

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Escherichia coli ve *Enterococcus faecalis* BAKTERİLERİNİN GÖZENEKLİ
SİLİSYUM YÜZEYİNDE DEPOLANMASINDA ELEKTRİK ALANIN ETKİSİ

SEVİNÇ GÜLER

DOKTORA TEZİ
FİZİK ANABİLİM DALI

DANIŞMAN
DOÇ. DR. ÇİĞDEM ORUÇ

İSTANBUL, 2020

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Escherichia coli ve *Enterococcus faecalis* **BAKTERİLERİNİN GÖZENEKLI
SİLİSYUM YÜZEYİNDE DEPOLANMASINDA ELEKTRİK ALANIN ETKİSİ**

Sevinç GÜLER tarafından hazırlanan tez çalışması 10.01.2020 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik Anabilim Dalı'nda **DOKTORA TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Tez Danışmanı

Doç. Dr. Çiğdem ORUÇ
Yıldız Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri

Doç. Dr. Çiğdem ORUÇ
Yıldız Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Ahmet ALTINDAL
Yıldız Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Fatma KÖKSAL ÇAKIRLAR
İstanbul Üniversitesi- Cerrahpaşa

Doç. Dr. Cenk SESAL
Marmara Üniversitesi

Doç. Dr. Süreyya AYDIN YÜKSEL
Yıldız Teknik Üniversitesi

Bu alışma, Yıldız Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü' nün 2015-01-01-KAP03 numaralı projesi ile desteklenmiştir.

ÖNSÖZ

Tez sürecimin her evresinde bilgi birikimini benimle paylaşmaktan vazgeçmeyen, deneysel çalışmalarımda maddi ve manevi yanımda olan Doç. Dr. Çiğdem ORUÇ' a çok teşekkür ederim.

Tezime olan katkılarından ve desteğini hiçbir zaman esirgemediğinden dolayı Prof. Dr. Ahmet ALTINDAL'a çok teşekkür ederim.

Tezimdeki deneysel çalışmalarımı desteklediği ve tezde kullanılan bakterilerin temin edilmesini sağladığı için Prof. Dr. Fatma KÖKSAL ÇAKIRLAR' a çok teşekkür ederim.

Deney çalışmalarda kullanılan bakteri temini için Arş. Gör. Dr. Günseli KURT GÜR' e ve deneysel çalışmalarda kullanılan bakterilerin hazırlık aşamasındaki desteklerinden dolayı Okan AYDOĞAN ve Doğukan ÖZBEY' e teşekkür ederim.

Hayatım boyunca her koşulda bana destek veren, en zor anlarımda bana umut olan ve bugünlere gelebilme sebebim olan değerli annem Şerife YILDIRIM'a ve değerli babam Nurettin YILDIRIM'a sonsuz teşekkür ederim.

Tanıdığım günden itibaren her koşulda yanımda olup, desteğini hiç esirgemeyen, koşulsuz sevmenin ne kadar güzel olabileceğini bana gösteren canım hayat arkadaşım, eşim Ekin GÜLER' e sonsuz teşekkür ederim.

Birbirimizin kalp atışlarını duyduğumuzdan beri, en iyi arkadaşım olan biricik oğlum Deniz'ime bana dünyanın en güzel anneliğini yaşattığı için sonsuz teşekkür ederim.

Şubat, 2020

Sevinç GÜLER

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
SİMGE LİSTESİ	ix
KISALTMA LİSTESİ	x
ŞEKİL LİSTESİ.....	xi
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xv
ÖZET	xvii
ABSTRACT	xix
BÖLÜM 1	
GİRİŞ 1	
1.1 Literatür Özeti	1
1.2 Tezin Amacı	5
1.3 Hipotez	6
BÖLÜM 2	
GENEL BİLGİLER.....	7
2.1 Yarıiletkenler	7
2.1.1 Saf Yarıiletkenler	8
2.1.2 Katkılı Yarıiletkenler	9
2.2 Tek Kristal Silisyum	11
2.2.1 Silisyumun Kristal Yapısı.....	11
2.2.2 Silisyumun Kimyasal Özellikleri.....	12
2.2.3 Silisyumun Fiziksel Özellikleri.....	12
2.3 Gözenekli Silisyum	13
2.3.1 Gözenekli Silisyumun Yapısı.....	13

2.3.2	Gözenekli Silisyumun Oluşum Mekanizması	14
2.3.3	Gözenekli Silisyum Oluşumunda Anodizasyon Koşulları	15
2.4	Bakteriler.....	16
2.4.1	Bakterilerin sınıflandırılması, çeşitleri	16
2.4.2	Bakterilerin üremesi, yaşam koşulları.....	16
2.4.3	<i>Escherichia coli</i>	17
2.4.4	<i>Enterococcus faecalis</i>	19
2.5	Kondansatör.....	19
2.6	Empedans Spektroskopisi	20
BÖLÜM 3		
DENEYSEL ÇALIŞMALAR		23
3.1	Biyolojik Yöntemler.....	23
3.2	Fiziksel Yöntemler	24
3.2.1	Gözenekli Silisyumun Elde Edilmesi.....	24
3.2.2	Gözeneklilik ve Kalınlık Parametrelerinin Belirlenmesi	25
3.2.3	Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) Analizi	26
3.2.4	Empedans Analizörü	26
3.2.5	UV-VIS Spektrofotometre	27
BÖLÜM 4		
BULGULAR.....		29
4.1	Gözenekli Silisyum Filmlerin SEM Analizleri	29
4.2	Makro Gözenekli In/Si/GS/Ag Yapılarda <i>E. coli</i> Bakteri Deneyleri.....	30
4.2.1	<i>E. coli'</i> nin Farklı Konsantrasyonlu Bakteri İçeren Sıvılarındaki Frekansa Bağlı Empedans Ölçümleri.....	30
4.2.2	Farklı Konsantrasyonlara Sahip <i>E.coli</i> Süspansiyonların UV-VIS Absorpsiyon Spektrumları.....	32
4.2.3	Sabit Konsantrasyonlu <i>E. coli</i> Bakterisi İçeren Sıvılara Dışarıdan Uygulanan İleri Yön Elektrik Alan Etkisi ile Frekansa Bağlı Empedans, İletkenlik Değişimi	34
4.2.4	Sabit Konsantrasyonlu <i>E. Coli</i> Bakterisi İçeren Sıvılara Dışarıdan Uygulanan Ters Yön Elektrik Alan Etkisi ile Frekansa Bağlı Empedans, İletkenlik Değişimi	37
4.2.5	Canlı <i>E. coli</i> Bakterisinin İleri Yönde Sabit 12 kV/cm Elektrik Alan Değeri Altında Farklı Zamanlardaki Frekansa Bağlı Empedans Değişimi	40
4.2.6	Canlı <i>E. coli</i> Bakterisinin Ters Yönde Sabit 12 kV/cm Elektrik Alan Değeri Altında Farklı Zamanlardaki Frekansa Bağlı Empedans Değişimi	41

4.2.7	Canlı ve ölü <i>E. coli</i> Bakterisinin İleri Yönde ve Ters Yönde Sabit 12 kV/cm Elektrik Alan Değeri Altında Farklı Zamanlardaki Frekansa Bağlı Empedans Değişimi...	43
4.3	Makro Gözenekli In/Si/GS/Ag Yapılarda <i>E. faecalis</i> Bakteri Deneyleri.....	46
4.3.1	<i>E. faecalis</i> ' in Farklı Konsantrasyonlu Bakteri İçeren Sıvılarındaki Frekansa Bağlı Empedans Ölçümleri.....	46
4.3.2	Farklı Konsantrasyonlara Sahip <i>E. faecalis</i> Süspansiyonların UV-VIS Absorpsiyon Spektrumları.....	47
4.3.3	Sabit Konsantrasyonlu <i>E. faecalis</i> Bakterisi İçeren Sıvılara Dışarıdan Uygulanan İleri Yön Elektrik Alan Etkisi ile Empedans Değişimi	49
4.3.4	Sabit Konsantrasyonlu <i>E. faecalis</i> Bakterisi İçeren Sıvılara Dışarıdan Uygulanan Ters Yön Elektrik Alan Etkisi ile Empedans Değişimi.....	50
4.3.5	Canlı <i>E. faecalis</i> Bakterisinin İleri Yönde Sabit 7 kV/cm Elektrik Alan Değeri Altında Zamana Bağlı Empedans Değişimi.....	52
4.3.6	Canlı <i>E. faecalis</i> Bakterisinin Ters Yönde 7 kV/cm Elektrik Alan Değeri Altında Zamana Bağlı Empedans Değişimi	53
4.3.7	Canlı ve ölü <i>E. faecalis</i> bakterisinin ileri yönde ve ters yönde 7 kV/cm elektrik alan değeri altında zamana bağlı empedans değişimi.....	55
4.3.8	Sabit Konsantrasyonlu <i>E. coli</i> bakterisi içeren sıvılara dışarıdan uygulanan elektrik alan etkisi ile frekansa bağlı empedans değişimi.....	57
4.3.9	<i>E. coli</i> ve <i>E. faecalis</i> Bakteri Deneylerinin Karşılaştırılması.....	65
4.4	Küçük Gözenekli Makro In/Si/GS/Ag Yapılarda <i>E. coli</i> Bakteri Deneyleri..	67
4.4.1	<i>E. coli</i> ' nin Farklı Konsantrasyonlu Bakteri İçeren Sıvılarındaki Frekansa Bağlı Empedans Ölçümleri.....	67
4.4.2	Sabit Konsantrasyonlu <i>E. Coli</i> Bakterisi İçeren Sıvılara Dışarıdan Uygulanan İleri Yön Elektrik Alan Etkisi ile Empedans Değişimi	68
4.4.3	Sabit Konsantrasyonlu <i>E. Coli</i> Bakterisi İçeren Sıvılara Dışarıdan Uygulanan Ters Yön Elektrik Alan Etkisi ile Empedans Değişimi	70
4.4.4	Canlı <i>E. coli</i> Bakterisinin İleri Yönde 12 kV/cm Elektrik Alan Değeri Altında Zamana Bağlı Empedans Değişimi	71
4.4.5	Canlı <i>E. coli</i> Bakterisinin Ters Yönde 12 kV/cm Elektrik Alan Değeri Altında Farklı Zamanlardaki Frekansa Bağlı Empedans Değişimi	72
4.4.6	Canlı ve Ölü <i>E. coli</i> Bakterisinin İleri Yönde ve Ters Yönde 12 kV/cm Elektrik Alan Değeri Altında Farklı Zamanlardaki Frekansa Bağlı Empedans Değişimi.....	74
4.5	Küçük gözenekli makro In/Si/GS/Ag Yapılarda <i>E. faecalis</i> Bakteri Deneyleri.....	76
4.5.1	<i>E. faecalis</i> ' in Farklı Konsantrasyonlu Bakteri İçeren Sıvılarındaki Frekansa Bağlı Empedans Ölçümleri.....	76

4.5.2	Sabit Konsantrasyonlu <i>E. faecalis</i> Bakterisi İçeren Sıvılara Dışarıdan Uygulanan İleri Yön Elektrik Alan Etkisi ile Empedans Değişimi	77
4.5.3	Sabit Konsantrasyonlu <i>E. faecalis</i> Bakterisi İçeren Sıvılara Dışarıdan Uygulanan Ters Yön Elektrik Alan Etkisi ile Empedans Değişimi.....	79
4.5.4	Canlı <i>E. faecalis</i> bakterisinin İleri Yönde 7 kV/cm Elektrik Alan Değeri Altında Zamana Bağlı Empedans Değişimi	80
4.5.5	Canlı <i>E. faecalis</i> Bakterisinin Ters Yönde 7 kV/cm Elektrik Alan Değeri Altında Zamana Bağlı Empedans Değişimi	81
4.5.6	Canlı ve Ölü <i>E. faecalis</i> Bakterisinin İleri Yönde Ve Ters Yönde 7 kV/cm Elektrik Alan Değeri Altında Zamana Bağlı Empedans Ölçümleri	82
BÖLÜM 5		
SONUÇ VE ÖNERİLER.....		84
KAYNAKLAR.....		88
ÖZGEÇMİŞ.....		92

SİMGE LİSTESİ

C	Kapasitans
Z	Empedans
Z'	Gerçek empedans
Z''	Sanal empedans
σ	İletkenlik
C _d	Çift tabaka kapasitans
ρ	Özdirenç
λ	Dalga boyu
T	Sıcaklık
E	Elektrik Alan
E _c	İletim Bandı
E _v	Değerlik (Valans) Bandı
h	Planck sabiti
ν, ω, f	Frekans
k	Elektronun dalga vektörü
α	Soğurma katsayısı
a	Örgü sabiti
e	Elektronun Yüğü
E _g	Yarıiletkenin Yasak Band Genişliği
I (t)	Zamana Bağlı Akım
V (t)	Zamana Bağlı Potansiyel
Φ	Faz Farkı
P	Gözeneklilik
t	Zaman

KISALTMA LİSTESİ

Si	Silisyum
Ge	Germanyum
GS	Gözenekli Silisyum
HF	Hidroflorik Asit
SEM	Taramalı Elektron Mikroskobu
<i>E. coli</i>	<i>Escherichia coli</i>
<i>E. faecalis</i>	<i>Enterococcus faecalis</i>
Al	Alüminyum
ES	Empedans Spektroskopisi
<i>S. typhimurium</i>	<i>Salmonella typhimurium</i>
SC	Basit Kübik
BCC	Cisim Merkezli Kübik
FCC	Yüzey Merkezli Kübik
AC	Alternatif Akım
Ag	Gümüş
In	İndiyum
Pt	Platin
MHA	Mueller-Hinton Agar
UV-VIS	Ultraviyole-Görünür Spektrofotometresi

ŞEKİL LİSTESİ

	Sayfa
Şekil 2. 1 Katılarda Band Diyagramları	8
Şekil 2. 2 Farklı sıcaklıklar için saf yarıiletken enerji band diyagramı	9
Şekil 2. 3 n tipi katkılı yarıiletken	10
Şekil 2. 4 p tipi katkılı yarıiletken	10
Şekil 2. 5 Basit kübik yapı, cisim merkezli kübik yapı, yüzey merkezli kübik yapı.....	11
Şekil 2. 6 Silisyumun kristal yapısı.....	12
Şekil 2. 7 Gözenekli silisyumun şematik gösterimi	14
Şekil 2. 8 Boşluk oluşma mekanizması.....	14
Şekil 2. 9 <i>E. coli</i> bakterisinin SEM görüntüsü	18
Şekil 2. 10 <i>E. faecalis</i> bakterisinin SEM görüntüsü	19
Şekil 2. 11 Paralel plakalı kondansatör şematik gösterimi	20
Şekil 2. 12 Kompleks empedans düzlemi	21
Şekil 3. 1 Bakteri hesaplamalarında kullanılan linkin ekran görüntüsü	24
Şekil 3. 2 GS üretimi için elektrokimyasal aşındırma yöntemi [48].	25
Şekil 3. 3 Empedans Analizörü	26
Şekil 3. 4 Deney düzeneğinin şematik gösterimi	27
Şekil 3. 5 Shimadzu UV-1280 Multipurpose UV-Vis Spektrofotometre cihazı	28
Şekil 4. 1 (a) Makro gözenekli üretilen GS/Si yapıların 1000 büyütmede üstten görünüşü (b) Makro gözenekli üretilen GS/Si yapıların 5000 büyütmede üstten görünüşü.....	29
Şekil 4. 2 (a) Küçük gözenekli makro üretilen GS/Si yapıların 1000 büyütmede üstten görünüşü (b) Küçük gözenekli makro üretilen GS/Si yapıların 5000 büyütmede üstten görünüşü.	30
Şekil 4. 3 (a) In/Si/GS/Ag yapıların <i>E. coli</i> ' nin farklı konsantrasyonlu bakteri içeren sıvılarındaki frekansa bağlı empedans grafiği (b) 100 Hz, 1 kHz, 10 kHz, 100 kHz frekans değerlerinde empedans değişimleri	32
Şekil 4. 4 Çeşitli bakteri konsantrasyonlarına sahip süspansiyonların UV-VIS absorpsiyon spektrumları (b) farklı konsantrasyonlardaki E.coli süspansiyonlarının 600 nm dalga boyundaki absorpsiyon değerleri	33
Şekil 4. 5 (a) In/Si/GS/Ag yapıların 4×10^7 cfu. mL ⁻¹ <i>E. coli</i> konsantrasyonunda sırasıyla 0kV/cm, 2kV/cm, 4kV/cm, 6kV/cm, 8kV/cm ve 10kV/cm ileri yönde uygulanan elektrik alan değerlerinde (a) frekansa bağlı empedans değişimi (b) 4×10^4 Hz sabit frekansı için empedans değişimi	35

Şekil 4. 6 (a) In/Si/GS/Ag yapıların 4×10^7 cfu. mL^{-1} <i>E. coli</i> konsantrasyonunda sırasıyla 0kV/cm, 2kV/cm, 4kV/cm, 6kV/cm, 8kV/cm ve 10kV/cm ileri yönde uygulanan elektrik alan değerlerinde (a) frekansa bağlı iletkenlik değişimi (b) 4×10^4 Hz sabit frekansı için iletkenlik değişimi	36
Şekil 4. 7 In/Si/GS/Ag yapıların 4×10^7 cfu. mL^{-1} <i>E. coli</i> konsantrasyonunda sırasıyla 0kV/cm, 2kV/cm, 4kV/cm, 6kV/cm, 8kV/cm ve 10kV/cm ters yönde uygulanan elektrik alan değerlerinde (a) frekansa bağlı empedans değişimi (b) 4×10^4 Hz sabit frekansı için empedans değişimi	38
Şekil 4. 8 (a) In/Si/GS/Ag yapıların 4×10^7 cfu. mL^{-1} <i>E. coli</i> konsantrasyonunda sırasıyla 0kV/cm, 2kV/cm, 4kV/cm, 6kV/cm, 8kV/cm ve 10kV/cm ters yönde uygulanan elektrik alan değerlerinde (a) frekansa bağlı iletkenlik değişimi (b) 4×10^4 Hz sabit frekansı için iletkenlik değişimi	39
Şekil 4. 9 (a) In/Si/GS/Ag yapıların 4×10^7 cfu mL^{-1} <i>E. coli</i> konsantrasyonunda farklı zamanlarda uygulanan ileri yönde 12 kV/cm elektrik alan değeri altında frekansa bağlı empedans grafiği (b) 4×10^4 Hz sabit frekans değerinde zamana bağlı empedans grafiği	41
Şekil 4. 10 (a) In/Si/GS/Ag yapıların 4×10^7 cfu mL^{-1} <i>E. coli</i> konsantrasyonunda farklı zamanlarda uygulanan ters yönde 12 kV/cm elektrik alan değeri altında frekansa bağlı empedans grafiği (b) 4×10^4 Hz sabit frekans değerinde empedans grafiği	42
Şekil 4. 11 (a) In/Si/GS/Ag yapıların canlı ve ölü 4×10^7 cfu mL^{-1} <i>E. coli</i> konsantrasyonunda farklı zamanlarda uygulanan ileri yönde 12 kV/cm elektrik alan değeri altında frekansa bağlı empedans grafiği (b) 4×10^4 Hz sabit frekans değerinde zamanla değişen empedans grafiği.....	44
Şekil 4. 12 (a) In/Si/GS/Ag yapıların canlı ve ölü 4×10^7 cfu mL^{-1} <i>E. coli</i> konsantrasyonunda farklı zamanlarda uygulanan ters yönde 12 kV/cm elektrik alan değeri altında frekansa bağlı empedans grafiği (b) 4×10^4 Hz sabit frekans değerinde zamanla değişen empedans grafiği.....	45
Şekil 4. 13 (a) In/Si/GS/Ag yapıların <i>E. faecalis</i> ' nin farklı konsantrasyonlu bakteri içeren sıvılarındaki frekansa bağlı empedans grafiği (b) 100 Hz, 1 kHz, 10 kHz, 100 kHz frekanslarındaki empedans değişimleri	47
Şekil 4. 14 Çeşitli bakteri konsantrasyonlarına sahip süspansiyonların UV-VIS absorpsiyon spektrumları (b) farklı konsantrasyonlardaki <i>E. faecalis</i> süspansiyonlarının 600 nm dalga boyundaki absorbans değerleri	48
Şekil 4. 15 (a) In/Si/GS/Ag yapıların 2×10^7 cfu. mL^{-1} cfu. <i>E. faecalis</i> konsantrasyonunda sırasıyla 0kV/cm, 1kV/cm, 2kV/cm, 3kV/cm, 4kV/cm ve 5kV/cm ileri yönde uygulanan elektrik alan değerlerinde (a) frekansa bağlı empedans değişimi (b) 4×10^4 Hz sabit frekansı için empedans değişimi.....	50
Şekil 4. 16 (a) In/Si/GS/Ag yapıların 2×10^7 cfu. mL^{-1} cfu. mL^{-1} <i>E. faecalis</i> konsantrasyonunda sırasıyla 0kV/cm, 1kV/cm, 2kV/cm, 3kV/cm, 4kV/cm ve 5kV/cm ters yönde uygulanan elektrik alan değerlerinde (a) frekansa bağlı empedans değişimi (b) 4×10^4 Hz sabit frekansı için empedans değişimi	51
Şekil 4. 17 (a) In/Si/GS/Ag yapıların 2×10^7 cfu. mL^{-1} <i>E. faecalis</i> konsantrasyonunda farklı zamanlarda uygulanan ileri yönde 7 kV/cm elektrik alan değeri altında frekansa bağlı empedans grafiği (b) 4×10^4 Hz sabit frekans değerinde empedans grafiği	53

Şekil 4. 18 In/Si/GS/Ag yapıların 2×10^7 cfu.mL ⁻¹ <i>E. faecalis</i> konsantrasyonunda farklı zamanlarda uygulanan ters yönde 7 kV/cm elektrik alan değeri altında frekansa bağlı empedans grafiği (b) 4×10^4 Hz sabit frekans değerinde empedans grafiği	54
Şekil 4. 19 (a) In/Si/GS/Ag yapıların canlı ve ölü 2×10^7 cfu.mL ⁻¹ <i>E. faecalis</i> konsantrasyonunda farklı zamanlarda uygulanan ileri yönde 7 kV/cm elektrik alan değeri altında frekansa bağlı empedans grafiği (b) 4×10^4 Hz sabit frekans değerinde empedans grafiği	56
Şekil 4. 20 (a) In/Si/GS/Ag yapıların canlı ve ölü 2×10^7 cfu.mL ⁻¹ <i>E. faecalis</i> konsantrasyonunda farklı zamanlarda uygulanan ters yönde 7 kV/cm elektrik alan değeri altında frekansa bağlı empedans grafiği (b) 4×10^4 Hz sabit frekans değerinde empedans grafiği	57
Şekil 4. 21 (a) In/Si/GS/Ag yapıların $1,5 \times 10^7$ cfu.mL ⁻¹ sabit <i>E. coli</i> konsantrasyonunda sırasıyla 0kV/cm, 1kV/cm, 2kV/cm, 3kV/cm, 4kV/cm ve 5kV/cm ileri yönde uygulanan elektrik alan değerlerinde (a) frekansa bağlı empedans değişimi (b) 4×10^4 Hz sabit frekansı için empedans değişimi	58
Şekil 4. 22 (a) In/Si/GS/Ag yapıların $1,5 \times 10^7$ cfu.mL ⁻¹ sabit <i>E. coli</i> konsantrasyonunda sırasıyla 0kV/cm, 1kV/cm, 2kV/cm, 3kV/cm, 4kV/cm ve 5kV/cm ters yönde uygulanan elektrik alan değerlerinde (a) frekansa bağlı empedans değişimi (b) 4×10^4 Hz sabit frekansı için empedans değişimi	59
Şekil 4. 23 In/Si/GS/Ag yapıların $1,5 \times 10^7$ cfu.mL ⁻¹ sabit <i>E. coli</i> konsantrasyonunda farklı zamanlarda uygulanan ileri yönde 7 kV/cm elektrik alan değeri altında frekansa bağlı empedans grafiği (b) 4×10^4 Hz sabit frekans değerinde empedans grafiği	61
Şekil 4. 24 (a) In/Si/GS/Ag yapıların $1,5 \times 10^7$ cfu.mL ⁻¹ <i>E. coli</i> konsantrasyonunda farklı zamanlarda ters yönde 7 kV/cm elektrik alan değeri altında frekansa bağlı empedans grafiği (b) 4×10^4 Hz sabit frekans değerinde empedans grafiği	62
Şekil 4. 25 (a) In/Si/GS/Ag yapıların canlı ve ölü $1,5 \times 10^7$ cfu mL ⁻¹ <i>E. coli</i> konsantrasyonundafarklı zamanlarda ileri yönde 7 kV/cm elektrik alan değeri altında frekansa bağlı empedans grafiği (b) 4×10^4 Hz sabit frekans değerinde empedans grafiği	63
Şekil 4. 26 (a) In/Si/GS/Ag yapıların canlı ve ölü $1,5 \times 10^7$ cfu mL ⁻¹ <i>E. coli</i> konsantrasyonundafarklı zamanlarda ters yönde 7 kV/cm elektrik alan değeri altında frekansa bağlı empedans grafiği (b) 4×10^4 Hz sabit frekans değerinde empedans grafiği	64
Şekil 4. 27 <i>E. coli</i> ve <i>E. faecalis</i> (a) ileri yönde (b) ters yönde normalize grafikleri	66
Şekil 4. 28 <i>E. coli</i> ve <i>E. faecalis</i> farklı zamanlarda (a) ileri yönde (b) ters yönde normalize grafikleri	67
Şekil 4. 29 (a) In/Si/GS/Ag yapıların <i>E. coli</i> 'nin farklı konsantrasyonlu bakteri içeren sıvılarındaki frekansa bağlı empedans grafiği (b) 100 Hz, 1 kHz, 10 kHz, 100 kHz <i>E. coli</i> 'nin farklı konsantrasyonlu sıvılarındaki empedans değişimleri	68
Şekil 4. 30 (a) In/Si/GS/Ag yapıların 4×10^7 cfu. mL ⁻¹ <i>E. coli</i> konsantrasyonunda sırasıyla 0kV/cm, 2kV/cm, 4kV/cm, 6kV/cm, 8kV/cm ve 10kV/cm ileri yönde uygulanan elektrik alan değerlerinde (a) frekansa bağlı empedans değişimi (b) 4×10^4 Hz sabit frekansı için empedans değişimi	69
Şekil 4. 31 (a) In/Si/GS/Ag yapıların 4×10^7 cfu. mL ⁻¹ <i>E. coli</i> konsantrasyonunda sırasıyla 0kV/cm, 2kV/cm, 4kV/cm, 6kV/cm, 8kV/cm ve 10kV/cm ters yönde uygulanan elektrik	

alan değerlerinde (a) frekansa bağlı empedans değişimi (b) 4×10^4 Hz sabit frekansı için empedans değişimi	71
Şekil 4. 32 (a) In/Si/GS/Ag yapıların 4×10^7 cfu mL ⁻¹ <i>E. coli</i> konsantrasyonunda farklı zamanlarda uygulanan ileri yönde 12 kV/cm elektrik alan değeri altında empedans grafiği (b) 4×10^4 Hz sabit frekans değerinde empedans grafiği	72
Şekil 4. 33 (a) In/Si/GS/Ag yapıların 4×10^7 cfu mL ⁻¹ <i>E. coli</i> konsantrasyonunda farklı zamanlarda uygulanan ters yönde 12 kV/cm elektrik alan değeri altında empedans grafiği (b) 4×10^4 Hz sabit frekans değerinde empedans grafiği	73
Şekil 4. 34 (a) In/Si/GS/Ag yapıların canlı ve ölü 4×10^7 cfu mL ⁻¹ <i>E. coli</i> konsantrasyonunda farklı zamanlarda uygulanan ileri yönde 12 kV/cm elektrik alan değeri altında frekansa bağlı empedans grafiği (b) 4×10^4 Hz sabit frekans değerinde empedans grafiği	75
Şekil 4. 35 (a) In/Si/GS/Ag yapıların canlı ve ölü 4×10^7 cfu mL ⁻¹ <i>E. coli</i> konsantrasyonunda farklı zamanlarda uygulanan ters yönde 12 kV/cm elektrik alan değeri altında frekansa bağlı empedans grafiği (b) 4×10^4 Hz sabit frekans değerinde empedans grafiği	76
Şekil 4. 36 In/Si/GS/Ag yapıların farklı bakteri (<i>E. faecalis</i>) konsantrasyonlardaki frekansa bağlı empedans grafiği	77
Şekil 4. 37 (a) In/Si/GS/Ag yapıların 2×10^7 cfu.mL ⁻¹ <i>E. faecalis</i> konsantrasyonunda sırasıyla 0kV/cm, 1kV/cm, 2kV/cm, 3kV/cm, 4kV/cm ve 5kV/cm ileri yönde uygulanan elektrik alan değerlerinde frekansa bağlı empedans değişimi (b) 4×10^4 Hz sabit frekansı için empedans değişimi.....	78
Şekil 4. 38 (a) In/Si/GS/Ag yapıların 2×10^7 cfu.mL ⁻¹ <i>E. faecalis</i> konsantrasyonunda sırasıyla 0kV/cm, 1kV/cm, 2kV/cm, 3kV/cm, 4kV/cm ve 5kV/cm ters yönde uygulanan elektrik alan değerlerinde frekansa bağlı empedans değişimi (b) 4×10^4 Hz sabit frekansı için empedans değişimi.....	79
Şekil 4. 39 (a) In/Si/GS/Ag yapıların 2×10^7 cfu.mL ⁻¹ <i>E. faecalis</i> konsantrasyonunda farklı zamanlarda uygulanan ileri yönde 7 kV/cm elektrik alan değeri altında frekansa bağlı empedans grafiği (b) 4×10^4 Hz sabit frekans değerinde empedans grafiği	80
Şekil 4. 40 In/Si/GS/Ag yapıların 2×10^7 cfu.mL ⁻¹ <i>E. faecalis</i> konsantrasyonunda farklı zamanlarda uygulanan ters yönde 7 kV/cm elektrik alan değeri altında frekansa bağlı empedans grafiği (b) 4×10^4 Hz sabit frekans değerinde empedans grafiği	81
Şekil 4. 41 (a) In/Si/GS/Ag yapıların canlı ve ölü 2×10^7 cfu.mL ⁻¹ <i>E. faecalis</i> konsantrasyonunda farklı zamanlarda uygulanan ileri yönde 7 kV/cm elektrik alan değeri altında frekansa bağlı empedans grafiği (b) 4×10^4 Hz sabit frekans değerinde empedans grafiği	82
Şekil 4. 42 (a) In/Si/GS/Ag yapıların canlı ve ölü 2×10^7 cfu.mL ⁻¹ <i>E. faecalis</i> konsantrasyonunda farklı zamanlarda uygulanan ters yönde 7 kV/cm elektrik alan değeri altında frekansa bağlı empedans grafiği (b) 4×10^4 Hz sabit frekans değerinde empedans grafiği	83

ÇİZELGE LİSTESİ

	Sayfa
Çizelge 2. 1 Maddelerin Özdirenç Değerleri	7
Çizelge 2. 2 Saf yarı iletkenlerinin bazı önemli özellikleri	8
Çizelge 2. 3 Silisyumun fiziksel özellikleri	13
Çizelge 2. 4 Bakterilerin sınıflandırılması	16

Escherichia coli ve *Enterococcus faecalis* **BAKTERİLERİNİN GÖZENEKLİ SİLİSYUM YÜZEYİNDE DEPOLANMASINDA ELEKTRİK ALANIN ETKİSİ**

Sevinç GÜLER

Fizik Anabilim Dalı

Doktora Tezi

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Çiğdem ORUÇ

Mikroorganizmaların hassas ve hızlı bir şekilde tayin edilebilmesi; gıda güvenliği, hastalıkların teşhisi gibi konularda önem arz etmektedir. Gözenekli silisyumun boşluklu yapısı, büyük yüzey alanı, elektrokimyasal anodizasyon parametrelerinin değiştirilerek gözenek boyutlarının ayarlanabilir olması nedeniyle biyosensör tasarımı için bir sensör platformu olarak kullanılması mümkündür.

Elektrik alan etkisi kullanılarak mevcut bakteri sensörlerinin ölçüm hassasiyetinin arttırılabileceği düşünülmüştür. Bakteriler, elektriksel yük taşırlar. Bu nedenle elektrik alanda hareket ettirilebilirler. GS tabanlı sensör platformuna uygulanan elektrik alanının ileri yönünün negatif yüklü bakterileri gözenekli silisyum yüzeyine yaklaştırabileceği, ters yönde uygulanan elektrik alanının ise bakterileri gözeneklerden uzaklaştırabileceği gösterilmiştir.

Bu tez çalışmasında, gözenekli silisyum sensör platformlarını elde etmek için n tipi tek kristal silisyum kullanılarak farklı parametrelerde uygulanan elektrokimyasal anodizasyon işlemi sonucu %60 makro (5-15 μm) gözenek boyutlarında ve % 52 küçük gözenekli makro (1-5 μm) gözenek boyutlarında olmak üzere iki farklı özellikte In/Si/GS/Ag yapılar elde edilmiştir.

Bu yapılar öncelikle elektrik alanın uygulanmadığı ortamda, sırasıyla, $1,7 \times 10^7$ cfu.mL⁻¹, $2,9 \times 10^7$ cfu.mL⁻¹, 4×10^7 cfu.mL⁻¹, $4,4 \times 10^7$ cfu.mL⁻¹, $4,8 \times 10^7$ cfu.mL⁻¹ ve $5,6 \times 10^7$ cfu.mL⁻¹ *Escherichia coli* (*E. coli*) ve sırasıyla, $1,1 \times 10^7$ cfu.mL⁻¹, $1,3 \times 10^7$ cfu.mL⁻¹, 2×10^7 cfu.mL⁻¹, $2,6 \times 10^7$ cfu.mL⁻¹, 3×10^7 cfu.mL⁻¹ ve $4,1 \times 10^7$ cfu.mL⁻¹ *Enterococcus faecalis* (*E. faecalis*)' in farklı bakteri konsantrasyonu içeren sıvıları içine daldırılarak 5Hz ile 100 kHz frekans aralığında frekansa bağlı empedans değerleri incelenmiştir. Bakteri konsantrasyon değerlerinin artmasıyla empedansta azalma meydana geldiği gözlemlenmektedir.

Elektrik alanın etkisini inceleyebilmek için iki Al levha arasına yerleştirilen makro gözenekli In/Si/GS/Ag yapılar, 4×10^7 cfu.mL⁻¹ *E. coli* sabit bakteri konsantrasyonu içeren sıvıya daldırılarak 0-10 kV/cm aralığında, 2×10^7 cfu.mL⁻¹ *E. faecalis* sabit bakteri konsantrasyonu içeren sıvıya daldırılarak 0-5 kV/cm aralığında çeşitli elektrik alan değerlerine maruz bırakılmıştır. Taban (alt) elektroda pozitif voltaj, tavan (üst) elektroda ise negatif voltaj uygulayarak (ileri yön elektrik alan) elektrik alanın artıdan eksiye doğru bir yönelimi olması nedeniyle sıvı içerisinde bulunan negatif yüklü bakterilerin ileri yönde bir elektrik alanın etkisi ile hareketi GS yapının empedans spektroskopisindeki azalma şeklinde yorumlanmıştır.

Taban elektroda negatif voltajın uygulanması sonucu, ters yönde uygulanan elektrik alanın etkisi ile bakterilerin gözeneklerden uzaklaşabildiği yorumlanmıştır. Ters yönde uygulanan elektrik alanın artmasıyla gözeneklere birikmiş olduğu düşünülen bakteriler uzaklaştığı için GS tabanlı yapının empedans spektroskopisinde artış meydana gelmiştir.

İki Al levha arasına yerleştirilen makro gözenekli In/Si/GS/Ag yapılar, $1,5 \times 10^7$ cfu. mL⁻¹ *E. coli* sabit bakteri konsantrasyonu içeren sıvıya daldırılarak 0-5 kV/cm aralığında çeşitli elektrik alan değerlerine maruz bırakılarak deneyler tekrar edilmiştir.

Ayrıca, ileri ve ters yönde uygulanan sabit elektrik alan değerinde, elektrik alanın uygulanma süresinin canlı ve ölü *E. coli* ve *E. faecalis* bakterilerin gözeneklere birikme durumunun empedans spektrumları üzerindeki etkisi incelenmiştir. Makro gözenekli In/Si/GS/Ag yapılar 0,5-3 saat aralığı boyunca, canlı 4×10^7 cfu.mL⁻¹ *E. coli* sabit bakteri konsantrasyonu içeren sıvıya daldırılarak 12 kV/cm, canlı 2×10^7 cfu.mL⁻¹ *E. faecalis* sabit bakteri konsantrasyonu içeren sıvıya daldırılarak 7 kV/cm sabit ileri ve ters yönde elektrik alana maruz bırakılmıştır. İleri ve ters yönde uygulanan elektrik alan süresinin artmasıyla empedans değerlerinde değişim gözlemlenmiştir. İleri yönde uygulanan sabit elektrik alan şiddetinin uygulanma süresi arttıkça GS tabanlı yapıda bulunan gözeneklere daha çok bakteri yerleşmiş ve empedans değerleri azalmıştır. Ters yönde uygulanan sabit elektrik alan şiddetinin süresinin artmasıyla gözeneklerde bulunan bakteriler uzaklaşarak empedans değerlerinde bir artma meydana getirmiştir. Makro gözenekli In/Si/GS/Ag yapılar 0,5-3 saat aralığı boyunca, canlı $1,5 \times 10^7$ cfu.mL⁻¹ *E. coli* sabit bakteri konsantrasyonu içeren sıvıya daldırılarak 7 kV/cm sabit ileri ve ters yönde elektrik alana maruz bırakılmış ve deneyler tekrar edilmiştir.

Sabit elektrik alanın uygulanma süresinin gözeneklere yerleşen bakteri sayısı üzerindeki etkisini netleştirebilmek için aynı deneyler ölü bakteri hücreleri üzerinde tekrarlanmıştır. Makro gözenekli In/Si/GS/Ag yapılar 0,5-3 saat aralığı boyunca, 121 °C de 1,5 atm basınçta 20 dakika süre ile otoklavlanmış 4×10^7 cfu.mL⁻¹ *E. coli* sabit bakteri konsantrasyonu içeren sıvıya daldırılarak 12 kV/cm, 2×10^7 cfu.mL⁻¹ *E. faecalis* sabit

bakteri konsantrasyonu içeren sıvıya daldırılarak 7 kV/cm sabit ileri ve ters yönde elektrik alana maruz bırakılmıştır. Otoklavlanma işlemi nedeniyle bakteri hücre duvarı zarı zarar görerek hücre duvarı içinde kalan iyonlar sıvı içerisine dağılmakta ve ortamdaki serbest iyon konsantrasyonunun artmasına neden olmaktadır. Elektrik alanın ileri ve ters yönde uygulanması sonucunda; ölü bakteri konsantrasyonundaki empedans değerleri canlı bakteri konsantrasyonunda incelenen empedans değerlerine göre daha düşüktür. Elektrik alanın uygulanma süresine bağlı olarak ölü bakteri konsantrasyonuna ait empedans değerlerinde kayda değer bir değişim gözlemlenmemiştir. Makro gözenekli In/Si/GS/Ag yapılar 0,5-3 saat aralığı boyunca, otoklavlanmış $1,5 \times 10^7$ cfu.mL⁻¹ *E. coli* sabit bakteri konsantrasyonu içeren sıvıya daldırılarak 7 kV/cm sabit ileri ve ters yönde elektrik alan maruz bırakılmış ve deneyler tekrar edilmiştir.

Tüm deneyler küçük gözenekli makro (1-5µm) In/Si/GS/Ag yapılar için tekrar edilmiştir. Hem *E. coli* hem de *E. faecalis* bakteri konsantrasyonlu sıvılarda elde edilen sonuçlar, makro gözenek boyutlarındaki GS tabanlı yapı için yapılan deney sonuçları ile örtüşmektedir.

Anahtar Kelimeler: Gözenekli Silisyum, *E. coli*, *E. faecalis*, Empedans Spektroskopisi, Elektrik Alan.

ABSTRACT

EFFECT OF ELECTRICAL FIELD IN STORAGE OF *Escherichia coli* AND *Enterococcus faecalis* BACTERIA ON THE POROUS SILICON SURFACE

Sevinç GÜLER

Department of Physics

PhD. Thesis

Adviser: Doç. Dr. Çiğdem ORUÇ

Precise and rapid determination of microorganisms; It is important in issues such as food safety, diagnosis of diseases. It is possible to use it as a sensor platform for biosensor design because the porous structure of porous silicon, large surface area, electrochemical anodization parameters are changed and pore sizes are adjustable.

It is thought that the measurement accuracy of existing bacteria sensors can be increased by using the electric field effect. Bacteria carry electrical charges. Therefore, they can move in the electric field. It has been shown that the forward direction of the electric field applied to the PS-based sensor platform can bring the negatively charged bacteria closer to the porous silicon surface, and the electric field applied in the reverse direction can remove the bacteria from the pores.

In this thesis study, 60% macro (5-15 μm) pore sizes and 52% small porous macro (1-5 μm) pore sizes as a result of electrochemical anodization process applied in different parameters using n type single crystal silicon to obtain porous silicon sensor platforms In/Si/PS/Ag structures with two different properties were obtained.

These structures are primarily in an environment where the electric field is not applied, $1,7 \times 10^7 \text{ cfu.mL}^{-1}$, $2,9 \times 10^7 \text{ cfu.mL}^{-1}$, $4 \times 10^7 \text{ cfu.mL}^{-1}$, $4,4 \times 10^7 \text{ cfu.mL}^{-1}$, $4,8 \times 10^7 \text{ cfu.mL}^{-1}$ and $5,6 \times 10^7 \text{ cfu.mL}^{-1}$ *Escherichia coli* (*E. coli*) and $1,1 \times 10^7 \text{ cfu.mL}^{-1}$, $1,3 \times 10^7 \text{ cfu.mL}^{-1}$, $2 \times 10^7 \text{ cfu.mL}^{-1}$, $2,6 \times 10^7 \text{ cfu.mL}^{-1}$, $3 \times 10^7 \text{ cfu.mL}^{-1}$ ve $4,1 \times 10^7 \text{ cfu.mL}^{-1}$ *Enterococcus faecalis* (*E. faecalis*) were immersed in fluids containing different bacterial concentrations and frequency-dependent impedance values were investigated in the frequency range of

5Hz to 100 kHz. It is observed that impedance decreases with increasing bacteria concentration values.

In order to examine the effect of the electric field, macro porous In/Si/PS/Ag structures placed between two Al plates are immersed in a liquid containing a constant bacteria concentration of 4×10^7 cfu.mL⁻¹ *E. coli* and in the range of 0-10 kV / cm and 2×10^7 cfu.mL⁻¹ *E. faecalis* was immersed in liquid containing constant bacterial concentration and exposed to various electric field values in the range of 0-5 kV / cm.

Due to the fact that the electric field has a positive and negative orientation by applying positive voltage to the base (bottom) electrode and negative voltage to the ceiling (upper) electrode, the motion of the negatively charged bacteria in the liquid with the effect of an electric field in the forward direction in the impedance spectroscopy of the PS structure interpreted as a decrease.

As a result of applying negative voltage to the base electrode, it is interpreted that bacteria can move away from the pores by the effect of the electric field applied in the opposite direction. Since the bacteria that are thought to have accumulated in the pores with the increase of the electric field applied in the opposite direction, the impedance spectroscopy of the PS-based structure has increased.

The experiments were repeated by immersing the macroporous In/Si/GS/Ag structures placed between the two Al plates in the liquid containing $1,5 \times 10^7$ cfu. mL⁻¹ *E. coli* constant bacteria concentration and exposure to various electric field values in the range of 0-5 kV / cm.

In addition, the effect of the application time of the electric field on the impedance spectra of the live and dead *E. coli* and *E. faecalis* bacteria in the pores at the constant electric field value applied forward and reverse were investigated.

Macroporous In/Si/GS/Ag structures are immersed in a liquid containing constant bacteria concentration of 4×10^7 cfu.mL⁻¹ *E. coli* for a period of 0.5-3 hours, 12 kV / cm, live 2×10^7 cfu.mL⁻¹ *E. faecalis* It was immersed in a liquid containing a constant bacterial concentration and exposed to a constant forward and reverse electric field at 7 kV / cm. The change in the impedance values was observed with the increase of the electric field applied in the forward and reverse direction. As the application time of the constant electric field intensity applied in the forward direction increases, more bacteria have been placed in the pores in the PS-based structure and the impedance values have decreased. With the increasing duration of constant electric field intensity applied in the opposite direction, the bacteria in the pores moved away, causing an increase in impedance values. Macroporous In/Si/PS/Ag structures were submerged in a liquid containing a constant bacteria concentration of $1,5 \times 10^7$ cfu.mL⁻¹ *E. coli* for a period of 0.5-3 hours, and exposed to a constant forward and reverse electric field. and the experiments were repeated.

In order to clarify the effect of the application time of the fixed electric field on the number of bacteria settled in the pores, the same experiments were repeated on the dead bacteria cells. Macroporous In/Si/PS/Ag structures are immersed in a liquid containing autoclaved 4×10^7 cfu.mL⁻¹ *E. coli* constant bacteria concentration for 20 minutes at a pressure of 1.5 atm at 121 °C for a period of 0.5-3 hours. cm, 2×10^7 cfu.mL⁻¹ *E. faecalis* was immersed in a liquid containing a constant bacterial

concentration and exposed to a constant forward and reverse electric field of 7 kV/cm. Due to the autoclaving process, the bacterial cell wall membrane is damaged and the ions remaining in the cell wall are dispersed into the liquid, causing an increase in the free ion concentration in the medium. As a result of the electric field forward and reverse application; The impedance values in the dead bacteria concentration are lower than the impedance values examined in the live bacteria concentration. No significant change in impedance values of dead bacteria concentration was observed depending on the application time of the electric field.

Macroporous In/Si/PS/Ag structures were immersed in a liquid containing autoclaved $1,5 \times 10^7$ cfu.mL⁻¹ *E. coli* constant bacteria concentration for a period of 0.5-3 hours and exposed to a constant forward and reverse electric field at 7 kV/cm. and the experiments were repeated.

All experiments were repeated for small porous macro (1-5µm) In/Si/PS/Ag structures. The results obtained in both *E. coli* and *E. faecalis* bacterial concentration fluids coincide with the experimental results for the PS-based structure in macro pore sizes.

Keywords: Porous Silicon, *E. coli*, *E. faecalis*, Impedance Spectroscopy, Electric Field.

1.1 Literatür Özeti

Silisyum kristalinin yüzeyinde hidroflorik asitte (HF) anodizasyon yoluyla oluşan gözenekli silisyum (GS), ilk olarak germanyum ve silisyum yarıiletken/elektrolit yapıların tanımlanması deneyleri sürecinde 1956'da Bell Laboratuvarlarında, Uhler tarafından bulunmuştur [1]. Gözenekli silisyum (GS), biyosensör geliştirme çabasında merkezi aşamaya gelmek üzere tasarlanan nanoyapılı bir malzemedir. Nanoyapılı gözenekli Si (GS), geniş iç yüzey alanı, ayarlanabilir gözenek boyutu, gözenekliliği ve üretim kolaylığı nedeniyle biyosensör uygulamaları için umut verici bir materyal olarak kullanılmaktadır [2]. Elektrolitte HF konsantrasyonu, akım yoğunluğu, silisyum katkı maddelerinin yoğunluğu, aydınlatma işlemi ve aşındırma süresi gibi parametrelere bağlı olarak birkaç nanometreden birkaç mikrometreye kadar değişen çeşitli gözenek boyutları elde edilebilir [3]. Gözenek boyutuna bağlı olarak, GS, mikro gözenekli (≤ 2 nm), mezo gözenekli (2-50 nm) ve makro gözenekli (>50 nm) olmak üzere üç gruba ayrılabilir [4].

Biyosensörler, gıdalardaki bakterilerin hızlı teşhisi için oldukça ümit verici olarak ortaya çıkmıştır. Biyosensörün genel işlevi, biyolojik tanıma olayını ölçülebilir bir elektrik sinyaline dönüştürmektir [5]. Elektrokimyasal biyosensörler, yüksek hassasiyete sahip, hızlı, ucuz olması nedeniyle elverişli olma avantajına sahiptir [6]. Gözenekli silisyum son zamanlarda biyosensör uygulamaları için potansiyel bir platform olarak araştırılmıştır [7]. GS, optik özelliklerini kullanarak çok çeşitli biyosensörlerin geliştirilmesinde başarıyla kullanılmaktadır [8]. Gözenekli silisyum, bakterilerin

biriktirilebileceği büyük yüzey alanı avantajına sahip olması nedeniyle kullanılan bir malzemedir [9].

Bai ve diğerleri 2016 yılında yaptıkları çalışmalarında, gözenekli yapı içine bakteri depolanmasında bakterilerin özelliklerinin (*E. coli*, *Klebsiella oxytoca* ve *Rhodococcus rhodochrous*) ve gözenek boyutunun etkili olduğunu bildirmişlerdir [10].

Empedans spektroskopisi kullanılarak mikroorganizmalar hakkında çalışmalar 20. yüzyılın başlarından beri yapılmıştır [11]. Empedans spektroskopisinde, iki elektrot arasına yerleştirilmiş bir numuneye sinüzoidal voltaj uygulanır ve voltajın frekansı maksimumdan minimum bir değere taranır [12]. Empedans spektroskopisi, yüksek hassasiyet ve yüzey bağlama olaylarını çözelti empedansından ayırma yeteneği gibi avantajlar sağlar [13].

Dev Das ve diğerleri 2009 yılında, aynı parametrelerde üretilen üç sensörü farklı *Salmonella typhimurium* konsantrasyonlarında 100 Hz ve 1 MHz frekans aralığında empedans spektroskopisi ölçümleri ile elektriksel olarak incelemişlerdir. Grafik sonuçlarından, 500 Hz'lik bir frekansta 150 k Ω ile 45 k Ω arasında değiştiği ve empedansta %75'lik bir azalma meydana geldiği görülmektedir. Frekans arttıkça, orta frekans aralığındaki (5 kHz üzerinde) empedans değerlerinde çözelti ortamının direnci nedeniyle empedans değerleri 50 k Ω ile 40 k Ω arasında olup, %20'lik bir düşme gözlemlenmiştir. 50 kHz'in üzerindeki daha yüksek frekanslarda, yüzdelik düşüş daha da azalmaktadır. Bu nedenle, *S. typhimurium*'un neden olduğu empedanstaki değişime çift katmanlı kapasitans hakimdir [14].

Dev Das ve diğerleri, 2011 yılındaki araştırmalarında, 3, 8 ve 12 μ m kalınlıkta ve % 55 gözenekliliğe sahip üç farklı makro gözenekli silisyum elde etmişlerdir. Bu üretilen silisyum tabanlı yapıların farklı *E. coli* konsantrasyonlarında 100 Hz ile 1 MHz frekans aralığında empedans spektroskopisi ile elektriksel ölçümleri alınmıştır. Sabit bakteri konsantrasyonunda bakteri yapışmadan önce gözenekli silisyum tabaka kalınlıklarının değerlerinin artmasıyla empedans değerlerinde bir artış gözlenirken, bakterilerin gözeneklere yerleşmesinden sonra üç farklı kalınlıktaki yapılar için empedans değerlerinde bir azalma meydana geldiğini göstermişlerdir. Üç farklı kalınlıktaki makro

gözenekli silisyum yapıli sensörlerin 100 Hz'de maksimum hassasiyet vereceğini ve bakteri algılama için 1 kHz'e kadar kullanılabileceklerini bildirmişlerdir [15].

Dev Das ve diğlerleri, 2012 de yaptıkları çalışmalarında ise 8 µm gözenekli silisyum tabaka kalınlıklı makro gözenekli silisyum tabanlı yapıların farklı *E. coli* konsantrasyonlarındaki 100Hz ile 1 MHz frekans aralığında empedans değışimlerini incelemişlerdir. Yapılan çalışma sonucunda, empedanstaki düşüş yüzdesinin daha düşük frekans aralığında daha fazla olduğu ve 1kHz'den sonra azaldığı ve bakteri konsantrasyonuıa sabit olduğunu gözlemlemişlerdir. Empedanstaki değışim yüzdesindeki azalmanın öncelikle frekanstaki artışla birlikte hem elektrot elektrolitinde arayüzeylerinde azaldıklarından ve çözelti direncinin 1kHz'den sonra daha belirgin hale gelmesinden kaynaklandığını bildirmişlerdir [16].

Lillehoj ve arkadaşları 2014 yılındaki araştırmalarında, mikro sensör platformu kullanarak 100 Hz ile 100 MHz frekans aralığında *S. mutans* ve *P. aeruginosa* konsantrasyonlarını tespit etmek için empedans ölçümlerini incelemişlerdir. Platformlarının tepkisini karakterize etmek için, molar konsantrasyonları 0.001 M'den 1.0 M'ye yükselen NaCl çözeltilerinin empedans ölçümleri yapılmıştır. Düşük frekans bölgesinde (10² Hz ila 3 kHz) empedansın, çoğunlukla elektrot yüzeylerindeki elektriksel çift katman nedeniyle, frekans artarken azaldığını, orta frekans bölgesinde (3 kHz ila 2 MHz), empedans tepkisinin sabit olduğunu ve buna elektrolitik çözeltinin empedansı hakim olduğunu belirtmişlerdir. Bu cevabın, empedansın büyüklüğü ile çözelti konsantrasyonu arasında açık bir ilişkisi olduğunu gösterdiğini, empedanstaki değışimin, çözelti konsantrasyonu ile aynı büyüklük derecesinde olduğunu göstermişlerdir. 0.001 M NaCl'de düşük iyonik konsantrasyonu ve buna bağıli elektriksel iletkenliğı nedeniyle en büyük empedans değeri verdiğı gözlemlenmiştir. Daha yüksek NaCl konsantrasyonlarının çözeltileri, elektrotlar arasındaki akım akışını kolaylaştıran, yüksek iletkenlikleri nedeniyle art arda düşük empedans tepkileri üretir. Üst frekans bölgesinde (2 MHz ila 100 MHz) ise, çözelti iletkenliğinin empedans tepkisi üzerinde ihmal edilebilir bir etkisinin olduğunu belirtmişlerdir. Mikro yapıli sensör platformları 10⁴ cfu / mL ile 10⁷ cfu / mL arasında değışen farklı *S. mutan* konsantrasyonlarında frekansa bağıli empedans değışimlerini incelemişlerdir. Empedans değeriindeki en

büyük değişimin düşük frekans bölgesinde olduğunu bildirerek 10^2 Hz frekans değerini baz almışlardır [17].

Yang ve diğerleri 2004 yılında, süt numunelerinde canlı *S. typhimurium*'un hızlı tespiti için mikro tabanlı yapıları empedans sensörleri olarak kullanmışlardır. Empedans değişimini, bakteri üreme süresine karşı dört sabit frekansta (10Hz, 100Hz, 1kHz ve 10kHz) değerlendirmişlerdir. Empedans değerleri, hücre sayısı 10^5 - 10^6 cfu.ml⁻¹ olana kadar değişmedi. Empedanstaki en büyük değişikliğin 10Hz'de gerçekleştiğini bildirmişlerdir. [18].

2008 yılında yaptığı çalışmasında Yang, bakteriyel hücrelerin empedans tespiti için mikroeletrot kullanarak bakteriyel hücre süspansiyonlarının empedans özelliklerinden yararlanmıştır. Bakteri çözeltilerinin iletkenliğinin, bakteri hücre yüzeyinin ve ilgili hücre yüzeyi arayüzey fizyolojisinin elektriksel özellikleri ile ilgili olduğunu bildirmiştir. *Salmonella* hücre konsantrasyonlarını 1Hz-100 kHz frekans aralığında empedans spektroskopisi ile incelemiştir. 1.93×10^6 cfu/ml sabit *Salmonella* konsantrasyonundaki empedans değişimlerinden, 1Hz-500 Hz arasında düşük frekans aralığında bölge, bir çift katmanlı bölgeyi ve 500 Hz-100 kHz arasındaki frekans aralığında bölge ise dirençli bölgeyi temsil etmektedir. Mikro elektro tabanlı yapılar, 10^4 ile 10^9 cfu / ml arasında farklı hücre konsantrasyonlarıyla empedans değişimlerini incelemiştir. Sonuçlara göre, 100 Hz ile 10 kHz frekans aralığında, artan hücre konsantrasyonları ile empedansın azaldığını gözlemlemiştir. Empedans değeri ve hücre konsantrasyonu arasındaki ilişkiyi araştırmak için en ideal frekans değeri olarak 1kHz sabit frekans değerini incelemiş ve empedans değişimlerini değerlendirmiştir. 1kHz'deki empedans değerinin, çözeltideki hücrelerin konsantrasyonunun azalmasıyla arttığını belirtmiştir. Bakteri konsantrasyonu 10^9 cfu / ml'den 10^8 , 10^7 , 10^6 cfu / ml'ye düştüğünde, çözeltilerin empedansı belirgin bir şekilde azalırken, hücre konsantrasyonları 10^6 cfu / ml'den düşük olduğunda, çözeltilerin empedans değerleri birbirinden önemli ölçüde farklı olmadığını bildirmiştir [19].

Jönsson ve diğerleri 2006 yılında yaptıkları çalışmalarında, serbest yük taşıyıcı konsantrasyonunda ve dolayısıyla canlı ve ölü *E. coli* hücrelerini çevreleyen besiyerinin iletkenliğinde bir fark olduğunu göstermeyi amaçlamışlardır. Çalışmalarında *E. coli*'nin

üç farklı konsantrasyonunu kullanmışlardır. Konsantrasyonlarda bulunan bakterileri öldürmek için 20 dakika boyunca 60 ° C'ye ısıtma işlemine (otoklavlama) tabii tutmuşlardır. Bakterilerin öldürülmesinin iletkenlikte bir artışa yol açtığı gözlenmiştir. Otoklavlama, çözeltideki toplam iyon sayısına herhangi bir ilave anlamına gelmediği için, iletkenliğin artması, uygulanan elektrik alanın etkisi altında başlangıçta serbest bırakılan hücrenin içinde yerleşmiş olan iyonların serbest kalarak hareket ettiği gözlenmiştir. Bu artışın, daha önceki bir çalışmada, hücrelerin öldürülürken iyonların hücrelerin içinden salınmasına bağlandığı ve serbest iyonların uygulanan elektrik alanın etkisi altında serbestçe hareket edebildiği gösterilmiştir [20].

1.2 Tezin Amacı

Bu tez çalışmasında, antijen-antikor etkileşimlerine dayanarak mevcut biyosensörlere bakteri bağlanma hassasiyetini arttıracak yeni bir elektrik alan destekli sensör platformu geliştirilmesi hedeflenmiştir. Bu hedefe yönelik, GS tabanlı sensörlerde elektrik alan destekli platform kullanılarak gözeneklerde bakteri biriktirilmesi temel alınmıştır. Bu amaçla negatif yük taşıyan *E. coli* ve *E. faecalis* bakterileri kullanılmıştır.

GS tabanlı sensör platformuna uygulanan elektrik alanın ileri yönünün negatif yüklü bakterileri gözenekli silisyum yüzeyine yaklaştırabileceğini, ters yönde uygulanan elektrik alanın ise bakterileri gözeneklerden uzaklaştırabileceğini göstermeyi hedefledik.

İki farklı anodizasyon koşullarında üretilen makro (5-15 µm) ve küçük gözenekli makro (1-5 µm) In/Si/GS/Ag yapıların *E. coli* ve *E. faecalis* bakteri konsantrasyonlu sıvılara daldırılarak farklı elektrik alan değerlerinin ileri yönde ve ters yönde uygulanması sonucu gözeneklere bakteri yaklaştırılması ve uzaklaştırılması amaçlanmıştır. Elektriksel ölçümler incelenerek bakterilerin, frekansa bağlı empedans, iletkenlik ve kapasitans değerlerine etkileri tartışılmıştır. Aynı şekilde, iki farklı anodizasyon koşullarında üretilen makro ve küçük gözenekli makro In/Si/GS/Ag yapıların sabit elektrik alan değeri altında canlı ve ölü *E. coli* ve *E. faecalis* bakteri içeren sıvılara daldırılarak fiziksel özellikleri tartışılmıştır. Ölü bakterili sıvılarda, bakteriler parçalanarak bakteri içindeki iyonlar sıvı içerisine dağılmıştır. Elektrik alan uygulandığında ölü bakteri içeren sıvıda empedans değerlerinde azalma olmaktadır. Ancak, uygulanan elektrik alan değerlerinin

artmasıyla ölü bakteri içeren sıvılardaki empedans değerlerinde neredeyse bir değişim gözlenmemiştir.

1.3 Hipotez

Çalışmalarda kullanılan *E. coli* ve *E. faecalis* bakterileri negatif yüklüdür ve paralel iki Al elektrod arasında elektrik alana maruz bırakıldıklarında hareketlenmeleri beklenir.

Uygulanan elektrik alan nedeniyle oluşan elektriksel kuvvetin yüklü bakteriler üzerine etkidiği ve bakterilerin elektrik alanda sürüklenmeye başladığı düşünülmektedir. Bakteriler negatif yüklü olduğu için bakterileri gözenekli silisyum yüzeyine doğru sürüklemek amacıyla silisyum tarafındaki elektrot pozitif kutuplanmıştır. Tersî şeklindeki kutuplamada ise bakterilerin silisyum yüzeyden uzaklaşağı beklenir.

Çalışmalar, yukarıda bahsedilen hipotez çerçevesinde yapılmış ve sonuçlar değerlendirilmiştir.

BÖLÜM 2

GENEL BİLGİLER

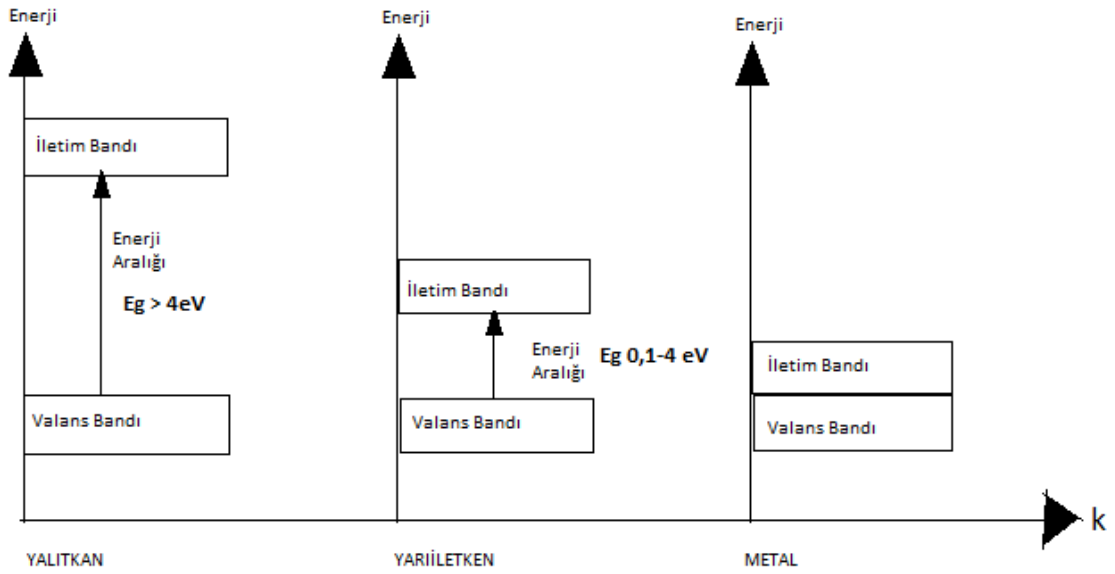
2.1 Yarıiletkenler

Yarıiletkenler, elektrik iletkenliği bakımından iletkenler ve yalıtkanlar arasında olan malzemelerdir. Çoğunlukla periyodik cetvelin 4A grubunda yer alırlar. Silisyum, Germanyum gibi maddeler yarıiletken maddelere örnektirler. Normalde yalıtkan olarak bulunan bu maddelere gerilim uygulandığı zaman ya da ısı, ışığa maruz bırakıldıkları zaman değerlik bandındaki elektronların bir kısmı serbest hale geçerek iletkenlik kazanırlar [21]. Elektriksel iletkenliklerin maddelere göre öz direnç değerleri Çizelge 2.1’ de verilmiştir.

Çizelge 2. 1 Maddelerin Öz direnç Değerleri

Metaller	$\rho = 10^{-10} \Omega.cm$
Yarıiletkenler	$\rho = 10^{-2}-10^9 \Omega.cm$
Yalıtkanlar	$\rho = 10^{22} \Omega.cm$

T=0 K de valans bandının tamamı dolu olduğu durumlarda burada bulunan elektronlar iletme katılmazlar. Şekil 2.1’ den de görüldüğü üzere metallerde yasak enerji aralığı neredeyse hiç yokken, bu enerji aralığı yalıtkanlarda çok daha geniştir. Bu nedenle valans bandında bulunan bir elektronun iletim bandına geçebilmesi için bir enerjiye ihtiyacı bulunmaktadır. Yasak enerji aralığı yarıiletkenlerde ise belli bir enerji seviyesi aralığındadır.



Şekil 2. 1 Katılarda Band Diyagramları

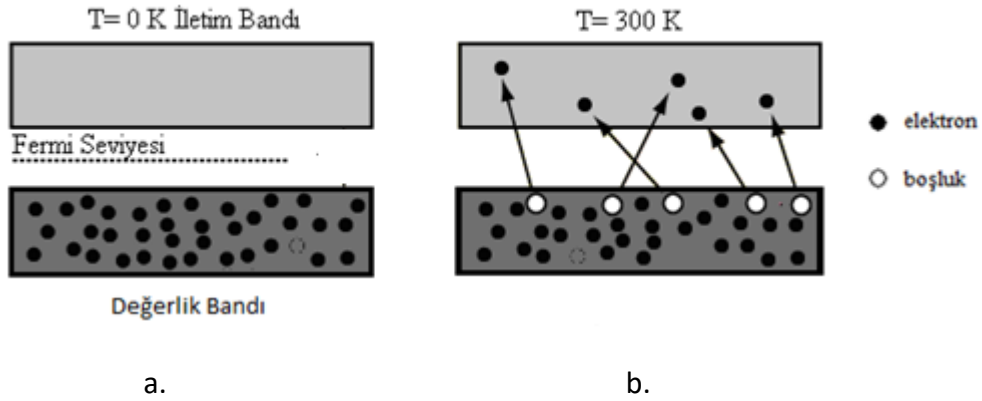
2.1.1 Saf Yarıiletkenler

Mutlak sıcaklıkta ($T=0$ K) iletim bandında (E_c) bulunan elektronların sayısı ile valans bandında (E_v) bulunan boşlukların sayısı birbirine eşit olduğu durumlardaki yarıiletken malzemelere saf yarıiletken denir. Silisyum (Si), Germanyum (Ge) saf yarı iletken malzemeler arasında en çok kullanılan maddelerdir. Saf yarıiletkenlere ait bazı özellikler Çizelge 2.2' de verilmiştir.

Çizelge 2. 2 Saf yarı iletkenlerinin bazı önemli özellikleri [21]

	Bant Aralığı (eV)	Elektriksel iletkenlik ($\Omega.m$) ⁻¹	Elektron Hareketliliği ($m^2/V.s$)	Boşluk Hareketliliği ($m^2/V.s$)
Si	1,11	4×10^{-4}	0,14	0,05
Ge	0,67	2,2	0,38	0,18

Saf yarıiletkenlerde Şekil 2.2 (a)' da görüldüğü gibi mutlak sıcaklık $T= 0 \text{ K}$ de valans bandındaki (E_v) elektron seviyeleri doluyken, iletim bandında (E_c) elektron bulunmamaktadır. Şekil 2.2 (b)' de ise sıcaklık yükseldiğinde ($T>0 \text{ K}$) valans bandında bulunan elektronlar en az yasak enerji aralığı (E_g) kadar bir enerji ile iletim bandına geçerek arkalarında boşluk (hole/deşik) bırakmaktadır.



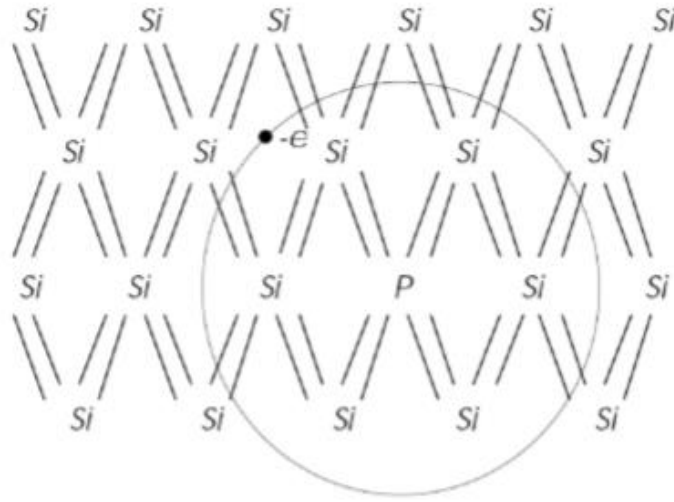
Şekil 2. 2 Farklı sıcaklıklar için saf yarıiletken enerji band diyagramı [22]

2.1.2 Katkılı Yarıiletkenler

Saf yarıiletken malzemeye katkı atomunun eklenmesi sonucu katkı yarıiletkenler elde edilir. Katkı atomuna göre n tipi yarıiletken ve p tipi yarıiletken olmak üzere 2 türdür.

2.1.2.1 n tipi yarıiletkenler

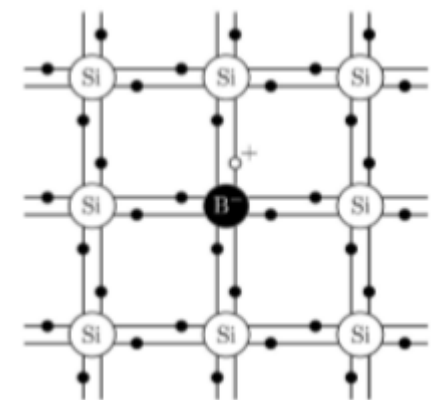
Elektron yoğunluğu boşluk yoğunluğundan fazla olan yarıiletkenlerde elektriksel iletkenliğe katkısı bulunan çoğunluk yük taşıyıcıları olan elektronlardır. IV. Grup elementlerinden Silisyum, Germanyum gibi saf yarıiletkenlere V. grup (N, P, As, Sb) donor atomlarının katkılanırılması sonucu n tipi yarıiletkenler elde edilir. Şekil 2.3 de görüldüğü üzere örneğin, V. grup elementlerden P (fosfor) dış yörüngesinde 5 elektron bulundururken, Si (Silisyum) ise dış yörüngesinde 4 elektron bulundurmaktadır. Katkılama sonrası fosforda bir elektron serbest elektron olarak dışarıda kalır. Dışta kalan serbest elektronlar bir elektrik alan etkisinde kalırlarsa hareket edebilirler (Şekil 2.3).



Şekil 2. 3 n tipi katkılı yarıiletken [23]

2.1.2.2 p tipi yarıiletkenler

p-tipi yarı iletken maddeler de ise boşluk konsantrasyonu serbest elektron konsantrasyonundan daha fazladır. p-tipi yarıiletken B, Al, Ga vb. atomlarından biri ile katkılanarak elde edilmektedir. Elektriksel iletkenliğe katkıda bulunan çoğunluk taşıyıcı konsantrasyonu fazla olan boşluklardır. Şekil 2.4 de görüldüğü üzere örneğin, p tipi katkılı yarıiletken elde etmek için 4A grubu elementi olan Si atomuna 3A grubu elementi olan B (Bor) atomu eklenirse, son yörüngesinde 3 elektronu bulunan Bor atomu, son yörüngesinde 4 elektronu bulunan Si atomunun 3 elektronu ile kovalent bağ yapar ve bir elektron açıkta kalır (Şekil 2.4)

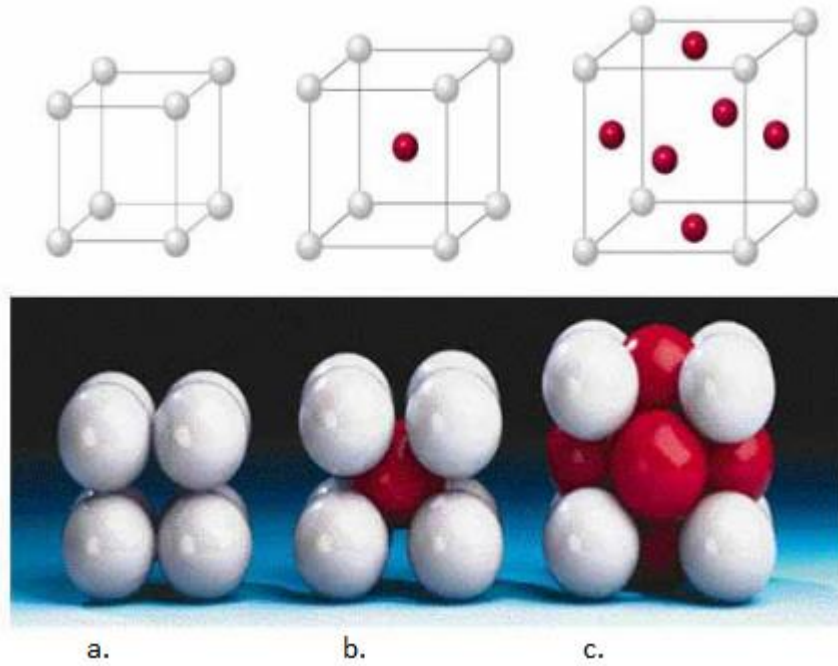


Şekil 2. 4 p tipi katkılı yarıiletken [23]

2.2 Tek Kristal Silisyum

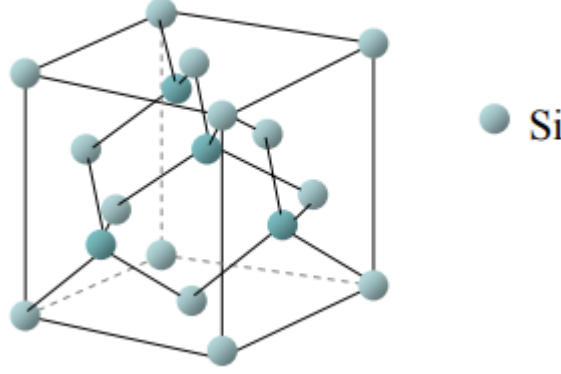
2.2.1 Silisyumun Kristal Yapısı

Kristal yapı (taneciklerin düzenli bir şekilde yerleştiği katılar) ve amorf yapı (taneciklerin düzensiz, gelişigüzel bir şekilde yerleştiği katılar) olmak üzere malzemeler ikiye ayrılmaktadır. Kristal yapı içerisindeki atomların birbirini tekrarlayan yapısına örgü denmektedir ve örgü noktası bu örgüdeki kesişim noktasıdır. Birim hücre ise kristal yapı içerisinde tekrar eden yapıların en basit olanıdır. Atomların kristal sistem içerisindeki diziliş biçimi kafes yapıyı oluşturmaktadır. Köşelerinde birer atom bulunduran yapılar basit kübik yapıyı (SC) oluştururken, köşelerine ek olarak kübün merkezinde bir atomun bulunduğu yapılar cisim merkezli kübik (BCC) yapıları oluşturur ve bunlara ek olarak yüzeylerinde de birer atom bulunduran yapılar, yüzey merkezli kübik (FCC) yapıları oluşturmaktadırlar (Şekil 2.5)



Şekil 2. 5 (a) Basit kübik yapı (b) cisim merkezli kübik yapı (c) yüzey merkezli kübik yapı [24]

Silisyum kristali, valans elektronlarının paylaşılarak kovalent bağ yapması sonucu, her silisyum atomunun dört komşusu olacak şekilde oluşmaktadır. Silisyum elmas yapısında kristalleşir ve örgü sabiti $a = 5.43 \text{ Å}$ dür. Şekil 2.6' da silisyumun kristal yapısı verilmektedir.



Şekil 2. 6 Silisyumun kristal yapısı [25]

2.2.2 Silisyumun Kimyasal Özellikleri

Periyodik cetvelin IV. grubunda yer alan silisyum elementinin atom numarası 14 tür. Elektron dizilimi ise $1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^2$ şeklinde olup, değerlik bandında dört elektron bulundurduğu için kovalent bağ yapmaktadır. Katılanmamış Silisyum III. Grup (In, Ga, Al, B) ve V. Grup (As, Sb, P, N) elementleri ile katkıldıklarında n tipi ve p tipi yarıiletkenler oluşmaktadır.

2.2.3 Silisyumun Fiziksel Özellikleri

Silisyumun saf hali mavi gri metalik bir renge sahiptir. Parlak ve katı şeklindedir. Metalik parlak ve grimsi formu kristal şeklini oluştururken, amorf şekli kahverengi toz halinde bulunmaktadır. Doğada serbest halde bulunmazlar. Yüksek sıcaklıklarda yapılan çalışmalar için elverişli bir yarıiletkendir. Silisyum yarıiletkenine ait bazı fiziksel özellikler Çizelge 2.3' de verilmiştir.

Çizelge 2. 3 Silisyumun fiziksel özellikleri [26].

Yoğunluk	2.330 g/mL
Erime Noktası	1414 °C (1687K)
Kaynama Noktası	2900°C (3173K)
Molar Hacmi	12.06 ml/ mol

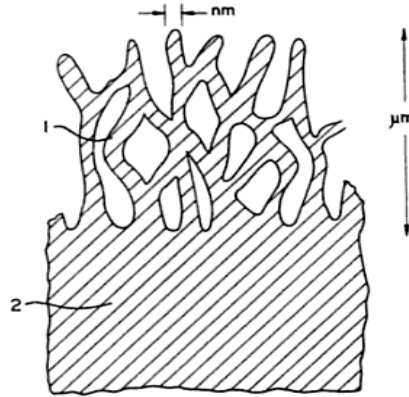
2.3 Gözenekli Silisyum

2.3.1 Gözenekli Silisyumun Yapısı

Tek kristal silisyumun elektrokimyasal aşındırma yöntemi sonucu yüzeyinde küçük boyuta kanalların ve gözeneklerin oluşturulduğu yapılara gözenekli silisyum yapılar denir. Mikro, mezo ve makro gözenekli yapılar olmak üzere üç kısımda incelenebilir. Gözenekli silisyum (GS), nanometre mertebesinde mikrometre mertebesine kadar değişen boyutlarda boşluklarla çevrelenmiş, silisyum bölgelerden oluşan bir ağıdır. Silisyumun hidroflorik asit içinde elektrokimyasal aşındırılması sırasında 1956'da keşfedildi [27]. Hidroflorik asit (HF) içinde elektrokimyasal aşındırma yöntemi ile (anodizasyon) elde edilen gözenekli silisyum, HF konsantrasyonu, sıcaklık, iletkenlik tipi, ışınlama ve anodizasyon zamanı, akım yoğunluğu gibi etkenler değiştirilerek incelendi. [28] [29]. Gözenekli silisyumda elektrokimyasal anodizasyon sonucu oluşturulan gözenekler sayesinde yüzey alanı yaklaşık değer olarak $800-1000 \text{ m}^2.\text{cm}^{-3}$ tür. Bu geniş yüzey alanına sıvı ve gazların dolması ile elektriksel iletkenlik üzerinde çalışmalar yapılmaktadır.

Gözenekli silisyumun elektrokimyasal olarak elde edilmesinde platin-elektrot ve farklı oranlarda sulandırılmış HF-esaslı elektrolit kullanılır. Devreye sabit akım uygulanarak, anodizasyon işlemi yapılır. Anodizasyon işlemi sırasında, silisyumun yüzeyi zamanla aşınarak gözenekler oluşur [30]. Üretim için kurulan devrede üretim hücresi olarak genelde HF ile tepkime vermeyen bir malzeme kullanılır. Oluşan devreye gerilim uygulandığında, birkaç mikrometre kalınlığında gözenekli tabaka meydana gelebilir.

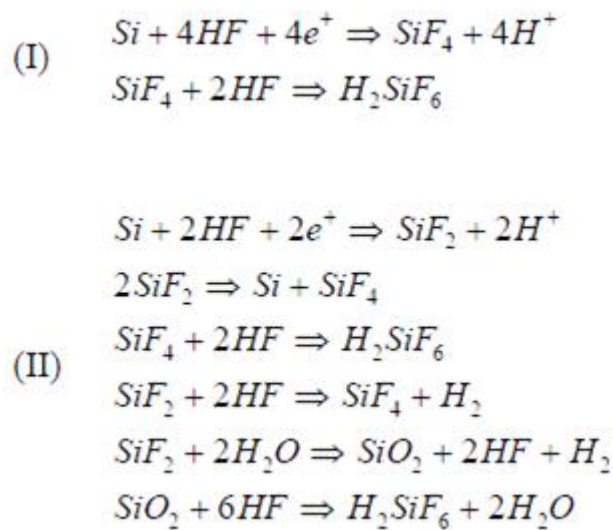
Akım yoğunluğu, HF asit konsantrasyonu, aşındırma esnasında kullanılan aydınlatmanın varlığı veya yokluğu, özellikle katkılama tipi ve silisyumun öz direnci gözenekli tabakanın morfolojisini etkilemektedir. Anodizasyon sürecinde tek kristal silisyum içinde Şekil 2.7' deki gibi bir çeşit birbirine bağlı süngerimsi, yüzeyleri hidrojen ile kaplı sütunsu yapılar oluştuğu söylenebilir.



Şekil 2. 7 Gözenekli silisyumun şematik gösterimi [31]

2.3.2 Gözenekli Silisyumun Oluşum Mekanizması

GS tabakaların oluşum mekanizmasını anlamak için silisyumun HF çözeltisi içerisinde çözülme mekanizmasını bilmek gerekmektedir. Çözülme ile boşluk oluşma mekanizması Şekil 2.8 'de verilmiştir. Nasır ve arkadaşları GS oluşum mekanizması için aşağıdaki reaksiyonları vermiştir.



Şekil 2. 8 Boşluk oluşma mekanizması

Anodizasyon yöntemi ile elde edilen GS oluşum mekanizmasını açıklamayı amaçlayan Lehmann ve Gösele' ye göre anodizasyon başladığında F- iyonları silisyum yüzeyindeki Si-H bağlarına saldırır. Bunun sonucu olarak Si-F bağları oluşur Diğer F- iyonları yüzeydeki öbür Si-H bağlarına saldırarak bu bağı koparır ve H₂ molekülü oluşur Si-F grupları polarizasyona neden olur ve arka Si-Si bağlarının elektron yoğunluğunu azaltır. Bu zayıflatılmış bağlara HF ve dH₂O tarafından saldırılır ve SiF₄ molekülünün yüzeyden ayrılması ile yüzeyde tekrar hidrojen bağları (Si-H) oluşur. Yüzeyden ayrılan silisyum atomu geride atomik boyutta bir çukur oluşturur. Yüzey geometrisindeki bu değişiklikler elektrik alanının dağılımını değiştirir ve deşikler bu boşluğa transfer edilir. Böylece anodizasyon boyunca silisyum atomları bu boşluktan ayrılmaya devam eder ve gözenekli silisyum üretilmiş olur.

2.3.3 Gözenekli Silisyum Oluşumunda Anodizasyon Koşulları

Gözenekli Silisyumun tüm özellikleri, gözeneklilik, kalınlık, gözenek çapı ve mikro yapısı, anodizasyon koşullarına bağlı olarak değişir.

Anodizasyon koşullarıysa;

- Hidroflorik asit konsantrasyonuna, hidroflorik asitin seyreltilmesi için kullanılan sıvının cinsine (distile su veya etanol ve bunların oranlı karışımları),
- Akım yoğunluğuna,
- Tek kristal silisyumun tipi ve direncine,
- Anodizasyonun süresine,
- Özellikle n-tipi silisyum için aydınlatmaya,
- Sıcaklığa,
- Ortamın nemine,
- Kurutma koşullarına, bağlıdır [32].

2.4 Bakteriler

Bakteriler 17.yy. da Antonie van Leeuwenhoek tarafından mikroskobun keşfiyle ilk defa gözlemlenmiştir. Bacterium adı 1838’de Christian Gottfried Ehrenberg tarafından kullanılmıştır. Bakteriler çok basit yapılı, genellikle klorofilsiz ve bölünerek çoğalan bir hücreli canlılar grubudur. Bakterilerin hızlı çoğalmaları ve biyokimyasal etkileri bakımından canlılar aleminin dengesini sağlamada çok büyük önem taşıyan bir grup oluştururlar. Bakteriler prokaryot hücreye sahiptir. Bakterileri çeviren iki tip hücre örtüsü vardır. En içte hücre zarı, onun üstünde de hücre duvarı yer alır. Hücre duvarı protein, yağ ve karbonhidratlardan meydana gelen karmaşık bir yapıdır. Bakterilerin sitoplazmaları içinde glikojen, protein, yağ tanecikleri ve ribozomlar görülür. Bakterilerde çekirdek, mitokondri ve endoplâzmik retikulum gibi bir zarla çevrilmiş özel organeller yoktur. Fakat bazı bakteriler “mezozom” denilen ve mitokondrileri andıran zar kıvrımları meydana getirir. Bakterinin %90’ı sudur. Su ve suda çözülmüş maddelerin bakteriye giriş çıkışı zar tarafından düzenlenir.

2.4.1 Bakterilerin sınıflandırılması, çeşitleri

Bakteriler genel olarak şekillerine, gram boyasına, oksijene duydukları ihtiyaca ve beslenme şekillerine göre Çizelge 2.4’ de verildiği üzere sınıflandırılırlar.

Çizelge 2. 4 Bakterilerin sınıflandırılması

Şekillerine Göre Bakteriler	Oksijen ihtiyacına göre Bakteriler	Beslenme Şekillerine Göre Bakteriler	Gram Boyasına Göre Bakteriler
Çubuk (bacillus)	Aerob	Hetotrof	Gram negatif
Yuvarlak (koküs)	Fakültatif aneorob	Ototrof	Gram pozitif
Spiral (spirillum)	Aneorob	Kemoototrof	
Virgül (vibrium)		Fotoototrof	

2.4.2 Bakterilerin üremesi, yaşam koşulları

Bakteriler ikiye bölünerek (bir ana hücreden birbirinin aynısı iki yavru hücre oluşur.) çoğalır. Bölünme süresi türlere bağlı olarak 20 dakika kadar kısa veya birkaç gün kadar

uzun olabilir. Örneğin *E. coli*'nin bir tek hücresinden, uygun ortamda sekiz saat sonra 10 milyon hücre üreyebilir. Daha sonra besin maddeleri azalıp toksik atık ürünler biriktikçe üreme yavaşlar ve tamamen durur. Bu haldeki hücreler uzun süre bekletilirse tümü ölür. Bakterilerin bölünmesiyle oluşan yeni bakteriler ya bir arada kalır ya da ayrılırlar. Biçimce çok değişiktirler ve yaşadıkları ortama göre bir görünüm edinirler. Birçoğunun spor denen dirençli biçimleri vardır ve bu biçime girdiklerinde aşırı ısıya ve soğuğa ya da kuraklığa dayanabilirler ve varlıklarını devam ettirirler. Bazı bakterileri sterilizasyonla yok etmenin güçlüğü bundan doğmaktadır. Gereken uygun sıcaklık, yeterli nem, oksijen ve pH gibi faktörler yeterli ve uygun olduğu sürece bakteriler üreme ve yaşamsal faaliyetlerini gerçekleştirirler. Uyarlandıkları ortama ya da içinde yaşadığı konağa en elverişli sıcaklık sınırları içinde hızla çoğalırlar. Bakteriler doğada önemli rol oynar. Bir kısmının çok yüksek enzim etkinliği vardır; mayalandırmaya dayalı sanayilerde bundan yararlanıldığı gibi, üstün yapılı hayvanların bağırsaklarında besinlerin sindirilmesinde de bakteriler önemli rol oynar. Genel olarak bakteriler mayalandırma ve çürütme etmenleridir, organik maddeleri gaza ve cansız maddelere dönüştürürler; bu maddeler yeniden yaşamsal çevrimde yer alır. Havadaki gazları kendine bağlayabilir, böylece toprağı azotça zenginleştirir ve bitkilere gelişmek için gereksindikleri inorganik besinlerin bir kısmını sağlamış olurlar. Yani bakteriler biyosferdeki çevrimlerde, parçalayıcı ya da mineralleştirici olarak çok önemli rol oynarlar. Organik çöpler ve atıklar bakteriler sayesinde bütanol ve metan gibi organik yakıtlara dönüştürülerek enerji üretiminde kullanılırlar.

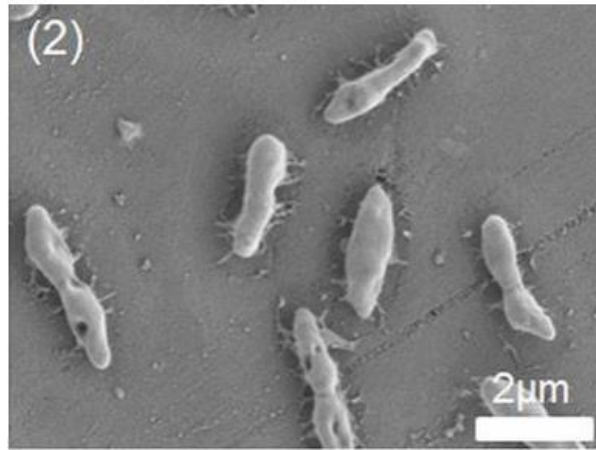
Yararlı bakteriler gibi zararlı (patojenik) bakteriler de vardır ve bunlar bakteriler aleminin çok küçük bir bölümüdür. Canlıların vücudunda parazit olarak yaşayan bakteriler birçok hastalığa (besin zehirlenmesi, verem, zatürre vb.) neden olurlar. Bazı bakteri türleri bazı yiyeceklerin (konservelerin) bozulmasına ve besin zehirlenmesine neden olurlar.

2.4.3 *Escherichia coli*

E. coli günümüzde toplum ve hastane kaynaklı enfeksiyonların en önemli etkenleri arasında bulunan bir mikroorganizma türüdür. *E. coli*'nin vücutta normal flora elemanı olması, anti mikrobiyal ajanlara karşı kolay ve hızlı direnç gelişiminin gözlenmesi ve

sahip olduğu virulans faktörleri; yüksek oranda enfeksiyon etkeni olarak izole edilmesinin nedenlerini oluşturmaktadır. Tüm bu etkenler *E. coli* suşlarının canlı veya cansız yüzey alanlara tutunmasını ve biyofilm oluşumunu arttırmaktadırlar.

E. coli *Enterobacteriaceae* familyasında yer aldığı bilinmektedir. Hastalık yapıcı olan bu bakteriler insan ya da hayvan bağırsak florasının içinde yer alan bir flora bakterisidir. *E. coli* bakterisi genel olarak gaitada bulunur ve yaklaşık 1 gramda 10^5 - 10^9 *E. coli* bakterisine rastlanmıştır. 1,1 -1,5 μm çapında olup, boyu 2-6 μm civarındadır. Sporsuz ve gram negatif bir bakteri türüdür. *E. coli* bakterisinin 5-46 $^{\circ}\text{C}$ aralığında üreme yapabilme özelliği bulunurken, optimum üreme sıcaklığı 37 $^{\circ}\text{C}$ dir. [33]. Besi yeri labotatuvar ortamı olarak belirlendiğinde, 18-44 $^{\circ}\text{C}$ de üreme yapar. Yüksek sıcaklıklarda üreyebilmesi ayırt edici bir özellik olarak da kullanılabilir. Agarda S tipi kolonileri oluştururlar ve hafif yuvarlaktırlar. Aynı zamanda 1-2 mm çapında olup, düzgün bombeli bir görünümündedirler. Sporsuz bir bakteri olmasına rağmen dış etkenlere oldukça dirençlidirler [34]. Oksijenli su, klor gibi dezenfektan yardımıyla birkaç dakikada yok edilebilirler iken, 55 $^{\circ}\text{C}$ de bir saatte ve 60 $^{\circ}\text{C}$ de yarım saatte yok edilebilirler [35]. Şekil 2.9' da *E. coli* bakterisinin SEM görüntüsü verilmektedir.



Şekil 2. 9 *E. coli* bakterisinin SEM görüntüsü [36]

Bağırsak dışında yaşamsal faaliyetlerini uzun süre sürdürebilen *E. coli* bakterisi, işiden kişiye temas etme yolu ile bulaşabilir ve özellikle gıda ve sularda bulunması nedeniyle enfeksiyona neden olabilmektedir [37]. Aynı zamanda yer altı sularında bulunan hayvan atıkları ile birlikte salgına neden olabilen bir bakteri türüdür [38]. Bununla beraber, gıda kaynaklı hastalıklarının yanı sıra bebeklerde ve çocuklarda ishal

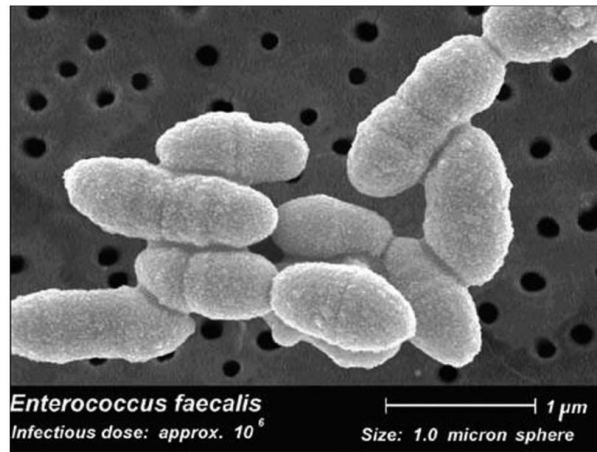
enfeksiyonuna neden olmaktadır ve bu hastalık sonucu böbrek yetmezliğinin de gelişebileceğini öne sürülmüştür [39].

2.4.4 *Enterococcus faecalis*

Enterococcus faecalis 1899 yılında ilk kez Fransa’ da Thiercelin tarafından ortaya çıkarılmıştır. Bu tür bakteriler hastane koşullarında bile dayanıklılık göstermeleri nedeniyle geniş bir pH spektrumunda çoğalabilmektedirler. 10-45 °C aralığında çoğalabilirler ve 60 °C de bile 30 dakika boyunca yaşamlarını sürdürebilirler [40], [41].

E. faecalis, sporsuz, Gram-pozitif olan bir bakteridir. Çapı 0,5-2 µm arasındadır. Küre veya ovoid şekilde olabilir. *E. faecalis* beyazımsı koloniler oluşturarak 30 dakika direnç gösterebilmektedir [42]. Ayrıca *E. faecalis* bakterisin yüzeyleri negatif olarak yüklenmektedir [43].

Enterokoklar, hayvanların sindirim atıklarında, toprakta, kirli suda hayvansal gıdalarda bulunabilen bakterilerdir. *Enterokoklar*, ciddi insan patojeni olan diğer bakteriler için düz (yatay) transfer edilebilen antibiyotik direnç genlerinin rezervuarı olarak dikkate alınmaktadır. [44]. Şekil 2.10’ da *E. faecalis*’ in SEM görüntüsü verilmektedir.

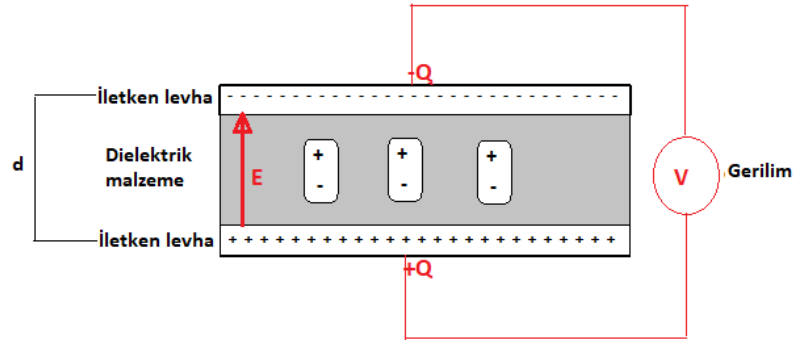


Şekil 2. 10 *E. faecalis* bakterisinin SEM görüntüsü [45]

2.5 Kondansatör

Dielektrik malzemeler; elektriksel iletkenliği sağlayacak kadar serbest taşıyıcıları olmayan malzemelerdir. Zıt yüklü iki iletken paralel levha arasına konulan dielektrik malzeme yardımıyla yük akışını engelleyebilen devre elemanlarına kondansatör

denmektedir. Bu devre elemanlarının temel özelliği; üzerlerinde elektriksel yükü depolamaktır. Şekil 2.11’ den görüldüğü üzere, yüzey alanı eşit paralel plakalı levhalara uygulanan gerilim sonucunda, dielektrik malzemede bulunan yükler zıt yüklerin (dipollerin) birbirini çekmesi prensibine göre yer değiştirirler. Bu nedenle, negatif yüklü plakanın yanındaki dielektrik malzeme yakınında pozitif yük birikmesi, diğer tarafta ise negatif yük birikmesi meydana gelmektedir (Şekil 2.11).



Şekil 2. 11 Paralel plakalı kondansatör şematik gösterimi

2.6 Empedans Spektroskopisi

Malzemenin küçük genlikli sinyallere karşı verdiği tepkiyi ölçmek için empedans spektroskopisi yöntemi kullanılmaktadır. Materyal karakterizasyonunda elektriksel ölçümler önem arz etmektedir. Sistemin fizikokimyasal özellikleri ile ilgili veriler sağlamanın yanısıra bazen zaman fonksiyonunda ölçülmesine rağmen genellikle frekansın fonksiyonu olarak ölçülmektedir [46].

Ohm yasası, bir direnç üzerindeki voltajın akımla doğru orantılı olduğunu belirtir. Ohm yasasının matematiksel ilişkisi aşağıdaki şekilde gösterilmektedir [47].

$$v(t) = R \times i(t), \quad R \geq 0 \quad (2.1)$$

burada

R ; ohm cinsinden ölçülen direnç,

$v(t)$, bir direncin iki noktası.

$i(t)$, dirençten geçen akımdır.

Doğru akım (DC) uygulandığında Denklem 2.1 uygulanır iken, alternatif akımda Ohm yasası Denklem 2.2 olarak yeniden yazılır.

$$V = I \times Z \quad (2.2)$$

Burada

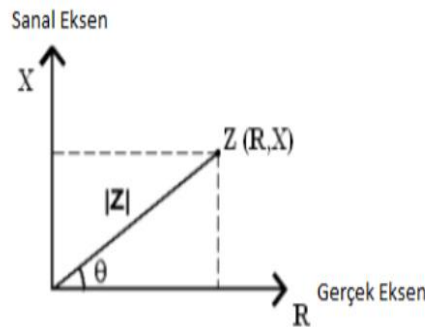
Z; ohm cinsinden ölçülen empedans olarak bilinen frekansa bağlı bir nicelik. Bir devrenin empedansı Z, faz gerilimi V'nin faz akımı I'ye oranıdır [47]. Bu nedenle, bir AC devresindeki empedans karmaşık bir miktar olduğundan, şu şekilde ifade edilebilir

$$Z = R + jX \quad (2.3)$$

$Z < X$

$$|Z| = \sqrt{R^2 + X^2} \quad (2.4)$$

Burada R, gerçekte bileşen (direnç) ve X, kompleks bileşendir (reaktans). Şekil 2.12 de kompleks empedans düzleminin grafik şekli verilmektedir.



Şekil 2. 12 Kompleks empedans düzlemi [47]

Dielektrik spektroskopisi ise (DS) maddenin yük iletim mekanizması hakkında daha ayrıntılı bilgi edinmek için kullanılan yöntemlerden birisidir. Ayrıca bu spektroskopi empedans spektroskopisinin bir parçası olarak da bilinmektedir. Dielektrik spektroskopisi, geniş bir frekans aralığında empedansı ölçüldükten sonra, kapasitans, empedansın gerçel ve sanal kısımları, iletkenlik gibi parametrelerin tümü ölçülüp bileşenleri empedanstan hesaplanabilir.

Empedans spektroskopisi olarak bilinen alternatif akım (AC) ölçümler, maddenin elektriksel karakterizasyonunda en etkili tekniklerden birisidir. Maddenin empedansı iki

bileşenli ifade olup, bunlar direnç (reel kısım) ve tepkisel (imajiner kısım) değerlerdir. Bu iki bileşenli kompleks empedans ifadesini, bütün malzemeler için kompleks düzlemde genel olarak şu şekilde ifade edebiliriz. Kompleks empedans:

$$Z^*(\omega) = Z'(\omega) - Z''(\omega) \quad (2.5)$$

burada

ω ; açısal frekans

Z' ; empedansın reel kısmı,

Z'' ; empedansın imajiner kısmını ifade eder [47].

BÖLÜM 3

DENEYSEL ÇALIŞMALAR

3.1 Biyolojik Yöntemler

Bu tez çalışmasında kullanılan bakteri suşları *E. coli* ve *E. faecalis*, İstanbul Üniversitesi Cerrahpaşa Tıp Fakültesi, Mikrobiyoloji Laboratuvarı ve Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Edebiyat Fakültesi, Moleküler Biyoloji ve Genetik Bölümü tarafından temin edilmiştir. Bakteriler 37 °C de Mueller-Hinton Agar' da (MHA) yetiştirilmiştir. Biriktirme deneyi sırasında, sıvı ortam olarak 30 mM NaCl çözeltisi (serum fizyolojik fizyolojik % 9) kullanılmıştır. Deneyde kullanılan bakteriler Agar ile temas etmeden üst kısımdan alınmıştır. 22-24 saat inkübasyon süresinden sonra test edilecek *E. coli* ve *E. faecalis* konsantrasyonları UV-VIS 600 nm dalga boyu spektrofotometresinde Mc Farland standartları baz alınarak hazırlanmıştır. Bakteri konsantrasyonları için <https://www.chem.agilent.com/store/biocalculators/calcoDBacterial.jsp?requestid=110959> linki kullanılarak yaklaşık değerler elde edilmiştir (Şekil 3.1).

E. coli Cell Culture Concentration from OD₆₀₀ Calculator

Calculator to give the concentration of *E. coli* cell cultures based on spectrophotometer readings at OD₆₀₀.

OD₆₀₀ of 1.0 = 8×10^8 cells/mL.

Bacterial cells/mL =

This calculator uses the extinction coefficients for *E. coli* and Yeast cultures to calculate the cell concentrations from the Optical Density (OD₆₀₀) reading taken with a spectrophotometer.

For bacterial cell cultures OD₆₀₀ of 1.0 = 8×10^8 cells/mL.

Şekil 3. 1 Bakteri hesaplamalarında kullanılan linkin ekran görüntüsü

3.2 Fiziksel Yöntemler

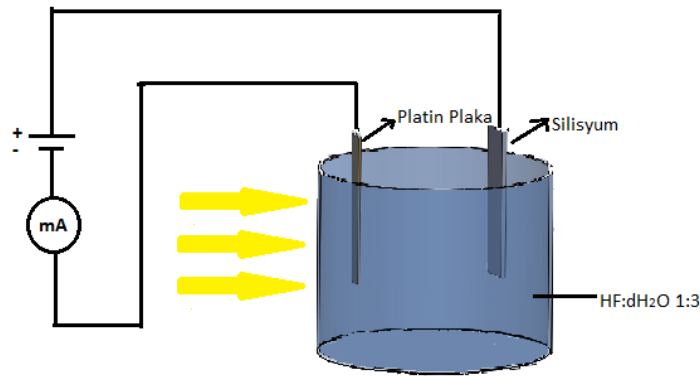
3.2.1 Gözenekli Silisyumun Elde Edilmesi

Gözenekli silisyum yapıyı elde etmek için elektrokimyasal anodizasyon yöntemi kullanılmıştır. Malzeme olarak (111) oryantasyonlu ve $1.25 \times 10^{-2} \Omega \cdot \text{cm}$ öz dirençli Antimon (Sb) katkılı n tipi tek kristal silisyum ile çalışılmıştır. İstenilen kalitede bir GS/Si yapı oluşturabilmek için kullanılan yarıiletkenin yüzeyinin çok iyi temizlenmiş olması gerekmektedir. Bu temizlik yarıiletkenin birçok yüzey kusurunu ortadan kaldıracığı için, GS/Si yapıların performansı da önemli ölçüde etkilenmiş olacaktır. Bu özelliklerdeki Si kristalleri önce 1x1 cm boyutlarında kesildikten sonra her bir parça aşağıdaki temizlik aşamalarından geçirilmiştir.

- ✓Deiyonize-su ile durulama
- ✓Hidroflorik asit içerisinde temizleme
- ✓Deiyonize su ile durulama.
- ✓Etil alkol içerisinde temizleme
- ✓Deiyonize su ile durulama.
- ✓Azot gazı ile kurutma.

Temizleme aşamasından sonra silisyum yarıiletkeni arka yüzeyi İndiyum (In) metali ile lehimlenmiş ve malzemeyi korumak için de aside dayanıklı balmumu ile kaplanmıştır.

Anodizasyon koşullarındaki parametrelerin değişimi ile gözenek boyutlarında değişiklik yapılabilinmektedir. Bu çalışmada iki farklı gözenek tipine ait yapılar kullanılmıştır. Gözenekli silisyumun elde edilmesi için yapılan elektrokimyasal anodizasyon işlemindeki numunelerin bir kısmı 15 mA/cm² sabit akım yoğunluğunda, HF:dH₂O oranı 1:3 olacak şekilde 40 dakika boyunca 50 W 12 V halojen lamba işlemine tabi tutulmuştur. Bu elektrokimyasal işlem sonucu elde edilen GS/Si yapılara gözenek boyutlarından dolayı makro gözenekli yapılar denmiştir. Numunelerin diğer kısmı ise 15 mA/cm² sabit akım yoğunluğunda, HF:dH₂O oranı 1:7 olacak şekilde 40 dakika boyunca 50 W 12 V halojen lamba işlemine tabi tutulmuştur. Bu GS/Si yapılara ise gözenek boyutlarının daha küçük olması nedeniyle küçük gözenekli makro yapılar denmiştir. Düzenekte kullanılacak olan malzemelerin HF asidi ile bir reaksiyon göstermemesi için elektrod olarak platin (Pt) tel kullanılmıştır. Elde edilen In/Si/GS yapılar sıvı gümüş boya ile In/Si/GS/Ag yapı haline getirilmiştir. Elektrokimyasal anodizasyon işlemi için kullanılan deney seti Şekil 3.2' de verilmiştir.



Şekil 3. 2 GS üretimi için elektrokimyasal aşındırma yöntemi [48]

3.2.2 Gözeneklilik ve Kalınlık Parametrelerinin Belirlenmesi

Anodizasyon elektrokimyasal cilalama yöntemi ile akım yoğunluğunun ani olarak 0.8-1 A/cm² yükseltilmesi sonucu GS/Si yapıdan ayrılır ve GS filmler elde edilir. Ortalama gözeneklilik için birçok farklı yöntem kullanılmakla beraber bunlar arasında en sık ve güvenilir olarak kullanılan ağırlık ölçüm yöntemidir.

$$P = \frac{m_1 - m_2}{m_1 - m_3} \quad (3.1)$$

Burada,

P: gözeneklilik,

m1: elektrokimyasal anodizasyon işlemi öncesinde tek kristal Si altlığın kütlesi ,

m2; elektrokimyasal anodizasyon işlemi sonrası GS/Si yapının kütlesi

m3; elektrokimyasal cilalama ile GS film tek kristal Si' dan ayrıldıktan sonra Si altlığın kütlesidir. Kütlelerin tartılma işlemi And HM-200 marka 0.1 mg duyarlıklı tartı ile gerçekleştirilmiştir.

3.2.3 Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) Analizi

Taramalı elektron mikroskobu yüksek çözünürlüklü resim oluşturmak için vakum ortamında oluşturulan ve aynı ortamda elektromanyetik lenslerle inceltelen elektron demeti ile incelenecek malzemeyi analiz etme imkanı sunar. Mikroskopta oluşturulan resimler, elektron demetinin malzeme ile olan etkileşiminden ortaya çıkan ışımlar veya geri yansıyan elektronlar sayılarak oluşturulur. Bu çalışmada, GS tabanlı yapılar, SEM (Scanning Electron Microscopy) "JEOL/JSM-6335F" aygıtı kullanılarak üstten SEM analizleri yapılmıştır.

3.2.4 Empedans Analizörü

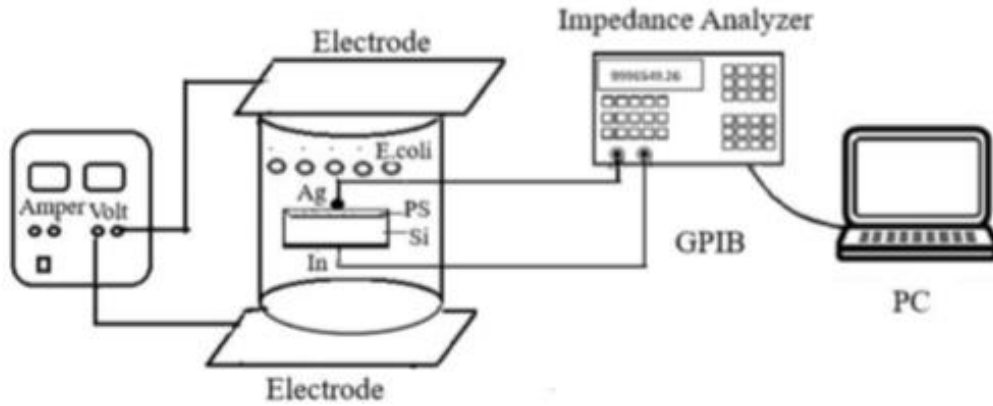
Makro gözenekli ve küçük gözenekli makro In/Si/GS/Ag sensör platformları bir petri kabında bulunan bakteri çözeltisine daldırılmasından sonra, paralel iki Al levha arasına yerleştirilerek elektrik alan deneyleri gerçekleştirilmiştir. Empedans spektrum ölçümleri 5 Hz ile 100 kHz frekans aralığında HP 4192A empedans analizörü kullanılarak yapıldı. Deneyde kullanılan empedans analizörü Şekil 3.3' de verilmiştir.



Şekil 3. 3 Empedans Analizörü

Empedans ölçümleri sırasında Al plakalarına petri kabında bulunan 4×10^7 cfu.mL⁻¹ sabit konsantrasyonlu *E. coli* bakteri çözeltisi için 0-10 kV/cm aralığında çeşitli elektrik alanlar uygulanmıştır. 2×10^7 cfu.mL⁻¹ sabit konsantrasyonlu *E. faecalis* bakteri çözeltisi için ise 0-5 kV/cm aralığında çeşitli elektrik alanlar uygulanmıştır. $1,5 \times 10^7$ cfu.mL⁻¹ sabit konsantrasyonlu *E. coli* bakteri çözeltisi için 0-5 kV/cm aralığında çeşitli elektrik alanlar uygulanarak deneyler tekrar edilmiştir.

Başka bir deney setinde ise, sabit ileri yönde ve ters yönde elektrik alanın uygulama süresinin, bakterilerin gözenekli yapı üzerindeki hareketi incelenmiştir. Elektrik alanın uygulama süresi, sabit bakteri konsantrasyonları için 0,5-3 saat aralığında ileri yönde ve ters yönde sabit elektrik alan değerinde uygulanmıştır. Bu değer 4×10^7 cfu.mL⁻¹ sabit konsantrasyonlu *E. coli* için 12 kV/cm iken, sabit konsantrasyonlu 2×10^7 cfu.mL⁻¹ *E. faecalis* bakteri çözeltisi için ise 7 kV/cm dir. Sabit konsantrasyonlu $1,5 \times 10^7$ cfu.mL⁻¹ *E. coli* için 7 kV/cm elektrik alan değerinde deneyler tekrar edilmiştir. Çalışmalarda kullanılan deney düzeneği Şekil 3.4’ de gösterilmiştir.



Şekil 3.4 Deney düzeneğinin şematik gösterimi

3.2.5 UV-VIS Spektrofotometre

İncelenmek istenen numunenin yüzeyine bir ışın demeti gönderildiğinde, bu ışın yüzeyden geçtikten veya yansıdıktan sonra ışın şiddetinde bir azalma meydana gelmektedir. Bu duruma soğurma denir ve soğurma miktarını ölçen cihaz da UV-VIS spektrofotometre cihazı olarak adlandırılmaktadır. Bu cihazın ölçüm aralığı mor ötesinden kızılötesine kadar bulunan dalga boylarını içermektedir. Burada UV, mor ötesini, VIS ise görünür bölgeyi ifade etmektedir [54].

Çalışmalarda kullanılan numunelerin optik geçirgenlikleri 350-1100 nm dalga boyu aralığında Şekil 3.5’ de verilen Shimadzu UV-1280 spektrofotometre cihazı ile taranmıştır.



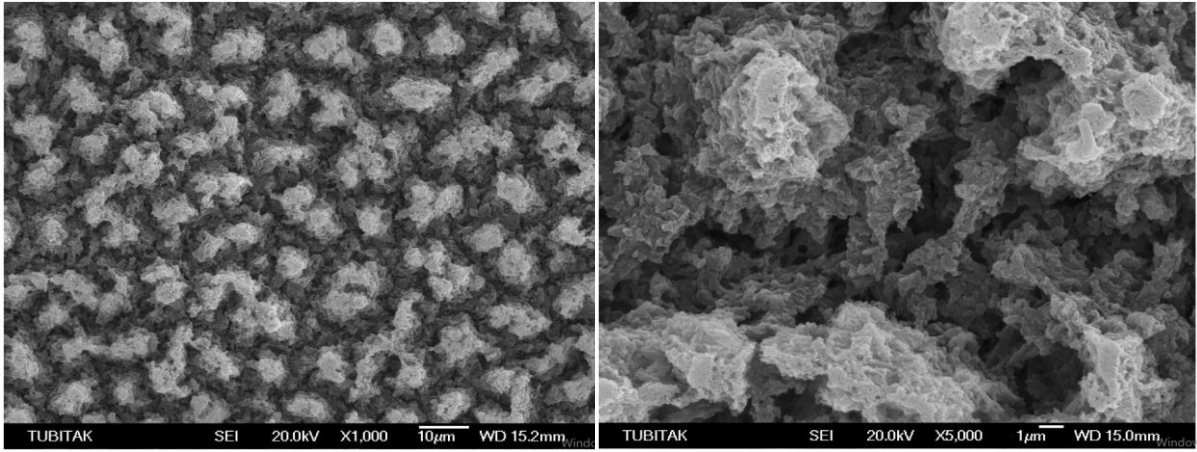
Şekil 3. 5 Shimadzu UV-1280 Multipurpose UV-Vis Spektrofotometre cihazı

BÖLÜM 4

BULGULAR

4.1 Gözenekli Silisyum Filmlerin SEM Analizleri

Antimon (Sb) katkılı n tipi tek kristal silisyum örneği ilk aşamada HF: dH₂O 1:3, anodizasyon zamanı 40 dakika, akım yoğunluğu 15 mA/cm² ve 50 W 12 V halojen lamba işlemine tabii tutularak yapılan elektrokimyasal anodizasyon işlemi sonucu elde edilmiş olan GS/Si yapıların üstten çekilmiş SEM görüntüleri Şekil 4.1 (a) ve Şekil 4.1 (b)'de verilmektedir. Makro gözenekli bu yapılardaki gözeneklerin (çukurların) ortalama çapı 5-15 µm olarak belirlenmiştir.

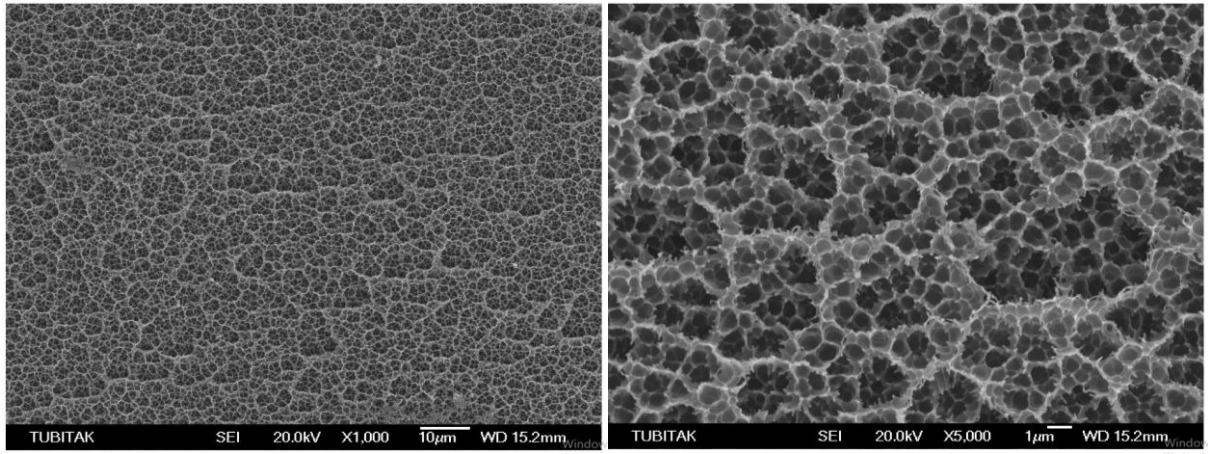


a.

b.

Şekil 4.1 (a) Makro gözenekli üretilen GS/Si yapıların 1000 büyütmede üstten görünüşü
(b) Makro gözenekli üretilen GS/Si yapıların 5000 büyütmede üstten görünüşü

Antimon (Sb) katkılı n tipi tek kristal silisyum örneği ikinci aşamada HF: dH₂O 1:7, anodizasyon zamanı 40 dakika, akım yoğunluğu 15 mA/cm² ve 50 W 12 V halojen lamba işlemine tabii tutularak yapılan elektrokimyasal anodizasyon işlemi sonucu elde edilmiş olan küçük gözenekli makro boyutlarda GS/Si yapıların üstten çekilmiş SEM görüntüleri Şekil 4.2 (a) ve Şekil 4.2 (b)' de verilmektedir. HF: dH₂O 1:7 oranının kullanılmasıyla çözelti derişik bir halden daha seyreltik bir hale getirilmiştir. Çözeltide HF oranının artmasıyla dağlamalar azalmakta ve gözenek oluşumunda bir azalma meydana gelmektedir. Bu nedenle gözenek boyutlarında da bir küçölme meydana gelmiştir. Küçük gözenekli makro yapılarıdaki gözeneklerin (çukurların) ortalama çapı 1-5 µm olarak belirlenmiştir.



a.

b.

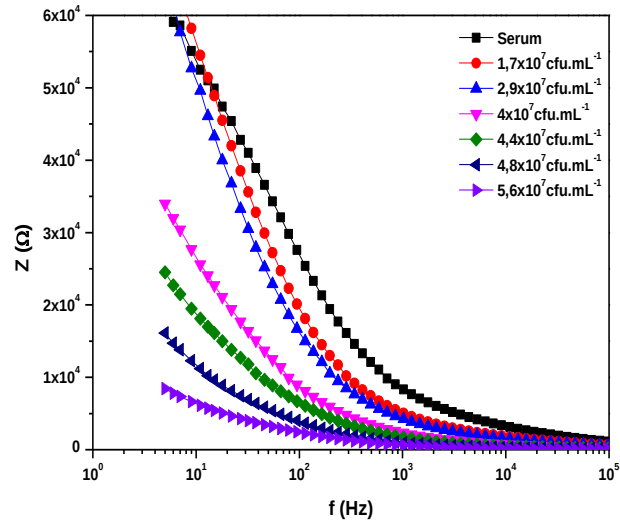
Şekil 4. 2 (a) Küçük gözenekli makro üretilen GS/Si yapıların 1000 büyütmede üstten görünüşü (b) Küçük gözenekli makro üretilen GS/Si yapıların 5000 büyütmede üstten görünüşü.

4.2 Makro Gözenekli In/Si/GS/Ag Yapılarda *E. coli* Bakteri Deneyleri

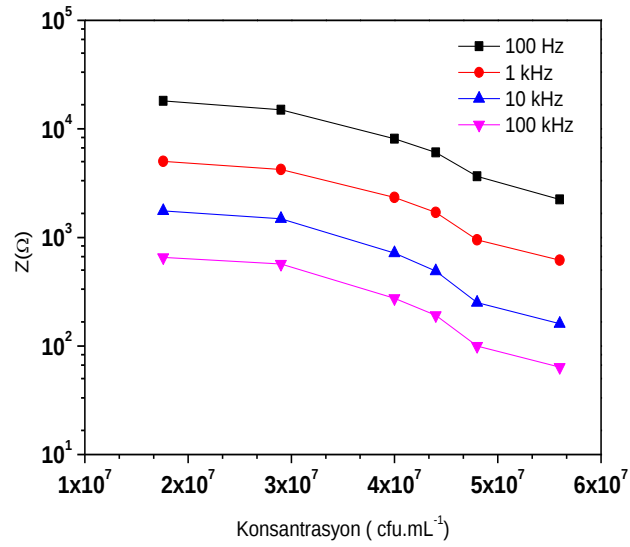
4.2.1 *E. coli*' nin Farklı Konsantrasyonlu Bakteri İçeren Sıvılarındaki Frekansa Bağlı Empedans Ölçümleri

Gözenekli silisyum sensör platformu için makro gözenekli olarak üretilen In/Si/GS/Ag yapının öncelikle serum fizyolojik ortamında ileri ve ters yönde uygulanan farklı elektrik alan değerleri için, frekansa bağlı empedans değişimi incelenmiştir. In/Si/GS/Ag yapının serum fizyolojik ortamında, empedans değerlerinde bir değişim gözlemlenmemiştir.

Makro gözenekli olarak üretilen In/Si/GS/Ag yapı *E. coli* bakterisinin farklı konsantrasyonunu içeren sıvılar içine daldırılarak, elektrik alanının uygulanmadığı ortamda bakteri konsantrasyonunun empedans spektrum üzerindeki etkisi incelenmiştir. Şekil 4.3 (a)' da *E. coli* bakterisi içermeyen sıvıdaki, In/Si/GS/Ag yapının empedans değerleri hemen hemen tüm frekanslar için en yüksek değere sahipken, *E. coli* bakterisi ilavesi yapılan sıvılara daldırıldığında empedans değerlerinde bir azalma görülmektedir. Bakteri konsantrasyonu sırasıyla, $1,7 \times 10^7$ cfu.mL⁻¹, $2,9 \times 10^7$ cfu.mL⁻¹, 4×10^7 cfu.mL⁻¹, $4,4 \times 10^7$ cfu.mL⁻¹, $4,8 \times 10^7$ cfu.mL⁻¹ ve $5,6 \times 10^7$ cfu.mL⁻¹ olarak artarak değiştiğinde, empedans değerlerinde azalma meydana gelmiştir. Bunun sebebi, elektrolit-elektrot arayüzeyinde oluşan çift katmanlı kapasitansın etkisi düşük frekans bölgesinde (<1kHz) belirgin olduğundan empedans değerleri, bakteri eklenmesi ile beraber azalacaktır. Kritik bir gevşeme frekansına ulaşıncaya kadar empedans değeri azalacak ve bu sınırın ötesinde çift katmanlı kapasitans artık mevcut olmayacaktır. Yüksek frekans bölgesinde (>1 MHz) ise bakteri konsantrasyonunun artmasına rağmen empedans değerlerinde çok az değişiklik vardır, çünkü bu bölgeye çözelti ortamının dielektrik kapasitansı hakim olmaktadır. Makro gözenekli In/Si/GS/Ag yapı bakterili serum fizyolojik ortamını, bakterisiz serum fizyolojik ortamından ayırt edebilmenin yanı sıra bakteri konsantrasyonlarını da birbirinden ayırt edebilmiştir. Bakteri konsantrasyonlarının GS tabanlı yapıların empedansı üzerindeki etkisini netleştirebilmek için, ölçülen empedansın seçilen frekanslarda bakteri konsantrasyonu ile değişimi Şekil 4.3 (b)' de gösterilmektedir. Seçilen tüm frekans değerlerinde (100 Hz, 1 kHz, 10 kHz, 100 kHz) bakteri konsantrasyonunun artması ile empedans değerlerinde bir azalma meydana gelmiştir. Aynı frekans değerinde bakterili sıvının farklı konsantrasyonlarının empedans ölçümleri üzerinde verdiği cevaplar farklı olmuştur.



a.



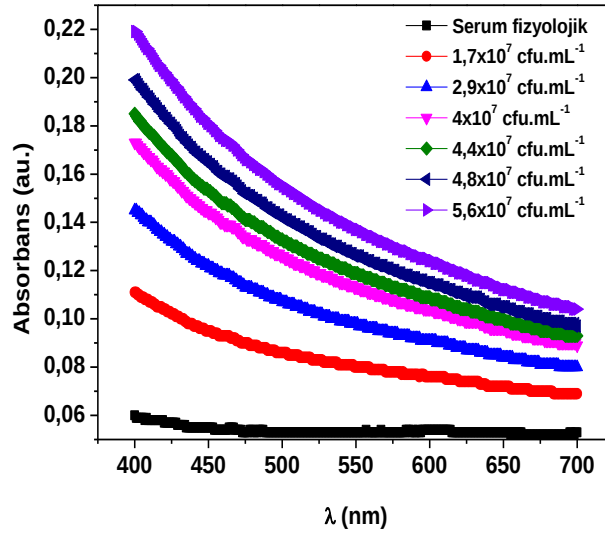
b.

Şekil 4. 3 (a) In/Si/GS/Ag yapıların *E. coli*'nin farklı konsantrasyonlu bakteri içeren sıvılarındaki frekansa bağlı empedans grafiği (b) 100 Hz, 1 kHz, 10 kHz, 100 kHz frekans değerlerinde empedans değişimleri

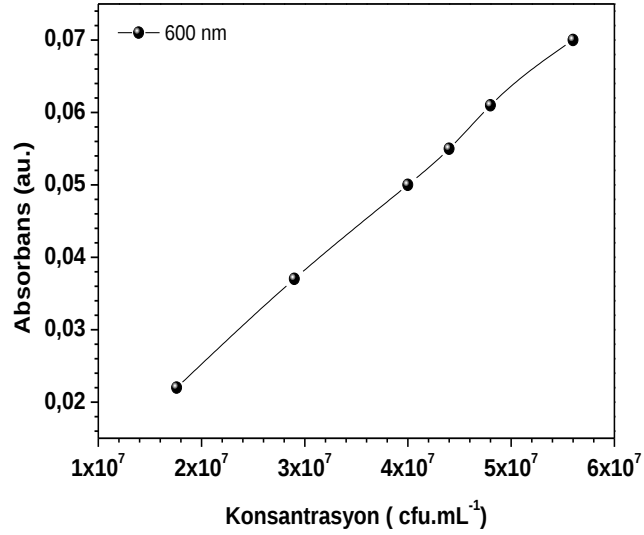
4.2.2 Farklı Konsantrasyonlara Sahip *E.coli* Süspansiyonların UV-VIS Absorpsiyon Spektrumları

Bakteri konsantrasyonlarının GS tabanlı yapıların absorbansı üzerindeki etkisini netleştirebilmek için, UV-VIS spektrofotometresi ile bakterisiz serum fizyolojik

ortamında ve farklı bakteri konsantrasyonlu sıvılarda UV-VIS absorpsiyon spektrum sonuçları Şekil 4.4 (a)' da verilmektedir. *E. coli* konsantrasyon hesabında kullanılan 600 nm dalga boyundaki absorbans değerleri değişimi Şekil 4.4 (b)' de görülmektedir.



a.

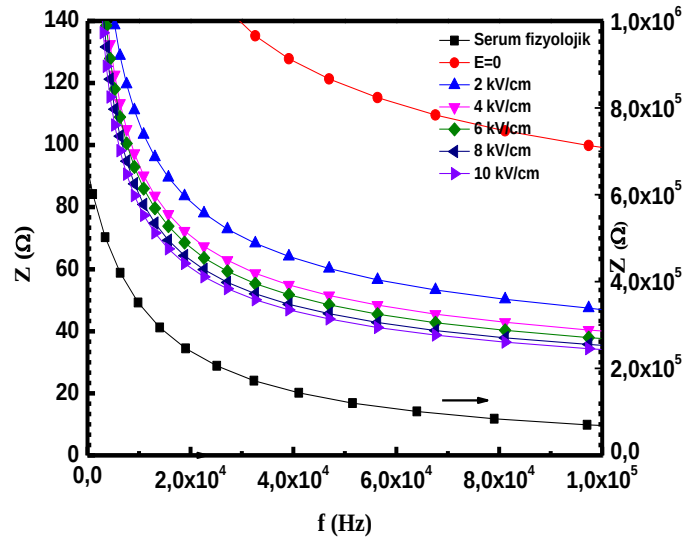


b.

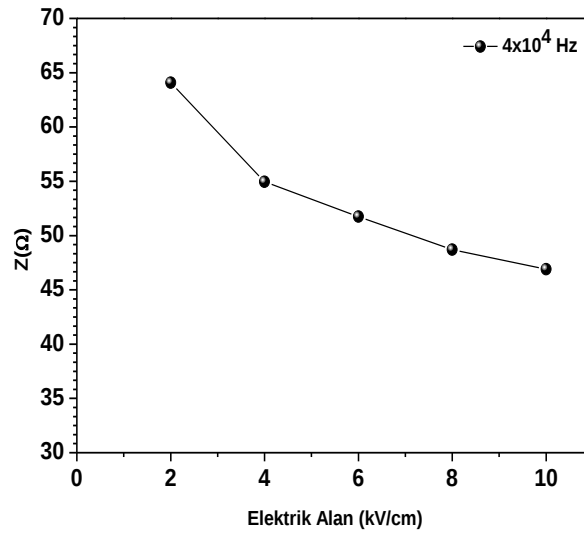
Şekil 4. 4 Çeşitli bakteri konsantrasyonlarına sahip süspansiyonların UV-VIS absorpsiyon spektrumları (b) farklı konsantrasyonlardaki *E.coli* süspansiyonlarının 600 nm dalga boyundaki absorbans değerleri

4.2.3 Sabit Konsantrasyonlu *E. coli* Bakterisi İçeren Sıvılara Dışarıdan Uygulanan İleri Yön Elektrik Alan Etkisi ile Frekansa Bağlı Empedans, İletkenlik Değişimi

Şekil 4.5 (a)' dan da görüleceği üzere, sabit bakteri konsantrasyonunda uygulanan elektrik alanın empedans değerleri üzerindeki etkisi görülmektedir. Çift tabaka kapasitansı düşük frekans bölgesine hakim olduğundan empedans değerlerinde hızlı bir azalma meydana gelmektedir. Yüksek frekans bölgesinde ise a.c. sinyalinin değişimi takip edebilmek için yeterli zamanı bulunmadığından empedans değerlerinde çok az bir değişim görülmektedir. Empedans değerleri, tüm frekanslar için uygulanan elektrik alan değeri ile birlikte azalmaktadır. Şekil 4.5 (b)' de ise 4×10^4 Hz sabit frekansı için sırasıyla 2kV/cm, 4kV/cm, 6 kV/cm, 8kV/cm ve 10kV/cm elektrik alan değerlerindeki empedans değişimleri görülmektedir. Elektrik alan etkisi ile bakteriler GS yüzeyine daha çok yaklaşarak, empedans değerlerinde azalmaya sebep olmuşlardır.



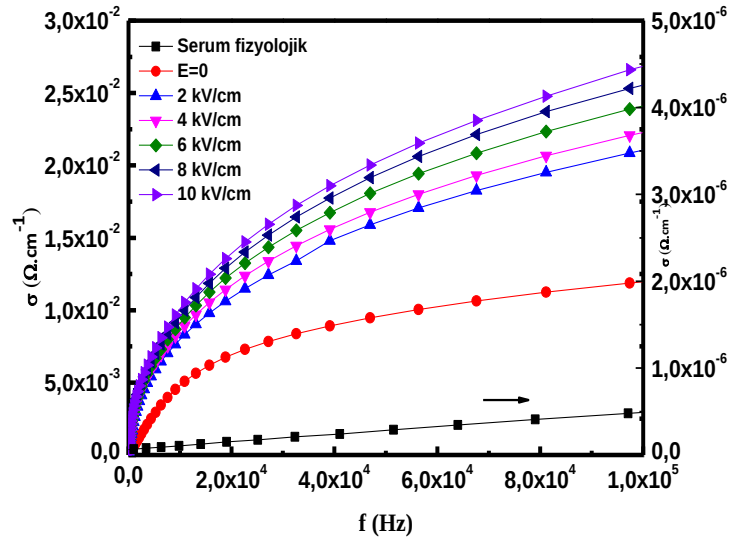
a.



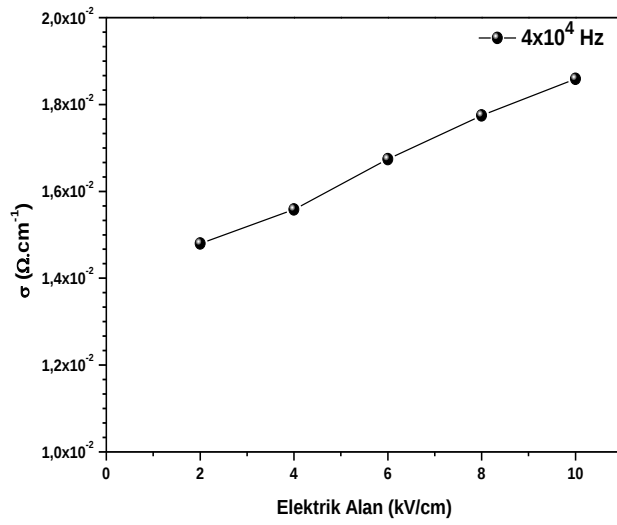
b.

Şekil 4. 5 (a) In/Si/GS/Ag yapıların 4×10^7 cfu. mL⁻¹ *E. coli* konsantrasyonunda sırasıyla 0kV/cm, 2kV/cm, 4kV/cm, 6kV/cm, 8kV/cm ve 10kV/cm ileri yönde uygulanan elektrik alan değerlerinde (a) frekansa bağlı empedans değişimi (b) 4×10^4 Hz sabit frekansı için empedans değişimi

Makro gözenekli In/Si/GS/Ag yapının 4×10^7 cfu.mL⁻¹ *E. coli* konsantrasyonlu sıvı içerisindeki iletkenlik değerlerindeki frekansa bağlı değişimi 2kV/cm, 4kV/cm, 6 kV/cm, 8kV/cm ve 10kV/cm elektrik alan uygulanarak incelenmiştir (Şekil 4.6 (a)). GS tabanlı yapılar 4×10^7 cfu.mL⁻¹ *E. coli* bakteri konsantrasyonu içeren sıvı içerisine daldırılıp, elektrik alan değerlerindeki artış ile birlikte iletkenlik değerlerinde de bir artış meydana gelmiştir. Şekil 4.6 (b)' de ise, 4×10^4 Hz sabit frekans değerinde elektrik alanın iletkenlik üzerindeki değişimleri incelenmiş ve elektrik alanın artmasıyla iletkenliğin arttığı gözlemlenmiştir. Elektrik alanın etkisi ile bakteriler GS yüzeyine daha çok yaklaşarak iletkenlik değerlerinin artmasına neden olmuşlardır.



a.

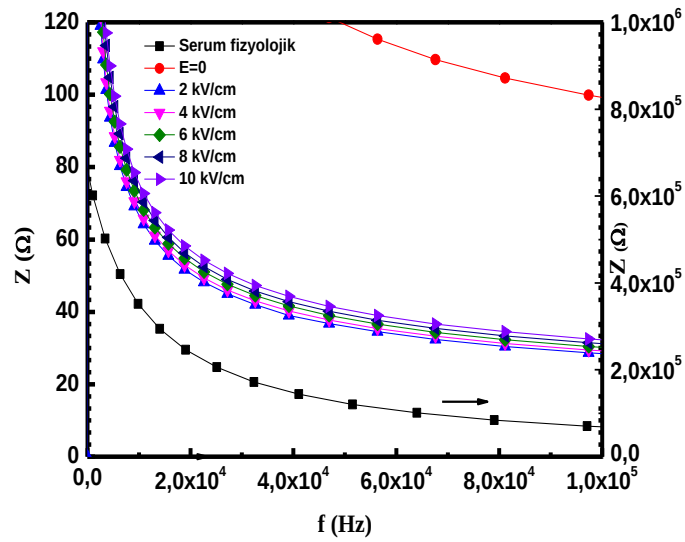


b.

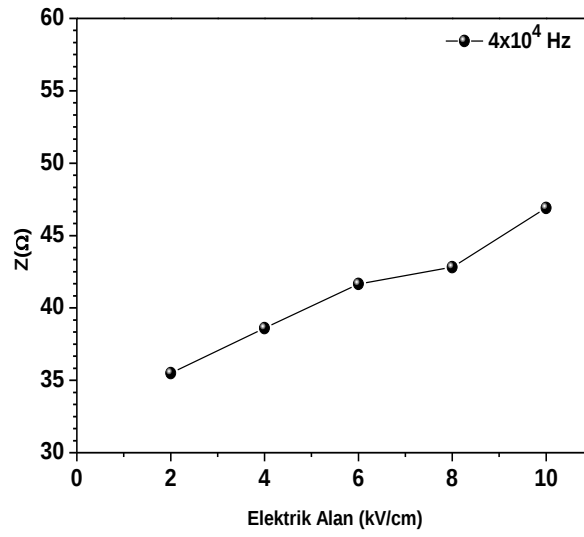
Şekil 4. 6 (a) In/Si/GS/Ag yapıların 4×10^7 cfu. mL⁻¹ *E. coli* konsantrasyonunda sırasıyla 0kV/cm, 2kV/cm, 4kV/cm, 6kV/cm, 8kV/cm ve 10kV/cm ileri yönde uygulanan elektrik alan değerlerinde (a) frekansa bağlı iletkenlik değişimi (b) 4×10^4 Hz sabit frekansı için iletkenlik değişimi

4.2.4 Sabit Konsantrasyonlu *E. Coli* Bakterisi İçeren Sıvılara Dışarıdan Uygulanan Ters Yön Elektrik Alan Etkisi ile Frekansa Bağlı Empedans, İletkenlik Değişimi

Makro gözenekli In/Si/GS/Ag yapıya ters yönde elektrik alan uygulayarak iletkenliğin, empedansın, kapasitansın frekansa bağlı ölçümleri yapılmıştır. Şekil 4.7 (a)' dan da görüleceği üzere, ters yönde uygulanan elektrik alanının etkisiyle empedans değerlerinde bir artma meydana gelmiştir. Şekil 4.7 (b)' de ise, 4×10^4 Hz sabit frekans değerinde elektrik alanının artmasıyla empedans değerlerinde bir artış gözlenmiştir. Bu sonuca göre, negatif yüklü *E. coli* bakterisinin gözeneklere birikmesinin uygulanan elektrik alanının tersine çevrilebilir olmasıyla önlenebileceği gösterilmektedir.



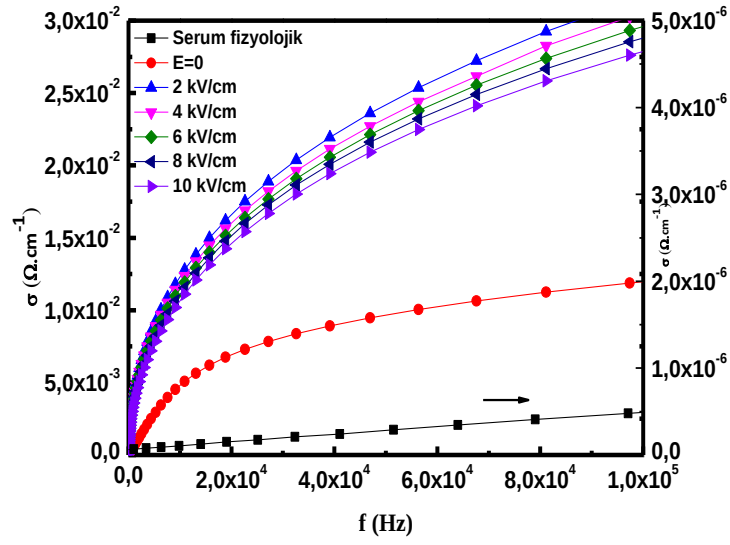
a.



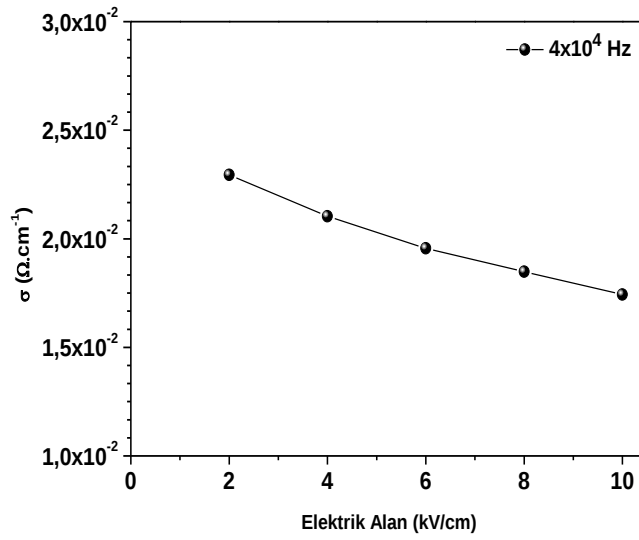
b.

Şekil 4. 7 In/Si/GS/Ag yapıların 4×10^7 cfu. mL⁻¹ *E. coli* konsantrasyonunda sırasıyla 0kV/cm, 2kV/cm, 4kV/cm, 6kV/cm, 8kV/cm ve 10kV/cm ters yönde uygulanan elektrik alan değerlerinde (a) frekansa bağlı empedans değişimi (b) 4×10^4 Hz sabit frekansı için empedans değişimi

Ters yönde uygulanan elektrik alanın In/Si/GS/Ag yapının 4×10^7 cfu.mL⁻¹ *E. coli* süspansiyonundaki iletkenliği üzerindeki etkisi incelenmiştir ve Şekil 4.8 (a)' da görüldüğü üzere elektrik alanın ters yönde uygulanması sonucu iletkenlik değerlerinde bir azalma meydana gelmiştir. Gözeneklerde bulunan bakteriler, ters yönde uygulanan elektrik alan değerlerini artmasıyla gözeneklerden uzaklaştırılabilmiştir. Şekil 4.8 (b)' de daha ayrıntılı olarak verilen 4×10^4 Hz sabit frekansında incelediğimiz iletkenlik değerleri elektrik alanın artmasıyla azalarak, gözeneklerde bakterilerin azaldığını göstermektedir.



a.

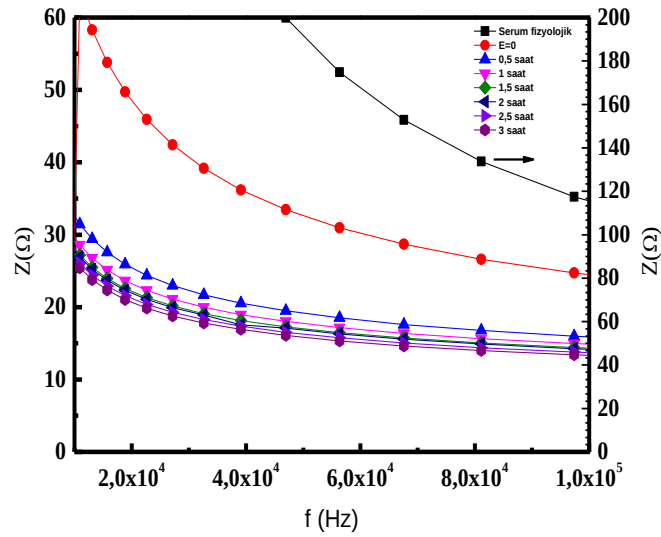


b.

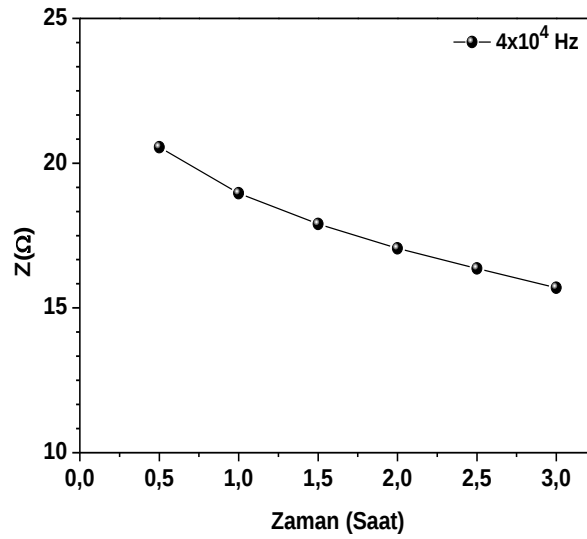
Şekil 4. 8 (a) In/Si/GS/Ag yapıların 4×10^7 cfu. mL^{-1} *E. coli* konsantrasyonunda sırasıyla 0kV/cm, 2kV/cm, 4kV/cm, 6kV/cm, 8kV/cm ve 10kV/cm ters yönde uygulanan elektrik alan değerlerinde (a) frekansa bağlı iletkenlik değişimi (b) 4×10^4 Hz sabit frekansı için iletkenlik değişimi

4.2.5 Canlı *E. coli* Bakterisinin İleri Yönde Sabit 12 kV/cm Elektrik Alan Değeri Altında Farklı Zamanlardaki Frekansa Bağlı Empedans Değişimi

Sabit ileri yönde elektrik alan değeri altında uygulanan elektrik alan süresinin makro gözenekli In/Si/GS/Ag yapı üzerinde bulunan gözeneklerde bakteri hücreleri birikmesi üzerine etkisi incelenmiştir. Elektrik alanın uygulama süresi 0,5 ile 3 saat arasında değişmiştir. In/Si/GS/Ag yapılar 4×10^7 cfu.mL⁻¹ *E. coli* bakteri konsantrasyonlu sıvı içerisine daldırılarak sabit 12 kV/cm ileri yönde elektrik alana maruz bırakılmıştır. Uygulanan elektrik alan süresinin artmasıyla empedans değerlerinde azalma meydana geldiği Şekil 4.9 (a)' da görülmektedir. Şekil 4.9 (b)' de 4×10^4 Hz sabit frekans değerindeki uygulanan elektrik alan süresine göre empedans değerleri belirlenmiş olup, sürenin artmasıyla empedans değerlerinde azalma olduğu görülmektedir. Bu sonuç bize ileri yönde uygulanan elektrik alan süresinin gözeneklere daha çok bakteri yönlendirebildiğini ve direncin azalarak, iletkenliğinin arttığını göstermektedir.



a.

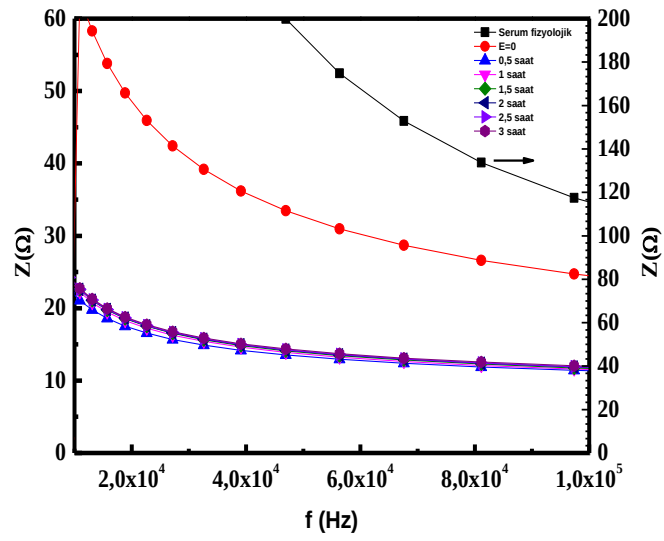


b.

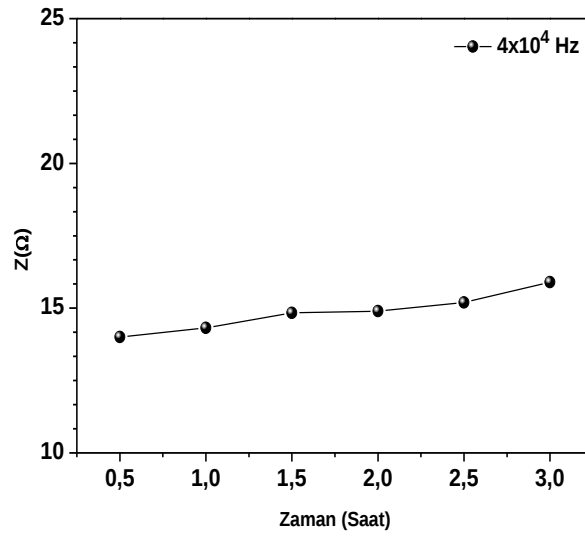
Şekil 4. 9 (a) In/Si/GS/Ag yapıların 4×10^7 cfu mL⁻¹ *E. coli* konsantrasyonunda farklı zamanlarda uygulanan ileri yönde 12 kV/cm elektrik alan değeri altında frekansa bağlı empedans grafiği (b) 4×10^4 Hz sabit frekans değeriinde zamana bağlı empedans grafiği

4.2.6 Canlı *E. coli* Bakterisinin Ters Yönde Sabit 12 kV/cm Elektrik Alan Değeri Altında Farklı Zamanlardaki Frekansa Bağlı Empedans Değişimi

Negatif yüklü *E. coli* bakterilerini gözeneklerden uzaklaştırabilmek için GS tabanlı makro yapıyı 0,5-3 saat arasında ters yönde 12 kV/cm elektrik alana maruz bırakarak elektrik alan süresinin empedans üzerindeki etkisi incelenmiştir. Elektrik alanın artan uygulama süresi ile tüm frekans değerleri için empedans değerlerinde bir artışın meydana geldiği Şekil 4.10 (a)' dan görülmektedir. Şekil 4.10 (b)' de ise 4×10^4 Hz sabit frekansında elektrik alanın uygulama süresinin empedans üzerindeki etkisi incelenmiştir. Bu sonuca göre, ters yönde uygulanan elektrik alan süresinin artmasıyla bakteri hücreleri gözeneklerden uzaklaşmış ve empedans değerleri artmıştır.



a.

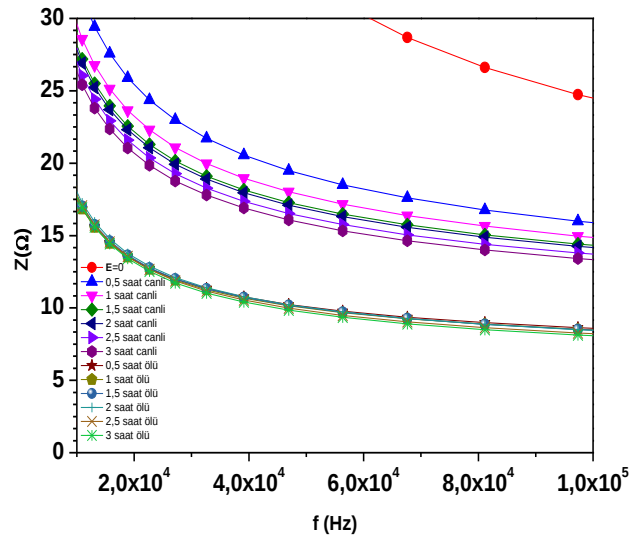


b.

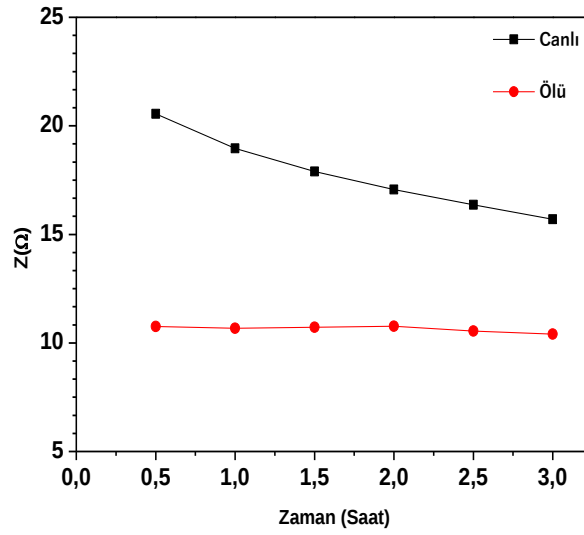
Şekil 4. 10 (a) In/Si/GS/Ag yapıların 4×10^7 cfu mL⁻¹ *E. coli* konsantrasyonunda farklı zamanlarda uygulanan ters yönde 12 kV/cm elektrik alan değeri altında frekansa bağlı empedans grafiği (b) 4×10^4 Hz sabit frekans değeri empedans grafiği

4.2.7 Canlı ve ölü *E. coli* Bakterisinin İleri Yönde ve Ters Yönde Sabit 12 kV/cm Elektrik Alan Değeri Altında Farklı Zamanlardaki Frekansa Bağlı Empedans Değişimi

Makro gözenekli In/Si/GS/Ag yapı, 4×10^7 cfu.mL⁻¹ canlı ve ölü *E. coli* konsantrasyonlu sıvılar içerisine daldırılarak sabit elektrik alan değeri altında 0,5 ile 3 saat aralığında ileri yönde ve ters yönde 12 kV/cm elektrik alana maruz bırakılmıştır. Şekil 4.11 (a)' da görüldüğü üzere canlı ve ölü bakteri hücrelerinin frekansa bağlı empedans değerlerindeki farklılıklar gözlemlenmiştir. Bakterilere uygulanan ısıtma işlemi (otoklavlama) bakteri hücre duvarı zarar görmüştür. Daha önce bakteri hücre duvarı içinde kalan iyonlar sıvı içine dağılarak ortamdaki serbest iyon konsantrasyonunu arttırmaktadır. Bu nedenle ölü bakterili sıvının empedansı canlı bakteriye göre daha düşüktür. Ancak ölü bakteri hücrelerine ait empedans sonuçlarında zamanla kayda değer bir değişim olmamıştır. Elektrik alanın empedansa zamanla etkisi canlı bakteri hücreleri ile kıyaslandığında neredeyse yok denilebilecek kadar azdır. Canlı bakteri deneylerinde empedans değerleri değişirken, ölü bakteri deneylerinde empedans değerleri neredeyse sabit kalmıştır. Bu çalışmanın, bir sıvıda yaşayan ve ölü bakteri hücrelerini belirlenmesinde önemli bir yöntem olabileceği tespit edilmiştir. Şekil 4.11 (b)' de ise 4×10^4 Hz sabit frekansında canlı ve ölü bakteri hücrelerinin zamanla değişen empedans değerleri verilmiştir. Şekil 4.12 (a) ve (b)' de ise ters yönde uygulanan elektrik alanın empedans üzerindeki değişim grafikleri verilmiştir. Ters yönde uygulanan elektrik alan değerlerinin artmasıyla bakteri hücreleri gözeneklerden uzaklaşarak empedans değerlerinde bir artmaya neden olmuştur.

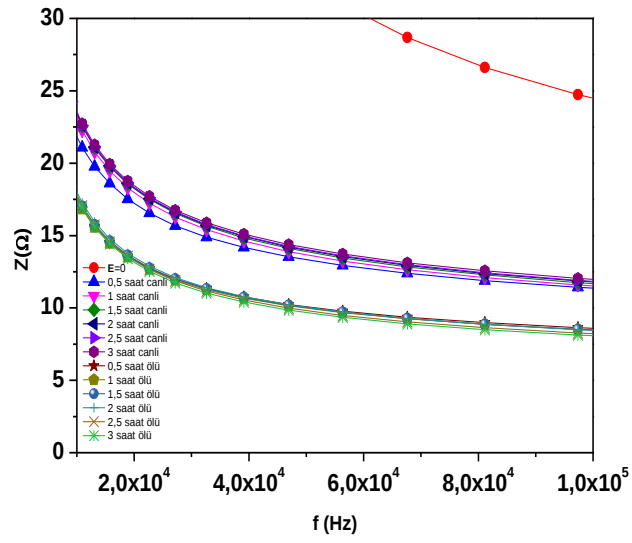


a.

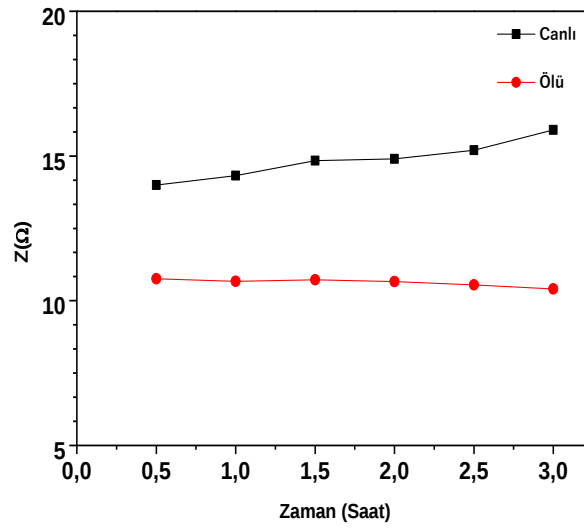


b.

Şekil 4. 11 (a) In/Si/GS/Ag yapıların canlı ve ölü 4×10^7 cfu mL⁻¹ *E. coli* konsantrasyonunda farklı zamanlarda uygulanan ileri yönde 12 kV/cm elektrik alan değeri altında frekansa bağlı empedans grafiği (b) 4×10^4 Hz sabit frekans değerinde zamanla değişen empedans grafiği



a.



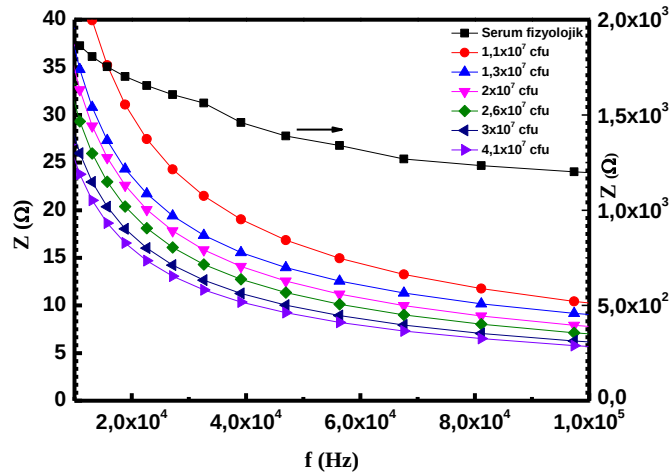
b.

Şekil 4. 12 (a) In/Si/GS/Ag yapıların canlı ve ölü 4×10^7 cfu mL⁻¹ *E. coli* konsantrasyonunda farklı zamanlarda uygulanan ters yönde 12 kV/cm elektrik alan değeri altında frekansa bağlı empedans grafiği (b) 4×10^4 Hz sabit frekans değerinde zamanla değişen empedans grafiği

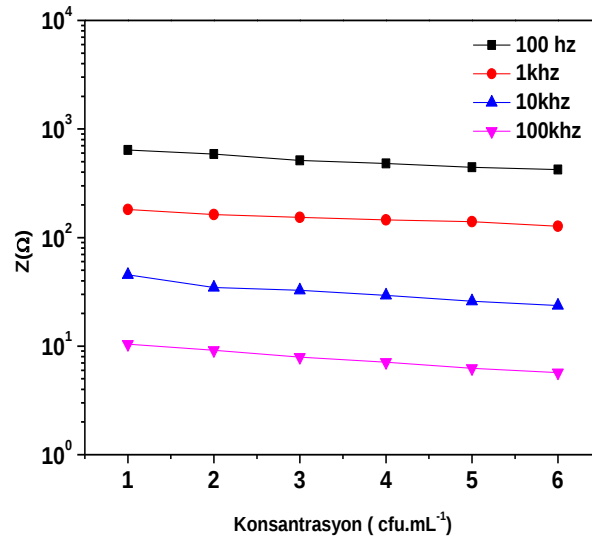
4.3 Makro Gözenekli In/Si/GS/Ag Yapılarda *E. faecalis* Bakteri Deneyleri

4.3.1 *E. faecalis*' in Farklı Konsantrasyonlu Bakteri İçeren Sıvılarındaki Frekansa Bağlı Empedans Ölçümleri

Gözenekli silisyum tabanlı makro gözenekli In/Si/GS/Ag yapılar, çeşitli *E. faecalis* bakteri konsantrasyonu içeren sıvılar içine daldırılarak elektrik alanının uygulanmadığı ortamda bakteri konsantrasyonunun empedans spektrum üzerindeki etkisi incelenmiştir. Şekil 4.13 (a)' da *E. faecalis* bakterisi içermeyen sıvıda, tüm frekanslar için maksimum empedansı gösterirken, *E. faecalis* bakteri ilavesi yapılan sıvılara daldırıldığında empedans değerlerinde bir azalma görülmüştür. Bakteri konsantrasyonu sırasıyla $1,1 \times 10^7 \text{cfu.mL}^{-1}$, $1,3 \times 10^7 \text{cfu.mL}^{-1}$, $2 \times 10^7 \text{cfu.mL}^{-1}$, $2,6 \times 10^7 \text{cfu.mL}^{-1}$, $3 \times 10^7 \text{cfu.mL}^{-1}$ ve $4,1 \times 10^7 \text{cfu.mL}^{-1}$ olarak artarak değiştiğinde, empedans değerlerinde bir azalma meydana gelmiştir. In/Si/GS/Ag yapı bakterili serum fizyolojik ortamını, bakterisiz serum fizyolojik ortamından ayırt edebilmesinin yanı sıra, bakteri konsantrasyonlarını da birbirinden ayırt edebildiği gözlemlenmiştir. Şekil 4.13 (b)' de ise çeşitli *E. faecalis* konsantrasyonlarının farklı frekanslardaki empedans değişimi verilmektedir. Seçilen tüm frekans değerleri için bakteri konsantrasyonunun artmasıyla empedans değerlerinde bir azalma görülmektedir.



a.

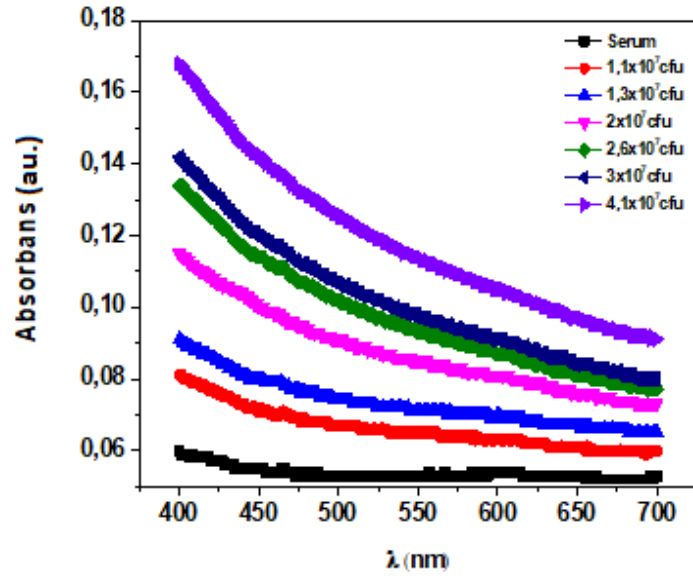


b.

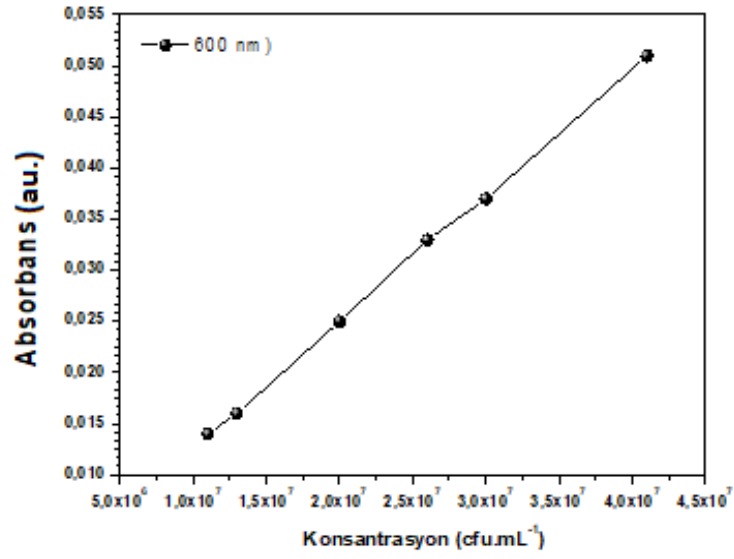
Şekil 4. 13 (a) In/Si/GS/Ag yapıların *E. faecalis*' nin farklı konsantrasyonlu bakteri içeren sıvılarındaki frekansa bağlı empedans grafiği (b) 100 Hz, 1 kHz, 10 kHz, 100 kHz frekanslarındaki empedans değişimleri

4.3.2 Farklı Konsantrasyonlara Sahip *E. faecalis* Süspansiyonların UV-VIS Absorpsiyon Spektrumları

UV-VIS spektrofotometresi ile bakterisiz serum fizyolojik ve farklı konsantrasyonlarda bakteri içeren serum fizyolojik ortamında UV-VIS absorpsiyon spektrumları Şekil 4.14 (a)' da incelenmiştir. UV bakteri konsantrasyonlarında gözlemlenen değişim bakteri konsantrasyonlarındaki farklılığı desteklemektedir. *E. faecalis* konsantrasyon hesabında kullanılan 600 nm dalga boyundaki absorbans değerleri değişimi Şekil 4.14 (b)' de görülmektedir.



a.

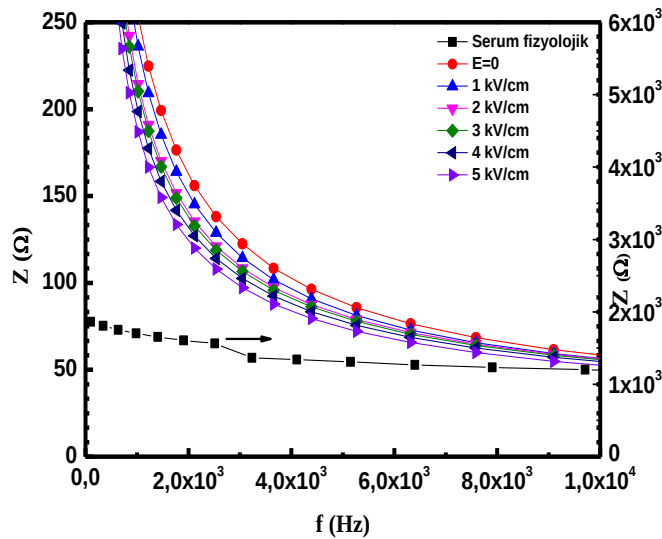


b.

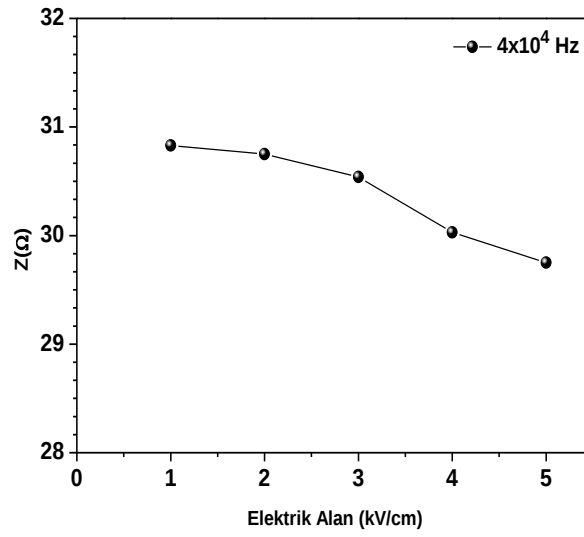
Şekil 4. 14 Çeşitli bakteri konsantrasyonlarına sahip süspansiyonların UV-VIS absorpsiyon spektrumları (b) farklı konsantrasyonlardaki *E.faecalis* süspansiyonlarının 600 nm dalga boyundaki absorbans değerleri

4.3.3 Sabit Konsantrasyonlu *E. faecalis* Bakterisi İçeren Sıvılara Dışarıdan Uygulanan İleri Yön Elektrik Alan Etkisi ile Empedans Değişimi

E. coli bakterisi için yapılan tüm deneyler makro gözenekli In/Si/GS/Ag yapısı kullanılarak *E. faecalis* bakterisi için tekrar edilmiştir. İlk deneyler, *E. coli* için tanımlanan değerler (elektrik alan değerleri 2-10 kV/cm ve farklı zamanlarda uygulanan ileri ve ters yönde sabit 12 kV/cm elektrik alan) için yapılmıştır. Ancak empedans, iletkenlik ve kapasitans değerlerinde belirgin bir fark gözlenememiştir. *E. coli* daha büyük ve çubuk şekilli, *E. faecalis* bakterisi ise daha küçük ve nispeten daha yuvarlak şekillidir. Bu nedenle belirtilen elektrik alan değerlerinde gözeneklerin içine daha hızlı yerleştiği düşünüldüğünden uygulanan elektrik alan değerlerinin şiddetleri azaltılarak (1-5 kV/cm aralığında elektrik alan ve farklı zamanlarda uygulanan sabit ileri ve ters yönde 7kV/cm elektrik alan) deneylere devam edilmiştir. Şekil 4.15 (a)' dan görüldüğü üzere 2×10^7 cfu.mL⁻¹ sabit bakteri konsantrasyonunda uygulanan elektrik alan değerleri altında tüm frekans değerlerinde empedans değerlerinde azalma meydana gelmiştir. Şekil 4. 15 (b)' de ise 4×10^4 Hz sabit frekansında elektrik alan değerinin artmasıyla empedans değerlerinde bir azalma olduğu görülmektedir. İleri yöndeki elektrik alanının artmasıyla bakteriler gözeneklere doğru çekilerek iletkenliğin artmasına neden olmuşlardır.



a.

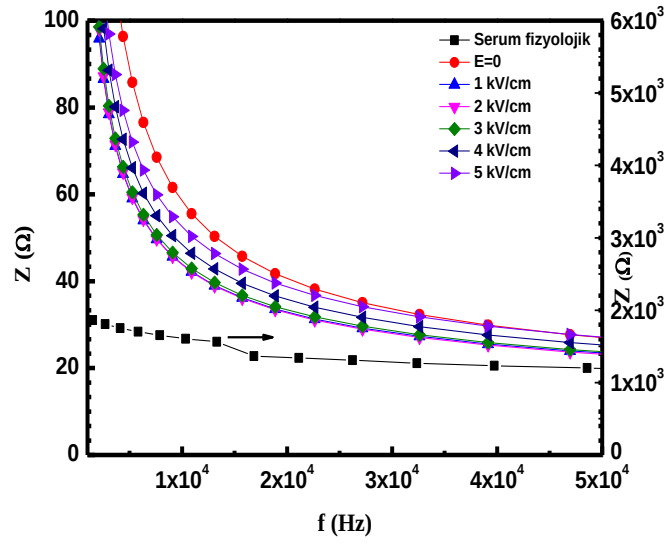


b.

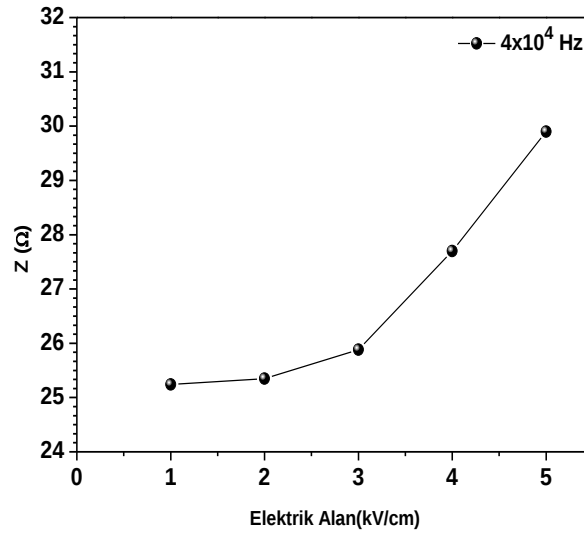
Şekil 4. 15 (a) In/Si/GS/Ag yapıların 2×10^7 cfu.mL⁻¹ cfu. *E. faecalis* konsantrasyonunda sırasıyla 0kV/cm, 1kV/cm, 2kV/cm, 3kV/cm, 4kV/cm ve 5kV/cm ileri yönde uygulanan elektrik alan değerlerinde (a) frekansa bağlı empedans değişimi (b) 4×10^4 Hz sabit frekansı için empedans değişimi

4.3.4 Sabit Konsantrasyonlu *E. faecalis* Bakterisi İçeren Sıvılara Dışarıdan Uygulanan Ters Yön Elektrik Alan Etkisi ile Empedans Değişimi

Şekil 4.16 (a)' dan da görüleceği üzere, ters yönde uygulanan elektrik alanının etkisiyle empedans değerlerinde bir artma meydana gelmiştir. Şekil 4.16 (b)' de ise, 4×10^4 Hz sabit frekans değerinde elektrik alanının artmasıyla empedans değerlerinde bir artış gözlemlenmiştir. Bu sonuca göre, *E. faecalis* bakterisinin gözeneklere birikmesinin uygulanan elektrik alanının tersine çevrilebilir olmasıyla önlenebileceği gösterilmektedir.



a.

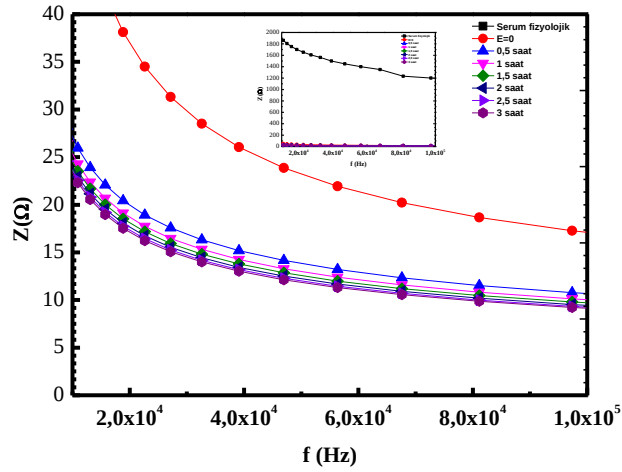


b.

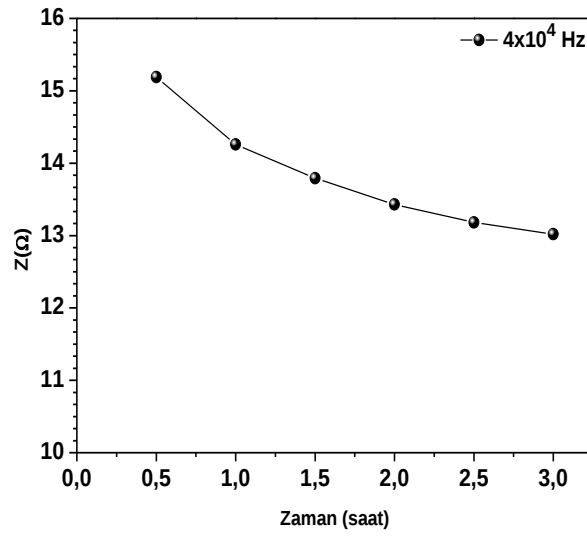
Şekil 4. 16 (a) In/Si/GS/Ag yapıların 2×10^7 cfu.mL⁻¹cfu. mL⁻¹ *E. faecalis* konsantrasyonunda sırasıyla 0kV/cm, 1kV/cm, 2kV/cm, 3kV/cm, 4kV/cm ve 5kV/cm ters yönde uygulanan elektrik alan değerlerinde (a) frekansa bağlı empedans değişimi (b) 4×10^4 Hz sabit frekansı için empedans değişimi

4.3.5 Canlı *E. faecalis* Bakterisinin İleri Yönde Sabit 7 kV/cm Elektrik Alan Değeri Altında Zamana Bağlı Empedans Değişimi

Makro gözenekli In/Si/GS/Ag yapılar 2×10^7 cfu.mL⁻¹ *E. faecalis* bakteri konsantrasyonlu sıvı içerisine daldırılarak sabit 7 kV/cm ileri yönde elektrik alana maruz bırakılmıştır. Uygulanan elektrik alan süresinin artmasıyla empedans değerlerinde azalma meydana geldiği Şekil 4.17 (a)' da görülmektedir. Şekil 4.17 (b)' de 4×10^4 Hz sabit frekans değerindeki uygulanan elektrik alan süresine göre empedans değerleri belirlenmiş olup, sürenin artmasıyla empedans değerlerinde azalma olduğu görülmektedir. İleri yönde uygulanan elektrik alan süresinin artması, bakterilerin gözeneklere daha çok yönlendirilebildiğini ve empedansın azalmasıyla, iletkenliğin arttığını göstermektedir.



a.

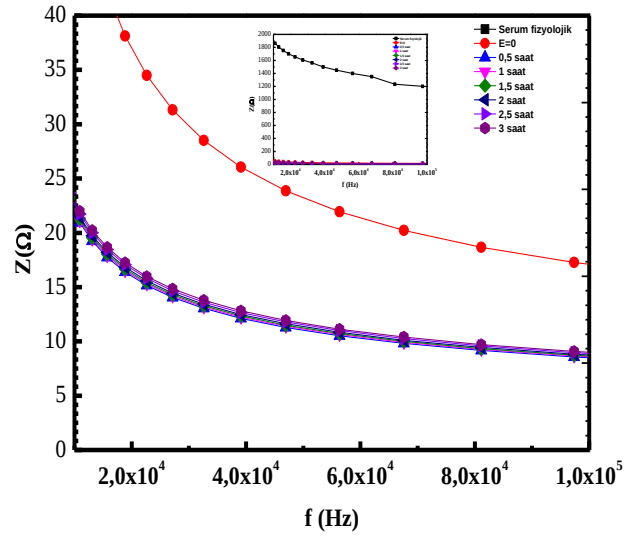


b.

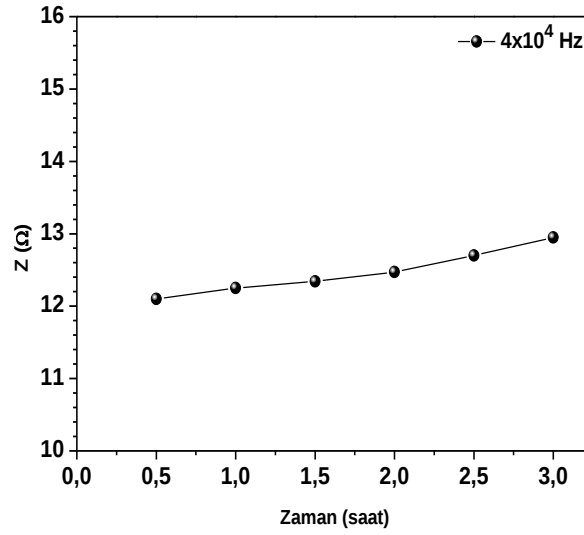
Şekil 4. 17 (a) In/Si/GS/Ag yapıların 2×10^7 cfu.mL⁻¹ *E. faecalis* konsantrasyonunda farklı zamanlarda uygulanan ileri yönde 7 kV/cm elektrik alan değeri altında frekansa bağlı empedans grafiği (b) 4×10^4 Hz sabit frekans değerinde empedans grafiği

4.3.6 Canlı *E. faecalis* Bakterisinin Ters Yönde 7 kV/cm Elektrik Alan Değeri Altında Zamana Bağlı Empedans Değişimi

Aynı deneyler 2×10^7 cfu.mL⁻¹ *E. faecalis* bakteri konsantrasyonu içerisindeki sıvı içerisine daldırılan GS tabanlı makro yapı için sabit 7 kV/cm ters yönde elektrik alana maruz bırakılarak tekrarlanmıştır. Şekil 4.18 (a) ve (b)' den de görüldüğü gibi ters yönde uygulanan elektrik alan süresinin artmasıyla empedans değerlerinde bir artış olmuştur. Bunun nedeni, bakteri hücrelerinin ters yönde uygulanan elektrik alan süresinin artmasıyla gözeneklerden uzaklaşmış olmasıdır. Gözeneklerden uzaklaşan bakteriler nedeniyle empedans değerlerinde meydana gelen artış bize iletkenliğin azaldığını göstermektedir.



a.

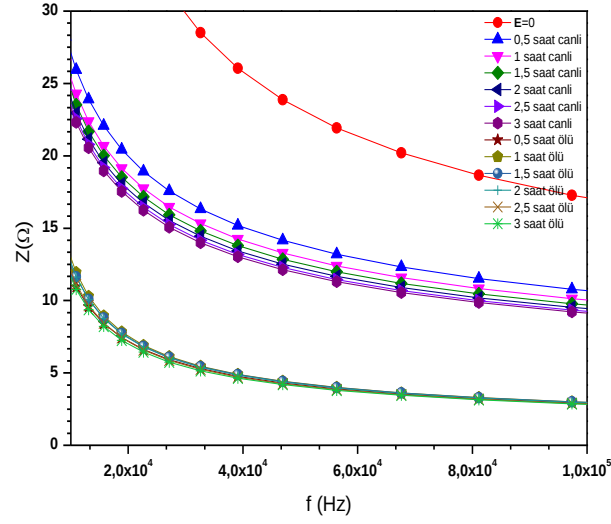


b.

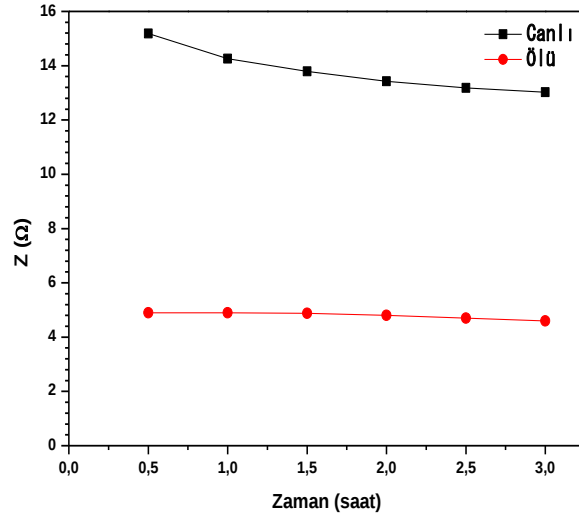
Şekil 4. 18 In/Si/GS/Ag yapıların 2×10^7 cfu.mL⁻¹ *E. faecalis* konsantrasyonunda farklı zamanlarda uygulanan ters yönde 7 kV/cm elektrik alan değeri altında frekansa bağlı empedans grafiği (b) 4×10^4 Hz sabit frekans değerinde empedans grafiği

4.3.7 Canlı ve ölü *E. faecalis* bakterisinin ileri yönde ve ters yönde 7 kV/cm elektrik alan değeri altında zamana bağlı empedans değişimi

E. coli bakterisi için yapılan ölü deneyleri *E. faecalis* bakterisi için de tekrar edilmiştir. 2×10^7 cfu.mL⁻¹ ölü ve canlı bakteri konsantrasyonlarında GS tabanlı makro yapıların ileri ve ters yönde sabit 7 kV/cm elektrik alana maruz bırakılması sonucu empedans değerlerinde değişimler görülmektedir. Ölü bakterili sıvının empedansı canlı bakteriye göre daha düşüktür. Şekil 4.19 ve 4.20’ de ölü ve canlı *E. faecalis* sabit konsantrasyonlu sıvılardaki empedans değerleri verilmiştir.

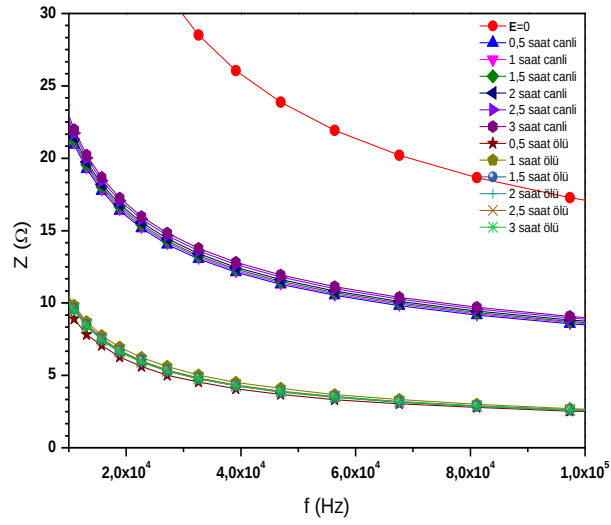


a.

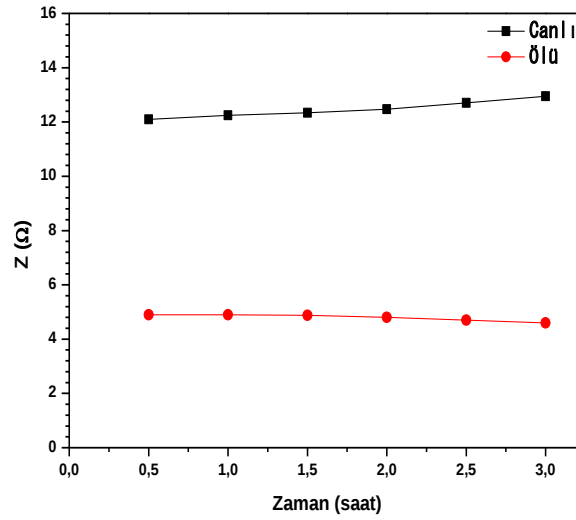


b.

Şekil 4. 19 (a) In/Si/GS/Ag yapıların canlı ve ölü 2×10^7 cfu.mL⁻¹ *E. faecalis* konsantrasyonunda farklı zamanlarda uygulanan ileri yönde 7 kV/cm elektrik alan değeri altında frekansa bağlı empedans grafiği (b) 4×10^4 Hz sabit frekans değerinde empedans grafiği



a.



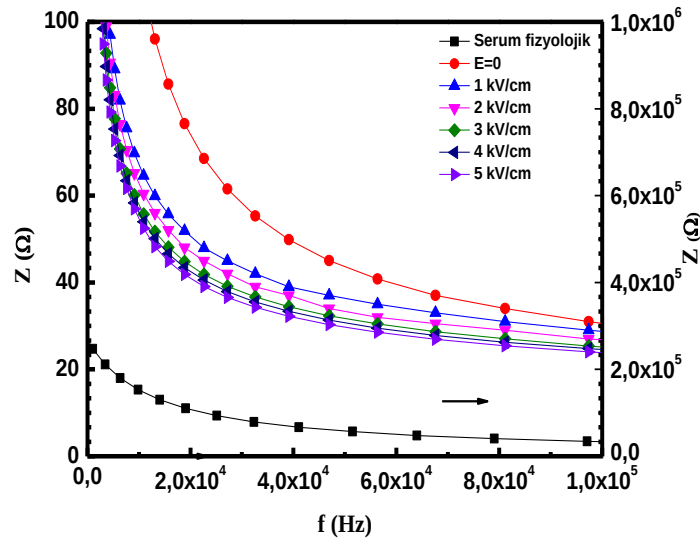
b.

Şekil 4. 20 (a) In/Si/GS/Ag yapıların canlı ve ölü 2×10^7 cfu.mL⁻¹ *E. faecalis* konsantrasyonunda farklı zamanlarda uygulanan ters yönde 7 kV/cm elektrik alan değeri altında frekansa bağlı empedans grafiği (b) 4×10^4 Hz sabit frekans değerinde empedans grafiği

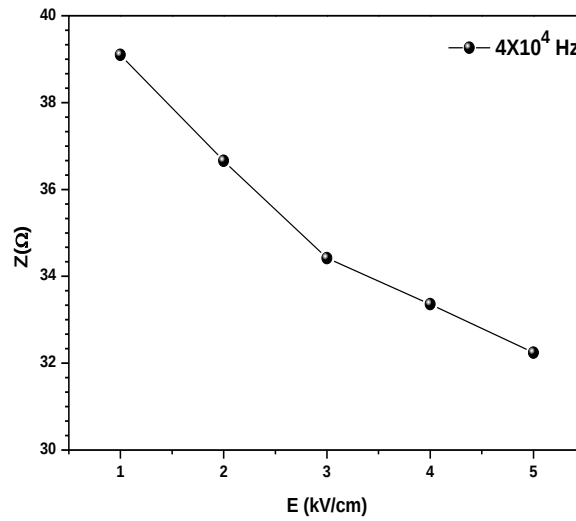
4.3.8 Sabit Konsantrasyonlu *E. coli* bakterisi içeren sıvılara dışarıdan uygulanan elektrik alan etkisi ile frekansa bağlı empedans değişimi

E. coli bakterisi için makro gözenekli silisyum kullanılarak yapılan deneylerde uygulanan elektrik alan şiddetleri (elektrik alan değerleri 2-10 kV/cm ve farklı zamanlarda uygulanan ileri ve ters yönde sabit 12 kV/cm elektrik alan) ile *E. faecalis* bakterisi için deneyler yapılmıştır. Ancak deney sonuçlarında belirgin bir fark gözlenmemiştir. *E. coli*'nin daha büyük ve çubuk şekilli, *E. faecalis* bakterisinin ise daha küçük ve nispeten daha yuvarlak şekilli olması nedeniyle büyük olan elektrik alan değerlerinde bakterilerin gözeneklerin içine daha hızlı yerleştiği düşünülmüştür. Uygulanan elektrik alan değerleri (1-5 kV/cm aralığında elektrik alan ve farklı zamanlarda uygulanan sabit ileri ve ters yönde 7kV/cm elektrik alan) azaltılarak deneyler tekrar edilmiştir. *E. faecalis* sonuçlarına uygun elektrik alan değerleri için *E. coli* bakteri deneyleri tekrar edilmiştir. Şekil 4.21 (a)'da ileri yönde uygulanan 0-5 kV/cm aralığındaki elektrik alan değerleri için tüm frekans değerlerinde ve Şekil 4.21 (b)'de ise 4×10^4 Hz sabit frekans değerinde empedansta azalma meydana gelmiştir. Düşük frekans bölgesindeki

empedans değerlerinde daha keskin bir azalma meydana gelirken, yüksek frekans bölgesinde neredeyse empedansın etkisi görülmemektedir.



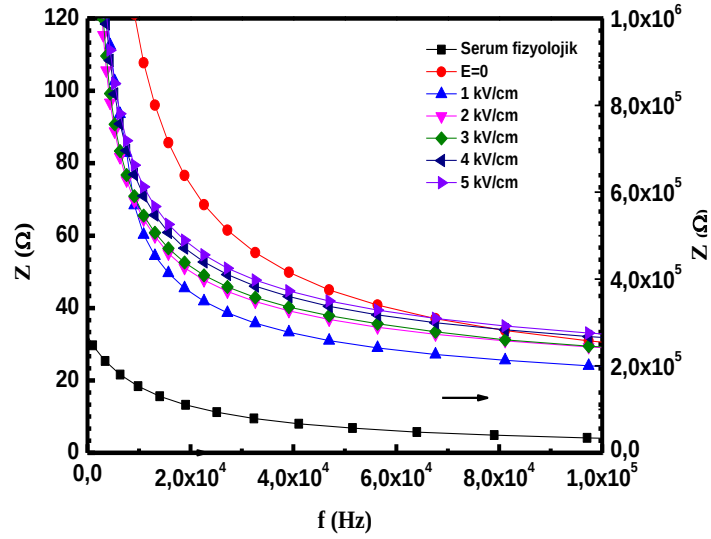
a.



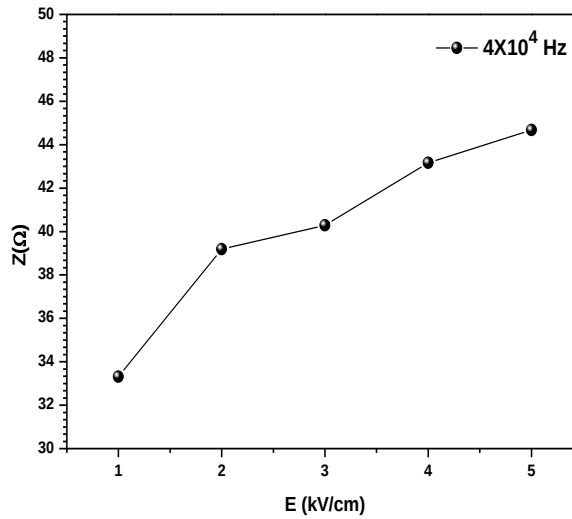
b.

Şekil 4. 21 (a) In/Si/GS/Ag yapıların $1,5 \times 10^7$ cfu.mL⁻¹ sabit *E. coli* konsantrasyonunda sırasıyla 0kV/cm, 1kV/cm, 2kV/cm, 3kV/cm, 4kV/cm ve 5kV/cm ileri yönde uygulanan elektrik alan değerlerinde (a) frekansa bağlı empedans değişimi (b) 4×10^4 Hz sabit frekansı için empedans değişimi

Şekil 4.22 (a)' da ters yönde uygulanan 0-5 kV/cm aralığındaki elektrik alan değerleri için tüm frekans değerlerinde ve Şekil 4.22 (b)' de ise 4×10^4 Hz sabit frekans değerinde empedansta artış meydana gelmiştir.



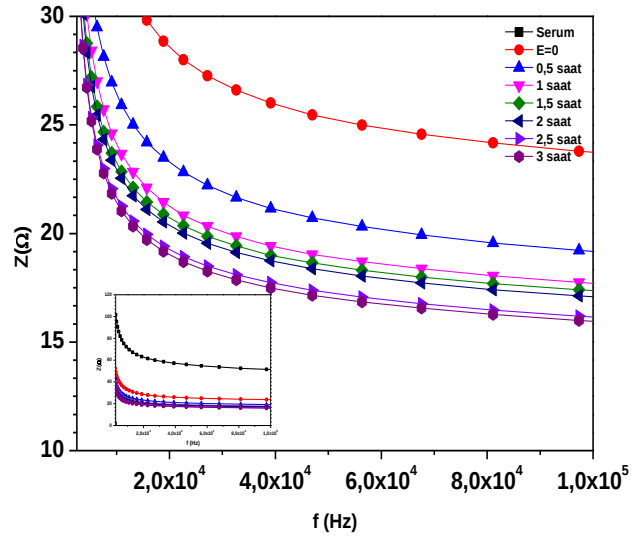
a.



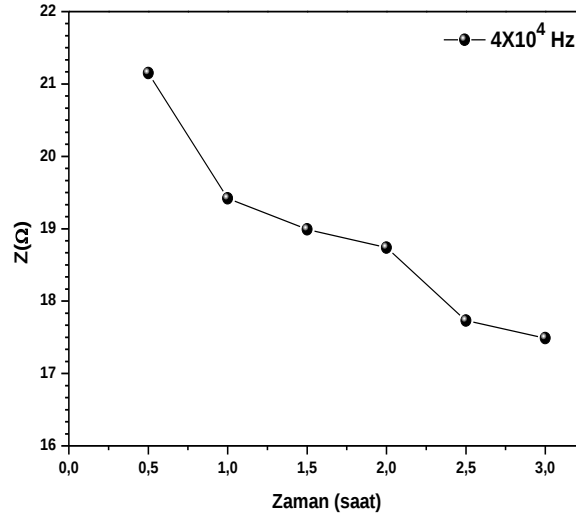
b.

Şekil 4. 22 (a) In/Si/GS/Ag yapıların $1,5 \times 10^7$ cfu.mL⁻¹ sabit *E. coli* konsantrasyonunda sırasıyla 0kV/cm, 1kV/cm, 2kV/cm, 3kV/cm, 4kV/cm ve 5kV/cm ters yönde uygulanan elektrik alan değerlerinde (a) frekansa bağlı empedans değişimi (b) 4×10^4 Hz sabit frekansı için empedans değişimi

Sabit 7 kV/cm elektrik alan şiddetinde ileri yönde uygulanan elektrik alan süresinin artmasıyla empedans değerlerinde azalma meydana geldiği Şekil 4.23 (a)' da görülmektedir. Şekil 4.23 (b)' de 4×10^4 Hz sabit frekans değerindeki uygulanan elektrik alan süresine göre empedans değerleri belirlenmiş olup, sürenin artmasıyla empedans değerlerinde azalma olduğu görülmektedir.



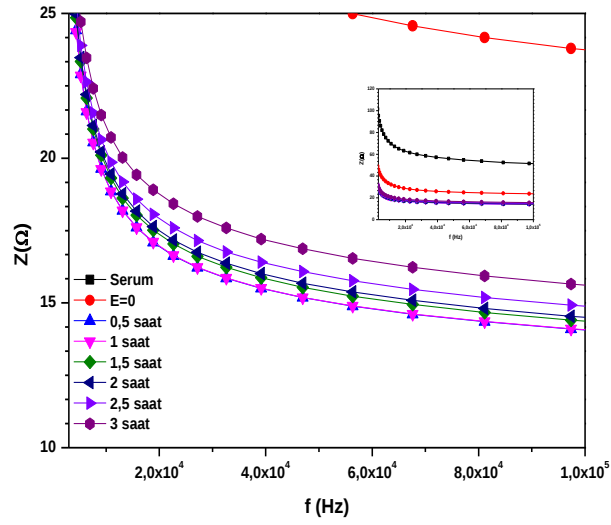
a.



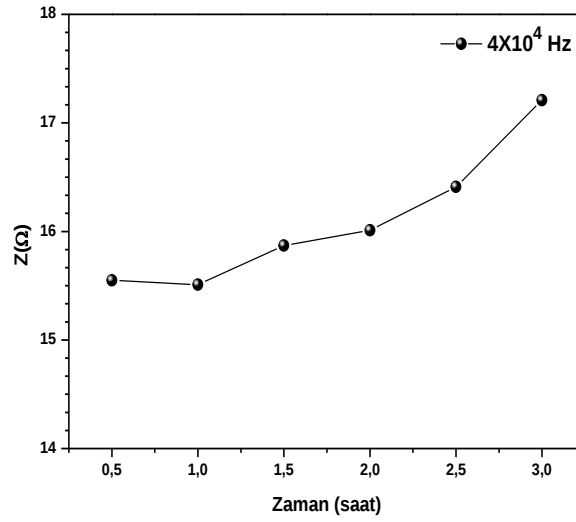
b.

Şekil 4. 23 In/Si/GS/Ag yapıların $1,5 \times 10^7$ cfu.mL⁻¹ sabit *E. coli* konsantrasyonunda farklı zamanlarad uygulanan ileri yönde 7 kV/cm elektrik alan değeri altında frekansa bağlı empedans grafiği (b) 4×10^4 Hz sabit frekans değeriinde empedans grafiği

Sabit 7 kV/cm elektrik alan şiddetinde ters yönde uygulanan elektrik alan süresinin artmasıyla empedans değerlerinde artış meydana geldiği Şekil 4.24 (a)' da görülmektedir. Şekil 4.24 (b)' de 4×10^4 Hz sabit frekans değeriindeki uygulanan elektrik alan süresine göre empedans değerleri belirlenmiş olup, sürenin artmasıyla empedans değerlerinde artış olduğu görülmektedir.



a.

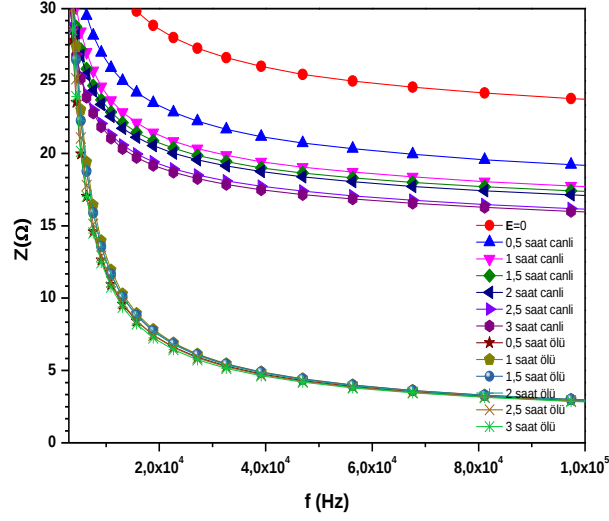


b.

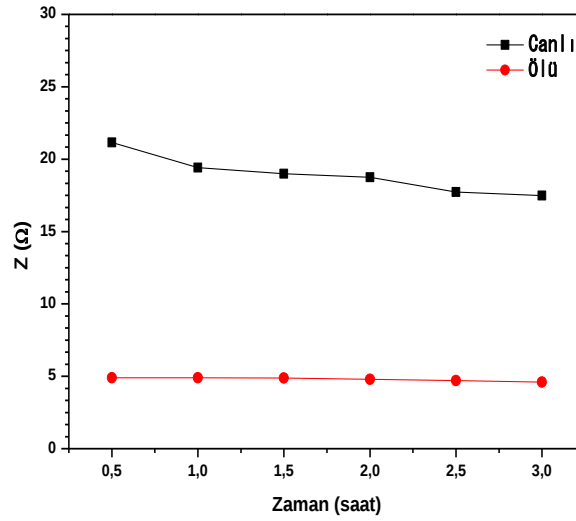
Şekil 4. 24 (a) In/Si/GS/Ag yapıların $1,5 \times 10^7$ cfu.mL⁻¹ *E. coli* konsantrasyonunda farklı zamanlarda ters yönde 7 kV/cm elektrik alan değeri altında frekansa bağlı empedans grafiği (b) 4×10^4 Hz sabit frekans değerinde empedans grafiği

GS tabanlı makro gözenekli yapılar için $1,5 \times 10^7$ cfu *E.coli* sabit bakteri konsantrasyonunda Şekil 4.25 (a)' da görüldüğü üzere canlı ve ölü bakteri hücrelerinin frekansa bağlı empedans değerlerindeki farklılıklar gözlemlenmiştir. Şekil 4.25 (b)' de ise 4×10^4 Hz sabit frekansında canlı ve ölü bakteri hücrelerinin zamanla değişen

empedans değeri verilmiştir. Şekil 4.26 (a) ve (b)' de ise ters yönde uygulanan 7kV/cm elektrik alanının empedans üzerindeki değişim grafikleri verilmiştir.

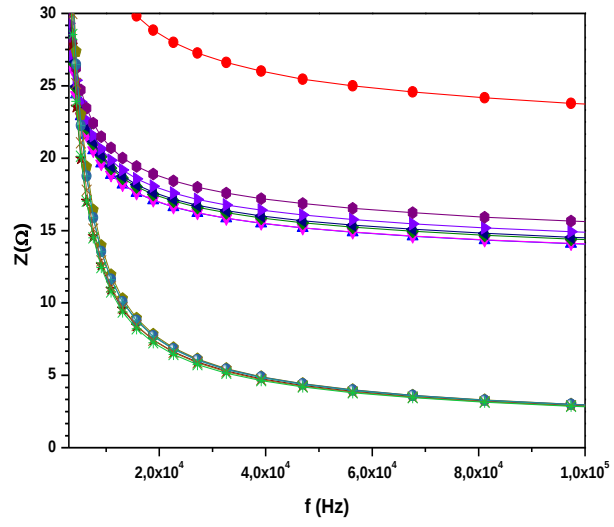


a.

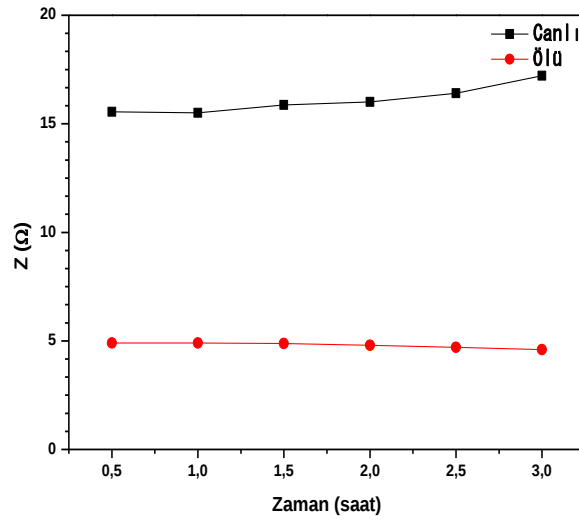


b.

Şekil 4. 25 (a) In/Si/GS/Ag yapıların canlı ve ölü $1,5 \times 10^7$ cfu mL⁻¹ *E. coli* konsantrasyonundafarklı zamanlarda ileri yönde 7 kV/cm elektrik alan değeri altında frekansa bağlı empedans grafiği (b) 4×10^4 Hz sabit frekans değeriinde empedans grafiği



a.

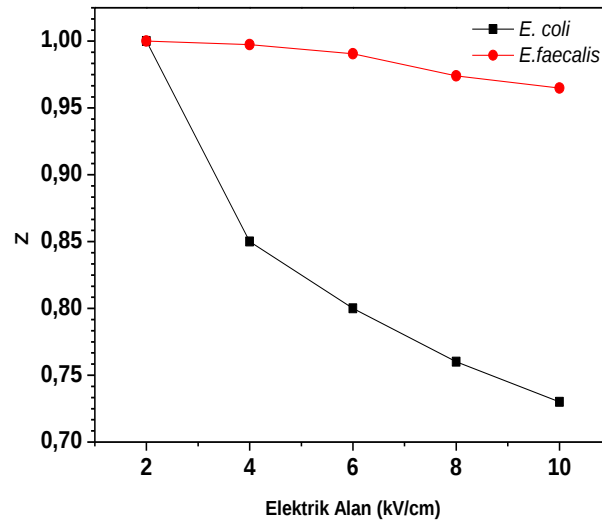


b.

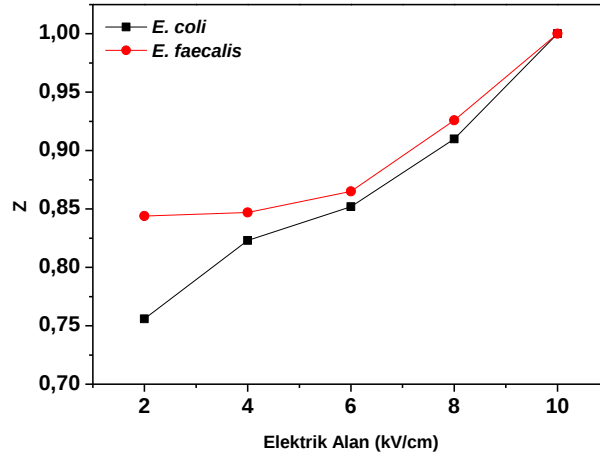
Şekil 4. 26 (a) In/Si/GS/Ag yapıların canlı ve ölü $1,5 \times 10^7$ cfu mL⁻¹ *E. coli* konsantrasyonundafarklı zamanlarda ters yönde 7 kV/cm elektrik alan değeri altında frekansa bağlı empedans grafiği (b) 4×10^4 Hz sabit frekans değeriinde empedans grafiği

4.3.9 *E. coli* ve *E. faecalis* Bakteri Deneylerinin Karşılaştırılması

Şekil 4.27 (a) ve (b)' de ileri ve ters yönde uygulanan elektrik alanın etkisi ile bakterilerin normalize edilmiş grafikleri verilmektedir. *E. coli* çubuk şekilli 2-6 μm boyunda iken *E. faecalis* 1-2 μm boyunda ve şekli daha yuvarlaktır. Şekil 4.27 (a) grafiğinde elektrik alan ile *E. coli* bakterili sıvıdaki GS tabanlı yapının empedans değerlerinde daha keskin bir değişim gözlenir. Çubuk şekilli olması nedeni ile gözeneklere yerleşimi daha yavaş gerçekleştiği düşünülmektedir. *E. faecalis* bakterisinin küçük ve yuvarlak olması nedeniyle gözenekleri daha hızlı doldurduğu için *E. faecalis* bakterili sıvıdaki GS tabanlı yapının empedans değerlerinde daha az değişim gözlenlendiği düşünülmüştür. Şekil 4.27 (b)' de ise ters yönlü elektrik alan uygulanmıştır. Yine *E. coli* içeren bakterili sıvılarda GS tabanlı yapının empedans değerlerindeki değişim bir miktar daha fazladır.



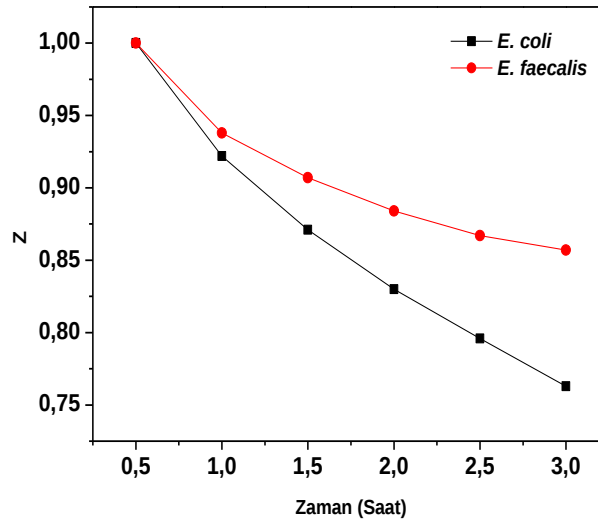
a.



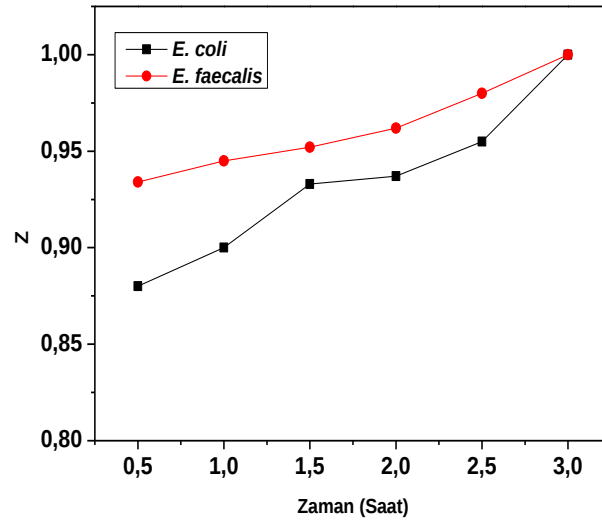
b.

Şekil 4. 27 *E.coli* ve *E. faecalis* (a) ileri yönde (b) ters yönde normalize grafikleri

Şekil 2.28 (a) ve (b)' de ise ileri ve ters yönde uygulanan sabit elektrik alanının etkisi ile uygulanma süresinin bakterilerin normalize edilmiş grafikleri verilmektedir. Sabit elektrik alanda zamanın etkisi de yukarıdaki açıklamaya benzer şekilde yorumlanabilir.



a.



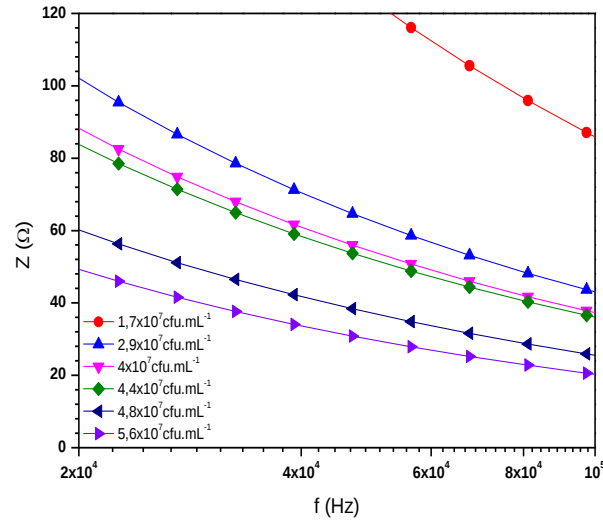
b.

Şekil 4. 28 *E. coli* ve *E. faecalis* farklı zamanlarda (a) ileri yönde (b) ters yönde normalize grafikleri

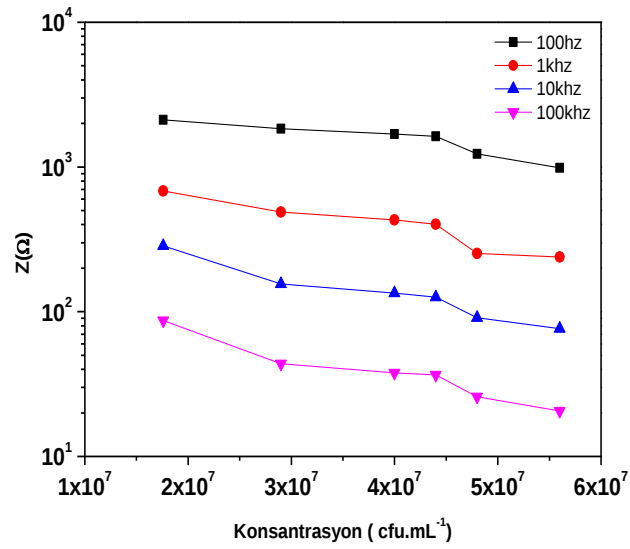
4.4 Küçük Gözenekli Makro In/Si/GS/Ag Yapılarda *E. coli* Bakteri Deneyleri

4.4.1 *E. coli*' nin Farklı Konsantrasyonlu Bakteri İçeren Sıvılarındaki Frekansa Bağlı Empedans Ölçümleri

Elektrokimyasal anodizasyon işleminde HF: dH₂O oranını 1:7 olarak değiştirerek daha küçük gözenekli makro In/Si/GS/Ag yapılar elde edilmiştir. Bu gözenekli yapı için tüm deneyler tekrar edilmiştir. Şekil 4.29 (a)' da sırasıyla $1,7 \times 10^7$ cfu.mL⁻¹, $2,9 \times 10^7$ cfu.mL⁻¹, 4×10^7 cfu.mL⁻¹, $4,4 \times 10^7$ cfu.mL⁻¹, $4,8 \times 10^7$ cfu.mL⁻¹ ve $5,6 \times 10^7$ cfu.mL⁻¹ *E. coli* konsantrasyonlarındaki empedans değişimleri tekrarlanmıştır. Şekil 4.29 (b)' de ise bazı frekans değerlerinde *E. coli*' nin farklı konsantrasyonlu sıvılarındaki empedans değişimleri incelenmiştir.



a.



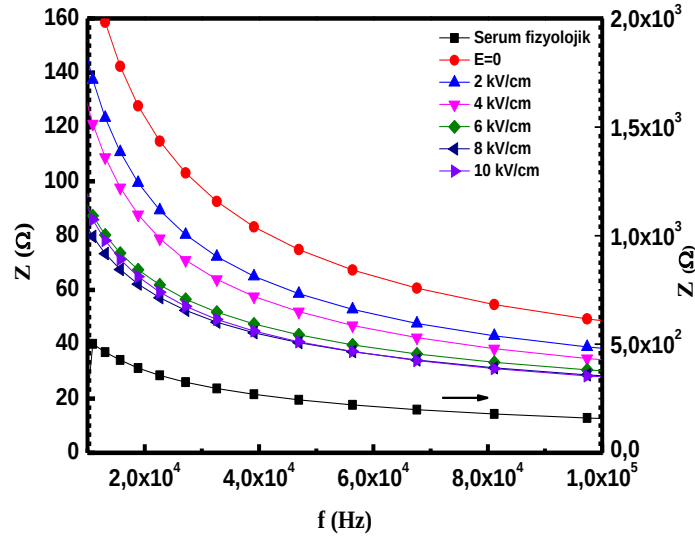
b.

Şekil 4. 29 (a) In/Si/GS/Ag yapıların *E. coli*' nin farklı konsantrasyonlu bakteri içeren sıvılarındaki frekansa bağlı empedans grafiği (b) 100 Hz, 1 kHz, 10 kHz, 100 kHz *E. coli* ' nin farklı konsantrasyonlu sıvılarındaki empedans değişimleri

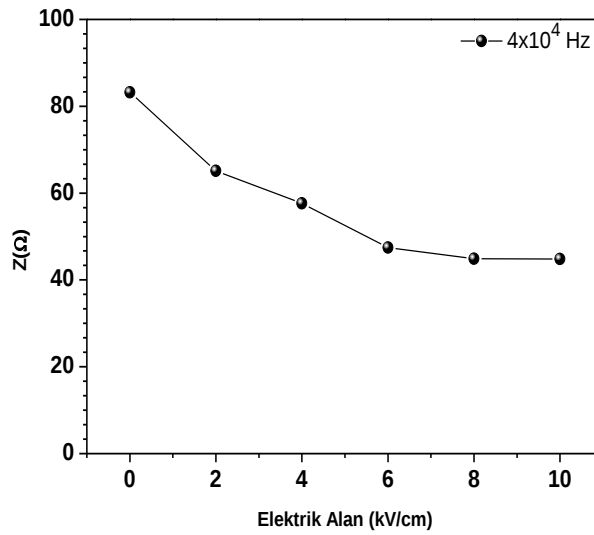
4.4.2 Sabit Konsantrasyonlu *E. Coli* Bakterisi İçeren Sıvılara Dışarıdan Uygulanan İleri Yön Elektrik Alan Etkisi ile Empedans Değişimi

Tüm deneyler küçük gözenekli makro GS tabanlı yapılar için tekrar edilmiştir. Şekil 4.30 (a)' da tüm frekans değerlerinde ileri yönde 0-10 kV/cm aralığında uygulanan elektrik alan değerleri için empedans değerlerinde azalma meydana gelmiştir. Şekil 4.30 (b)' de

ise 4×10^4 Hz sabit frekansında elektrik alan değerlerinin empedans üzerindeki etkisi incelenmiştir. Artan elektrik alan değeri ile birlikte empedans değerlerinde azalma meydana geldiği görülmektedir.



a.

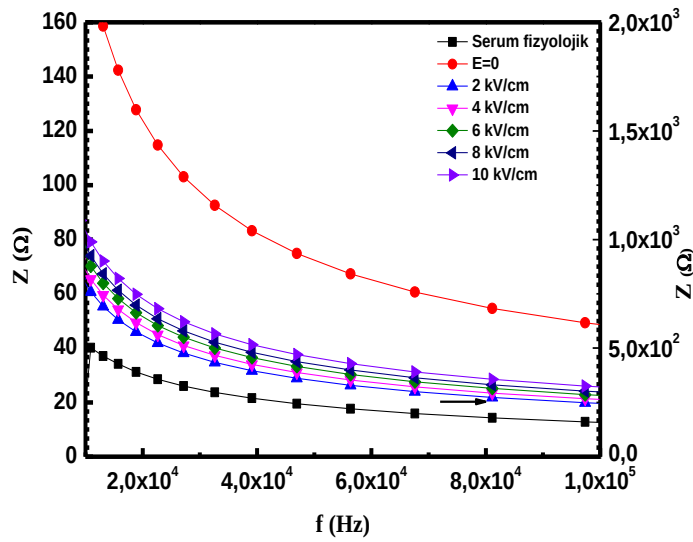


b.

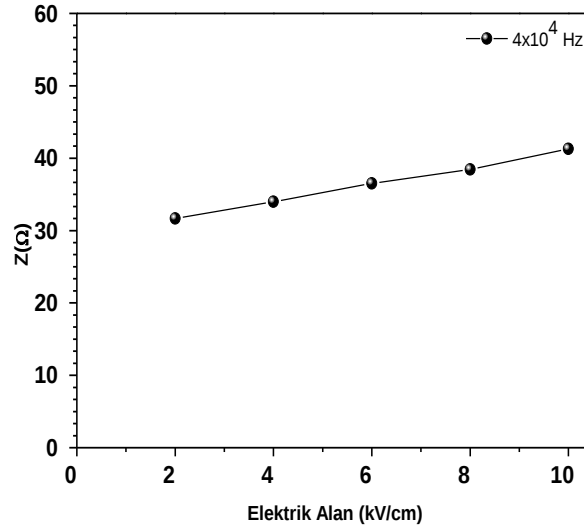
Şekil 4. 30 (a) In/Si/GS/Ag yapıların 4×10^7 cfu. mL^{-1} *E. coli* konsantrasyonunda sırasıyla 0kV/cm, 2kV/cm, 4kV/cm, 6kV/cm, 8kV/cm ve 10kV/cm ileri yönde uygulanan elektrik alan değerlerinde (a) frekansa bağlı empedans değişimi (b) 4×10^4 Hz sabit frekansı için empedans değişimi

4.4.3 Sabit Konsantrasyonlu *E. Coli* Bakterisi İçeren Sıvılara Dışarıdan Uygulanan Ters Yön Elektrik Alan Etkisi ile Empedans Değişimi

Tüm deneyler makro gözenekli GS tabanlı yapılar için tekrar edilmiştir. Şekil 4.31 (a) ters yönde uygulanan elektrik alan değerinin tüm frekans değerlerinde empedans üzerindeki etkisini göstermektedir. Uygulanan elektrik alan değerinin artmasıyla gözeneklerden daha fazla bakteri uzaklaşacağı için empedans değerlerinde bir artma meydana geldiği görülmektedir. Şekil 4.31 (b)' de ise 4×10^4 Hz sabit frekans değerinde ters yönde artan elektrik alan değerlerinin empedans değerlerindeki artmaya neden olduğu görülmektedir.



a.

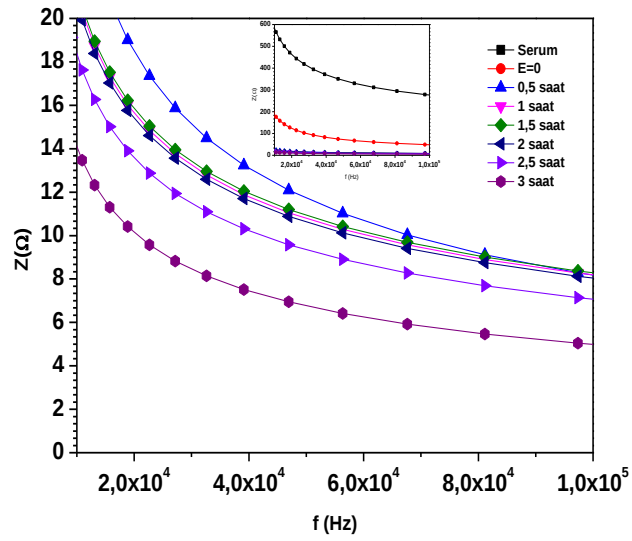


b.

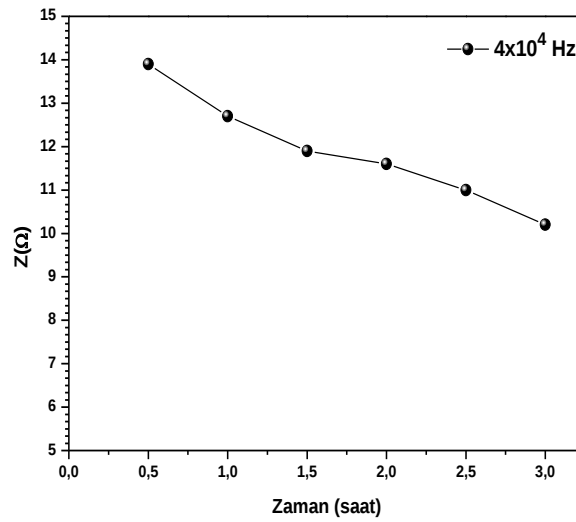
Şekil 4. 31 (a) In/Si/GS/Ag yapıların 4×10^7 cfu. mL⁻¹ *E. coli* konsantrasyonunda sırasıyla 0kV/cm, 2kV/cm, 4kV/cm, 6kV/cm, 8kV/cm ve 10kV/cm ters yönde uygulanan elektrik alan değerlerinde (a) frekansa bağlı empedans değişimi (b) 4×10^4 Hz sabit frekansı için empedans değişimi

4.4.4 Canlı *E. coli* Bakterisinin İleri Yönde 12 kV/cm Elektrik Alan Değeri Altında Zamana Bağlı Empedans Değişimi

Tüm deneyler küçük gözenekli makro GS tabanlı yapılar için tekrar edilmiştir. Şekil 4.32 (a) ve (b)' den görüldüğü üzere ileri yönde uygulanan elektrik alanın uygulanma süresinin frekansa bağlı empedans değişimi verilmiştir. Sabit frekans değerinde uygulanma süresine bağlı empedans değerlerinde zamana arttıkça bir azalma meydana geldiği görülmüştür.



a.



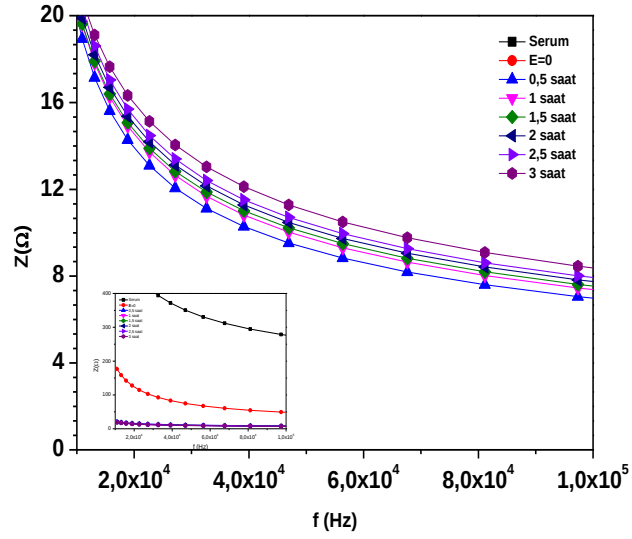
b.

Şekil 4. 32 (a) In/Si/GS/Ag yapıların 4×10^7 cfu mL⁻¹ *E. coli* konsantrasyonunda farklı zamanlarda uygulanan ileri yönde 12 kV/cm elektrik alan değeri altında empedans grafiği (b) 4×10^4 Hz sabit frekans değerinde empedans grafiği

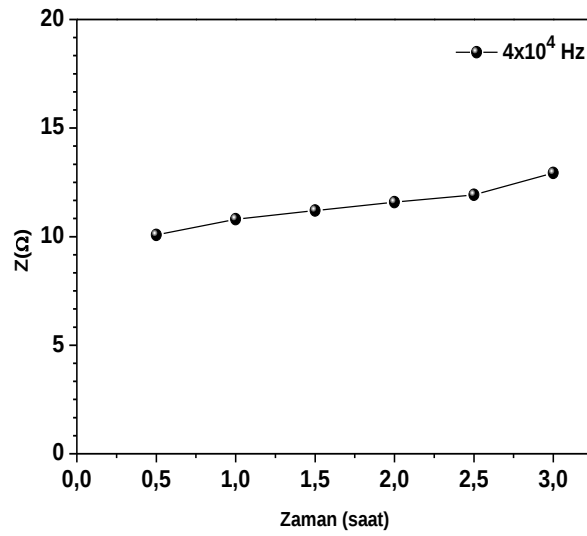
4.4.5 Canlı *E. coli* Bakterisinin Ters Yönde 12 kV/cm Elektrik Alan Değeri Altında Farklı Zamanlardaki Frekansa Bağlı Empedans Değişimi

Şekil 4.33 (a)' da görüldüğü üzere, ters yönde uygulanan elektrik alan süresinin artmasıyla empedans değerlerinde bir artış meydana gelmiştir. Şekil 4.33 (b)' de ise

4×10^4 Hz sabit frekansında ters yönde uygulanan elektrik alan süresinin empedans değerleri üzerindeki etkisi incelenmiştir.



a.

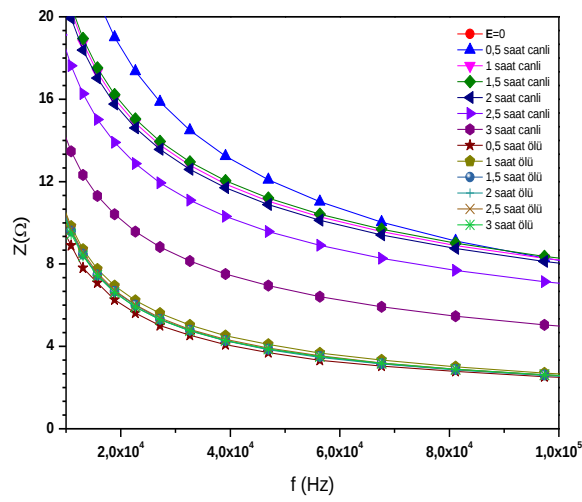


b.

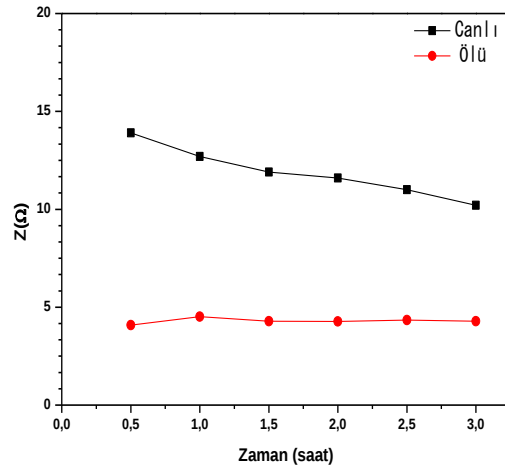
Şekil 4. 33 (a) In/Si/GS/Ag yapıların 4×10^7 cfu mL⁻¹ *E. coli* konsantrasyonunda farklı zamanlarda uygulanan ters yönde 12 kV/cm elektrik alan değeri altında empedans grafiği (b) 4×10^4 Hz sabit frekans değerinde empedans grafiği

4.4.6 Canlı ve Ölü *E. coli* Bakterisinin İleri Yönde ve Ters Yönde 12 kV/cm Elektrik Alan Değeri Altında Farklı Zamanlardaki Frekansa Bağlı Empedans Değişimi

Küçük gözenekli makro yapılar için 4×10^7 cfu.mL⁻¹ *E.coli* sabit bakteri konsantrasyonunda Şekil 4.34 (a)' da görüldüğü üzere canlı ve ölü bakteri hücrelerinin frekansa bağlı empedans değerlerindeki farklılıklar gözlemlenmiştir. Şekil 4.34 (b)' de ise 4×10^4 Hz sabit frekansında canlı ve ölü bakteri hücrelerinin zamanla değişen empedans değerleri verilmiştir. Şekil 4.35 (a) ve (b)' de ise ters yönde uygulanan 7kV/cm elektrik alanının empedans üzerindeki değişim grafikleri verilmiştir.

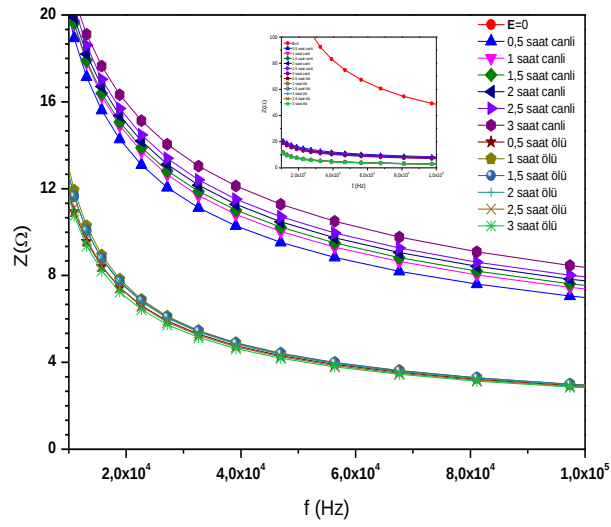


a.

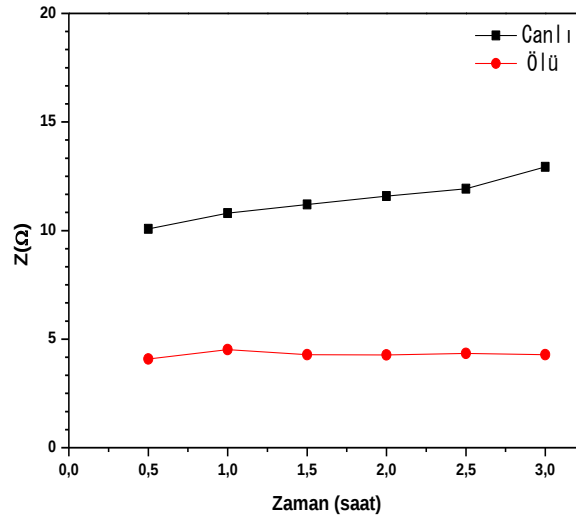


a.

Şekil 4. 34 (a) In/Si/GS/Ag yapıların canlı ve ölü 4×10^7 cfu mL⁻¹ *E. coli* konsantrasyonunda farklı zamanlarda uygulanan ileri yönde 12 kV/cm elektrik alan değeri altında frekansa bağlı empedans grafiği (b) 4×10^4 Hz sabit frekans değerinde empedans grafiği



a.



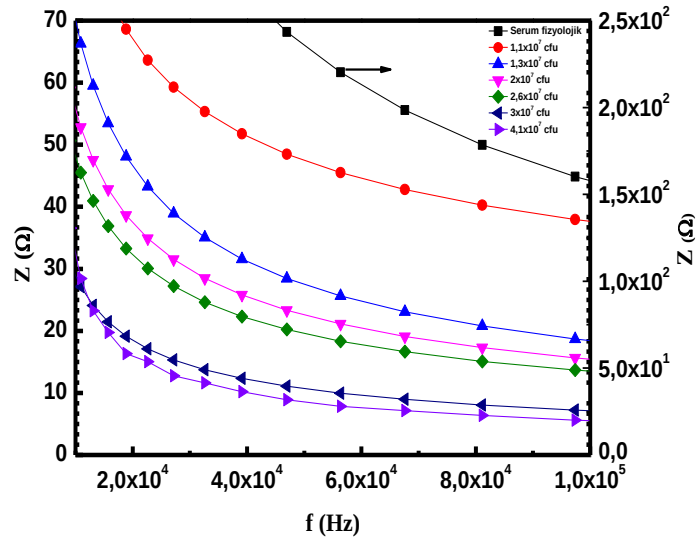
b.

Şekil 4. 35 (a) In/Si/GS/Ag yapıların canlı ve ölü 4×10^7 cfu mL⁻¹ *E. coli* konsantrasyonunda farklı zamanlarda uygulanan ters yönde 12 kV/cm elektrik alan değeri altında frekansa bağlı empedans grafiği (b) 4×10^4 Hz sabit frekans değerinde empedans grafiği

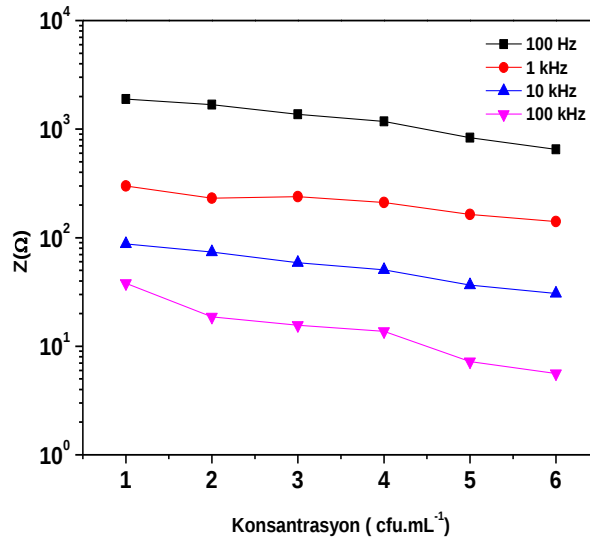
4.5 Küçük gözenekli makro In/Si/GS/Ag Yapılarda *E. faecalis* Bakteri Deneyleri

4.5.1 *E. faecalis'* in Farklı Konsantrasyonlu Bakteri İçeren Sıvılarındaki Frekansa Bağlı Empedans Ölçümleri

Küçük gözenekli makro In/Si/GS/Ag yapılar için Şekil 4.36 (a)' da sırasıyla $1,1 \times 10^7$ cfu.mL⁻¹, $1,3 \times 10^7$ cfu.mL⁻¹, 2×10^7 cfu.mL⁻¹, $2,6 \times 10^7$ cfu.mL⁻¹, 3×10^7 cfu.mL⁻¹ ve $4,1 \times 10^7$ cfu.mL⁻¹ *E. faecalis* konsantrasyonlarındaki empedans değişimleri tekrarlanmıştır. Şekil 4.36 (b)' de ise bazı frekans değerlerinde *E. faecalis'* in farklı konsantrasyonlu sıvılarındaki empedans değişimleri incelenmiştir. Diğer deneylerdeki benzer etkiler burada da görülmektedir.



a.



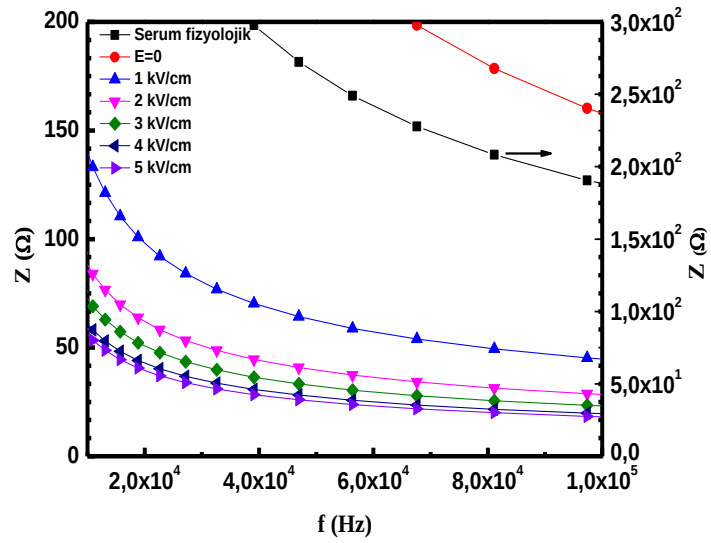
b.

Şekil 4. 36 In/Si/GS/Ag yapıların farklı bakteri (*E. faecalis*) konsantrasyonlardaki frekansa bağlı empedans grafiği

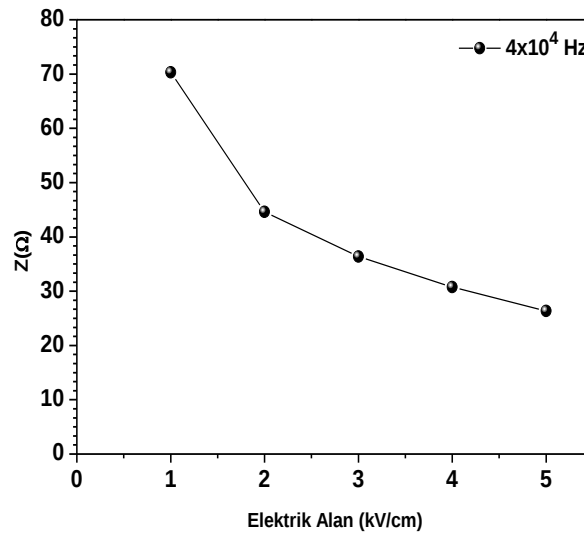
4.5.2 Sabit Konsantrasyonlu *E. faecalis* Bakterisi İçeren Sıvılara Dışarıdan Uygulanan İleri Yön Elektrik Alan Etkisi ile Empedans Değişimi

Şekil 4.37 (a)' dan görüldüğü üzere 2×10^7 cfu.mL⁻¹ sabit bakteri konsantrasyonunda uygulanan elektrik alan değerleri altında tüm frekans değerlerinde empedans değerlerinde azalma meydana gelmiştir. Şekil 4. 37 (b)' de ise 4×10^4 Hz sabit

frekansında elektrik alan değerin artmasıyla empedans değlerinde bir azalma olduğu görülmektedir.



a.

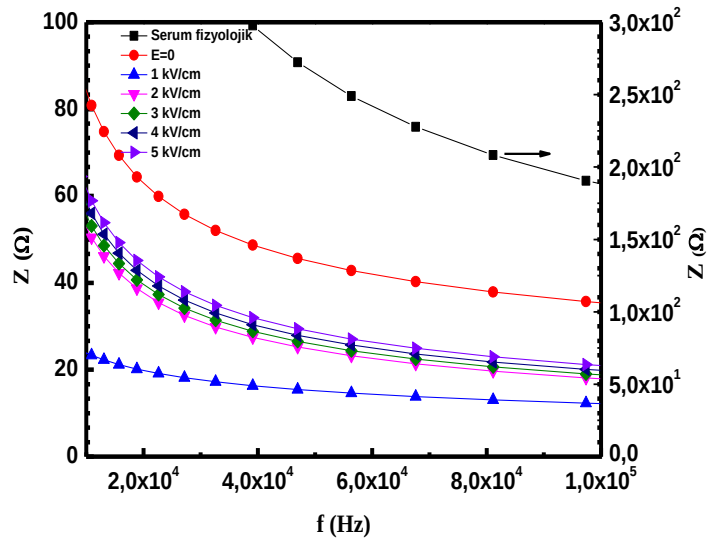


b.

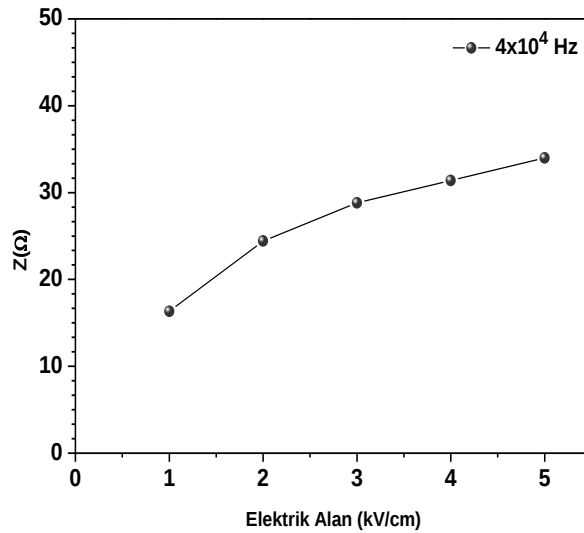
Şekil 4. 37 (a) In/Si/GS/Ag yapıların 2×10^7 cfu.mL⁻¹ *E. faecalis* konsantrasyonunda sırasıyla 0kV/cm, 1kV/cm, 2kV/cm, 3kV/cm, 4kV/cm ve 5kV/cm ileri yönde uygulanan elektrik alan değlerinde frekansa bağlı empedans değişimi (b) 4×10^4 Hz sabit frekansı için empedans değişimi

4.5.3 Sabit Konsantrasyonlu *E. faecalis* Bakterisi İçeren Sıvılara Dışarıdan Uygulanan Ters Yön Elektrik Alan Etkisi ile Empedans Değişimi

Şekil 4.38 (a)' dan da görüleceği üzere, ters yönde uygulanan elektrik alanının etkisiyle empedans değerlerinde bir artma meydana gelmiştir. Şekil 4.38 (b)' de ise, 4×10^4 Hz sabit frekans değerinde elektrik alanının artmasıyla empedans değerlerinde bir artış gözlenmiştir.



a.

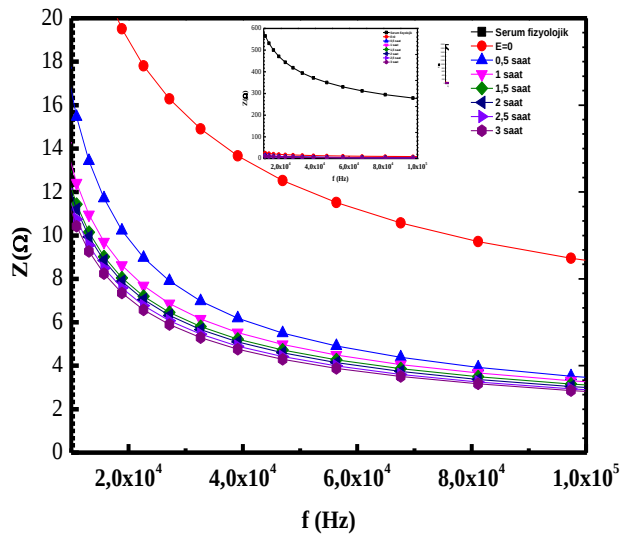


b.

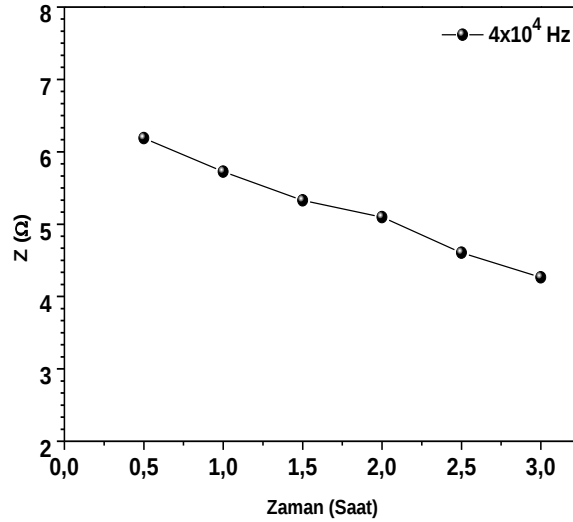
Şekil 4. 38 (a) In/Si/GS/Ag yapıların 2×10^7 cfu.mL⁻¹ *E. faecalis* konsantrasyonunda sırasıyla 0kV/cm, 1kV/cm, 2kV/cm, 3kV/cm, 4kV/cm ve 5kV/cm ters yönde uygulanan elektrik alan değerlerinde frekansa bağlı empedans değişimi (b) 4×10^4 Hz sabit frekansı için empedans değişimi

4.5.4 Canlı *E. faecalis* bakterisinin İleri Yönde 7 kV/cm Elektrik Alan Değeri Altında Zamana Bağlı Empedans Değişimi

Uygulanan elektrik alan süresinin artmasıyla empedans değerlerinde azalma meydana geldiği Şekil 4.39 (a)' da görülmektedir. Şekil 4.39 (b)' de 4×10^4 Hz sabit frekans değerindeki uygulanan elektrik alan süresine göre empedans değerleri belirlenmiş olup, sürenin artmasıyla empedans değerlerinde azalma olduğu görülmektedir



a.

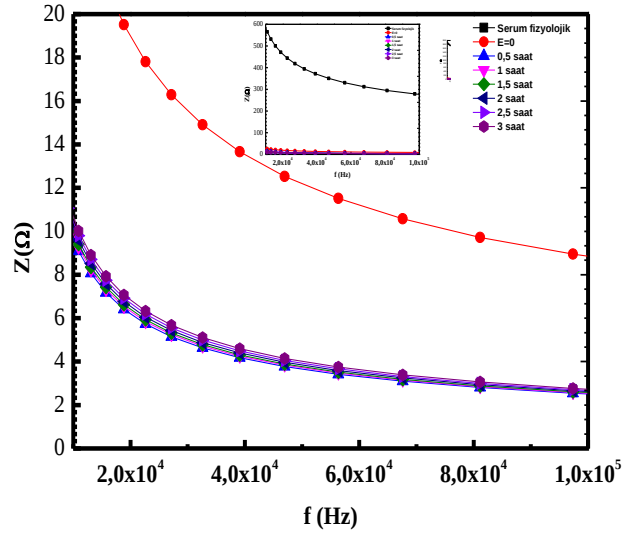


b.

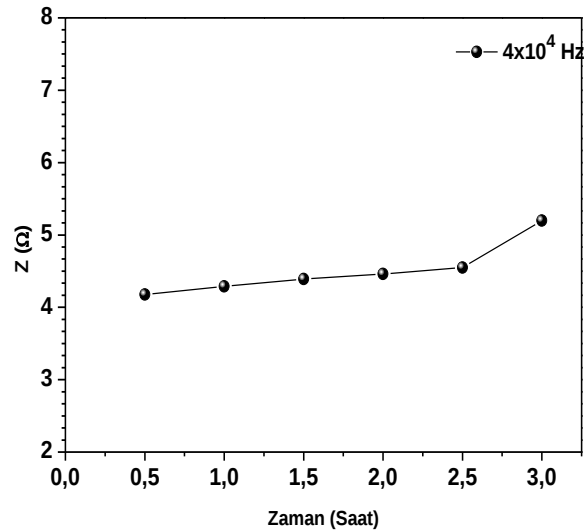
Şekil 4. 39 (a) In/Si/GS/Ag yapıların 2×10^7 cfu.mL⁻¹ *E. faecalis* konsantrasyonunda farklı zamanlarda uygulanan ileri yönde 7 kV/cm elektrik alan değeri altında frekansa bağlı empedans grafiği (b) 4×10^4 Hz sabit frekans değerinde empedans grafiği

4.5.5 Canlı *E. faecalis* Bakterisinin Ters Yönde 7 kV/cm Elektrik Alan Değeri Altında Zamana Bağlı Empedans Değişimi

Şekil 4.40 (a) ve (b)' den de görüldüğü gibi ters yönde uygulanan elektrik alan süresinin artmasıyla empedans değerlerinde az da olsa bir artış olmuştur.



a.

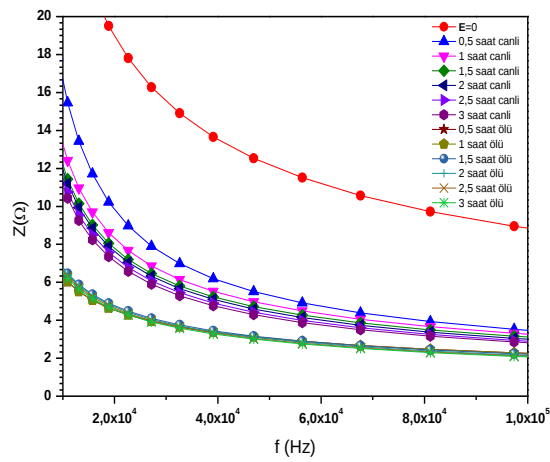


b.

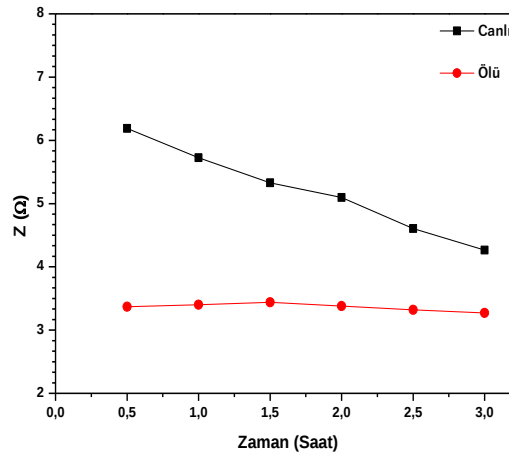
Şekil 4. 40 In/Si/GS/Ag yapıların 2×10^7 cfu.mL⁻¹ *E. faecalis* konsantrasyonunda farklı zamanlarda uygulanan ters yönde 7 kV/cm elektrik alan değeri altında frekansa bağlı empedans grafiği (b) 4×10^4 Hz sabit frekans değerinde empedans grafiği

4.5.6 Canlı ve Ölü *E. faecalis* Bakterisinin İleri Yönde Ve Ters Yönde 7 kV/cm Elektrik Alan Değeri Altında Zamana Bağlı Empedans Ölçümleri

Ölü bakteri hücrelerine ait empedans sonuçlarında kayda değer bir değişim olmamıştır. Yaşayan bakteri hücreleri ile kıyaslandığında neredeyse hiçbir etkisi bulunmamaktadır. Bu nedenle, yaşayan bakteri deneylerinde empedans değerleri değişirken, ölü bakteri deneylerinde empedans değerleri neredeyse sabit kalmıştır. Şekil 4.41' de ileri yönde Şekil 4.42' de ise ters yönde farklı zamanlarda uygulanan sabit 7 kV/cm elektrik alan değeriindeki empedans değişimleri verilmiştir.

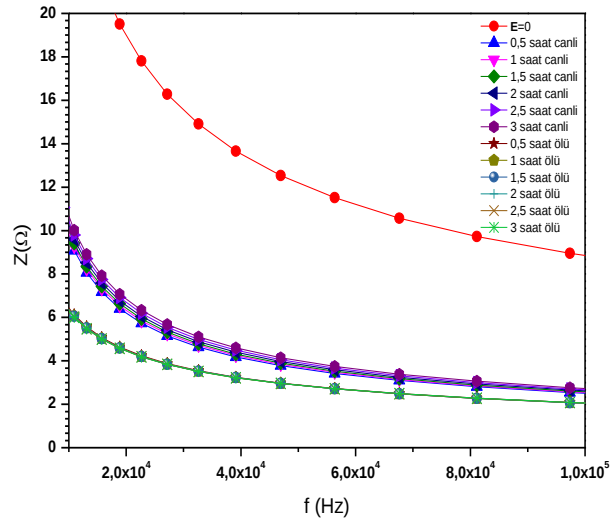


a

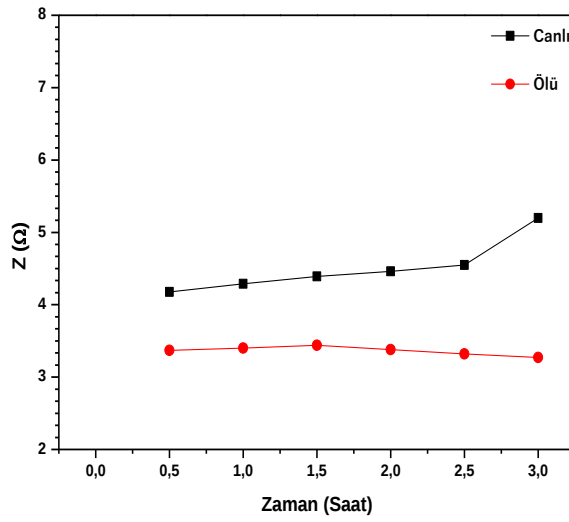


b

Şekil 4. 41 (a) In/Si/GS/Ag yapıların canlı ve ölü 2×10^7 cfu.mL⁻¹ *E. faecalis* konsantrasyonunda farklı zamanlarda uygulanan ileri yönde 7 kV/cm elektrik alan değeri altında frekansa bağlı empedans grafiği (b) 4×10^4 Hz sabit frekans değerinde empedans grafiği



a.



b.

Şekil 4. 42 (a) In/Si/GS/Ag yapıların canlı ve ölü 2×10^7 cfu.mL⁻¹ *E. faecalis* konsantrasyonunda farklı zamanlarda uygulanan ters yönde 7 kV/cm elektrik alan değeri altında frekansa bağlı empedans grafiği (b) 4×10^4 Hz sabit frekans değerinde empedans grafiği

SONUÇ VE ÖNERİLER

1. Bu çalışmada, Antimon (Sb) katkılı n tipi tek kristal silisyum örneğinin (HF: dH₂O 1:3, anodizasyon zamanı 40 dakika, akım yoğunluğu 15 mA/cm² ve 50 W 12 V halojen lamba) elektrokimyasal anodizasyon işlemi ile elde edilmiş makro gözenek boyutlarına sahip In/Si/GS/Ag yapılar ve (HF: dH₂O 1:7, anodizasyon zamanı 40 dakika, akım yoğunluğu 15 mA/cm² ve 50 W 12 V halojen lamba) elektrokimyasal anodizasyon işlemi ile elde edilmiş olan küçük gözenekli makro boyutlarına sahip In/Si/GS/Ag yapılar elde edilmiştir.
2. Makro gözenekli GS tabanlı yapılar % 60 gözenekliliğe sahip olup gözenek çapları ortalama 5-15 µm olarak belirlenirken, küçük gözenekli makro GS tabanlı yapılar ise % 52 gözenekliliğe sahip olup gözenek çapları ortalama 1-5 µm olarak belirlenmiştir.
3. Makro gözenek (5-15µm) boyutlarda ve küçük gözenekli makro (1-5µm) boyutlarında üretilen GS tabanlı In/Si/GS/Ag yapılar 25 °C oda sıcaklığında elektrik alanın uygulanmadığı ortamda 1,7x10⁷ cfu.mL⁻¹, 2,9x10⁷cfu.mL⁻¹, 4x10⁷cfu.mL⁻¹, 4,4x10⁷cfu.mL⁻¹, 4,8x10⁷cfu.mL⁻¹ ve 5,6x10⁷cfu.mL⁻¹ *Escherichia coli* (*E. coli*) ve 1,1x10⁷cfu.mL⁻¹, 1,3x10⁷cfu.mL⁻¹, 2 x10⁷cfu.mL⁻¹, 2,6 x10⁷cfu.mL⁻¹, 3x10⁷cfu.mL⁻¹ ve 4,1x10⁷cfu.mL⁻¹ *Enterococcus* (*E. faecalis*) bakteri konsantrasyonlarının sıvı ortamlarda algılanma özellikleri, bakteri konsantrasyonlarına bağlı olarak 5Hz ile 100 kHz frekans aralığı içinde a.c. ölçüm yöntemleri ile incelenmiştir. Makro (5-15µm) ve küçük gözenekli makro

(1-5µm) In/Si/GS/Ag yapılar bakterili serum fizyolojik ortamını, bakterisiz serum fizyolojik ortamından ayırt edebilmiştir ve bakteri konsantrasyonlarını da birbirinden ayırt edebilmişlerdir.

4. Elektrik alanın gözeneklere bakteri hücrelerinin yaklaşması veya uzaklaşması üzerindeki etkisini ölçebilmek için, 4×10^7 cfu.mL⁻¹ *E. coli* bakteri çözeltisine daldırılmış makro gözenek boyutundaki In/Si/GS/Ag yapılara ileri ve ters yönde 0-10 kV/cm aralığında, 2×10^7 cfu.mL⁻¹ *E. faecalis* bakteri çözeltisine daldırılmış makro gözenek boyutundaki In/Si/GS/Ag yapılara ise ileri ve ters yönde 0-5 kV/cm aralığında çeşitli elektrik alan değerlerinin 5Hz ile 100 kHz frekans aralığı içinde uygulanması sonucu frekansa bağlı a.c. ölçümleri incelenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre elektrik alanın ileri yönde ve ters yönde uygulanması gözeneklere bakterilerin yönlendirebileceğini göstermiştir. İleri yönde uygulanan elektrik alan değerlerinin artmasıyla bakteriler gözeneklere yaklaşarak empedans değerlerinde bir azalma meydana getirirken, ters yönde uygulanan elektrik alan değerlerinin artmasıyla bakteriler gözeneklerden uzaklaşarak empedans değerlerinde bir azalma meydana getirmiştir.
5. *E. faecalis* deneylerinde kullanılan elektrik alan değerleri ile örtüşebilmesi için aynı elektrik alan değerlerinde *E. coli* bakteri için deneyler tekrar edilmiştir. $1,5 \times 10^7$ cfu.mL⁻¹ *E.coli* bakteri konsantrasyonuna daldırılan makro gözenekli GS tabanlı yapılar, 0-5 kV/cm elektrik alana maruz bırakılmışlardır. İleri ve ters yönde uygulanan elektrik alan ile bakterilerin yönlendirilebileceği görülmüştür.
6. İleri ve ters yönde elektrik alanın uygulanma süresi ile, canlı ve ölü *E. coli* ve *E. faecalis* bakteri hücrelerinin gözeneklere yönlendirilmesinin empedans spektrumları üzerindeki etkisi incelenmiştir. Makro gözenek (5-15µm) boyutlarındaki In/Si/GS/Ag yapılar 4×10^7 cfu.mL⁻¹ canlı bakteri çözeltisine daldırılarak, 0,5-3 saat aralığında *E. coli* için 12 kV/cm, *E. faecalis* için ise 7 kV/cm sabit ileri ve ters yönde elektrik alana maruz bırakılmıştır. İleri yönde uygulanan elektrik alan süresinin artmasıyla empedans değerlerinde azalma meydana gelirken, ters yönde uygulanan elektrik alan süresinin artmasıyla empedans değerlerinde bir artış meydana geldiği görülmüştür. Bu sonuç hem

uygulanan elektrik alanın bakteri hücrelerinin gözeneklere yaklaştırılmasında veya uzaklaştırılmasında etkisi olduğunu, hem de aynı zamanda elektrik alan uygulama süresinin de bakterilerin sıvı içerisindeki yönlendirilmesinde etkisi olduğunu göstermiştir.

7. $1,5 \times 10^7$ cfu.mL⁻¹ *E.coli* konsantrasyonuna daldırılan makro gözenekli GS tabanlı yapılar için *E. faecalis* bakteri deneylerinde kullanılan farklı zamanlarda uygulanan 7 kV/cm elektrik alan değeri için tekrar edilmiştir. Deney sonuçları diğer deney sonuçları ile örtüşmektedir.
8. Uygulanan elektrik alanın etkisinin ve uygulama süresinin gözeneklere yerleşen bakteri sayısı üzerindeki etkisini netleştirebilmek için aynı deneyler ölü bakteri hücreleri üzerinde tekrarlanmıştır. Makro gözenek boyutlarındaki In/Si/GS/Ag yapılar, 121 °C de 1.5 atmosferde 20 dakika süre ile otoklavlanan 4×10^7 cfu.mL⁻¹ *E.coli* bakteri çözeltilisine daldırılarak, 0,5-3 saat aralığında 12 kV/cm, 2×10^7 cfu.mL⁻¹ *E. faecalis* için ise 7 kV/cm sabit ileri ve ters yönde elektrik alana maruz bırakılmıştır. Yeni *E.coli* deneyleri için ise $1,5 \times 10^7$ cfu.mL⁻¹ *E.coli* bakteri çözeltilisine daldırılarak 7 kV/cm sabit ileri ve ters yönde elektrik alana maruz bırakılarak deneyler tekrar edilmiştir. Otoklavlanma işlemi nedeniyle bakteri hücre duvarı zarı zarar görerek hücre duvarı içinde kalan iyonlar sıvı içerisine dağılmakta ve ortamdaki serbest iyon konsantrasyonunun artmasına neden olmaktadır. Ölü bakteri konsantrasyonundaki empedans değerleri canlı bakteri konsantrasyonunda incelenen empedans değerlerine göre daha düşüktür. Elektrik alanın uygulanma süresine bağlı olarak ölü bakteri konsantrasyonuna ait empedans değerlerinde kayda değer bir değişim gözlemlenmemiştir.
9. Deneyler küçük gözenekli makro (1-5 µm) boyutlarındaki In/Si/GS/Ag yapılar için de tekrarlanmıştır. Hem *E. coli* hem de *E. faecalis* bakteri konsantrasyonlu çözeltilerde elde edilen sonuçlar, makro gözenek (5-15 µm) boyutlarındaki sonuçlar ile örtüşmektedir.
10. Küçük gözenekli makro (1-5 µm) boyutlarındaki In/Si/GS/Ag yapılar için tekrarlanan elektrik alanın uygulanma süresinin empedans ölçümleri makro (5-15 µm) gözenek boyutundaki sonuçlar ile örtüşmektedir.

11. Bütün bu deneyler elektrik alan etkisi kullanılarak mevcut bakteri sensörlerinin ölçüm hassasiyetinin arttırılabileceğini göstermektedir. GS tabanlı sensör platformuna uygulanan elektrik alanın ileri yönünün negatif yüklü bakterileri gözenekli silisyum yüzeyine yaklaştırabileceği, ters yönde uygulanan elektrik alanın ise bakterileri gözeneklerden uzaklaştırabileceği gösterilmiştir.

KAYNAKLAR

- [1] A. Uhler, "Electrolytic Shaping of Germanium and Silicon", *Bell Syst. Tech. J.*, c. 35, sy 2, ss. 333-347, Mar. 1956, doi: 10.1002/j.1538-7305.1956.tb02385.x.
- [2] A. Jane, R. Dronov, A. Hodges, ve N. H. Voelcker, "Porous silicon biosensors on the advance", *Trends Biotechnol.*, c. 27, sy 4, ss. 230-239, Nis. 2009, doi: 10.1016/j.tibtech.2008.12.004.
- [3] K. Kobayashi, F. A. Harraz, S. Izuo, T. Sakka, ve Y. H. Ogata, "Macropore growth in a prepatterned p-type silicon wafer", *Phys. Status Solidi A*, c. 204, sy 5, ss. 1321–1326, 2007.
- [4] A. Julbe ve J. D. F. Ramsay, "Methods for the characterisation of porous structure in membrane materials", içinde *Membrane Science and Technology*, c. 4, Elsevier, 1996, ss. 67–118.
- [5] T. M. Cahn, *Biosensors*, c. 1. Springer Science & Business Media, 1993.
- [6] A. L. Ghindilis, P. Atanasov, M. Wilkins, ve E. Wilkins, "Immunosensors: electrochemical sensing and other engineering approaches", *Biosens. Bioelectron.*, c. 13, sy 1, ss. 113–131, 1998.
- [7] M. P. Stewart ve J. M. Buriak, "Chemical and biological applications of porous silicon technology", *Adv. Mater.*, c. 12, sy 12, ss. 859–869, 2000.
- [8] I. Rea vd., "Fabrication and characterization of a porous silicon based microarray for label-free optical monitoring of biomolecular interactions", *J. Appl. Phys.*, c. 107, sy 1, s. 014513, 2010.
- [9] S. M. Yoo ve S. Y. Lee, "Optical Biosensors for the Detection of Pathogenic Microorganisms", *Trends Biotechnol.*, c. 34, sy 1, ss. 7-25, Oca. 2016, doi: 10.1016/j.tibtech.2015.09.012.
- [10] H. Bai, N. Cochet, A. Pauss, ve E. Lamy, "Bacteria cell properties and grain size impact on bacteria transport and deposition in porous media", *Colloids Surf. B Biointerfaces*, c. 139, ss. 148-155, Mar. 2016, doi: 10.1016/j.colsurfb.2015.12.016.
- [11] P. J. Riu, "Electrical bioimpedance methods", içinde *International Conference on Electrical Bio-Impedance 1998: Barcelona, Spain*, 1999.

- [12] H. J. Schütt ve E. Gerdes, "Space-charge relaxation in ionically conducting oxide glasses. I. Model and frequency response", *J. Non-Cryst. Solids*, c. 144, ss. 1–13, 1992.
- [13] A. Bogomolova vd., "Challenges of Electrochemical Impedance Spectroscopy in Protein Biosensing", *Anal. Chem.*, c. 81, sy 10, ss. 3944-3949, May. 2009, doi: 10.1021/ac9002358.
- [14] R. D. Das, C. RoyChaudhuri, S. Maji, S. Das, ve H. Saha, "Macroporous silicon based simple and efficient trapping platform for electrical detection of Salmonella typhimurium pathogens", *Biosens. Bioelectron.*, c. 24, sy 11, ss. 3215–3222, 2009.
- [15] R. Dev Das, A. Dey, S. Das, ve C. RoyChaudhuri, "Interdigitated Electrode-Less High-Performance Macroporous Silicon Structure as Impedance Biosensor for Bacteria Detection", *IEEE Sens. J.*, c. 11, sy 5, ss. 1242-1252, May. 2011, doi: 10.1109/JSEN.2010.2087746.
- [16] R. D. Das, N. Mondal, S. Das, ve C. RoyChaudhuri, "Optimized Electrode Geometry for an Improved Impedance Based Macroporous Silicon Bacteria Detector", *IEEE Sens. J.*, c. 12, sy 6, ss. 1868-1877, Haz. 2012, doi: 10.1109/JSEN.2011.2175724.
- [17] P. B. Lillehoj, C. W. Kaplan, J. He, W. Shi, ve C.-M. Ho, "Rapid, electrical impedance detection of bacterial pathogens using immobilized antimicrobial peptides", *J. Lab. Autom.*, c. 19, sy 1, ss. 42–49, 2014.
- [18] L. Yang, Y. Li, C. L. Griffis, ve M. G. Johnson, "Interdigitated microelectrode (IME) impedance sensor for the detection of viable Salmonella typhimurium", *Biosens. Bioelectron.*, c. 19, sy 10, ss. 1139–1147, 2004.
- [19] L. Yang, "Electrical impedance spectroscopy for detection of bacterial cells in suspensions using interdigitated microelectrodes", *Talanta*, c. 74, sy 5, ss. 1621-1629, Şub. 2008, doi: 10.1016/j.talanta.2007.10.018.
- [20] M. Jönsson, K. Welch, S. Hamp, ve M. Strømme, "Bacteria Counting with Impedance Spectroscopy in a Micro Probe Station", *J. Phys. Chem. B*, c. 110, sy 20, ss. 10165-10169, May. 2006, doi: 10.1021/jp060148q.
- [21] "4/26/2016. Bölüm 7: Elektriksel Özellikler. Malzemelerin Elektriksel Özellikleri. Elektron hareketliliği İletkenlik Enerji bant yapıları - PDF Free Download". [Çevrimiçi]. Erişim adresi: <https://docplayer.biz.tr/19226492-4-26-2016-bolum-7-elektriksel-ozellikler-malzemelerin-elektriksel-ozellikleri-elektron-hareketliliği-iletkenlik-enerji-bant-yapilari.html>. [Erişim: 26-Kas-2019].
- [22] "(Kittel, 1976 - Google Akademik". [Çevrimiçi]. Erişim adresi: https://scholar.google.com.tr/scholar?hl=tr&as_sdt=0%2C5&q=%28Kittel%2C+1976&btnG=. [Erişim: 26-Kas-2019].
- [23] E. Sarioğlu, "BOR KATKILI SİLİSYUMUN OPTİKSEL ÖZELLİKLERİ", s. 80.
- [24] W. D. Callister ve D. D. Rethwisch, *Malzeme bilimi ve Mühendisliği*. Nobel, 2013.
- [25] "13. Ders Yarıiletkenlerin Optik Özellikleri - PDF Ücretsiz indirin". [Çevrimiçi]. Erişim adresi: <https://docplayer.biz.tr/33740007-13-ders-yariiletkenlerin-optik-ozellikleri.html>. [Erişim: 30-Kas-2019].

- [26] “Kimyaevi: Fiziksel Özellikleri”. [Çevrimiçi]. Erişim adresi: <http://www.kimyaevi.org/TR/Genel/YariMetalKardes.aspx?F6E10F8892433CFF679A66406202CCB05CDBAED4AD3E38F7>. [Erişim: 26-Kas-2019].
- [27] “Electrolytic Shaping of Germanium and Silicon - Uhlir - 1956 - Bell System Technical Journal - Wiley Online Library”. [Çevrimiçi]. Erişim adresi: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/j.1538-7305.1956.tb02385.x>. [Erişim: 09-Haz-2019].
- [28] “Porous silicon formation mechanisms: Journal of Applied Physics: Vol 71, No 8”. [Çevrimiçi]. Erişim adresi: <https://aip.scitation.org/doi/abs/10.1063/1.350839>. [Erişim: 09-Haz-2019].
- [29] A. Foucaran, F. Pascal-Delannoy, A. Giani, A. Sackda, P. Combette, ve A. Boyer, “Porous silicon layers used for gas sensor applications”, *Thin Solid Films*, c. 297, sy 1, ss. 317-320, Nis. 1997, doi: 10.1016/S0040-6090(96)09437-0.
- [30] “Luminescence Bands and their Proposed Origins In Highly Porous Silicon - Canham - 1995 - physica status solidi (b) - Wiley Online Library”. [Çevrimiçi]. Erişim adresi: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/pssb.2221900102>. [Erişim: 09-Haz-2019].
- [31] V. Lehmann ve U. Gösele, “Porous silicon formation: A quantum wire effect”, *Appl. Phys. Lett.*, c. 58, sy 8, ss. 856-858, Şub. 1991, doi: 10.1063/1.104512.
- [32] S. Aydın Yüksel, “Gözenekli silisyum esaslı sensörlerin hazırlanması ve incelenmesi”, 2010.
- [33] I. Erol, *Gıda Hijyeni ve Mikrobiyolojisi. Pozitif matbaacılık*. Ankara, Türkiye, 2007.
- [34] H. A. Sarı, “Beyaz peynirlerde escherichia coli O157: H7 serotipinin araştırılması”, PhD Thesis, Adnan Menderes Üniversitesi, 2008.
- [35] A. Temiz, “Gıdalarda indikatör mikroorganizmalar”, *Gıda Mikrobiyolojisi*, c. 1, ss. 87-107, 1998.
- [36] Ö. İ. Tekin, “YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ”, s. 112.
- [37] T. Van de Venter, “Emerging food-borne diseases: a global responsibility”, *Food Nutr. Agric.*, sy 26, ss. 4-13, 2000.
- [38] E. Sokolova, J. Åström, T. J. Pettersson, O. Bergstedt, ve M. Hermansson, “Estimation of pathogen concentrations in a drinking water source using hydrodynamic modelling and microbial source tracking”, *J. Water Health*, c. 10, sy 3, ss. 358-370, 2012.
- [39] E. Peacock, V. W. Jacob, ve S. M. Fallone, “Escherichia coli O157: H7: etiology, clinical features, complications, and treatment”, *Nephrol. Nurs. J.*, c. 28, sy 5, s. 547, 2001.
- [40] B. E. Murray, “The life and times of the Enterococcus.”, *Clin. Microbiol. Rev.*, c. 3, sy 1, ss. 46-65, 1990.
- [41] “Sümerkan B. (2002). Sterilizasyon dezenfeksiyon... - Google Akademik”. [Çevrimiçi]. Erişim adresi:

- https://scholar.google.com.tr/scholar?hl=tr&as_sdt=0%2C5&q=S%C3%BCmerkan+B.+%282002%29.+Sterilizasyon+dezenfeksiyon+hastane+infeksiyonlar%C4%B1+kitab%C4%B1+http%3A%2F%2Fwww.das.org.tr%2Ftr%2Fdosya%2Fkongre%2Fkong2002%2F035.pdf%2C+12+Nisan+2017.&btnG=. [Erişim: 09-Haz-2019].
- [42] G. W. Tannock ve G. Cook, "Enterococci as members of the intestinal microflora of humans", içinde *The Enterococci*, American Society of Microbiology, 2002, ss. 101–132.
- [43] M. Tariq, C. Bruijs, J. Kok, ve B. P. Krom, "Link between Culture Zeta Potential Homogeneity and Ebp in *Enterococcus faecalis*", *Appl. Environ. Microbiol.*, c. 78, sy 7, ss. 2282-2288, Nis. 2012, doi: 10.1128/AEM.07618-11.
- [44] A. Hummel, W. H. Holzapfel, ve C. M. Franz, "Characterisation and transfer of antibiotic resistance genes from enterococci isolated from food", *Syst. Appl. Microbiol.*, c. 30, sy 1, ss. 1–7, 2007.
- [45] "View Image". [Çevrimiçi]. Erişim adresi: http://www.dentalhypotheses.com/viewimage.asp?img=DentHypotheses_2012_3_4_142_106838_u3.jpg. [Erişim: 17-Haz-2019].
- [46] D. Delipinar, "Probertit, elektrokoagölasyon termal atık ve elektrokoagölasyon bor atığın dielektrik özelliklerinin empedans spektroskopisi yöntemi ile incelenmesi", 2013.
- [47] C. K. Alexander, *Fundamentals of electric circuits*. McGraw-Hill, 2009.
- [48] S. Yıldırım, "Çeşitli metallerin (Au, Ag, Cu, Pd) ve metal kalınlığının gözenekli silisyum esaslı hidrojen pili parametrelerine etkisi", 2011.
- [49] "UV-VIS Spektrofotometre Bakım Validasyon", *LabServis*. [Çevrimiçi]. Erişim adresi: <http://www.labservis.net/cihaz-periyodik-bakim/uv-vis-spektrofotometresi/>. [Erişim: 05-Ara-2019].

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı :Sevinç GÜLER
Doğum Tarihi ve Yeri :07.10.1986 Bulgaristan
Yabancı Dili :İngilizce
E-posta :sevinc7yildirim@gmail.com

ÖĞRENİM DURUMU

Derece	Alan	Okul/Üniversite	Mezuniyet Yılı
Y. Lisans	Fizik	Yıldız Teknik Üniversitesi	2011
Lisans	Fizik	Trakya Üniversitesi	2009
Lise	Fen Matematik	Edirne Lisesi	2004

İŞ TECRÜBESİ

Yıl	Firma/Kurum	Görevi
2019-halen	İstanbul Aydın Üniversitesi	Öğretim Görevlisi
2013-2019	Nişantaşı Üniversitesi	Öğretim Görevlisi

YAYINLARI

Makale

1. Güler, S., Oruç, Ç., & Altındal, A. (2019). Electric field assisted deposition of *E. coli* bacteria into the pores of porous silicon. *Journal of microbiological methods*, 161, 96-101.
2. Çiğdem, ORUÇ., GÜLER, S., & LUŞ, H. M. (2018). Metal-Gözenekli Silisyum Direk Hidrojen Pili Üretim Parametrelerinin Geliştirilmesi. *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji*, 6(3), 544-557.
3. Oruc, C., & Guler, S. (2014). Effect of Au, Ag and Cu thin films' thickness on the electrical parameters of metal-porous silicon direct hydrogen fuel cell. *International Journal of Hydrogen Energy*, 39(35), 20183-20189.

Bildiri

1. S. Guler, C. Oruc, A. Altındal "The Effect of the Electric Field on The Adhesion of *E. Coli* on Porous Silicones of Different Sizes", 4nd International Conference on Material Science and Technology, IMSTEC2019, October 18-20, 2019, Ankara, TURKEY.
2. S. Guler, C. Oruc, M. Lus, "Effect of Etching Time on The Morphology of Porous Silicon Structures", The International Conference on Materials Science, Machine and Automotive Engineerings and Technology, IMSMATEC2018, April 10-12, 2018, Çeşme/İZMİR.
3. S. Guler, C. Oruc, M. Lus, 'Impact of Current Density on The Electrical Properties of Porous Silicon Fuel cell', The International Conference on Materials Science, Machine and Automotive Engineerings and Technology, IMSMATEC2018, April 10-12, 2018, Çeşme/İZMİR.

4. S. Guler, C. Oruc, " Investigation of Au and Pd Coated Metal / Porous Silicon / Silicon Structures", 2th International Conference on Material Science and Technology, IMSTEC2017, October 11-13, 2017, Cappadocia, TURKEY.
5. S. Guler, C. Oruc, " Effect Of Hf Concentration To Morhpology of Porous Silicon Surface", Turkish Physical Society 33rd International Physics Congress, TFD33, September 6-10, 2017, Bodrum, TURKEY.
6. S. Guler, C. Oruc, A. Altindal, " Influence of Electric Field on E. coli Attachment to Porous Silicon Surface", 4th MSNG2017, June 2017, Sarajevo, BOSNIA.
7. C. Oruc Lus, S. (Yildirim) Guler, Effect of Cu Thin Films' Thickness on the Electrical Parameters of Metal-porous Silicon Direct Hydrogen Fuel Cell, Energy Technologies and Carbon Dioxide Management, February 16-20, 2014, San Diego, CA, TMS 2014.
8. E. Aşçı, S. Yıldırım, Ç. Oruç Luş, "Anodizasyon Koşullarından Işığın Ag-GS-Si Hidrojen Pili Parametrelerine Etkisi", Turkish Physical Society 28th International Physics Congress, September 2011, Bodrum, TURKEY.
9. S. Yıldırım, E. Aşçı, Ç. Oruç Luş, "Ag Metali ve Metal Kalınlığının Gözenekli Silisyum Esaslı Hidrojen Pili Parametrelerine Etkisi", Turkish Physical Society 28th International Physics Congress, September 2011, Bodrum, TURKEY.
10. C. Oruç Luş, E. Aşçı, S. Yıldırım, "Effect of Anadization Conditions on Metal-Porous Silicon Direct Hydrogen Fuel Cell", Materials Science & Technology, Houston, USA, 2010.

Proje

1. Yıldız Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projesi “Çeşitli Metallerin (Au, Ag, Cu, Pd) ve Metal Kalınlığının Gözenekli Silisyum Esaslı Hidrojen Pili Parametrelerine Etkisi “, 2011-01-01YULAP02.
2. Yıldız Teknik Üniversitesi, "Gözenekli Silisyum Esaslı Biyosensörler", BAP Arastırma Projesi, 2015-01-01-KAP03, Araştırmacı.