

**ANKARA ÜNİVERSİTESİ
BİYOTEKNOLOJİ ENSTİTÜSÜ**

DOKTORA TEZİ

**AEROBİK BAKTERİLERİN KOROZYONA
ETKİSİNİN İNCELENMESİ**

Amirparviz FARSHCHI TABRIZI

Danışman Öğretim üyesi:

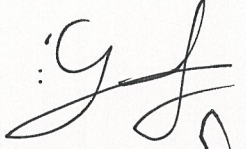
Yrd. Doç. Dr. Hasan NAZIR

Ankara

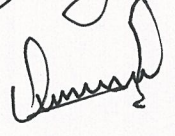
2012

Yrd. Doç. Dr. Hasan NAZIR danışmanlığında Amirparviz FARSHCHI TABRIZI tarafından hazırlanan bu çalışma 13 / 06 / 2012 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Temel Biyoteknoloji Anabilim Dalı'nda Doktora Tezi olarak kabul edilmiştir.

Başkan : Prof. Dr. Gömül Dönmeç

İmza : 


Üye : Prof. Dr. Ahmet Akalar

İmza : 

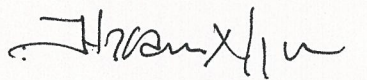
Üye : Prof. Dr. Mustafa Taştekin

İmza : 

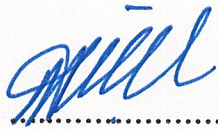
Üye : Prof. Dr. Adnan Kenar

İmza : 

Üye : Yrd. Doç. Dr. Hasan Nazir

İmza : 

Yukardaki sonucu onaylarım.



Enstitü Müdürü

(İmza)

Prof. Dr. Mustafa AKÇELİK

Aerobik Bakterilerinin Korozyona Etkisinin İncelenmesi

ÖZET

Bu doktora tezi çalışmasında, sahadan alınan pas örneklerinden izole edilmiş ve 16S rRNA gen sekans analizi ile tanımlanmış olan *Pseudomonas aeruginosa*, *Aeromonas eucrenophila*, *Clavibacter michiganensis* ve *Delftia acidovorans* bakterilerinin Fe, Co, Ni, Cu metallerine korozyon etkisi elektrokimyasal teknikler, taramalı elektron mikroskopu-X-ışınları saçılımı analizi (SEM-EDX) ve analitik olarak da bakteri-metal çözeltisinin pH ölçümü yapılarak incelenmiştir. Elektrokimyasal çalışmalarda açık devre potansiyeli (OCP), kuartz kristal mikrobals (QCM), doğrusal taramalı voltametri (LSV), Tafel ve elektrokimyasal empedans (EIS) teknikleri kullanılmıştır. SEM-EDX ile bakterinin metal yüzeyinde neden olduğu koroziif tabakanın morfolojisi ve yüzeyde oluşturduğu biyofilm tabakası görüntülenmiş ve metal yüzeyi analiz edilmiştir. Ayrıca bakterinin yaşamsal faaliyeti sırasında oluşan biyofilm tabakasındaki indirgen grupların varlığı infrared (FTIR) spektrofotometresi ile gösterilmiş ve korozyona olan etkisi vurgulanmıştır.

Bu tez çalışmasında, bakteriyal korozyona karşı dirençleri incelenen Fe, Co, Ni, Cu metallerinin çalışma elektrotları elektrokimyasal kaplama banyolarından kronoamperometri (CA) tekniği ile kaplanarak, homojen ve yaklaşık 100 nm kalınlığında hazırlanmıştır. Elektrokimyasal kaplamalar, QCM deneylerinde altın diğer deneylerde ise, pirinç ve ST-42 yumuşak çelik yüzeyine yapılmıştır. Bütün deneylerde her defasında taze hazırlanmış bakteri kültürünün ekspanansiyel fazından alınan bakteriler kullanılmıştır. Ekspanansiyel fazdan alınan bakterilerin salgıladığı biyokütle ile çalışma elektrotlarının yüzeyinin (R=5.1 mm) biyofilm tabakası olarak kaplanması yaklaşık olarak beş saat sürmektedir. Bu süre SEM ve OCP ile belirlenmiş ve bu tez çalışmasında optimum çalışma süresi olarak kabul edilmiştir.

Bu doktora tezi kapsamında yapılan deneyler ile, bakteri ile kirlenmiş/kirletilmiş ortamların metallerin korozyon hızını artırdığı, bakterilerin yaşamsal faaliyeti sonucunda ilk anda oluşan biyofilm tabakasıyla da ilişkilendirilerek, genel sonuç olarak gösterilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Mikrobiyal korozyon, QCM, Fe, Co, Ni, Cu, Pseudomonas aeruginosa, Aeromonas eucrenophila, Clavibacter michiganensis, Delftia acidovorans, Nutrient Broth.

The Investigation of the Aerobic Bacteria Corrosion Effect

ABSTRACT

In this doctoral thesis study, the corrosion effect of *Pseudomonas aeruginosa*, *Aeromonas eucrenophila*, *Clavibacter michiganensis* and *Delftia acidovorans* bacteria, which is defined by 16S rRNA gene sequence analysis and isolated from the rust specimens taken from the field on Fe, Co, Ni, and Cu metals surfaces. These metal surfaces have been investigated via electrochemical techniques, Scanning Electron Microscope-Energy Dispersive X-ray (SEM-EDX), and analytically the bacterium – metal solutions pH values have also been recorded. In electrochemical studies, Open Circuit Potential (OCP), Quartz Crystal Microbalance (QCM), Linear Scanning Voltammetry (LSV) and Electrochemical Impedance Spectroscopy (EIS) techniques are used. The morphology of the corroded layer and formed biofilm on metal surface due to microbial activity have been displayed and analyzed by SEM-EDX. Moreover, during the vital activity of bacteria, the existence of the reducing groups on the surface of the resultant biofilm layer is shown by Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR) and effect of these groups on surface corrosion has been emphasized.

In this thesis study, working electrodes of Fe, Co, Ni, Cu which examined bacterial resistance to corrosion, electrodeposited in electroplating baths by chronoamperometry (CA - Chronoamperometry) technique and were prepared homogeneously and approximately 100 nm thickness. In QCM experiment, the coatings have been carried out on gold (Au) surfaces, and in other experiments, brass (Cu-Zn alloy) and ST-42 mild steel surfaces have been used. All the experiments were carried out with fresh bacterial samples prepared from the exponential phase of bacterium culture. Coating the surface of working electrodes (R=5.1 mm), secreted by the biomass of the bacteria in exponential phase takes five hours, approximately. This period of time is determined by SEM and OCP, and has been accepted as an optimum operating time, in this thesis.

The scope of this doctoral thesis with the experiments, contaminated/polluted environments with bacteria increase the rate of corrosion of metals and as a result of the vital activity of bacteria in relation to the first steps of the biofilm formation, the result is shown in general.

Key Words: Microbial Corrosion, QCM, Fe, Co, Ni, Cu, Pseudomonas aeruginosa, Aeromonas eucrenophila, Clavibacter michiganensis, Delftia acidovorans, Nutrient Broth.

Baba'ma

Teşekkürler

Doktora programım boyunca, hem danışman hocam olarak her türlü desteği sağlayan, yapıcı önerileriyle bana yön veren ve hem gerçek bir arkadaş gibi benim gelecekteki bilim ve iş hayatımda en önemli role sahip olan, en içten duygularıyla Sayın Yrd. Doç. Dr Hasan NAZIR'a

Tez süresi boyunca çalışmalarımı takip eden ve değerli bilgilerini benden esirgemeyen hocalarım, Sayın Prof. Dr. Gönül DÖNMEZ'e ve Sayın Prof. Dr. Adnan KENAR'a

Bu tez çalışmasının olmazsa olmazı sevgili değerli dostum Nalan Oya SAN'a

Benim her türlü kahrımı çeken ve hayat yolunda hiçbir desteğini esirgemeyen dünyalar tatlısı sevgili eşim Sanaz ATAELI'ye

Hayatını bizlere adayan, en ufak başarımızla sevinip mutlu olan, fedakâr annem, Fatemeh RAHBAR'a

Eşi benzerleri bulunmayan, dünyalar kadar sevdiğim kardeşlerim, Vahideh ve Hamed'e

Türkiye'ye geldiğimden itibaren beni maddi manevi olarak koruyan, canım arkadaşım Dr. Asgher MORADI'ye

Bana özgüven veren eşimin ailesi, anne babası (Pourandokht, Manouchehr) ve kardeşim Afşin ATAELI'ye

Amirparviz FARSHCHI TABRIZI

ANKARA, HAZİRAN 2012

İÇİNDEKİLER

ÖZET	i
ABSTRACT	ii
TEŞEKKÜR	iii
ŞEKİLLER DİZİNİ	vi
ÇİZELGELER DİZİNİ	viii
SİMGELER DİZİNİ	ix
1.GİRİŞ	1
1.KAYNAK ÖZETLERİ	3
2.1. Korozyon Tanımı ve Önemi	3
2.1.1. Korozyon çeşitleri	3
2.1.2. Galvanik (metal çifti) korozyon.....	4
2.1.3. Mikrobiyal korozyon	4
2.2. Mikrobiyal korozyonun incelenmesi	11
2.2.1. Açık devre potansiyeli (OCP)	11
2.2.2. Lineer tarama voltametri (LSV)	12
2.2.3. Tafel ekstrapolasyonu yöntemi (TAFEL)	13
2.2.4. Elektrokimyasal empedans spektroskopisi (EIS)	14
2.2.5. QCM	17
2.2.6. pH etkisi	17
2.2.7. SEM ve EDX	18
2.3. Korozyon Kontrol yöntemleri	18
2.3.1. Geleneksel korozyon kontrol yöntemleri	18
2.3.2. Mikrobiyal korozyonun kontrol yöntemleri	19
2.3.2.1. Yararlı biyofilmler kullanarak	19
2.3.2.2. Mikrobiyal korozyondan korunmak için yeni yaklaşımlar	20
3. MATERYAL ve YÖNTEM	22
3.1. Materyal	22
3.1.1. Bakteri kültürü	22
3.1.2. Cihazlar	23
3.1.2.1. Elektrokimyasal hücre ve elektrotlar	23

3.2. Yöntem	24
3.2.1. Bakteriyel ortamın hazırlanması	24
3.2.2. Elektrotun hazırlanması	24
3.2.3. Optimum deney süresinin belirlenmesi	24
3.2.4. SEM ve EDS analizi	25
3.2.5. pH	25
3.2.6. FTIR Analizi	25
4. BULGULAR	26
4.1. Fe'nin Mikrobiyal Korozyonunun incelenmesi.....	26
4.1.1. Fe'nin bakterili ve bakterisiz ortamda kaydedilen OCP'nin grafikleri	26
4.1.1.1. Fe'in <i>P. aeruginosa</i> için kaydedilen OCP grafiği	26
4.1.1.2. Fe'in <i>A. eucrenophila</i> için kaydedilen OCP grafiği	26
4.1.1.3. Fe'in <i>C. michiganesis</i> için kaydedilen OCP grafiği	27
4.1.1.4. Fe'in <i>D. acidovorans</i> için kaydedilen OCP grafiği	27
4.1.1.5. Fe'in N. Broth için kaydedilen OCP grafiği	27
4.1.2. Fe'nin bakterili ve bakterisiz ortamda kaydedilen QCM'in grafikleri	28
4.1.2.1. Fe'in <i>P. aeruginosa</i> için kaydedilen QCM grafiği	28
4.1.2.2. Fe'in <i>A. eucrenophila</i> için kaydedilen QCM grafiği	28
4.1.2.3. Fe'in <i>C. michiganesis</i> için kaydedilen QCM grafiği.....	28
4.1.2.4. Fe'in <i>D. acidovorans</i> için kaydedilen QCM grafiği	29
4.1.2.5. Fe'in N. Broth için kaydedilen QCM grafiği	29
4.1.3. Fe'nin bakterili ve bakterisiz ortamda kaydedilen LSV'nin grafikleri	30
4.1.3.1. Fe'in <i>P. aeruginosa</i> için kaydedilen LSV grafiği	30
4.1.3.2. Fe'in <i>A. eucrenophila</i> için kaydedilen LSV grafiği	30
4.1.3.3. Fe'in <i>C. michiganesis</i> için kaydedilen LSV grafiği	30
4.1.3.4. Fe'in <i>D. acidovorans</i> için kaydedilen LSV grafiği	31
4.1.3.5. Fe'in N. Broth için kaydedilen LSV grafiği	31
4.1.4. Fe'nin bakterili ve bakterisiz ortamda kaydedilen Tafel'in grafikleri	32
4.1.4.1. Fe'in <i>P. aeruginosa</i> için kaydedilen Tafel grafiği	32
4.1.4.2. Fe'in <i>A. eucrenophila</i> için kaydedilen Tafel grafiği	32
4.1.4.3. Fe'in <i>C. michiganesis</i> için kaydedilen Tafel grafiği	32
4.1.4.4. Fe'in <i>D. acidovorans</i> için kaydedilen Tafel grafiği	33
4.1.4.5. Fe'in N. Broth için kaydedilen Tafel grafiği	33
4.1.5. Fe'nin bakterili ve bakterisiz ortamda kaydedilen EIS'nin grafikleri	34

4.1.5.1. Fe'in <i>P. aeruginosa</i> için kaydedilen EIS grafiği	34
4.1.5.2. Fe'in <i>A. eucrenophila</i> için kaydedilen EIS grafiği	34
4.1.5.3. Fe'in <i>C. michiganesis</i> için kaydedilen EIS grafiği	34
4.1.5.4. Fe'in <i>D. acidovorans</i> için kaydedilen EIS grafiği	35
4.1.5.5. Fe'in N. Broth için kaydedilen EIS grafiği	35
4.1.6. Fe'nin Bakterili ve bakterisiz Ortamda pH'nın ölçülmesi	37
4.1.6.1. Fe ve <i>P. aeruginosa</i> için çizilen pH grafiği	37
4.1.6.2. Fe ve <i>A. eucrenophila</i> için çizilen pH grafiği	37
4.1.6.3. Fe ve <i>C. michiganesis</i> için çizilen pH grafiği	37
4.1.6.4. Fe ve <i>D. acidovorans</i> için çizilen pH grafiği	38
4.1.6.5. Fe ve N. Broth için çizilen pH grafiği	38
4.1.7. Fe'nin bakterili ve bakterisiz ortamlar için kaydedilen SEM mikrografları ve EDX Analizleri	39
4.1.7.1. Fe ve <i>P. aeruginosa</i> için kaydedilen SEM mikrografı ve EDX analizi	39
4.1.7.2. Fe ve <i>A. eucrenophila</i> için kaydedilen SEM mikrografı ve EDX analizi ..	39
4.1.7.3. Fe ve <i>C. michiganesis</i> için kaydedilen SEM mikrografı ve EDX analizi ..	40
4.1.7.4. Fe ve <i>D. acidovorans</i> için kaydedilen SEM mikrografı ve EDX analizi ..	40
4.1.7.5. Fe ve N. Broth için kaydedilen SEM mikrografı ve EDX analizi	41
4.2. Co'm Mikrobiyal Korozyonunun incelenmesi.....	42
4.2.1. Co'm bakterili ve bakterisiz ortamda kaydedilen OCP'nin grafikleri	42
4.2.1.1. Co'm <i>P. aeruginosa</i> için kaydedilen OCP grafiği	42
4.2.1.2. Co'm <i>A. eucrenophila</i> için kaydedilen OCP grafiği	42
4.2.1.3. Co'm <i>C. michiganesis</i> için kaydedilen OCP grafiği	42
4.2.1.4. Co'm <i>D. acidovorans</i> için kaydedilen OCP grafiği	43
4.2.1.5. Co'm N. Broth için kaydedilen OCP grafiği	43
4.2.2. Co'm bakterili ve bakterisiz ortamda kaydedilen QCM'in grafikleri	44
4.2.2.1. Co'm <i>P. aeruginosa</i> için kaydedilen QCM grafiği	44
4.2.2.2. Co'm <i>A. eucrenophila</i> için kaydedilen QCM grafiği	44
4.2.2.3. Co'm <i>C. michiganesis</i> için kaydedilen QCM grafiği.....	44
4.2.2.4. Co'm <i>D. acidovorans</i> için kaydedilen QCM grafiği	45
4.2.2.5. Co'm N. Broth için kaydedilen QCM grafiği	45
4.2.3. Co'm bakterili ve bakterisiz ortamda kaydedilen LSV'nin grafikleri	46
4.2.3.1. Co'm <i>P. aeruginosa</i> için kaydedilen LSV grafiği	46
4.2.3.2. Co'm <i>A. eucrenophila</i> için kaydedilen LSV grafiği	46
4.2.3.3. Co'm <i>C. michiganesis</i> için kaydedilen LSV grafiği	46

4.2.3.4. Co'ın <i>D. acidovorans</i> için kaydedilen LSV grafiği	47
4.2.3.5. Co'ın N. Broth için kaydedilen LSV grafiği	47
4.2.4. Co'ın bakterili ve bakterisiz ortamda kaydedilen Tafel'in grafikleri	48
4.2.4.1. Co'ın <i>P. aeruginosa</i> için kaydedilen Tafel grafiği	48
4.2.4.2. Co'ın <i>A. eucrenophila</i> için kaydedilen Tafel grafiği	48
4.2.4.3. Co'ın <i>C. michiganesis</i> için kaydedilen Tafel grafiği	48
4.2.4.4. Co'ın <i>D. acidovorans</i> için kaydedilen Tafel grafiği	49
4.2.4.5. Co'ın N. Broth için kaydedilen Tafel grafiği	49
4.2.5. Co'ın bakterili ve bakterisiz ortamda kaydedilen EIS'nin grafikleri	50
4.2.5.1. Co'ın <i>P. aeruginosa</i> için kaydedilen EIS grafiği	50
4.2.5.2. Co'ın <i>A. eucrenophila</i> için kaydedilen EIS grafiği	50
4.2.5.3. Co'ın <i>C. michiganesis</i> için kaydedilen EIS grafiği	50
4.2.5.4. Co'ın <i>D. acidovorans</i> için kaydedilen EIS grafiği	51
4.2.5.5. Co'ın N. Broth için kaydedilen EIS grafiği	51
4.2.6. Co'ın Bakterili ve bakterisiz Ortamda pH'nın ölçülmesi	53
4.2.6.1. Co ve <i>P. aeruginosa</i> için çizilen pH grafiği	53
4.2.6.2. Co ve <i>A. eucrenophila</i> için çizilen pH grafiği	53
4.2.6.3. Co ve <i>C. michiganesis</i> için çizilen pH grafiği	53
4.2.6.4. Co ve <i>D. acidovorans</i> için çizilen pH grafiği	54
4.2.6.5. Co ve N. Broth için çizilen pH grafiği	54
4.2.7. Co'ın bakterili ve bakterisiz ortamlar için kaydedilen SEM mikrografları ve EDX Analizleri	55
4.2.7.1. Co ve <i>P. aeruginosa</i> için kaydedilen SEM mikrografi ve EDX analizi	55
4.2.7.2. Co ve <i>A. eucrenophila</i> için kaydedilen SEM mikrografi ve EDX analizi .	55
4.2.7.3. Co ve <i>C. michiganesis</i> için kaydedilen SEM mikrografi ve EDX analizi .	56
4.2.7.4. Co ve <i>D. acidovorans</i> için kaydedilen SEM mikrografi ve EDX analizi ..	56
4.2.7.5. Co ve N. Broth için kaydedilen SEM mikrografi ve EDX analizi	57
4.3. Ni'in Mikrobiyal Korozyonunun incelenmesi.....	58
4.3.1. Ni'in bakterili ve bakterisiz ortamda kaydedilen OCP'nin grafikleri	58
4.3.1.1. Ni'in <i>P. aeruginosa</i> için kaydedilen OCP grafiği	58
4.3.1.2. Ni'in <i>A. eucrenophila</i> için kaydedilen OCP grafiği	58
4.3.1.3. Ni'in <i>C. michiganesis</i> için kaydedilen OCP grafiği	58
4.3.1.4. Ni'in <i>D. acidovorans</i> için kaydedilen OCP grafiği	59
4.3.1.5. Ni'in N. Broth için kaydedilen OCP grafiği	59
4.3.2. Ni'in bakterili ve bakterisiz ortamda kaydedilen QCM'in grafikleri	60

4.3.2.1. Ni'in <i>P. aeruginosa</i> için kaydedilen QCM grafiği	60
4.3.2.2. Ni'in <i>A. eucrenophila</i> için kaydedilen QCM grafiği	60
4.3.2.3. Ni'in <i>C. michiganesis</i> için kaydedilen QCM grafiği.....	60
4.3.2.4. Ni'in <i>D. acidovorans</i> için kaydedilen QCM grafiği	61
4.3.2.5. Ni'in N. Broth için kaydedilen QCM grafiği	61
4.3.3. Ni'in bakterili ve bakterisiz ortamda kaydedilen LSV'nin grafikleri	62
4.3.3.1. Ni'in <i>P. aeruginosa</i> için kaydedilen LSV grafiği	62
4.3.3.2. Ni'in <i>A. eucrenophila</i> için kaydedilen LSV grafiği	62
4.3.3.3. Ni'in <i>C. michiganesis</i> için kaydedilen LSV grafiği	62
4.3.3.4. Ni'in <i>D. acidovorans</i> için kaydedilen LSV grafiği	63
4.3.3.5. Ni'in N. Broth için kaydedilen LSV grafiği	63
4.3.4. Ni'in bakterili ve bakterisiz ortamda kaydedilen Tafel'in grafikleri	64
4.3.4.1. Ni'in <i>P. aeruginosa</i> için kaydedilen Tafel grafiği	64
4.3.4.2. Ni'in <i>A. eucrenophila</i> için kaydedilen Tafel grafiği	64
4.3.4.3. Ni'in <i>C. michiganesis</i> için kaydedilen Tafel grafiği	64
4.3.4.4. Ni'in <i>D. acidovorans</i> için kaydedilen Tafel grafiği	65
4.3.4.5. Ni'in N. Broth için kaydedilen Tafel grafiği	65
4.3.5. Ni'in bakterili ve bakterisiz ortamda kaydedilen EIS'nin grafikleri	66
4.3.5.1. Ni'in <i>P. aeruginosa</i> için kaydedilen EIS grafiği	66
4.3.5.2. Ni'in <i>A. eucrenophila</i> için kaydedilen EIS grafiği	66
4.3.5.3. Ni'in <i>C. michiganesis</i> için kaydedilen EIS grafiği	66
4.3.5.4. Ni'in <i>D. acidovorans</i> için kaydedilen EIS grafiği	67
4.3.5.5. Ni'in N. Broth için kaydedilen EIS grafiği	67
4.3.6. Ni'in Bakterili ve bakterisiz Ortamda pH'nın ölçülmesi	69
4.3.6.1. Ni ve <i>P. aeruginosa</i> için çizilen pH grafiği	69
4.3.6.2. Ni ve <i>A. eucrenophila</i> için çizilen pH grafiği	69
4.3.6.3. Ni ve <i>C. michiganesis</i> için çizilen pH grafiği	69
4.3.6.4. Ni ve <i>D. acidovorans</i> için çizilen pH grafiği	70
4.3.6.5. Ni ve N. Broth için çizilen pH grafiği	70
4.3.7. Ni'in bakterili ve bakterisiz ortamlar için kaydedilen SEM mikrografları ve EDX Analizleri	71
4.3.7.1. Ni ve <i>P. aeruginosa</i> için kaydedilen SEM mikrografı ve EDX analizi	71
4.3.7.2. Ni ve <i>A. eucrenophila</i> için kaydedilen SEM mikrografı ve EDX analizi ..	71
4.3.7.3. Ni ve <i>C. michiganesis</i> için kaydedilen SEM mikrografı ve EDX analizi ..	72
4.3.7.4. Ni ve <i>D. acidovorans</i> için kaydedilen SEM mikrografı ve EDX analizi ..	72

4.3.7.5. Ni ve N. Broth için kaydedilen SEM mikrografı ve EDX analizi	73
4.4. Cu'nın Mikrobiyal Korozyonunun incelenmesi.....	74
4.4.1. Cu'nın bakterili ve bakterisiz ortamda kaydedilen OCP'nin grafikleri	74
4.4.1.1. Cu'nın <i>P. aeruginosa</i> için kaydedilen OCP grafiği	74
4.4.1.2. Cu'nın <i>A. eucrenophila</i> için kaydedilen OCP grafiği	74
4.4.1.3. Cu'nın <i>C. michiganesis</i> için kaydedilen OCP grafiği	74
4.4.1.4. Cu'nın <i>D. acidovorans</i> için kaydedilen OCP grafiği	75
4.4.1.5. Cu'nın N. Broth için kaydedilen OCP grafiği	75
4.4.2. Cu'nın bakterili ve bakterisiz ortamda kaydedilen QCM'in grafikleri	76
4.4.2.1. Cu'nın <i>P. aeruginosa</i> için kaydedilen QCM grafiği	76
4.4.2.2. Cu'nın <i>A. eucrenophila</i> için kaydedilen QCM grafiği	76
4.4.2.3. Cu'nın <i>C. michiganesis</i> için kaydedilen QCM grafiği.....	76
4.4.2.4. Cu'nın <i>D. acidovorans</i> için kaydedilen QCM grafiği	77
4.4.2.5. Cu'nın N. Broth için kaydedilen QCM grafiği	77
4.4.3. Cu'nın bakterili ve bakterisiz ortamda kaydedilen LSV'nin grafikleri	78
4.4.3.1. Cu'nın <i>P. aeruginosa</i> için kaydedilen LSV grafiği	78
4.4.3.2. Cu'nın <i>A. eucrenophila</i> için kaydedilen LSV grafiği	78
4.4.3.3. Cu'nın <i>C. michiganesis</i> için kaydedilen LSV grafiği	78
4.4.3.4. Cu'nın <i>D. acidovorans</i> için kaydedilen LSV grafiği	79
4.4.3.5. Cu'nın N. Broth için kaydedilen LSV grafiği	79
4.4.4. Cu'nın bakterili ve bakterisiz ortamda kaydedilen Tafel'in grafikleri	80
4.4.4.1. Cu'nın <i>P. aeruginosa</i> için kaydedilen Tafel grafiği	80
4.4.4.2. Cu'nın <i>A. eucrenophila</i> için kaydedilen Tafel grafiği	80
4.4.4.3. Cu'nın <i>C. michiganesis</i> için kaydedilen Tafel grafiği	80
4.4.4.4. Cu'nın <i>D. acidovorans</i> için kaydedilen Tafel grafiği	81
4.4.4.5. Cu'nın N. Broth için kaydedilen Tafel grafiği	81
4.4.5. Cu'nın bakterili ve bakterisiz ortamda kaydedilen EIS'nin grafikleri	82
4.4.5.1. Cu'nın <i>P. aeruginosa</i> için kaydedilen EIS grafiği	82
4.4.5.2. Cu'nın <i>A. eucrenophila</i> için kaydedilen EIS grafiği	82
4.4.5.3. Cu'nın <i>C. michiganesis</i> için kaydedilen EIS grafiği	82
4.4.5.4. Cu'nın <i>D. acidovorans</i> için kaydedilen EIS grafiği	83
4.4.5.5. Cu'nın N. Broth için kaydedilen EIS grafiği	83
4.4.6. Cu'nın Bakterili ve bakterisiz Ortamda pH'nın ölçülmesi	85
4.4.6.1. Cu ve <i>P. aeruginosa</i> için çizilen pH grafiği	85

4.4.6.2. Cu ve <i>A. eucrenophila</i> için çizilen pH grafiği	85
4.4.6.3. Cu ve <i>C. michiganesis</i> için çizilen pH grafiği	85
4.4.6.4. Cu ve <i>D. acidovorans</i> için çizilen pH grafiği	86
4.4.6.5. Cu ve N. Broth için çizilen pH grafiği	86
4.4.7. Cu'n bakterili ve bakterisiz ortamlar için kaydedilen SEM mikrografları ve EDX Analizleri	87
4.4.7.1. Cu ve <i>P. aeruginosa</i> için kaydedilen SEM mikrografi ve EDX analizi	87
4.4.7.2. Cu ve <i>A. eucrenophila</i> için kaydedilen SEM mikrografi ve EDX analizi ..	87
4.4.7.3. Cu ve <i>C. michiganesis</i> için kaydedilen SEM mikrografi ve EDX analizi ..	88
4.4.7.4. Cu ve <i>D. acidovorans</i> için kaydedilen SEM mikrografi ve EDX analizi ..	88
4.4.7.5. Cu ve N. Broth için kaydedilen SEM mikrografi ve EDX analizi	89
5. SONUÇ veTARTIŞMA	90
KAYNAKLAR	102

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1. Mikroorganizmaların biyofilm oluşumunda haberleşme ve sinyalizasyon sistemi.....	5
Şekil 2.2. Şematik olarak mikroorganizmaların yüzeyde biyofilm oluşumu	6
Şekil 2.3. Biyofilm oluşumu sonucu meydana gelen farklı havalanma bölgeleri	7
Şekil 2.4. Bir metalin iki farklı ortamda açık devre potansiyel eğrileri	12
Şekil 2.5. Zamana karşı voltaj değişimi	13
Şekil 2.6. Tafel eğrisi	14
Şekil 2.7. Doğrusal bir sistemde sinüzoidal akım (a) ve yanıtı (b)	15
Şekil 2.8. İmpedans vektörü ile Nyquist eğrisi	15
Şekil 2.9. Tek bir ara yüzey düşünüldüğünde basit bir eşdeğer devre	16
Şekil 2.10. Sauerbrey denklemi	17
Şekil 2.11. pH'ın korozyon hızına etkisi	18
Şekil 2.12.a,b,c. Mikrobiyal korozyonda mümkün olan inhibisyon mekanizmaları	20
Şekil 3.1. QCM sisteminde Fe'nin elektrot yüzeyine kaplanmasını frekans farkı olarak göstermektedir	24
Şekil 3.2. Ni'nin <i>A. eucrenophila</i> ortamında OCP'nin beş saatlik süre sonunda dengeye geldiğini göstermektedir	24
Şekil 4.1.1.1. Fe'nin <i>P. aeruginosa</i> 'da OCP grafiği	26
Şekil 4.1.1.2. Fe'nin <i>A. eucrenophila</i> 'da OCP grafiği	26
Şekil 4.1.1.3. Fe'nin <i>C. michiganensis</i> 'de OCP grafiği	27
Şekil 4.1.1.4. Fe'nin <i>D. acidovarans</i> 'da OCP grafiği	27
Şekil 4.1.1.5. Fe'nin N. Broth'da OCP grafiği	27
Şekil 4.1.2.1. Fe'nin <i>P. aeruginosa</i> 'da QCM grafiği	28
Şekil 4.1.2.2. Fe'nin <i>A. eucrenophila</i> 'da QCM grafiği	28
Şekil 4.1.2.3. Fe'nin <i>C. michiganensis</i> 'de QCM grafiği	28
Şekil 4.1.2.4. Fe'nin <i>D. acidovarans</i> 'da QCM grafiği	29
Şekil 4.1.2.5. Fe'nin N. Broth'da QCM grafiği	29
Şekil 4.1.3.1. Fe'nin <i>P. aeruginosa</i> 'da LSV grafiği	30

Şekil 4.1.3.2. Fe'nin <i>A. eucrenophila</i> 'da LSV grafiği	30
Şekil 4.1.3.3. Fe'nin <i>C. michiganensis</i> 'de LSV grafiği	30
Şekil 4.1.3.4. Fe'nin <i>D. acidovarans</i> 'da LSV grafiği	31
Şekil 4.1.3.5. Fe'nin N. Broth'da LSV grafiği	31
Şekil 4.1.4.1. Fe'nin <i>P. aeruginosa</i> 'da Tafel grafiği	32
Şekil 4.1.4.2. Fe'nin <i>A. eucrenophila</i> 'da Tafel grafiği	32
Şekil 4.1.4.3. Fe'nin <i>C. michiganensis</i> 'de Tafel grafiği	32
Şekil 4.1.4.4. Fe'nin <i>D. acidovarans</i> 'da Tafel grafiği	33
Şekil 4.1.4.5. Fe'nin N. Broth'da Tafel grafiği	33
Şekil 4.1.5.1. Fe'nin <i>P. aeruginosa</i> 'da EIS grafiği	34
Şekil 4.1.5.2. Fe'nin <i>A. eucrenophila</i> 'da EIS grafiği	34
Şekil 4.1.5.3. Fe'nin <i>C. michiganensis</i> 'de EIS grafiği	34
Şekil 4.1.5.4. Fe'nin <i>D. acidovarans</i> 'da EIS grafiği	35
Şekil 4.1.5.5. Fe'nin N. Broth'da EIS grafiği	35
Şekil 4.1.6.1. Fe'nin <i>P. aeruginosa</i> 'da pH grafiği	37
Şekil 4.1.6.2. Fe'nin <i>A. eucrenophila</i> 'da pH grafiği	37
Şekil 4.1.6.3. Fe'nin <i>C. michiganensis</i> 'de pH grafiği	37
Şekil 4.1.6.4. Fe'nin <i>D. acidovarans</i> 'da pH grafiği	38
Şekil 4.1.6.5. Fe'nin N. Broth'da pH grafiği	38
Şekil 4.1.7.1. Fe'nin <i>P. aeruginosa</i> 'da SEM görüntüsü ve EDX grafiği	39
Şekil 4.1.7.2. Fe'nin <i>A. eucrenophila</i> 'da SEM görüntüsü ve EDX grafiği	39
Şekil 4.1.7.3. Fe'nin <i>C. michiganensis</i> 'de SEM görüntüsü ve EDX grafiği.....	40
Şekil 4.1.7.4. Fe'nin <i>D. acidovarans</i> 'da SEM görüntüsü ve EDX grafiği	40
Şekil 4.1.7.5. Fe'nin N. Broth'da SEM görüntüsü ve EDX grafiği	41
Şekil 4.2.1.1. Co'nun <i>P. aeruginosa</i> 'da OCP grafiği	42
Şekil 4.2.1.2. Co'nun <i>A. eucrenophila</i> 'da OCP grafiği	42

Şekil 4.2.1.3. Co'nun <i>C. michiganensis</i> 'de OCP grafiği	42
Şekil 4.2.1.4. Co'nun <i>D. acidovarans</i> 'da OCP grafiği	43
Şekil 4.2.1.5. Co'nun N. Broth'da OCP grafiği	43
Şekil 4.2.2.1. Co'nun <i>P. aeruginosa</i> 'da QCM grafiği	44
Şekil 4.2.2.2. Co'nun <i>A. eucrenophila</i> 'da QCM grafiği	44
Şekil 4.2.2.3. Co'nun <i>C. michiganensis</i> 'de QCM grafiği	44
Şekil 4.2.2.4. Co'nun <i>D. acidovarans</i> 'da QCM grafiği	45
Şekil 4.2.2.5. Co'nun N. Broth'da QCM grafiği	45
Şekil 4.2.3.1. Co'nun <i>P. aeruginosa</i> 'da LSV grafiği	46
Şekil 4.2.3.2. Co'nun <i>A. eucrenophila</i> 'da LSV grafiği	46
Şekil 4.2.3.3. Co'nun <i>C. michiganensis</i> 'de LSV grafiği	46
Şekil 4.2.3.4. Co'nun <i>D. acidovarans</i> 'da LSV grafiği	47
Şekil 4.2.3.5. Co'nun N. Broth'da LSV grafiği	47
Şekil 4.2.4.1. Co'nun <i>P. aeruginosa</i> 'da Tafel grafiği	48
Şekil 4.2.4.2. Co'nun <i>A. eucrenophila</i> 'da Tafel grafiği	48
Şekil 4.2.4.3. Co'nun <i>C. michiganensis</i> 'de Tafel grafiği	48
Şekil 4.2.4.4. Co'nun <i>D. acidovarans</i> 'da Tafel grafiği	49
Şekil 4.2.4.5. Co'nun N. Broth'da Tafel grafiği	49
Şekil 4.2.5.1. Co'nun <i>P. aeruginosa</i> 'da EIS grafiği	50
Şekil 4.2.5.2. Co'nun <i>A. eucrenophila</i> 'da EIS grafiği	50
Şekil 4.2.5.3. Co'nun <i>C. michiganensis</i> 'de EIS grafiği	50
Şekil 4.2.5.4. Co'nun <i>D. acidovarans</i> 'da EIS grafiği	51
Şekil 4.2.5.5. Co'nun N. Broth'da EIS grafiği	51
Şekil 4.2.6.1. Co'nun <i>P. aeruginosa</i> 'da pH grafiği	53
Şekil 4.2.6.2. Co'nun <i>A. eucrenophila</i> 'da pH grafiği	53
Şekil 4.2.6.3. Co'nun <i>C. michiganensis</i> 'de pH grafiği	53

Şekil 4.2.6.4. Co'nun <i>D. acidovarans</i> 'da pH grafiği	54
Şekil 4.2.6.5. Co'nun N. Broth'da pH grafiği	54
Şekil 4.2.7.1. Co'nun <i>P. aeruginosa</i> 'da SEM görüntüsü ve EDX grafiği	55
Şekil 4.2.7.2. Co'nun <i>A. eucrenophila</i> 'da SEM görüntüsü ve EDX grafiği	55
Şekil 4.2.7.3 Co'nun <i>C. michiganensis</i> 'de SEM görüntüsü ve EDX grafiği	56
Şekil 4.2.7.4. Co'nun <i>D. acidovarans</i> 'da SEM görüntüsü ve EDX grafiği	56
Şekil 4.2.7.5. Co'nun N. Broth'da SEM görüntüsü ve EDX grafiği	57
Şekil 4.3.1.1. Ni'nin <i>P. aeruginosa</i> 'da OCP grafiği	58
Şekil 4.3.1.2. Ni'nin <i>A. eucrenophila</i> 'da OCP grafiği	58
Şekil 4.3.1.3. Ni'nin <i>C. michiganensis</i> 'de OCP grafiği	58
Şekil 4.3.1.4. Ni'nin <i>D. acidovarans</i> 'da OCP grafiği	59
Şekil 4.3.1.5. Ni'nin N. Broth'da OCP grafiği	59
Şekil 4.3.2.1. Ni'nin <i>P. aeruginosa</i> 'da QCM grafiği	60
Şekil 4.3.2.2. Ni'nin <i>A. eucrenophila</i> 'da QCM grafiği	60
Şekil 4.3.2.3. Ni'nin <i>C. michiganensis</i> 'de QCM grafiği	60
Şekil 4.3.2.4. Ni'nin <i>D. acidovarans</i> 'da QCM grafiği	61
Şekil 4.3.2.5. Ni'nin N. Broth'da QCM grafiği	61
Şekil 4.3.3.1. Ni'nin <i>P. aeruginosa</i> 'da LSV grafiği	62
Şekil 4.3.3.2. Ni'nin <i>A. eucrenophila</i> 'da LSV grafiği	62
Şekil 4.3.3.3. Ni'nin <i>C. michiganensis</i> 'de LSV grafiği	62
Şekil 4.3.3.4. Ni'nin <i>D. acidovarans</i> 'da LSV grafiği	63
Şekil 4.3.3.5. Ni'nin N. Broth'da LSV grafiği	63
Şekil 4.3.4.1. Ni'nin <i>P. aeruginosa</i> 'da Tafel grafiği	64
Şekil 4.3.4.2. Ni'nin <i>A. eucrenophila</i> 'da Tafel grafiği	64
Şekil 4.3.4.3. Ni'nin <i>C. michiganensis</i> 'de Tafel grafiği	64
Şekil 4.3.4.4. Ni'nin <i>D. acidovarans</i> 'da Tafel grafiği	65

Şekil 4.3.4.5. Ni'nin N. Broth'da Tafel grafiği	65
Şekil 4.3.5.1. Ni'nin <i>P. aeruginosa</i> 'da EIS grafiği	66
Şekil 4.3.5.2. Ni'nin <i>A. eucrenophila</i> 'da EIS grafiği	66
Şekil 4.3.5.3. Ni'nin <i>C. michiganensis</i> 'de EIS grafiği	66
Şekil 4.3.5.4. Ni'nin <i>D. acidovarans</i> 'da EIS grafiği	67
Şekil 4.3.5.5. Ni'nin N. Broth'da EIS grafiği	67
Şekil 4.3.6.1. Ni'nin <i>P. aeruginosa</i> 'da pH grafiği	69
Şekil 4.3.6.2. Ni'nin <i>A. eucrenophila</i> 'da pH grafiği	69
Şekil 4.3.6.3. Ni'nin <i>C. michiganensis</i> 'de pH grafiği	69
Şekil 4.3.6.4. Ni'nin <i>D. acidovarans</i> 'da pH grafiği	70
Şekil 4.3.6.5. Ni'nin N. Broth'da pH grafiği	70
Şekil 4.3.7.1. Ni'nin <i>P. aeruginosa</i> 'da SEM görüntüsü ve EDX grafiği	71
Şekil 4.3.7.2. Ni'nin <i>A. eucrenophila</i> 'da SEM görüntüsü ve EDX grafiği	71
Şekil 4.3.7.3. Ni'nin <i>C. michiganensis</i> 'de SEM görüntüsü ve EDX grafiği	72
Şekil 4.3.7.4. Ni'nin <i>D. acidovarans</i> 'da SEM görüntüsü ve EDX grafiği	72
Şekil 4.3.7.5. Ni'nin N. Broth'da SEM görüntüsü ve EDX grafiği	73
Şekil 4.4.1.1. Cu'nun <i>P. aeruginosa</i> 'da OCP grafiği	74
Şekil 4.4.1.2. Cu'nun <i>A. eucrenophila</i> 'da OCP grafiği	74
Şekil 4.4.1.3. Cu'nun <i>C. michiganensis</i> 'de OCP grafiği	74
Şekil 4.4.1.4. Cu'nun <i>D. acidovarans</i> 'da OCP grafiği	75
Şekil 4.4.1.5. Cu'nun N. Broth'da OCP grafiği	75
Şekil 4.4.2.1. Cu'nun <i>P. aeruginosa</i> 'da QCM grafiği	76
Şekil 4.4.2.2. Cu'nun <i>A. eucrenophila</i> 'da QCM grafiği	76
Şekil 4.4.2.3. Cu'nun <i>C. michiganensis</i> 'de QCM grafiği	76
Şekil 4.4.2.4. Cu'nun <i>D. acidovarans</i> 'da QCM grafiği	77
Şekil 4.4.2.5. Cu'nun N. Broth'da QCM grafiği	77

Şekil 4.4.3.1. Cu'nun <i>P. aeruginosa</i> 'da LSV grafiği	78
Şekil 4.4.3.2. Cu'nun <i>A. eucrenophila</i> 'da LSV grafiği	78
Şekil 4.4.3.3. Cu'nun <i>C. michiganensis</i> 'de LSV grafiği	78
Şekil 4.4.3.4. Cu'nun <i>D. acidovarans</i> 'da LSV grafiği	79
Şekil 4.4.3.5. Cu'nun N. Broth'da LSV grafiği	79
Şekil 4.4.4.1. Cu'nun <i>P. aeruginosa</i> 'da Tafel grafiği	80
Şekil 4.4.4.2. Cu'nun <i>A. eucrenophila</i> 'da Tafel grafiği	80
Şekil 4.4.4.3. Cu'nun <i>C. michiganensis</i> 'de Tafel grafiği	80
Şekil 4.4.4.4. Cu'nun <i>D. acidovarans</i> 'da Tafel grafiği	81
Şekil 4.4.4.5. Cu'nun N. Broth'da Tafel grafiği	81
Şekil 4.4.5.1. Cu'nun <i>P. aeruginosa</i> 'da EIS grafiği	82
Şekil 4.4.5.2. Cu'nun <i>A. eucrenophila</i> 'da EIS grafiği	82
Şekil 4.4.5.3. Cu'nun <i>C. michiganensis</i> 'de EIS grafiği	82
Şekil 4.4.5.4. Cu'nun <i>D. acidovarans</i> 'da EIS grafiği	83
Şekil 4.4.5.5. Cu'nun N. Broth'da EIS grafiği	83
Şekil 4.4.6.1. Cu'nun <i>P. aeruginosa</i> 'da pH grafiği	85
Şekil 4.4.6.2. Cu'nun <i>A. eucrenophila</i> 'da pH grafiği	85
Şekil 4.4.6.3. Cu'nun <i>C. michiganensis</i> 'de pH grafiği	85
Şekil 4.4.6.4. Cu'nun <i>D. acidovarans</i> 'da pH grafiği	86
Şekil 4.4.6.5. Cu'nun N. Broth'da pH grafiği	86
Şekil 4.4.7.1. Cu'nun <i>P. aeruginosa</i> 'da SEM görüntüsü ve EDX grafiği	87
Şekil 4.4.7.2. Cu'nun <i>A. eucrenophila</i> 'da SEM görüntüsü ve EDX grafiği	87
Şekil 4.4.7.3 Cu'nun <i>C. michiganensis</i> 'de SEM görüntüsü ve EDX grafiği.....	88
Şekil 4.4.7.4. Cu'nun <i>D. acidovarans</i> 'da SEM görüntüsü ve EDX grafiği	88
Şekil 4.4.7.5. Cu'nun N. Broth'da SEM görüntüsü ve EDX grafiği	89

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 4.1. Fe'nin, bakterili ve bakterisiz ortamdaki OCP değerler	27
Çizelge 4.2. Fe'nin, bakterili ve bakterisiz ortamdaki kütle kaybı değerleri	29
Çizelge 4.3. Fe'nin kırılma potansiyeli (E_b) ve kütle kaybı ($\Delta_{Kütle}$) değerleri	31
Çizelge 4.4 Fe'nin, bakterili ve bakterisiz ortamları için Tafel grafiklerinden belirlenen korozyon parametreleri	33
Çizelge 4.5. Fe'nin, bakterili ve bakterisiz ortamlar için EIS spektrograflarından hesaplanan elektronik devre eşdeğeri parametreleri	36
Çizelge 4.6. Fe'nin bakterili ve bakterisiz ortamda 5 saat sonunda ölçülen pH değerleri	38
Çizelge 4.7. Fe'nin bakterili ve bakterisiz ortamda EDS analizi ile bulunan oksijen ve klor oranları	41
Çizelge 4.8. Co'nun, bakterili ve bakterisiz ortamdaki OCP değerler	43
Çizelge 4.9. Co'nun, bakterili ve bakterisiz ortamdaki kütle kaybı değerleri	45
Çizelge 4.10. Co'nun kırılma potansiyeli (E_b) ve kütle kaybı ($\Delta_{Kütle}$) değerleri	47
Çizelge 4.11 Co'nun, bakterili ve bakterisiz ortamları için Tafel grafiklerinden belirlenen korozyon parametreleri	49
Çizelge 4.12. Co'nun, bakterili ve bakterisiz ortamlar için EIS spektrograflarından hesaplanan elektronik devre eşdeğeri parametreleri	52
Çizelge 4.13. Co'nun bakterili ve bakterisiz ortamda 5 saat sonunda ölçülen pH değerleri	54
Çizelge 4.14. Co'nun bakterili ve bakterisiz ortamda EDS analizi ile bulunan oksijen ve klor oranları	57
Çizelge 4.15. Ni'nin, bakterili ve bakterisiz ortamdaki OCP değerler	59
Çizelge 4.16. Ni'nin, bakterili ve bakterisiz ortamdaki kütle kaybı değerleri	61
Çizelge 4.17. Ni'nin kırılma potansiyeli (E_b) ve kütle kaybı ($\Delta_{Kütle}$) değerleri	63
Çizelge 4.18 Ni'nin, bakterili ve bakterisiz ortamları için Tafel grafiklerinden belirlenen korozyon parametreleri	65
Çizelge 4.19. Ni'nin, bakterili ve bakterisiz ortamlar için EIS spektrograflarından hesaplanan elektronik devre eşdeğeri parametreleri	68
Çizelge 4.20. Ni'nin bakterili ve bakterisiz ortamda 5 saat sonunda ölçülen pH değerleri	70

Çizelge 4.21. Ni'nin bakterili ve bakterisiz ortamda EDS analizi ile bulunan oksijen ve klor oranları	73
Çizelge 4.22. Cu'nun, bakterili ve bakterisiz ortamdaki OCP değerler	75
Çizelge 4.23. Cu'nun, bakterili ve bakterisiz ortamdaki kütle kaybı değerleri	77
Çizelge 4.24. Cu'nun kırılma potansiyeli (E_b) ve kütle kaybı ($\Delta_{K\u00fctle}$) değerleri	79
Çizelge 4.25 Cu'nun, bakterili ve bakterisiz ortamları için Tafel grafiklerinden belirlenen korozyon parametreleri	81
Çizelge 4.26. Cu'nun, bakterili ve bakterisiz ortamlar için EIS spektrogramlarından hesaplanan elektronik devre eşdeğeri parametreleri	84
Çizelge 4.27. Cu'nun bakterili ve bakterisiz ortamda 5 saat sonunda ölçülen pH değerleri	86
Çizelge 4.28. Cu'nun bakterili ve bakterisiz ortamda EDS analizi ile bulunan oksijen ve klor oranları	89

SİMGELER DİZİNİ

AFM	Atomic Force Microscopy
AC	Alternating Current
β_a	Anodik tafel saçılma değeri
β_c	Katodik tafel saçılma değeri
C_{dl}	Double layer Capacitance
CA	Kronoamperometri
CPE	Sabit Faz Elementi
E_{corr}	Korozyon Potansiyeli
EDS	Energy-dispersive X-ray spectroscopy
EDX	Energy-dispersive X-ray spectroscopy
EIS	Electrochemical Impedance Spectroscopy
ESP	Hücre dışı polimer
ECP	Extra Cellular Polymer
EPS	Exopolimeric Substances
EQCM	Electrochemical Quartz Crystal Microbalance
FTIR	Fourier Transform Spectroscopy
i_{corr}	Korozyon Akımı
I_{corr}/A	Korozyon Akım Yoğunluğu
LSV	Linear Scanning Voltametry
MIC	Microbially Influenced Corrosion
ng	Nano gram
OCP	Open Circuit Potential
pH	Power of Hydrogen
QCM	Quartz Crystal Microbalance
R_b	Biofilm Resistance
R_{ct}	Charge Transfer Resistance
R_f	Film Resistance
R_p	Polarization Resistance
R_s	Solution Resistance
SEM	Scanning Electron Microscopy
XPS	X-ray Photoelectron Spectroscopy
XRD	X-ray Diffraction

1. GİRİŞ

Korozyon en genel anlamda, bir metalin (ya da alaşımların) bulunduğu ortamın etkisiyle tahrip olması şeklinde tanımlanabilir. Metal yüzeyinde cereyan eden bu tahribat gerçekte zamana da bağlı olan bir elektrokimyasal reaksiyonlar bütünüdür.

Metaller buldukları ortamda enerji almalarına da gerek olmadan reaksiyona girerek önce iyonik hale sonra da ortamdaki başka elementlerle birleşerek düşük enerjili yapıları olan bileşiklere haline dönmeye çalışırlar. Ortamın, metalin bozunmasına olan etkisi ise, kimyasal veya elektrokimyasal reaksiyonlardan biri ya da her ikisi ile birlikte olmaktadır. Metal veya alaşımların oksitlenmesi kimyasal korozyon (kuru korozyon) olarak adlandırılırken, sulu ortamlar içinde bozunmaları ise, elektrokimyasal korozyon (ıslak korozyon) olarak adlandırılmaktadır. Mikrobiyal korozyon (MIC – Microbial Influenced Corrosion) veya biyokorozyon etkisi ise, metal veya metal substratlarının korozyon sürecinin ve kinetiğinin çeşitli mikroorganizmalardan etkilenmesi anlamına gelir. Mikrobiyal korozyonda mikroorganizmalar korozyonun doğrudan meydana gelmesinde etkili değildir, ancak metabolik faaliyetleri sırasında artan oksijen miktarı ve hücre dışına salgılanan protein ve enzimlerin metal yüzeyi ile etkileşimi sonucunda korozyon hızlanmaktadır. Mikroorganizmalar buldukları ortamda yaşamsal faaliyetlerini sürdürebilmek için koloniler oluştururlar ve bu yaşamsal faaliyetleri sırasında açığa çıkardıkları metabolitler ile de buldukları metal yüzeye tutunurlar. Onların bu davranışı yüzeyde biyofilm olarak tanımlanan ve bileşimi mikroorganizma-protein-enzim-diğer (metal oksit ve hidroksitler) olan bir biyokütle oluşturmaktadır. Böyle ortamlarda yüzeyde adsorblanan biyokimyasal maddeler (biyofilm substratları) metal yüzeyinin morfolojisini değiştirerek farklı direnç noktaları oluşturdukları gibi, sahip oldukları fonksiyonlu gruplar ile de yüzeyde farklı oksijen derişimlerinin bulunduğu bölgelerin oluşmasına ve bu bölgeler arasında bir potansiyel farkın meydana gelmesine de neden olmaktadır. Dolayısıyla korozyon hızı etkilenmektedir. Bundan başka, biyofilm tabakasının kalınlığı arttıkça metal yüzeyinde oksijen içermeyen bölgeler ve bu bölgelerde sülfat indirgeyici bakteri olarak da bilinen anaerobik bakteriler oluşmaya başlamaktadır. Ortaya çıkan bu yeni durum da korozyon hızını ayrıca artırmaktadır. Mikrobiyal korozyonda, metal yüzeyinde bir aerobik bakterinin varlığıyla başlayan süreç çok kısa zamanda metalin korozyonunu hızlandıran kaotik bir ortam oluşturmaktadır.

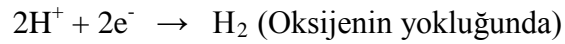
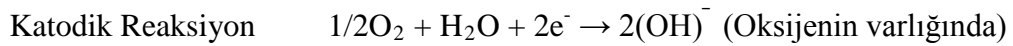
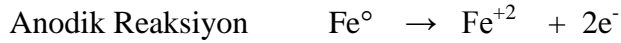
Bilindiği gibi metaller sahip oldukları elektriksel, termal ve mekanik özellikleri nedeniyle endüstride geniş bir alanda kullanılmaktadır. Diğer taraftan korozyon metal varlığının bir gereğidir ve ülkeler bu nedenle çok büyük zararlara uğramaktadır. Türkiye Korozyon Derneği Türkiye için bu zararı, gayri safi milli hâsılasının % 4,5'i olduğunu ifade etmektedir. Metal-bakteri etkileşiminin insan sağlığıyla da doğrudan ilgili olduğu alanları vardır. Örneğin Türkiyede içme suyu nakli halen galvanize, bakır ya da nikel-çinko alaşım kaplı borularla yapılmaktadır. Bundan başka metal ve metal substratlarının aynı zamanda çevresel bir atık olduğu da düşünöldüğünde bakteri-metal etkileşiminin her yönüyle incelenmesi önemlidir.

Bu çalışmanın amacı, sahadan alınan pas örneklerinden izole edilmiş aerobik bakterilerin; *Pseudomonas aeruginosa*, *Aeromonas eucrenophila*, *Clavibacter michiganensis* ve *Delftia acidovorans*, sanayide hem saf hem de alaşımları halinde çok kullanılan demir (Fe), kobalt (Co), nikel (Ni) ve bakır (Cu) metallerinin korozyonuna etkisini, ilk anda oluşan biyofilm tabakasıyla da ilişkilendirilerek, incelenmesidir.

2. KAYNAK ÖZETLERİ

2.1. Korozyon Tanımı ve Önemi

Korozyon, metalik malzemelerin katı, sıvı ve gazlar tarafından aşındırılması ile özelliklerini kaybetmesi ve kullanılmaz hale gelmesidir. Korozyonun en fazla görüldüğü malzeme, elektrokimyasal reaksiyonlara eğilimlerinin yüksek olmasından dolayı metallerdir. Metallerin korozyona uğrama miktarları oksijene olan ilgileriyle alakalıdır. Korozyon sırasında anodik (elektron veren, yükseltgenme) reaksiyonlar ile katodik (elektron alan, indirgenme) reaksiyonları birlikte oluşur. En çok kullanılan metal olması nedeniyle demir metalinin bulunduğu ortamdaki anodik ve katodik reaksiyonları örnek olarak:



Bu süreçte anot–katot arası gerilim farkı elektron hareketine neden olur (elektrokimyasal pilde olduğu gibi) ve bu elektron alış verişiyle de metalin aşınması ile sonuçlanır.

Korozyon; yapıların çürümesine, yüksek maliyetli cihazların bozulmasına, endüstriyel kirliliğe, besin kirliliğine ve hayli yüksek maliyetlere sebep olmaktadır. Bütün bunlar korozyonu önlemek için yapılan bütün çalışmaların ne kadar önemli olduğunu göstermektedir. Korozyon olayı endüstrinin her dalında kendini gösterir. Atmosfer şartlarına açık bulunan tanklar, depolar, direkler, taşıtlar, yeraltı boru hatları, iskele ayakları ve birçok makine parçası korozyon olayı ile karşı karşıyadır. Tüm bu yapılar korozyon sebebiyle beklenenden daha kısa sürede işletme dışı kalmakta ve büyük ekonomik kayıplar meydana gelmektedir.

2.1.1. Korozyon çeşitleri

Korozyon çeşitlerini şöyle sıralayabiliriz:

- 1- Genel Korozyon
- 2- Aralık Korozyon
- 3- Çukurcuk Korozyon

- 4- Taneler Arası Korozyon
- 5- Seçimli Korozyon
- 6- Erozyon Korozyon
- 7- Gerilim Çatlama Korozyon
- 8- Galvanik ya da Metal Çifti Korozyon
- 9- Mikrobiyal Korozyon

Mikrobiyal korozyon, galvanik korozyon temelli bir korozyon türüdür. Mikrobiyal korozyonun galvanik korozyondan olan farkı yalnız metal yüzeyindeki biyofilm oluşumudur. Bu nedenle mikrobiyal korozyondan önce galvanik korozyon tanımlanmıştır.

2.1.2. Galvanik (metal çifti) korozyon

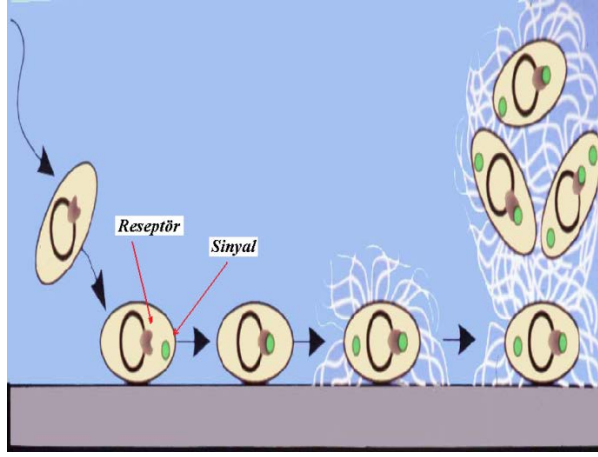
İki farklı metalin bağlantısından ileri gelen bir korozyon çeşididir. Bu tip korozyona sık rastlanır. Metallerden daha soy olanı katot, daha aktif olanı ise anot gibi davranır ve bir korozyon hücresi meydana gelir. Böyle bir hücrede anot olan metal korozyona uğrar.

Galvanik korozyonun mümkün olabilmesi için her iki metalle ilişkide olan bir elektrolitin de bulunması gerekir. Metal yüzeyi kuru ise, galvanik korozyon söz konusu olmaz. Ancak dışarıda atmosfere açık olarak duran metal yüzeylerinde genellikle galvanik korozyona yetecek miktarda bir rutubet bulunur ve bu rutubet bir elektrolit gibi davranarak galvanik korozyona neden olur.

2.1.3. Mikrobiyal korozyon

Metal malzemelerin biyolojik bozunması olarak ifade edilen mikrobiyal korozyon; biyokimyasal korozyon, biyokorozyon, bakteriyel korozyon, mikroorganizmalar tarafından oluşturulan korozyon (MIC - Microbially Influenced Corrosion) gibi adlarla da tanımlanmaktadır. Bütün bu terimler gerçekte mikroorganizmaların, bakterilerin ve mantarların korozyon olayındaki belirleyici ve etkin rolünü ifade etmektedir. Aynı zamanda bazı çalışmalarda biyofilm-metal etkileşmesi dikkate alınarak, biyokorozyon, bir metalin elektrokimyasal çözünmesi olarak da ifade edilmiştir. Metal yüzeyindeki elektrokimyasal reaksiyonlar biyolojik yapının metal ile etkileşmesiyle ve birçok aşamada gerçekleşmektedir. Biyokorozyonun ilk aşaması metal yüzeyinde gelişen biyofilm ile başlamaktadır (Feugeas, 1997).

Biyofilm oluşumunun mekanizmasının araştırmasında bazı bilim adamları, mikroorganizmaların bir araya gelip ve bu yapıyı oluşturmak için, mikroorganizmalar arasında haberleşme veya sinyalizasyon sisteminin mevcut olduğu düşünülmektedirler (Courtesy of W. Costerton, Center for Biofilm Engineering). Mikroorganizmalar polisakkaridler gibi hücre dışı polimerler üreterek koloniler şeklinde yüzeyde biyofilm tabakasını oluşturup yüzeyi kapatmaktadırlar (Siedlerek ve Ark., 1994; Nercessian ve Ark., 2010)(Şekil 2.1.).



Şekil 2.1. Mikroorganizmaların biyofilm oluşumunda haberleşme ve sinyalizasyon sistemi.

Uzun süreli mikrobiyal korozyon incelemeleri biyofilmlerin deniz suyuna bir kaç saat maruz kaldıktan sonra materyal yüzeylerinin bakteriler, alglar ve metabolik ürünler ile kaplanarak oluştuğunu gösterdi. Biyofilmler diğer bakteriler ve mikroorganizmaların çoğalması ve tutunması için altkatmanı sağlamaktadırlar. Mikrobiyal korozyon, biyofilmin bu tabakasında meydana gelmektedir ve biyofilm metal yüzeyinde oluşmasaydı, mikrobiyal korozyonda meydana gelmezdi.

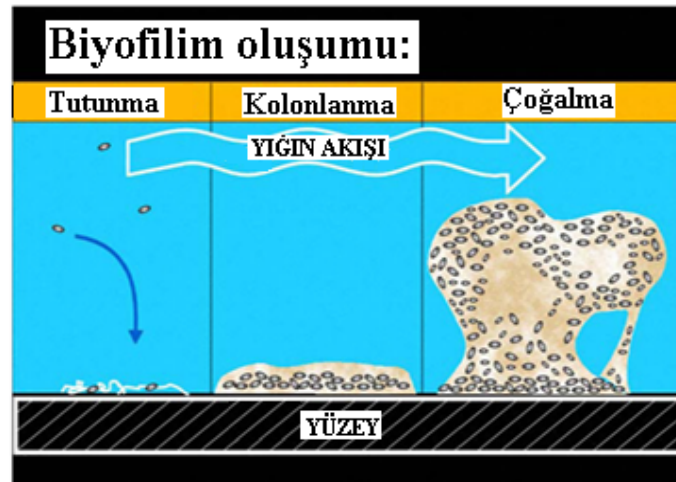
Biyofilmlerin tutunması, gelişmesi ve kopması metallaerin elektrokimyasal durumunu ve korozyon proselerini etkilemektedir. Bir başka anlamda, metallaerin elektrokimyasal durumları ve korozyon proseleride biyofilmlerin özelliklerinden ve çoğalmasından etkileniyor (Matsunaga, 2000). Biyofilmler sadece yüzeyler üzerinde oksijen derişim hücresi ve iyon derişim hücresi ile korozyona sebep olmamaktadır belki diğer bakterilerin ve mikroorganizmaların tutulmasına olanak sağlanmaktadır (Little, 1997). Biyofilmlerin inkübasyon süresinde farklı görüşler var.

Farklı çalışmaların sonucu, mikrobiyal korozyon, hetrojen biyofilm oluşumu sonucu ve dolayısıyla farklı oksijen derişim gradiyentlerinin ve metal yüzeyinde hücrelerin farklı

havalanması sonucunda meydana gelir (Saravia, 1991). Bu biyobozulma etkileri olgunlaşmış aerobik hetrotrof floranın anaerobik sülfat indirgeyen bakteriler ile eşlik etmesi ile oldukça şiddetlenmiştir. Hepsi değil ama bir çok besinsel değerlerden yoksul olan sulu ortamlarda bakteriler çoğunluk olarak sualtı yüzeylerde mevcut olan ve tutunan biyofilmlerde büyümektedirler. Başlangıçta bu bakteriler belki hücre dışı polimerler ile rasgele yüzeye tutunmaktadır ve bu polimerlerin devam eden üretimi diğer bakterilerinde tutunmasına neden olmaktadır. Bu prosenin devam etmesi büyük sayıda bakterinin içine gömülü olduğu ince bir biyofilm tabakasının meydana gelmesine olanak sağlamaktadır. Biyofilmdeki bölgesel çevre değişiklikleri kendilerini hem aerobik ve hem anaerobik çevrelerde bulan mikroorganizmaların büyümesini desteklenmektedir (Tanji, 1999).

Bazı bilim adamları, mikrobiyal korozyon genel olarak mikroorganizmalar tarafından başlatılan veya ağırlaştırılan korozyon türü olarak tanımlanmışlar ki bu anodik veya katodik reaksiyonların mikroorganizmalar tarafından tetiklenme veya ortamı elektrolite dönüştürerek yapılmaktadır.

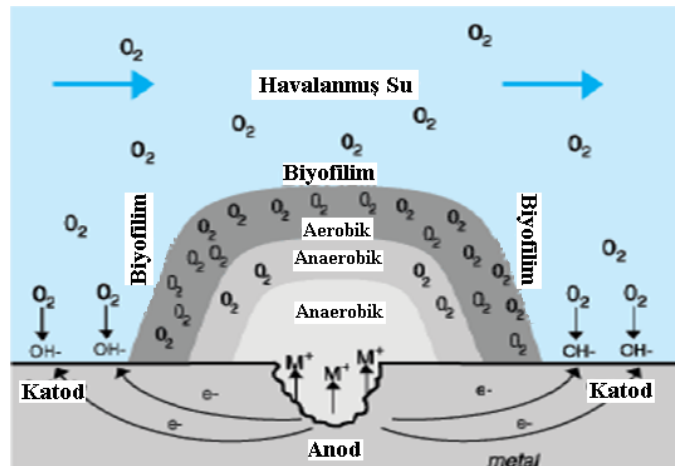
Metal yüzeyine mikroorganizmalarca oluşturulmuş ve çeşitli bölgelere dağılmış biyofilm koloni formasyonları yüzeyde farklı havalanma bölge şekilleri oluştururlar. Dolayısıyla bu bölgelerle koloniler arası farklı oksijenlenir ve bu nedenle kolonilerin merkezinde metale temas sonucu ansızın oksijenlenir (Şekil 2.2.). Metalin iki bölgesindeki bu farklı oksijenlenme potansiyel elektrik farklılığına ve sonuçta bir korozyon akımına neden olur (Feugeas, 1997). Bu oluşum farklı havalanma ile meydana gelen korozyon şeklidir.



Şekil 2.2. Şematik olarak mikroorganizmaların yüzeyde biyofilm oluşumu.

Kümeler, kanallar ve araboşluklar gibi yapısal heterojeniteler yüzeyde sıvı akışını ve kütle aktarımını etkilemektedir. Aynı zamanda fonksiyonel heterojenite bölgesel olarak besinlerin tüketimini veya yan ürünlerin üretimini (organik asitler, reaktif oksijen türleri, enzimler ve diğerleri) etkiler ve böylece içsel kimyasal gradiyantların meydana gelmesine olanak sağlar. Aslında, biyofilmdeki farklı hücreler veya hücre gruplarının, besinlerin kısıtlanması durumunda veya antibiyotik, biosit veya ağır metaller varlığı gibi ters durumlarda çeşitli yanıtlar verebilirler ve böylece mikrobiyal korozyon etkisi çalışmaları için karmaşık bir senaryo hazırlamaktadır.

Korozyonu iki türe ayırmak gerekir: bölgesel ve düz yüzeye yayılmış korozyon. Bölgesel korozyon tercihen havalanma altında veya derişim elemanları koşullarında gelişir. Bu tür korozyon bir mikrokoloninin anaerobik metabolizm zonlarının oksijen tüketimi sonucunda gelişmesinden sonuçlanabilir, oysa ki bitişikteki yüzey mikrokolonin olmadığından dolayı aerobik kalmaktadır. Sonuç olarak bir mikrokoloninin altında bir anod oluşup ve bitişikteki alan katod haline gelmektedir. Metalin çözünmesi meydana gelebilir. Ayrıca, demir hidroksit III çökeltileri bazen bölgesel korozyonuna neden olmaktadır gerçi çökeltiler korozyon sebebi değil sadece bir göstergesi olabilirler. Düz yüzeye yayılmış korozyon çoğu zaman sülfat indirgeyen bakterilerin altında veya asit üreten anaerobik mikroorganizmalar varlığında meydana gelir. Oluşum aslında basit değildir. Bakterilerin doğası, organik molekül salgılama özellikleri ve solunum tipleri burada belirleyici olmaktadır. Aerobik solunum yapan bakteriler varlığında şematik olarak biyofilm oluşumunu ve meydana gelen mikrobiyal korozyonun faktörlerini göstermektedir. Şekil 2.3. metaller yüzeyinde farklı havalanma bölgelerden dolayı farklı anodik ve katodik reaksiyonlar meydana geldiğini göstermektedir



Şekil 2.3. Biyofilm oluşumu sonucu meydana gelen farklı havalanma bölgeleri.

Metaller suya maruz kaldıklarında korozyona uğrarlar. Aerobik ortamda korozyon elektron akımı başlayınca meydana gelir (Örn, oksijenin katotda sürekli olma koşuluyla ve çözünmeyen korozyon ürünleri örn, demir oksit anoddan uzaklaşmaktadır. Bir kaç çevresel faktör, korozyon ürünlerinin bileşimi, metal türü, yığın suyun kimyasal bileşimi, elektrokimyasal ve mikroorganizmalar gibi etkenler korozyon hızını etkiler (Borenstein, 1994).

Mikrobiyal korozyonla ilgili mikroorganizmalar sülfat indirgeyen bakteriler demir oksitleyen bakteriler (Borenstein, 1994), demir indirgeyen bakteriler (Beech ve Gaylarde 1999), asit üreten bakteriler (Geeseey 1990) ve funguslardır. Mikrobiyal korozyonun mekanizmaları çok karmaşıktır, çünkü bu süreç bir çok faktörden etkilenir: oksijen solumundan meydana gelen difransiyel havalanma hücreleri, organik ve inorganik asitler gibi korozif ajanların üretimi, metal kireçlenme, hücre dışı polimerlerin metallere bağlanma etkisi, korozyon inhibitörlerinin inaktivasyonu (Little, 1992), katodik ve anodik depolarizasyon (Geeseey, 1990).

Hücre dışı matris içinde bakteriler, enzimler ve ek olarak özel materyallar (örn. çözünmeyen metabolik ve korozyon ürünleri) bulunabilir. Çözünmeyen gazlar (oksijen), katı maddeler ve suyun alıkoyma özelliğinden dolayı matris organizmaları kuraklığa, yüksek tuz ve ağır metaller, biyositler ve deterjanlara karşı korumak için özel difüzyon bariyeri önermektedir.

Havalanma difransiyeli, seçmeli filitre etmek, kaplama altı korozyon, katodik depolarizasyon, bakteriyel ESP'ye metal iyonlarının bağlanması (Bremer, 1991) gibi çeşitli özel mekanizmalar bakır alaşımlarının mikrobiyal korozyonu için önerilmiştir. Pope ve arkadaşları, bunların dışında, biyolojik ürünler, karbon dioksit, hidrojen sülfür, amonyak, organik ve inorganik asitler, depolarizor gibi etki eden metabolizm, sülfür bileşikleri gibi etkenler bölgesel olarak bakır yüzeyine saldırılmaktadır.

Ortam ve ortamın fizikokimyasal özellikleri de biyokorozyon aktivitelerinde belirleyici bir rol oynamaktadır. Farklı ortamların sahip oldukları sıcaklık, pH değerleri, oksijen miktarları, içerdikleri organik ürünler, nem miktarları gibi fizikokimyasal kompozisyonlar mikrobiyolojik formasyonların gelişimlerinde etkili olmaktadır.

Mikrobiyal korozyon meydana geldiğinde mikroorganizmalar bakır ve çözelti arayüzeyindeki pH'nın düşmesine sebep olup ve koruyucu tabakanın çözülmesini

artırmaktadır (Davidson, 1996). pH'nın bakır ve çözelti arayüzeyindeki düşüş bakırın mikrobiyal korozyonunda en önemli faktördür (Webster, 2000).

Bakırın mikrobiyal korozyonunun açıklanması için önerilen modeller, hücre dışı polimerlerin (EPS), mikrobiyal aktiviteler sırasında, EPS'nın katyon seçici doğası nedeniyle öncelikli katodik bölgeler oluşturmak için (Siedlerek, 1994; Wagner , 1997) ve bakırın EPS'ye bağlanmadan meydana gelen bakır iyon derişim hücrelerinin gelişimini dikkate alarak zayıf asidik çevre oluşumu için üretilmiş olduğunu ileri sürmüşler.

Oksijen tüketimi CO₂ üreterek sudaki oksijen oranını azaltmakta, dolayısıyla pH oranı buna paralel olarak da azalmaktadır. Metaller steril olmayan ortamlarda biyolojik bir film tabakasıyla kaplanırlar ve zamanla biyokorozyona maruz kalırlar. Metallerin çoğu biyokorozyondan etkilenmeye uygundur.

Heterojenus biyofilm ve ilgili bakteriler karmaşık biyolojik sistemler oluşturmaktadır ki metal ve biyofilm arayüzeyinde, pH'da gradientlerin oluşması, çözünmemiş oksijen, klorür ve sülfat gibi bir kaç kimyasal değişime neden olmaktadır; (Brenstein, 1994). Aerobik koşullarda, bakteriyel kolonilerin metabolizmasından kaynaklanan genellikle mikrobiyal kolonlanma, havalanma difransiyelinin oluşumuna ve hücrelerin derişiminin değişmesine neden olmaktadır. Bu hücre derişimlerinin oluşumunun pasif filmlerin bütünlüğü üzerinde olan zararları ve çukurcuk ve oyucuk korozyonun başlanmasına kolaylık sağlaması geniş bir şekilde bilinmektedir (Little, 1992).

Yasunori Tanji ve arkadaşarı, 1999 da, karbon çeliğin korozyonun artıran biyofilmin besinsel değerlerden yoksul olan ortamda yapısal analizini yaptılar. Bir günlük inkübasyon süresi sonunda biyofilmin oluşumu ve filmin kalınlığının inkübasyon süresine bağlı olarak arttığı gözlemlendi. Kuponlardaki kütle kaybıda inkübasyon süresine bağlı olarak arttı ve 140 günlük süre sonunda 70,4 (mg/cm²)'ye ulaştı. İnkübasyon süresinde meydana gelen kütle kaybı steril ortamda olan kütle kaybının beş katıdır. Karbon çeliğin mikrobiyal korozyonuna neden olan biyofilmin yapısal analizi ve karakterizasyonu yapıldı. Biyofilme yakın bölgede suda çözülmüş olan oksijen derişiminde hızlı azalma tespit edildi. Bir çok analizin sonunda metal yüzeyinde çözülmüş oksijenin heterojenik dağılımı gözlemlendi. Aerobik ve sülfat indirgeyen bakterilerin derişiminin inkübasyon süresinde azalması ve bu sürede biyofilmin kalınlığının atması ya ölü mikroorganizmaların yoğunluğunun artmasında veya mikroorganizmaların ürettiği hücre dışı polimerlerin yığılmasından

yanaklandığını gösterdi. Bu gözlemler çözülmüş oksijenin düzenli olmayan dağılım eğrisinin ve hücrelerin derişiminin karbon çeliğın mikrobiyal korozyonunda kritik bir rol oynadığını gösterdi.

John ve Bardal korozyon potansiyelinin değişmesinin, paslanmaz çeliğın katodu üzerindeki biyofilmin özelliklerinin değişmesinden kaynaklandığını gösterdi.

Wang ve Ark., 2004'de, biyofilm oluşumunun deniz suyuna maruz kalan metallerin korozyon potansiyeline olan etkisini incelediler. Doğal deniz suyunda pasif metallerin korozyon potansiyeli üstel kuralına göre negatif değerlere doğru gitmektedir ama steril deniz suyunda daha az değişiklik var. Bakteri sayısı pasif metaller üzerinde üstel kuralına göre değiştı ve aynı şekilde korozyon potansiyeli de değiştı. Bakterilerin başlangıçta yüzeye tutunduğu zaman korozyon potansiyeli hızla çoğaldı ve artış çok göz alıcıydı. Bu sonuç biyofilmin çoğalması ve gelişmesinin korozyon potansiyelinin artmasına neden olduğunu gösterdi.

Nercessian ve Ark., 2010'da, *Pseudomonas fluorescens* (ATCC 17552)'in bakır korozyonu ile ilgili biyofilmin katalaz aktivitesi ve iş hacmini incelediler. Bakırın mikrobiyal korozyon etkisinin iç mekanizmasında anlamak için eşzamanlı biyokimyasal ve elektrokimyasal deneyler düzenlediler. Sonuçlar *P. fluorescens*'ın bakır yüzeyinde biyofilm oluşturmak için geniş bir lag fazına sahip olmaları gerekir. Kataliz aktivitenin sabit faz biyofilmlerinde yüksek olduğu bulunmuştur. Elektrokimyasal sonuçlar biyofilmin ayrıntılı bir şekilde arayüzeydeki oksijeni tükettiğini ve yük transfer reaksiyonlarını kısıtladığını göstermektedir. Ama eşzamanlı olarak, bazı bölgesel asitlenmeleri belirtmektedir ki bu da metalin koruyucu tabakasına etki edip ve metalin çözünmesini kolaylaştırmaktadır.

Beech ve Ark., metal katyonlarının EPS'ye bağlanması metal yüzeyinin iyonlaşmasını teşvik ettiğini önerdiler. Böylece metal iyon konsantrasyon hücrelerin ve metal yüzey doğasının elektrokimyasal özelliğinin değişmesine neden olmaktadır (Busalmen, 1998, Beech, 1999).

Almeida ve França, 1999 da, ısı sistemlerindeki korozyon ile ilgili olan termofilik ve mezofilik bakterilerinin biyofilmlerini incelediler. Biyofilmin gelişmesi ısı sisteminin çıkış noktasında bulunan AISI 1020 karbon çelik üzerinde otuzuncu ve altmışıncı günlerde değerlendirildi. Su sıcaklığı 41°C ve 60°C derece arasında değiştı. Bir çok olasılıklı sayı

teknikleri mezofilik ve termofilik bakterilerin, aerobik, anaerobik ve sülfat indirgeyen türlerinin planktonik ve yapışık (sesil) fazlarda sayması için kullanıldı. Sonuçlar aerobik termofilik bakterilerin her iki fazda da ağır bastığını, ki eşitti $9,5 \pm 0,8 \times 10^6$ hücre/ml planktonik fazda gösterdi. Biyofilmde maksimum aerobik hücre derişimi altmışıncı günde $7,8 \pm 0,6 \times 10^8$ hücre/cm² kaydedildi.

Yuan ve Pehkonen, 2007’de, AFM ve XPS’i kullanarak aerobik bakteri olan *Pseudomonas NCIMB 2010*’ın 304 paslanmaz çeliğın mikrobiyal korozyonunu incelediler. Bu çalışmada *Pseudomonas*’ın bölünmesinin ikili olduğunun ve biyofilm oluşumunun ve paslanmaz çeliğın yüzeyinde hidrojenitenin ve kalınlığın arttığının hareketli (dinamik) ve sürekli bir prose olduğı bulundu. Metal kuponların yüzeylerinin bozulması bakterinin bölgesel saldırısının altında kalarak ve maruz kalma süresi ile giderek şiddetlenmiştir. Çukurcukların deriliğı liner olarak zamanla arttı.

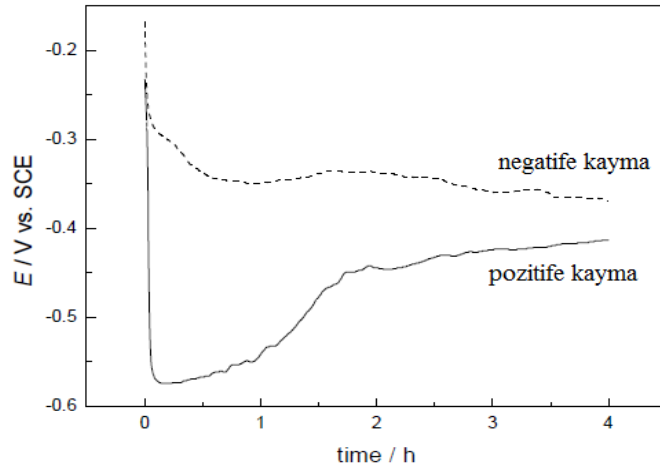
2.2. Mikrobiyal korozyonun incelenmesi

Yapılan literatür araştırması, mikrobiyal korozyonun incelenmesi için farklı yöntemlerin kullanıldığını göstermektedir. Bu yöntemler başlıca iki ana grup altında toplanabilir: *i-* Elektrokimyasal yöntemler *ii-* Görüntüleme yöntemleri ve diğer ölçüm yöntemleri. Elektrokimyasal yöntemlerin (tekniklerin) biyokorozyon incelemesinde kullanılması geçmiş yıllara dayanmaktadır. Mikrobiyal korozyonda en önemli ve en sık kullanılan temel elektrokimyasal teknikler (bu tez kapsamında da kullanılmış olan): OCP, LSV, Tafel ve EIS tır. Daha yakın tarihli çalışmalarda ise, yüzeyde korozyon nedeniyle kaybolan kütle tayinini yapmaya imkan verdiği için QCM de kullanılmaktadır. Görüntüleme yöntemleri içinde en çok kullanılan SEM dir. SEM ve EDX’in birlikte kullanımı ise, incelenen yüzey bölgesinin hem morfolojisinin hem de element analizinin eş zamanlı yapılmasına imkan vermektedir. Diğer ölçümler için en çok tercih edilen ise FTIR spektroskopisidir. Ayrıca bakteriyel ortamın pH değışimi ile ilgili ölçümler de yapılmaktadır. Bu tez kapsamında, bu yöntemlerin hepsi kullanılmıştır. Aşağıda bu yöntemlerle ilgili genel açıklamalar verilmiştir.

2.2.1. Açık devre potansiyeli (OCP)

OCP tekniğıyle bir elektrokimyasal hücrede, hiç akım geçmediğı kabul edilerek, zamana karşı potansiyel değışimi ölçülür. Yalın halde metal yüzeyinde $M \rightleftharpoons M^{n+} + ne^{-}$ dengesinin geçerli olduğı kabul edilir. Bu denge tepkimesinde her iki yöne doğru olan

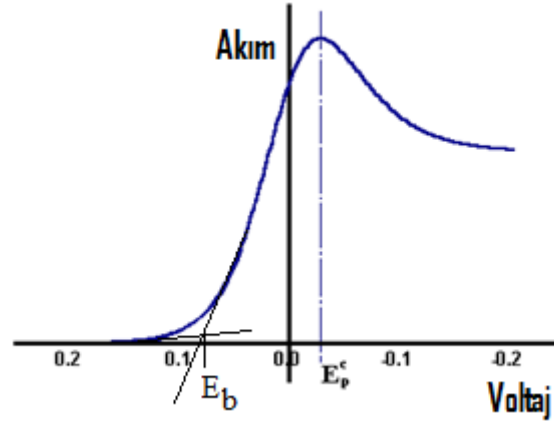
elektron değişimi ve hızı birbirine eşittir. Dolayısıyla metal yüzeyinde herhangi bir yükseltgenme/indirgenme reaksiyonu gerçekleşmez. Korozif ortamda ise, metalin korozyona uğraması sonucunda bir potansiyel farkı oluşur. OCP tekniğiyle oluşan bu potansiyel değeri ölçülür. Ölçülen bu değer açık devre potansiyeli veya korozyon potansiyeli olarak adlandırılır. Açık devre potansiyel değerlerinin referans elektrodun potansiyeline göre daha pozitif olması, metalin korozyona karşı dirençli, daha negatif olması ise, korozyona karşı dirençsiz olduğunu gösterir. Açık devre potansiyeli, mikrobiyal korozyonda önemli bir teknik olarak ele alınır (Şekil 2.4.).



Şekil 2.4. İki farklı eğilimde zaman karşı ölçülmüş açık devre potansiyel eğrileri.

2.2.2. Lineer taramalı voltametri (LSV)

Lineer taramalı voltametri tekniğinde potansiyel zamanın bir fonksiyonu olarak kullanılır ve elektrokimyasal hücreden geçen akım ölçülür. Sonuç, potansiyel-akım grafiği olarak verilir (Şekil 2.5).

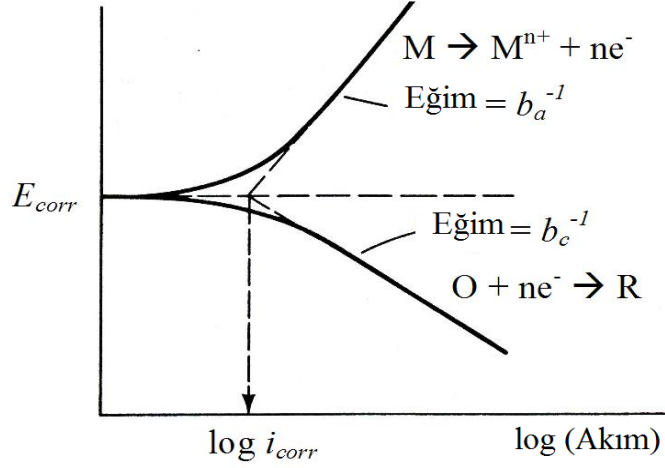


Şekil 2.5. Linear Taramalı potansiyel eğrilerinde akım yanıtlarının zamana karşı çizilmesini göstermektedir.

LSV tekniği günümüzde metal yüzeyinin kırılma potansiyelinin (E_b) ve korozyon hızının bulunması çalışmalarında kullanılmaktadır. LSV tekniği, bir metal ya da alaşımı için aynı şartlarda ölçüm yapılması halinde aynı E_b ve yükseltgenme potansiyeli (E_p) değerlerini verir. Dolayısıyla korozyon çalışmalarında karşılaştırılabilir sonuçlar vermektedir. Bu tez kapsamında yapılan çalışmalarda, LSV tekniği E_b potansiyelinin ve bu potansiyel değerinin aşılması halinde meal yüzeyinde meydana gelen kütle kaybının ölçülmesinde kullanılmıştır.

2.2.3. Tafel ekstrapolasyonu yöntemi (TAFEL)

Tafel, LSV ile kaydedilmiş potansiyel-akım grafiğinin, potansiyel-log (akım) grafiği olarak yeniden çizilmesidir. Korozyon potansiyelinden başlayarak anodik ve katodik yönde çizilen bu eğriler Tafel eğrileri olarak adlandırılır. Tafel eğrilerinden korozif ortam ile sürekli temasta olan metalin korozyon akımını (ve korozyon yoğunluğunu), korozyon potansiyelini, polarizasyon direncini ve saçılma parametrelerini hesaplamak mümkündür. Bu hesaplamalar için ekstrapolasyon yöntemi kullanılır. Tafel eğrilerinin doğrusal kısımları geriye doğru ekstrapole edildiğinde korozyon potansiyelinde (E_{corr}) kesişirler, aynı zamanda kesişme noktasındaki akım korozyon akımı (i_{corr}) olarak adlandırılır (Şekil 2.8.). Korozyon akımının elektrodun yüzey alanına bölünmesiyle de metalin korozyon hızı olan akım yoğunluğu (I_{corr}) elde edilir.

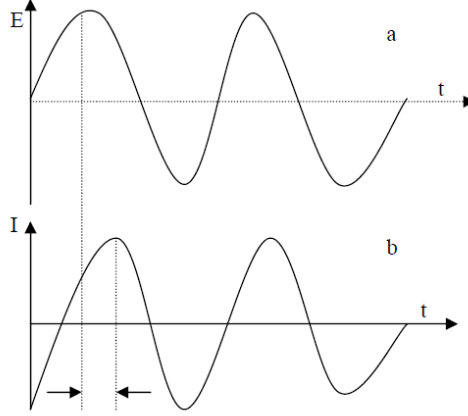


Şekil 2.6. Tafel eğrisi ve ekstrapolasyonu.

2.2.4. Elektrokimyasal empedans spektroskopisi (EIS)

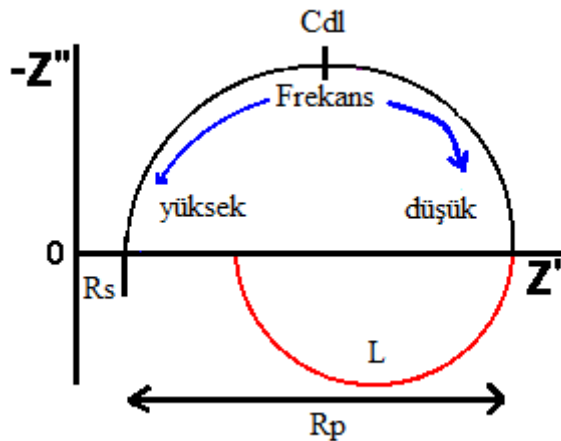
Elektrokimyasal empedans spektroskopisi (EIS) veya alternatif akım (AC) empedans metotları son zamanlarda kullanımı artmıştır. Başlangıçta elektrot çözelti arayüzey (çift tabaka kapasitans) tayini ve AC polaritesinin belirlenmesinde kullanılmış olan bu teknik günümüzde, elektrot süreçlerinin ve karmaşık arayüzeylerin karakterizasyonunda kullanılmaktadır. Gerçekte EIS tekniğinde, sisteme uygulanan küçük amplitüdü (1-10 mV) periyodik AC sinyallerine elektrokimyasal hücrenin yanıtı incelenir. Ölçümler farklı AC frekanslarında (100 -0,001 kHz) yapılmaktadır. Böylece EIS, elektrokimyasal sistemin yanıtının analizini yaparak ara yüzey reaksiyonları ve kinetiği hakkında bilgi vermektedir. Bununla birlikte, EIS'nin ara yüzey reaksiyonlarıyla ilgili olarak tüm sorulara cevap verememesini de vurgulamak gerekmektedir. EIS tümleyen bir tekniktir ve arayüzey proselerini açıklamak için ayrıca diğer tekniklerinde kullanılması gereklidir (Lasia, 1999).

EIS tekniğinde, elektrokimyasal hücreye belirlenmiş frekans değerinde bir sinüzoidal potansiyel uygulandığında (Şekil 2.11a) hücrenin verdiği yanıt uyarı frekansını da içeren bir AC sinyalidir (Şekil 2.11b). Bu akım sinyali sinüzoidal fonksiyonların toplamıdır. Ayrıca küçük bir aralığa ait olduğu için, hücrenin yanıtı olan sinyal yalancı (sanal) doğrusal olarak kabul edilebilir. Bir doğrusal ya da sanal doğrusal sistemde, sinüzoidal potansiyele karşı hücrenin akım yanıtı, aynı frekansta bir sinüzoidal dalga olacaktır, ancak bir faz kayması (θ) meydana gelecektir (Bard ve Faulkner, 1980).



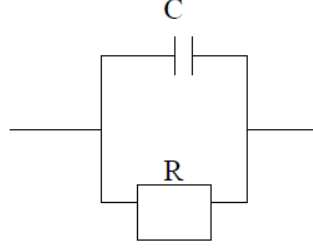
Şekil 2.7. Doğrusal bir sistemde elektrokimyasal hücreye uygulanan sinüzoidal akım (a) ve hücrenin yanıtı (b), faz kayması oklar ile işaretlenmiştir.

Gerçekte EIS tekniğinde yapılan işlem (sabit veya değişken potansiyelde ve belirli frekans değerlerinde sinüzoidal akım uygulanması) Ohm yasasına uygundur. Bilindiği gibi Ohm yasası potansiyel-akım orantısı için bir direnç (R) (AC'da empedans, Z) tanımlar ve direnç (ya da empedans), potansiyel ile akım oranına eşittir [$R(Z)=E/I$]. Dolayısıyla alternatif akımda gerçek ve sanal durumlar için iki ayrı empedans (Z), sırasıyla $Z_{gerçek}(Z_{real}$ veya Z') ve $Z_{sanal}(Z_{imaginary}, Z'')$, değeri hesaplanabilir. Hesaplanan bu Z değerleri, X ekseninde Z' ve Y ekseninde Z'' olacak şekilde grafiğe geçirildiğinde, elde edilen grafik Nyquist eğri(leri)si (Şekil 2.13) olarak adlandırılır. Bundan başka frekans bilgisi (Hz) toplam empedans ($|Z|$)'a ya da frekans bilgisi (Hz) faz kayması (θ)'na karşı grafiğe geçirildiğinde ise Bode grafiği olarak adlandırılan grafikler elde edilir (Bard ve Faulkner, 1980).



Şekil 2.8. İmpedans vektörü ile Nyquist eğrisi; yüksek frekans değerleri solda, düşük frekans değerleri sağda yer almaktadır.

EIS ölçümüyle çizilen Nyquist eğrisinden bir elektrik eşdeğer devresi tanımlamak mümkündür. Şekil 2.13’de verilen yarım daire Şekil 2.14’de verilen elektrik devresiyle tanımlanır. Nyquist çizimi sonunda çizilen grafikte gözlenen her bir yarım daire için Şekil 2.14’de ki eşdeğer devreye aynı devre elemanlarıyla seri ya da paralel bir eklenti yapılır.



Şekil 2.9. Tek bir ara yüzey düşünüldüğünde basit bir eşdeğer devre.

EIS ölçümleri eşdeğer elektriksel devre modeli ile değerlendirilir. Dolayısıyla EIS ölçümlerinden hedeflenen bir elektriksel devre modelinin tanımlanması ve bu modeldeki devre elemanlarının değerlerinin hesaplanmasıdır. Temel devre elemanları birbirlerine göre paralel olan kapasitör (C), direnç (R) ve indüktans (L) dir. İndüktans (L), metal çözelti arayüzündeki yük birikmesini ifade etmektedir.

Kapasitör, iki iletken yüzey iletken olmayan bir ortamla (dielektrik) birbirinden ayrıldığında meydana gelir. Elektrokimyasal hücrelerde metal-çözelti arayüzeyi, gerçekte böyle bir kapasitör gibi davranmaktadır. Şüphesiz kapasitansın değeri, tabakaların boyutuna, tabakalar arası mesafeye ve dielektrik özelliklere bağlı olarak değişir (Kelly, Scully, Shoesmith, Buchheit, 2003). Ancak hiçbir zaman metal-çözelti ara yüzeyi ideal kapasitör gibi davranmaz. Korozyon prosesinin sürekliliği nedeniyle her zaman bir yük geçişi vardır. Ancak arayüzeydeki metal yüzeyinin deformasyonu nedeniyle de bu yük geçişi bir direnç ile karşılaşır. Şekil 2.14 ile verilen devre hem yüksek frekans bölgesi hem de düşük frekans bölgesi için geçerlidir. Yüksek frekans bölgesi için hesaplanan C ve R değerleriyle metal yüzeyindeki deformasyon tartışılırken, düşük frekans bölgesi için hesaplanan C ve R değerleriyle metal-çözelti arayüzeyi tartışılır. Yüksek ve düşük frekans bölgeleri için hesaplanan C ve R’leri birbirinden ayırt etmek için düşük frekans bölgesi için hesaplanan C, çift tabaka kapasitansı (C_{dl}) ve R, yük transfer direnci (R_{ct}) olarak adlandırılır. Şekil 2.14’de gösterilen R_s çözelti direnci, R_p ise polarizasyon direncidir. Elektriksel devre elemanlarının sayısal değerlerinin hesaplanması için yardımcı programlar kullanılır. Tez kapsamında *ZView* ve *EISSA* paket programları kullanılmıştır.

2.2.5. QCM

Kuartz kristal mikrobalsans (QCM), elektrokimyasal ölçümlerde kullanılan yeni bir yöntemdir. Mikrobiyal korozyon etkisinin incelemesinde, mikroorganizmaların yüzeye tutunmalarının takipinde ve bakterilerin biyofilm oluşturmalarının incelemesinde uzun süreli ve on line olarak kullanılmaktadır (Telegdi ve Ark., 2000). QCM piezoelektrik temelli gravimetrik bir sistemdir ve bağlı elektrodun frekans farkını ölçme esasına dayanır. QCM ile, kullanılan çalışma elektrodu yüzeyinde meydana gelen kütle değişimleri hassas (10^{-12} g) olarak ölçülebilir. Çalışma elektrodunun frekans farkı (Δf) ile yüzeyindeki kütle değişimi (Δm) arasındaki ilişki ilk defa Sauerbrey tarafından verilmiştir (Şekil 2.19).

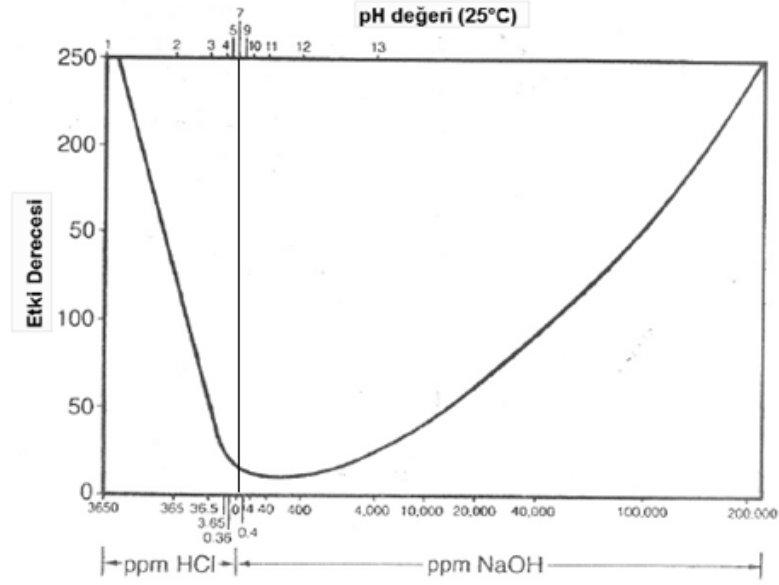
$$\Delta f = -\frac{2f_0^2 n \Delta m}{A \sqrt{\rho \mu}}$$

Şekil 2.10. Sauerbrey denklemi.

Burada f_0 sistemde çalışma elektrodu olarak kullanılan kuartz kristalin doğal rezonans frekansı; n, kuartz kristalin osilasyonunun harmonik numarası (burada=1); A, kristalin aktif yüzey alanı; ρ kuartz kristalin yoğunluğu ($2,684 \text{ g/cm}^3$) ve μ kristalin kesme kuvveti modülü ($2,947 \times 10^{11} \text{ g/cm.s}^2$) dır.

2.2.6. pH etkisi

pH hidrojen iyonun aktivitesi cinsinden bir asit veya bazın derecesini ifade etme yoluyla ihtiyaç duyulan kantitatif bilgiyi sağlar. Korozyon gelişiminde etkili olan pH değişimleri su ortamındaki çözülmüş oksijen miktarına bağlı olarak da farklılıklar gösterir. Suyun pH değeri düştükçe asitlik değeri arttığı için korozyon yapıcı özellik kazanmaktadır. Ayrıca 12-13 gibi pH seviyelerinde de bu defa OH^- iyonlarının artması ile bazik korozyon yapıcı özellik kazanmaktadır. pH 8,0-10,0 aralığında ise, artan alkalinite değeri ile birlikte kalsiyum kristallerinin oluşmasına ve ısıll yüzeylere yapışmasına zemin hazırlamaktadır. pH'ın sistemde korozyon hızına olan etkisi Şekil 2.20'deki grafikte açıkça görülmektedir.



Şekil 2.11. pH'nin korozyon hızına etkisi.

2.2.7. SEM ve EDX

Taramalı elektron mikroskopisi (SEM), korozyon deneylerinde metal yüzeylerin biyotik ve abiyotik ortamda morfolojisinin nasıl değiştiğini anlamak için en önemli ve vazgeçilmeyen bir yöntemdir. Ayrıca, SEM ve EDX birlikte kullanılmasıyla korozyon sonucunda yüzeyde biriken kompleks ve ürünlerin elementel analizinin yapılması da mümkündür.

2.3. Korozyon kontrol yöntemleri

2.3.1. Geleneksel korozyon kontrol yöntemleri

Metallerin korozyonunu önlemek için çeşitli yöntemler bulunmaktadır. Uygulamada bunlardan en uygun olanı seçilmelidir.

- 1- Dayanıklı malzeme kullanmak
- 2- Korozyona dayanıklı malzemeyle metal yüzeyini kaplamak
- 3- Ortama inhibitör eklemek
- 4- Katodik koruma uygulamak
- 5- Anodik koruma uygulama

2.3.2. Mikrobiyal korozyonun kontrol yöntemleri

Polimer kaplama: Polimerik kaplamalar metallerin korozyondan korunması için genel bir yaklaşımdır. Ancak bazen yapılan polimerik kaplama mikrobiyal bozunmanın aracı haline gelebilir. Örneğin mikroorganizmalar fizyolojik aktivitelerinden dolayı polimer kaplamalar üzerinde koloniler oluştururlar ve kaplama filmini diğer mikroorganizmalar için daha kolay ulaşılabilir hale getirirler. Böylece kaplama filmini beslenme kaynağına dönüştürmüş olurlar. Dolayısıyla polimer kaplamanın koruduğu metaller korozyona karşı dirençlerini kaybederler.

Katodik koruma: Katodik koruma, sisteme akım uygulanarak veya katodik polarizasyon oluşturmak için kurban (sacrify) metal kullanılarak yapılmaktadır. Böylece katodik yüzeyde koruma tabakası oluşturulmaktadır (Guezenec, 1994, Zuo, 2007). Ancak katodik polarizasyonun mikrobiyal aktivite ve yüzeyde oluşan biyofilm ile nasıl etkileştiği tam olarak bilinmemektedir. Literatürde sülfat indirgeyen bakteri türü olan *Vibrio natriengens* ile yapılan çalışmada katodik korumanın metal yüzeyinde bakteriyel tutunmayı etkilemediği, belkide korozyonu kolaylaştırdığı rapor edilmektedir (Guezenec, 1994, Zuo, 2007). Bu nedenle bu tekniği kullanması halinde sistemin tümünde geniş biyolojik ve kimyasal analizler yapmak gereklidir.

İnhibitör: İnhibitörler son zamanlarda geniş şekilde kullanılmaktadır. Korozyondan korunmada nihai çözüm olmamakla beraber metallerin kullanım sürelerini uzatmaktadırlar.

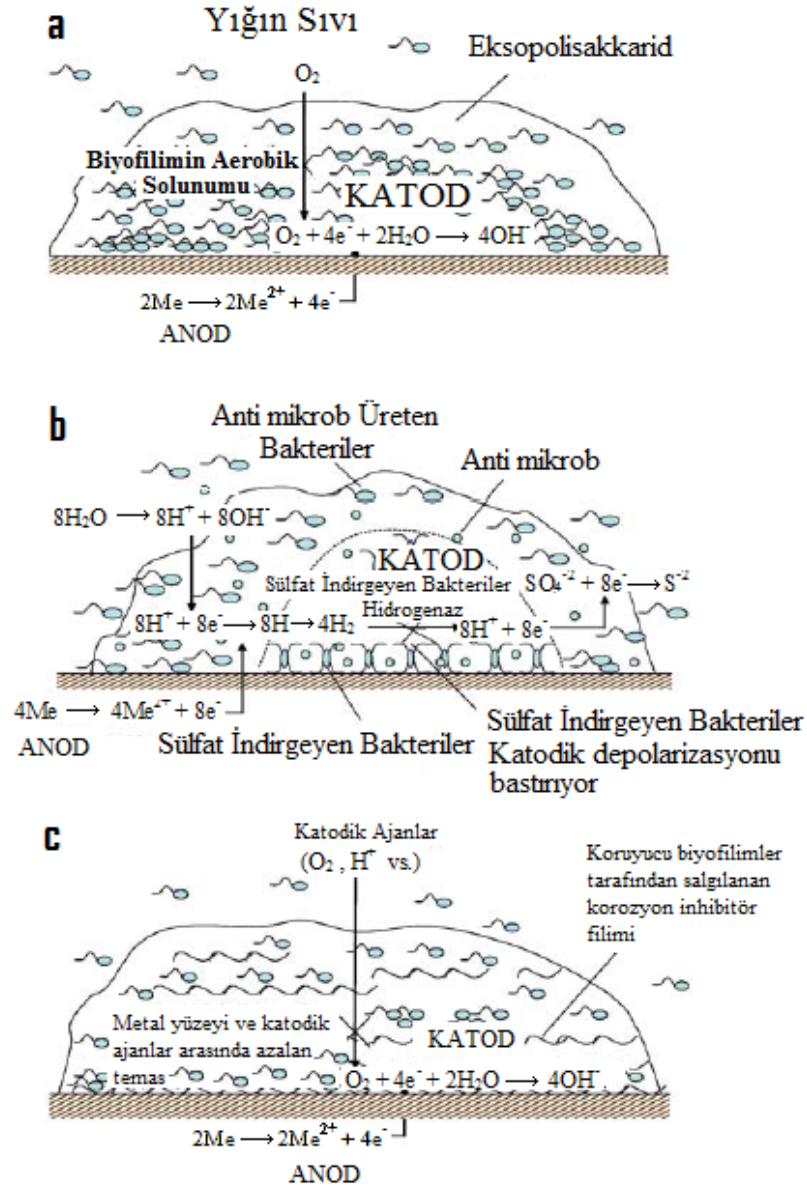
Biyositler: Biyositler biyofilm oluşumunu ve mikrobiyal korozyon etkisini azaltmak için kullanılmaktadır. Ancak sonuçlar tatmin edici değildir. Çünkü mikrobiyal korozyon etkisi yüzeye absorplanmış olan biyofilm-metal arayüzeyinde devam etmektedir. Biyositler yüzeye tutunmuş organizmalara fazla etkili değildir. Ayrıca biyofilmler hızlı bir şekilde anti mikrobiyal ajanlara direnç kazanabilmektedir (Xu ve Ark. 1998; Donlan ve Costerton 2002; Dunne 2002).

2.3.2.1. Yararlı biyofilmler kullanarak

Bakteri biyofilmlerinin metal yüzeyinde oluşması, genel ilke olarak korozyonu hızlandırır. Ancak, yüzeydeki biyofilm tabakasının varlığı yük aktarım bariyeri olarak da

değerlendirilebilir. Dolayısıyla biyofilm tabakası korozyon ajanlarının (oksijen ve klor gibi) girişini engelleyebilir veya yüzey ile temaslarını azaltabilir ve korozyonu yavaşlatır.

Literatürde mikrobiyal korozyon inhibisyonu için önerilen mekanizmalar: *a*- Bakteriyel aktivitelerde korozif katod ajanlarının uzaklaştırılması (oksijen solunumu gibi aerobik koşullarda, Şekil 2.21.a.); *b*- Korozyona sebep olan bakterilerin, antimikrobiyal salgı yapan bakteriler tarafından inhibisyonu (Şekil 2.21.b.); *c*- Metal yüzeyinde koruyucu tabaka oluşturmak, pasif metal oksitler veya yapışkan korozyon inhibitörleri salgılayan biyofilmler gibi (Şekil 2.21.c.). Bu üç mekanizmaya ait örnek şekil 2.21. de verilmiştir.



Şekil 2.12. Mikrobiyal korozyonda mümkün olan inhibisyon mekanizmaları.

2.3.2.2. Mikrobiyal korozyondan korunmak için yeni yaklaşımlar

Zuo ve arkadaşları 2005’de rastgele bir bakteriyofajın alüminyum ve yumuşak çelik yüzeyinde ürettiği peptid bağlarının bu metallerin koruması için bir potansiyele sahip olduğunu rapor etmişlerdir. Çalışma, biyofilmin oluşumuyla bakteriler kararlı bir şekilde metal yüzeyinde tutunabilirler ve böylece biyofilm oluşturan bakterilerin metal bağı kuran peptitleri organik kaplama kararlılığı gösterebilir yaklaşımına dayanmaktadır. Ancak literatürde bu konuyla ilgili henüz detaylı bir açıklama rapor edilmemiştir.

3. MATERYAL ve YÖNTEM

3.1. Materyal

3.1.1. Bakteri kültürü

Bu doktora çalışmasında, *Pseudomonas aeruginosa*, *Aeromonas eucrenophila*, *Clavibacter michiganensis* ve *Delftia acidovorans* bakterileri kullanılmıştır. Bakterinin saf kültürleri mikrobiyolojik olarak paslanmış su arıtma tesislerinden alınan su örneklerinden, izole edilerek ve kullanılarak gerçekleştirilmiştir. *A. eucrenophila* ve *D. acidovorans* Ankara İvedik Su Arıtım tesislerinde su çıkış borusundan, *C. michiganensis* Safran bolu içme suyu kaynaklı borudan alınmış pas numunesinden izole edilmiştir. Örnekler, Nutrient Agar besiyeri içeren Petri plakalar üzerine yayıldı. Bir N agar besiyeri bileşimi pepton 5.0 g ölçekli et, et ekstraktı (N kaynak), sodyum klorür 3.0 g ve 6,0 g agar 15 g 1 L.'de, Plakalar, $30 \pm 1^\circ\text{C}$ 100 rpm'de döner çalkalayıcıda (C 'New Brunswick Scientific İnnova 4230). 7-10 gün boyunca inkübe edilerek elde edilmiştir. Mikro-koloni hücreleri N. Agar ortamı plakaları üzerinde tekrar tekrar çizgi oluşturarak bu plakalar üzerinde hücreler izole edildip ve saflaştırılmıştır. İzole edilmiş bakterinin 16S rRNA sekanslar bazında karakterize edilmiş ve Katılım No. (NCBI Gen Bankası Numarası: *A. eucrenophila*, GQ466170.1; *C. michiganensis*, GQ466171.1; *D. acidovorans*, GQ466172.1). (SAN ve Ark.. 2010). *P. aeruginosa* ise, Ankara Üniversitesi Fen Fakültesi Biyoloji Bölümü, Biyoteknoloji Araştırma Grubu Bakteri koleksiyonundan alınmıştır. Saf kültürler 4°C tutulup ve her 3 ayda N. Agar ortamına transfer edilmiştir. Bakteriler döner çalkalayıcıda ($30 \pm 1^\circ\text{C}$, 100 rpm) üzerine N. besiyerine 20 mL ihtiva eden bir 100 ml Erlenmeyer şişesinde 24 saat kültüre edilmiştir. İnkübe olmuş bakteriler 5000g 10 dakika (Hettich EBA12) santrifüj'de ve sonra biyokorozyon deneyleri için kullanılmıştır. Bir % 1 v / v 24 saat bakteri kültürü ($\text{OD}_{600} \approx 2.4$) tekrarlanabilirliği sağlamak için tüm deneyler için kullanılmıştır. Bakteri yoğunluğu UV-vis spektrofotometre (SHIMADZU, UV-1201 V, Japonya) ile 600 nm dalga boyunda optik yoğunluk (OD) ölçülerek hesaplanmıştır. Hücre sayısı hesaplaması 1.0 bir OD değeri $\approx 10^9$ hücre / ml eşdeğer olduğu varsayımı ile standart kalibrasyona dayanmaktadır. Bakteri büyüme eğrisi OD ölçümlerinden belirlenmiştir. Üstel faz 24 saat sonra yaklaşık 2.4 bir OD değeri ile ulaşılmıştır.

3.1.2. Cihazlar

Elektrokimyasal çalışmalarda OCP, QCM, CV (potansiyel-akım-kütle değişimi) ve LSV (potansiyel-akım-kütle değişimi) tekniklerinde CHI400a (CH Instruments, USA) elektrokimyasal kuartz kristal mikrobalsans (EQCM) cihazı ve CHI sürüm 9.12 yazılımı; LSV(potansiyel-akım değişimi), Tafel hesaplamaları ve EIS tekniklerinde ise, Ivium CompactStat (Ivium, Nederland) cihazı ve Ivium soft sürüm 1.807 yazılımı kullanıldı. Yüzey görüntüsü ve yüzeyde biriken korozif tabakanın EDX analizi Taramalı Elektron Mikroskopu JEOL JSM-7000F Field Emission SEM-EDX ile kaydedilmiştir. pH ölçümleri için, JENWAY 3010 ve HANNA pH metreleri kullanılmıştır. Bakteri kültürünü homojen karıştırmak için IKA MS 3 digital vortex kullanılmıştır. Çözeltideki iyon derişimi GBC Atomik Absorpsiyon Spektrofotometre (GBC scientific equipment, Australia) cihazı ve GBC Avanta sürüm 2.02 yazılımı kullanılarak tayin edildi. Metal yüzeyindeki oluşan biyofilm tabakasının analizi için SHIMADZU IRAFFINITY 3, FTIR cihazı kullanılmıştır.

3.1.2.1. Elektrokimyasal hücre ve elektrotlar

EQCM cihazı ile yapılan çalışmalarda CHI 127 (CH Instruments, USA) standart üç elektrotlu teflon hücre ($V= 4$ ml), Ag/AgCl (CHI111, CH Instruments, USA) referans elektrot, Pt (CHI115, CH Instruments, USA) karşıt elektrot ve Au kaplı kuartz (CHI125A, CH Instruments, USA; 7,995 MHz, $R= 5,1$ mm, AT-cut) çalışma elektrodu olarak kullanılmıştır. CompactStat cihazı ile yapılan çalışmalarda ise, teflondan imal edilmiş standart üç elektrotlu bir hücre ($V= 12$ ml), Ag/AgCl (CHI111, CH Instruments, USA) referans elektrot, Pt (CHI115, CH Instruments, USA) karşıt elektrot ve pirinç ve yumuşak çelikten kesilmiş ($R= 1$ cm, $h= 0,5$ cm) diskler çalışma elektrodu olarak kullanılmıştır. Çalışmalarda kullanılan Au, pirinç ve yumuşak çelik elektrotlar ilgili metaller (Fe, Co, Ni, Cu ve Zn) ile kaplandıktan sonra kullanılmıştır. Metal kaplama banyo bileşimleri: Fe, 0,05M Fe(II)SO₄.7H₂O and 0,2M H₃BO₃ (2:1); Co, 0,5M CoSO₄.7H₂O and 1M H₃BO₃ (2:1); Ni, 1M NiSO₄.7H₂O, 0,1M NiCl₂ . 6H₂O, 0,5M H₃BO₃ (5:1:2,5); Cu: 0,12M CuSO₄.5H₂O; Zn, 0,55M ZnCl₂ ve 3,4M NH₄Cl dır.

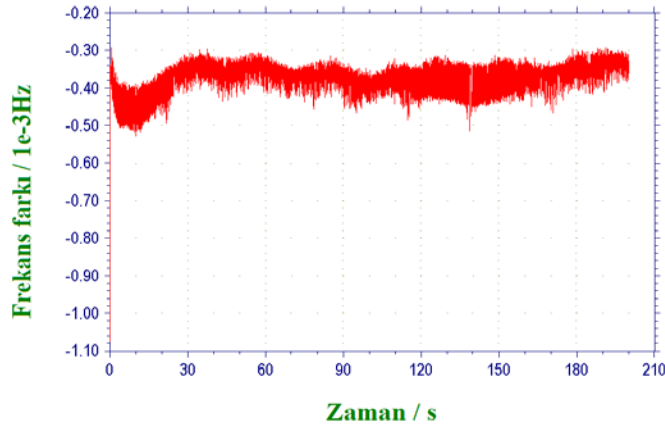
3.2. Yöntem

3.2.1. Bakteriyel ortamın hazırlanması

Deneylerde her seferinde taze bakteri kullanılmıştır. Kullanılan bakteri miktarı 2,5 µl/ 1 ml N. Broth dır. Bakteri kültürü vortex cihazı ile 10 s karıştırıldıktan sonra kullanılmıştır.

3.2.2. Elektrodun hazırlanması

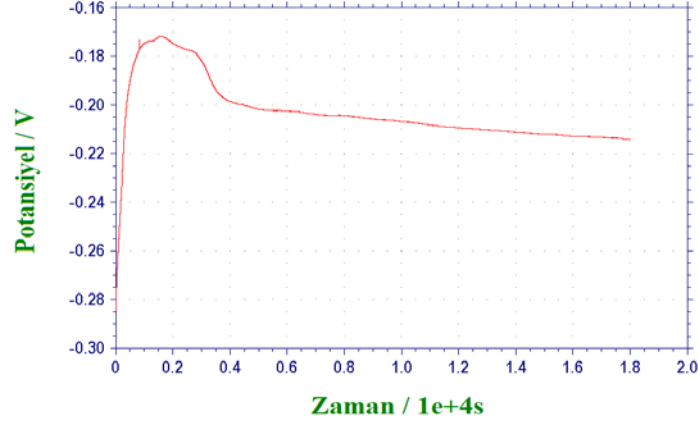
Çalışma elektrotları CA'ile kütle kontrollü olarak kaplandıktan sonra kullanıldı. Kaplama verimini arttırmak için Au elektrot piranha çözeltisi (18,5 M %35 lik 750 ml H₂SO₄ ve H₂O₂) ile, pirinç ve yumuşak çelik elektrotları ise, zımparalandıktan ve yüzeyleri aseton ile yıkandıktan sonra kullanıldı. Kullanılan kaplama potansiyelleri: Fe, baş.-0,4 V son -1,4 V; Co, baş. -0,4 V son -1,2 V; Ni, baş. -0,4 V son -0,9 V; Cu, baş. 0 V son -0,8 V dır. Fe için yapılan kaplamanın örnek çıktısı şekil 3.1.' de verilmiştir. Deneylerde yaklaşık 100 nm kalınlıkta metal kaplamalar kullanılmıştır.



Şekil 3.1. QCM sisteminde Fe için yapılan kaplamanın örnek çıktısı.

3.2.3. Optimum deney süresinin belirlenmesi

Optimum deney süresi SEM ve OCP ile belirlenmiştir. Üstel fazdan alınan bakterilerin salgıladığı biyo kütleinin, kullanılan elektrotların yüzeyini (R= 5,1 mm, A= 204 cm²) biyofilm tabakası olarak kaplaması yaklaşık olarak beş saat sürmektedir (Şekil 3.2.).



Şekil 3.2. Ni'nin A. eucrenophila ortamında OCP'nin beş saatlık süre sonunda dengeye geldiğini göstermektedir.

Mikrobiyal korozyonu da hızlandıran biyofilm oluşumu: OCP, QCM ile beş saat; EQCM ile kaydedilen CV ve LSV'ler ile bir saat (her 10 dakikada bir ölçüm); CompactStat ile kaydedilen LSV ve EIS'ler 30, 60, 90 ve 120 dakika takip edilmiştir.

3.2.4. SEM ve EDS analizi

Mikrobiyal korozyon etkisi ile değişen metal yüzeylerin morfolojisi ve yüzey analizi SEM ve EDS ile yapılmıştır. Bunun için, çalışılan metallerle kaplı pirinç diskler OCP süresince besiyeri ve bakterili ortamlarda bekletildikten sonra SEM görüntüleri kaydedilmiş ve EDS analizi yapılmıştır. SEM görüntüleri kaydedilmeden önce disk yüzeyleri N₂ ile kurutulmuştur.

3.2.5. pH

Deney ortamının pH değişimi beş saat süre ile takip edildi.

3.2.6. FTIR Analizi

Bakterilerin metaller üzerinde oluşturduğu biyofilm tabakası FTIR ile incelendi. takip edildi. Bunun için, kaplı pirinç diskler bakterili ortamlarda beş saat, 24 saat ve iki haftalık süreler ile bekletildi. Bakterili ortamlardan alınan diskler kurutulduktan sonra disk yüzeylerinin FTIR-ATR spektrumu kaydedildi.

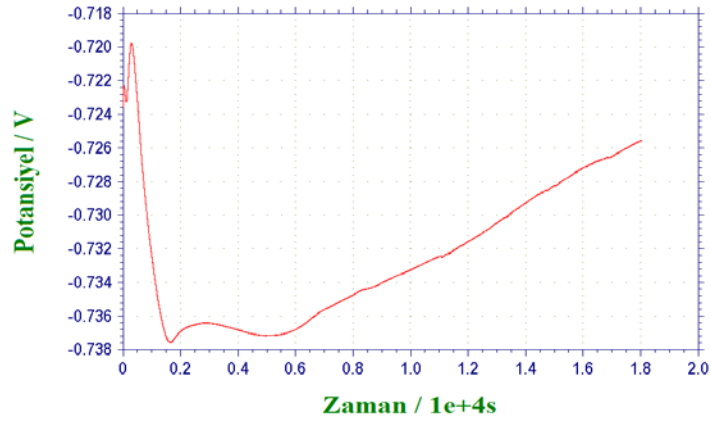
4. BULGULAR

Bu tez kapsamında, dört farklı bakteri (*P. aeruginosa*, *A. eucrenophila*, *C. michiganensis* ve *D. acidovorans*) ve dört farklı metal (Fe, Co, Ni ve Cu) ile çalışılmış, elektrokimyasal (OCP, QCM, LSV, Tafel ve EIS) ve spektrofotometrik (FTIR-ATR) olarak mikrobiyal korozyon etkisi incelenmiştir. Besiyeri ile karşılaştırmalı olarak yapılan deneylerde elde edilen bulgular metal ve bakteri bazında karşılaştırmaya olanak sağlayabilecek şekilde sırayla aşağıda verilmiştir.

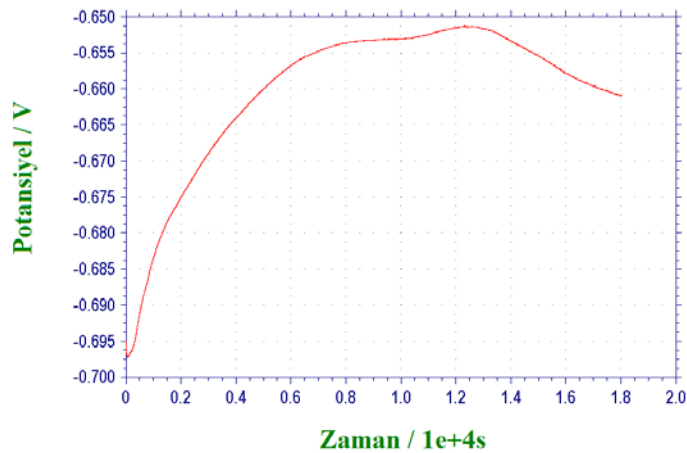
4.1. Fe'nin Mikrobiyal Korozyonunun İncelenmesi

4.1.1. Fe'nin bakterili ve bakterisiz ortamda kaydedilen OCP'nin grafikleri

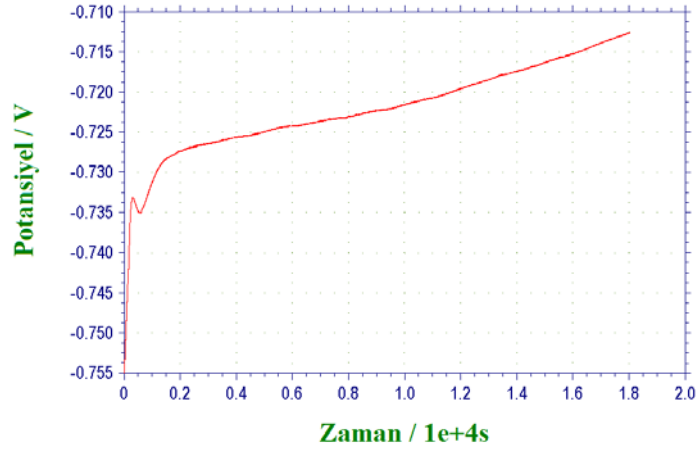
4.1.1.1. Fe'in *P. aeruginosa* için kaydedilen OCP grafiği



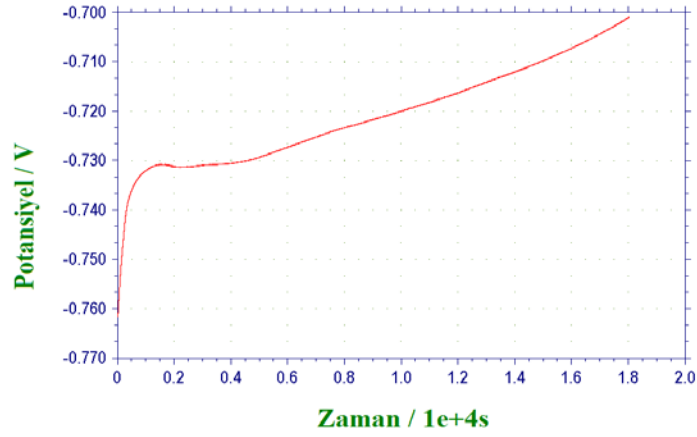
4.1.1.2. Fe'in *A. eucrenophila* için kaydedilen OCP grafiği



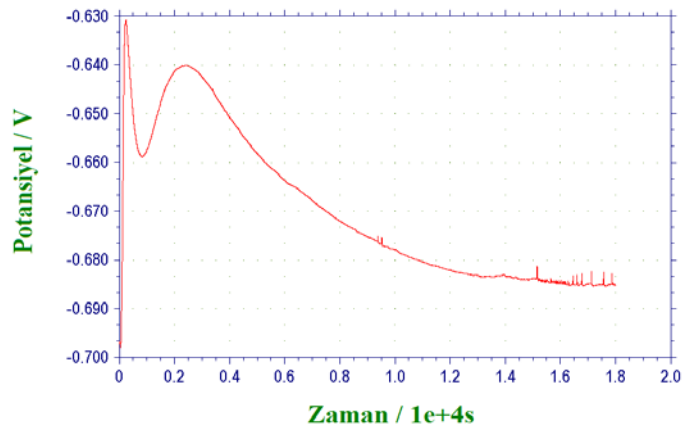
4.1.1.3. Fe'in *C. michiganensis* için kaydedilen OCP grafiği



4.1.1.4. Fe'in *D. acidovorans* için kaydedilen OCP grafiği



4.1.1.5. Fe'in N. Broth için kaydedilen OCP grafiği

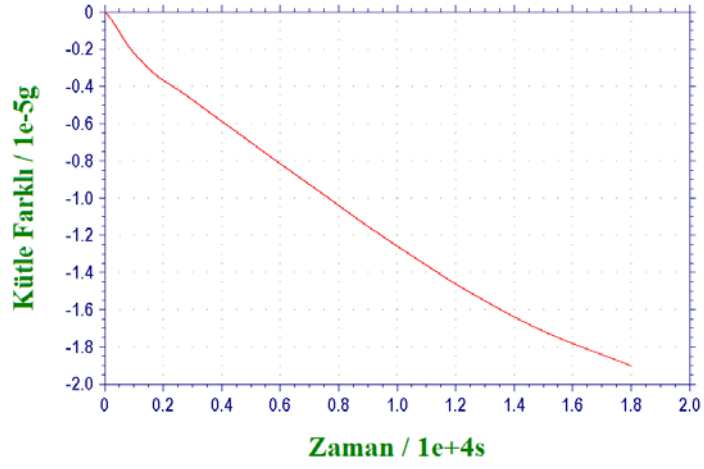


Çizelge 4.1. Fe'nin, bakterili ve bakterisiz ortamlardaki OCP değerleri, 5 saat.

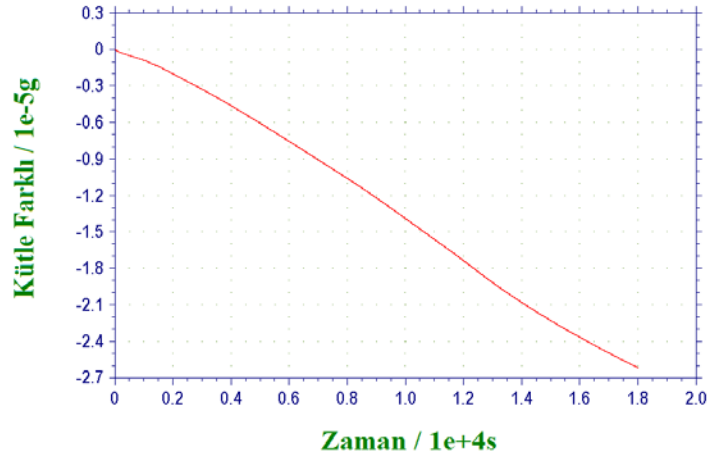
	<i>P. aeruginosa</i>	<i>A. eucrenophila</i>	<i>C. michiganensis</i>	<i>D. acidovorans</i>	N. Broth
OCP (V)	-0,7255	-0,6610	-0,7126	-0,7008	-0,6852

4.1.2. Fe'nin bakterili ve bakterisiz ortamda kaydedilen QCM'in grafikleri

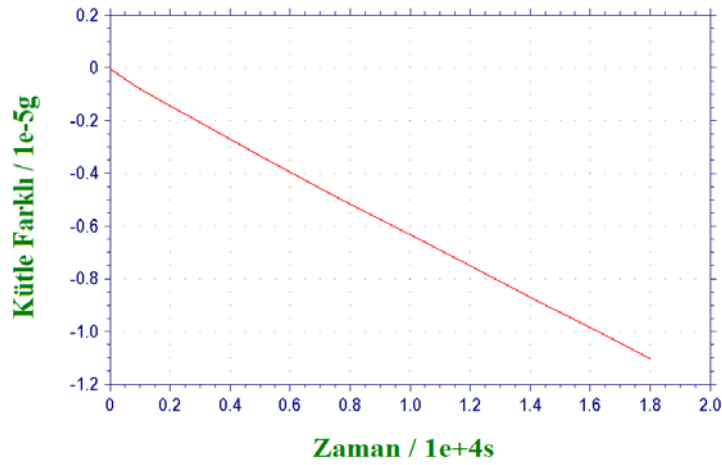
4.1.2.1. Fe'in *P. aeruginosa* için kaydedilen QCM grafiği



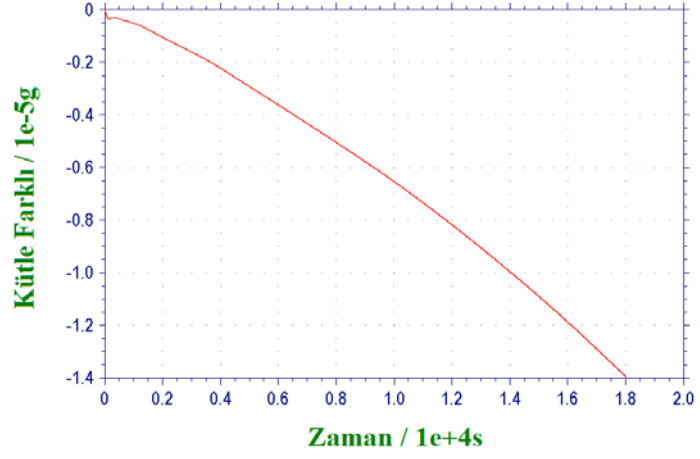
4.1.2.2. Fe'in *A. eucrenophila* için kaydedilen QCM grafiği



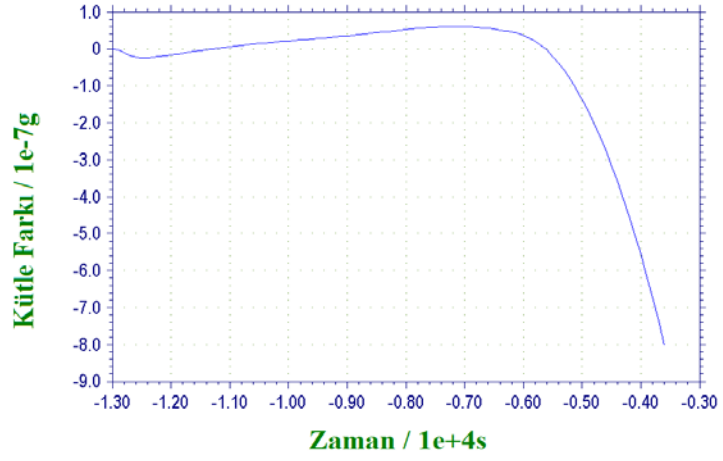
4.1.2.3. Fe'in *C. michiganensis* için kaydedilen QCM grafiği



4.1.2.4. Fe'in *D. acidovorans* için kaydedilen QCM grafiği



4.1.2.5. Fe'in N. Broth için kaydedilen QCM grafiği

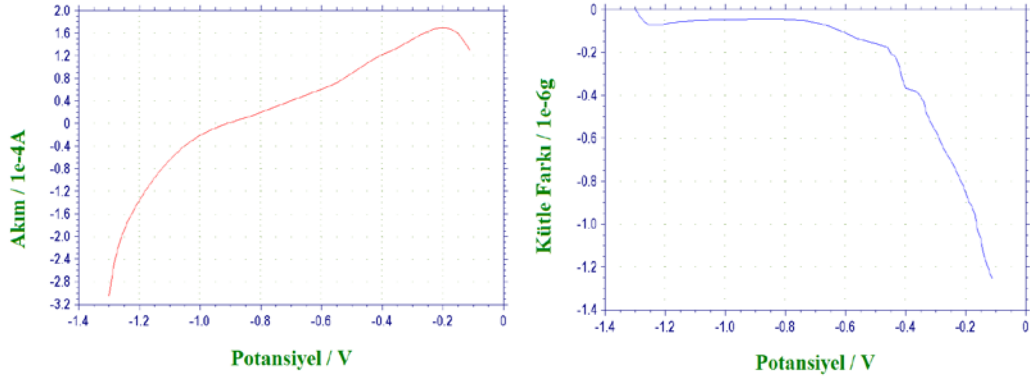


Çizelge 4.2. Fe'nin, bakterili ve bakterisiz ortamdaki kütle kaybı ($\Delta_{\text{Kütle}}$) değerleri, 5 saat.

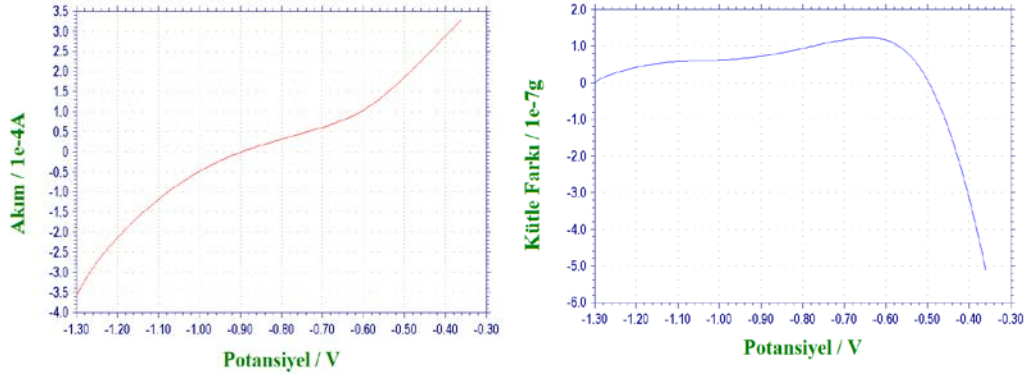
	<i>P. aeruginosa</i>	<i>A. eucrenophila</i>	<i>C. michinanensis</i>	<i>D. acidovorans</i>	N. Broth
$\Delta_{\text{Kütle}}$ (μg)	18,99	26,26	11,07	13,98	08,397

4.1.3. Fe'nin bakterili ve bakterisiz ortamda kaydedilen LSV'nin grafikleri

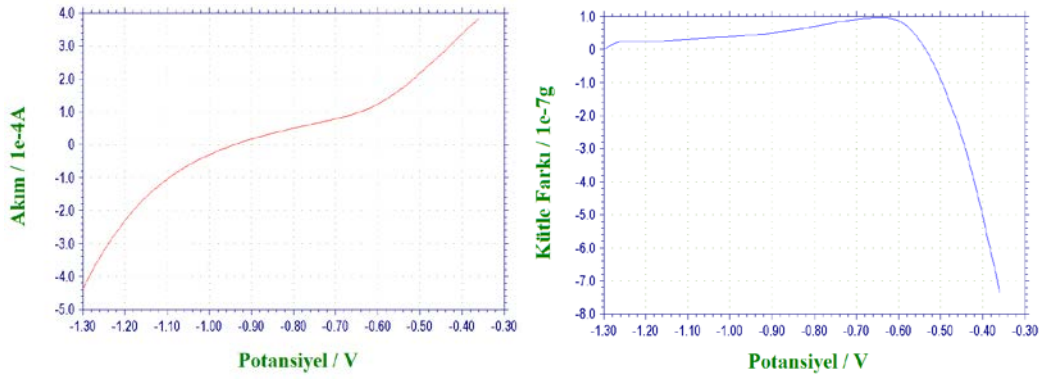
4.1.3.1. Fe'in *P. aeruginosa* için kaydedilen LSV grafiği



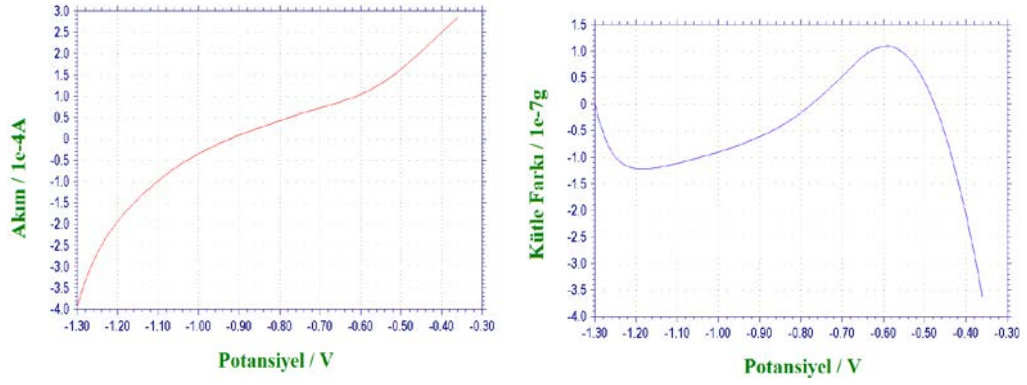
4.1.3.2. Fe'in *A. eucrenophila* için kaydedilen LSV grafiği



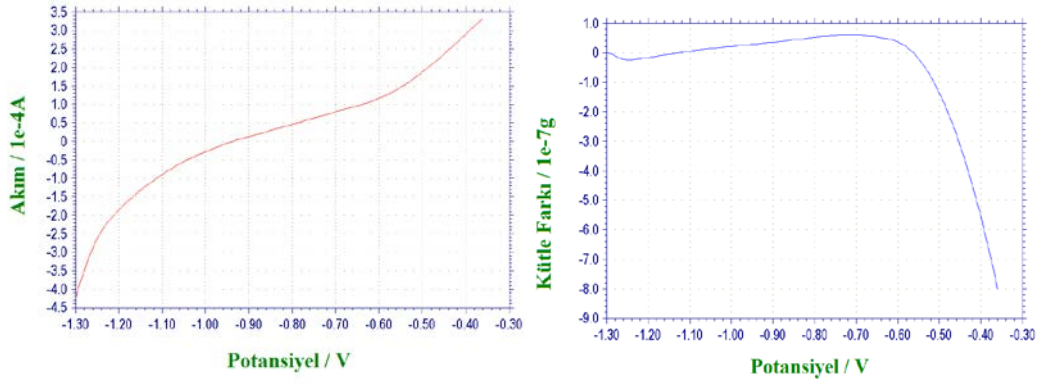
4.1.3.3. Fe'in *C. michiganesis* için kaydedilen LSV grafiği



4.1.3.4. Fe'in *D. acidovorans* için kaydedilen LSV grafiği



4.1.3.5. Fe'in N. Broth için kaydedilen LSV grafiği

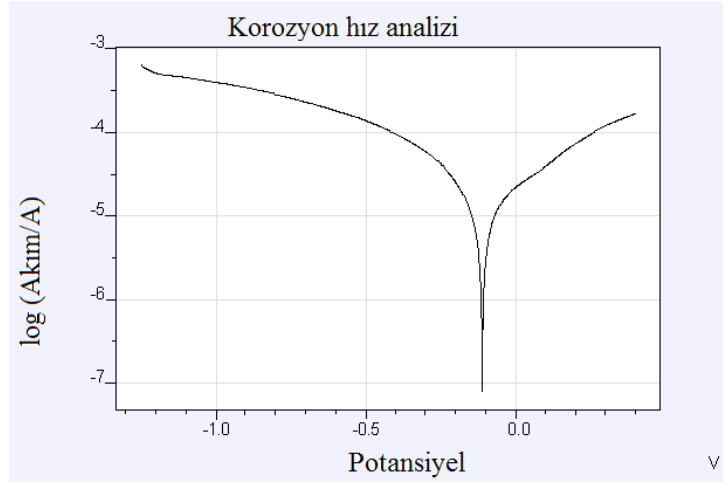


Çizelge 4.3. Fe'nin kırılma potansiyeli (E_b) ve kütle kaybı ($\Delta_{\text{Kütle}}$) değerleri, 1 saat.

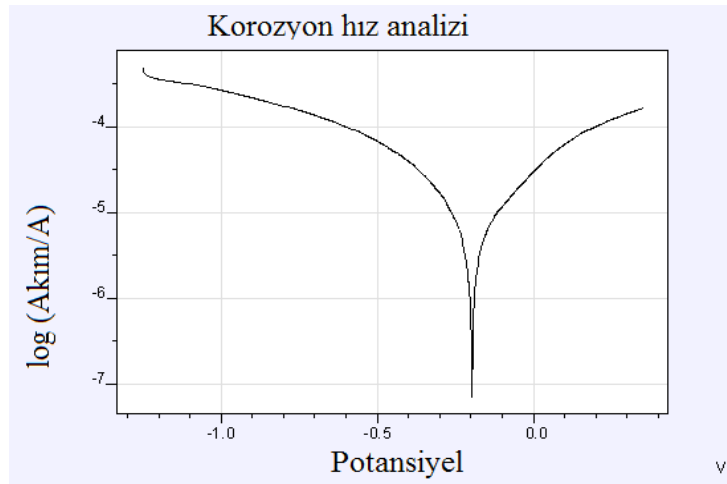
	<i>P. aeruginosa</i>	<i>A. eucrenophila</i>	<i>C. michinanensis</i>	<i>D. acidovorans</i>	N. Broth
E_b (V)	-0,7308	-0,6156	-0,6328	-0,6275	-0,6089
$\Delta_{\text{Kütle}}$ (μg)	-1,255	-0,5140	-0,7369	-0,3647	-0,8023

4.1.4. Fe'nin bakterili ve bakterisiz ortamda kaydedilen Tafel'in grafikleri

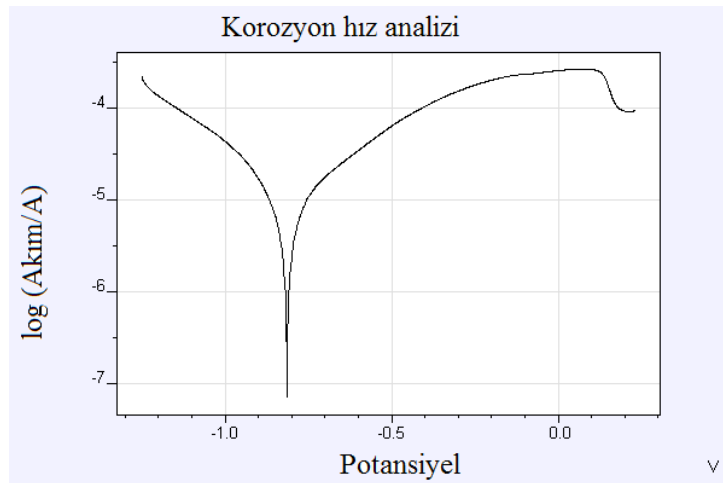
4.1.4.1. Fe'in *P. aeruginosa* için kaydedilen Tafel grafiği



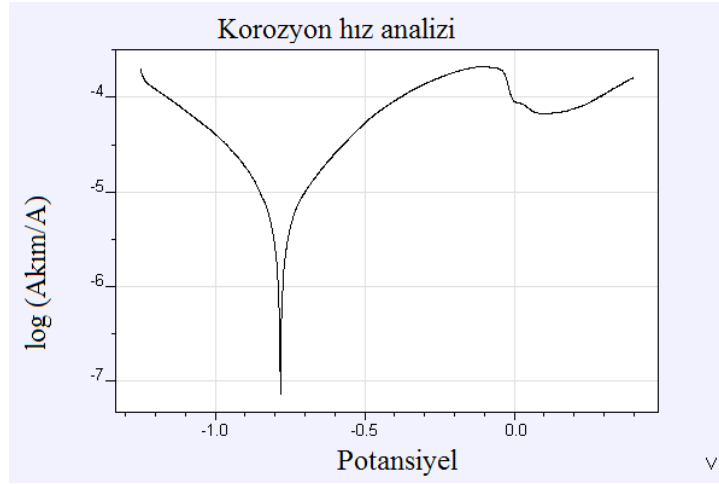
4.1.4.2. Fe'in *A. eucrenophila* için kaydedilen Tafel grafiği



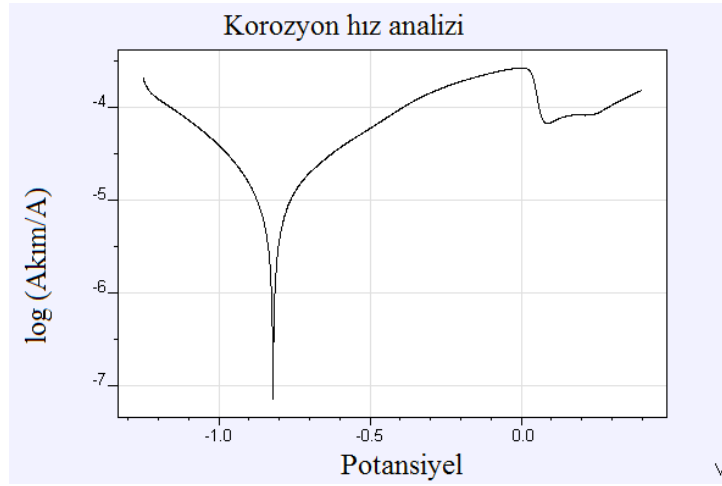
4.1.4.3. Fe'in *C. michiganesis* için kaydedilen Tafel grafiği



4.1.4.4. Fe'in *D. acidovorans* için kaydedilen Tafel grafiği



4.1.4.5. Fe'in N. Broth için kaydedilen Tafel grafiği

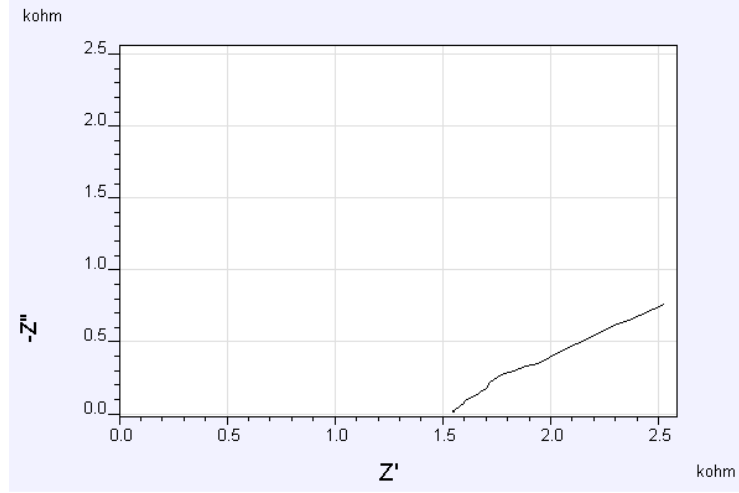


Çizelge 4.4 Fe'nin, bakterili ve bakterisiz ortamları için Tafel grafiklerinden belirlenen korozyon parametreleri, 1 saat.

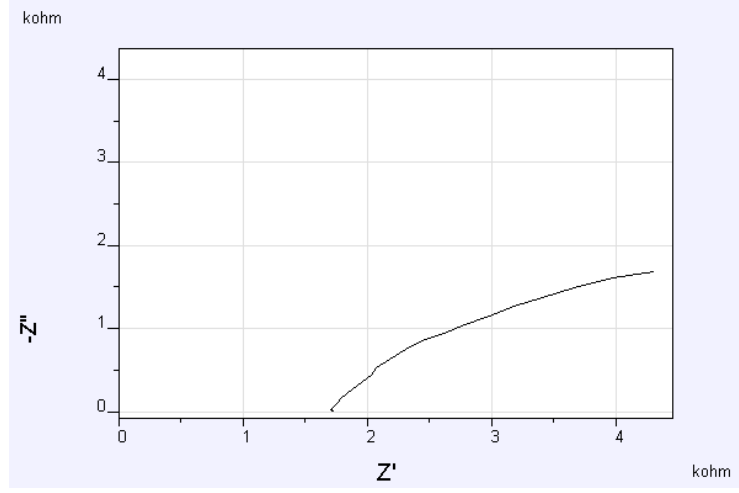
	<i>P. aeruginosa</i>	<i>A. eucrenophila</i>	<i>C. michinanensis</i>	<i>D. acidovorans</i>	N. Broth
E_{corr} (V)	-0,1103	-0,1965	-0,8136	-0,7815	-0,8203
i_{corr} (μ A)	8,521	4,839	6,562	3,997	5,825
I_{corr} (μ A/cm ²)	43,47	24,690	33,48	20,39	29,72
R_p (Ω)	4010	7338	5865	7787	5876
β_a (V/dec)	0,634	0,494	0,514	0,378	0,428
β_c (V/dec)	0,254	0,304	0,338	0,293	0,315

4.1.5. Fe'nin bakterili ve bakterisiz ortamda kaydedilen EIS'nin grafikleri

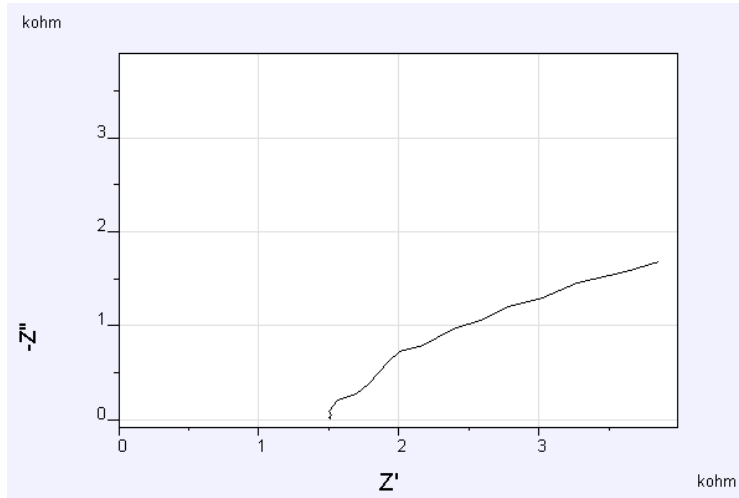
4.1.5.1. Fe'in *P. aeruginosa* için kaydedilen EIS grafiği



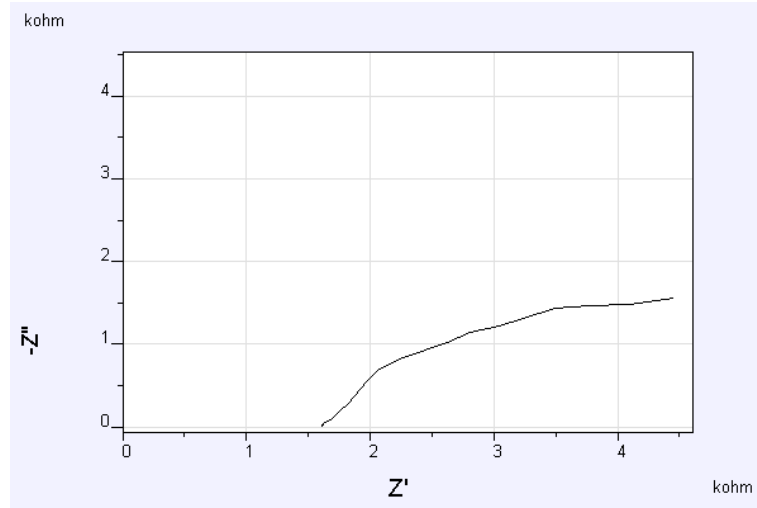
4.1.5.2. Fe'in *A. eucrenophila* için kaydedilen EIS grafiği



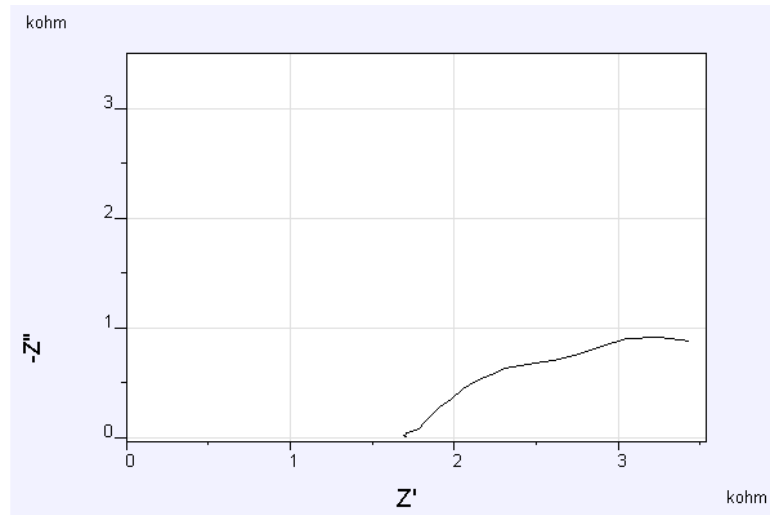
4.1.5.3. Fe'in *C. michiganensis* için kaydedilen EIS grafiği



4.1.5.4. Fe'in *D. acidovorans* için kaydedilen EIS grafiği



4.1.5.5. Fe'in N. Broth için kaydedilen EIS grafiği



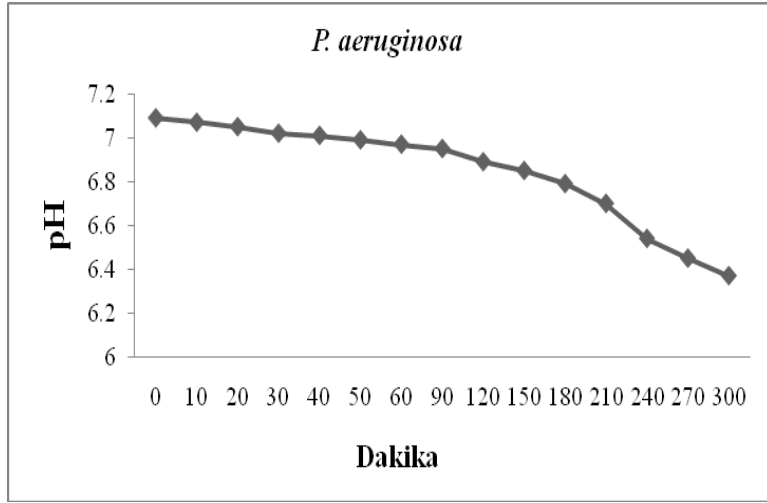
Çizelge 4.5. Fe'nin, bakterili ve bakterisiz ortamlar için EIS spektrogramlarından hesaplanan elektronik devre eşdeğeri parametreleri, 1 saat.

	R_1 (Ω)	Q_1 (μF)	η_1	R_2 (Ω)	Q_2 (μF)	η_2	R_3 (Ω)
<i>P. aeruginosa</i> *	1525	1025	0,50156	5905			
<i>A. eucrenophila</i>	1690,1	342,15	0,6114	6530,8			
<i>C. michinanensis</i>	1485,8	392,21	0,61523	6708,4			
<i>D. acidovorans</i>	1606,3	290,7	0,66652	5205,6			
N. Broth	1693	460,05	0,6215	3347,3			
<i>P. aeruginosa</i> *	1534	1193,1	0,50856	8328	2233,9	0,98	90,6
<i>A. eucrenophila</i>	1690,1	500	0,64332	6676,1	500	0,80752	650,32
<i>C. michinanensis</i>	1485,8	485,58	0,050492	$4,8122e^{-06}$	392,21	0,61523	6708,4
<i>D. acidovorans</i>	1606,3	290,27	0,66722	5194,2	$2,44e^{-4}$	0,98847	$9,8e^{-14}$
N. Broth	1693	467,65	0,61716	3396	165,35	1,0099	2,3141
<i>P. aeruginosa</i>	1523,8	499,99	0,47042	19,909	499,95	0,56414	4892,6
<i>A. eucrenophila</i>	1690,1	279,61	0,20118	24,158	211,39	0,73336	$1e^{06}$
<i>C. michinanensis</i>	1485,8	390,8	0,61735	6620,3	$0,858e^{-6}$	0,71925	$9,1e^{-13}$
<i>D. acidovorans</i>	1606,3	294,34	0,66196	5334,7	$1,035e^{-6}$	0,86403	$9,9e^{-13}$
N. Broth	1693	392,66	0,10234	4,9222	366,09	0,68226	$1e^{06}$

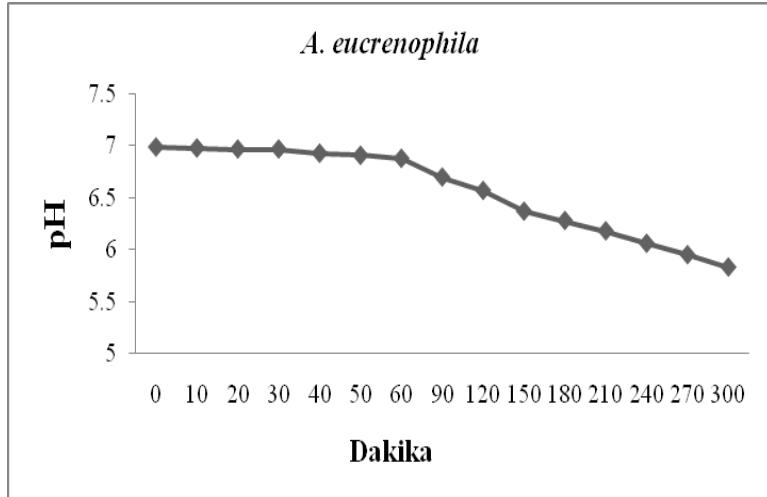
*: Zview

4.1.6. Fe'nin Bakterili ve bakterisiz Ortamda pH'nın ölçülmesi

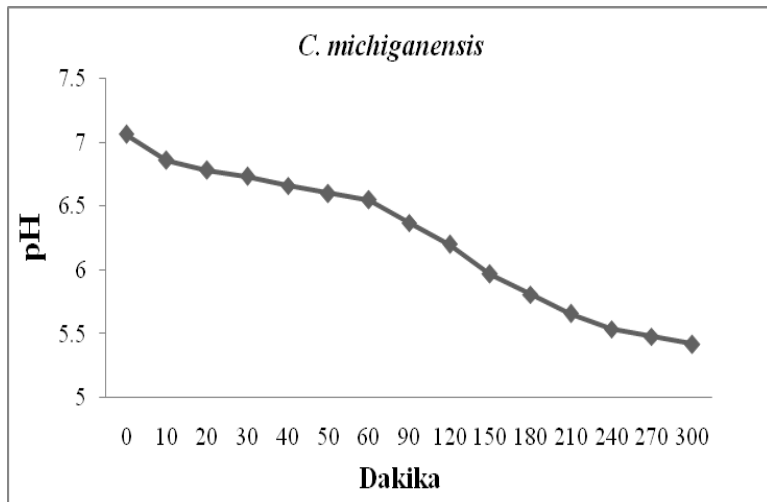
4.1.6.1. Fe ve *P. aeruginosa* için çizilen pH grafiği



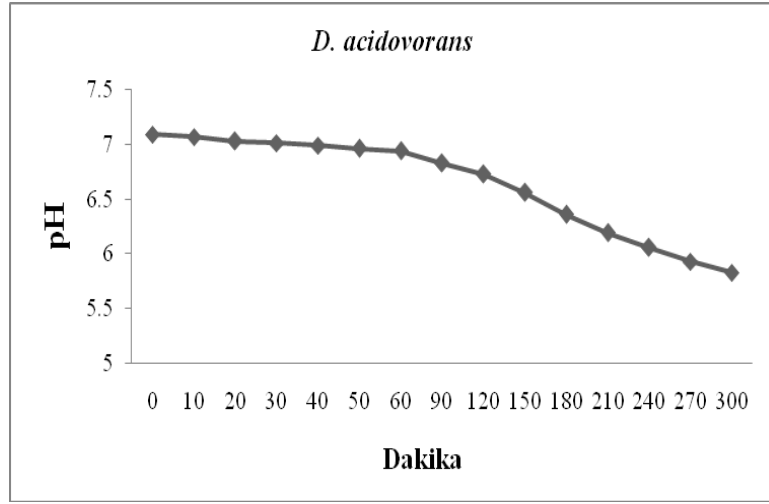
4.1.6.2. Fe ve *A. eucrenophila* için çizilen pH grafiği



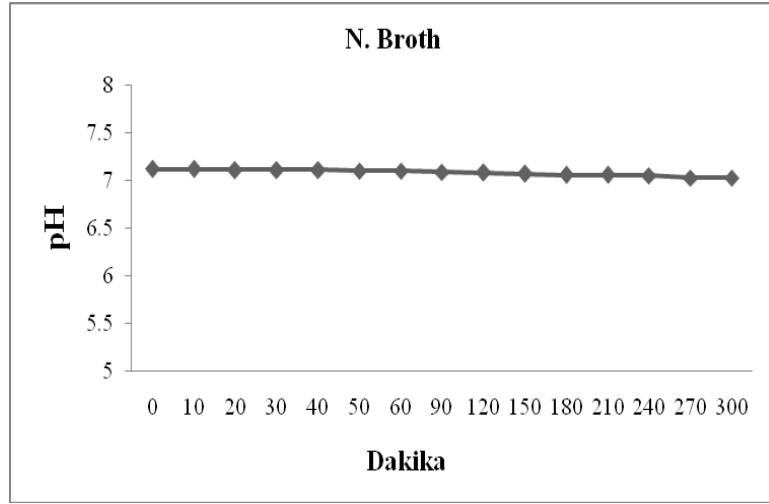
4.1.6.3. Fe ve *C. michiganensis* için çizilen pH grafiği



4.1.6.4. Fe ve *D. acidovorans* için çizilen pH grafiği



4.1.6.5. Fe ve N. Broth için çizilen pH grafiği

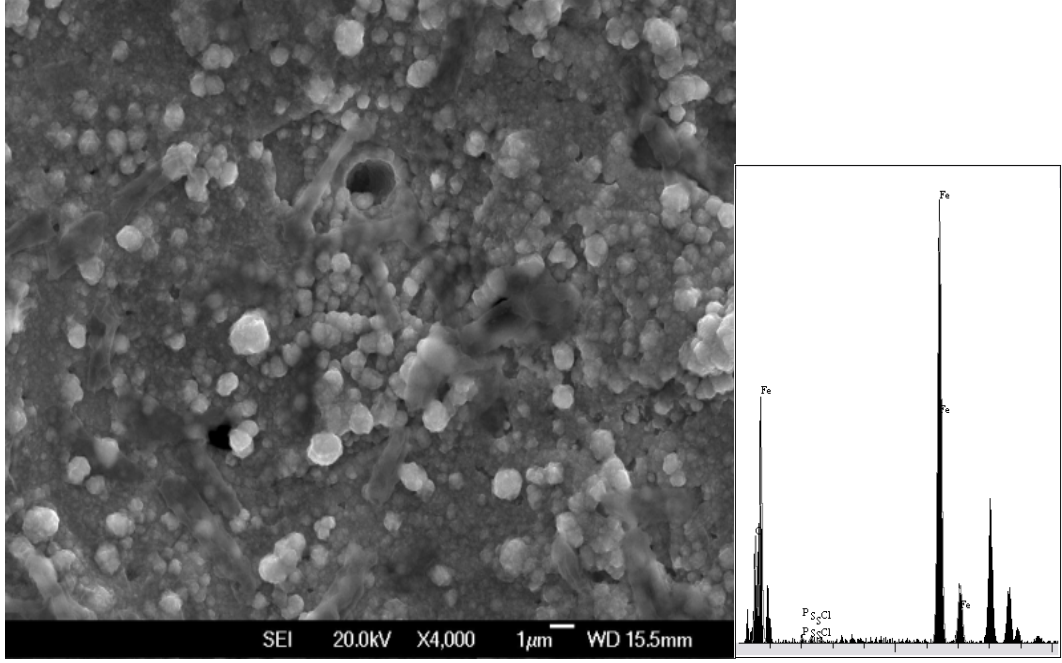


Çizelge 4.6. Fe'nin bakterili ve bakterisiz ortamda 5 saat sonunda ölçülen pH değerleri, 5 saat.

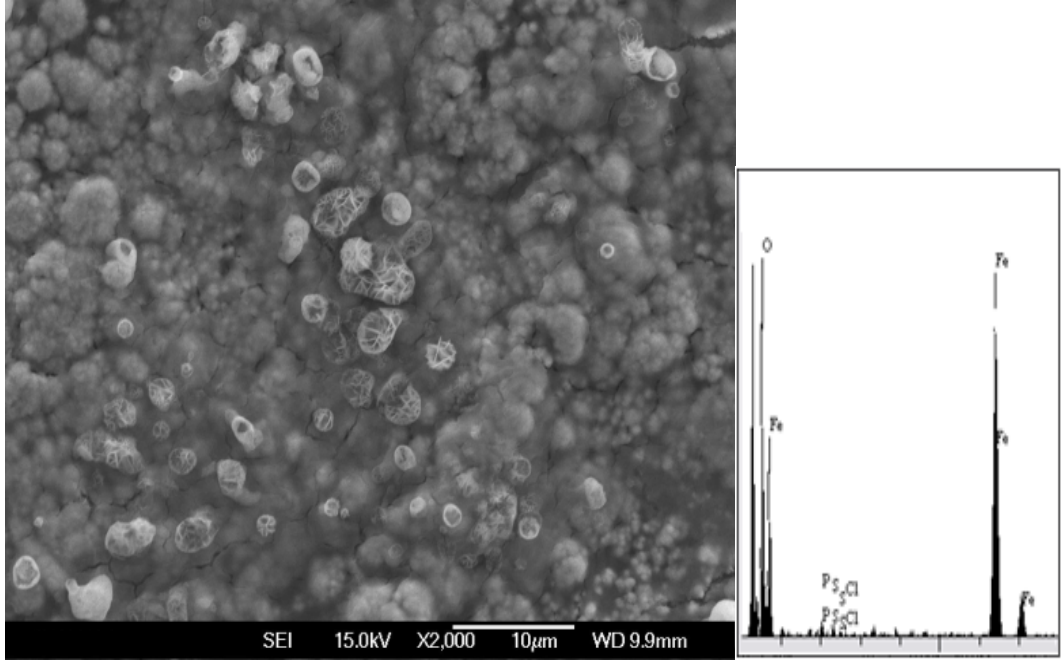
	<i>P. aeruginosa</i>	<i>A. eucrenophila</i>	<i>C. michinanensis</i>	<i>D. acidovorans</i>	N. Broth
pH	6,37	5,83	5,42	5,83	7,03

4.1.7. Fe'nin bakterili ve bakterisiz ortamlar için kaydedilen SEM mikrografları ve EDX Analizleri

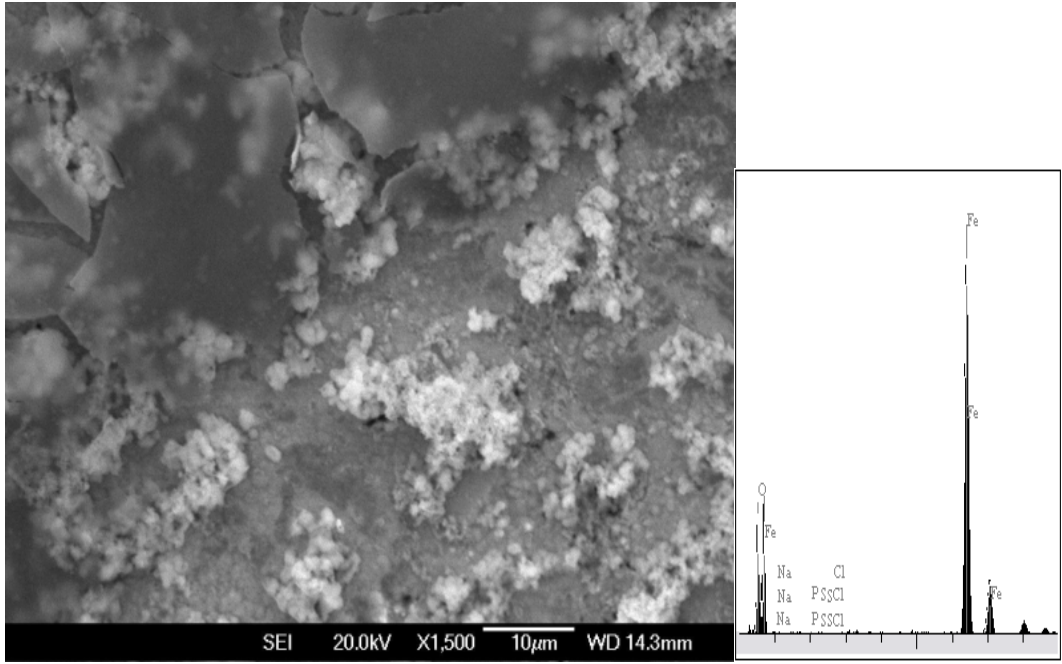
4.1.7.1. Fe ve *P. aeruginosa* için kaydedilen SEM mikrografı ve EDX analizi



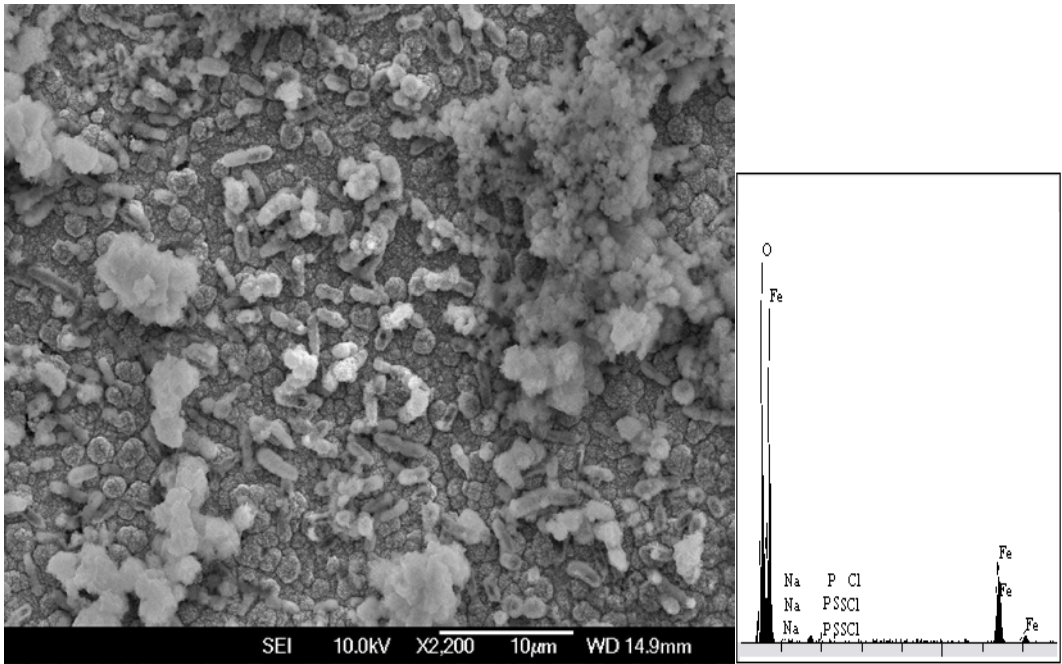
4.1.7.2. Fe ve *A. eucrenophila* için kaydedilen SEM mikrografı ve EDX analizi



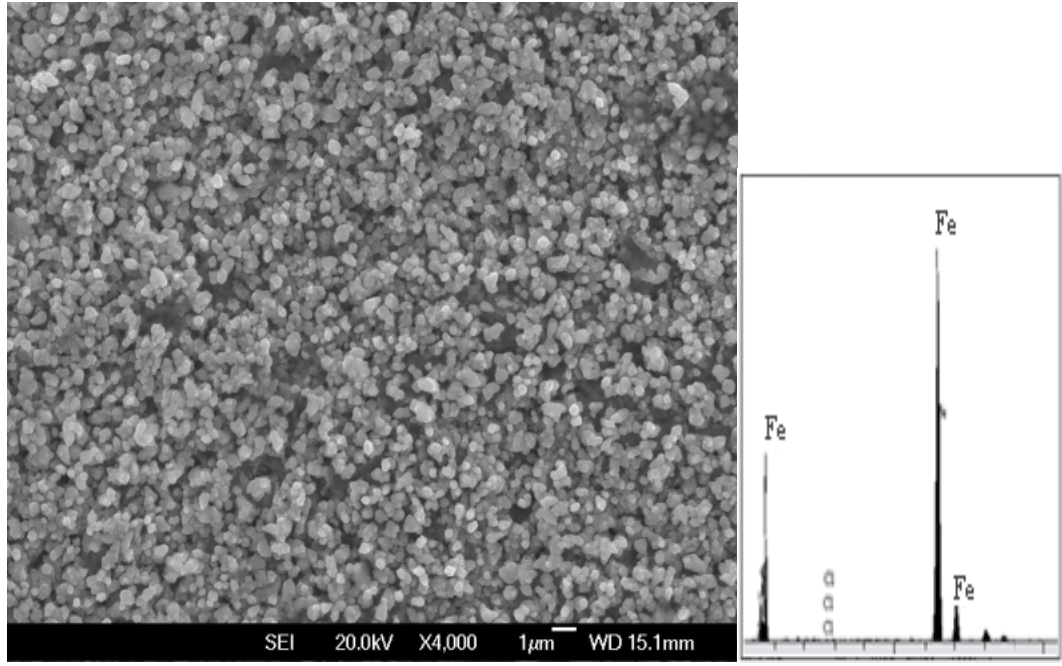
4.1.7.3. Fe ve *C. michiganensis* için kaydedilen SEM mikrografı ve EDX analizi



4.1.7.4. Fe ve *D. acidovorans* için kaydedilen SEM mikrografı ve EDX analizi



4.1.7.5. Fe ve N. Broth için kaydedilen SEM mikrografı ve EDX analizi



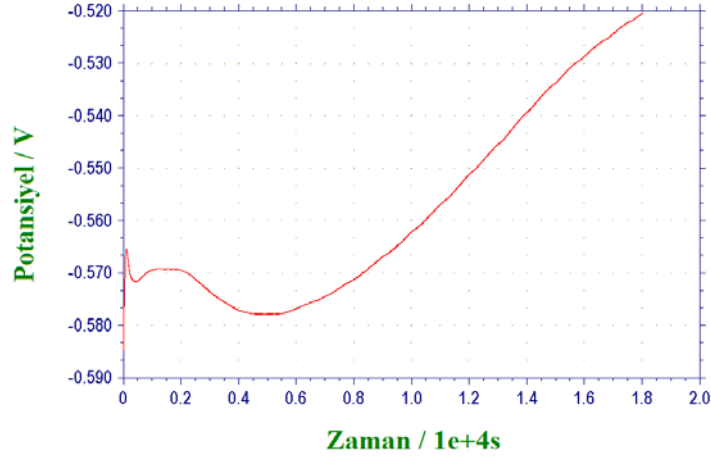
Çizelge 4.7. Fe'in bakterili ve bakterisiz ortamda EDS analizi ile bulunan oksijen ve klor oranları, 5 saat.

	<i>P. aeruginosa</i>	<i>A. eucrenophila</i>	<i>C. michinanensis</i>	<i>D. acidovorans</i>	N. Broth
O %	14,327	21,207	16,929	21,731	9,233
Cl %	0,293	0,368	0,191	0,128	0,059

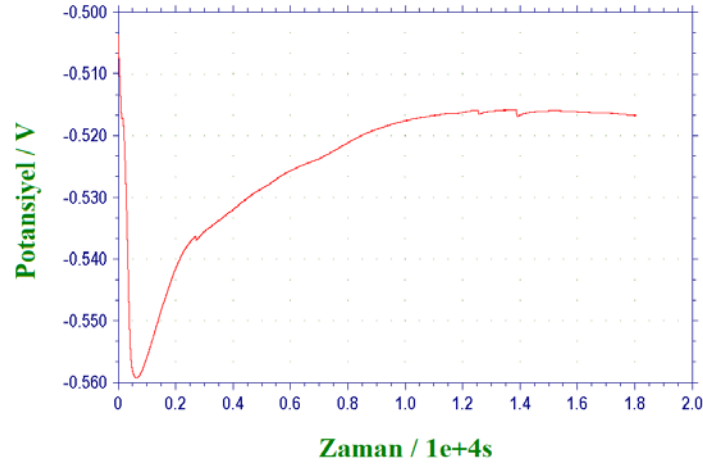
4.2. Co'm Mikrobiyal Korozyonunun İncelenmesi

4.2.1. Co'm bakterili ve bakterisiz ortamda kaydedilen OCP'nin grafikleri

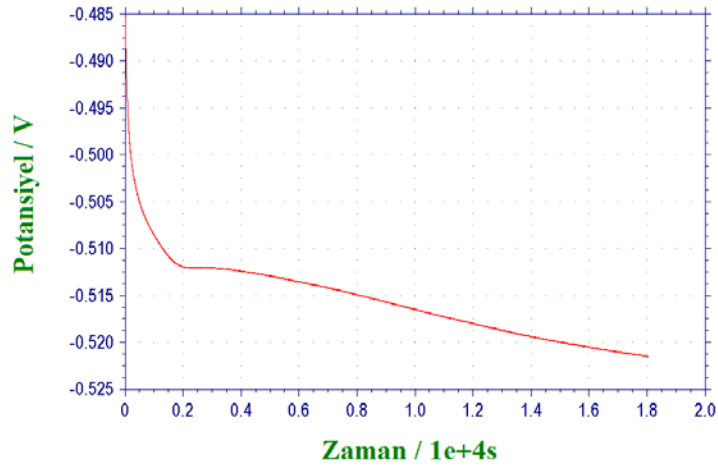
4.2.1.1. Co'm *P. aeruginosa* için kaydedilen OCP grafiği



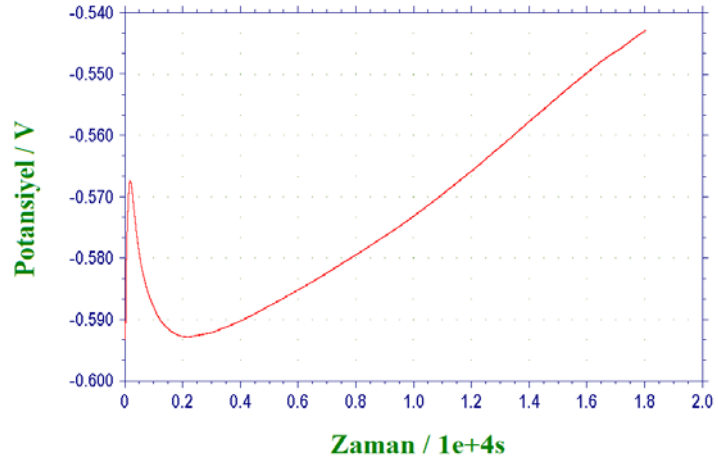
4.2.1.2. Co'm *A. eucrenophila* için kaydedilen OCP grafiği



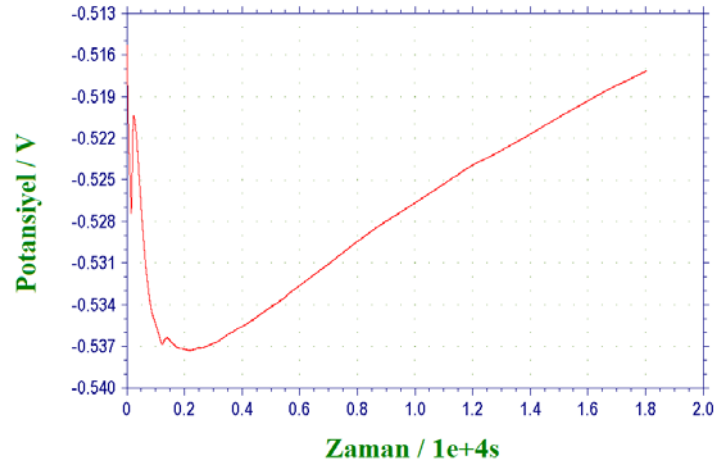
4.2.1.3. Co'm *C. michiganesis* için kaydedilen OCP grafiği



4.2.1.4. Co'm *D. acidovorans* için kaydedilen OCP grafiği



4.2.1.5. Co'm N. Broth için kaydedilen OCP grafiği

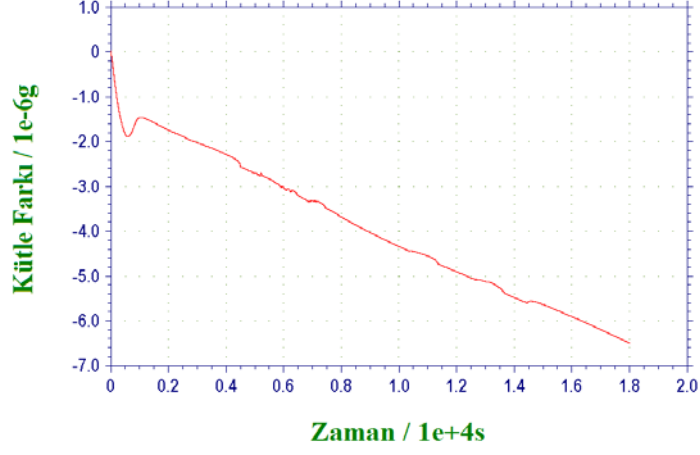


Çizelge 4.8. Co'nun, bakterili ve bakterisiz ortamdaki OCP değerleri, 5 saat.

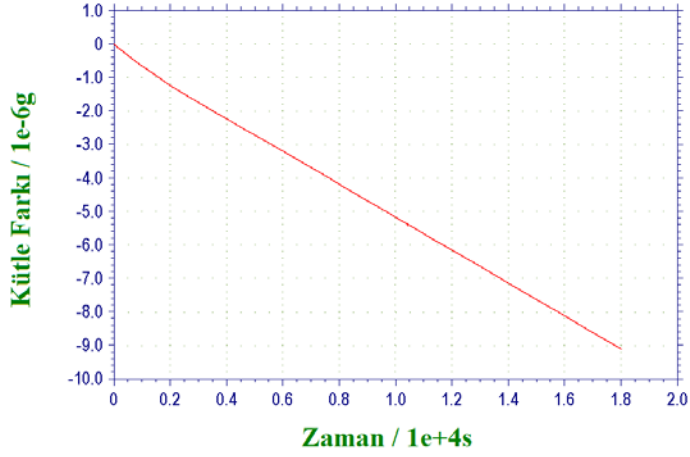
	<i>P. aeruginosa</i>	<i>A. eucrenophila</i>	<i>C. michinanensis</i>	<i>D. acidovorans</i>	N. Broth
OCP (V)	-0,5203	-0,5166	-0,5215	-0,5427	-0,5171

4.2.2. Co'm bakterili ve bakterisiz ortamda kaydedilen QCM'in grafikleri

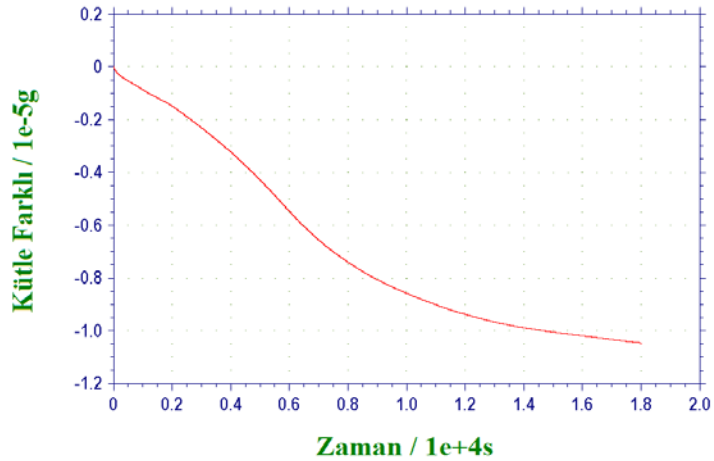
4.2.2.1. Co'm *P. aeruginosa* için kaydedilen QCM grafiği



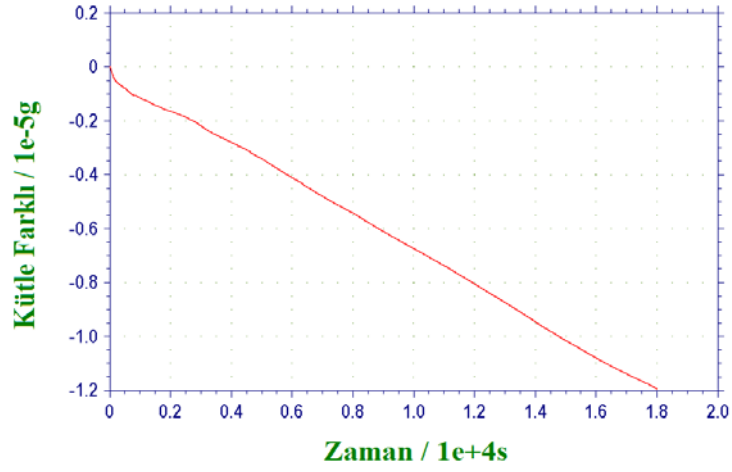
4.2.2.2. Co'm *A. eucrenophila* için kaydedilen QCM grafiği



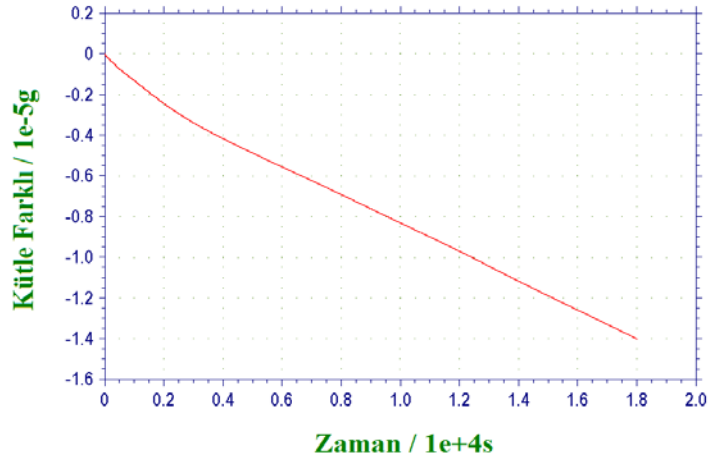
4.2.2.3. Co'm *C. michiganesis* için kaydedilen QCM grafiği



4.2.2.4. Co'm *D. acidovorans* için kaydedilen QCM grafiği



4.2.2.5. Co'm N. Broth için kaydedilen QCM grafiği

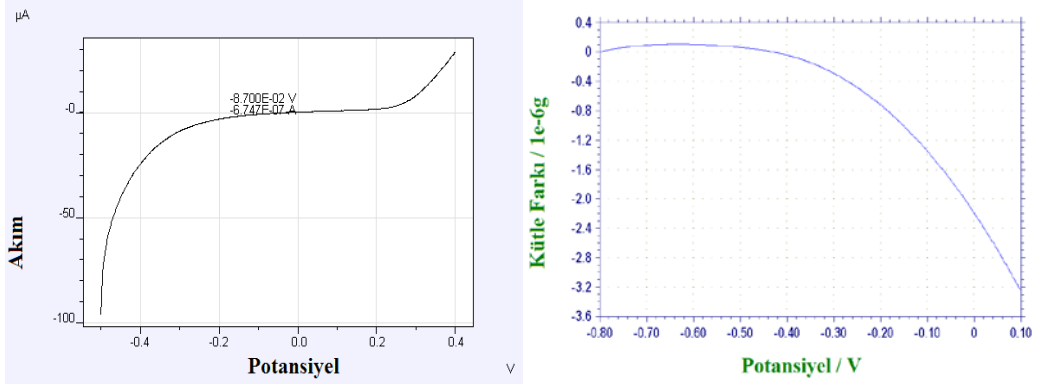


Çizelge 4.9. Co'nun, bakterili ve bakterisiz ortamdaki kütle kaybı ($\Delta_{\text{kütle}}$) değerleri, 5 saat.

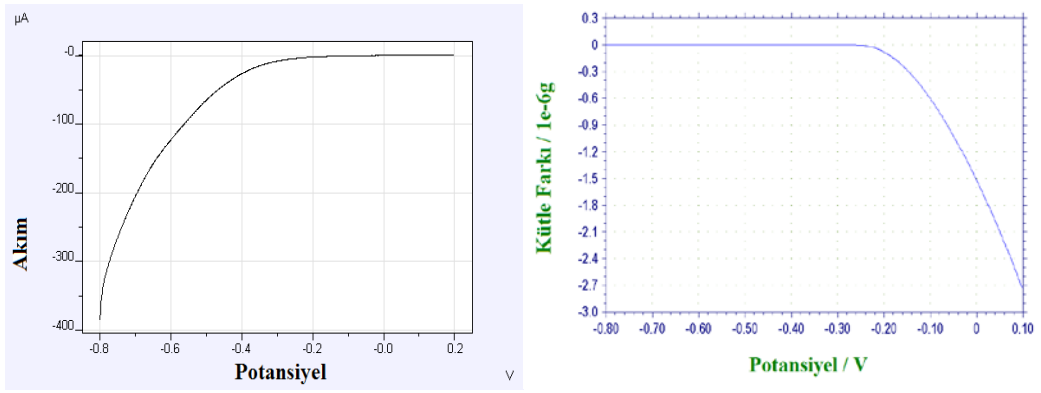
	<i>P. aeruginosa</i>	<i>A. eucrenophila</i>	<i>C. michinanensis</i>	<i>D. acidovorans</i>	N. Broth
$\Delta_{\text{kütle}}$ (μg)	-6,518	-9,142	-1,050	-1,198	-1,470

4.2.3. Co'm bakterili ve bakterisiz ortamda kaydedilen LSV'nin grafikleri

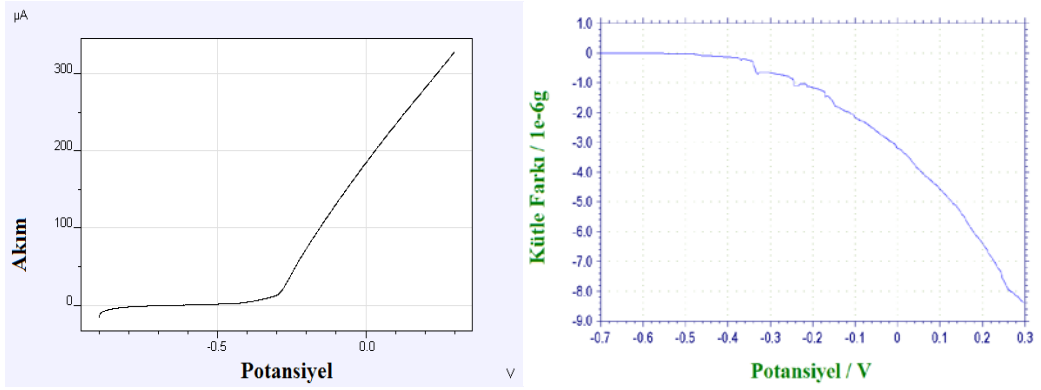
4.2.3.1. Co'm *P. aeruginosa* için kaydedilen LSV grafiği



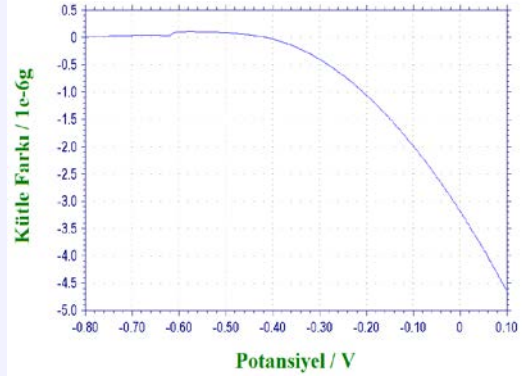
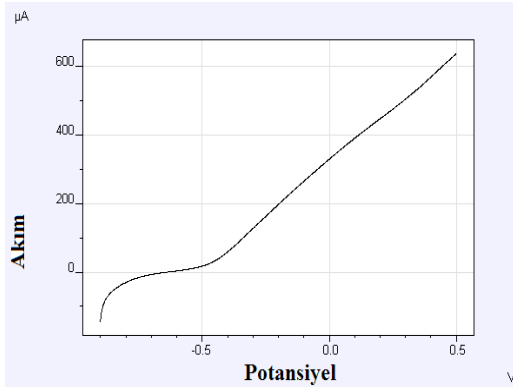
4.2.3.2. Co'm *A. eucrenophila* için kaydedilen LSV grafiği



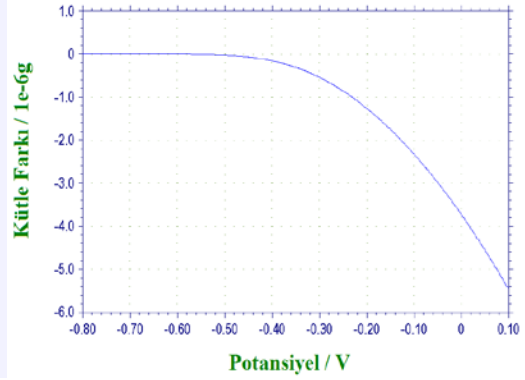
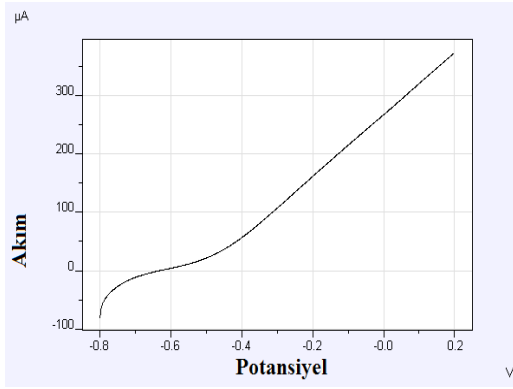
4.2.3.3. Co'm *C. michiganesis* için kaydedilen LSV grafiği



4.2.3.4. Co'm *D. acidovorans* için kaydedilen LSV grafiği



4.2.3.5. Co'm N. Broth için kaydedilen LSV grafiği

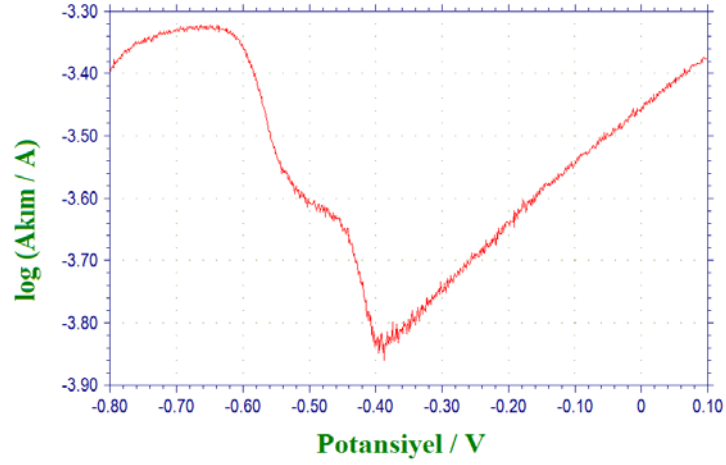


Çizelge 4.10. Co'nun kırılma potansiyeli (E_b) ve kütle kaybı ($\Delta_{\text{kütle}}$) değerleri, 1 saat.

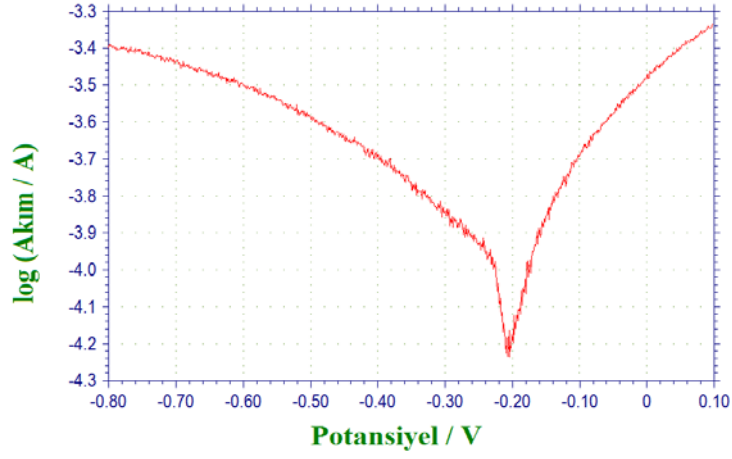
	<i>P. aeruginosa</i>	<i>A. eucrenophila</i>	<i>C. michinanensis</i>	<i>D. acidovorans</i>	N. Broth
E_b (V)	-0,3948	-0,2055	-0,4561	-0,4472	-0,4310
$\Delta_{\text{kütle}}$ (μg)	-3,257	-2,743	-8,437	-4,625	-5,427

4.2.4. Co'm bakterili ve bakterisiz ortamda kaydedilen Tafel'in grafikleri

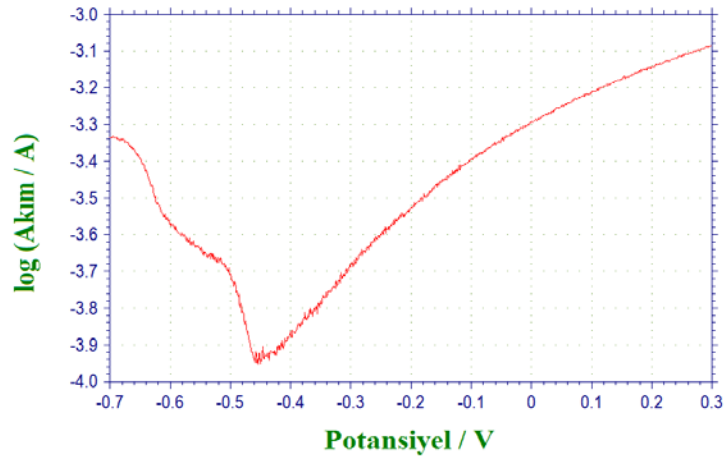
4.2.4.1. Co'm *P. aeruginosa* için kaydedilen Tafel grafiği



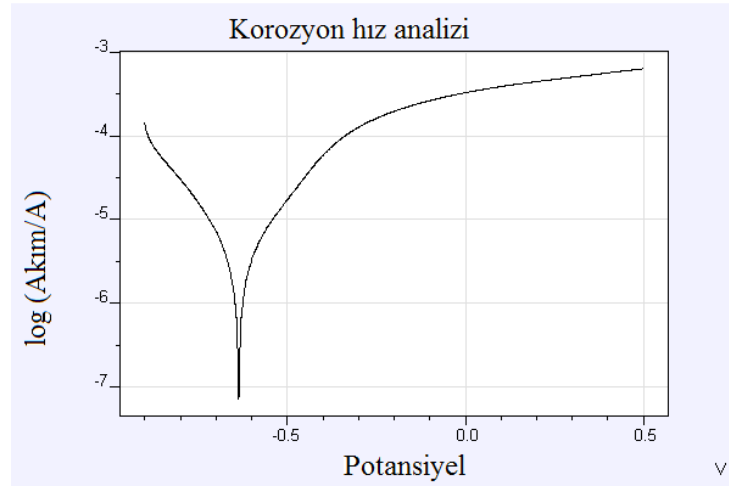
4.2.4.2. Co'm *A. eucrenophila* için kaydedilen Tafel grafiği



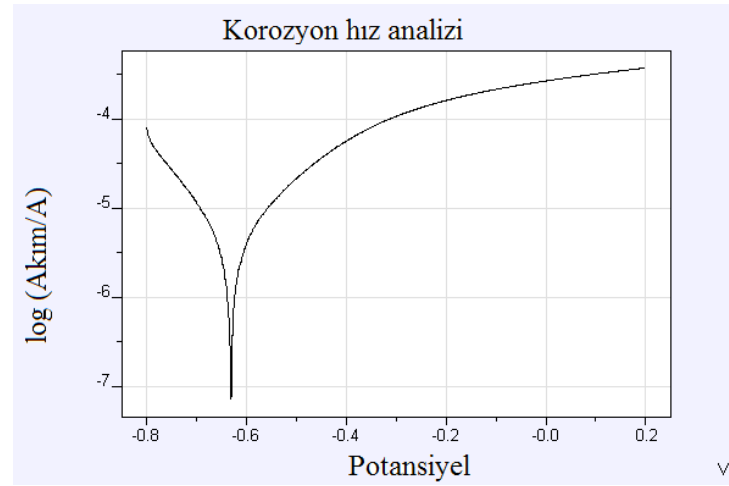
4.2.4.3. Co'm *C. michiganesis* için kaydedilen Tafel grafiği



4.2.4.4. Co'm *D. acidovorans* için kaydedilen Tafel grafiği



4.2.4.5. Co'm N. Broth için kaydedilen Tafel grafiği

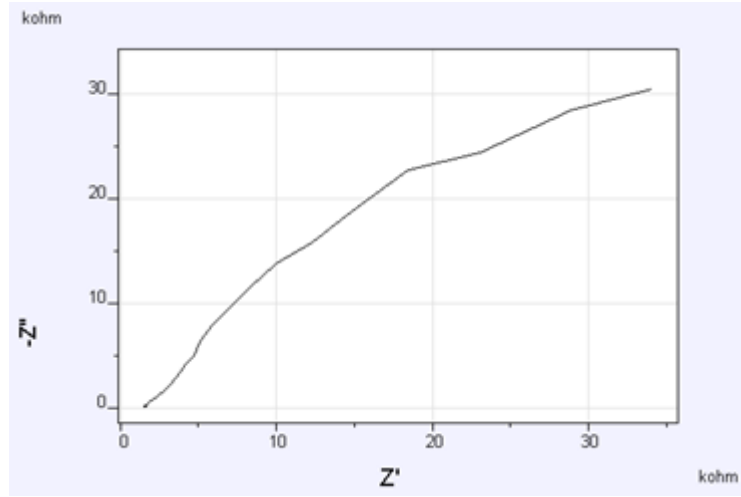


Çizelge 4.11. Co'nun, bakterili ve bakterisiz ortamları için Tafel grafiklerinden belirlenen korozyon parametreleri, 1 saat.

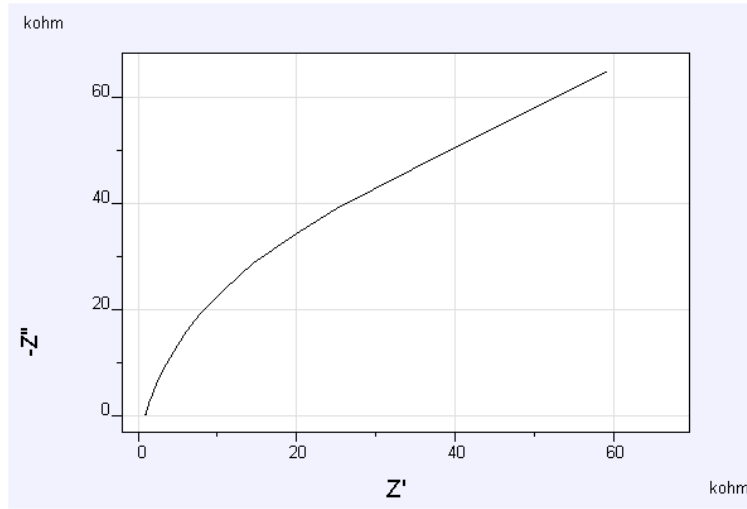
	<i>P. aeruginosa</i>	<i>A. eucrenophila</i>	<i>C. michinanensis</i>	<i>D. acidovorans</i>	N. Broth
E_{corr} (V)	-0,0285	-0,0045	-0,6115	-0,6365	-0,6314
i_{corr} (μ A)	0,2803	0,1989	0,07913	1,063	2,004
I_{corr} (μ A/cm ²)	1,43	1,015	0,4037	5,423	10,22
R_p (Ω)	$1,083e^5$	$1,631e^5$	$1,374e^5$	$1,126e^4$	7617
β_a (V/dec)	14,229	0,560	0,099	0,141	0,186
β_c (V/dec)	0,004679	0,248	0,138	0,115	0,143

4.2.5. Co'm bakterili ve bakterisiz ortamda kaydedilen EIS'nin grafikleri

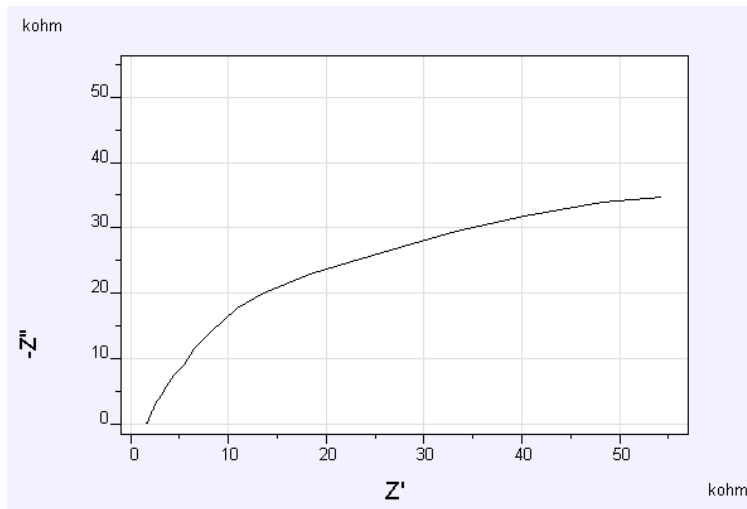
4.2.5.1. Co'm *P. aeruginosa* için kaydedilen EIS grafiği



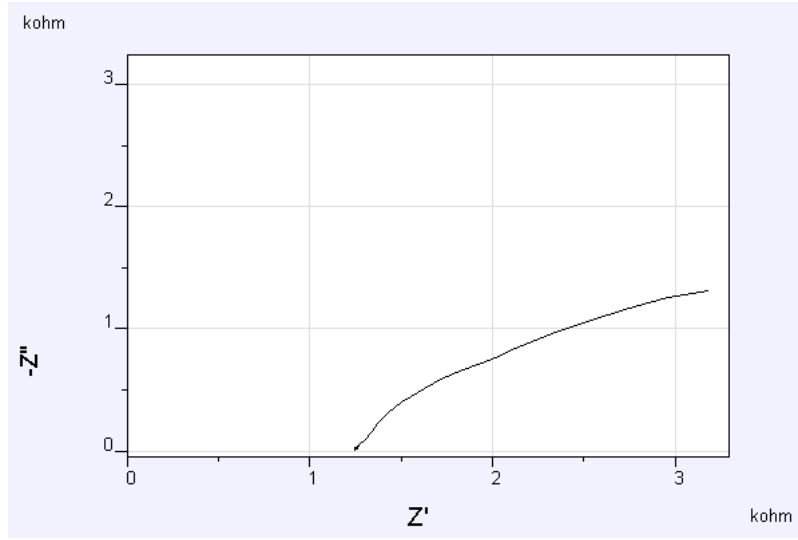
4.2.5.2. Co'm *A. eucrenophila* için kaydedilen EIS grafiği



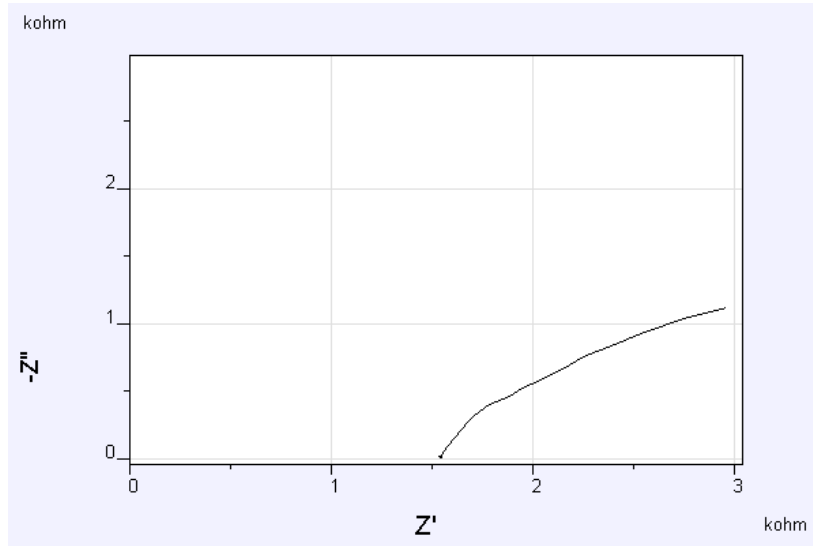
4.2.5.3. Co'm *C. michiganesis* için kaydedilen EIS grafiği



4.2.5.4. Co'm *D. acidovorans* için kaydedilen EIS grafiği



4.2.5.5. Co'm N. Broth için kaydedilen EIS grafiği



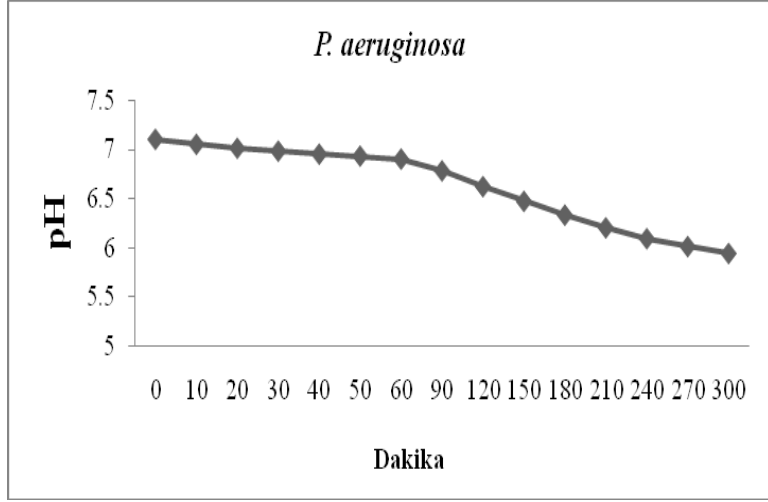
Çizelge 4.12. Co'nun, bakterili ve bakterisiz ortamlar için EIS spektrograflarından hesaplanan elektronik devre eşdeğeri parametreleri, 1 saat.

	R_1 (Ω)	Q_1 (μF)	η_1	R_2 (Ω)	Q_2 (μF)	η_2	R_3 (Ω)
<i>P. aeruginosa</i> *	1604	41,81	0,65554	200960			
<i>A. eucrenophila</i>	917,94	29,05	0,86751	1,4439e ⁰⁵			
<i>C. michinanensis</i> *	1660	19,735	0,81267	86490			
<i>D. acidovorans</i>	1242,2	463,53	0,62518	4930,7			
N. Broth*	1528	679,53	0,66073	4132			
<i>P. aeruginosa</i>	1616,2	39,105	0,75945	1,0033e ⁰⁵	19,276	0,86668	809,49
<i>A. eucrenophila</i>	917,94	29,012	0,86822	1,4179e ⁰⁵	340,8	0,97282	8,4e ⁻¹⁴
<i>C. michinanensis</i>	1657,6	38,97	0,99519	15453	33,477	0,75245	99191
<i>D. acidovorans</i>	1242,2	463,52	0,6253	4928,8	115,13	1	0,3909
N. Broth*	1536	638,55	0,71032	2054	4416,5	0,9928	2030
<i>P. aeruginosa</i> *	1591	2191,1	0,72877	4044	17,925	0,8	96481
<i>A. eucrenophila</i>	917,94	28,966	0,86911	1,3876e ⁵	479,82	0,9904	6,6e ⁻¹⁴
<i>C. michinanensis</i>	1657,6	18,476	0,83051	76362	160,43	1	32448
<i>D. acidovorans</i>	1242,2	463,49	0,62525	4929,5	482,69	0,28285	7,8e ⁻¹³
N. Broth*	1542	485,71	0,79933	1731	1362,2	0,903	2003

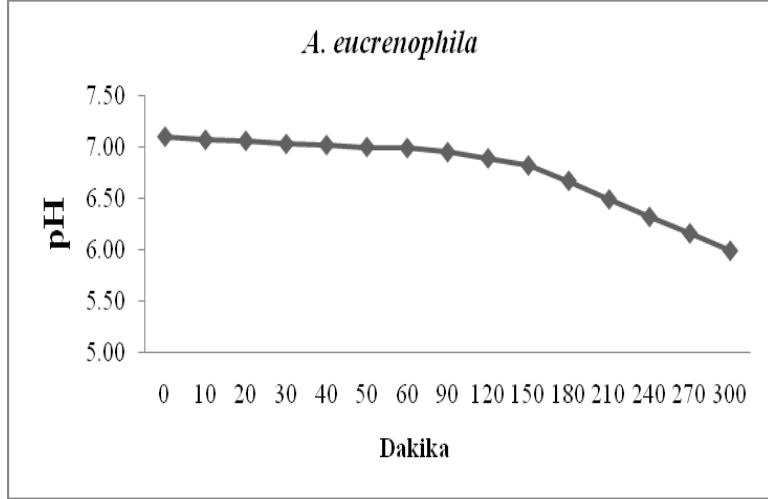
*: Zview

4.2.6. Co'nun Bakterili ve bakterisiz Ortamda pH'nın ölçülmesi

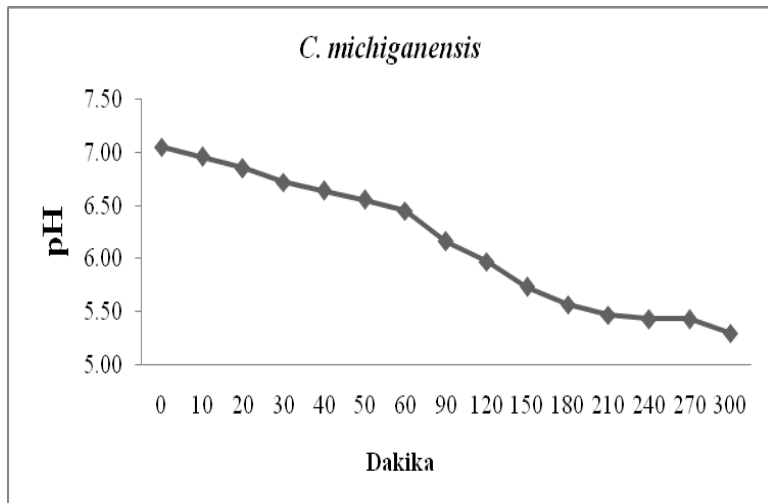
4.2.6.1. Co ve *P. aeruginosa* için çizilen pH grafiği



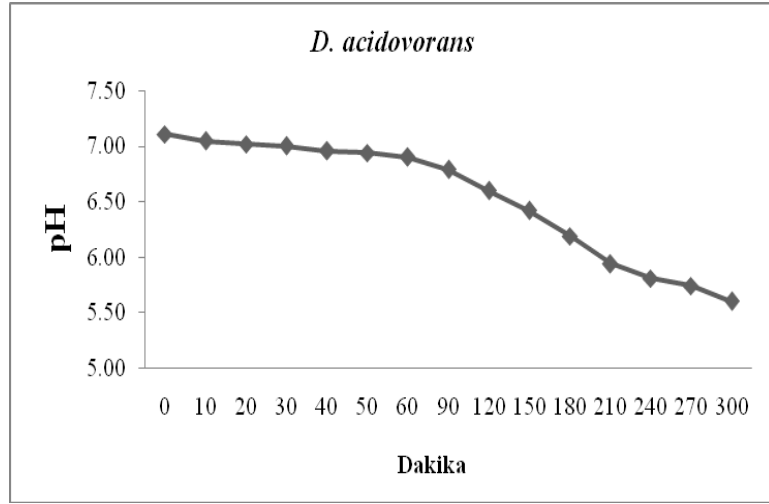
4.2.6.2. Co ve *A. eucrenophila* için çizilen pH grafiği



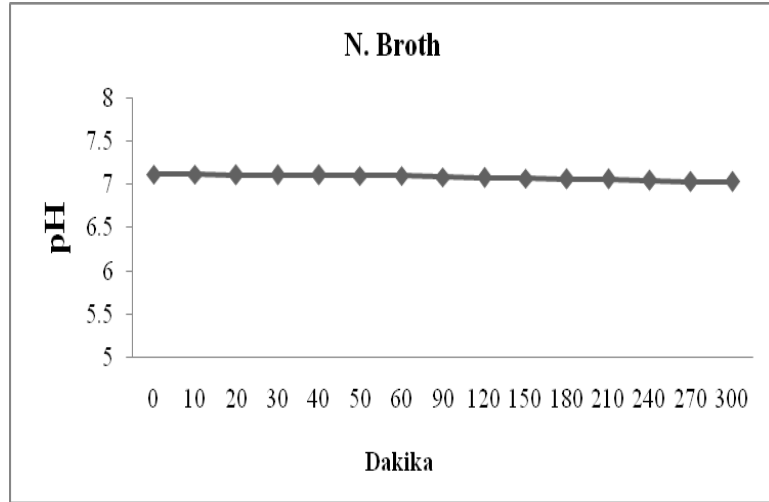
4.2.6.3. Co ve *A. eucrenophila* için çizilen pH grafiği



4.2.6.4. Co ve *D. acidovorans* için çizilen pH grafiği



4.2.6.5. Co ve N. Broth için çizilen pH grafiği

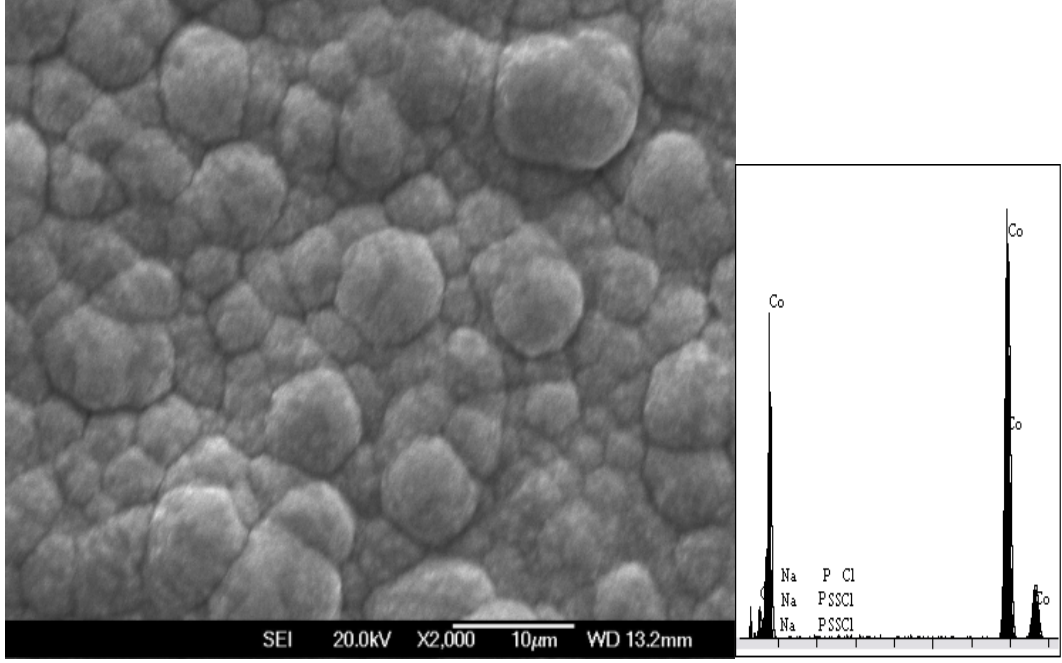


Çizelge 4.13. Co'nun bakterili ve bakterisiz ortamda 5 s sonunda ölçülen pH değerleri.

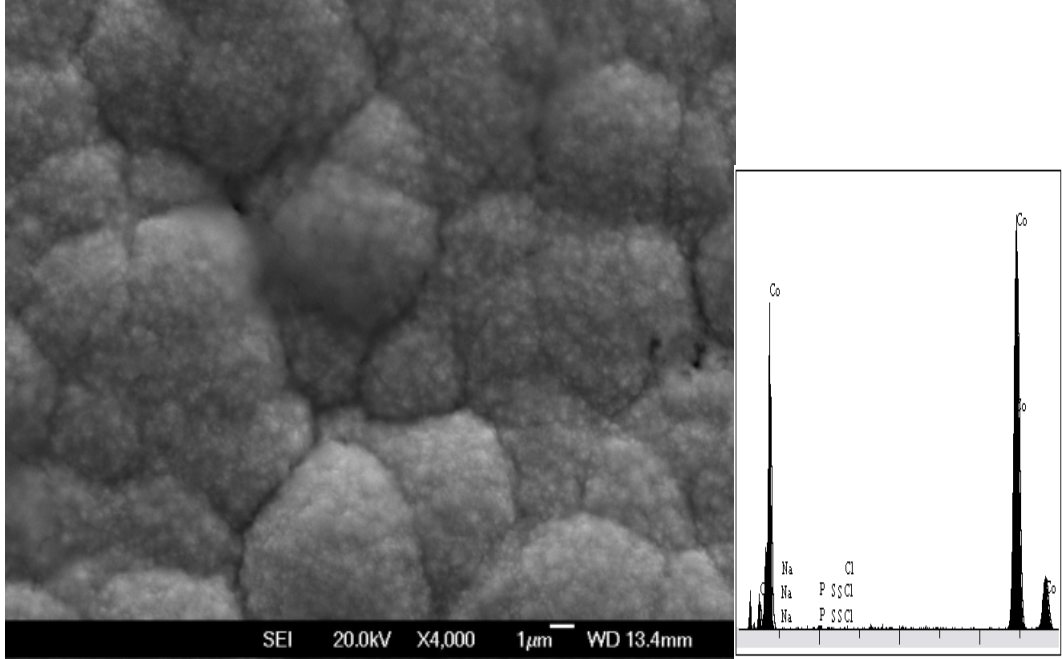
	<i>P. aeruginosa</i>	<i>A. eucrenophila</i>	<i>C. michinanensis</i>	<i>D. acidovorans</i>	N. Broth
pH	5,94	5,99	5,30	5,60	7,03

4.2.7. Co'm bakterili ve bakterisiz ortamlar için kaydedilen SEM mikrografları ve EDX Analizleri

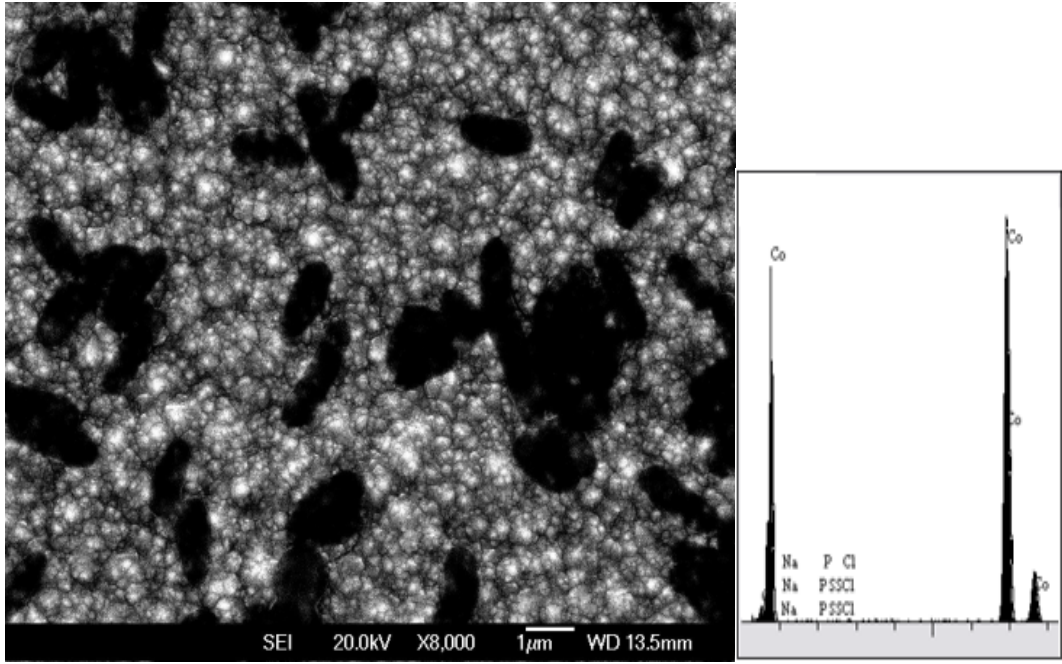
4.2.7.1. Co ve *P. aeruginosa* için kaydedilen SEM mikrografı ve EDX analizi



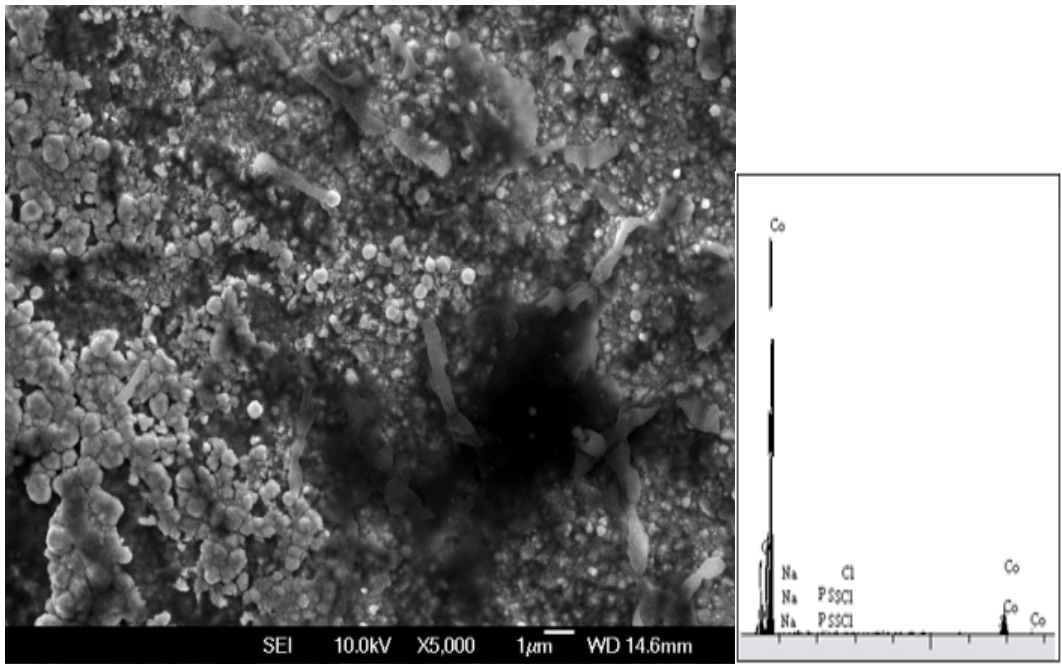
4.2.7.2. Co ve *A. eucrenophila* için kaydedilen SEM mikrografı ve EDX analizi



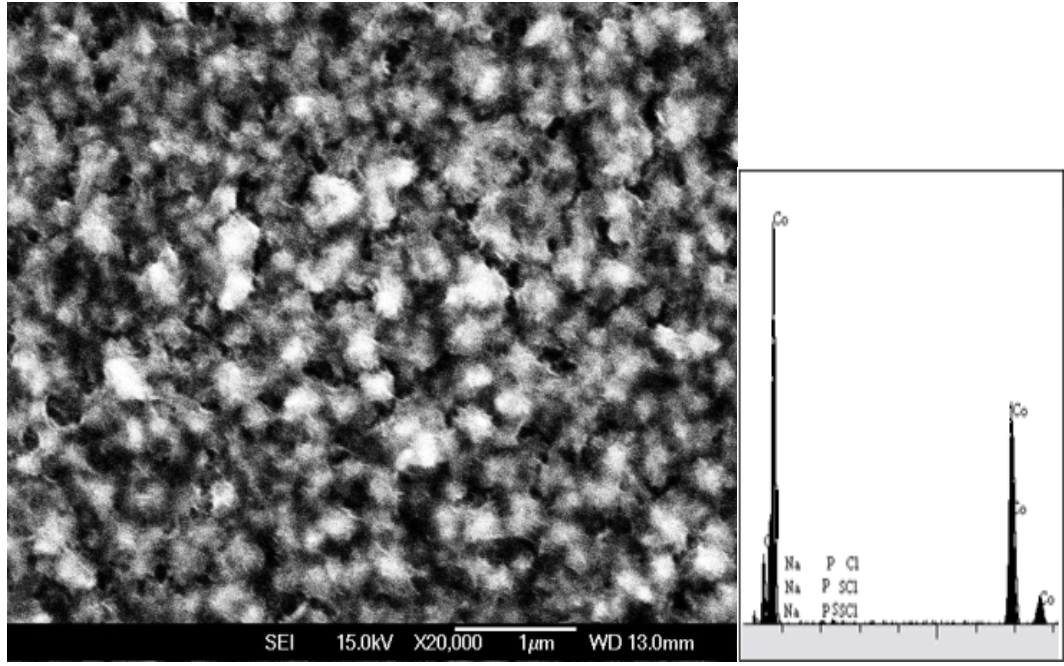
4.2.7.3. Co ve *C. michiganensis* için kaydedilen SEM mikrografı ve EDX analizi



4.2.7.4. Co ve *D. acidovorans* için kaydedilen SEM mikrografı ve EDX analizi



4.2.7.5. Co ve N. Broth için kaydedilen SEM mikrografı ve EDX analizi



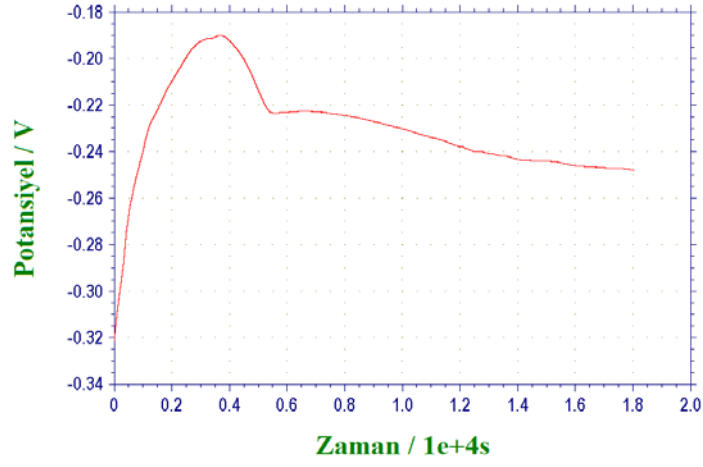
Çizelge 4.14. Co'nun bakterili ve bakterisiz ortamda EDS analizi ile bulunan oksijen ve klor oranları, 5 saat.

	<i>P. aeruginosa</i>	<i>A. eucrenophila</i>	<i>C. michinanensis</i>	<i>D. acidovorans</i>	N. Broth
O %	4,004	3,918	2,647	8,291	7,267
Cl %	0,134	0,130	0,100	0,107	0,112

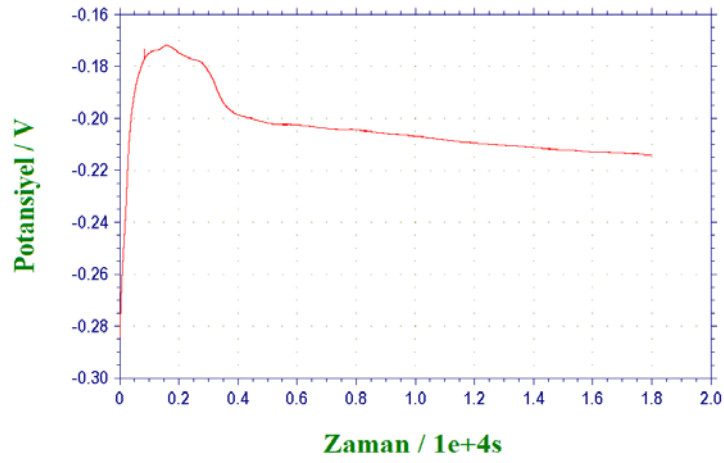
4.3. Ni'in Mikrobiyal Korozyonunun İncelenmesi

4.3.1. Ni'in bakterili ve bakterisiz ortamda kaydedilen OCP'nin grafikleri

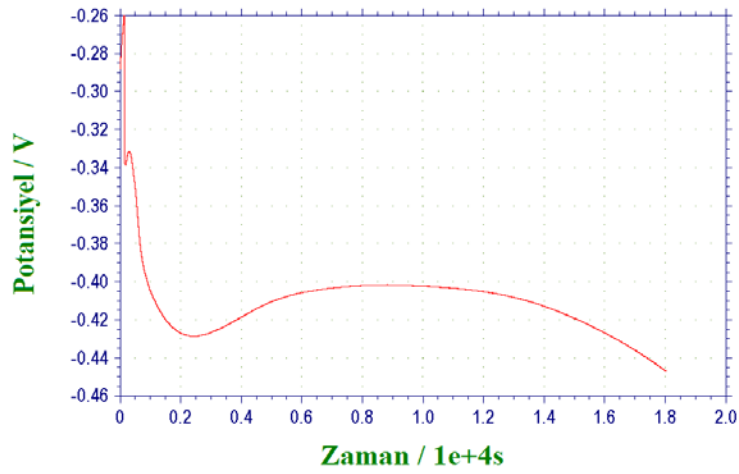
4.3.1.1. Ni'in *P. aeruginosa* için kaydedilen OCP grafiği



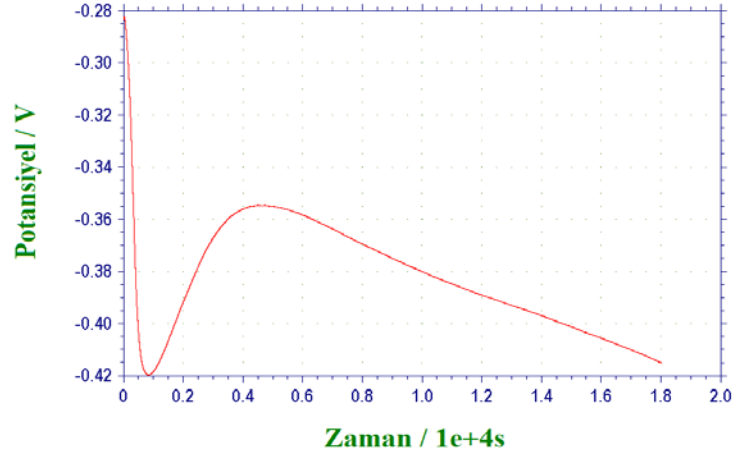
4.3.1.2. Ni'in *A. eucrenophila* için kaydedilen OCP grafiği



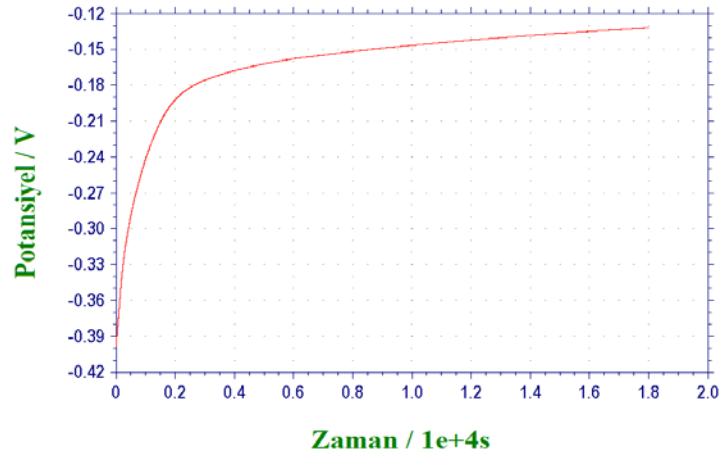
4.3.1.3. Ni'in *C. michiganesis* için kaydedilen OCP grafiği



4.3.1.4. Ni'in *D. acidovorans* için kaydedilen OCP grafiği



4.3.1.5. Ni'in N. Broth için kaydedilen OCP grafiği

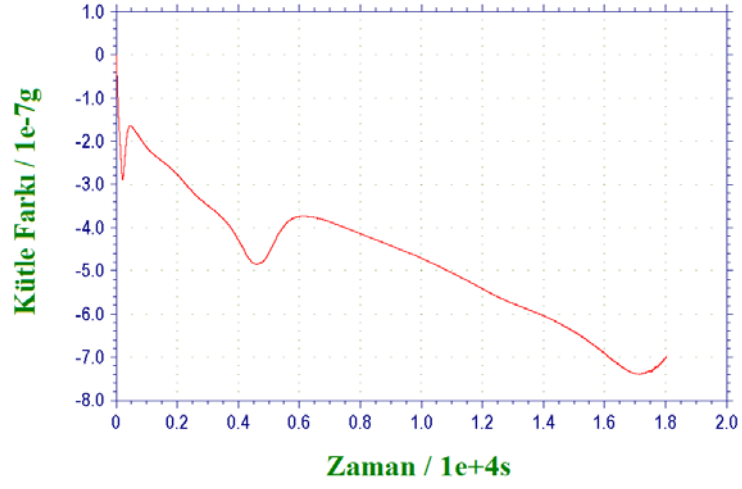


Çizelge 4.15. Ni'nin, bakterili ve bakterisiz ortamdaki OCP değerleri, 5 saat.

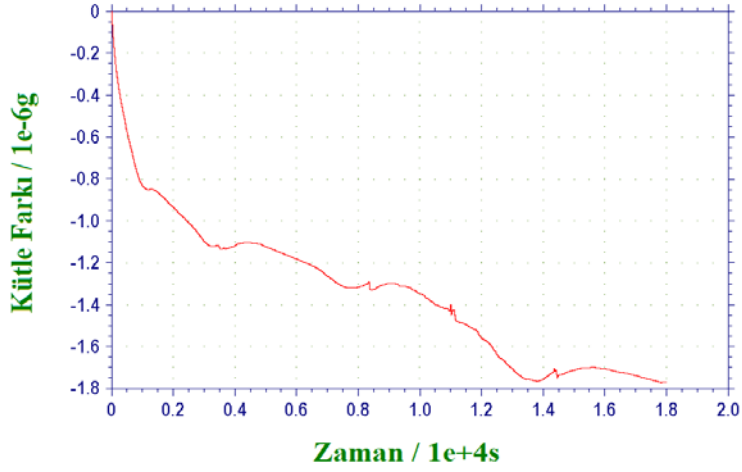
	<i>P. aeruginosa</i>	<i>A. eucrenophila</i>	<i>C. michinanensis</i>	<i>D. acidovorans</i>	N. Broth
OCP (V)	-0,2478	-0,2141	-0,4475	-0,4154	-0,1316

4.3.2. Ni'in bakterili ve bakterisiz ortamda kaydedilen QCM'in grafikleri

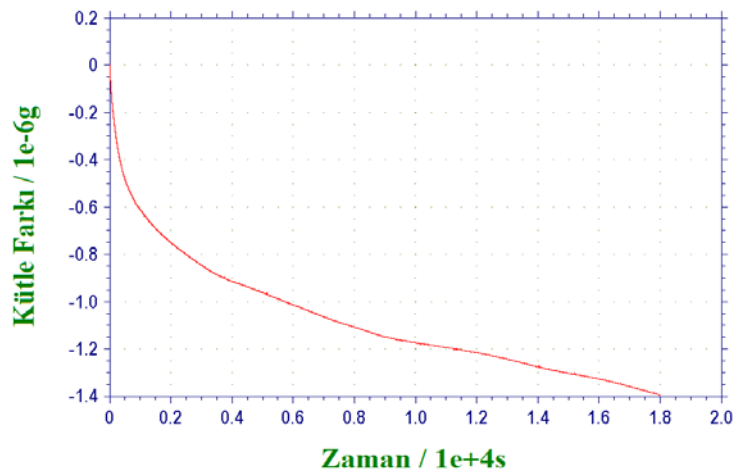
4.3.2.1. Ni'in *P. aeruginosa* için kaydedilen QCM grafiği



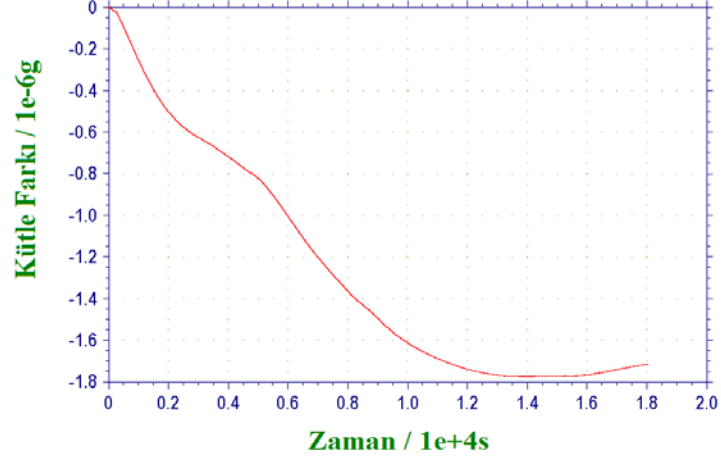
4.3.2.2. Ni'in *A. eucrenophila* için kaydedilen QCM grafiği



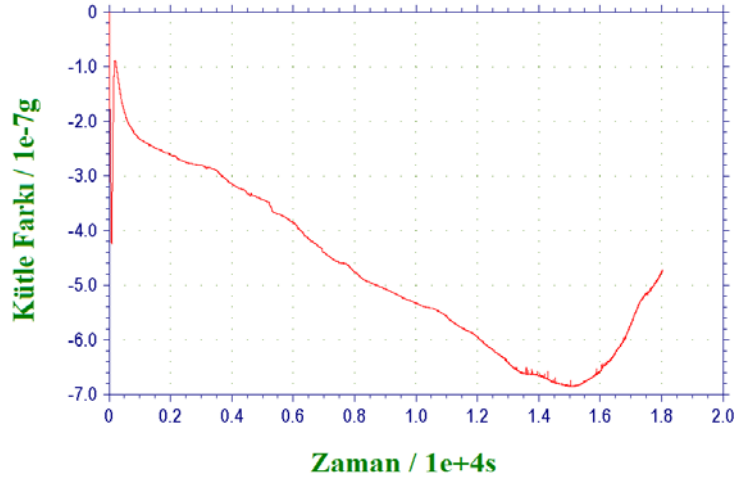
4.3.2.3. Ni'in *C. michiganensis* için kaydedilen QCM grafiği



4.3.2.4. Ni'in *D. acidovorans* için kaydedilen QCM grafiği



4.3.2.5. Ni'in N. Broth için kaydedilen QCM grafiği

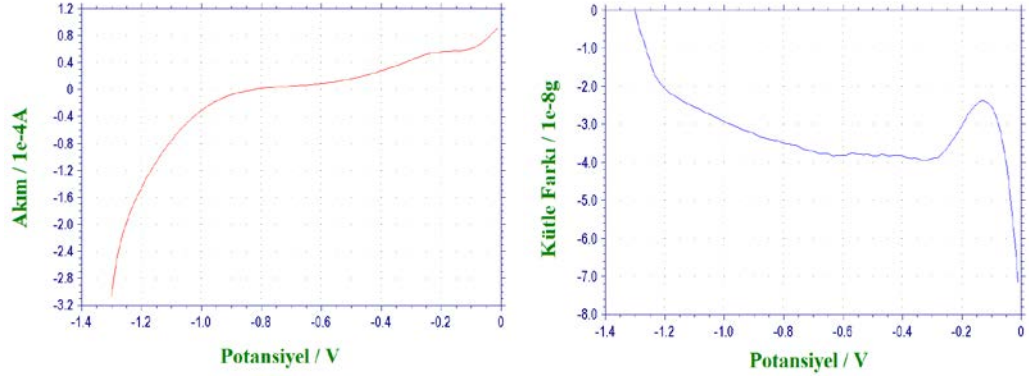


Çizelge 4.16. Ni'nin, bakterili ve bakterisiz ortamdaki kütle kaybı ($\Delta_{\text{kütle}}$) değerleri, 5 saat.

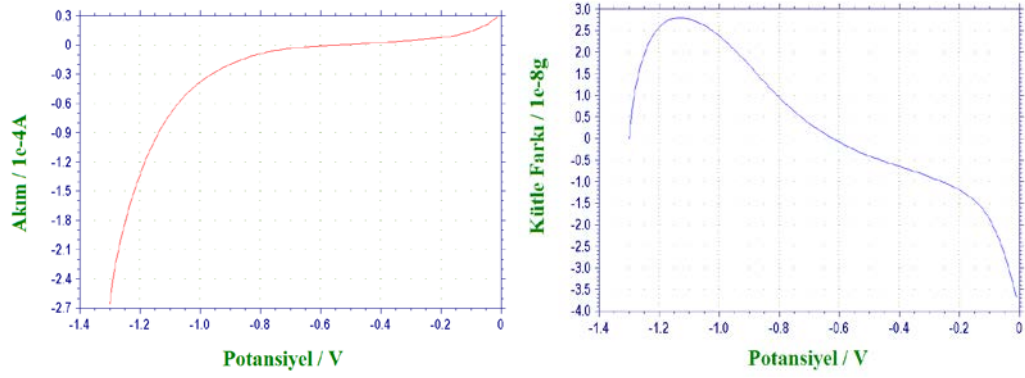
	<i>P. aeruginosa</i>	<i>A. eucrenophila</i>	<i>C. michinanensis</i>	<i>D. acidovorans</i>	N. Broth
$\Delta_{\text{Kütle}} (\mu\text{g})$	-0,7015	-1,770	-1,398	-1,716	-0,4744

4.3.3. Ni'in bakterili ve bakterisiz ortamda kaydedilen LSV'nin grafikleri

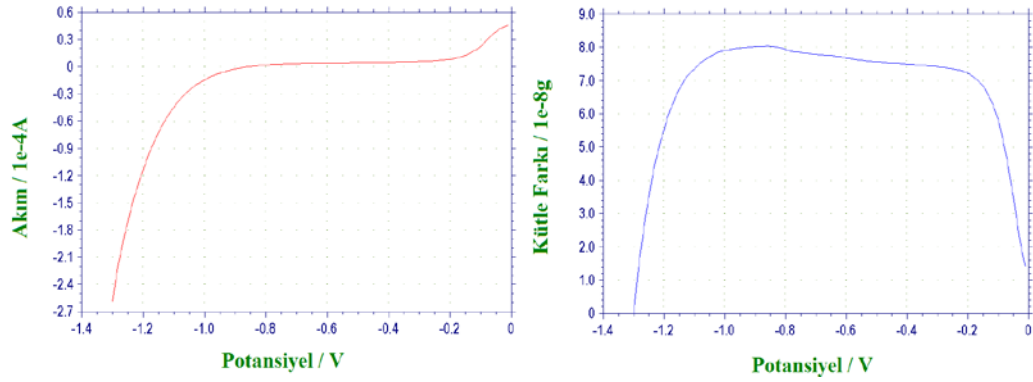
4.3.3.1. Ni'in *P. aeruginosa* için kaydedilen LSV grafiği



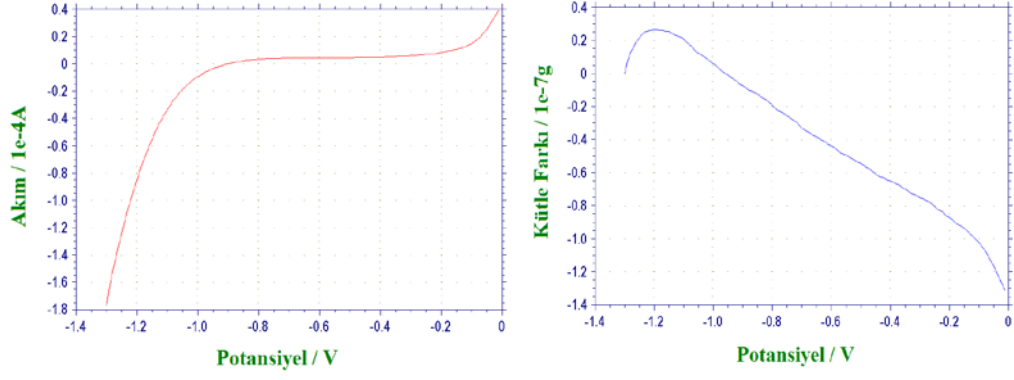
4.3.3.2. Ni'in *A. eucrenophila* için kaydedilen LSV grafiği



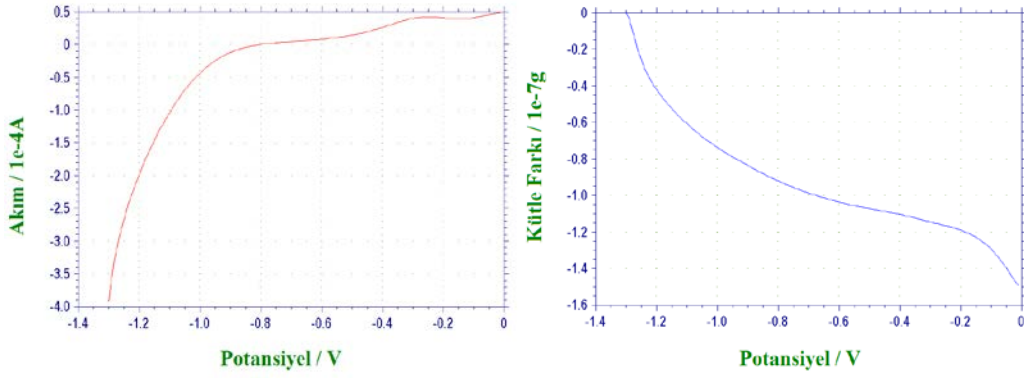
4.3.3.3. Ni'in *C. michiganensis* için kaydedilen LSV grafiği



4.3.3.4. Ni'in *D. acidovorans* için kaydedilen LSV grafiği



4.3.3.5. Ni'in N. Broth için kaydedilen LSV grafiği

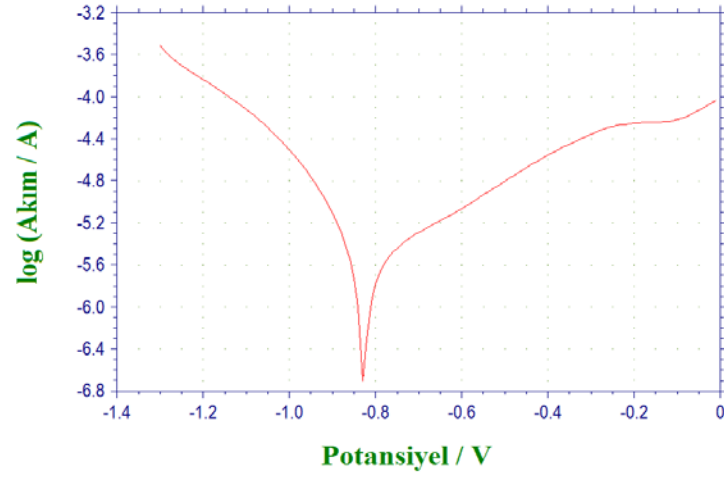


Çizelge 4.17. Ni'nin kırılma potansiyeli (E_b) ve kütle kaybı ($\Delta_{\text{kütle}}$) değerleri, 1 saat.

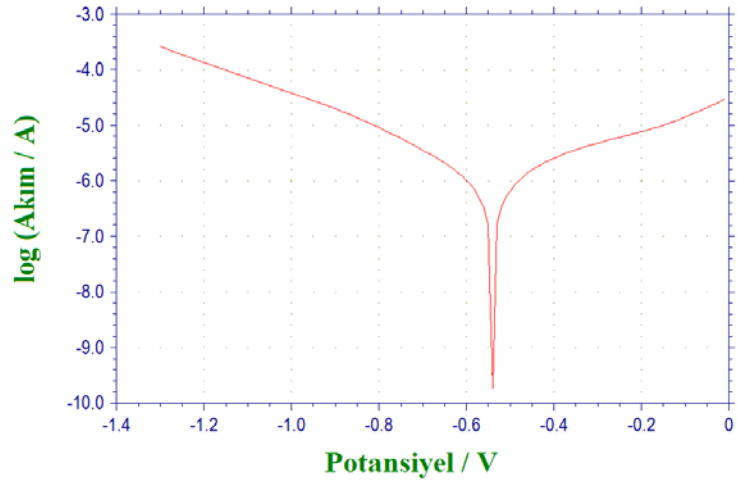
	<i>P. aeruginosa</i>	<i>A. eucrenophila</i>	<i>C. michinanensis</i>	<i>D. acidovorans</i>	N. Broth
E_b (V)	-0,0640	-0,0511	-0,1141	-0,0844	-0,0659
$\Delta_{\text{kütle}}$ (μg)	-0,0715	-0,0370	-0,0141	-0,1313	-0,1494

4.3.4. Ni'in bakterili ve bakterisiz ortamda kaydedilen Tafel'in grafikleri

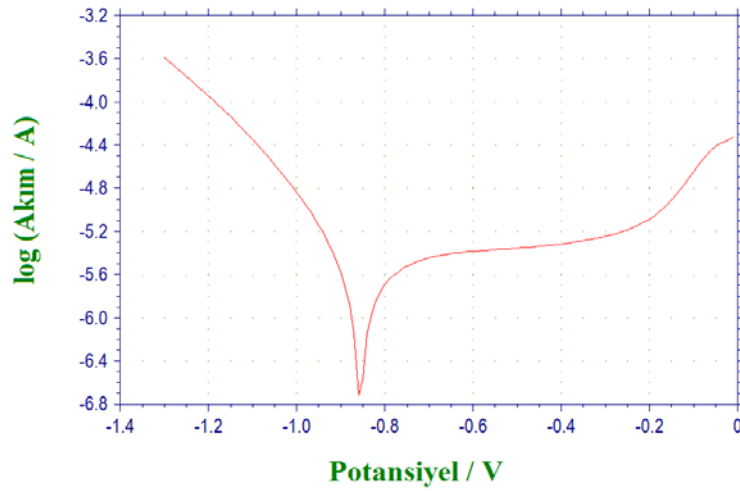
4.3.4.1. Ni'in *P. aeruginosa* için kaydedilen Tafel grafiği



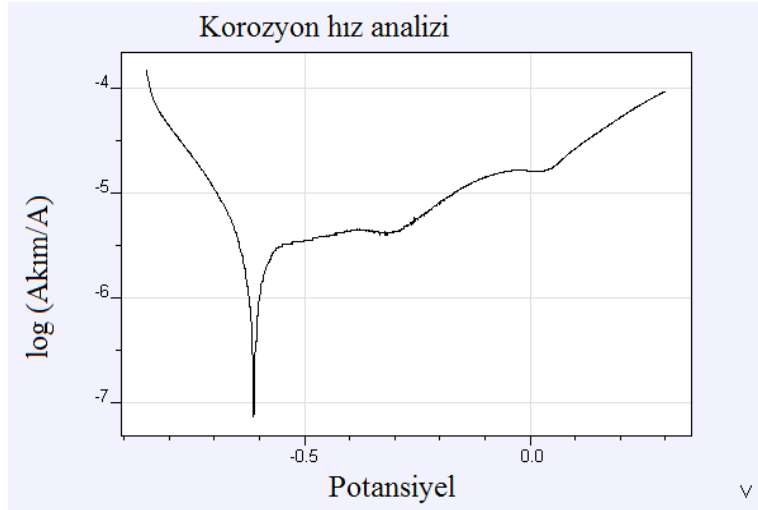
4.3.4.2. Ni'in *A. eucrenophila* için kaydedilen Tafel grafiği



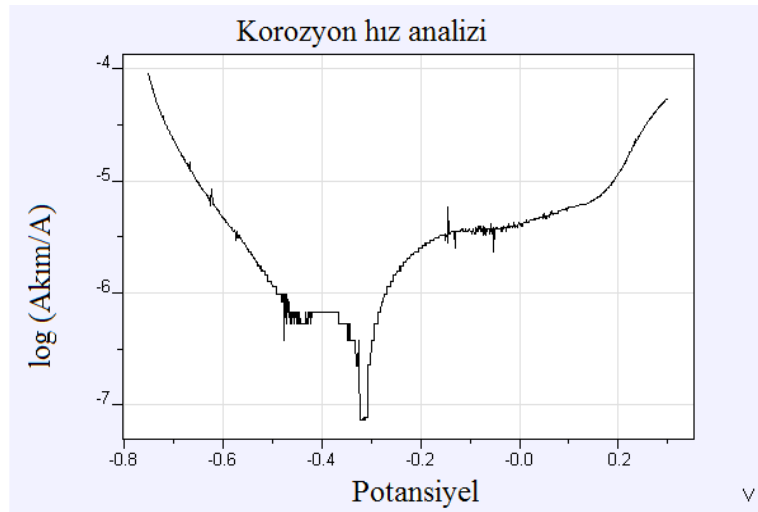
4.3.4.3. Ni'in *C. michiganensis* için kaydedilen Tafel grafiği



4.3.4.4. Ni'in *D. acidovorans* için kaydedilen Tafel grafiği



4.3.4.5. Ni'in N. Broth için kaydedilen Tafel grafiği

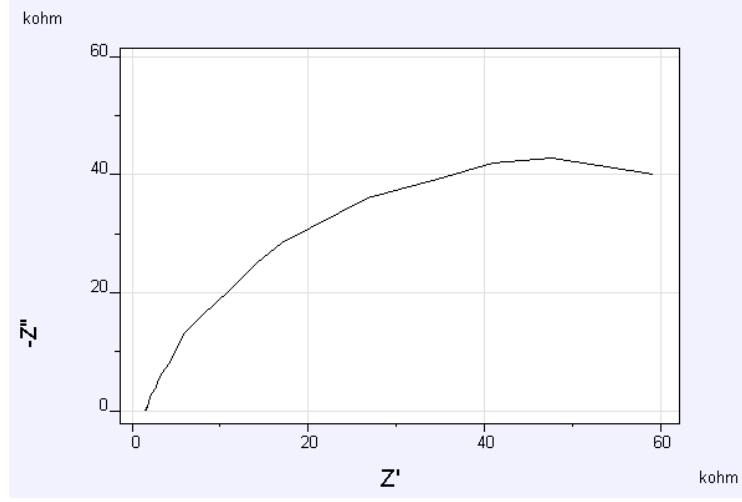


Çizelge 4.18. Ni'nin, bakterili ve bakterisiz ortamları için Tafel grafiklerinden belirlenen korozyon parametreleri, 1 saat.

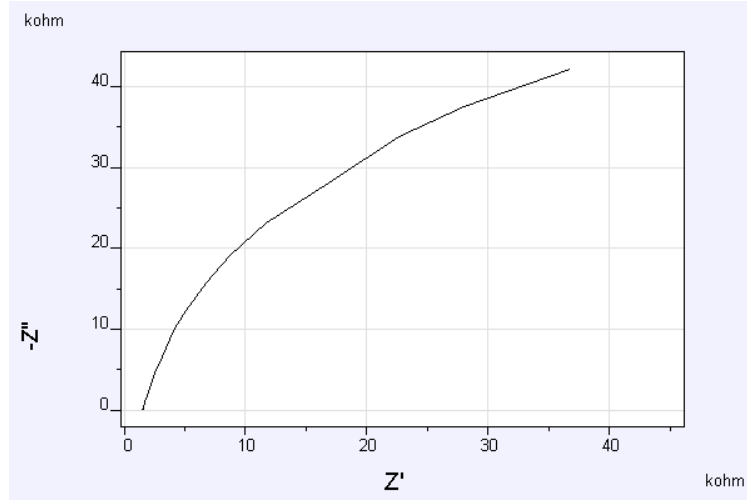
	<i>P. aeruginosa</i>	<i>A. eucrenophila</i>	<i>C. michinanensis</i>	<i>D. acidovorans</i>	N. Broth
E_{corr} (V)	-0,4915	-0,0025	-0,5155	-0,6125	-0,3147
i_{corr} (μ A)	0,1016	0,1532	0,2102	0,5752	0,217
I_{corr} (μ A/cm ²)	0,5184	0,7814	1,073	2,935	1,107
R_p (Ω)	$1,088e^5$	$1,291e^5$	$9,562e^4$	$1,315e^4$	$6,169e^4$
β_a (V/dec)	0,258	0,250	0,274	0,112	0,157
β_c (V/dec)	0,076	0,181	0,174	0,063	0,130

4.3.5. Ni'in bakterili ve bakterisiz ortamda kaydedilen EIS'nin grafikleri

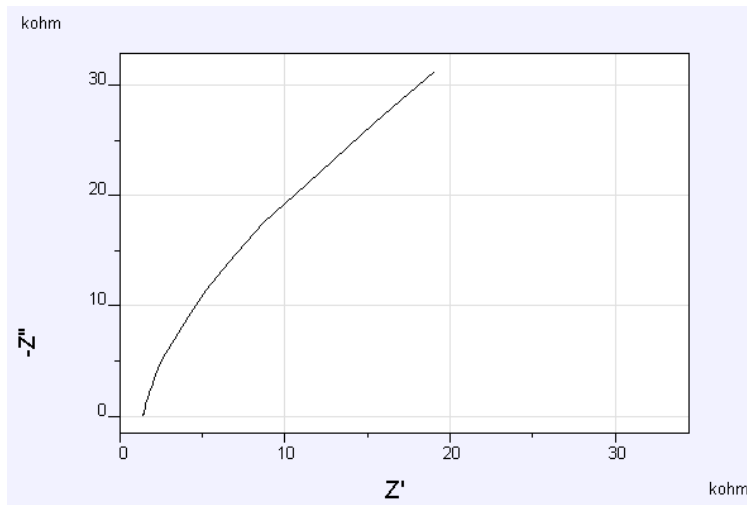
4.3.5.1. Ni'in *P. aeruginosa* için kaydedilen EIS grafiği



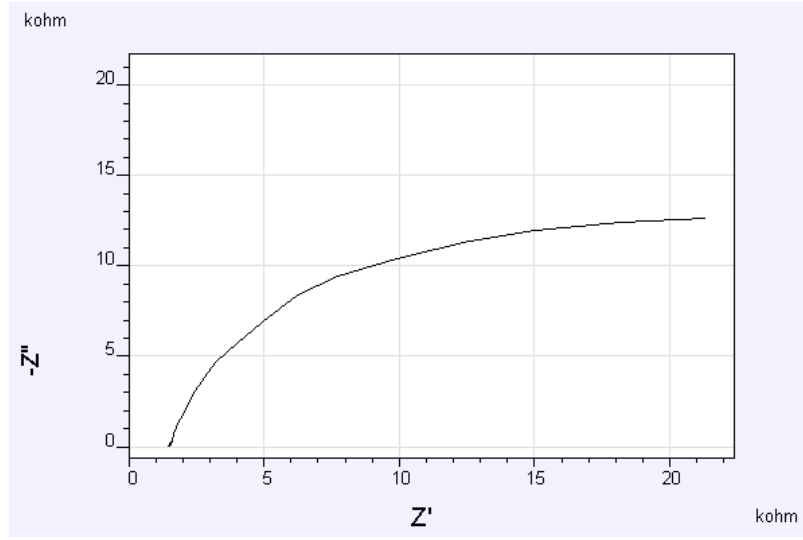
4.3.5.2. Ni'in *A. eucrenophila* için kaydedilen EIS grafiği



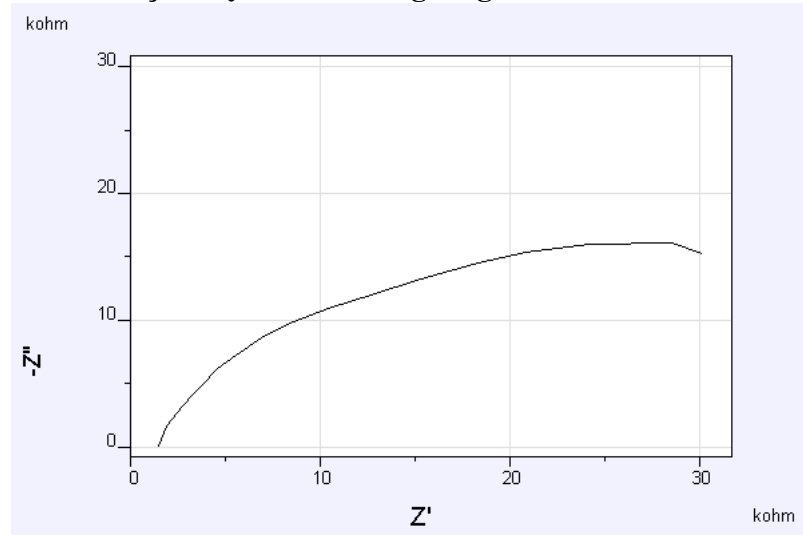
4.3.5.3. Ni'in *C. michiganensis* için kaydedilen EIS grafiği



4.3.5.4. Ni'in *D. acidovorans* için kaydedilen EIS grafiği



4.3.5.5. Ni'in N. Broth için kaydedilen EIS grafiği



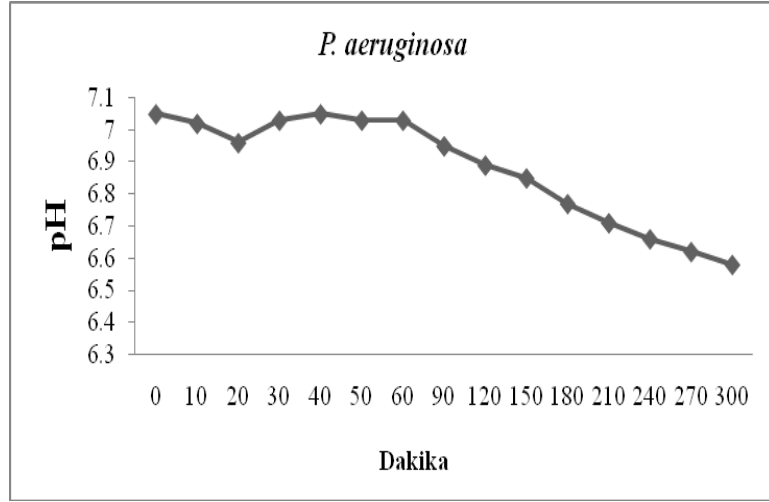
Çizelge 4.19. Ni'nin, bakterili ve bakterisiz ortamlar için EIS spektrograflarından hesaplanan elektronik devre eşdeğeri parametreleri, 1 saat.

	R_1 (Ω)	Q_1 (μF)	η_1	R_2 (Ω)	Q_2 (μF)	η_2	R_3 (Ω)
<i>P. aeruginosa</i>	1544,5	20,84	0,85797	1,0654e ⁰⁵			
<i>A. eucrenophila</i>	1535	28,689	0,87555	1,1138e ⁰⁵			
<i>C. michinanensis</i>	1397,5	50,667	0,86484	1,1357e ⁰⁵			
<i>D. acidovorans</i>	1497,5	59,03	0,84929	31618			
N. Broth*	1439	30,205	0,78201	42053			
<i>P. aeruginosa</i>	1544,5	20,84	0,85797	1,0654e ⁰⁵	7,22e ⁻³	0,99673	0,0138
<i>A. eucrenophila</i>	1535	69,284	0,80518	2,2711e ⁰⁵	46,533	0,95327	37396
<i>C. michinanensis</i>	1397,5	58,267	0,86293	1,311e ⁰⁵	307,53	1	3578,4
<i>D. acidovorans</i>	1497,5	89,325	0,80466	31158	156,24	1	5336,9
N. Broth	1484,6	37,834	0,8422	13617	74,494	0,82359	36222
<i>P. aeruginosa</i>	1544,5	20,841	0,85796	1,0654e ⁵	442,03	0,97251	6,4e ⁻¹⁴
<i>A. eucrenophila</i>	1535	27,785	0,88519	1,045e ⁰⁵	155,83	1	1e ⁰⁶
<i>C. michinanensis</i>	1397,5	48,752	0,88252	85410	84,379	1	40294
<i>D. acidovorans</i>	1497,5	56,466	0,86447	28340	500	0,91646	6798,1
N. Broth	1484,6	25,633	0,83033	30329	116,54	0,9248	16932

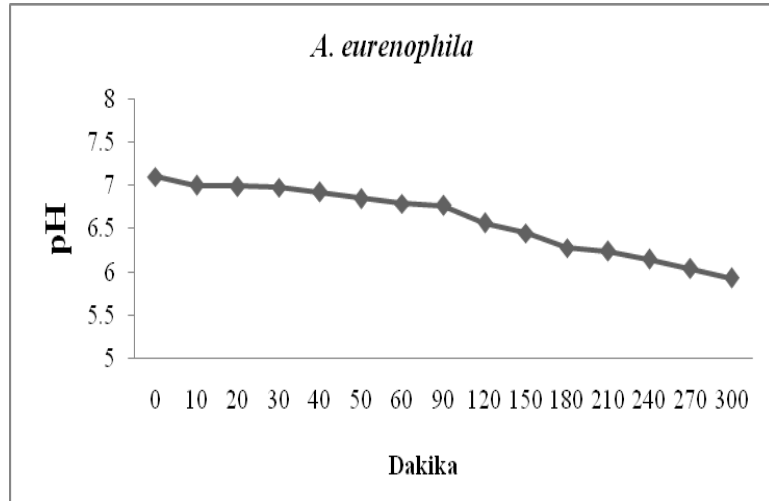
*: Zview

4.3.6. Ni'in Bakterili ve bakterisiz Ortamda pH'nın ölçülmesi

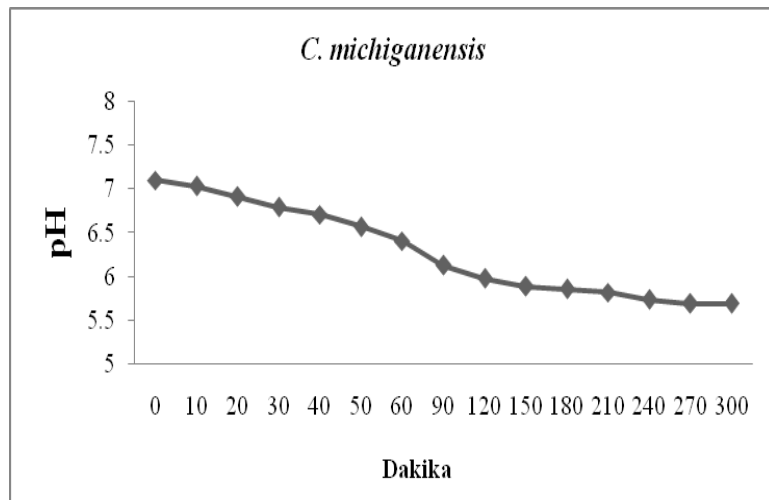
4.3.6.1. Ni ve *P. aeruginosa* için çizilen pH grafiği



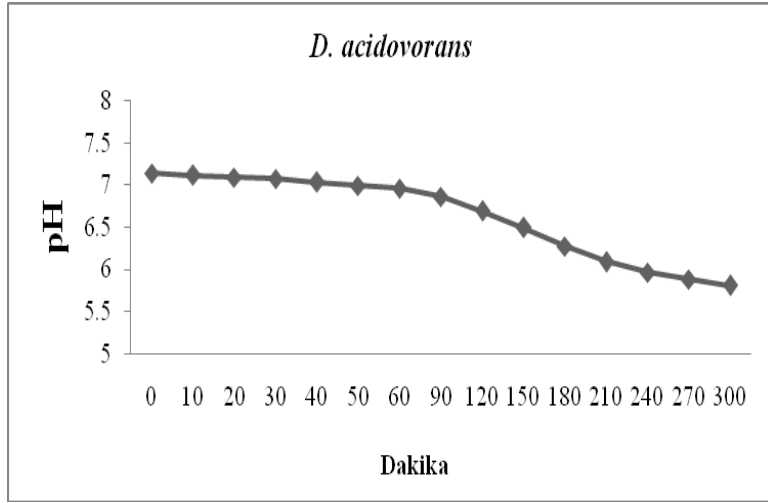
4.3.6.2. Ni ve *A. eurenophila* için çizilen pH grafiği



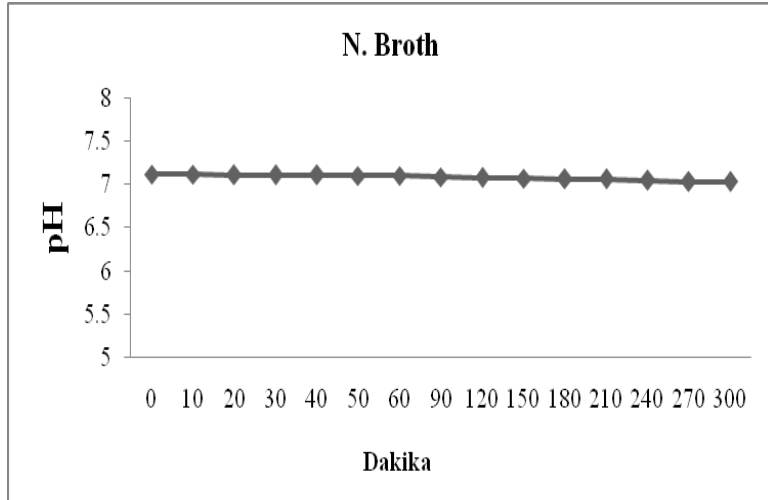
4.3.6.3. Ni ve *C. michiganensis* için çizilen pH grafiği



4.3.6.4. Ni ve *D. acidovorans* için çizilen pH grafiği



4.3.6.5. Ni ve N. Broth için çizilen pH grafiği

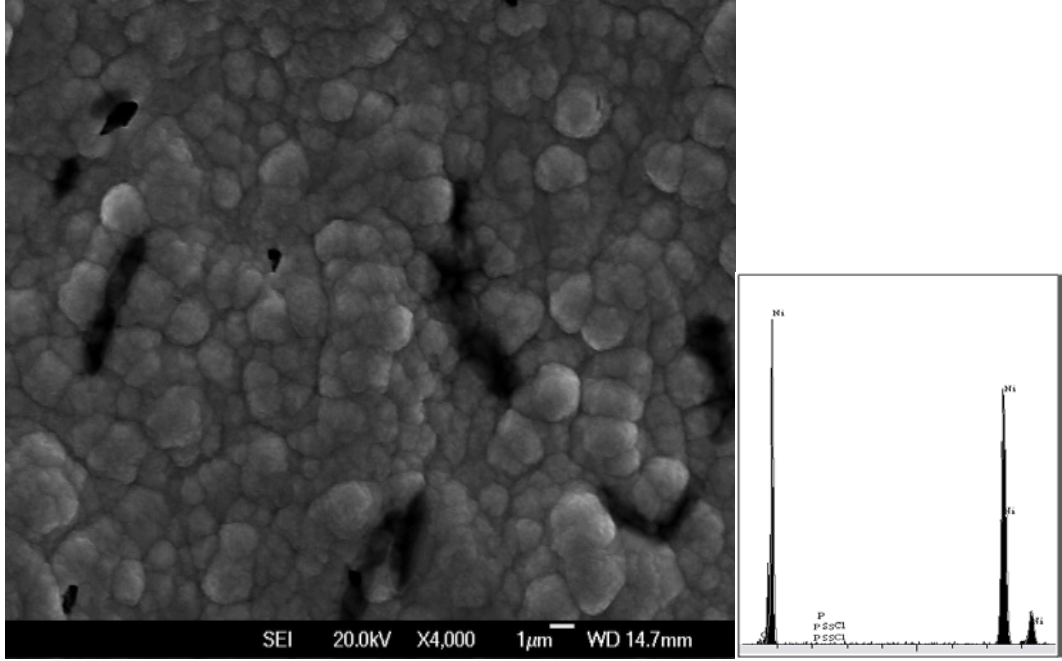


Çizelge 4.20. Ni'nin bakterili ve bakterisiz ortamda 5 s sonunda ölçülen pH değerleri.

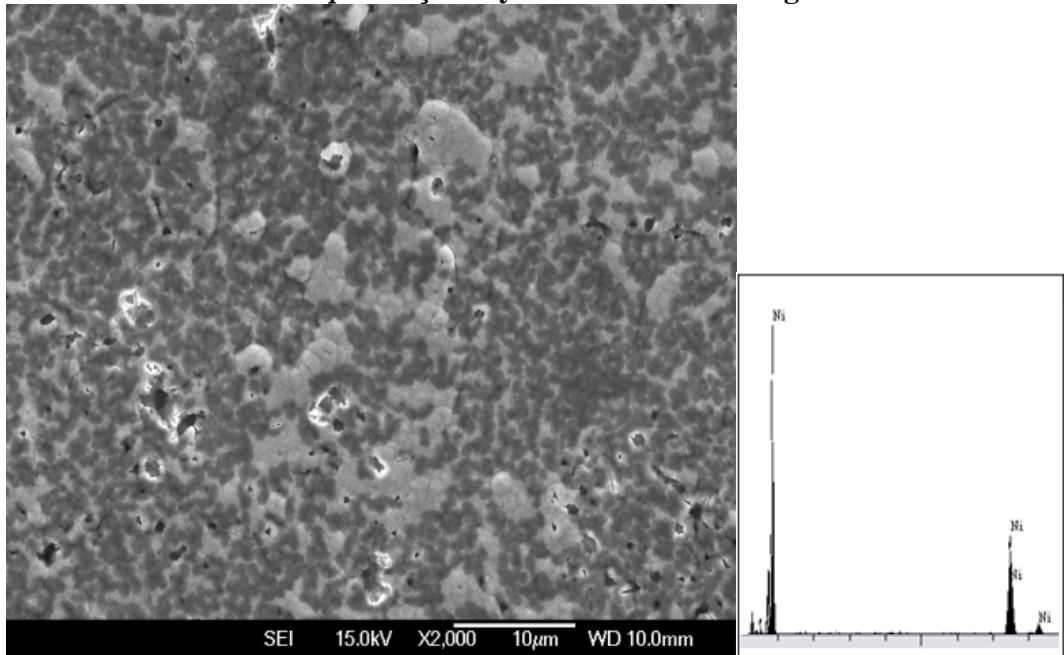
	<i>P. aeruginosa</i>	<i>A. eucrenophila</i>	<i>C. michinanensis</i>	<i>D. acidovorans</i>	N. Broth
pH	6,58	5,93	5,69	5,81	7,02

4.3.7. Ni'in bakterili ve bakterisiz ortamlar için kaydedilen SEM mikrografları ve EDX Analizleri

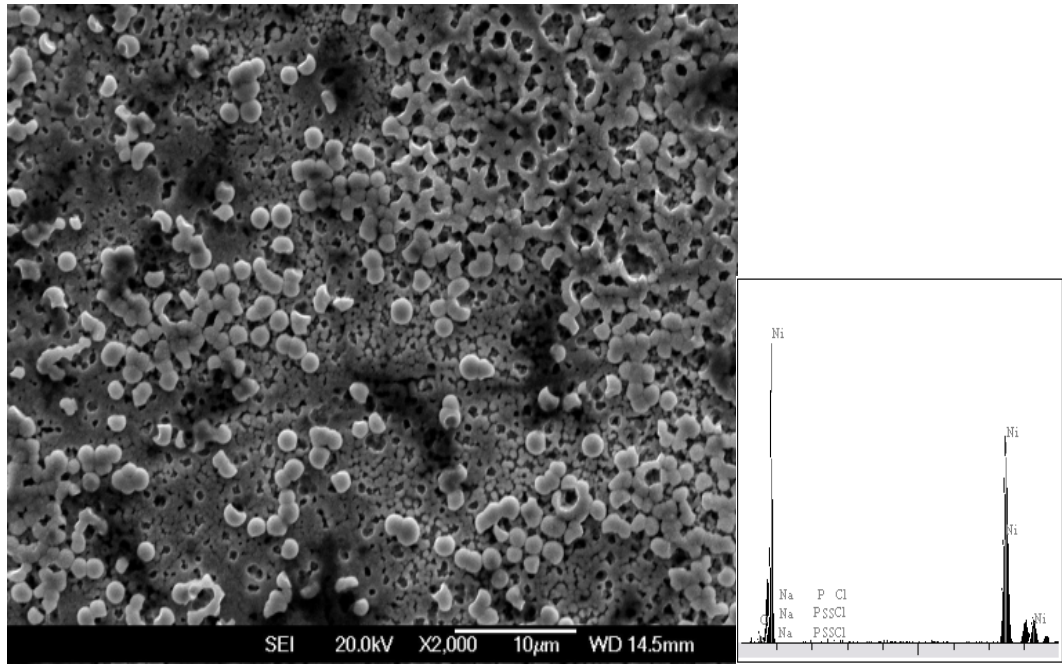
4.3.7.1. Ni ve *P. aeruginosa* için kaydedilen SEM mikrografı ve EDX analizi



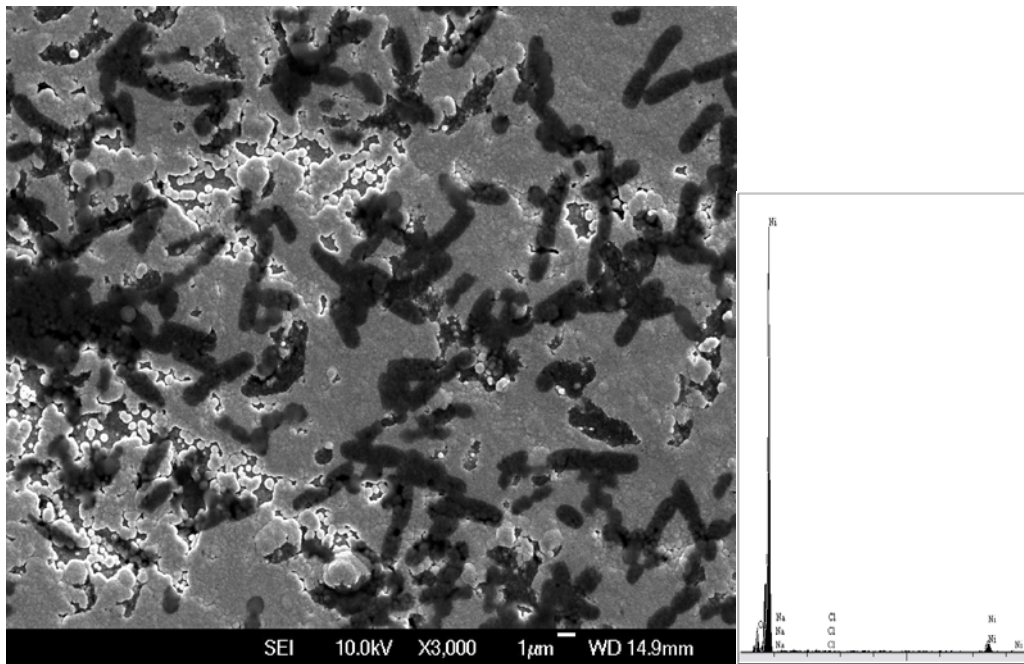
4.3.7.2. Ni ve *A. eucrenophila* için kaydedilen SEM mikrografı ve EDX analizi



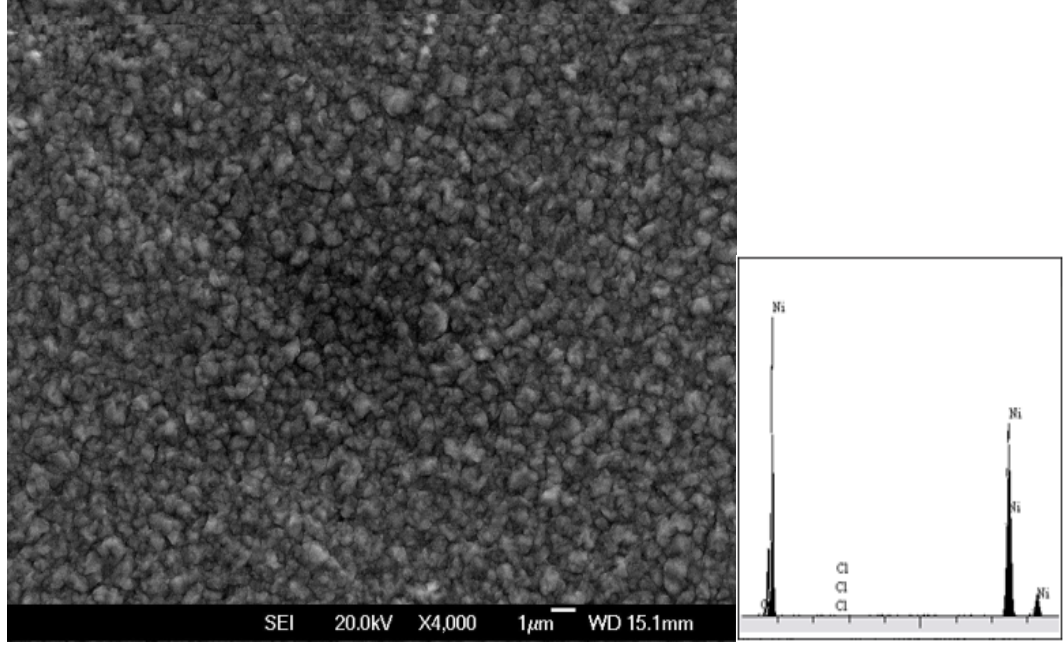
4.3.7.3. Ni ve *C. michiganensis* için kaydedilen SEM mikrografı ve EDX analizi



4.3.7.4. Ni ve *D. acidovorans* için kaydedilen SEM mikrografı ve EDX analizi



4.3.7.5. Ni ve N. Broth için kaydedilen SEM mikrografı ve EDX analizi



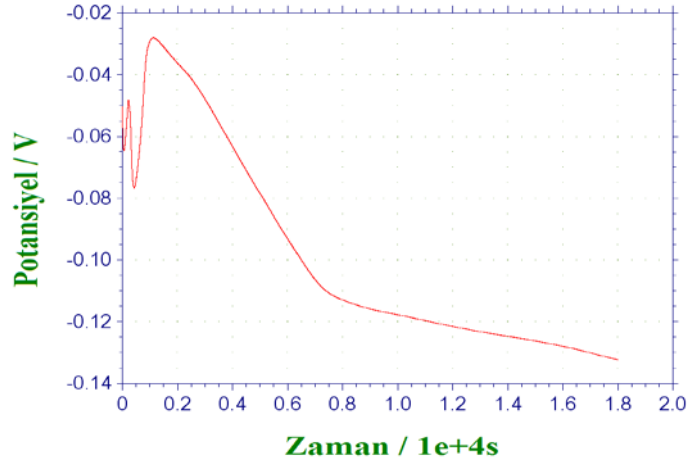
Çizelge 4.21. Ni'nin bakterili ve bakterisiz ortamda EDS analizi ile bulunan oksijen ve klor oranları, 5 saat.

	<i>P. aeruginosa</i>	<i>A. eucrenophila</i>	<i>C. michinanensis</i>	<i>D. acidovorans</i>	N. Broth
O %	1,128	2,909	3,875	3,950	1,031
Cl %	0,145	0,426	0,253	0,174	0,121

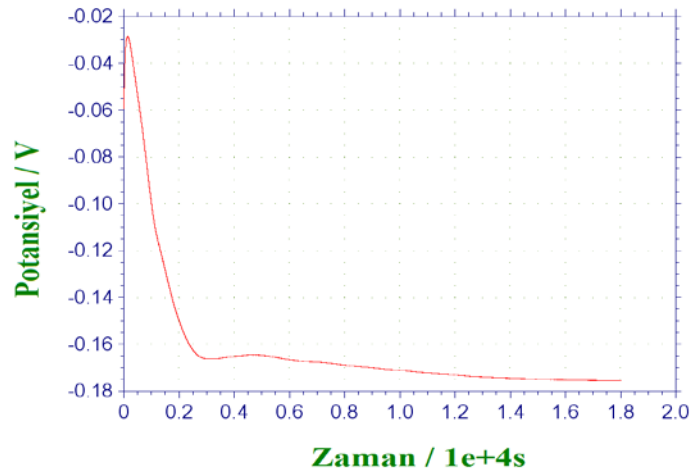
4.4. Cu'nun Mikrobiyal Korozyonunun İncelenmesi

4.4.1. Cu'nun bakterili ve bakterisiz ortamda kaydedilen OCP'nin grafikleri

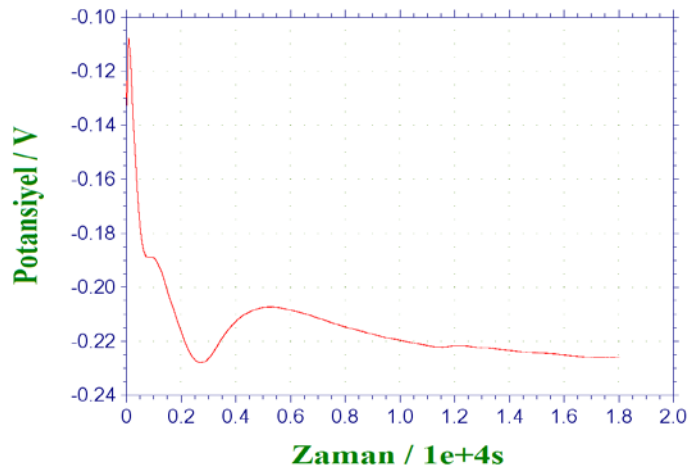
4.4.1.1. Cu'nun *P. aeruginosa* için kaydedilen OCP grafiği



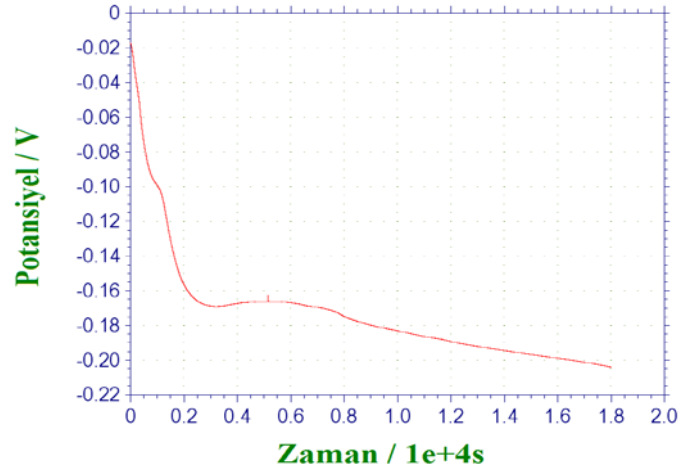
4.4.1.2. Cu'nun *A. eucrenophila* için kaydedilen OCP grafiği



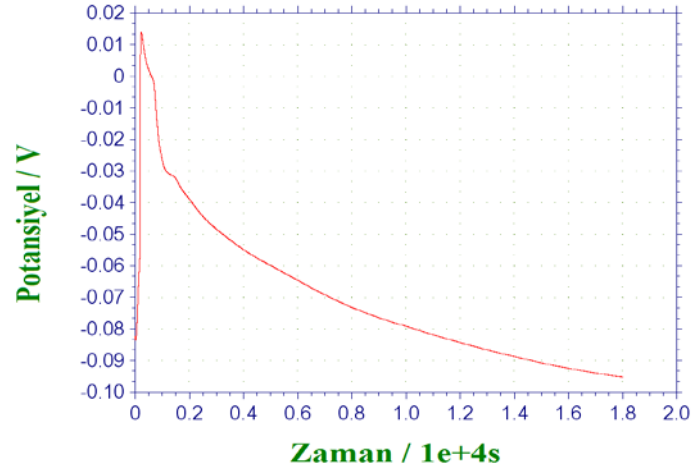
4.4.1.3. Cu'nun *C. michiganensis* için kaydedilen OCP grafiği



4.4.1.4. Cu'nun *D. acidovorans* için kaydedilen OCP grafiği



4.4.1.5. Cu'nun N. Broth için kaydedilen OCP grafiği

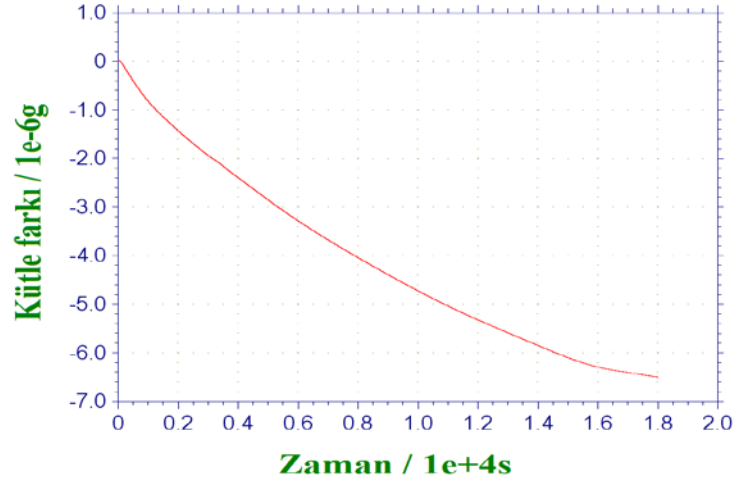


Çizelge 4.22. Cu'nun, bakterili ve bakterisiz ortamdaki OCP değerleri, 5 saat.

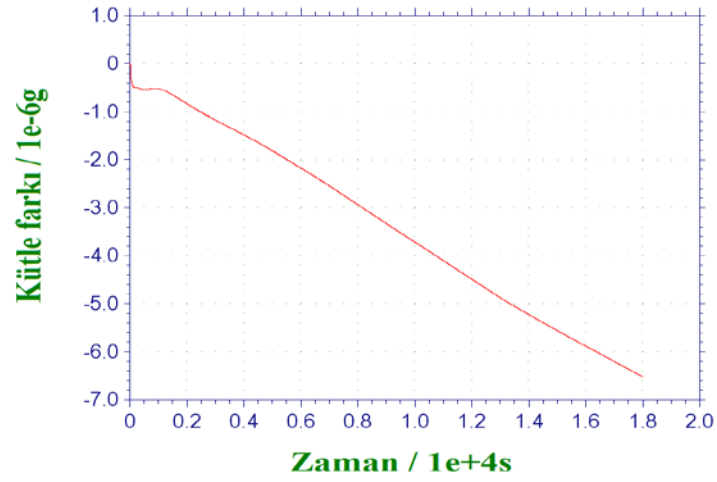
	<i>P. aeruginosa</i>	<i>A. eucrenophila</i>	<i>C. michinanensis</i>	<i>D. acidovorans</i>	N. Broth
OCP (V)	-0,1325	-0,1755	-0,2260	-0,2040	-0,0952

4.4.2. Cu'm bakterili ve bakterisiz ortamda kaydedilen QCM'in grafikleri

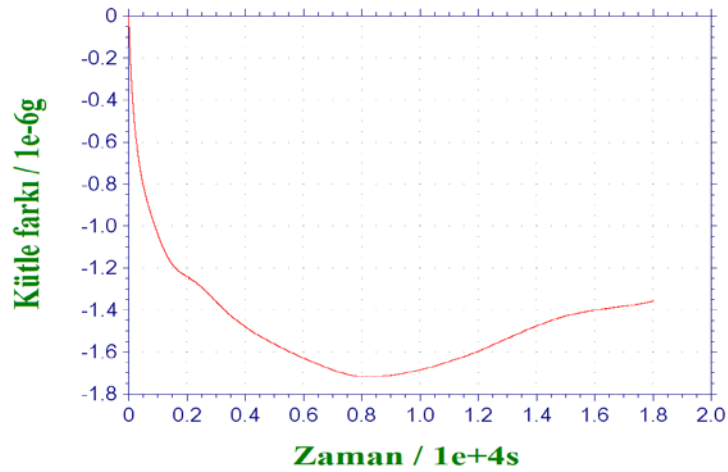
4.4.2.1. Cu'm *P. aeruginosa* için kaydedilen QCM grafiği



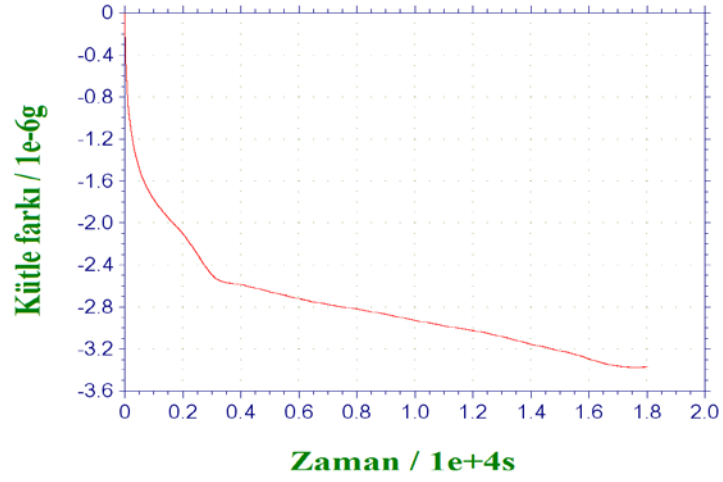
4.4.2.2. Cu'm *A. eucrenophila* için kaydedilen QCM grafiği



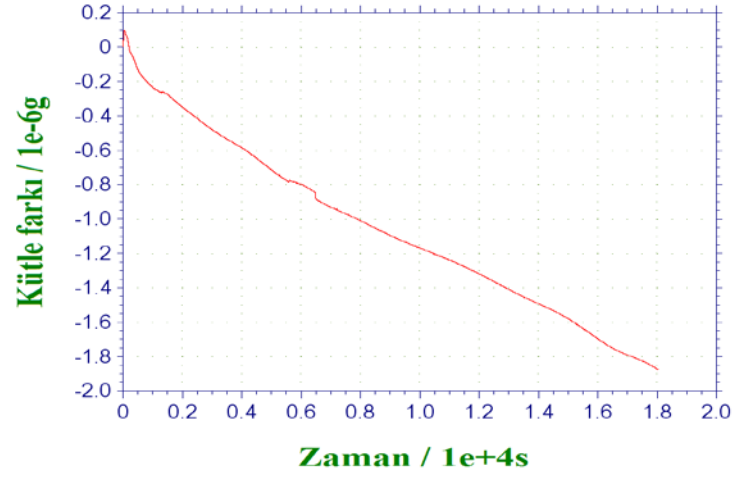
4.4.2.3. Cu'm *C. michiganesis* için kaydedilen QCM grafiği



4.4.2.4. Cu'm *D. acidovorans* için kaydedilen QCM grafiği



4.4.2.5. Cu'm N. Broth için kaydedilen QCM grafiği

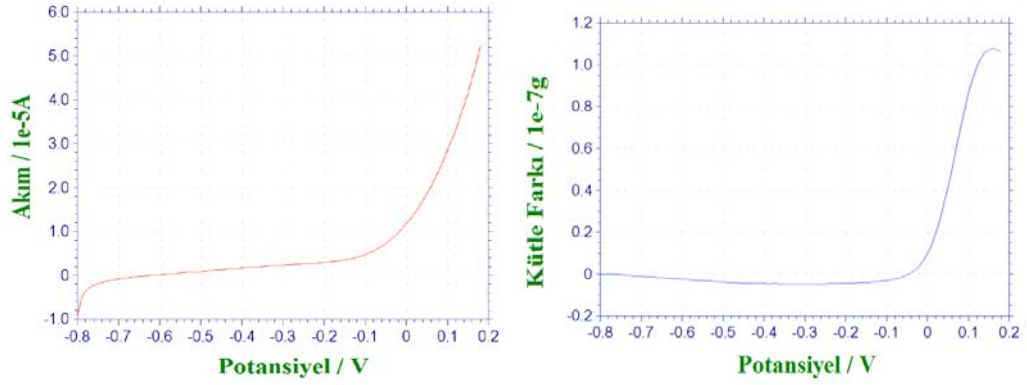


Çizelge 4.23. Cu'nun, bakterili ve bakterisiz ortamdaki kütle kaybı ($\Delta_{\text{kütle}}$) değerleri, 5 saatç

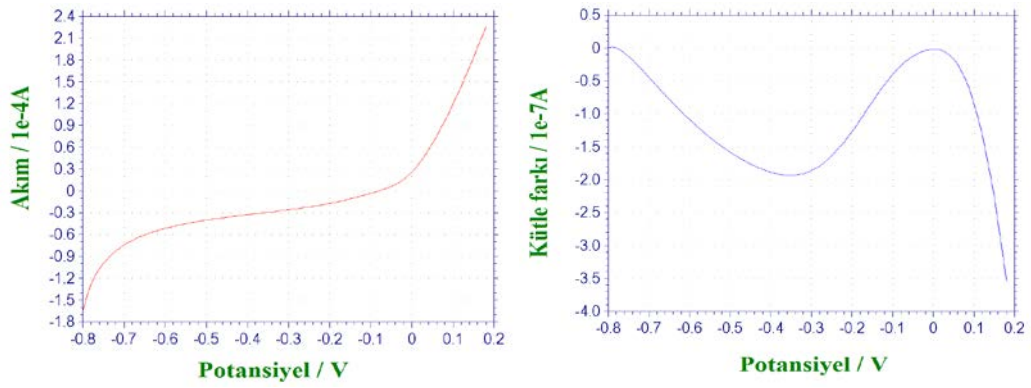
	<i>P. aeruginosa</i>	<i>A. eucrenophila</i>	<i>C. michinanensis</i>	<i>D. acidovorans</i>	N. Broth
$\Delta_{\text{kütle}}$ (μg)	-6,503	-6,538	-1,357	-3,371	-1,880

4.4.3. Cu'm bakterili ve bakterisiz ortamda kaydedilen LSV'nin grafikleri

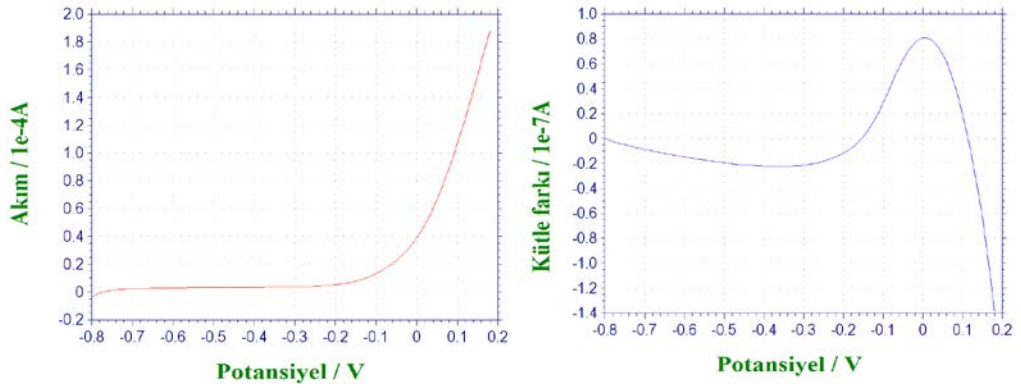
4.3.3.1. Cu'm *P. aeruginosa* için kaydedilen LSV grafiği



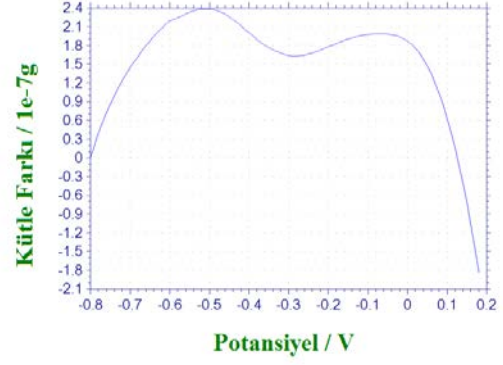
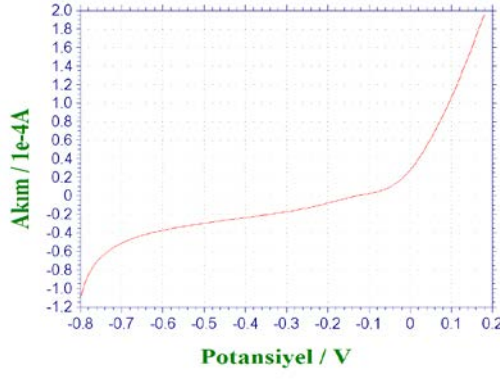
4.4.3.2. Cu'm *A. eucrenophila* için kaydedilen LSV grafiği



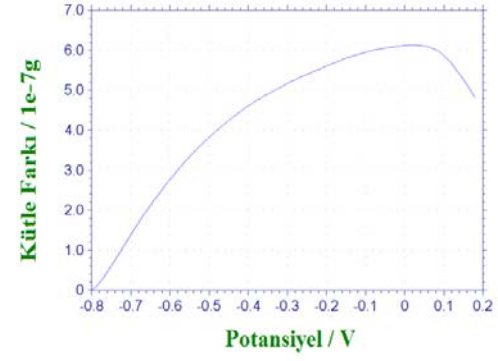
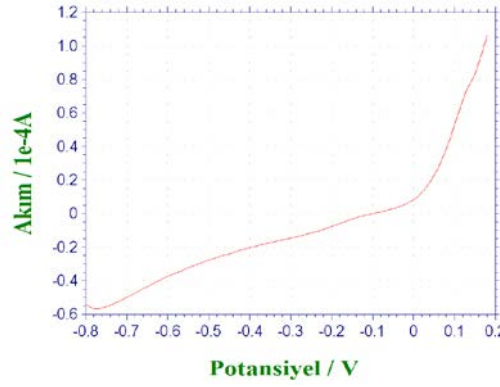
4.4.3.3. Cu'm *C. michiganesis* için kaydedilen LSV grafiği



4.4.3.4. Cu'm *D. acidovorans* için kaydedilen LSV grafiği



4.4.3.5. Cu'm N. Broth için kaydedilen LSV grafiği

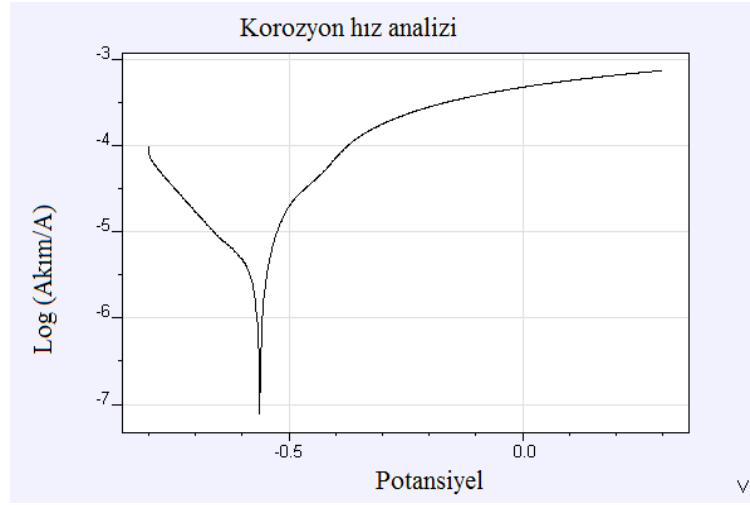


Çizelge 4.24. Cu'nun kırılma potansiyeli (E_b) ve kütle kaybı ($\Delta_{\text{kütle}}$) değerleri, 1 saat.

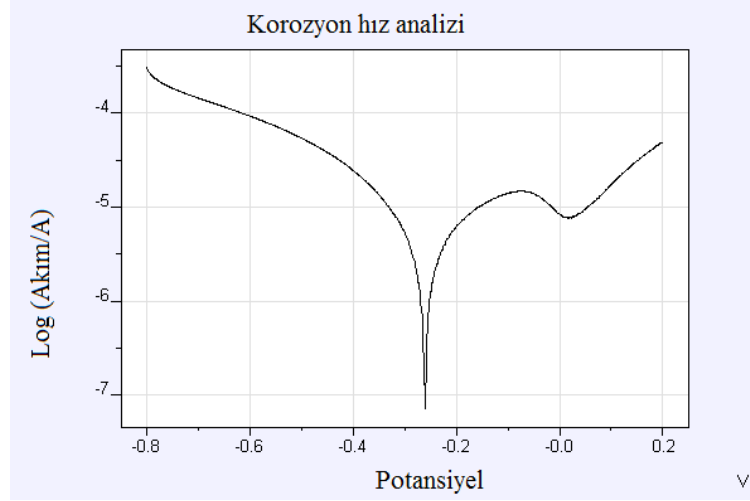
	<i>P. aeruginosa</i>	<i>A. eucrenophila</i>	<i>C. michiganensis</i>	<i>D. acidovorans</i>	N. Broth
E_b (V)	-0,0313	-0,0131	-0,0327	-0,0169	0,0209
$\Delta_{\text{kütle}}$ (μg)	0,1060	-0,3532	-0,1387	-0,1834	0,4820

4.4.4. Cu'm bakterili ve bakterisiz ortamda kaydedilen Tafel'in grafikleri

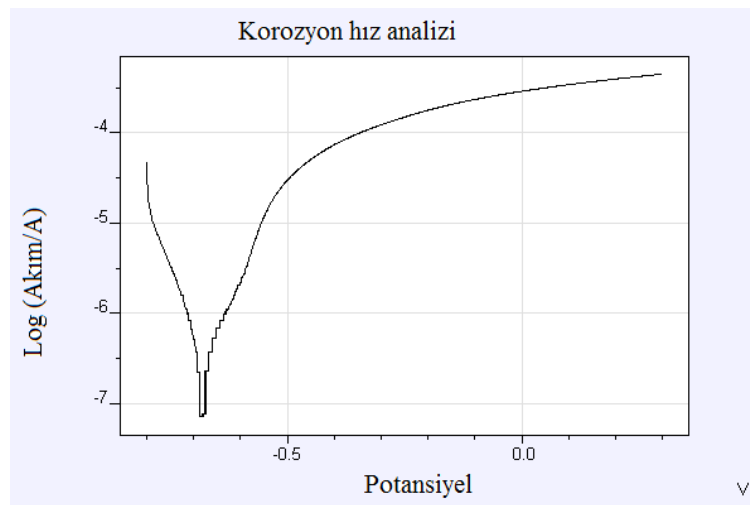
4.4.4.1. Cu'm *P. aeruginosa* için kaydedilen Tafel grafiği



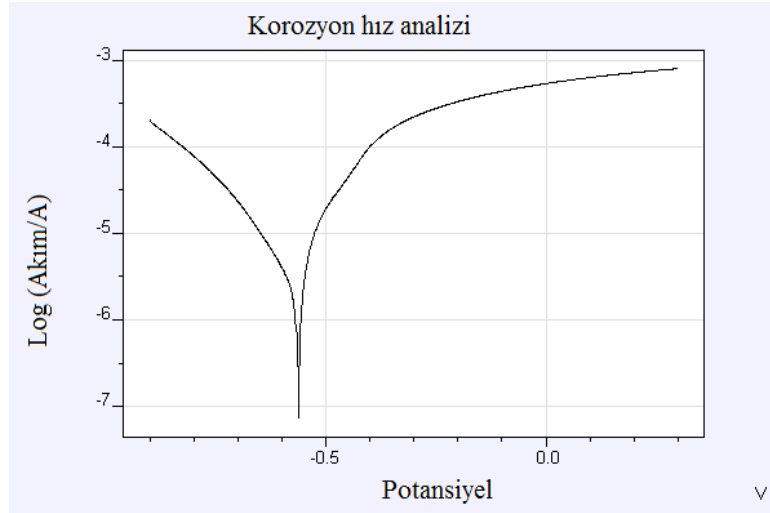
4.4.4.2. Cu'm *A. eucrenophila* için kaydedilen Tafel grafiği



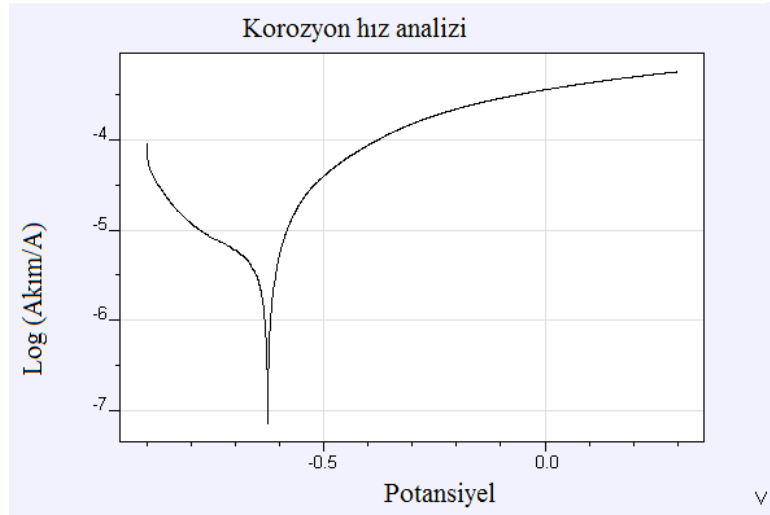
4.4.4.3. Cu'm *C. michiganensis* için kaydedilen Tafel grafiği



4.4.4.4. Cu'm *D. acidovorans* için kaydedilen Tafel grafiği



4.4.4.5. Cu'm N. Broth için kaydedilen Tafel grafiği

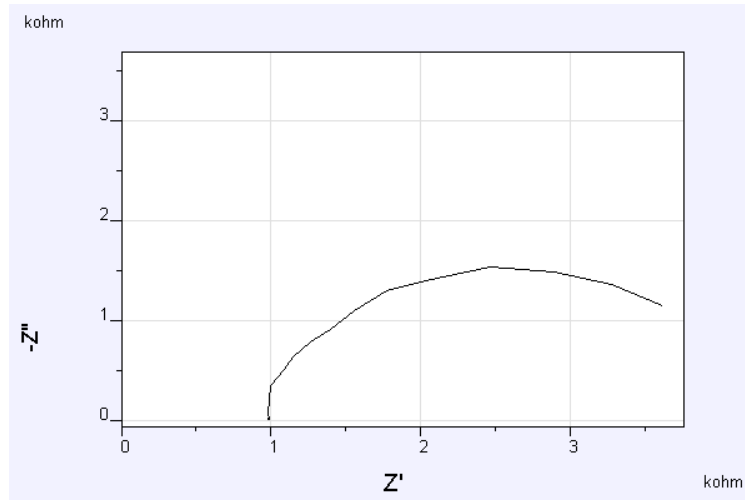


Çizelge 4.25. Cu'nun, bakterili ve bakterisiz ortamları için Tafel grafiklerinden belirlenen korozyon parametreleri, 1 saat.

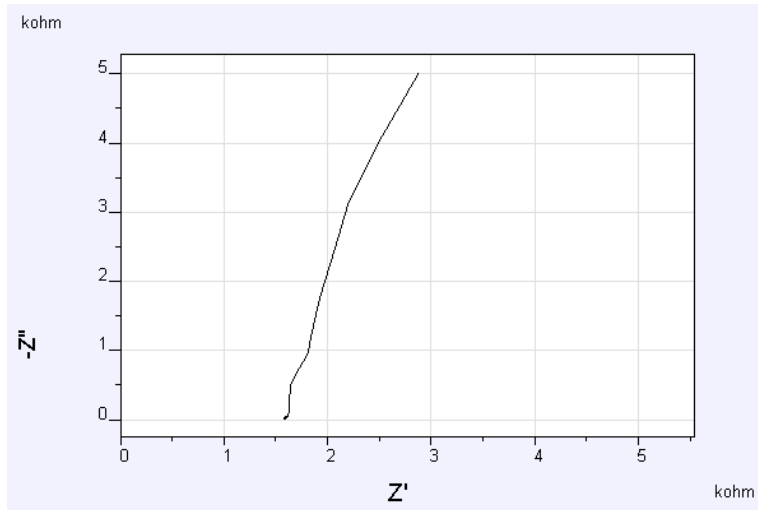
	<i>P. aeruginosa</i>	<i>A. eucrenophila</i>	<i>C. michinanensis</i>	<i>D. acidovorans</i>	N. Broth
E_{corr} (V)	-0,5623	-0,2605	-0,6805	-0,5623	-0,6263
i_{corr} (μA)	2,074	1,845	0,1723	2,673	6,502
I_{corr} ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)	10,58	9,413	0,8789	13,64	33,17
R_p (Ω)	6134	8830	$4,544e^4$	6169	4462
β_a (V/dec)	0,094	0,228	0,099	0,113	0,312
β_c (V/dec)	0,238	0,139	0,072	0,397	0,303

4.4.5. Cu'm bakterili ve bakterisiz ortamda kaydedilen EIS'nin grafikleri

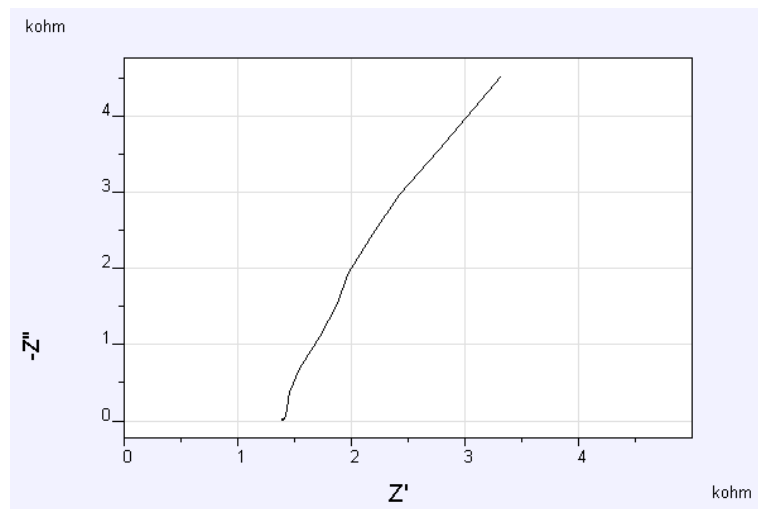
4.4.5.1. Cu'm *P. aeruginosa* için kaydedilen EIS grafiği



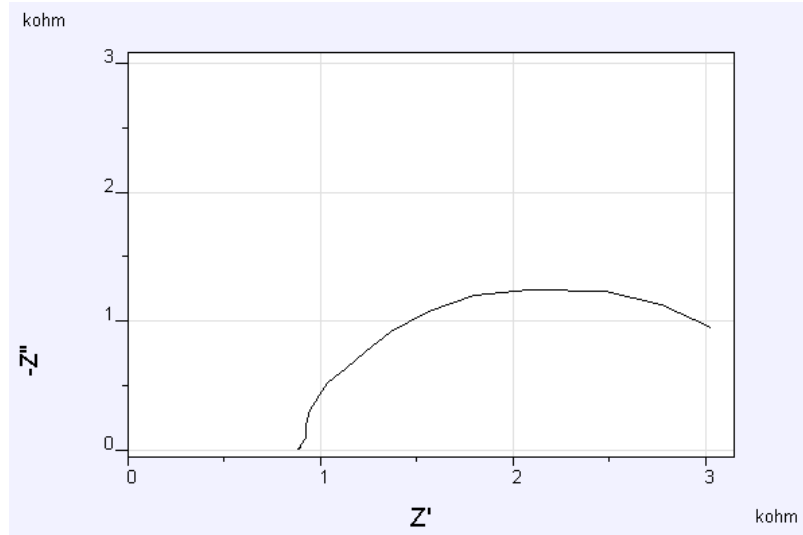
4.4.5.2. Cu'm *A. eucrenophila* için kaydedilen EIS grafiği



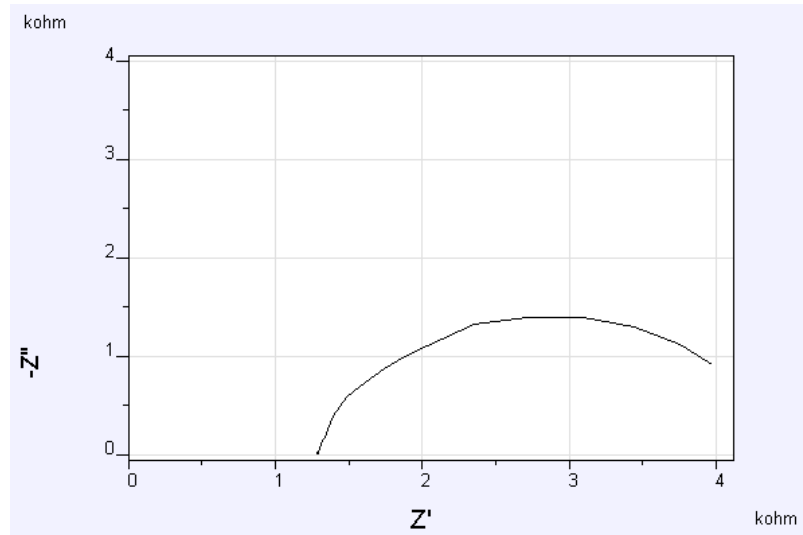
4.4.5.3. Cu'm *C. michiganensis* için kaydedilen EIS grafiği



4.4.5.4. Cu'm *D. acidovorans* için kaydedilen EIS grafiği



4.4.5.5. Cu'm N. Broth için kaydedilen EIS grafiği



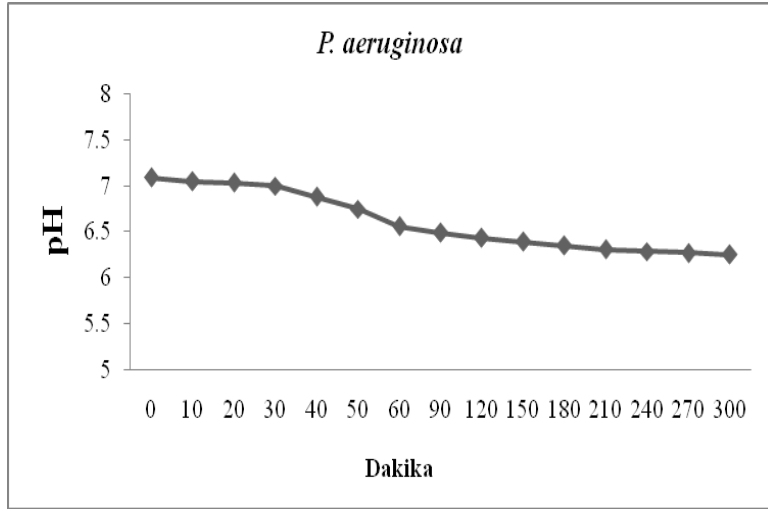
Çizelge 4.26. Cu'nun, bakterili ve bakterisiz ortamlar için EIS spektrogramlarından hesaplanan elektronik devre eşdeğeri parametreleri, 1 saat.

	R_1 (Ω)	Q_1 (μF)	η_1	R_2 (Ω)	Q_2 (μF)	η_2	R_3 (Ω)
<i>P. aeruginosa</i>	979,67	325,55	0,9309	3339,3			
<i>A. eucrenophila</i>	1584,7	404,73	0,87039	1,581e ⁰⁵			
<i>C. michinanensis</i>	1394,8	394,4	0,82098	42863			
<i>D. acidovorans</i>	892,34	396,76	0,93295	2736,4			
N. Broth	1290,2	272,94	0,89593	3229,1			
<i>P. aeruginosa</i> *	994	498,96	0,93237	2950	934,21	0,925	979,6
<i>A. eucrenophila</i>	1584,7	404,86	0,88368	89696	323,18	0,78532	17,313
<i>C. michinanensis</i>	1394,8	394,37	0,82099	42861	490,21	0,98016	9,8e ⁻¹⁴
<i>D. acidovorans</i> *	894,8	673,33	0,93642	1995	867,47	0,974	778,7
N. Broth *	1303	328,52	0,90966	2226	1324,9	0,998	893,8
<i>P. aeruginosa</i>	979,67	279,84	0,9852	2132,2	477,71	0,8528	2132,2
<i>A. eucrenophila</i>	1584,7	359,45	0,84661	6,2264e ⁵	311,75	0,2779	2,16e ⁰⁵
<i>C. michinanensis</i>	1394,8	382,46	0,82695	1,824e ⁻¹²	19,022	0,27829	93778
<i>D. acidovorans</i>	892,34	398,61	0,93112	2745,9	1,878e ⁻⁷	0,96413	1,4e ⁻¹³
N. Broth	1290,1	272,68	0,89481	3218,7	503,8	0,01559	16,53

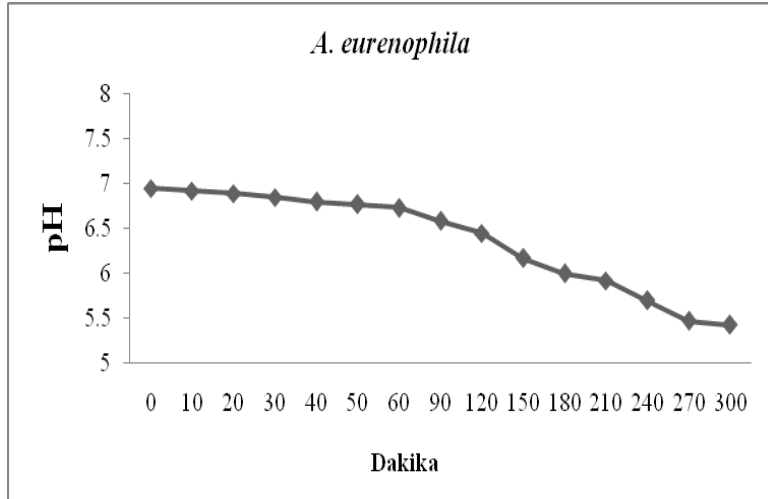
*: Zview

4.4.6. Cu'nun Bakterili ve bakterisiz Ortamda pH'nın ölçülmesi

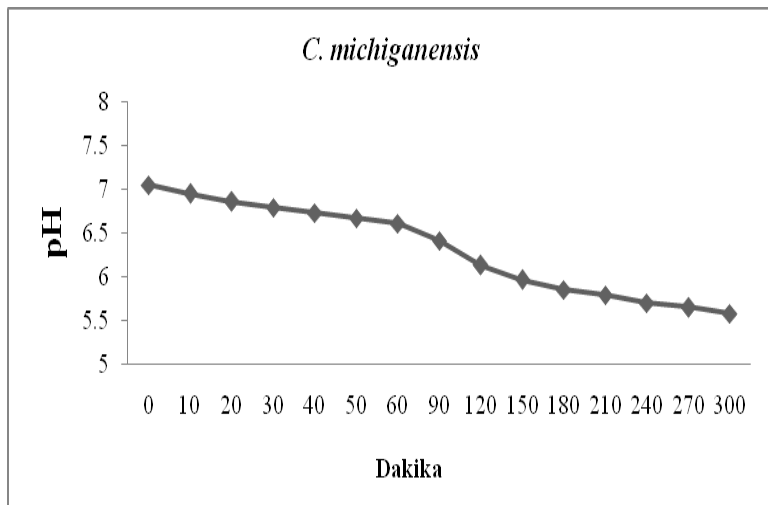
4.4.6.1. Cu ve *P. aeruginosa* için çizilen pH grafiği



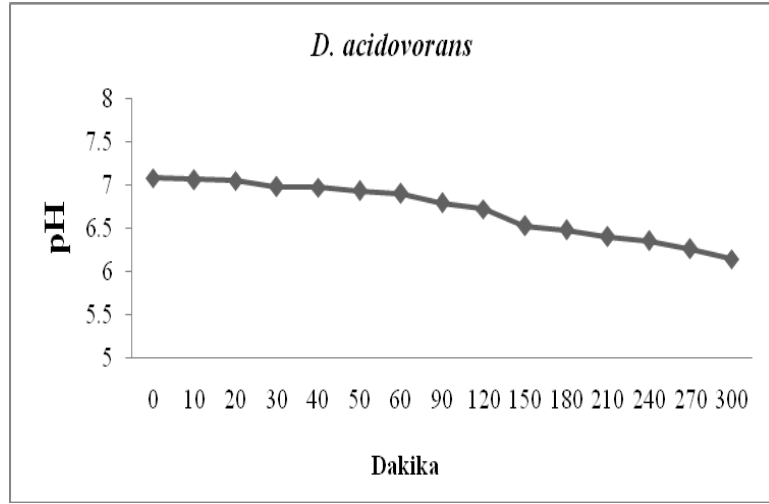
4.4.6.2. Cu ve *A. eurenophila* için çizilen pH grafiği



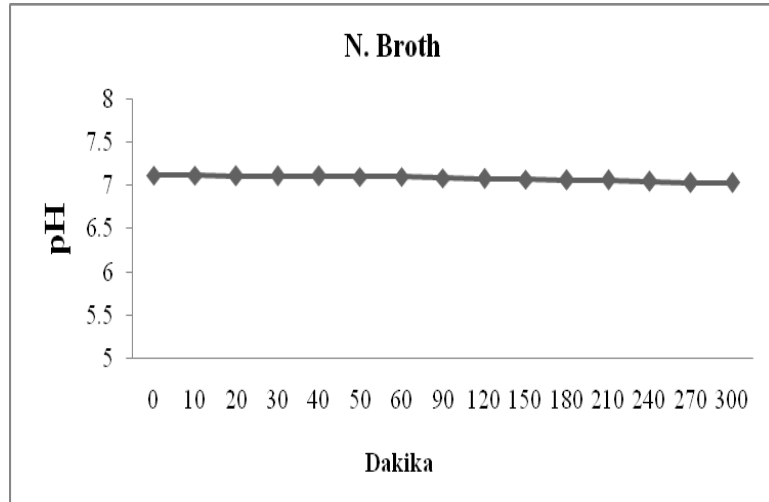
4.4.6.3. Cu ve *C. michiganensis* için çizilen pH grafiği



4.4.6.4. Cu ve *D. acidovorans* için çizilen pH grafiği



4.4.6.5. Cu ve N. Broth için çizilen pH grafiği

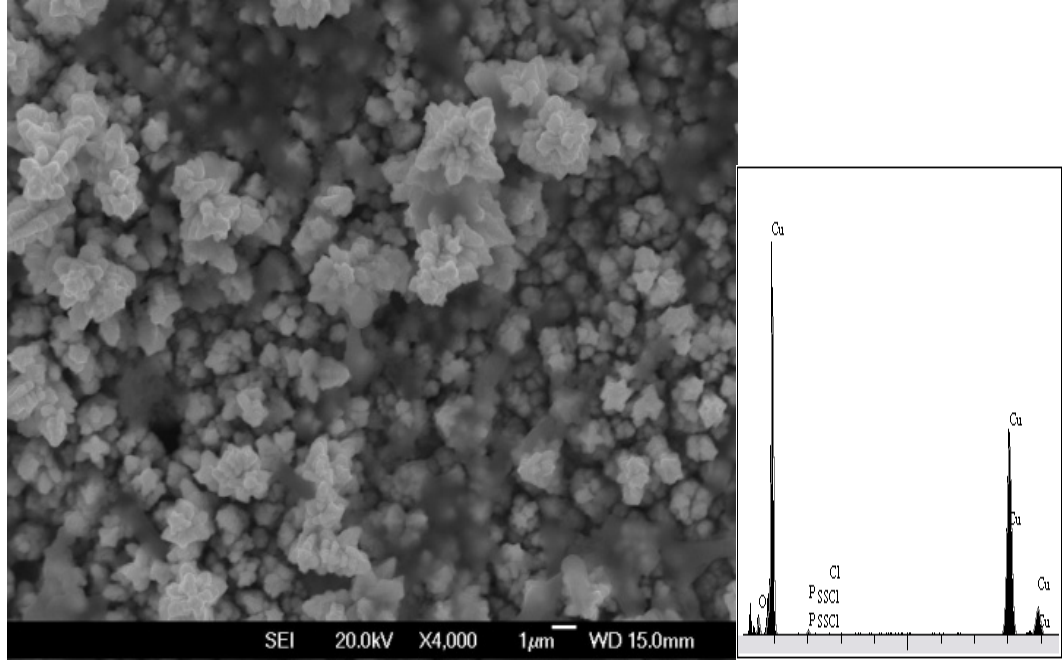


Çizelge 4.27. Cu'nun bakterili ve bakterisiz ortamda 5 s sonunda ölçülen pH değerleri.

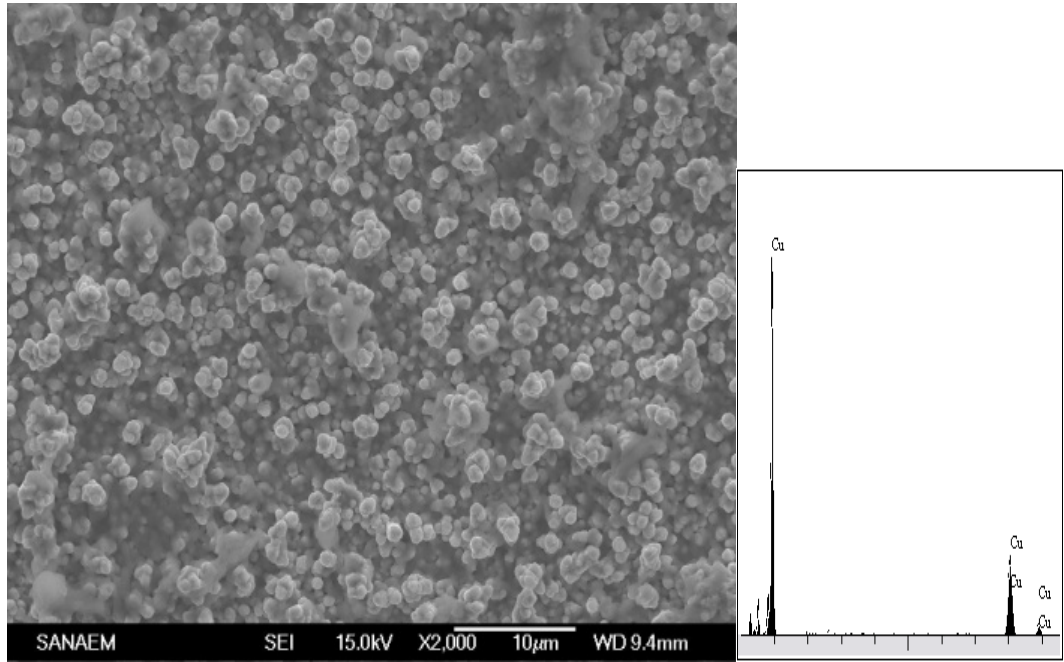
	<i>P. aeruginosa</i>	<i>A. eucrenophila</i>	<i>C. michinanensis</i>	<i>D. acidovorans</i>	N. Broth
pH	6,25	5,43	5,58	6,14	7,02

4.4.7. Cu'nun bakterili ve bakterisiz ortamlar için kaydedilen SEM mikrografları ve EDX Analizleri

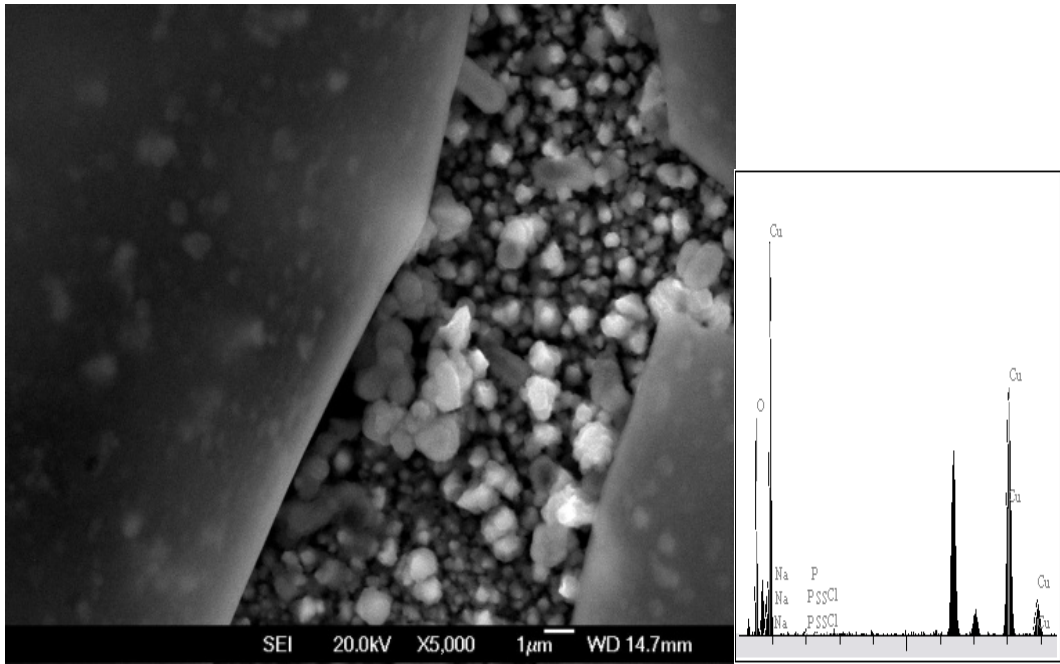
4.4.7.1. Cu ve *P. aeruginosa* için kaydedilen SEM mikrografı ve EDX analizi



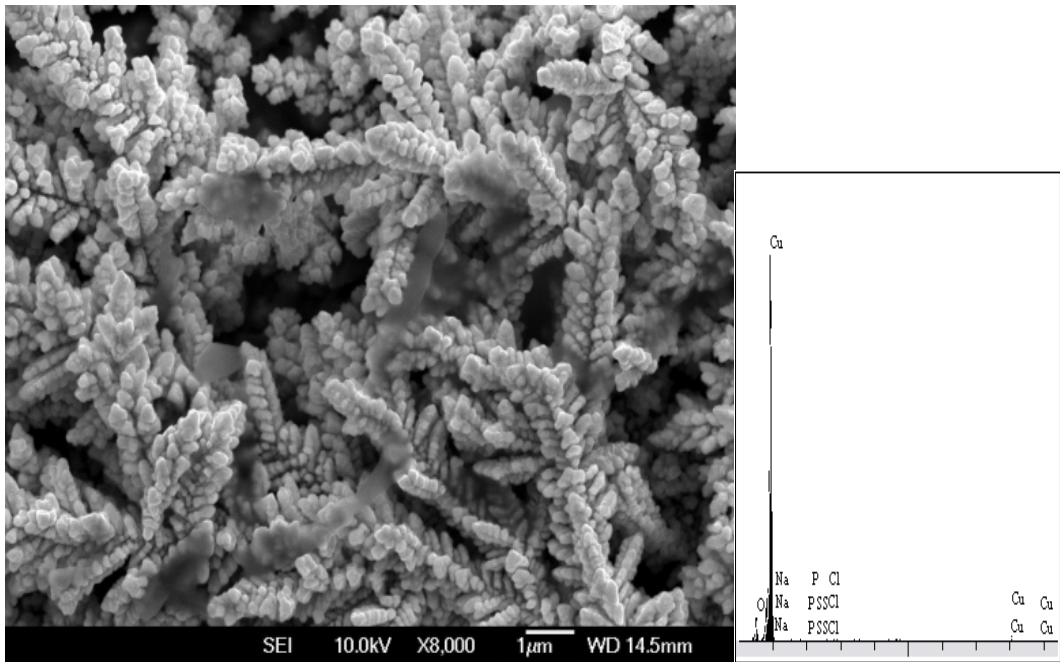
4.4.7.2. Cu ve *A. eucrenophila* için kaydedilen SEM mikrografı ve EDX analizi



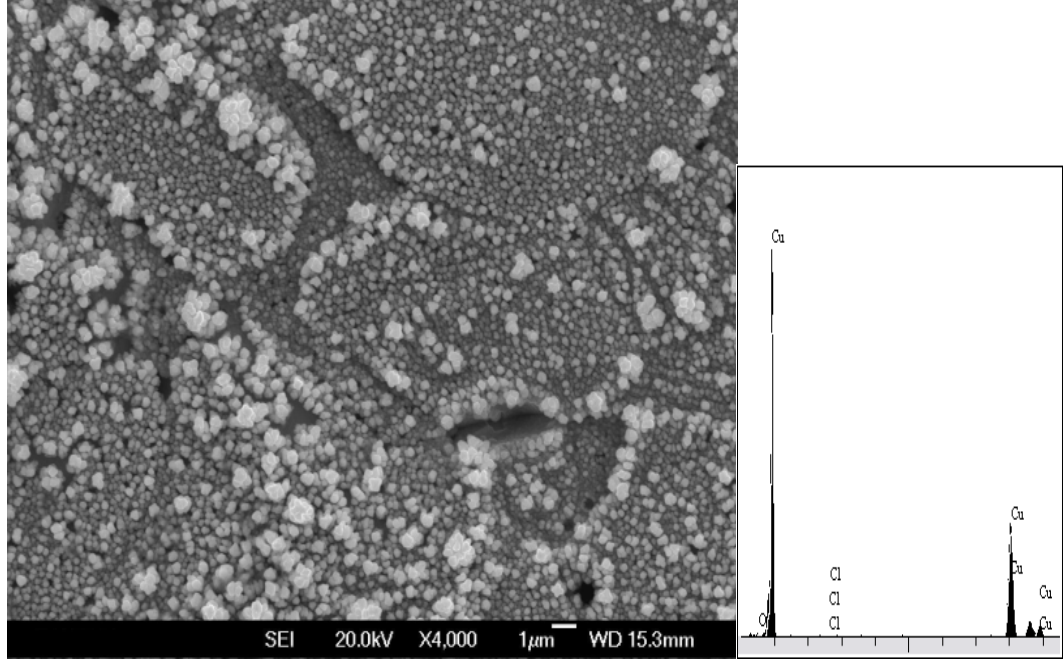
4.4.7.3. Cu ve *C. michiganensis* için kaydedilen SEM mikrografı ve EDX analizi



4.4.7.4. Cu ve *D. acidovorans* için kaydedilen SEM mikrografı ve EDX analizi



4.4.7.5. Cu ve N. Broth için kaydedilen SEM mikrografı ve EDX analizi



Çizelge 4.28. Cu'nun bakterili ve bakterisiz ortamda EDS analizi ile bulunan oksijen ve klor oranları, 5 saat.

	<i>P. aeruginosa</i>	<i>A. eucrenophila</i>	<i>C. michinanensis</i>	<i>D. acidovorans</i>	N. Broth
O %	4,058	5,525	20,722	2,478	1,733
Cl %	0,129	0,602	0,093	0,449	0,290

5. SONUÇ ve TARTIŞMA

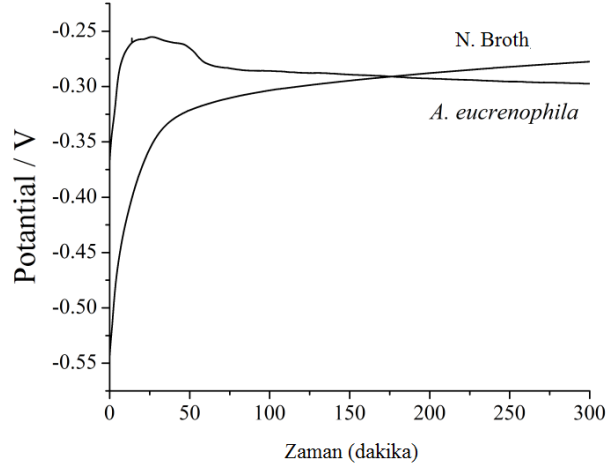
Tez kapsamında yapılan çalışmalardan elde edilen sonuçlar aerobik bakterilerin korozyon etkisinin, hem bakterinin metal yüzeyinde biyofilm oluşturması sırasında hem de biyofilm oluşuktan sonraki süreçte devam ettiğini göstermektedir. Bundan başka, bir genel sonuç olarak ifade etmek gerekir ki, dört metalin bakterili ortamdaki korozyon davranışları benzerdir ve korozyon hızları bakterisiz ortama göre yüksek bulunmuştur.

Aerobik bakterilerin korozyon etkisi davranışı 4 madde altında toplanabilir: *i-* Bakteriler yaşamsal faaliyetleri nedeniyle metal yüzeyindeki oksijen miktarını artırır, korozyon potansiyeli negatif değerlere kayar dolayısıyla, korozyon hızı artar. *ii-* Bakteri EPS salgısı ile yüzeyde biyofilm oluşmaya başlar. Biyofilmin oluşmaya başlamasıyla birlikte açık devre potansiyelinde anodik tarafa doğru bir kayma gözlenir. Ancak aynı zamanda korozyon akımında da bir artış gözlenmektedir. Korozyon potansiyelinin pozitif değerlere kayması nedeniyle oluşan biyofilm tabakasının inhibitör etkinliği gösterdiği söylene bile, artan korozyon akımı nedeniyle korozyon hızı yine de yüksektir. Gözlenen inhibitör etkisi yalancı koruma (pesudo protection) olarak tanımlanabilir. *iii-* Zaman ilerledikçe, korozyon akımındaki yükselme nedeniyle korozyon potansiyeli tekrar katodik bölgeye kayar. *iv-* Biyofilm oluşmuş metal yüzeyi bölgelerinde korozyon reaksiyonları biyofilm-metal arayüzeyinde cerayan etmeye devam eder.

Aşağıda *A. eucrenophila* bakterisinin Ni'in korozyonuna etkisi ve tez kapsamında çalışılan bütün bakterilerin Fe korozyonuna etkisi irdelenmiştir.

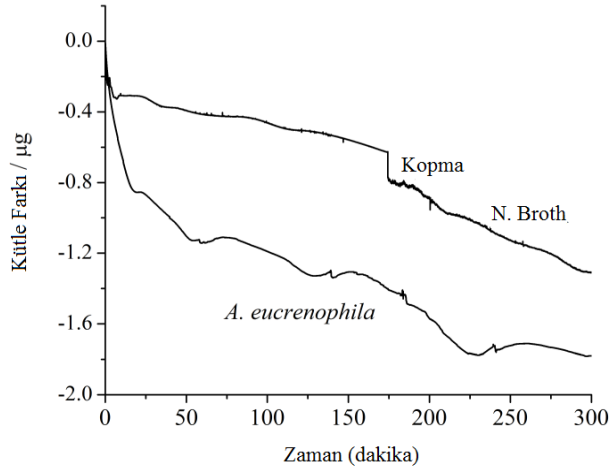
***A. eucrenophila* bakterisinin Nikel'in korozyonuna etkisinin incelenmesi**

Nikel'in bakterili ve bakterisiz ortamlar için kaydedilen açık devre potansiyelleri (E_{OCP}) Şekil 5.1. 'de gösterilmiştir. Nikel'in E_{OCP} değeri bakterili ortamda $\{-0,297 \text{ V (vs. Ag / AgCl)}\}$ bakterisiz ortama göre $\{-0,277 \text{ V (vs. Ag / AgCl)}\}$ yaklaşık 20mV daha düşüktür. Şekil 5.1. bakterili ve bakterisiz otamlara maruz kalan nikelin korozyon potansiyel eğrileri arasında farklı bir eğilim olduğunu göstermektedir. Ayrıca, başlangıçta *A.eucrenophila* ortamında korozyon potansiyeli pozitif değerlere doğru devam ederken yaklaşık 1 saat sonra potansiyel daha negatif değerlere doğru gitmektedir. Bu durum, nikel yüzeyi üzerindeki bakteriyel faaliyet ve biyofilm oluşumu nedeniyle (Heakal Ark., 2010).



Şekil 5.1. Ni'in *Aeromonas eucrenophila* ve bakterisiz ortamdaki OCP değerleri.

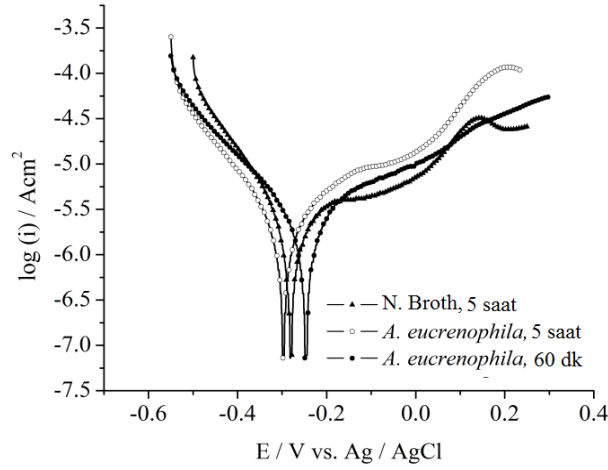
Diğer taraftan, kontrol edilebilir sulu elektrokimyasal çözeltilerde, QCM, ng/cm^2 aralığında elektrot yüzeyinde kütle değişikliklerini saptayabilmektedir (Wang ve Ark., 2006). Şekil 5.2. elektrot yüzeyin deki kütle değişikliklerini maruz kalma süresi boyunca (5 saat) göstermektedir. Deney sürecinin sonunda, elektrot yüzeyindeki kütle kaybı bakterisiz ortamda $-1,30 \mu\text{g}$ iken bakterili ortamda $-1,78 \mu\text{g}$ dır. Açıkça bakterili ortamın bakterisiz ortama göre daha korozif olduğu ifade edilebilir.



Şekil 5.2. Ni elektrotlarının *Aeromonas eucrenophila* ve bakterisiz ortamda zamana bağlı kütle kaybı değerleri.

Şekil 5.3. nikel elektrotlarının polarizasyon eğrilerini bakterili ve bakterisiz ortamlarda 60 dakikalık ve 5 saatlik sürelerde göstermektedir. Tafel eğrilerinden elde edilen elektrokimyasal korozyon parametreleri (korozyon potansiyeli, E_{corr} ; korozyon akımı, i_{corr} ; korozyon akım yoğunluğu, I_{corr} ; anodik Tafel eğimi, β_a ; katodik Tafel eğimi β_c ve polarizasyon direnci R_p) Tablo 5.1.'de verilmiştir. Elektrodun ortama 5 saat batırıldıktan

sonra, korozyon potansiyelinin -0,28 V (vs. Ag / AgCl) olduğu gözlenmiştir. Ancak, nikel'in bakteri inoküle edilmiş ortamdaki korozyon potansiyeli 60 dakikalık süre sonunda anodik bölgeye (-0,25 V (vs. Ag / AgCl)) doğru gitmektedir ki bu da korozyon hızının azalması anlamına gelmektedir. Böylece, β_a değerlerinin pozitif yöne kayması, anodik bölgeden elektron transferinin zor olduğunu göstermektedir.



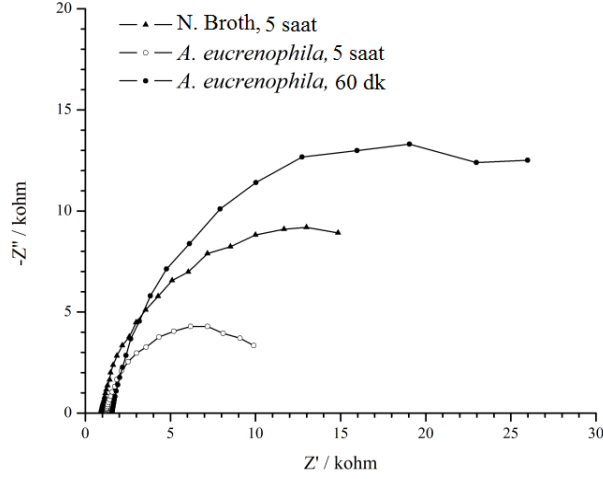
Şekil 5.3. Nikel elektrotlarının bakterili ve bakterisiz ortamdaki tafel eğrileri.

Tablo 5.1. Nikel elektrotları için *Aeromonas eucrenophila* ve bakterisiz ortamda tafel eğrilerinden elde edilen parametreler.

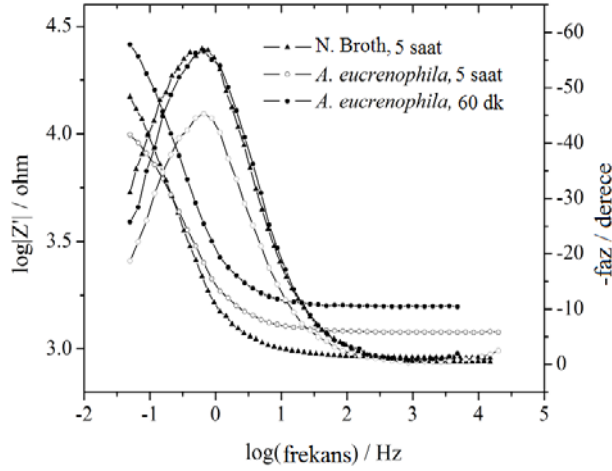
	N. Broth	İnkübasyondan sonra	
	5 Saat	60 Dk	5 Saat
E_{corr} V vs. Ag/AgCl	-0,28	-0,25	-0,30
i_{corr} (μ A)	1,04	1,68	2,04
I_{corr} (μ A/cm ²)	4,92	8,24	10,01
Anodik tafel eğrisi β_a (V/dec)	0,47	0,51	0,62
Kahodik tafel eğrisi β_c (V/dec)	0,13	0,25	0,25
R_p (Ω cm ²)	96138	93198	80099
Korozyon hızı μ m/yıl	3,28	5,50	6,68

Bununla beraber, bakteriyel yaşamsal faaliyetten dolayı yüzey üzerinde hızlı bir şekilde oksijen miktarı artmaktadır ve hücre dışı polimerik salgı (EPS) etkisinden dolayı koruma yapılmaktadır (Little ve Ark., 1996; Zuo ve Ark., 2005), bu koruma yalancı bir korumadır. Ancak, inkübasyon süresine bağlı olarak, SEM görüntüleri yüzeyde pürüzlülük, çukurlar, yanal ve dikey çatlaklar göstermektedir. Bu yeni yüzey, korozyon akımının ve korozyon akım yoğunluğunun artışına neden olmaktadır (Cetin ve Aksu, 2009). 5 saatin sonunda, biyofilm korozyon potansiyeli katodik bölgeye kaymaktadır (-0.30 V (vs Ag / AgCl)). Buna ek olarak, inkübasyon süresindeki artış, korozyon akımı ve korozyon akımı

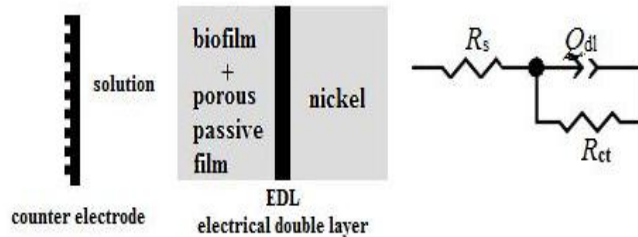
yoğunluğunu da artırmaktadır ki bu korozyon oranının artması, çukurlu ve çatlamış yüzeyin artışı anlamına gelmektedir. Bu nedenle, sistem mikrobiyal korozyona karşı hassastır. EIS sonuçları Tafel sonuçlarını teyit etmektedir.



Şekil 5.4.a. Nikel'in *Aeromonas eucrenophila* ve bakterisiz ortamdaki EIS değerleri.



Şekil 5.4.b. Nikel'in *Aeromonas eucrenophila* ve bakterisiz ortamdaki Bode diyagramındaki faz açısı değerleri.



Şekil 5.4.c. Nikel'in *Aeromonas eucrenophila* ve bakterisiz ortamda eşdeğer devresi.

Şekil 5.4., nikel analizinde kullanılan EIS ve eşdeğer devresini bakterili ve bakterisiz ortamlar için göstermektedir. Tüm deneylerde, biyofilm oluşumu nedeniyle, EIS

ölçümlerinden önce, hücre potansiyel ve hücre akımı, zamanın bir fonksiyonu olarak, ölçülmüştür (i_{cell} en düşük ve en yüksek değerleri 0,23 ve 0,68 μA). IR düşüşü Tablo 5.2.'deki çözelti direnç değerlerine göre hesaplanmıştır ve nikel örnekleri için IR düşüşü 0.28-0.81 mA olarak elde edilmiştir. Yani, EIS ölçümleri IR biyofilm düşüşü için düzeltilmemiştir. Nyquist kapasitif eğrileri (Şekil 5.4a), yüksek frekans ve düşük frekans yolu üzerinde bir yarı dairesel grafik göstermektedir. Ayrıca, empedans çapı döngüleri 60 dakikada artmıştır ve sonra ortam empedansı döngüsüne uygun olarak 5 saat süreyle azalmıştır. Bu desen, koruyucu oksit tabakası oluşumu nedeniyle korozyon hızının azalmasını ve sonra zamanın artmasıyla korozyon hızının da artış gösterdiğini ortaya koymaktadır. Şekil 5.4b Bode eğrilerini göstermektedir. Bode eğrileri düşük frekansta bir maksimum pik gösterir ki elektriksel çift tabakadan (EDL) türetilmektedir. Şekil 5.4b'de görüldüğü gibi, zamanın başlamasından 5 saatlik süre içinde maksimum pik $\sim 57^\circ \sim 45^\circ$ azalmaktadır bu da korozyon oranının artmasını göstermektedir. Diğer taraftan, Bode diyagramlarında herhangi bir faz kayması gözlenmemiştir. Bu nedenle, EIS ölçümlerine ait elektriksel eşdeğer devre tek zaman sabiti içermektedir. Şekil 5.4c nikel'in yüzey filminin fiziksel yapısını ve ilgili eşdeğer devresini göstermektedir (Yuan ve Ark., 2007) ki bu da empedans verilerini değerlendirmede tatmin edici bir şekilde kullanılabilir. Ayrıca, nikel yüzeyinde *A. eucrenophila* tarafından üretilen heterojen biyofilmin muhtemelen başka bir pik vermesine dikkat çekmek önemlidir. Ancak, biyofilm gelişimi dinamik bir süreç olduğu için ve metal yüzeylerinde sürekli bağlanmalar, büyümeler ve ayrılmalar ile beraber gittiği için, tespit edilmesi zordur (Franklin ve ark, 2000, Yuan ve ark, 2007). Elde edilen elektrokimyasal parametreler Tablo 5.2.'de özetlenmiştir.

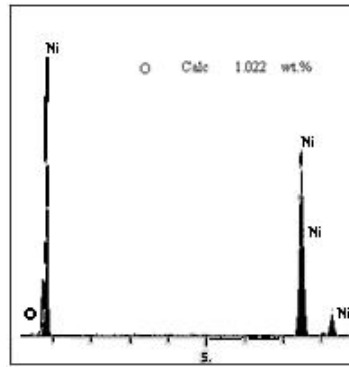
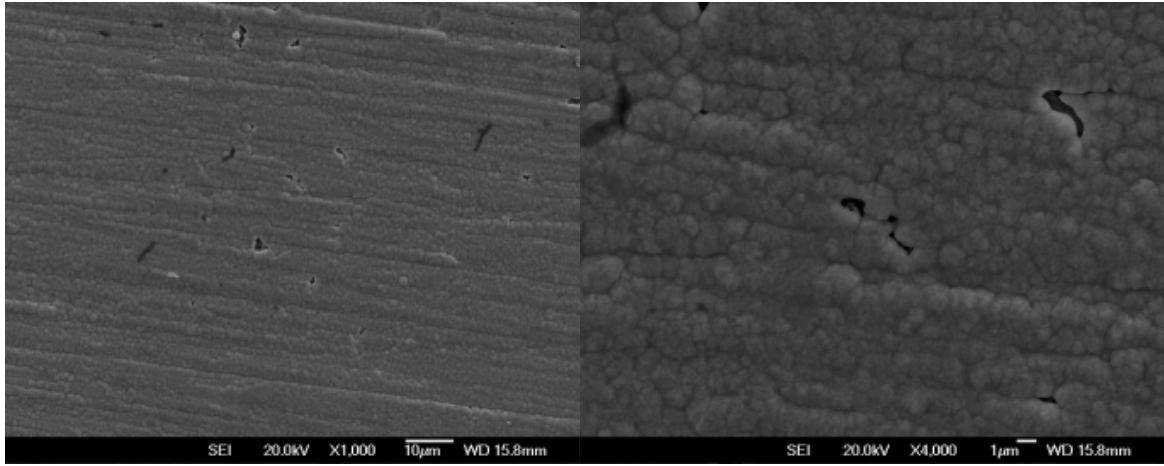
Tablo 5.2 *Nikel'in Aeromonas eucrenophila ve bakterisiz ortamdaki EIS değerleri*

	N. Broth	İnkübasyondan sonra	
	5 Saat	60 Dk	5 Saat
R_s	915,20	1571	1196
R_{ct} ($\Omega \text{ cm}^2$)	103893,72	152076,40	48382,60
$Q_{dl} \times 10^{-5}$ ($\Omega^{-1} \text{ cm}^{-2}$)	8,49	4,48	10,14
η	0,86	0,87	0,83

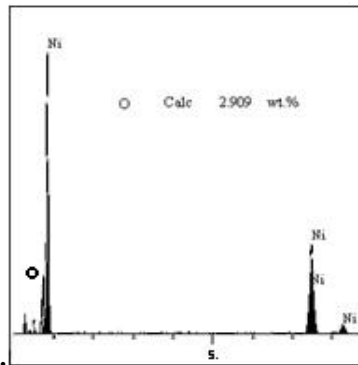
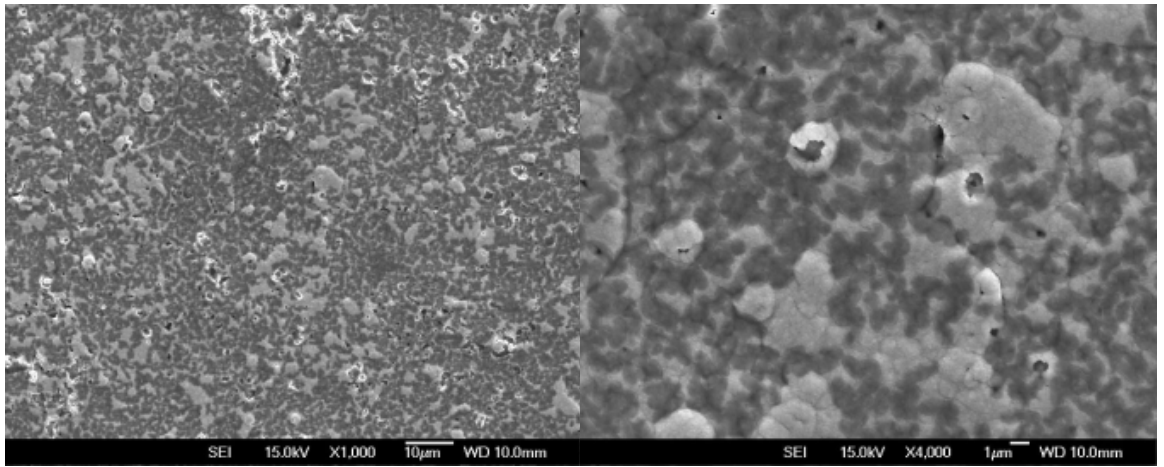
Devrede R_s çözelti direnci, R_{ct} yük transfer direnci, Q_{dl} elektriksel çift tabakanın sabit faz elemanı (CPE) 'dır. CPE bir yüzeyin mikroskopik pürüzlülüğüne bağlı olarak kullanılmaktadır. η , CPE'nin gücü olarak ve η 'nin değeri 1 den az olarak tanımlanmıştır ki bu da kusurlu bir kapasitöre (Çetin ve Aksu, 2009) işaret etmektedir ve yüzey

homojenitesinin bir ölçüsü olarak kabul edilebilir. Bakteri ile inoküle edilmiş ortama maruz kalma süre sonunda, katı yüzeydeki η faktörünün azalma eğilimi, yüzeyin pürüzlülüğün artışı göstermektedir. Tablo 5.2. de gösterildiği gibi, R_{ct} bakterili ortamda bakterisiz ortama göre belirgin bir şekilde azalmaktadır ki bu *A. eucrenophila*'nın hücreleri ve EPS'nin nikel yüzeyinde korozyon oranında bir artışı ifade etmektedir. Nikel yüzeyindeki hücreler ve EPS, oksit film formasyon sürecinin kinetiğini etkilemekte veya oksit filmin yatay ve dikey şekil bozulmasını kolaylaştırmaktadır. (Caldwell ve Ark., 1992; Videla, 2001; Valcarce ve Ark., 2005; Yuan ve Ark., 2007).

Şekil 5.5.'de 5 saatlik bakterili ve bakterisiz ortama maruz kalan nikel disk yüzeylerinin SEM görüntüleri ve EDX sonuçlarını göstermektedir. Şekil 5.5b'de görüldüğü gibi, nikel örneklerinin yüzeyleri kısmen mikrobiyal hücreler, EPS ve metabolizma ürünleri kümeleri ile örtülmüştür. Buna ek olarak, SEM görüntülerinde, bakterili ortamda (Şekil 5.5b x4000 büyütülmüş) bakterisiz ortama göre (Şekil 5.5a, x4000 büyütülmüş), daha fazla çukurlaşma ve çatlak korozyonu gözlenmektedir. EDX, nikel örneklerinin yüzeyi üzerinde bazı tipik alanların elementel analiz için kullanılmıştır. SEM analiz sonuçları, bakterili ortamda nikel yüzeyinde (Şekil 5.5b) oksit yüzdesinin % 2,90 iken, bakterisiz ortamda (Şekil 5.5a) % 1,02 olduğunu göstermiştir. Bu sonuçlar, *A. eucrenophila*'nın oksit yüzdesi artışa neden olduğunu göstermektedir.



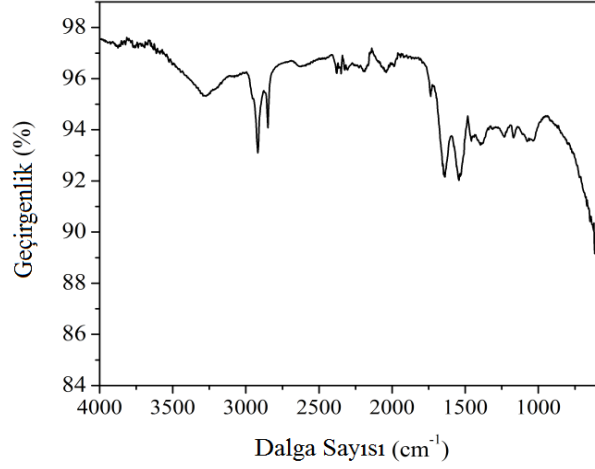
Şekil 5.5.a.



Şekil 5.5.b.

Şekil 5.5. Nikel'in bakterisiz (a) ve *Aeromonas eucrenophila* (b) ortamında SEM ve EDX görüntüleri.

Şekil 5.6. bakterili ortama maruz kalma süresi sonunda, oluşan biyofilm ve EPS'nin FT-IR spektromunu göstermektedir.



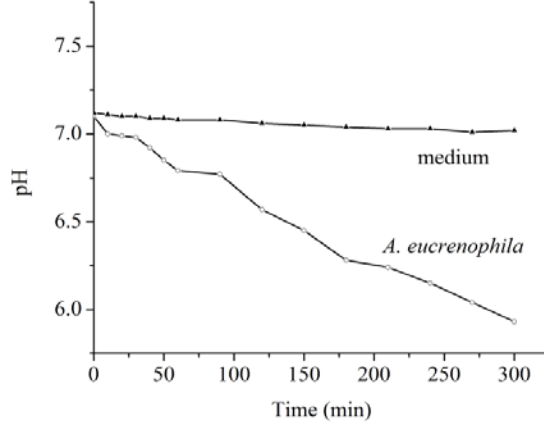
Şekil 5.6. Nikel'in *Aeromonas eucrenophila* ortamındaki FTIR spektromu.

Pik değerleri Çizelge 5.3.'de verilmiştir. EPS'li biyofilmlerin yapısında bulunan mümkün gruplar polisakkaritler, proteinler (amitler) ve hidrokarbonlardır. OH gruplarının varlığı 3279 cm^{-1} 'da gerilme modları ile gösterilmektedir. 2920 cm^{-1} ve 2848 cm^{-1} deki pikler alifatik CH ve CH_2 gerilme modlarından kaynaklanmaktadır. C = O (amit I) ve C-N (amit II) söz konusu olduğunda, iki adet pik noktası, sırasıyla 1639 cm^{-1} ve 1544 cm^{-1} gözlemlenmiştir. Ayrıca, polisakkaritlerin sivri pikleri C-O, P=O, veya C-O-C, literatürdeki gözlemler ile uyumludur (Chan ark., 2002; Beech ve Ark, 1999; San ve Ark, 2011). Pikler sırasıyla, 1386 cm^{-1} , 1230 cm^{-1} ve 1072 cm^{-1} de görünmektedir.

Tablo 5.3. Nikel'in *Aeromonas eucrenophila* ortamındaki spektromu.

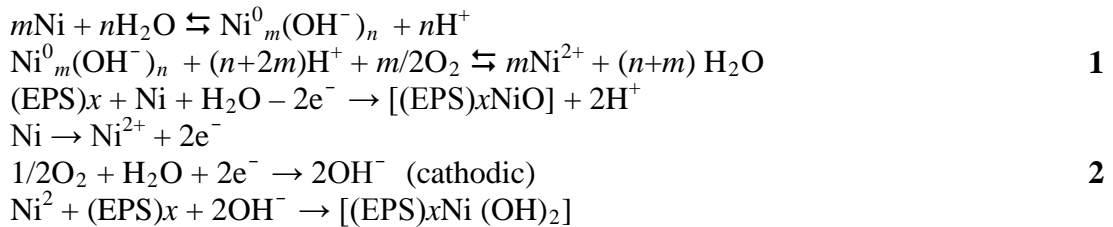
	Dalga sayısı (cm^{-1})	Fonksiyonlu grup
Bölgeler		
Hidrokarbonlar	3279	O-H gerilme
	2920	CH_2 asimetric gerilme
	2848	CH_2 simetric gerilme
Proteinler	1736, 1639	C=O amit I
	1544	C-N amit II
Polisakkaritler	1386	C-O karboksilik asit
	1230	P=O
	1072	C-O, C-O-C polisakkaritlerden gerilme

Şekil 5.7.'de görüldüğü gibi, başlangıçta nikel'in bakterili ve bakterisiz ortamda pH değerleri yaklaşık olarak (pH 7,12) aynıdır. Besiyerinin pH değeri maruz kalma süresi boyunca değişmemiş ancak nikel'in bakterili ortamdaki pH'sı pH 5,93'e düşmüştür.



Şekil 5.7. Nikel'in *Aeromonas eurenophila* ve bakterisiz ortamdaki pH değerleri.

EPS karboksilik asit ve amino asit grupları gibi fonksiyonel grupları içeren, polisakkaritler, üronik asitler, şekerler ve proteinlerden oluşmaktadır. Lewandowski ve Ark 1994, Ayrıca Roe ve Ark. 1996'da, EPS kaplı aşınmış metal yüzeyindeki biyofilm pH'sının asidik alanda olduğunu tespit etmişlerdir. Beech ve arkadaşları, EPS içermeyen besiyeri içinde pH 6.4 iken % 1 EPS karşılaştırıldığında , ortamın 3,9 değerinde bir pH'a sahip olduğunu bildirilmişler. Asidik ortam, muhtemelen polisakaritlerin üronik asit şekerleri ve EPS'nin protein bileşenlerinin amino asitler ile ilişkili karboksilik asit gruplarından kaynaklanmaktadır (Beech, Sunny Cheung, 1995). Böylece, EPS, metal yüzeyin elektrokimyasal özelliklerini etkileyerek metallerin korozyonunda önemli bir rol oynayabilmektedir (Fang ve Ark., 2002). EPS varlığında, nikel'in koroziif tabakasının oluşum reaksiyonu aşağıdaki reaksiyonlar (1, 2) olarak önerilebilir. İç tabaka muhtemelen nikel kompleksidir ve dış tabakada *A. eurenophila* ortamında EPS'den oluşmaktadır.



Fe için ölçülen sayısal değerlerin tartışılması

OCP

Fe'in OCP için ölçülen değerleri incelendiğinde, (Nutrient Broth, -0.6852V; *Pseudomonas Aeruginosa*, -0,7255 V; *Aeromonas eucrenophila*, -0,6610 V; *Clavibacter michiganensis*, -0,7126 V; *Delfia acidovarans*, -0,7008 V) bakterili ortamda, *A.eucrenophila* dışında, besiyeri ortamına göre daha fazla korozyona uğradığı ve *P.aeruginosa* da bu değerlerin en yüksek olduğu görülmektedir (Çizelge 4.1.). *A.eucrenophila*'daki bu aykırı davranış ilk bakışta biyofilm tabakasının inhibitör etkisi olarak değerlendirilebilir olsa da, gerçekte bu yalancı bir korumadır (pseudo protection). Nitekim QCM sonuçları *A.eucrenophila* daki kütle kaybının N. Broth ortamından daha fazla olduğunu göstermiştir. Ayrıca, pH ölçümü *A.eucrenophila*'da asidik yöne kayma ve EDX sonuçları da *A.eucrenophila* bulunduran ortamda N. Broth'a göre oksijen miktarının arttığını göstermektedir. QCM, pH, EDX, Tafel ve EIS verileri *A.eucrenophila* bulunduran ortamda korozyonun biyofilm-metal arayüzeyinde devam ettiğini göstermektedir.

QCM

Demir için QCM'de beş saatlik süre sonunda kütle kaybı değerleri (N. Broth, -8,397µg; *P. Aeruginosa*, -18,99µg; *A. eucrenophila*, -26,26µg; *Clavibacter michiganensis*, -11,07µg; *Delfia acidovarans*, -13,98µg) olarak kaydedilmiştir (Çizelge 4.2.). Bakterili ortamlarda kütle kaybının en çok olduğu görülmektedir. Dolayısıyla bakterili ortamda korozyon hızının daha yüksek olduğu söylenebilir.

LSV ve Tafel

LSV, korozyon takibi için kullanılan teknikler arasında en etkili olanıdır. Ayrıca bu teknik ile kaydedilen potansiyel-akım grafiğinin Y-eksenine ait değerlerinin logaritmasının alınmasıyla elde edilen potansiyel-log akım (akım yoğunluğu) grafiği *Tafel* grafiği olarak adlandırılmaktadır. Bu iki teknikte korozyonun incelenmesi aynı anda 7 değişken (LSV 1; Tafel 6) ile yapılmaktadır (Çizelge 4.3.). Dolayısıyla sayısal değerlerin birbiriyle uyumu ya da birbirine göre değişimi korozyonun doğru olarak yorumlanmasına imkan vermektedir. Fe'in bütün bakteriyel ortamlar için ölçülen LSV ve Tafel değerleri Çizelge 4.4'de verilmiştir.

Tez kapsamında yaptığımız çalışmalar, bakterinin metal yüzeyine konulduktan sonra metalin korozyon davranışının pratikçe iki farklı biçimde olduğunu göstermiştir: *i-* Biyofilm tabakasının yüzeyde oluşması sırasındaki ve *ii-* Biyofilm tabakası yüzeyin büyük bir kısmını örttükten sonraki davranış. Bu tez kapsamında birinci durumundaki davranışı 1 saatlik ölçümler ile, ikinci durumdaki davranışı ise 5 saatlik ölçümler ile takip edilmiştir. Fe için 1 saatlik süre sonunda kaydedilen LSV ve QCM grafiğinden ölçülen kırılma potansiyelleri (E_b) ve kütle kaybı ($\Delta_{\text{Kütle}}$) değerleri incelendiğinde (*P. aeruginosa* -0,7308 V, -1,225 μg ; *A. eucrenophila* -0,6156 V, -0,514 μg ; *C. michiganensis* -0,6328 V, -0,7369 μg ; *D.acidovarans* -0,6275 V, -0,3647 μg ; N. Broth -0,6089V, -0,8023 μg) (Çizelge 4.3) en negatif kırılma potansiyelinin ve en yüksek kütle kaybının *P. aeruginosa*'ya ait olduğu görülecektir. Metal yüzeyinde daha hızlı korozyonu ifade eden bu sayısal değerler aynı zamanda *P. aeruginosa*'nın metal yüzeyinde daha kısa sürede biyofilm tabakası oluşturduğunu da göstermektedir. Aynı süre için -farklı zamanda kaydedilen Tafel değerleri incelendiğinde ise (Çizelge 4.4), korozyon potansiyelleri arasında bir düzensizlik görülse de korozyon akımı değerinin (I_{corr} ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$; *P. aeruginosa* 43,47, *A. eucrenophila* 24,690, *C. michiganensis* 33,48, *D.acidovarans* -20,39) yine de *P. aeruginosa* bulunduran bakterili ortamda olduğu görülecektir. Bu sonuç bize, biyofilm tabakasının metal yüzeyinde koruma yapmadığını aksine korozyonun biyofilm-metal arayüzeyinde devam ettiğini göstermektedir.

EIS

Elektrokimyasal empedans spektroskopisi temel olarak yüksek frekans bölgesinde yüzeyde oluşan biyofilm tabakasının *dış yüzeyi* ve düşük frekans bölgesinde biyofilm-metal arayüzeyi *-iç yüzeyi-*, hakkında bilgi verir. Ayrıca EIS ile yapılan ölçümlerin anlamlı olarak değerlendirilebilmesi için kaydedilen grafik deseninden (Nyquist ve Bode diyagramları), grafik deseninin karşılığı olan elektronik devre eşdeğerinin hesaplanmasına imkan verir. Tez kapsamında yapılan çalışmalarda, yüzeyde oluşan biyofilm tabakasının yüzey ile ilişkisi üç ayrı elektronik devre eşdeğeri olarak düşünülmüş [$(R_s(Q_{\text{pf}}R_{\text{pf}}))$; $(R_s(Q_{\text{pf}}R_{\text{pf}})(Q_{\text{dl}}R_{\text{dl}}))$; $(R_s(Q_{\text{pf}}(R_{\text{pf}}(Q_{\text{dl}}R_{\text{dl}}))))$] ve herbiri için devre elemanlarının değerleri ayrı olarak hesaplanmıştır. Hesaplanan değerler incelendiğinde hem Fe için hem de diğer metaller için en uygun sonuçların $(R_s(Q_{\text{pf}}R_{\text{pf}}))$ (çözelti-biyofilm+poröz pasif tabaka+metal yüzeyi) devresi için elde edildiği söylenebilir. Diğer taraftan, geçekte en uygun elektronik devre eşdeğerinin $(R_s(Q_{\text{pf}}(R_{\text{pf}}(Q_{\text{dl}}R_{\text{dl}}))))$ (çözelti-biyofilm+poröz pasif tabaka+biyofilm-

metal yüzeyi) olması beklenmektedir. Bu anomali, mikrobiyal korozyonun dinamik bir proses olmasıyla ilgilidir. Yüksek frekans bölgesinde yapılan ilk ölçümler ile düşük frekans bölgesinde yapılan ölçümler arasında geçen 20 dk'lık süre (ölçüm süresinin 1/3'ü) içinde yüzeyde meydana gelen yanal ve dikey çatlaklar (SEM mikrografları) biyofilm-metal yüzeyini birbirinden ayrıştırılabilir parametreler ile tartışılmasına müsade etmemektedir. Bu nedenle en uygun olarak tartışılabilir sonuçlar ($R_s(Q_{pf}R_{pf})$) devresi için elde edilmiştir. Fe için bu değerler incelendiğinde çift tabaka direncinin (R_{pf}) düşük olduğu bakterinin *P. aeruginosa* olduğu görülecektir. Bu durum ise, *P. aeruginosa* ortamında biyofilm-metal arayüzeyinde yük aktarımının (korozyon akımı, tafel ile uyumlu sonuç) yüksek olduğunu göstermektedir. EIS ölçümlerinden sonuç olarak bakteri-metal etkileşmesinin metalin bariyer direncini düşürdüğü ve korozyonu hızlandırdığı söylenebilir.

KAYNAKLAR

- Almeida, M.A.N., Franca, F.P. 1999. Thermophilic and mesophilic bacteria in biofilms associated with corrosion in a heat exchanger. *World Journal of Microbiology & Biotechnology*, 15; 439-442.
- Angell, P. 1999. Understanding microbially influenced corrosion as biofilmmediated changes in surface chemistry. *Current Opinion in Biotechnology*, 10; 269-272.
- Babu, B.R., Maruthamuthu, S., Rajasekar, A., Muthukumar, N. and Palaniswamy, N. 2006. Microbiologically influenced corrosion in dairy effluent. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 3(2); 159-166.
- Bard, A.J., Faulkner, L.R., 1980. *Electrochemical Methods*. Jo Wiley&Sons, USA, 718.
- Beech, I.B. Sunny, C.W. Cheung, 1995. Interactions of exopolymers produced by sulphate reducing bacteria with metal ions. *Int. Biodeter. Biodegr*, (35) 59–72.
- Beech, I. B., Gaylarde, C.C. 1999. Recent Advances in the Study of Biocorrosion. *Revista de Microbiologia*, 30; 177-190.
- Borenstein, S. W. 1994. MIC failure analysis. *Materials performance*, 33(4); 43-45.
- Bremer, P.J. 1991. Characterization of a thin copper film to investigate microbial biofilm formation. *Surface and Interface Analysis*, 17(11); 767–772.
- Busalmen, J. P. 1998. Ellipsometric Measurement of Bacterial Films at Metal-Electrolyte Interfaces. *Applied and Environmental Microbiology*, 64(10); 3690–3697.
- Busalmen, J.P., Sanchez, S.R. 2003. Changes in the Electrochemical Interface as a Result of the Growth of *Pseudomonas fluorescens* Biofilms on Gold. *Biotechnology and Bioengineering*, 82(5); 619-625.
- Caldwell, D.E. Korber, D.R. Lawrence, J.R. J. 1992. *Microbiol. Method*, (15) 249–261.
- Cetin, D., Aksu, M.L. 2009. Corrosion behavior of low-alloy steel in the presence of *36 Desulfotomaculum* sp.. *Corros. Sci*, (51) 1584–1588.

- Chan, K.Y. Xu, L.C. Fang, H.H.P. 2002. Anaerobic electrochemical corrosion of mild steel in the presence of extracellular polymeric substances produced by a culture enriched in sulfate-reducing bacteria. *Environ. Sci. Technol.*, (36) 1720–1727.
- Cheng, S., Tian, J., Chen, S., Lei, Y., Chang, X., Liu, T., Yin, T. 2009. Microbially influenced corrosion of stainless steel by marine bacterium *Vibrio natriegens*: (I) Corrosion behavior. *Materials Science and Engineering*, 29; 751–755.
- Courtesy of W. Costerton. 2008. A Paradigm Shift for Antibacterials. *Industrial Biotechnology Workshop*, 24, Perth.
- Davidson, D. 1996. Effects of *Arthrobacter* sp., *Acidovorax delafieldii*, and *Bacillus megaterium* colonisation on copper solvency in a laboratory reactor. *Biofouling*, 9(4); 279-292.
- Donlan, R.M., Costerton, J.W. 2002. Biofilms: survival mechanisms of clinically relevant microorganisms. *Clin Microbiol Rev*, 15(2); 93-167.
- Dunne, W.M. 2002. Bacterial Adhesion: Seen Any Good Biofilms Lately?. *Clinical Microbiology Reviews*, 15(2); 155-166.
- Erbil, M. 1984. *Korozyon-I*, SEGEM Yayınları, 270 s., Ankara.
- Feugeas, F. 1997. Corrosion influence par les micro-organismes. *J. Phi-s III France*, 7; 631-663.
- Franklin, M.J. White, D.C. Little, B. Ray, R. Pope, R. 2000. The role of bacteria in pit propagation of 42 carbon steel. *Biofouling*, (15) 13-23.
- Geesey, G. G. 1990. Determination of Bacterial Growth and Activity at Solid-Liquid Interfaces. *Annual Review of Microbiology*, 44; 579-602.
- George, R.P. 2003. Influence of Surface Characteristics and Microstructure on Adhesion of Bacterial Cells onto a Type 304 Stainless Steel. *Biofouling*, 19; 1–8.
- Gomez de Saravia, S. G. 1991. Biofilm effects and MIC of carbon steel in electrolytic media contaminated with microbial strains isolated from cutting-oil emulsions. *Corrosion*, 47(9); 687-692.

- Guezenec, J.G. 1994. Cathodic protection and microbially induced corrosion. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 34(3-4); 275-288.
- Hamilton, W.A. 2003. Microbially Influenced Corrosion as a Model System for the Study of Metal Microbe Interactions: a Unifying Electron Transfer Hypothesis. *Biofouling*, 19(1); 65-76.
- Heakal, F. El-Taib 2010, Electrochemical behavior of 304L stainless steel in high saline and sulphate solutions containing alga *Dunaliella salina* and b-carotene. *J. Alloy. Compd.* (491) 636–642.
- Herbert, H.P. Fang, Chong, X. Li Kwong-Yu, C. 2002. Effects of toxic metals and chemicals on biofilm and biocorrosion. *Water Research*, (36) 4709–4716.
- Jayaraman, A., Earthman, J.C., Wood, T.K. 1997. Corrosion inhibition by aerobic biofilms on SAE 1018 steel. *Appl Microbiol Biotechnol*, 47; 62-68.
- Kaypmaz, T.C., Tuncay, R.N. 2010. Li-iyon polimer pillerde sağlamlık durumu değerlendirmesi. *İtü dergisi*, 9(1); 25-35.
- Kelly, R.G., Scully, J.R., Shoesmith, D.W., Buchheit, R.G. 2003. *Electrochemical Techniques in Corrosion Science and Engineering*. Marcel Dekker, Inc, 427, New York. Basel.
- Kopteva, Z.H.P. 2004. Microflora of damaged ferroconcrete structures under the conditions of inhibitory protection. *Mikrobiol Z*, 66(5);68-75.
- Lasia, A. 1999. *Electrochemical Impedance Spectroscopy and Its Applications, Modern Aspects of Electrochemistry*. Kluwer Academic/Plenum Publishers, 32; 143-248.
- Lewandowski, Z. Funk, T. Roe, F. Little, B. 1994. Spatial distribution of pH at mild steel surfaces using an iridium oxide microelectrode. *Microbiologically influenced corrosion testing ASTM STP 1232*, ASTM: Philadelphia, 61–69.
- Little, B. 1992. An overview of microbiologically influenced corrosion. *Electrochimica Acta*, 37(12); 2185-2194.

- Little, B., Wagner, P., Angell, P., White, D., 1996. Correlation between localized anodic areas and *Oceanospirillum* biofilms on copper. *International Biodeterioration and Biodegradation*, 37, 159-162.
- Little, B.J. 1997. Spatial relationships between bacteria and mineral surfaces. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 35(1); 123-159.
- Mansfeld, F. 2007. The interaction of bacteria and metal surfaces. *Electrochimica Acta*, 52; 7670–7680.
- Matsunaga, T. 2000. Electrochemical Prevention of Biofouling. *Denki Kagaku oyobi Kogyo Butsuri Kagaku*, 11; 847-852.
- Miečinskis, P., Leinartas, K., Uksienė, K., Lugauskas, A., Ramanauskas, R. and Juzeliūnas, E. 2006. QCM study of microbially induced corrosion of aluminium exposed to *Aspergillus niger* Tiegh. *Chemija*, 17(4); 30–34.
- Nercessian, D., Duville, F. B., Desimone, M., Simison, S., Busalmen, J. P., 2010. Metabolic turnover and catalase activity of biofilms of *Pseudomonas fluorescens* (ATCC 17552) as related to copper corrosion. *water research*, 44; 2592–2600.
- O'Toole, G. 2000. Biofilm formation as microbial development. *Annu Rev Microbiol*, 54; 49-79.
- Perez, E.J., Sierra, R.C., Gonzalez, I., Vives, F.R. 2007. Influence of *Desulfovibrio* sp. biofilm on SAE 1018 carbon steel corrosion in synthetic marine medium. *Corrosion Science*, 49; 3580–3597.
- Potekhina, J.S., Sherisheva, N.G., Povetkina, L.P, Pospelov, A.P., Rakitina, T.A., Warnecke, F., Gottschalk. G. 1999. Role of microorganisms in corrosion inhibition of metals in aquatic habitats. *Appl Microbiol Biotechnol*, 52; 639-646.
- Ren, D., Bedzyk, L.A., Thomas, S.M., Ye, R.W. and Wood, T.K. 2004. Gene expression in *Escherichia coli* biofilms. *APPLIED MICROBIOLOGY AND BIOTECHNOLOGY*, 64(4); 515-524.

- Reyesa, A., Leteliera, M.V., Iglesiab, R.D., Gonzalez, B., Lagos, G. 2008. Microbiologically induced corrosion of copper pipes in low-pH water. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 61; 135–141.
- Roe, F.L. Lewandowski, Z. Funk, T. 1996. Simulating microbiologically influenced corrosion by depositing extracellular biopolymer on mild steel surfaces. *Corrosion*, (52) 744–52.
- Rongjun, Z., Kus, E., Mansfeld, F., Thomas, K., Wood 2005, The importance of live biofilms in corrosion protection. *Corrosion Science*, (47) 279–287.
- Rongjun Zuo, 2007. Biofilms: strategies for metal corrosion inhibition employing microorganisms. *Appl Microbiol Biotechnol*, 76; 1245–1253.
- San, N.O. Nazır, H. Dönmez, G. 2011. Microbial corrosion of Ni–Cu alloys by *Aeromonas eucrenophila* bacterium. *Corrosion Science*, (53) 2216–2221.
- Siedlerek, H. Wagner, D., Fischer, W.R. ve Paradies H.H. 1994. Microbiologically influenced corrosion of copper. *Corrosion Science*, 10; 1751-1763.
- Stewart, P.S., Franklin, M.J. 2008. Physiological heterogeneity in biofilms. *Nature Reviews Microbiology*, 6; 199-210.
- Tanji, Y., Morono, Y., Soejima, A., Hori, K. and Unno, H. 1999. Structural Analysis of a Biofilm Which Enhances Carbon Steel Corrosion in Nutritionally Poor Aquatic Environments. *Journal of Bioscience and Bioengineering*, 88(5); 551-556.
- Tansug, G. 2008. Elektrokimyasal olarak oluşturulacak Polipirol (PPy), Poli N-Metil Piroil (PmPy) ve PPy/PmPy filmlerinin demirli malzemelerin korozyon davranışları üzerindeki etkilerinin araştırılması. Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü (Doktora Tezi), 1-187, Adana.
- Telegdi, J., Shaban, A., Kalman, E. 2000. EQCM study of copper and iron corrosion inhibition in presence of organic inhibitors and biocides. *Electrochimica Acta*, 45; 3639–3647.
- Tüken, T., Erbil, M., Yalçınkaya, S., Yazıcı, B. 2007. İletken Polimerler Yardımıyla Korozyonun Önlenmesi. Çukurova Üniversitesi, Fen Edebiyat Fakültesi, 8, Adana.

- Valcarce, M.B. de Sa´nchez, S.R. Va´zquez, M. 2005. *Corros. Sci*, 47 (3) 795–809.
- Videla, H.A. 2001. *Int. Biodeter. Biodegrad*, 176–201.
- Wagner, D. 1997. Microbiologically influenced corrosion of copper in potable water installations. *Werkstoffe und Korrosion*, 48(5); 311-321.
- Wang H.W. 2000. The erosive wear of mild and stainless steels under controlled corrosion in alkaline slurries containing alumina particles. *Journal of Materials Science*, 35(21), 5263-5273.
- Wang, W., Wang, J., Li, X., Xu, H. and Wu, J. 2004. Influence of biofilms growth on corrosion potential of metals immersed in seawater. *Materials and Corrosion*, 55(1); 30-36.
- Wang, W. , Wang, J., Xu, H. ve Li, X. 2006. Electrochemical techniques used in MIC studies. *Materials and Corrosion*, (57) 800-804.
- Watnick, P., Kolter, R. 2000. Biofilm, City of Microbes. *J Bacteriol*, 182(10); 2675–2679.
- Webster B. J. 2000 Microbiologically influenced corrosion of copper in potable water systems-pH effects. *Corrosion*, 56(9); 942-950.
- Xu, K. 1998. Voltammetric Microelectrodes for Biocorrosion Studies. *Corrosion*, 54(10); 1-10.
- Yuan, S.J., Choong, A.M.F., Pehkonen,.S.O. 2007. The influence of the marine aerobic *Pseudomonas* strain on the corrosion of 70/30 Cu–Ni alloy. *Corrosion Science*, 49; 4352–4385.
- Zuo, R., Kus, E., Mansfeld, F., Wood, T.K. 2005. The importance of live biofilms in corrosion protection. *Corrosion Science*, 47; 279–287.

ÖZGEÇMİŞ

Amirparviz FARSHCHI TABRIZI

Ankara üniversitesi, Biyoteknoloji Entitüsü

06100 Tandogan Ankara, Türkiye

Tel: (090 312) 212 6720 / 1026 – 1035

E-mail: amir_f_tabrizi@yahoo.com

Öğrenim Durumu

Hali hazırda Ankara üniversitesi, Biyoteknoloji Entitüsü doktora programı öğrencisi (Tez konusu: Aerobik Bakterilerin Metal Korozyonuna Etkisinin incelenmesi)

2006 Biyomühendislik yüksek Lisans, Hacettepe Üniversitesi Ankara (Tez konusu: Altın Nanopartiküllerin Üretimi ve QCM Sistemlerinde Kullanımı)

2002 Uygulamalı Fizik Lisans, Urumiya Üniversitesi, İran (Proje Konusu: GaAs Yarı Geçirgenlerinin Özelliklerinin İncelenmesi)

Yayınlar (SCI İndeks Uluslar arası 3 ,Ulusal 1)

SCI İndeks

[3] | A.P.F. Tabrizi, H. Nazir, N. O. San, G. Donmez, Monitoring of Corrosion of Aeromonas eucrenophila In The First Steps of Biofilm Formation on Nickel, "*Journal of Engineering and Applied Sciences*" 19 Nisan 2012 kabul edilmiş (Baskıda).

[2] | F. Ayhan, A. Tabrizi, and H. Ayhan, "Microgravimetric DNA Detection with Gold Nanoparticle Immobilized Piezo Crystal by Quartz Crystal Microbalance", *Sensor Letters American Scientific Publishers*, Vol. 9, 1–7, 2011.

[1] | Tabrizi, P. F. A., San, N. O., Dönmez, G., Nazir, H., "The Study of Corrosion | Effect of *Pseudomonas aeruginosa* on Fe, Cu and Ni Metal surfaces by EQCM", 2nd International Conference CORROSION and Material Protection, O005, 19-22 April 2010, Prague, Czech Republic.

Ulusal

[1] Amir Tabrizi¹, Fatma Ayhan², Hakan Ayhan^{2*}, Gold Nanoparticle Synthesis and Characterisation, *Hacettepe J. Biol. & Chem.*, 2009, 37 (3) 217-226.

Konferans Tutanakları (Uluslararası 2, Ulusal 4)

Uluslararası

[2] | Tabrizi, P. F. A., San, N. O., Dönmez, G., Nazir, H., "Microbial Influence Corrosion Monitoring of *Clavibacter michiganensis* on Fe, Cu, Ni by EIS and SEM", 2nd International Conference CORROSION and Material Protection, P006, 19-22 April 2010, Prague, Czech Republic.

- [1] Emregül, C. K., Nazir, H., Tabrizi, F. P. A., San, N. O., Dönmez, G., "Determination of Bacterial Corrosion of Copper by *Pseudomonas aeruginosa* with EQCM", EUCORR 2009, The European Corrosion Congress, p. 279, 6-10 September 2009, Nice, France.

Ulusal

- [4] Tabrizi, P. F. A., San, N. O., Dönmez, G., Nazir, H., "*Clavibacter michiganensis* Bakterisinin Fe ve Cu Metallerinin Korozyonuna Etkisinin İncelenmesi", XVI. Ulusal Biyoteknoloji Kongresi, s 61, 13-16 Aralık 2009, Antalya, Türkiye.

- [3] Tabrizi, P. F. A., San, N. O., Dönmez, G., Nazir, H., "Investigation Of Corrosion Behaviour Of Ni Coated Steel in Presence Of Aerobic *Aeromonas eucrenophila* On EQCM", 8. International Electrochemistry Meeting In Turkey, p. 83, 8-11 October 2009, Antalya, Turkey.

- [2] Tabrizi A. F. P., San N. O., Dönmez G., Nazir H., "*Pseudomonas aeruginosa* Bakterisinin Fe Korozyonuna Etkisinin EQCM İle İncelenmesi", 23. Ulusal Kimya Kongresi, S09, Bildiriler s. Sivas, 47, 16-20 Haziran 2009.

- [1] Tabrizi, P. F. A., San, N. O., Dönmez, G., Nazir, H., "*Aeromonas eucrenophila* Bakterisinin Cu Korozyonuna Etkisinin EQCM İle İncelenmesi", II. Ulusal Anorganik Kimya Kongresi, P14, Bildiriler s. 44, Elazığ 16-19 Mayıs 2009.