

T.C.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

BİYOFOOTOVOLTAİK HÜCRE İLE ELEKTRİK ÜRETİMİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Merve BAKIR
171112107

Anabilim Dalı: Çevre Mühendisliği

Program: Çevre Teknolojisi

Tez Danışmanı: Doç.Dr. Ergin TAŞKAN (F.Ü)

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih: 11 Eylül 2019

EKİM-2019

T.C.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

BİYOFOTOVOLTAİK HÜCRE İLE ELEKTRİK ÜRETİMİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Merve BAKIR

(171112107)

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih: 11 Eylül 2019

Tezin Savunulduğu Tarih: 10 Ekim 2019

Tez Danışmanı : Doç.Dr. Ergin TAŞKAN (F.Ü)

Diğer Jüri Üyeleri: Doç.Dr. Özge HANAY (F.Ü)

Dr. Öğr. Üyesi Hilal ARSLANOĞLU IŞIK (Munzur Ü)

EKİM-2019

ÖNSÖZ

Tez çalışmam boyunca bilgi ve birikimini esirgemeyen, tezimin tüm aşamalarında ilgi ve desteğini her daim hissettiğim değerli hocam Doç. Dr. Ergin TAŞKAN'a en içten teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışmam FÜBAP MF.18.62 no'lu proje kapsamında yürütülmüştür. Desteklerinden dolayı Fırat Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi'ne teşekkür ederim.

Ayrıca laboratuvar çalışmalarında desteğini gördüğüm Arş. Gör. Dr. Banu TAŞKAN'a ve yüksek lisans öğrencisi Sevilay SUNA'ya,

Hayatımın her döneminde maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen dualarıyla da hep yanımda olan değerli anneme ve babama sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Merve BAKIR

ELAĞIĞ-2019

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ	II
İÇİNDEKİLER.....	III
ÖZET	V
SUMMARY	VI
TABLolar LİSTESİ	VII
ŞEKİLLER LİSTESİ	VIII
KISALTMALAR LİSTESİ	X
1. GİRİŞ.....	1
1.1. Genel Bilgi	1
1.2. Çalışmanın Amacı	1
2. LİTERATÜR	2
2.1. Biyoenerji ve Fotosentetik Biyoprosesler	2
2.2. Biyoelektrokimyasal Sistemler (BES).....	3
2.2.1. Mikrobiyal Yakıt Hücresi (MYH).....	4
2.2.2. Foto-Mikrobiyal Yakıt Hücreleri (Foto-MYH).....	5
2.2.2.1. Anoksijenik Foto-MYH.....	5
2.2.2.2. Foto-biyokatotlar	6
2.2.2.3. Foto-biyoreaktör MYH.....	6
2.2.3. Fotosentetik Sediment MYH.....	7
2.2.4. Mikroalg MYH Sistemleri.....	7
2.3. Biyofotovoltaik Hücre (BFVH).....	8
2.3.1. BFVH'lerin Çalışma Prensipleri	11
2.3.2. BFVH'lerde Kullanılan Malzemeler	11
2.3.2.1. Anot Malzemesi	12
2.3.2.2. Katot Malzemesi.....	12
2.3.2.3. Membran Malzemesi	12
2.3.3. BFVH'lerin Çalışma Koşulları.....	13
2.3.3.1. Işık	13
2.3.3.2. Sıcaklık.....	14

2.3.3.3. pH.....	14
2.3.3.4. İletkenlik.....	14
2.3.3.5. Medyator Konsantrasyonu.....	15
2.3.3.6. Nutrientler	15
2.3.3.7. CO ₂	16
2.3.3.8. Biyokütle	16
3. MATERYAL ve METOT	17
3.1. Çalışmada Kullanılan Alg Türlerinin Çoğaltılması.....	17
3.2. Mikrobiyal Analizler	20
3.2.1. DNA Ekstraksiyonu	20
3.2.2. Polimeraz Zincir Reaksiyonu (PCR).....	21
3.3. BFBVH Reaktörlerinin Kurulumu.....	23
3.4. BFBVH Reaktörlerinin İşletmeye Alınması	25
3.5. Voltaj Ölçümü	25
3.6. Elektrokimyasal Analizler	26
3.6.1. Elektrokimyasal Empedans Analizi (EIS).....	27
3.6.2. Cyclic Voltametri Analizi	27
3.6.3. Lineer Sweep Voltametri Analizi.....	27
3.7. SEM Analizleri.....	28
4. BULGULAR ve TARTIŞMA	29
4.1. BFBVH Reaktörlerine Ait Voltaj Sonuçları	29
4.2. BFBVH Reaktörlerinde Ait Güç Sonuçları	32
4.3. BFBVH Reaktörlerine Ait Cyclic Voltametri Analiz Sonuçları.....	34
4.4. BFBVH Reaktörlerine Ait Biyofilm Direnç Sonuçları.....	36
4.5. SEM.....	39
5. SONUÇ ve ÖNERİLER	44
KAYNAKLAR.....	46
ÖZGEÇMİŞ	54

ÖZET

Bu tez çalışmasında tek bölmeli ve çift bölmeli biyofotovoltaik hücre (BFVH) kullanılarak farklı alg türlerinin elektrik üretim kapasiteleri araştırılmıştır. Bu amaçla *Chlorella vulgaris*, *Chlorella protothecoides*, *Chlorella sp.* ve *Spirulina sp.* türleri kullanılarak elektrik üretim potansiyelleri araştırılmıştır.

En yüksek güç üretimi hem çift bölmeli hem de tek bölmeli (hava katot) BFVH reaktörlerinde *Spirulina sp.* türünde elde edilmiştir. Elde edilen max güç miktarı çift bölmeli BFVH reaktöründe $277,86 \text{ mW/m}^2$, tek bölmeli BFVH reaktöründe ise $217,33 \text{ mW/m}^2$ olarak ölçülmüştür. Diğer alg türleri de literatüre kıyasla yüksek güç sonuçları sergilemiştir. Çift bölmeli BFVH reaktörlerinde *Chlorella vulgaris*'te $142,28 \text{ mW/m}^2$, *Chlorella sp.*'de $170,66 \text{ mW/m}^2$, *Chlorella protothecoides*'te ise $247,06 \text{ mW/m}^2$ maksimum güç yoğunluğu elde edilmiştir. Tek bölmeli (hava katot) BFVH reaktörlerinde ise *Chlorella vulgaris*'te $87,08 \text{ mW/m}^2$, *Chlorella sp.*'de $68,38 \text{ mW/m}^2$, *Chlorella protothecoides*'te $103,01 \text{ mW/m}^2$ 'lik güç miktarları elde edilmiştir. SEM sonuçları BFVH'lerin anot elektrotu yüzeyinde yoğun bir biyofilm tabakasının mevcut olduğunu göstermiştir.

Anahtar Kelimeler: Biyofotovoltaik Hücre (BFVH), Alg, Elektrik Üretimi

SUMMARY

Electricity Generation By Biophotovoltaic Cell

In this thesis, the electricity generation capacities of different algae species were investigated using single and double chamber biophotovoltaic cell (BPVC). For this purpose, the electricity generation capacity of *Chlorella Vulgaris*, *Chlorella protothecoides*, *Chlorella sp.*, and *Spirulina sp.* was determined.

The highest power density was obtained with *Spirulina sp.* in both single (air cathode) and double chamber BPVCs. The maximum power density obtained for single and double chamber (BPVC) with *Spirulina sp.* were 277,86 mW/m² and 217,33 mW/m². The other algae species exhibited high power density compared to the literature. The maximum power density of double chamber BPVCs were 142,28 mW/m², 170,66 mW/m² and 247,06 mW/m² with *Chlorella vulgaris*, *Chlorella sp.* and *Chlorella protothecoides*, respectively. The maximum power density of single chamber (air cathode) BPVCs were 87,08 mW/m², 68,38 mW/m² and 103,01 mW/m² with *Chlorella vulgaris*, *Chlorella sp.* and *Chlorella protothecoides*, respectively. SEM results showed that a dense biofilm layer was present on the anode electrode surface of BPVCs.

Keywords: Biophotovoltaic cell (BPVC), Algae, Electricity generation

TABLÖLAR LİSTESİ

Sayfa No

Tablo 2.1. Biyokütle fiksasyonu ve toplam dünya tüketimi ile güneş enerjisi karşılaştırması	2
Tablo 2.2. BFVH ile ilgili literatür çalışmaları.....	10
Tablo 3.1. Karışık alg türlerinin çoğaltılması için kullanılan mineral çözelti içeriği	17
Tablo 3.2. Chlorella türlerinin çoğaltılması için kullanılan besiyeri içeriği	19
Tablo 3.3. Spirulina sp. türünün çoğaltılması için kullanılan besiyeri içeriği	20
Tablo 3.4. PCR işleminde kullanılan primerlere ait baz dizilimi	23
Tablo 3.5. PCR analizinin işlem basamakları.....	23
Tablo 4.1. BFVH reaktörlerine ait nyquist sonuçları.....	39

ŞEKİLLER LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 2.1. Mikrobiyal Yakıt Hücresi	5
Şekil 2.2. Biyofotovoltaik Hücre (BFVH)	8
Şekil 3.1.Çoğaltılan karışık alg kültürü.....	17
Şekil 3.2. Agarlı besiyerine ekimi yapılan karışık alg kültürlerinin görüntüsü	18
Şekil 3.3.Agarlı besiyerinden alınan saf türlerin çoğaltılması için kullanılan fotobiyoreaktörün görünümü.....	19
Şekil 3.4. A: PCR işleminde kullanılan cihaz, B: agaroz jel elektroforezi	22
Şekil 3.5. PCR işlemi sonucu elde edilen jel görüntüsü.....	22
Şekil 3.6.Çift bölmeli BFVH reaktörü	24
Şekil 3.7. Tek bölmeli (hava katot) BFVH	24
Şekil 3.8.Çalışmada kullanılan elektrot malzemeleri. A: platin kaplı titanyum mesh, B: kalay oksit kaplı bakır mesh, C: platin kaplı karbon kağıt	24
Şekil 3.9. İşletmeye alınan BFVH reaktörleri	25
Şekil 3.10.Çalışmada kullanılan Agilent 34410A Data Acquisition/Switch Unit marka multimetrenin görüntüsü	26
Şekil 3.11. Çalışmada kullanılan multimetreye ait Agilent Benchlink Data Logger 3 V4.3 bilgisayar programının bir görüntüsü	26
Şekil 3.12. Gamry Echem Analyst V6.25 yazılımı ile oluşturulan model.	27
Şekil 4.1. Çift bölmeli BFVH reaktörlerinde elde edilen voltaj grafikleri.....	29
Şekil 4.2. Tek bölmeli (hava katot) BFVH reaktörlerinde elde edilen voltaj grafikleri.....	31
Şekil 4.3. Çift bölmeli BFVH reaktörlerinde elde edilen güç eğrileri	32
Şekil 4.4. Tek bölmeli (hava katot) BFVH reaktörlerinin güç eğrileri	33
Şekil 4.5. Çift bölmeli BFVH reaktörlerine ait cyclic voltametri analiz sonuçları	35
Şekil 4.6. Tek bölmeli (hava katot) BFVH reaktörlerine ait cyclic voltametri analiz sonuçları	36

Şekil 4.7. Çift bölmeli BFVH reaktörlerine ait modellenen sonuç (kırmızı çizgi) ve deneysel sonuç (mavi daire) nyquist grafikleri	37
Şekil 4.8. Tek bölmeli (hava katot) BFVH reaktörlerine ait modellenen sonuç (kırmızı çizgi) ve deneysel sonuç (mavi daire) nyquist grafikleri.....	38
Şekil 4.9. Chlorella vulgaris türünün kullanıldığı çift bölmeli (A, B) ve tek bölmeli (C, D) BFVH reaktörlerinden işletme sonunda anot elektrot yüzeyinden alınan SEM görüntüleri	40
Şekil 4.10. Chlorella sp. türünün kullanıldığı çift bölmeli (A, B) ve tek bölmeli (C, D) BFVH reaktörlerinden işletme sonunda anot elektrot yüzeyinden alınan SEM görüntüleri	41
Şekil 4.11. Chlorella protothecoides türünün kullanıldığı çift bölmeli (A, B) ve tek bölmeli (C, D) BFVH reaktörlerinden işletme sonunda anot elektrot yüzeyinden alınan SEM görüntüleri	42
Şekil 4.12. Spirulina sp. türünün kullanıldığı çift bölmeli (A, B) ve tek bölmeli (C, D) BFVH reaktörlerinden işletme sonunda anot elektrot yüzeyinden alınan SEM görüntüleri	43

KISALTMALAR LİSTESİ

ATP	: Adenozin trifosfat
BES	: Biyoelektrokimyasal sistem
BFVH	: Biyofotovoltaik hücre
CE	: Kolombik verim
EE	: Enerji verimliliği
EIS	: Elektrokimyasal empedans analizi
mW	: Miliwatt
mV	: Milivolt
MYH	: Mikrobiyal yakıt hücresi
OCP	: Açık devre potansiyeli
PDM	: Proton değişim membranı
PCR	: Polimeraz zincir reaksiyonu
V	: Volt
W	: Watt

1. GİRİŞ

1.1. Genel Bilgi

Dünya nüfusundaki hızlı artış, tüm dünyada enerji talebinin giderek artmasına yol açmaktadır. Nüfus artışı sınırlı fosil yakıt rezervlerinin hızlı tüketimi ile birleştiğinde küresel ısınmaya yol açan CO₂'nin salınımının artışına neden olmaktadır. Bu nedenle hem enerji talebindeki artış hem de çevreye olan olumsuz etkileri yenilenebilir enerji kaynaklarının fosil yakıtlara alternatif olarak kullanımını zorunlu hale getirmiştir.

Yenilenebilir enerji kaynaklarından biri alglerdir. Fotosentetik organizmalar olan algler güneş enerjisini kullanarak fotosentez yoluyla ışık enerjisini kimyasal enerjiye dönüştürürler. Alternatif enerji kaynaklarına olan ilginin artmasıyla birlikte algler birçok farklı enerji kaynağının (biyodizel, biyoetanol, biyohidrojen ve biyoelektrik) üretimi için hammadde olarak kullanılmaya başlanmıştır. Söz konusu enerji kaynakları içerisinde biyoelektrik insan aktivitelerinde direk kullanımı ve herhangi bir enerji dönüşümü gerektirmediği için diğer enerji kaynaklarından daha fazla ilgi görmektedir. Bu nedenle BFVH'ler fotosentetik algler kullanılarak enerji üretimi sağlaması açısından oldukça önemlidir. BFVH'de kullanılan elektrot malzemesi ve fotosentetik mikroorganizma türü elektrik üretimini etkileyen en önemli faktörlerdendir. BFVH'lerde genellikle karbon malzemeler ve farklı metal malzemeler anot elektrotu olarak kullanılmıştır. Bu elektrot malzemeleri farklı şekillere ve yüzey alanlarına sahiptirler. Ancak, iyi bir anot malzemesi yüksek elektriksel iletkenliği, mikroorganizmalar ile biyoyumluluğu ve yüksek spesifik yüzey alanı ile ön plana çıkmaktadır. Diğer taraftan, anot bölmesinde bulunan fotosentetik organizmanın türü ve miktarı BFVH'de elde edilen güç miktarını ciddi bir şekilde etkilemektedir.

1.2. Çalışmanın Amacı

Bu çalışmanın amacı, BFVH'lerde yapılan çalışmalarda kullanılan elektrot malzemelerinden farklı yeni bir elektrot kombinasyonu kullanılarak farklı alg türlerinin elektrik üretim performansının belirlenmesidir. Tez çalışması ile kullanılan elektrot kombinasyonundan yüksek güç yoğunluklarına ulaşmak hedeflenmiştir.

2. LİTERATÜR

2.1. Biyoenerji ve Fotosentetik Biyoprosesler

Biyoproses veya biyo-katalizli prosesler yoluyla üretilen enerji, fosil yakıtlara alternatif olarak ümit verici bir enerji kaynağı olarak bilinir. Biyoenerji; biyokütle, biyoyakıt, biyogaz ve biyoelektrik olarak üretilir.

Biyoenerji, fotosentetik organizmaların, güneş enerjisini kimyasal enerjiye dönüştürme, CO₂ yakalama ve sabitleme yoluyla biyokütle üretme konusundaki katalitik kapasitelerine bağlı olarak güneş enerjisiyle yakından ilgilidir. Güneş enerjisi yenilenebilir enerji sektöründeki en yüksek potansiyele sahiptir, çünkü güneşin dünyaya sağladığı enerji oldukça fazladır. Bir saatlik güneş enerjisi dünyada bir yılda tüketilen enerjiden daha fazladır (Tablo 2.1). Dikkate değer bir şekilde, fotosentetik organizmaların biyokütle olarak sabitlediği enerji, fotosentetik işlemin potansiyelini ve etkinliğini gösteren dünya enerji tüketiminden altı kat daha yüksektir (Luo vd., 2013).

Tablo 2.1. Biyokütle fiksasyonu ve toplam dünya tüketimi ile güneş enerjisi karşılaştırması (Luo vd., 2013)

Kaynak /Tüketim	Enerji [(10 ¹⁸ J) yıl ⁻¹]
Güneş Enerjisi	3,850,000
Fotosentezde Sabit Enerji	3,000
Dünya Tüketimi	500

Biyokütle doğrudan veya işlenerek yakıt elde etmek için kullanılabilir. Biyokütlenin yanmasıyla elektrik için ısı üretilirken, dönüşüm yolları (piroliz vs.) gaz ve sıvı yakıtlar elde edilebilir. Bu işlemler, ürünün enerji verimliliğini azaltan yüksek sıcaklık (500-1000 °C) gerektirir, ancak yine de umut verici bir yenilenebilir enerji kaynağıdır (McKendry, 2002).

Alternatif olarak, yakıt üretimi için biyokütlenin düşük sıcaklıkta işlenmesi biyokimyasal dönüşümle gerçekleştirilebilir. Organik maddenin anaerobik çürütücülerdeki metanojenik mikroorganizmalar tarafından parçalanması biyometan (biyogaz) üretmek için kullanılabilir (McKendry, 2002). Kurutulmuş siyanobakteriyel biyokütle, bir enerji

kaynağı olarak fotosentetik mikroorganizmanın değişkenliğini gösteren bir anaerobik çürütücüyü beslemek için kullanılabilir (Inglesby vd., 2012). Ortaya çıkan bir başka biyogaz tipi, foto-biyolojik fermantasyon, enzimatik ve mikrobiyal elektroliz veya bu işlemlerin bir kombinasyonu ile üretilen biyohidrojendir (Chandrasekhar vd., 2015). Ek olarak, zengin biyokütleden elde edilen yağlar mekanik olarak eksrtakte edilebilir ve biyodizel üretmek için doğrudan veya daha fazla işleminden geçirilebilir (McKendry, 2002).

Üçüncü nesil biyoyakıtlar, ümit verici bir alternatif olarak fotosentetik mikroorganizmalardan (mikroalg ve siyanobakteriler) elde edilirler. Fotosentetik mikroorganizmalar hektar başına daha yüksek biyokütle verimi sağlarlar. Ayrıca fotosentetik mikroorganizma yüksek CO₂ konsantrasyonlarında gelişebilir ve endüstriyel faaliyetlerden kaynaklanan CO₂ emisyonlarını azaltmak için bir alternatif sunar (Quintana vd., 2011).

Biyoenenerjinin bir başka formu, biyoelektrokimyasal hücrelerde kendiliğinden üretilen ve fotosentetik sistemler de dahil olmak üzere biyolojik sistemlerin elektrokatalitik etkisinden dolayı ortaya çıkan biyoelektriktir. Biyoelektrik *in vivo* olarak üretilir, bu nedenle diğer foto biyoproseslerle, örneğin biyoremidasyon ve biyodizel üretimi ile entegre edilebilir. Ayrıca, fotosentetik biyokütle kullanan prosesler, genel olarak toksik değildir, bu nedenle açık alan uygulamalarında uygulanabilirler.

2.2. Biyoelektrokimyasal Sistemler (BES)

Biyoelektrokimya, biyolojinin elektrokimyasal yönleriyle, elektron transferini içeren biyokimyasal reaksiyonlar yani elektron kazanma ve elektron kaybı ile ilgilidir.

BES'ler, bir elektrotun yüzeyinde meydana gelen biyoelektrokimyasal reaksiyonlara dayanan teknolojik sistemlerdir. Katı faz elektrotlarıyla etkileşime giren sistemler biyokimya, hücre biyolojisi, elektrokimya, mühendislik ve fizik disiplinlerini içeren verimli bir araştırma alanı haline gelmiştir. Bu konu, çevre politikaları ile ilgili en son araştırma bulgularını sağlayan ve 2013 yılında enerji üretimi, atıksu arıtma ve değerli kimyasalların üretimi için BES'lerin potansiyeli hakkında rapor veren "Çevre İçin Bilim Politikası"nın dikkatini çekmiştir (European Commission, 2013).

Biyokatalizörler olarak bütün mikroorganizmalara sahip biyoanotlar kullanan biyoelektrokimyasal hücreler, mikrobiyal yakıt hücreleri (MYH) olarak bilinir, çünkü bir

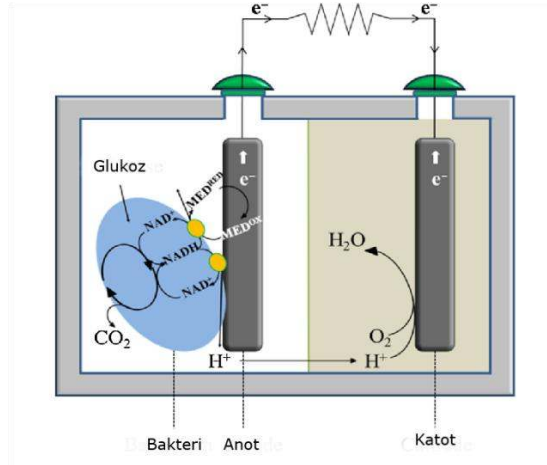
organik yük beslemesi gereklidir. Bu nedenle MYH'nin verimliliğini korumak için sürekli veya en azından aralıklı bir besleme olması gerekir (Rosenbaum vd., 2010; Logan vd., 2006). Alternatif olarak, yakıt gerektirmeden biyoelektrik üreten fotosentetik mikroorganizmalar da araştırılmıştır. Bu tip biyoelektrokimyasal hücreler biyofotovoltaik hücre (BFVH) olarak bilinir (Bombelli vd., 2011). Elektron verici olarak kullanılan mikroorganizmaların performansı, hücre dışı elektron transferi kapasitelerine göre değişir.

Biyoelektrokimyasal hücreler ayrıca anotta, katotta veya her ikisinde biyolojik bir substrat içeren biyolojik elektrolitik hücrelerde de kullanılabilir. Bu sistemde, elektrokimyasal hücre desteklenir ve bir reaksiyon meydana gelir, bu nedenle sistem değerli ürünler üretecek şekilde uyarlanabilir.

2.2.1. Mikrobiyal Yakıt Hücresi (MYH)

Mikrobiyal yakıt hücreleri oksijeni bir elektron alıcısı olarak ortadan kaldırmak için bakteriyel mekanizmanın kullanıldığı ve anaerobik koşullarda işletilen hücrelerdir (Torres vd., 2009; Logan vd., 2006) . MYH reaktörü anot ve katot bölmelerinden oluşup birbirinden proton değişim membranı (PDM) ile ayrılır (Şekil 2.1). Anot bölgesinde üretilen elektronlar harici bir devre ile katot bölgesine aktarılır. Hidrojen ise PDM'ından geçerek katot bölgesinde nihai elektron alıcısı (örneğin O_2) ile birleşerek suya dönüşür. O_2 'nin varlığı ve pozitif elektrik yükü oluşturan H^+ 'ler sayesinde, anot bölgesindeki elektronlar katot bölgesine doğru çekilir ve böylece bir elektrik akımı oluşur. Elektrik akımının oluşabilmesi için anot bölgesinde oksijen veya başka bir elektron alıcı bulunmamalıdır. Elektron alıcı olarak sadece anot elektrotu bulunmalı ve ortamın tamamen anaerobik olması gerekmektedir.

MYH'lerde çamur veya çökelti bir mikroorganizma topluluğu içerir ve oksitleyici bir potansiyele maruz kaldığında bakterilerle zenginleştirilir (Torres vd., 2009). Karışık bakteriler saf kültürlerden daha iyi performans gösterir (Watson vd., 2010). Elektrokimyasal hücreler için önemli üç ana parametre vardır. Bu parametreler OCP, iç direnç ve max güç üretimidir.



Şekil 2.1. Mikrobiyal Yakıt Hücresi (MYH) (Seselj vd., 2015)

MYH'ler, ışığın kullanıldığı elektrokimyasal hücrelerden çok daha yüksek akım yoğunluklarına ulaşır. Fakat MYH'ler güç üretmek için bir yakıtı ihtiyaç duyarlar. Bu nedenle MYH'ler çoğunlukla atıksu arıtımı amacıyla kullanılır (Nimje vd., 2012).

2.2.2. Foto-Mikrobiyal Yakıt Hücreleri (Foto-MYH)

Yakıt ihtiyacı MYH'ler için bir engel oluşturduğundan araştırmaların odağı, enerji kaynağı olarak güneş ışığı ve mikroorganizmanın canlılığını sürdürebilmesi için karbon kaynağı olarak havadaki CO₂ kullanılarak fotosentetik mikrobiyal yakıt hücrelerine (foto-MYH) yönelmiştir. Genel olarak, foto-MYH'lerde ışığa tepki veren alg türleri kullanılır (Darus vd., 2017). Aynı zamanda, mixotrofik mikroorganizmalar ve anoksijenik fotosentetik mikroorganizmalar enerji kaynağı olarak organik substrat ve ışığı kullanırlar (Chandra vd., 2012). Son olarak klasik bir MYH'yi beslemek için fotosentetik olarak kültürlenmiş biyokütle, küresel anlamda ışık kaynaklı elektrik üretimi ile ilişkilidir.

2.2.2.1. Anoksijenik Foto-MYH

Literatürde kükürt içeren ve kükürt içermeyen mor bakteriler olan anoksijenik fotosentetik mikroorganizmalar kullanılarak elektrik üretimi sağlanmıştır (Xing vd., 2009; Badalamenti vd., 2013). Kükürt içermeyen mor bakteri *R. Palustris* kullanılarak, 2,720 mW/m²'lik bir güç miktarı elde edilmiştir. Bu güç miktarı ışıktan bağımsız olarak elde

edilmiştir (Xing vd., 2008). Bununla birlikte *R. Palustris*, yüksek ışık yoğunluğuna maruz kaldığında artan bir güç üretimi sergilemiştir (Xing vd., 2009).

Ayrıca, bu mikroorganizmalar anoksijenik fotosentez yapar ve H₂O dışında fotosentez için bir elektron vericiye ihtiyaç duymaktadır, örneğin elektron verici olarak asetat veya sülfür gereklidir. Bu nedenle sürekli bir yakıt beslemesine ihtiyaç duyarlar.

2.2.2.2. Foto-biyokatotlar

Foto-biyokatotlar, anottaki anaerobik ekzoelektrojenik bakterilerle çalışılırken katot bölgesinin doğal olarak oksijenlenmesini sağlar. Foto-biyokatotların kullanıldığı MYH'nin performansındaki artış, katodik potansiyel artışı ve daha düşük katodik dirençten kaynaklanmaktadır (Wu vd., 2014). Ayrıca, daha yüksek ışık yoğunluğu daha yüksek oksijen oluşumuna yol açması nedeni ile daha yüksek güç çıkışı elde edilir (Wu vd., 2014).

Katotta sabitlenmiş fotosentetik mikroorganizmaların, elektrot yüzeyinde bulunan oksijenin zenginleştirilmesiyle daha yüksek performans gösterdiği rapor edilmiştir (Zhou vd., 2012).

2.2.2.3. Foto-biyoreaktör MYH

Bu sistemde fotosentetik mikroorganizmalar, biyokütle ve besin maddeleri üretmek için yetiştirilir ve daha sonra bir MYH'ye besleme yapılarak kullanılırlar.

Strik vd. (2011) tarafından yapılan bir çalışmada mikroalg *Chlorella Vulgaris* MYH'ye besleme yapmış ve 980 mW/m² 'lik yüksek bir güç yoğunluğu rapor edilmiştir. Bir diğer çalışmada, siyanobakteri türü olan *A.maxima*'nın kurutulmuş biyokütlesinin kullanıldığı MYH ile, asetat veya gliserol ile beslenen MYH'den daha yüksek bir güç çıkışı elde edilmiştir (Inglesby vd., 2012). Güç üretiminin yanı sıra yapılan başka bir çalışmada alg büyümesi için bir foto-biyoreaktörün sürekli bir işlemde MYH'ye bağlandığı bir sistem geliştirilmiştir (Strik vd., 2008).

2.2.3. Fotosentetik Sediment MYH

Fotosentetik sediment MYH, sediment ile doldurulmuş anot bölgesi ve sediment üstünde mikroalg ile dolu bir katot bölgesinden oluşur. Anot bölgesinde bakteriyel aktivite CO₂ üretir ve daha sonra katot bölgesinde alg hücreleri tarafından tüketilir.

He vd. (2009), 145 günden fazla işletilen 1k Ω 'luk bir dirençle maksimum 0,054 mA akım üreten “sediment tipi fototrofik bir MYH” inşa etmişlerdir. Commault vd. (2014), mikroalg ve siyanobakteriler ile birlikte kompleks bir mikrobiyal topluluk içeren fotosentetik bir biyo-katottan oluşan herhangi bir beslemeye yapmadan 180 gün boyunca işletilen ve maksimum 11 mW/m² güç yoğunluğu üretebilen membransız sediment tipi bir MYH geliştirmişlerdir.

2.2.4. Mikroalg MYH Sistemleri

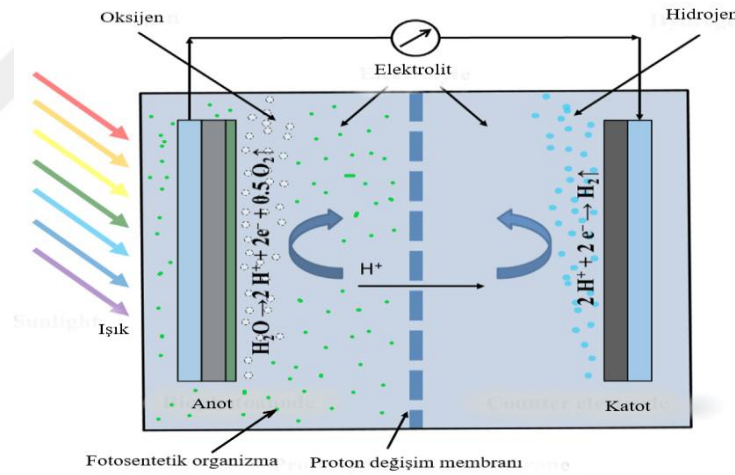
Elektrik üretimi için farklı MYH tipleri üzerine çok sayıda araştırma yapılmış ve her sistemin temel ayırt edici özellikleri tartışılmıştır (Bajracharya vd., 2016; Butti vd., 2016; Kelly vd., 2014). MYH'lerde kullanılan algler, katot bölgesinde fotosentetik reaksiyonlar sırasında etkin elektron alıcıları olarak veya anot bölgesinde elektron verici olarak kullanılabildiğinden ve organik substratları gidermede yetenekli oldukları için bu sistemlerde tercih edilebilmektedir (Wu vd., 2013; Gude vd., 2013; Commault vd., 2014). Alglerin kullanıldığı MYH'ler de bakteri popülasyonları ve alg biyokütlesi arasında bir etkileşim oluşturur ve bu sistem minimum enerji girişi ile çalışır. Algal MYH mekanizması, biyolojik olarak parçalanabilir substratların oksidasyonunu , anotta elektron üreten ve katotta CO₂ oluşmasını içermektedir (He vd., 2009; Powell vd., 2011).

Ma vd. (2017), atıksu kullanarak *Chlorella* biyokütle üretimi için fotosentetik bir MYH tasarlamış ve sistemin hem biyokütle hem de enerji üretimi için sürdürülebilir olduğunu rapor etmişlerdir. Baicha vd. (2016), MYH'lerden biyoenerji üretimi için mikroalg kullanımını incelemiş, aynı zamanda MYH'de katot bölgesinde biyokütle yetiştiriciliği için CO₂ kullanımını araştırmışlardır. MYH'nin yanı sıra alglerin diğer BES'lerde kullanımı da araştırılmıştır.

2.3. Biyofotovoltaik Hücre (BFVH)

BFVH, fotosentetik organizmaları kullanarak ışık enerjisiyle suyu parçalayan ve daha sonra üretilen elektronları anot yüzeyine aktaran yeni bir biyoelektrokimyasal reaktör sistemidir (Bradley vd., 2012). BFVH'ler elektrik üretimi için organik besin kaynaklarına ihtiyaç duymazlar ve herhangi bir atık oluşturmazlar. Bu nedenle bu sistemler çevre dostu ve düşük maliyetlidirler. MYH ve anaerobik enerji üretme yöntemlerinden farklı olarak bir BFVH sera gazı etkisi olan CO₂ üretimi olmadan enerji üretimini ışık enerjisinden faydalanarak sağlar (Bradley vd., 2012).

BFVH'ler klasik MYH sistemlerine benzer olarak anot bölmesi, katot bölmesi ve her iki bölmeyi birbirinden ayıran PDM'den oluşmaktadır (Şekil 2.2). Bu sistemde algler ve siyanobakteriler gibi fotosentetik organizmalar anot bölgesinde kullanılır. Bu organizmalar suyun oksidasyonunu sağlamak için ışık enerjisini kullanırlar.



Şekil 2.2. Biyofotovoltaik Hücre (BFVH) (Kargul vd., 2017)

Daha öncede belirtildiği gibi BFVH'lerde elektron verici olarak su (yakıt) ile birlikte fotosentetik mikroorganizmalar kullanılır. BFVH'lerde mediyatör kullanılmadan elektrik akımı elde edilebildiği için fotosentetik mikroorganizmaların doğrudan elektron transfer kapasitesine yeteneğine sahip olduğu anlaşılmaktadır (McCormick vd., 2011). Yapılan bir çalışmada mikro boyutta bir BFVH'de 100 mW/m² 'ye kadar olan güç çıkışları elde edilmiştir (Bombelli vd., 2015).

Daha öncede belirtildiği gibi BFBVH'ler için enerji kaynağı ışık ve yakıt kaynağı ise sudur. Bu nedenle MYH'lerde olduğu gibi kolombik ve enerji verimliliği hesaplanmaz. Bu nedenle BFBVH sistemlerinde bu parametreler ışık ve fotosentetik aktivite enerji dönüşümü açısından yeniden tanımlanmıştır.

- **Kolombik Verim (CE):** Oksijen üretim hızı (fotosentez hızı) olarak ölçülen suyun bölünmüş moleküllerinden elde edilen akım ve toplam elektrik yüklerin oranı olarak tanımlanır (McCormick vd., 2011).

- **Enerji Verimliliği (EE):** Bir BFBVH tarafından üretilen gücün ve anot yüzey alanı üzerindeki enerjinin oranı olarak tanımlanır (Nishio vd., 2013). Enerji verimliliği BFBVH'de kullanılan ışık kaynağının türüne bağlı olacaktır. Bu nedenle BFBVH çalışmalarının bazılarında filtreli ışık (McCormick vd., 2011) veya LED ışık kullanılmıştır (Bradley vd., 2013).

Literatürde yapılan çalışmalarda fotosentetik ortamlarda daha yüksek ekzoelektrojenik kapasite elde etmek için aşağıdaki öneriler sunulmuştur.

1. Doğal olarak daha yüksek ekzoelektrojenik kapasiteye sahip fotosentetik mikroorganizmalar seçilmeli (Ng vd., 2014).
2. Fotosentetik büyüme iyileştirilmelidir (McCormick vd., 2013).

MYH'ler veya foto-MYH'lerde elde edilenlerden daha düşük güç çıkışlarına rağmen BFBVH'lerin sürdürülebilirliği diğer sistemlere göre oldukça iyidir. Bu nedenle son yıllarda araştırmacılar BFBVH çalışmalarına daha fazla önem vermiştir. Farklı fotosentetik organizmaların farklı elektrot malzemeler ile arasındaki elektrokimyasal etkileşimlerin daha iyi anlaşılması daha yüksek güç verimine ulaşmak için önemli bir adım olacaktır (Schuergers vd., 2017). BFBVH'lerdeki düşük güç çıkışları enerji ihtiyacının düşük olduğu ve elektrik enerjisinin iletiminin oldukça güç veya imkânsız olduğu uzak bölgelerdeki sinyal ışıkları için uygun olabilecektir. Literatürde BFBVH ile ilgili yapılan bazı çalışmalarla ilgili veriler Tablo 2.2'de sunulmuştur.

Tablo 2.2. BFVH ile ilgili literatür çalışmaları

Fotosentetik Mikroorganizma	Anot/Katot	Anot Bölme Hacmi (µL)	Medyatör	Max Güç (mW/m ²)	Çalışmalar
<i>Anabaena sp.</i>	Au/N-Au	4.3	Metilen mavisi	0.0004	Chiao vd., (2006)
<i>Synechocystis sp.</i> <i>PCC 6803</i>	ITO/N-CPt	150	K ₃ [Fe(CN) ₆]	1.2	Bombelli vd., (2011)
<i>Synechococcus sp.</i> <i>WH 5701</i>	ITO/Pt- kaplamalı cam	12600	-	10	McCormick vd., (2011)
<i>Chlorella vulgaris</i>	FTO/karbon kumaş	2300	K ₃ [Fe(CN) ₆]	24	Thorne vd., (2011)
<i>Oscillatoria limnetica</i>	ITO/Pt-C	20000	-	0.02	Bombelli vd., (2012)
<i>Synechocystis sp.</i> <i>PCC 6803</i>	Karbon fiber	60000	-	0.3	Madiraju vd., (2012)
<i>Synechocystis TM</i>	ITO/N-CPt	31/500	K ₃ [Fe(CN) ₆]	0.2	Bradley vd., (2013)
<i>Chlamydomonas reinhardtii</i>	Pre-treated graphite/csc	5×10 ⁵	K ₃ [Fe(CN) ₆]	13	Lan vd., (2013)
<i>Nostoc sp.</i>	CNTCP/laccase on CNTCP	-	-	35	Sekar vd., (2014)
<i>Nostoc sp.</i>	CNTCP/laccase on CNTCP	-	BQ	100	Sekar vd., (2014)
<i>Chlorella Vulgaris</i>	TiO ₂ /rGO	10000	K ₃ [Fe(CN) ₆]	35	Senthilkumar vd., (2018)
<i>Spirulina platensis</i>	Au mesh/grafit kumaş	10 ⁶	-	10	Lin vd., (2013)
<i>Synechocystis sp.</i> <i>PCC 6803</i>	InSnBi alloy/Pt	0.4	-	105	Bombelli vd., (2014)
<i>Pauschulzia pseudovolvox</i>	TiO ₂ /CC	70000	-	6	Luimstra vd., (2013)

*Kısaltmalar; Nafion film (N), karbon platin (CPt), platin (Pt), indiyum kalay oksit (ITO), flor katkılı kalay oksit (FTO), polypyrrole ile karbon boya (PPCP), karbon kağıdı üzerinde karbon nanotüpler (CNTCP), benzokinin (BQ), karbon kumaş (CC), indirgenmiş grafen oksit (rGO).

2.3.1. BFBVH'lerin Çalışma Prensipli

BFBVH'lerin çalışma sistemi mikrobiyal yakıt hücrelerine (MYH) benzerdir. Fakat MYH'ler elektrik üretebilmek için organik maddeye ihtiyaç duyar (Bombelli vd., 2012). BFBVH'ler ise elektrik üretimi için organik besin kaynaklarına ihtiyaç duymazlar ve suyu yakıt olarak kullanıp elektrik üretiminin yanında oksijen (O₂) üretimi de sağlarlar. Bu nedenle bu sistemler çevre dostu ve düşük maliyetlidirler. MYH ve anaerobik enerji üretme yöntemlerinden farklı olarak BFBVH'ler sera gazı etkisi olan karbondioksit (CO₂) salınımına neden olmayıp enerji üretimini ışık enerjisinden faydalanılarak gerçekleştirir (Bradley vd., 2012).

BFBVH'lerde anot bölgesinde fotosentetik organizmalar bulunup ışık enerjisini kullanarak suyun oksidasyonunu gerçekleştirirler. Fotosentezin ışık tepkimelerinde ATP ve NADPH₂ üretimi için gerek duyulan hidrojen ve elektronları elde etmek için su parçalanır. Elde edilen elektronlar (e⁻) anot yüzeyine aktarılır. Fotosentez sırasında üretilen elektronlar, su oluşturmak için indirgeyici elektrotta (katot) proton (H⁺) ve oksijen (O₂) ile yeniden birleşmek üzere dış hat üzerinden hareket eder. Üretilen elektronlar bazı durumlarda düşük elektrik enerjisine ihtiyaç duyan elektronik cihazları çalıştırmak için yeterli olabilir (Driver ve Bombelli, 2011).

Bir BFBVH sisteminde gerçekleşen reaksiyonlar aşağıdaki gibidir:



Bu çalışma ile yeni bir elektrot kombinasyonu kullanılarak farklı fotosentetik mikroorganizmaların elektrik üretim performansları araştırılacaktır.

2.3.2.BFBVH'lerde Kullanılan Malzemeler

Bu sistemlerde kullanılacak malzemelerin seçimi yapılırken maliyet ve elektrik üretim performansı gibi hususlara dikkat edilmelidir. BFBVH'lerde anot malzemesi, katot malzemesi ve membran sistemin önemli üç temel bileşenidir.

2.3.2.1. Anot Malzemesi

Anot malzemeleri, genel maliyet durumu ve enerji üretimindeki performansı nedeniyle BFVH'lerde önemli rol oynamaktadır. Anot malzemesinin seçiminde iyi elektriksel iletkenlik, düşük elektriksel direnç, alglerle güçlü biyouyumluluk, kimyasal stabilite, korozyon önleyiciliği, geniş yüzey alanı ve uygun mekanik dayanım gibi özellikler dikkate alınmalıdır. Yaygın olarak kullanılan anot malzemeleri, grafit plakalar ve çubuklar, karbon fiber fırçalar, karbon bez, karbon kağıt, karbon keçe, karbon nanotüp ve granül grafitir. Karbon elektrot, diğer elektrotlara kıyasla düşük maliyeti nedeniyle yoğun bir şekilde kullanılmaktadır. Ayrıca yüzeyinde biyofilm oluşturma yeteneği nedeniyle de elektrot malzemesinin seçimi oldukça önemlidir. Çünkü biyofilm, elektronun elektrot ve alg substratı yardımıyla yakalanmasına yardımcı olur (Sivakumar vd., 2018).

2.3.2.2. Katot Malzemesi

Katot malzemesi, BFVH'lerde güç üretimini ve performansı önemli ölçüde etkileyen bir diğer faktördür. Katot bölmesinde elektron alıcı olarak genellikle oksijen kullanılmaktadır. Oksijenin kullanılması işletimin sürdürülebilirliği ve teminin kolay olmasından dolayı oldukça avantajlıdır. Ayrıca metal katalizörlerin kullanılması yüksek katodik potansiyellerin elde edilmesine yardımcı olur. Katot elektrotu olarak platinin kullanılması oksijenin indirgenmesini hızlandırır. Fakat platinin kullanılması katot malzemesinin maliyetini önemli ölçüde artırmaktadır.

2.3.2.3. Membran Malzemesi

Anot ve katot bölmelerini birbirinden ayıran membran, iki bölmeli BFVH'deki en önemli bileşenlerden biridir. Membran BFVH'de anottan katota proton transferini sağlar. BFVH'lerde membran seçiminde,

- İyon iletkenliği,
- İç direnç,
- Mekanik, kimyasal ve termal stabilite gibi faktörler önemlidir.

Anottan katota geçen protonlar, anot bölgesindeki pH'ı etkileyebilir ve katottaki pH'ı artırabilir ve bu da performans sorunlarına neden olabilir (Mo vd., 2009). Anotta pH'nın düşmesi mikroorganizma faaliyetini ve doğrudan elektrik üretimini etkileyecektir. Katotta pH'nın artması ise protonların transfer hızını olumsuz etkileyerek BFVH'de katot bölgesine proton transferinin sınırlandırılmasına neden olacaktır. Tampon çözelti kullanılarak katot bölgesinde pH değişimi dengeli hale getirilebilir.

Özetle, BFVH için membranlar aşağıda belirtilen gereklilikleri yerine getirmelidir:

- Yüksek iyonik iletkenlik,
- Yüksek mekanik stabilite,
- Yüksek kimyasal stabilite,
- Düşük yüzey geçişi,
- Maliyet,
- Kullanılabilirlik,

2.3.3. BFVH'lerin Çalışma Koşulları

BFVH'lerin performansını etkileyen en önemli unsurlardan biri elektron verici olarak kullanılan fotosentetik mikroorganizmanın aktivitesidir. BFVH'nin seçilen mikroorganizmalara bağlı çalışma koşulları biyokatalitik kapasitesini belirleyecektir. Bu nedenle fotosentetik mikroorganizmaların ekzoelektrojenik aktivitesini artıran ve BFVH'de enerji kayıplarını en aza indiren koşulları bulmak oldukça önemlidir.

2.3.3.1. Işık

Yapılan çalışmalar, elektrik üretiminin aydınlık koşullarda gerçekleştiğini ve daha yüksek ışık yoğunluklarıyla arttığını göstermiştir (Inglesby vd., 2013; Pisciotta vd., 2010) . Bununla birlikte literatürdeki bazı örnekler, yalnızca karanlıkta bir elektrik akımı üretmek için fotosentetik mikroorganizmaları kullanmıştır (Lin vd., 2013). Ayrıca Fu. vd., (2010) tarafından *Spirulina Platensis* siyanobakterisi kullanılarak biyoelektrokimyasal bir sistemde karanlıktan aydınlığa geçince akımın hızla düştüğü tespit edilmiştir. Başka bir çalışmada, açık devre potansiyellerinin (OCP) karanlıkta daha yüksek olduğu ve artan ışık yoğunluğu ile kademeli olarak azaldığı gözlenmiştir (Fu vd., 2009).

2.3.3.2. Sıcaklık

Biyokütle büyümesi için BFVH'lerde kullanılan mikroorganizmalar için uygun ortam sıcaklığı ayarlanmalıdır. Fu vd. (2010) yaptıkları çalışmada siyanobakteri *Spirulina Platensis* ile aşılınmış bir BFVH'de 20, 30 ve 40 °C'de yapılan çalışmalarda güç üretiminde net bir artış bulmaya çalışmışlardır. Çalışmanın sonunda elde edilen max güç yoğunluğu 6,5 mW/m² olarak rapor edilmiştir.

BFVH'lerin çalışması için minimum enerji girişi gerekir, bu nedenle çoğu çalışma 20-30 °C sıcaklık aralığında gerçekleştirilmiştir (Bombelli vd., 2011; McCormick vd., 2011; Bradley vd., 2013; Cereda vd., 2014) .

2.3.3.3. pH

Sıcaklıkta olduğu gibi, mikroorganizmalar belirli bir aralıktaki pH değerlerinde en uygun şekilde büyürler. Birçok siyanobakteri türü pH 7,5 ve 9,0 arasında ve nadiren pH 5,5'in altında daha iyi büyür (Billini vd., 2008).

Fu vd. (2010), pH 5,5, 8,3 ve 9,9'da güç çıkışını ölçerek *Spirulina Platensis* ile aşılınmış bir BFVH'de pH'nın etkisini araştırmışlardır. Çalışma sonucunda pH 8,3 ile 9,9 arasında büyük bir farkın görülmediği rapor edilmiştir.

2.3.3.4. İletkenlik

Ortam iletkenliği BFVH'nin performansını etkileyen önemli bir faktördür. Bu sistemlerde kullanılan mikroorganizmalarda ortamın iletkenliğini önemli ölçüde etkiler. BFVH'lerde kullanılacak mikroorganizma türlerinin belirlenirken hem siyanobakteriler hem de mikro algler gibi tatlı su ve denizlerde yaşayan türler incelenmiştir (McCormick vd., 2011). BFVH'lerde ortamın iletkenliği deniz suyuna kıyasla sulu çözeltilerde daha düşüktür, bu nedenle elektrokimyasal hücrenin iç direnci bir sistemden diğerine önemli miktarda değişebilir. McCormick vd., (2011) medyatörsüz bir BFVH'de dört farklı mikroorganizma ile çalışmış, tatlı su türleri için 22 kΩ ve 333 kΩ deniz türleri için 3 kΩ'luk iç dirençler elde etmişlerdir. Ancak BFVH çalışmalarının çoğunda tatlı su mikroorganizmaları kullanıldığından ve bu mikroorganizmalar için daha fazla veri olmasından dolayı, tatlı su türleri daha çok kullanılmıştır.

2.3.3.5. Medyatör Konsantrasyonu

Redoks medyatörleri, elektronların hücre dışına transferinde sistemin daha verimli olmasını sağlamaktadır. Ferrisiyanid /ferrisiyanür, bu amaç için ideal bir redoks medyatörüdür. Bombelli vd., (2011) ferrisiyanid konsantrasyonunun güç çıkışı üzerindeki etkisini incelemiş, ferrisiyanid konsantrasyonunun (0.5mM ile 35 mM) artırılmasıyla BFBH'de üretilen gücün arttığını tespit etmişlerdir.

Thorne vd. (2014), mikroalg *Chlorella Vulgaris* kültürlerinde medyatörün etkin konsantrasyonunda bir kayıp olduğunu, hücre yüzeyinde sıkışmadan dolayı %14'e kadar ferrisiyanidin eksik olduğunu tespit etmişlerdir. Özellikle medyatör ilavesi düşük konsantrasyonda ise biyoelektrokimyasal hücrenin etkinliğinin azaldığı belirtilmiştir.

Kimyasal mediyatörlerin yüksek konsantrasyonlarda kullanılması membran polarizasyonu ve birçok metabolik reaksiyon üzerinde olumsuz etkilere sahip olup mikroorganizmalar üzerinde toksik etkilere neden olabilir. Bu nedenle BFBH'lere mediyatör ilavesi genellikle düşük konsantrasyonlarda ilave edilmektedir. Örneğin ferrisiyanid için bu değer 1 mM seviyesindedir (Bradley vd., 2013; Anderson vd., 2015; Laohavisit vd., 2015).

2.3.3.6. Nutrientler

Besin, mikroorganizmaların canlılığı için önemli bir faktördür. Mikroorganizmaların besin eksikliği yaşamaları durumunda bu koşullarla başa çıkabilmek için bir dizi tepki göstermektedir (Ho vd., 2012).

Çeşitli mikroalg türünde demir eksikliği, plazma zarındaki ferrik redüktazların aşırı ekspresyonuna bağlı olarak ferrisiyanid redüksiyon kapasitesinin artmasına neden olmuştur (Lynnes vd., 1998). Örneğin, *Chlamydomonas reinhardtii* türü ferrisiyanid redüksiyon oranlarında 10 kat artış göstermiştir (Xue vd., 1998). Bununla birlikte bu metabolik aktivite BFBH'lerde düşük dayanıklılık nedeniyle kullanılmamıştır.

2.3.3.7. CO₂

Karbondiyoksitin biyokütle üretimi üzerindeki etkisi ve fotoreaktörlerde CO₂ birikimi, literatürde yapılmış çalışmalarla kapsamlı bir şekilde incelenmiştir (Lee vd., 2004). Bununla birlikte BFVH'lerde CO₂'nin elektronlara rakip olduğu ve CO₂ seviyelerinin düşük tutulması gerektiği tartışılmıştır. Bradley vd., (2012) tarafından önerildiği gibi CO₂ fiksasyon, ekzoelektrojenik oranları artırmak için suyun fotolizinden korunmalı veya ayrılmalıdır. Ayrıca yüksek hücre dışı ferrik redüktaz aktivitesi gösteren yüksek CO₂ ile (mikroalg %20, bitkide %0.08 CO₂) yetiştirilen birkaç mikroalg ve bitki örneği vardır (Jin vd., 2009).

2.3.3.8. Biyokütle

Bir BFVH'de fotosentetik mikroorganizma miktarının artmasıyla yüksek akım değerleri elde edilebilir. Fu vd., (2009) medyatörsüz bir sisteme yüklenen yüksek miktardaki biyokütlenin, aydınlıkta ve karanlıkta açık devre potansiyeli (OCP) değerlerini yükselttiğini rapor etmiştir. OCP değerleri biyofilm kalınlığının belirli bir değeri geçmesi durumunda elektrot yüzeyine doğru elektron transferinin kısıtlanmasından dolayı azalmaktadır. Fu vd., (2009) yaptıkları çalışmada elektrot yüzeyindeki biyokütle miktarının sadece elektron üretimini sağlamak için önemli olmadığını, aynı zamanda biyofilm kalınlığı ve elektrot alanının da BFVH performansında önemli bir etkiye sahip olduğunu rapor etmişlerdir. Çalışmada OCP değerleri ışıktan bağımsız olarak belirli bir biyokütle yoğunluğundan sonra düşmüştür. Bu verilere dayanarak biyofilmdeki bazı katmanların elektron transfer edemediği ancak yine de biyofilm içindeki etkileşimi değiştiren ve böylece OCP'yi azaltan iç tabakalarla etkileşime girdiği tahmin edilebilir.

Ferrisiyanürün kullanıldığı bir BFVH'de artan biyokütle konsantrasyonunun güç üretimiyle orantılı olduğu belirtilmiştir (Bombelli vd., 2011). Bunun sebebinin kullanılan medyatörün elektron iletimine yardımcı olduğu ve biyokütle miktarının elektron iletimini kısıtlayıcı etkisini ortadan kaldırması olarak düşünülebilir. Bununla birlikte bazı araştırmacılar bu durumun çok yoğun türlerde geçerli olmadığını belirtmişlerdir, çünkü daha yüksek hücre yoğunluğu ışık geçirgenliği ve ferrisiyanür difüzyonu üzerinde olumsuz etkilere de neden olabilmektedir.

3. MATERYAL ve METOT

3.1. Çalışmada Kullanılan Alg Türlerinin Çoğaltılması

Bu çalışmada *Chlorella vulgaris*, *Chlorella protothecoides*, *Chlorella sp.* ve *Spirulina sp.* türleri Elazığ Kehli (38°35'36.3"N 39°20'23.6"E) deresinden alınan su numunesi kullanılarak çoğaltılmıştır. İlk olarak alınan su numunesinden Muñoz vd. (2005) belirtilen mineral çözeltisi (Tablo 3.1) kullanılarak 2000 lux ışık yoğunluğunda 15 gün süre ile karışık alg türleri çoğaltılmıştır (Şekil 3.1).

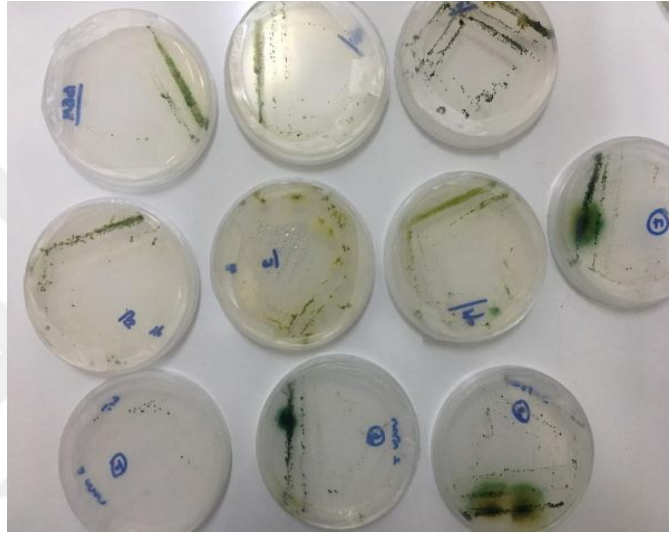


Şekil 3.1.Çoğaltılan karışık alg kültürü

Tablo 3.1. Karışık alg türlerinin çoğaltılması için kullanılan mineral çözelti içeriği (Muñoz vd., 2005)

Kimyasal	Miktar g/l
KNO ₃	1,25
MgSO ₄ . 7H ₂ O	0,625
CaCl ₂ . 2H ₂ O	0,1105
H ₃ BO ₃	0,1142
FeSO ₄ .7H ₂ O	0,0498
ZnSO ₄ .7H ₂ O	0,0882
MoO ₃	0,0071
MnCl ₂ .4H ₂ O	0,0144
CuSO ₄ .5H ₂ O	0,0157
Co(NO ₃) ₂ .6H ₂ O	0,0049
EDTA	0,5
KH ₂ PO ₄	0,6247
K ₂ HPO ₄	1,3251

Karışık alg türlerinin çoğaltılması sağlandıktan sonra saf türlerin çoğaltılması işlemine başlanmıştır. Karışık alg kültüründen saf türler elde edebilmek için agarlı besiyeri kullanılmıştır (Şekil 3.2). *Chlorella* türleri için kullanılan agar besiyerinin içeriği için www.ccap.ac.uk'de belirtilen Bold Basal Medium (BBM) kullanılmıştır. *Spirulina sp.* türünün izole edilmesi için FadelMadkour vd., (2012) çalışmasında kullanılan Zarrouk Ortamı hazırlanmıştır. Daha sonra agarlı besiyerine karışık türlerden ekim yapılmış 15 Gün boyunca 25 °C sıcaklıkta 12 saat aydınlık/karanlık şartlarda büyümeye bırakılmıştır.



Şekil 3.2. Agarlı besiyerine ekimi yapılan karışık alg kültürlerinin görüntüsü

Agarlı besiyerinden izole edilen *Chlorella* türleri Bold Basal Medium (BBM), *Spirulina sp.* türü ise Zarrouk Ortamı kullanılarak 2000 lux ışık yoğunluğunda 12 saat aydınlık/karanlık olacak şekilde 15 gün boyunca kültürlenmiştir (Şekil 3.3). Saf türlerin çoğaltılması için kullanılan mineral çözeltiler Tablo 3.2’de ve Tablo 3.3’de verilmiştir.



Şekil 3.3.Agarlı besiyerinden alınan saf türlerin çoğaltılması için kullanılan fotobiyoreaktörün görünümü

Tablo 3.2. Chlorella türlerinin çoğaltılması için kullanılan besiyeri içeriği (Bold Basal Medium (BBM))
(URL 1)

Kimyasal	Miktar g/L
NaNO ₃	10,0
MgSO ₄ .7H ₂ O	3,0
NaCl	1,0
K ₂ HPO ₄	3,0
KH ₂ PO ₄	7,0
CaCl ₂ .2H ₂ O	1,0
İz Elementler	
ZnSO ₄ .7H ₂ O	8,82
MnCl ₂ .4H ₂ O	1,44
MoO ₃	0,71
CuSO ₄ .5H ₂ O	1,57
Co(NO ₃) ₂ .6H ₂ O	0,49
H ₃ BO ₃	11,42
EDTA-KOH Çözeltisi	
EDTA	50,0
KOH	31,0
FeSO ₄ .7H ₂ O	4,98

Tablo 3.3. *Spirulina* sp. türünün çoğaltılması için kullanılan besiyeri içeriği (Zarrouk Ortamı)

Kimyasal	Miktar g/l
NaNO ₃	2,5
K ₂ HPO ₄	0,5
K ₂ SO ₄	1,0
NaCl	1,0
MgSO ₄ · 7H ₂ O	0,2
CaCl ₂ · 2H ₂ O	0,04
FeSO ₄ · 7H ₂ O	0,01
EDTA	0,5
NaHCO ₃	16,8
Mikroelement çözeltisi	1ml
Mikroelement çözeltisi: H ₃ BO ₃ , 2,86; MnCl ₂ · 4H ₂ O, 1,81; ZnSO ₄ · 7H ₂ O, 0,222; Na ₂ MoO ₄ , 0,0177; CuSO ₄ · 5H ₂ O, 0,079 (g/L).	

Karışık numuneden elde edilen saf türlerin çoğaltılması sağlandıktan sonra her bir tür için sırasıyla DNA ekstraksiyonu, PCR ve sekans dizileme işlemleri gerçekleştirilmiştir.

3.2. Mikrobiyal Analizler

3.2.1. DNA Ekstraksiyonu

Elde edilen saf türlerin DNA izolasyonu için DNeasy PowerSoil DNA izolasyon kiti (Hiden, Germany) kullanılmıştır. Ekstraksiyon işlemi üretici firmanın verdiği protokol kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Uygulanan işlemler aşağıda sıralanmıştır.

1. DNA ekstraksiyon tüpü yavaşça vorteks ile karıştırıldı.
2. C1 çözeltisi kontrol edildi ve C1 çökelmiş ise kullanmadan önce 60 °C'ye kadar ısıtıldı.
3. 60 µL C1 çözeltisi, DNA ekstraksiyon tüpüne ilave edildi ve birkaç kez ters düz edilip yavaşça vorteks ile karıştırıldı.

4. Vorteks için kullanılan vorteks adaptör tüp tutucunun yatay olarak kullanılmış DNA ekstraksiyon tüpü 10 dk maksimum hızda vorteks ile karıştırılmış ve daha sonra oda sıcaklığında 30 s 10000 rpm’de santrifüjlendi.
5. Tüp içerisindeki üst sıvı 400-500 µL olacak şekilde temiz bir tüpe aktarıldı.
6. 250 µL C2 çözeltisi tüplere ilave edildi ve 5 s vortekslendi. Daha sonra tüpler 4 °C ‘de 5 dk inkübe edildi.
7. Tüpler oda sıcaklığında 10000 rpm’de 1 dk santrifüjlendi.
8. Tüp içerisindeki üst sıvı 600 µL’yi aşmayacak şekilde alındı ve 2 ml’lik temiz tüpe aktarıldı.
9. C3 çözeltisinden 200 µL alınarak bir tüpe ilave edildi ve kısa süre vortekslendi.
10. Tüpler oda sıcaklığında 10000 rpm’de 1 dk santrifüjlendi.
11. Tüp içerisindeki üst sıvı 750 µL’yi aşmayacak şekilde 2 ml’lik temiz tüpe aktarıldı.
12. C4 çözeltisi kullanılmadan önce karıştırıldı, 1200 µL C4 çözeltisi tüpe ilave edildi ve 5s vortekslendi.
13. Tüp içerisinde 675 µL alınarak spin filtreye ilave edildi ve oda sıcaklığında 1 dk 10000 rpm’de santrifüjlendi. Spin filtreden geçen kısım uzaklaştırılarak işlem tekrarlandı. Her örnek için yükleme tekrarlandı.
14. C5 çözeltisinden 500 µL spin filtreye ilave edilerek ve oda sıcaklığında 10000 rpm’de 1 dk santrifüjlendi ve geçen kısım uzaklaştırıldı.
15. Spin filtre oda sıcaklığında 10000 rpm’de 1 dk santrifüjlendi.
16. Spin filtre 2 ml’lik temiz bir tüpe yerleştirildi.
17. 100 µL C6 çözeltisi spin filtredeki beyaz membranın merkezine ilave edildi.
18. Spin filtre oda sıcaklığında 10000 rpm’de 30 s santrifüjlendi.
19. Spin filtre uzaklaştırıldı ve tüp içerisindeki DNA numunesi PCR işlemi için hazır hale getirildi.

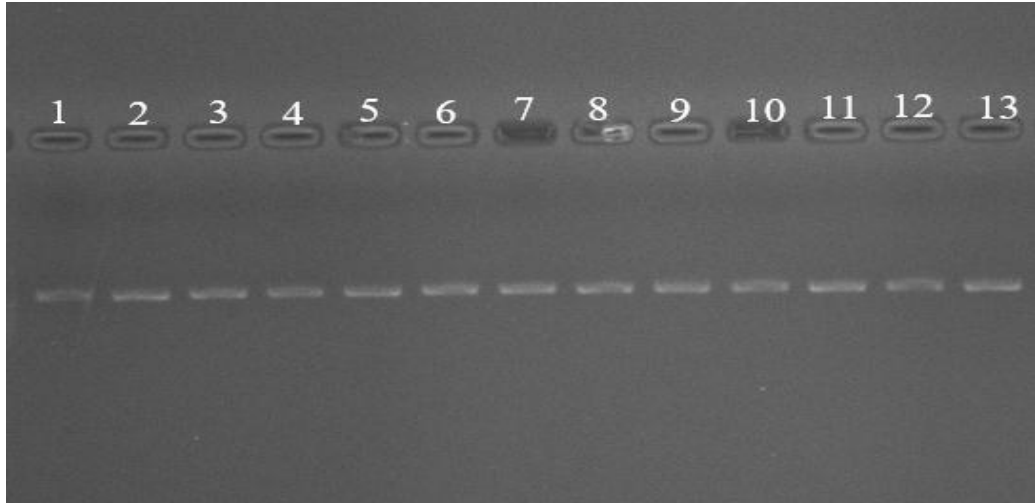
3.2.2. Polimeraz Zincir Reaksiyonu (PCR)

PCR işleminde mikrobiyal türleri belirlemekte kullanılacak olan 18S rRNA genlerinin çoğaltılması için TECHNE/TC-512 marka PCR cihazı kullanılmıştır. PCR işleminde kullanılan primerler ve işlem basamakları Tablo 3.4 ve Tablo 3.5’de verilmiştir. PCR

işleminde sonra analizin başarılı olup olmadığını kontrol etmek amacıyla PCR ürünleri Sybr Safe boyası ile boyanmış ve %1'lik (w/v) agaroz jelinde 100 V'da 20 dk süre ile yürütülmüştür (Şekil 3.4). PCR işlemine ait agaroz jel görüntüsü Şekil 3.5'de verilmiştir.



Şekil 3.4. A: PCR işleminde kullanılan cihaz, B: agaroz jel elektroforezi



Şekil 3.5. PCR işlemi sonucu elde edilen jel görüntüsü.

Tablo 3.4. PCR işleminde kullanılan primerlere ait baz dizilimi

Primer adı	Baz dizilimi
Forward (Euk1A)	5'- CTGGTTGATCCTGCCAG -3'
Reverse (Euk516r-GC)	5'- ACCAGACTTGCCCTCC-CGCCCCGGGGCGCGCCCCGGGCGGGGCGGGGGCACGGGGG -3'

Tablo 3.5. PCR analizinin işlem basamakları

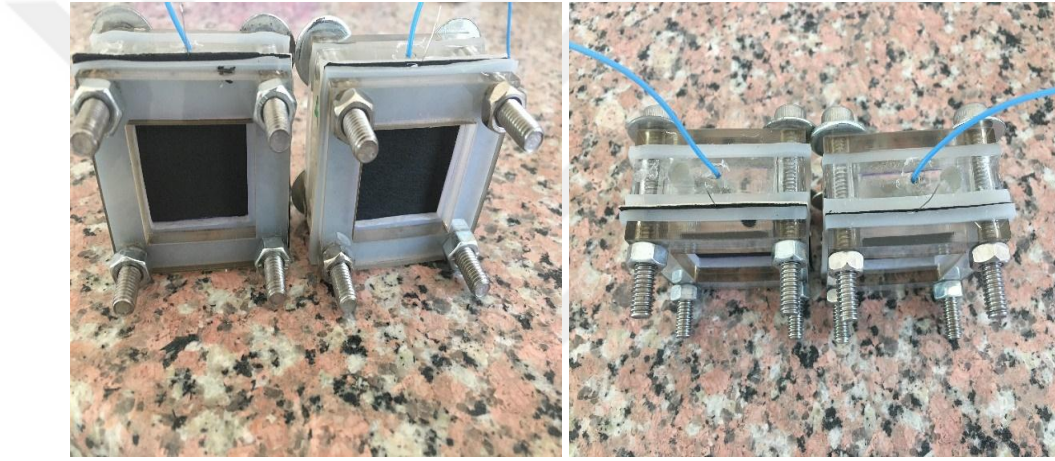
İşlem Basamağı	Süre (saniye)	Sıcaklık (°C)
Innitial denaturation	130	94
Denaturation	30	94
Anneling	45	56
Extension	130	72

3.3. BFBVH Reaktörlerinin Kurulumu

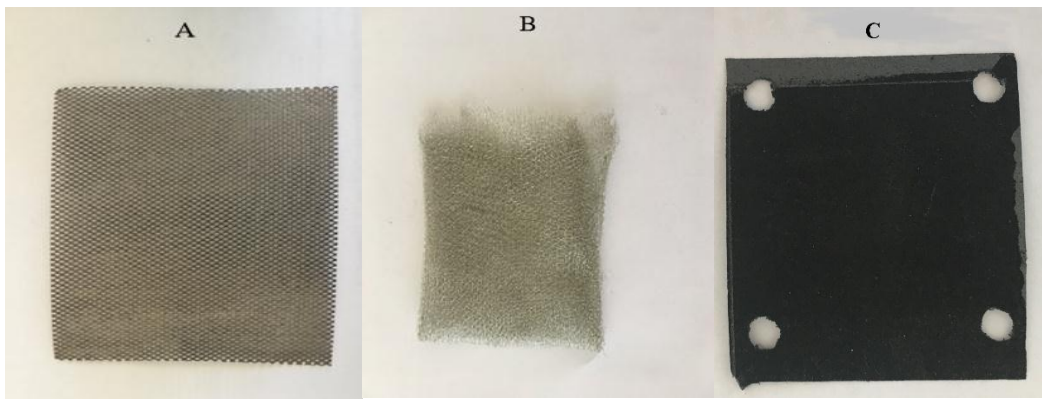
Elektrik üretim çalışmaları çift bölmeli (Şekil 3.6) ve tek bölmeli (Şekil 3.7) BFBVH reaktörlerinde gerçekleştirilmiştir. BFBVH reaktörleri pleksiglas malzeme kullanılarak anot ve katot bölmelerinin etkin hacmi 10 ml olacak şekilde hazırlanmıştır. BFBVH'lerde anot malzemesi olarak kalay oksit kaplı bakır mesh, katot malzemesi olarak çift bölmeli reaktörde platin kaplı titanyum mesh ve tek bölmeli reaktörlerde ise platin kaplı karbon kağıt elektrot kullanılmıştır. Tek bölmeli BFBVH'lerde AvCarb P50T marka gaz difüzyon tabakası kullanılmıştır. Elektrot malzemelerine ait görüntü Şekil 3.8'de verilmiştir. BFBVH'lerde elektrokimyasal analizler üçlü elektrot sistemi ile gerçekleştirilmiş ve bu amaçla Ag/AgCl referans elektrot kullanılmıştır. BFBVH'lerde ULTREX CMI- 7000 marka proton değişim membranı (PDM) kullanılarak hidrojen (H⁺) iyonlarının transferi ve bölmelerin fiziksel ayrımı gerçekleştirilmiştir. PDM'ler kullanılmadan önce üretici firmanın önerdiği prosedür kullanılarak şartlandırılmıştır (40 °C de %5'lik NaCl çözeltisinde bekletilmiştir). Bölmeler cıvata yardımıyla sıkıştırılarak sabitlenmiş ve silikon conta kullanılarak sızdırmazlık sağlanmıştır. BFBVH reaktörleri işletmeye alınmadan önce musluk suyu ile doldurularak sızdırmazlık testi yapılmıştır. Sistemde anot ve katot elektrotları 1000 Ω'luk dış direnç kullanılarak sabitlenmiştir.



Şekil 3.6.Çift bölmeli BFBVH reaktörü



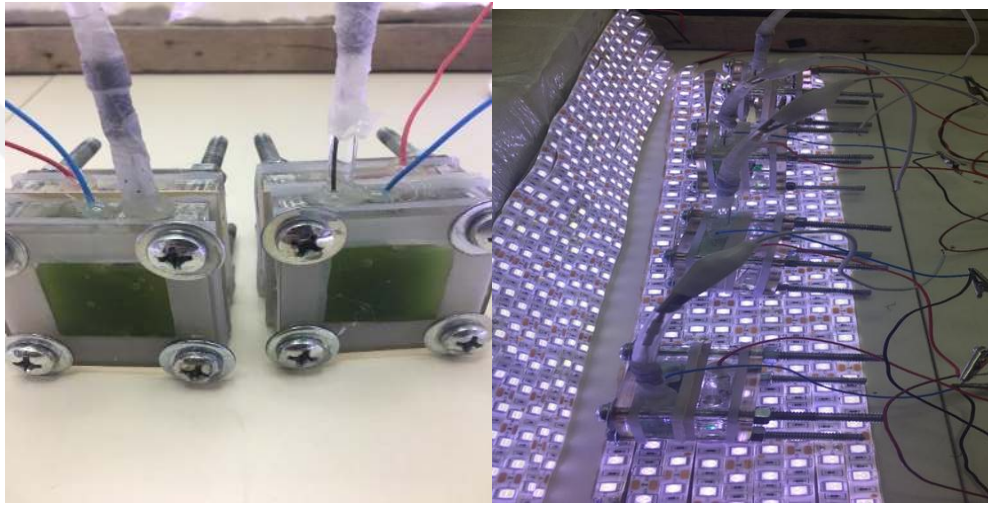
Şekil 3.7. Tek bölmeli (hava katot) BFBVH



Şekil 3.8. Çalışmada kullanılan elektrot malzemeleri. A: platin kaplı titanyum mesh, B: kalay oksit kaplı bakır mesh, C: platin kaplı karbon kağıt

3.4. BFVH Reaktörlerinin İşletmeye Alınması

Reaktörler işletmeye alınmadan önce anot bölgesi kuru ağırlığı 3 gr olan saf alg kültürleriyle katot bölgesi ise 50 mM fosfat tamponu içeren çözelti ile doldurulmuştur. BFVH reaktörleri kesikli olarak işletilmiş ve işletme sürecinde reaktörlere herhangi bir besleme yapılmamıştır. Reaktörler 10 gün süre ile işletilmiş ve elektrik üretimi kayıt altına alınmıştır (Şekil 3.9).



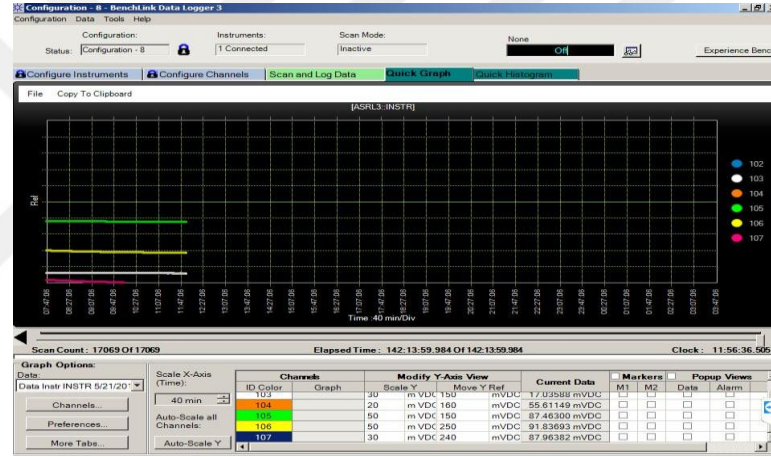
Şekil 3.9. İşletmeye alınan BFVH reaktörleri

3.5. Voltaj Ölçümü

BFVH reaktörlerinde üretilen elektrik miktarı çok kanallı Agilent 34410A Data Acquisition/Switch Unit multimetre kullanılarak 3 dk aralıklarla ölçülmüştür (Şekil 3.10). BFVH reaktörlerinde ölçülen voltaj değerleri, Agilent Benchlink Data Logger 3 V4.3 yazılımı kullanılarak on-line olarak bilgisayara kaydedilmiştir (Şekil 3.11). BFVH reaktörlerinde elde edilen veriler BFVH'lerde performans göstergelerinden olan voltaj (mV) şekline dönüştürülerek sunulmuştur.



Şekil 3.10.Çalışmada kullanılan Agilent 34410A Data Acquisition/Switch Unit marka multimetrenin görüntüsü



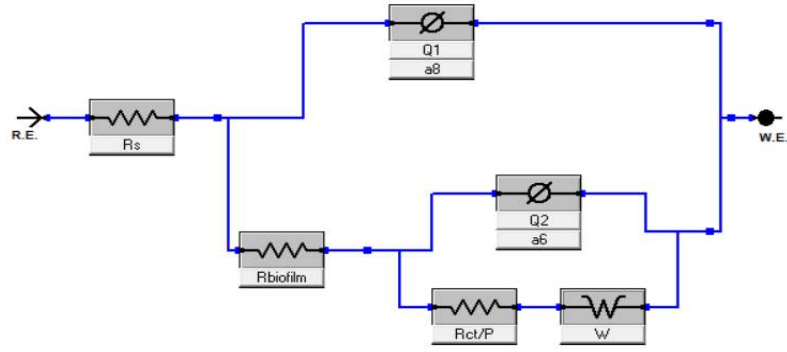
Şekil 3.11. Çalışmada kullanılan multimetreye ait Agilent Benchlink Data Logger 3 V4.3 bilgisayar programının bir görüntüsü

3.6. Elektrokimyasal Analizler

Bu çalışmada elektrokimyasal analizler Gamry Interface 1000 potansiyostat kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Elde edilen veriler Gamry Framework Data Acquisition yazılımı kullanılarak analiz edilmiştir.

3.6.1. Elektrokimyasal Empedans Analizi (EIS)

Elektrokimyasal empedans analizleri (EIS), 5 mV genlikli sinyal ile 0,1 Hz ile 100 kHz frekans aralığında gerçekleştirilmiştir. Elde edilen veriler kullanılarak BFVH reaktörlerinin farklı bileşenlerine ait direnç değerleri Gamry Echem Analist V6.25 yazılımı ile Chen vd., (2017) tarafından verilen model oluşturularak belirlenmiştir. Kullanılan model Şekil 3.12’de verilmiştir.



Şekil 3.12. Gamry Echem Analyst V6.25 yazılımı ile oluşturulan model. (Rct: yük transfer direnci, Rbio: Biofilm direnci, Rs: solüsyon direnci, W: Warburg sabiti)

3.6.2. Cyclic Voltametri Analizi

Cyclic voltametri ölçümleri üçlü elektrot sistemi; anot elektrodu, katot elektrodu ve Ag/AgCl referans elektrot kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Analizler -1V ile 0,75V aralığında 5 mV/s tarama hızında gerçekleştirilmiştir. BFVH reaktörlerinde cyclic voltametri analizleri işletme süresi sonunda anot sıvısı ve elektrot yüzeyinde biyofilm mevcut iken yapılmıştır.

3.6.3. Lineer Sweep Voltametri Analizi

Lineer sweep voltametri analizi, 0,25 mV/s tarama hızında Ag/AgCl referans elektrodu kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Analiz sonucunda ölçülen değerler (potansiyele karşı akım değerleri) aşağıdaki denklemler kullanılarak akım yoğunluğu değerlerine karşı güç yoğunluğu birimlerine çevrilmiş ve BFVH reaktörlerine ait güç eğrileri

oluşturulmuştur. Akım yoğunluğu, elektrot birim alandan geçen akım miktarıdır. Güç yoğunluğu, elektrot birim alanı başına üretilen güç miktarıdır.

$$V = I.R \quad (3.1)$$

$$P = I.V = I^2.R \quad (3.2)$$

Burada;

V: Potansiyel, volt

I: Akım, amper

R: Direnç, ohm

P: Güç, watt

ifade etmektedir.

Elektrot yüzey alanına bağlı olarak akım yoğunluğu (A/m^2) ve güç yoğunluğu (mW/m^2) eşitlik (3.3) ve eşitlik (3.4) kullanılarak hesaplanmıştır;

$$\text{Akım yoğunluğu} = \frac{I(A)}{\text{elektrot yüzey alanı}(m^2)} \quad (3.3)$$

$$\text{Güç yoğunluğu} = \frac{I.V}{\text{elektrot yüzey alanı}(m^2)} \quad (3.4)$$

3.7. SEM Analizleri

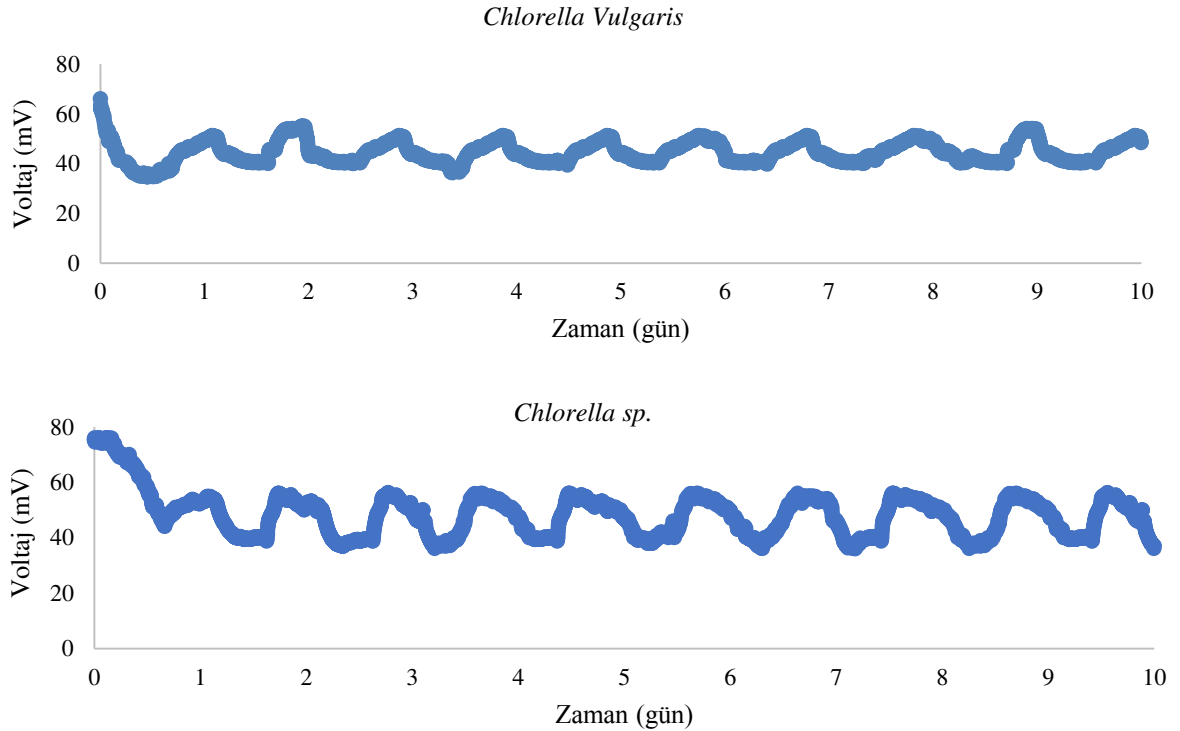
SEM analizleri ZEISS marka elektron mikroskobu kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Biyofilm numuneleri oda sıcaklığında kurutulmuştur. Numuneler daha iyi bir elektriksel iletkenlik sağlanması için yüzeyleri 20 dk süreyle altınla kaplanmıştır. Ardından görüntüleme işlemi yapılmıştır.

4. BULGULAR ve TARTIŞMA

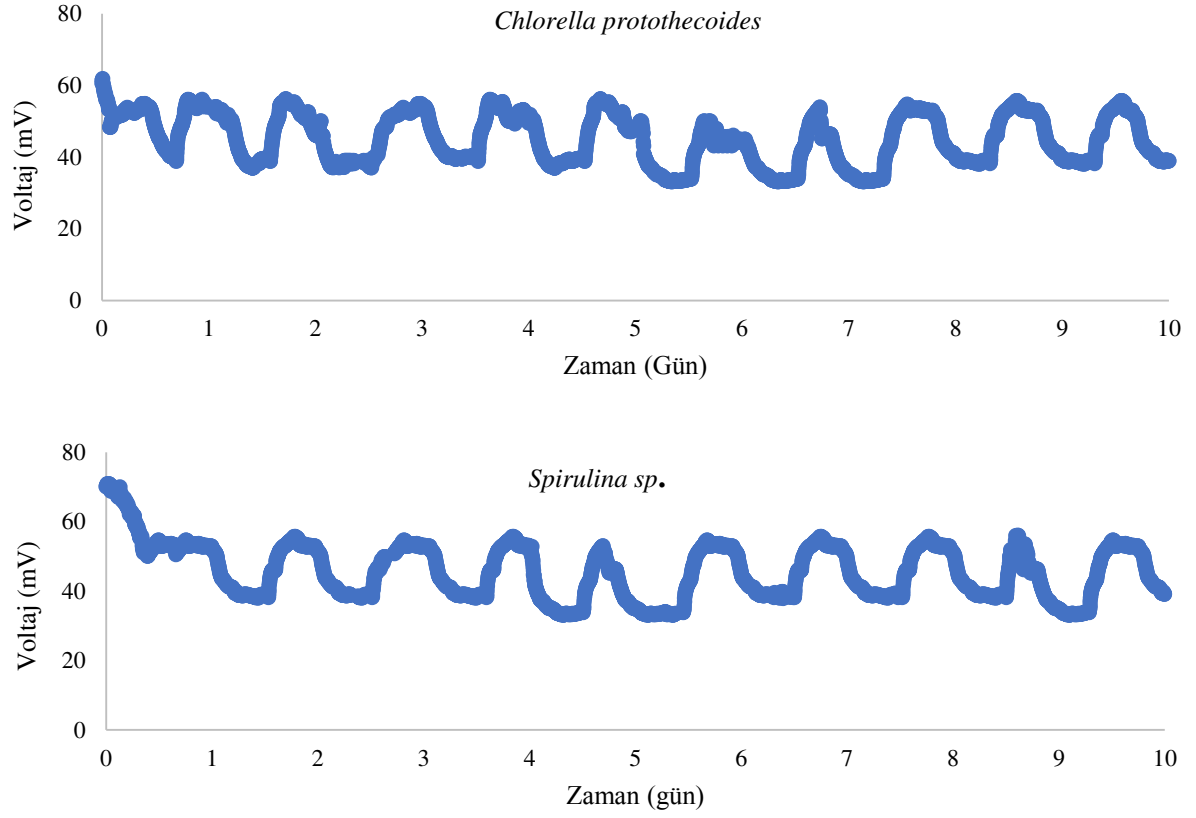
Chlorella vulgaris, *Chlorella sp.*, *Chlorella protothecoides* ve *Spirulina sp.* türlerinin kullanıldığı çift bölmeli ve tek bölmeli BFBH reaktörleri 10 gün boyunca 12 saat ışık/12saat karanlık şartlarda işletilmiştir.

4.1. BFBH Reaktörlerine Ait Voltaj Sonuçları

Farklı alg türleri ile işletilen çift bölmeli ve tek bölmeli BFBH'lerin voltaj üretimi Şekil 4.1 ve Şekil 4.2'de verilmiştir. BFBH'lerin voltaj üretimi aydınlık ve karanlık şartlarda fotosentetik aktiviteye bağlı olarak değişkenlik göstermiştir. BFBH reaktörlerinde voltaj değerleri aydınlık şartlarda fotosentetik aktiviteye bağlı olarak artmış, karanlık şartlarda ise fotosentetik aktivitenin azalması veya durması ile düşmüştür.

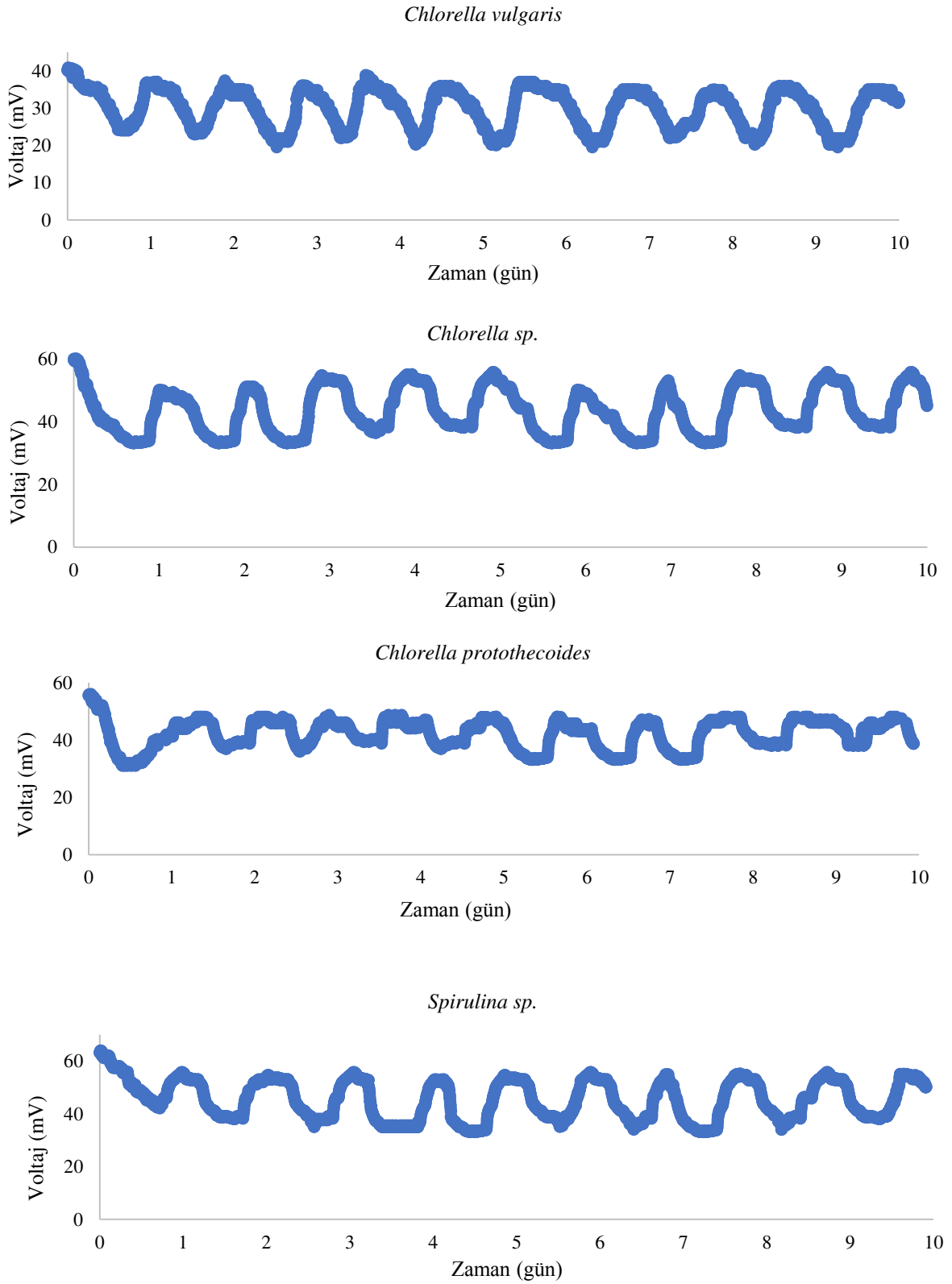


Şekil 4.1. Çift bölmeli BFBH reaktörlerinde elde edilen voltaj grafikleri



Şekil 4.1. Çift bölmeli BFVH reaktörlerinde elde edilen voltaj grafikleri (Devamı)

Çift bölmeli BFVH reaktörlerinde voltaj değerleri 60-75 mV arasında değişmiştir. Voltaj değerleri karanlık şartlarda ortalama 40 mV iken aydınlık şartlarda bu değer ortalama 65 mV olarak değişmiştir.



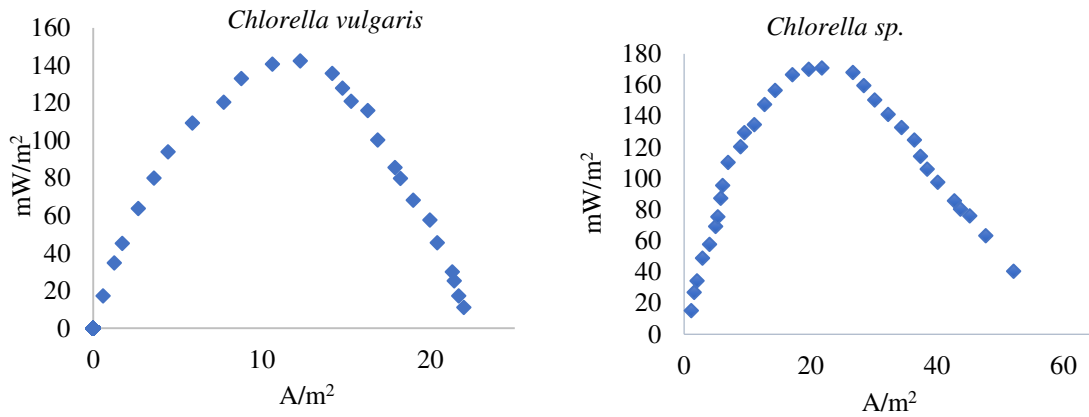
Şekil 4.2. Tek bölmeli (hava katot) BFBH reaktörlerinde elde edilen voltaj grafikleri

Tek bölmeli (hava katot) BFVH reaktörlerinde elde edilen voltaj değerleri 40-55 mV arasında değişmiştir. Voltaj değerleri karanlık şartlarda ortalama 30 mV iken aydınlık şartlarda bu değer ortalama 45 mV değerine yükselmiştir.

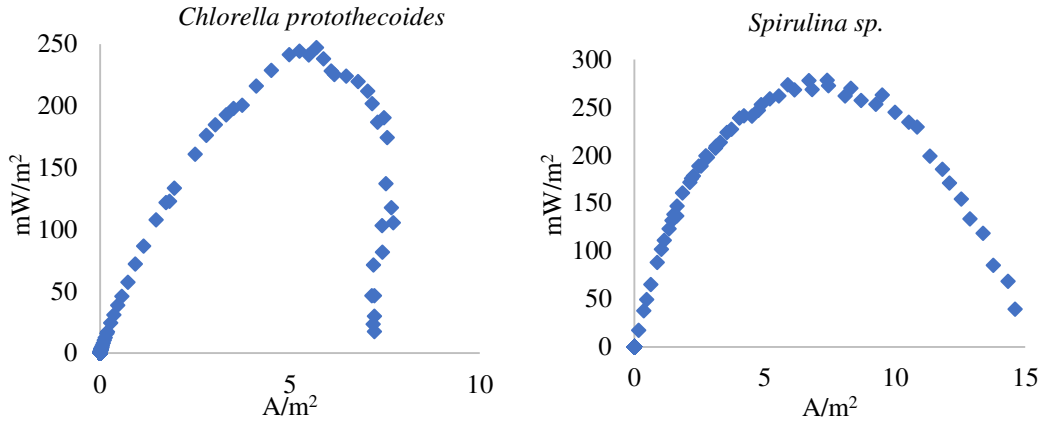
4.2. BFVH Reaktörlerinde Ait Güç Sonuçları

Dört farklı alg türünün kullanıldığı BFVH reaktörlerine ait güç sonuçları Şekil 4.3 ve Şekil 4.4’ de verilmiştir. En yüksek güç üretimi *Spirulina sp.* türün kullanıldığı çift bölmeli BFVH’de $277,86 \text{ mW/m}^2$ olarak elde edilmiştir. Çift bölmeli *Chlorella vulgaris*, *Chlorella sp.*, *Chlorella protothecoides* türlerinin kullanıldığı BFVH’lerde ise elde edilen güç değerleri sırasıyla; $142,28 \text{ mW/m}^2$, $170,66 \text{ mW/m}^2$, $247,06 \text{ mW/m}^2$ olduğu tespit edilmiştir.

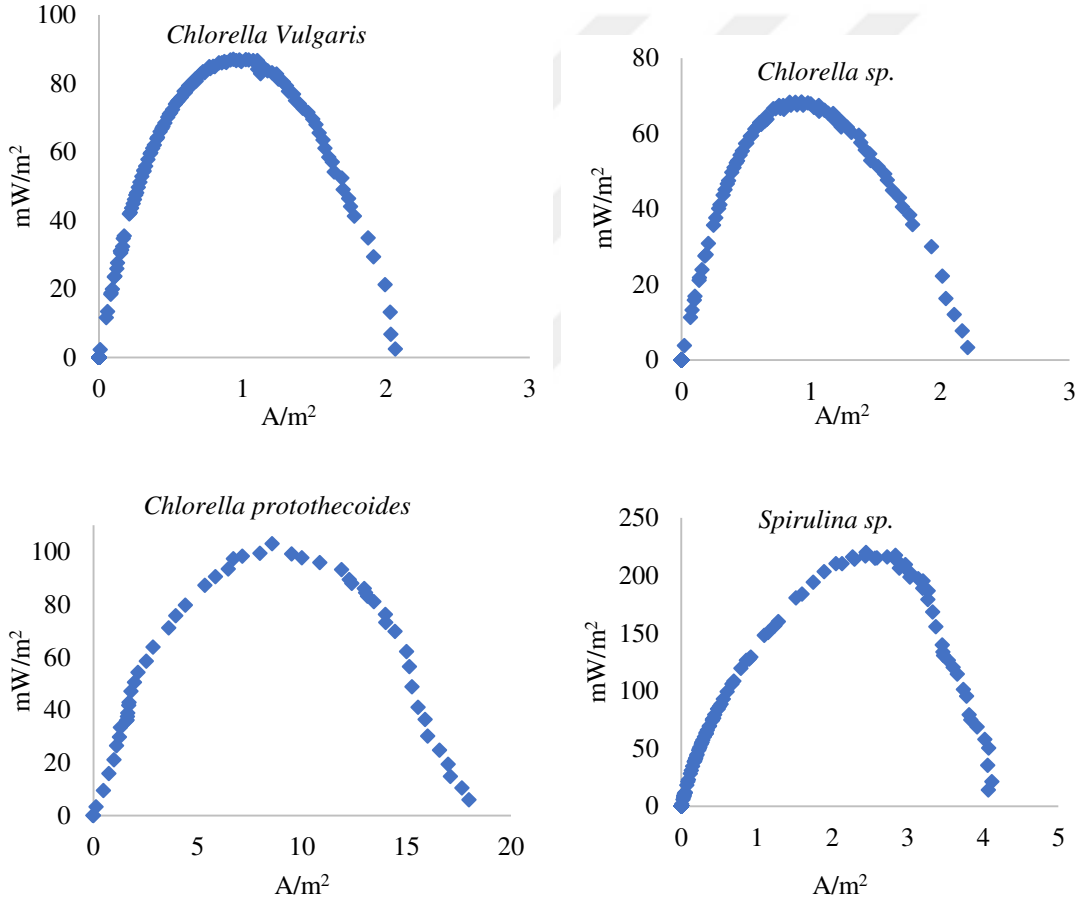
Tek bölmeli (hava katot) BFVH’lerde ise en yüksek güç üretimi *Spirulina sp.* türünün kullanıldığı reaktörde $217,33 \text{ mW/m}^2$ olarak elde edilmiştir. *Chlorella vulgaris*, *Chlorella sp.*, *Chlorella protothecoides* türlerinin kullanıldığı reaktörlerde ise sırasıyla $87,08 \text{ mW/m}^2$, $68,38 \text{ mW/m}^2$, $103,01 \text{ mW/m}^2$ olarak elde edilmiştir.



Şekil 4.3. Çift bölmeli BFVH reaktörlerinde elde edilen güç eğrileri



Şekil 4.3. Çift bölmeli BFBH reaktörlerinde elde edilen güç eğrileri (Devamı)



Şekil 4.4. Tek bölmeli (hava katot) BFBH reaktörlerinin güç eğrileri

Bu çalışmada elde edilen güç değerleri literatürde yapılmış birçok çalışmadan daha yüksektir. Thorne vd., (2011) tarafından *Chlorella vulgaris* türü ile yapılmış bir çalışmada elektrot olarak FTO/karbon kumaş kullanılmış ve BFBH’de 24 mW/m²’lik bir güç miktarı elde edilmiştir. N. Senthilkumar vd., (2018) tarafından yapılmış diğer bir çalışmada

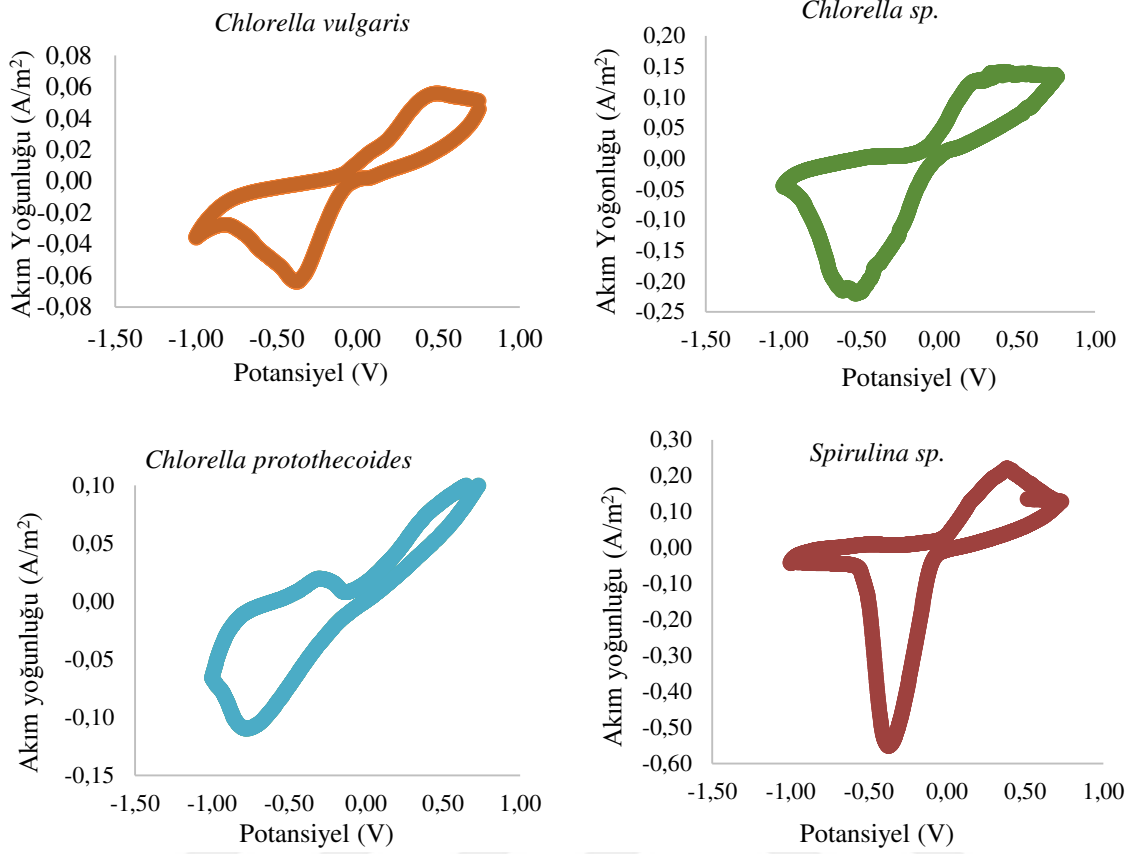
TiO₂/rGO elektrotun kullanılmış ve *Chlorella vulgaris* türü ile 35 mW/m²'lik bir güç miktarı elde edilmiştir. Lin vd., (2013) tarafından *Spirulina sp.* türü kullanılarak yapılmış başka bir çalışmada ise elektrot olarak Au mesh/grafit kullanılmış ve BFVH'de 10 mW/m²'lik bir güç miktarı elde edilmiştir.

Bu tez çalışmasından elde edilen güç değerleri literatür değerleri (Tablo 2.2) ile kıyaslandığında kullanılan elektrot malzemelerinin elektrik üretimine olumlu bir katkısı açık bir şekilde tespit edilmiştir.

4.3.BFVH Reaktörlerine Ait Cyclic Voltametri Analiz Sonuçları

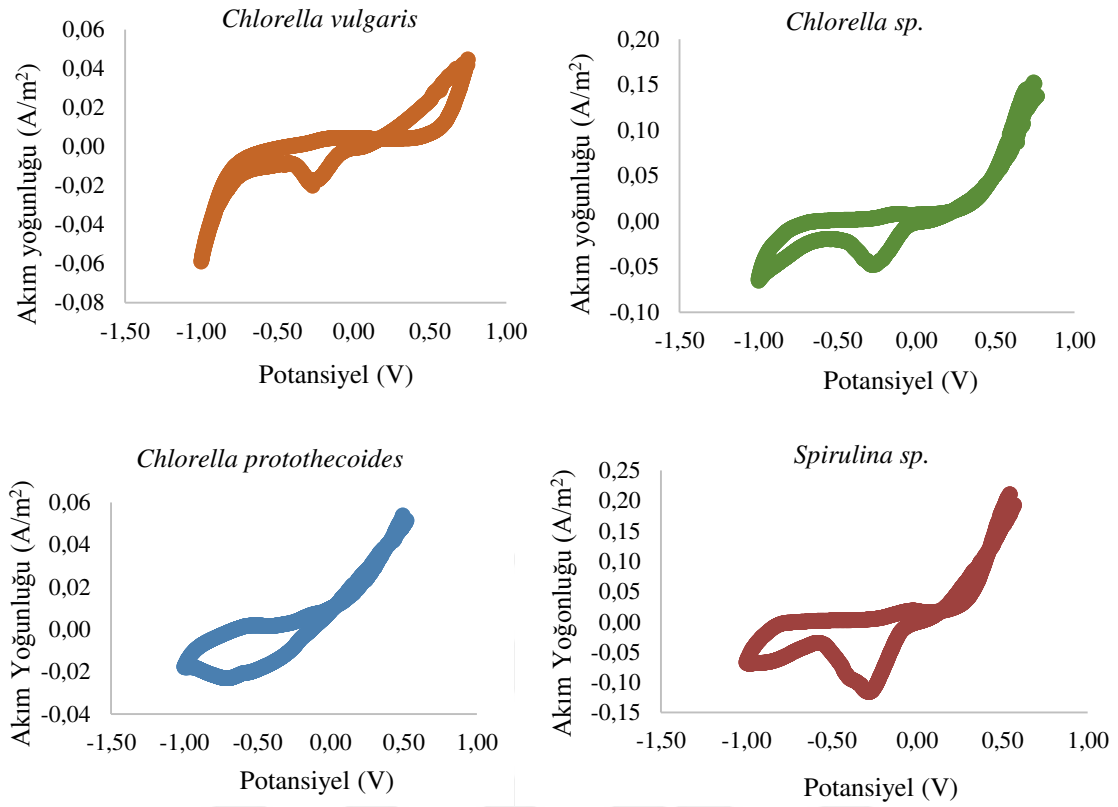
Bu çalışmada BFVH'lerde elde edilen cyclic voltametri sonuçları Şekil 4.5 ve Şekil 4.6' da verilmiştir.

Çift bölmeli BVFH reaktörlerine ait cyclic voltametri eğrilerinde anot ve katot pikleri belirgin bir şekilde gözlenmiştir. Akım yoğunluğunun en yüksek olduğu anot piki *Spirulina sp.* türünde 0,212 A/m² olarak elde edilmiştir. *Chlorella vulgaris*, *Chlorella sp.*, *Chlorella protothecoides* türleri için ise anot pik değerleri sırasıyla 0,055 A/m², 0,138 A/m², 0,107 A/m² olarak elde edilmiştir. Katot pikleri ise *Chlorella vulgaris*, *Chlorella sp.*, *Chlorella protothecoides*, *Spirulina sp.*, türleri için sırasıyla -0,064 A/m², -0,220 A/m², -0,110 A/m², -0,551 A/m² olarak elde edilmiştir.



Şekil 4.5. Çift bölmeli BFBVH reaktörlerine ait cyclic voltametri analiz sonuçları

Tek bölmeli (hava katot) BFBVH reaktörlerine ait cyclic voltametri eğrilerinde akım yoğunluğunun en yüksek olduğu anot piki *Spirulina sp.* türünde $0,211 \text{ A/m}^2$ olarak elde edilmiştir. *Chlorella vulgaris*, *Chlorella sp.*, *Chlorella protothecoides* türlerinde ise sırasıyla $0,045 \text{ A/m}^2$, $0,152 \text{ A/m}^2$, $0,054 \text{ A/m}^2$ olarak elde edilmiştir. Katot pikleri ise *Chlorella vulgaris*, *Chlorella sp.*, *Chlorella protothecoides*, *Spirulina sp.*, türleri için sırasıyla $-0,058 \text{ A/m}^2$, $-0,064 \text{ A/m}^2$, $-0,028 \text{ A/m}^2$, $-0,115 \text{ A/m}^2$ olarak elde edilmiştir.

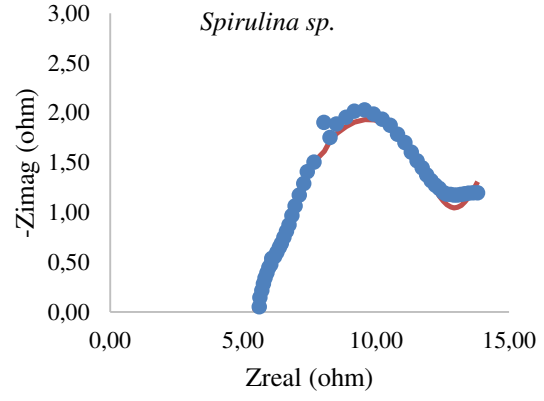
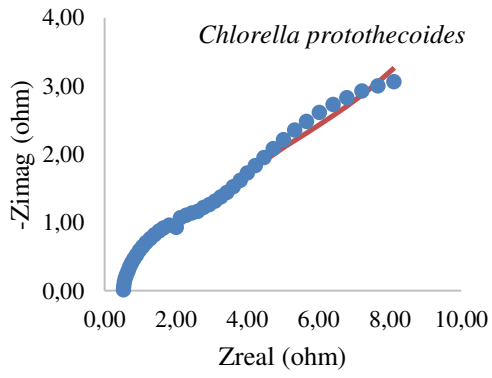
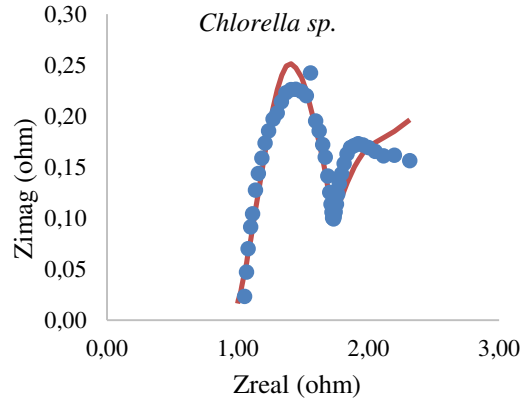
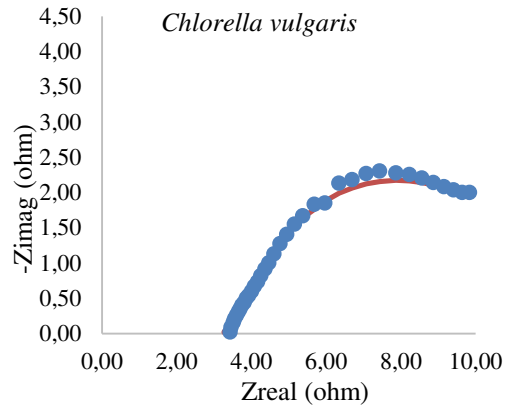


Şekil 4.6. Tek bölmeli (hava katot) BFBH reaktörlerine ait cyclic voltametri analiz sonuçları

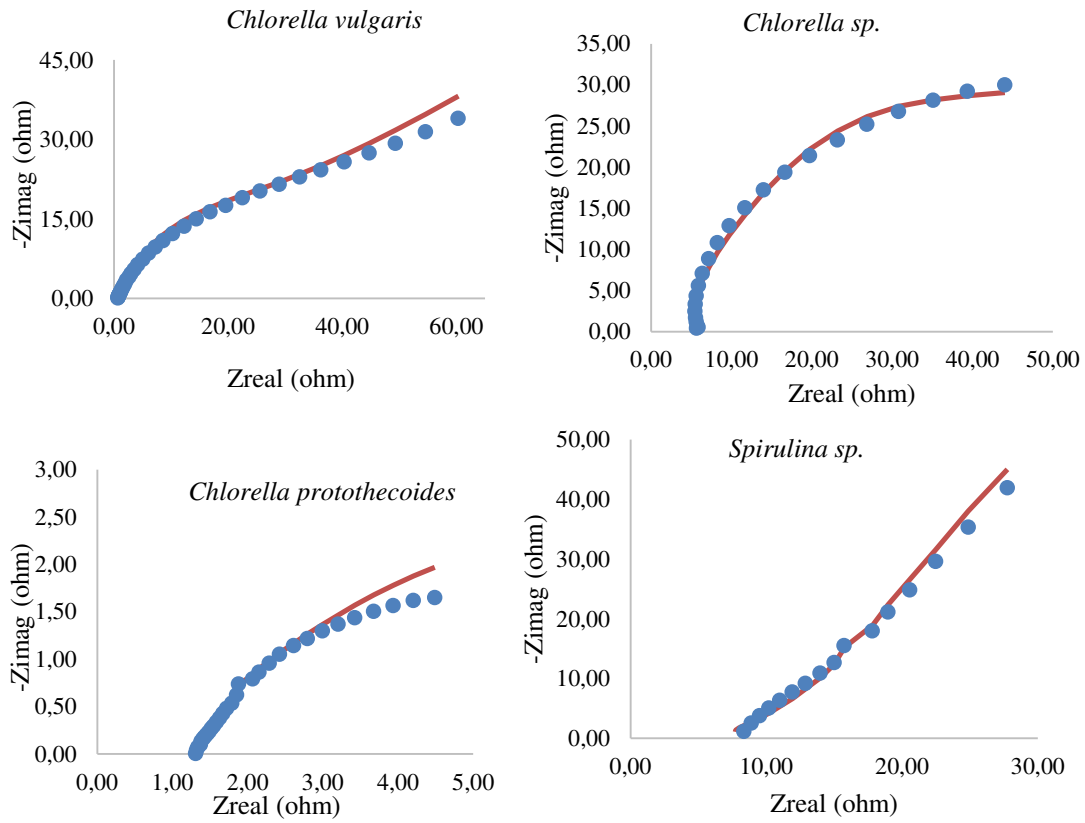
Elde edilen yüksek akım değerleri alg türlerinin yüksek elektron transfer etkinliğine sahip olduğunu göstermektedir. Özellikle *Spirulina sp.* türünün kullanıldığı BFBH’de elde edilen yüksek pikler yüksek elektron transfer etkinliğinin biyofilm aktivitesine bağlı olduğunu göstermektedir.

4.4. BFBH Reaktörlerine Ait Biyofilm Direnç Sonuçları

BFBH’lerde anot elektrotu yüzeyinde oluşan biyofilm yapısında bulunan alglerin ürettikleri elektronları anot yüzeyine aktarmaları BFBH’nin elektrik üretim verimi açısından kritik bir öneme sahiptir. Elektron transferinin iyi olması aktif alg yoğunluğu ve biyofilm yapısının iyi olmasıyla açıklanır. BFBH’lerde biyofilm direnci empedans sonuçları Şekil 14’te verilen model uygulanarak hesaplanmıştır. Çift bölmeli ve tek bölmeli (hava katot) BFBH reaktörleri için elde edilen Nyquist eğrileri Şekil 4.7 ve Şekil 4.8’de verilmiştir.



Şekil 4.7.Çift bölmeli BFVH reaktörlerine ait modellenen sonuç (kırmızı çizgi) ve deneysel sonuç (mavi daire) nyquist grafikleri



Şekil 4.8. Tek bölmeli (hava katot) BFBH reaktörlerine ait modellenen sonuç (kırmızı çizgi) ve deneysel sonuç (mavi daire) nyquist grafikleri

Chlorella vulgaris, *Chlorella sp.*, *Chlorella protothecoides*, *Spirulina sp.* türlerinin kullanıldığı BFBH reaktörlerinden elde edilen nyquist sonuçlarının kullanılan modele göre analiz edilmesi sonucu elde edilen değerler Tablo 4.1’de verilmiştir.

Chlorella vulgaris türünün kullanıldığı çift bölmeli BFBH’de anot biyofilm direnci, yük transfer direnci ve solüsyon direncinin sırasıyla 0.74, 2.09, ve 3.53 Ω olduğu tespit edilmiştir. Tek bölmeli BFBH’de ise bu değerlerin 6.05, 21.46 ve 0.71 Ω olduğu tespit edilmiştir.

Chlorella sp. türünün kullanıldığı çift bölmeli BFBH’de anot biyofilm direnci, yük transfer direnci ve solüsyon direncinin sırasıyla 0.35, 48.72 ve 1.02 Ω olduğu tespit edilmiştir. Tek bölmeli BFBH’de ise bu değerlerin 37.90, 4.16 ve 0.71 Ω olduğu tespit edilmiştir.

Chlorella protothecoides türünün kullanıldığı çift bölmeli BFBH’de anot biyofilm direnci, yük transfer direnci ve solüsyon direncinin sırasıyla 1.14, 8.33 ve 0.57 Ω olduğu

tespit edilmiştir. Tek bölmeli BFVH’de ise bu değerlerin 0.37, 10.36 ve 1.35 Ω olduğu tespit edilmiştir.

Spirulina sp. türünün kullanıldığı çift bölmeli BFVH’de anot biyofilm direnci, yük transfer direnci ve solüsyon direncinin sırasıyla 6.36, 0.96 ve 5.60 Ω olduğu tespit edilmiştir. Tek bölmeli BFVH’de ise bu değerlerin 28.35, 122.9 ve 6.36 Ω olduğu tespit edilmiştir.

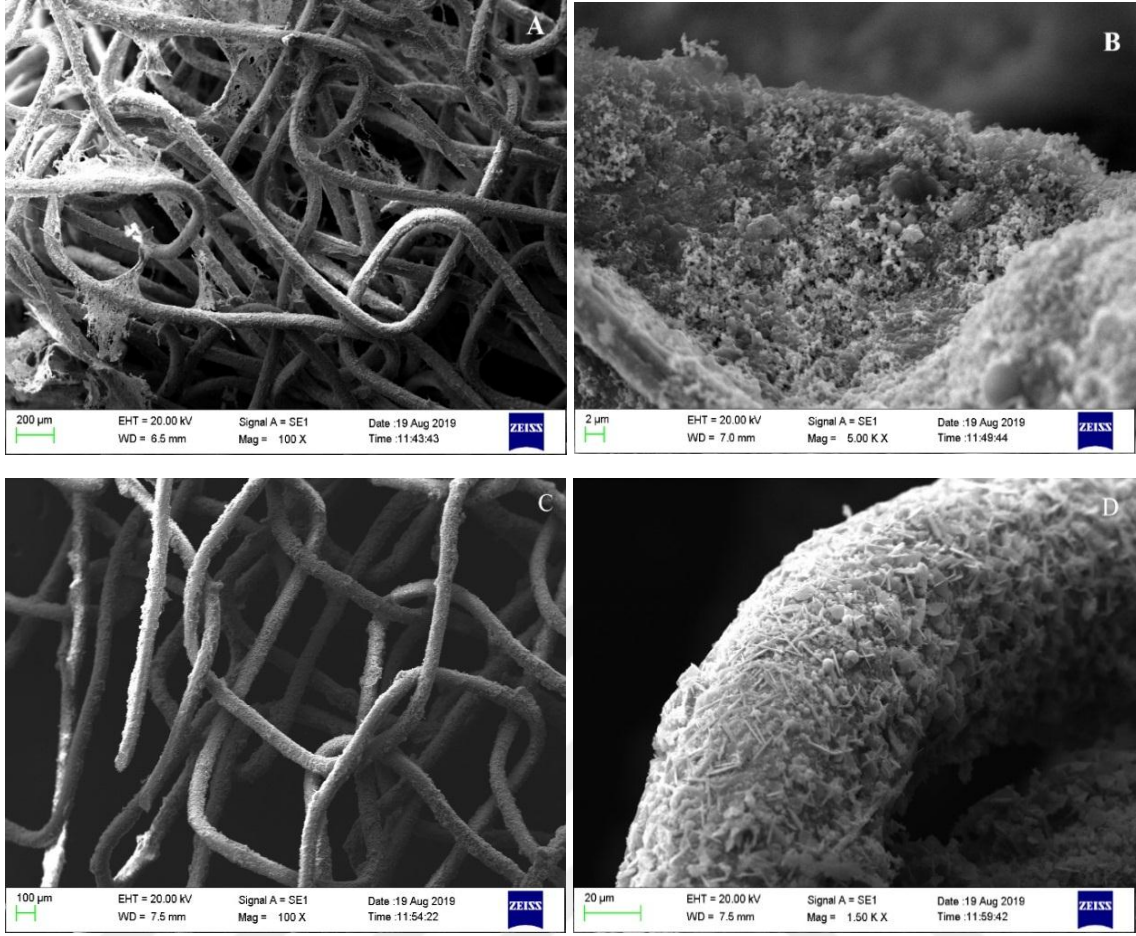
Tablo 4.1. BFVH reaktörlerine ait nyquist sonuçları (R_{bio}:Anot biyofilm direnci, R_{ct}: Anot yük transfer direnci, R_s:Solüsyon direnci)

Çift Bölmeli BFVH			
Tür	R _{bio}	R _{ct}	R _s
<i>Chlorella Vulgaris</i>	0.74	2.09	3.53
<i>Chlorella sp.</i>	0.35	48.72	1.02
<i>Chlorella protothecoides</i>	1.14	8.33	0.57
<i>Spirulina sp.</i>	6.36	0.96	5.60
Tek Bölmeli BFVH			
<i>Chlorella Vulgaris</i>	6.05	21.46	0.71
<i>Chlorella sp.</i>	37.90	4.16	6.19
<i>Chlorella protothecoides</i>	0.37	10.36	1.35
<i>Spirulina sp.</i>	28.35	122.9	6.34

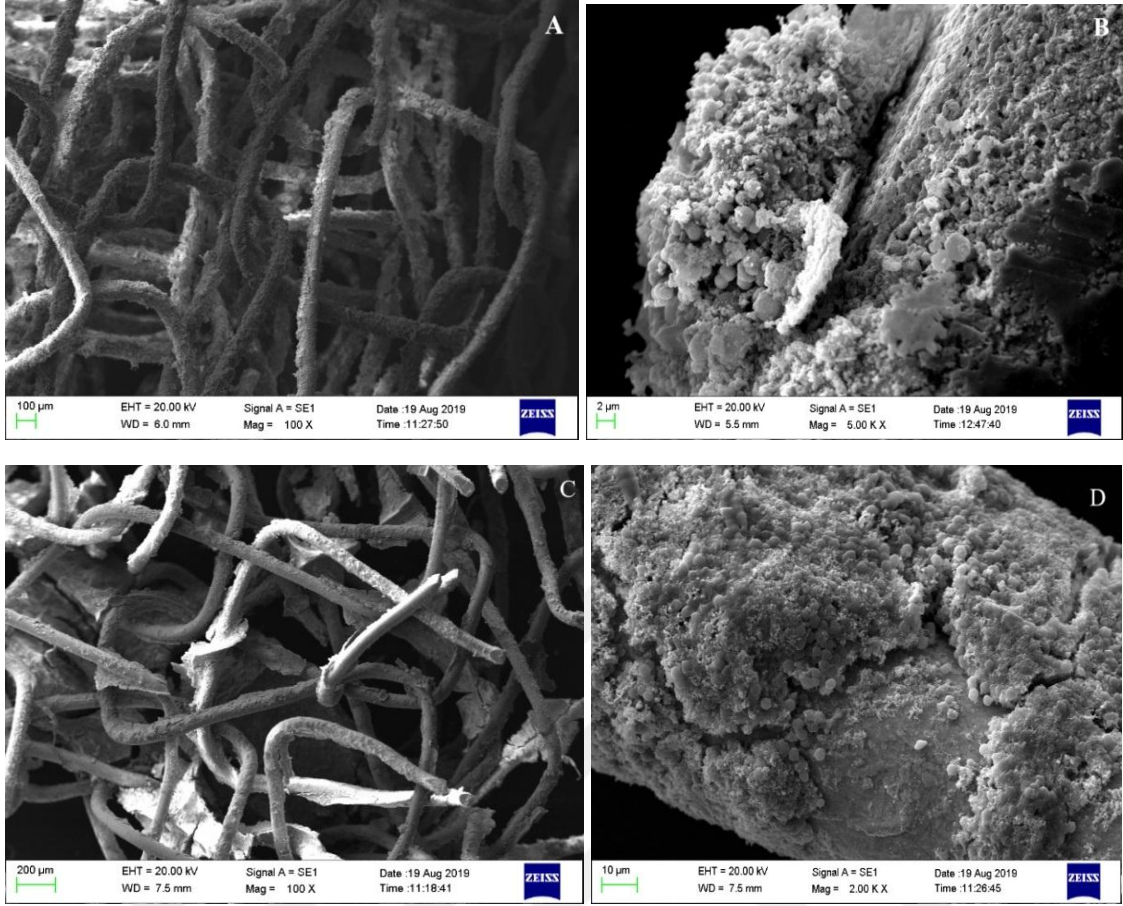
4.5. SEM

BFVH reaktörlerinde anot elektrotu yüzeyindeki biyofilm yapısı reaktörün performansını etkileyen önemli faktörlerden biridir. Bu çalışmada BFVH reaktörlerinde kullanılan her bir alg türünün oluşturduğu biyofilm yapısını incelemek için işletme süresi sonunda SEM analizleri gerçekleştirilmiştir.

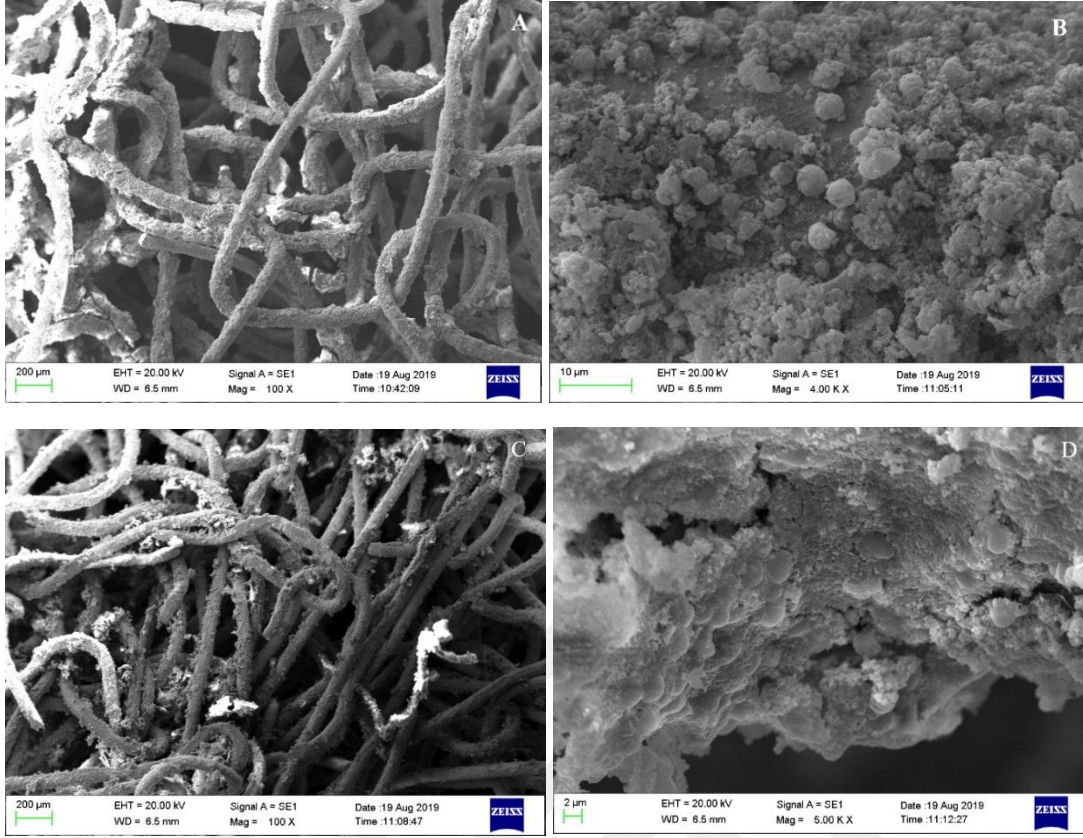
Chlorella vulgaris, *Chlorella sp.*, *Chlorella protothecoides*, *Spirulina sp.* türlerinin kullanıldığı çift bölmeli ve tek bölmeli (hava katot) BFVH reaktörlerinde işletme sonunda anot elektrot yüzeyinden alınan SEM görüntüleri Şekil 4.9, Şekil 4.10, Şekil 4.11 ve Şekil 4.12’da verilmiştir.



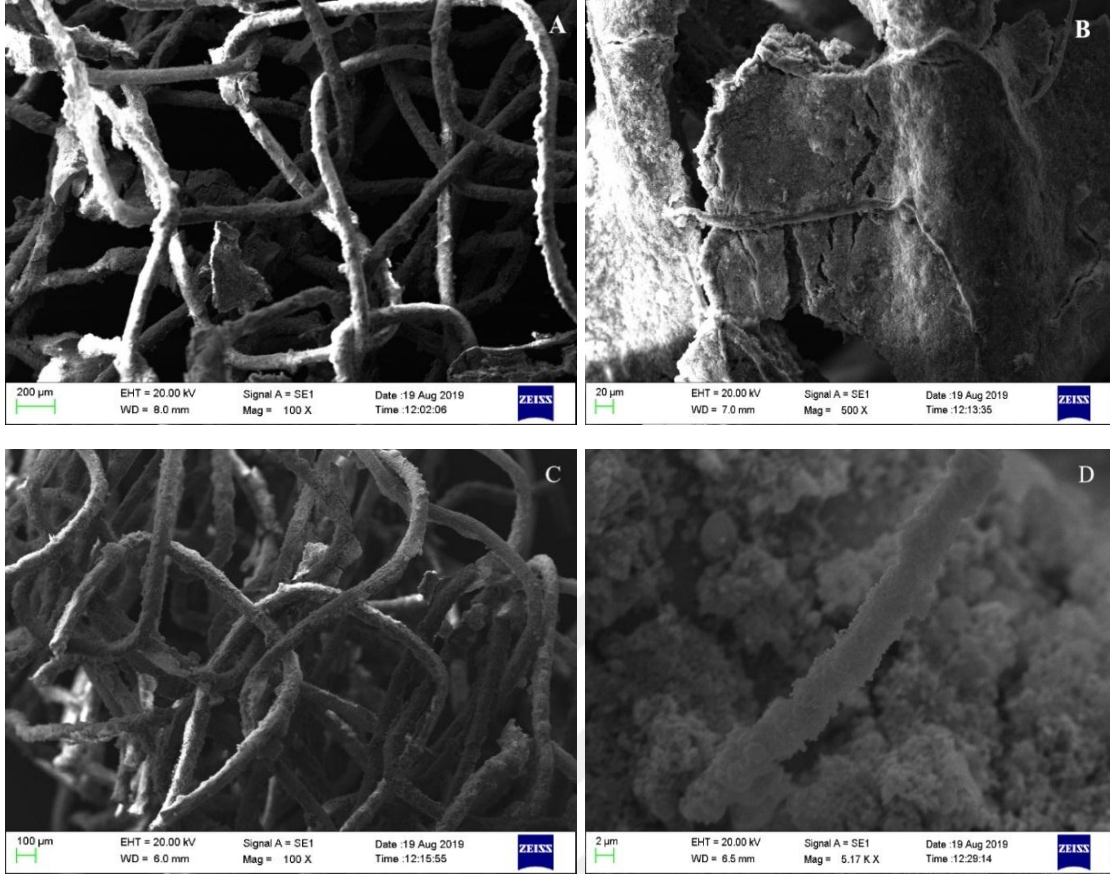
Şekil 4.9. *Chlorella vulgaris* türünün kullanıldığı çift bölmeli (A, B) ve tek bölmeli (C, D) BFBH reaktörlerinden işletme sonunda anot elektrot yüzeyinden alınan SEM görüntüleri



Şekil 4.10. *Chlorella* sp. türünün kullanıldığı çift bölmeli (A, B) ve tek bölmeli (C, D) BFVH reaktörlerinden işletme sonunda anot elektrot yüzeyinden alınan SEM görüntüleri



Şekil 4.11. *Chlorella protothecoides* türünün kullanıldığı çift bölmeli (A, B) ve tek bölmeli (C, D) BFVH reaktörlerinden işletme sonunda anot elektrot yüzeyinden alınan SEM görüntüleri



Şekil 4.12. Spirulina sp. türünün kullanıldığı çift bölmeli (A, B) ve tek bölmeli (C, D) BFBH reaktörlerinden işletme sonunda anot elektrot yüzeyinden alınan SEM görüntüleri

Çift bölmeli ve tek bölmeli (hava katot) BFBH reaktörlerinin anot elektrotu yüzeyinden farklı noktalardan alınan SEM görüntülerinde elektrot yüzeyinde kalın bir biyofilm tabakasının mevcut olduğu görülmektedir. Daha yüksek büyütme oranlarında alınan SEM görüntülerinde biyofilm yapısının içeriğinde alglerin yoğun şekilde olduğu belirlenmiştir. Ayrıca elektrot yüzeyinde yoğun bir şekilde hücre dışı polimerik maddenin mevcut olduğu görülmektedir. Elektrot yüzeyinde hücre dışı polimerik maddenin varlığı biyoelektrokimyasal sistemlerde üretilen elektronların anota aktarılmasını kısıtlayan önemli bir faktördür. Ancak bu durum kullanılan elektrot malzemesinin mikroorganizmalar ile biyolojik uyumluluğunu ciddi oranda arttırmakta ve biyofilm oluşumuna katkı sağlamaktadır.

5. SONUÇ ve ÖNERİLER

“Biyofotovoltaik Hücre (BFVH) ile Elektrik Üretimi” isimli bu çalışmada yeni bir elektrot kombinasyonu kullanılarak dört farklı alg türünün BFVH’de elektrik üretim performansı araştırılmıştır. Çalışmada kullanılan BFVH reaktörleri çift bölmeli (sulu katot) ve tek bölmeli (hava katot) olarak tasarlanmıştır. Çift bölmeli BFVH reaktörlerinde anot elektrotu olarak kalay oksit kaplı bakır mesh katot elektrotu olarak platin kaplı titanyum mesh kullanılmıştır. Tek bölmeli BFVH reaktörlerinde ise anot elektrotu olarak kalay oksit kaplı bakır mesh, katot elektrotu olarak platin kaplı karbon kağıt ve gaz difüzyon tabakası kullanılmıştır. BFVH’lerin anot bölmesinde kullanılmak üzere *Chlorella vulgaris*, *Chlorella protothecoides*, *Chlorella sp.* ve *Spirulina sp.* alg türleri seçilmiştir. Her bir BFVH’nin elektrik üretim performansı detaylı bir şekilde araştırılarak çalışma tamamlanmıştır. Çalışma kapsamında elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmiştir.

- BFVH reaktörlerinde en önemli performans parametresi güç yoğunluğudur. Çift bölmeli BFVH reaktörlerinde *Chlorella vulgaris*, *Chlorella sp.*, *Chlorella protothecoides*, ve *Spirulina sp.* türleri kullanılarak sırasıyla 142,28 mW/m², 170,66 mW/m², 247,06 mW/m² ve 277,86 mW/m² güç yoğunlukları elde edilmiştir. Tek bölmeli (hava katot) BFVH reaktörlerinde *Chlorella vulgaris*, *Chlorella sp.*, *Chlorella protothecoides*, ve *Spirulina sp.* türleri kullanılarak sırasıyla 87,08 mW/m², 68,38 mW/m², 103,01 mW/m² ve 217,33 mW/m² güç yoğunlukları elde edilmiştir. Bu sonuçlar çift bölmeli ve tek bölmeli BFVH’lerde kullanılan yeni elektrot kombinasyonlarının elektrik ve güç üretimine ciddi oranda katkı sağladığını göstermiştir. Bu durum mesh yapıdaki anot materyalinin yüksek biyofilm oluşturma yeteneği, elektrik iletkenliği ve mikroorganizmalar ile biyolojik uyumluluğunun yüksek olması ile açıklanabilir.

- Çalışmada en yüksek güç yoğunluğu *Spirulina sp.* türü ile elde edilmiştir. Elde edilen bu sonuç *Spirulina sp.* türünün elektrik üretim performansının diğer türlere kıyasla daha yüksek olduğunu göstermektedir. Bu durum *Spirulina sp.* türünün biyofilm oluşturma yeteneği ve elektron transfer yeteneğinin yüksek oluşu ile açıklanabilir.

- Çift bölmeli ve tek bölmeli (hava katot) BFVH reaktörlerinde yapılan cyclic voltametri analizlerinde en yüksek anot pikleri *Spirulina sp.* türünün kullanıldığı reaktörde sırasıyla 0,212 A/m² ve 0,211 A/m² olarak elde edilmiştir. Bu sonuçlar *Spirulina*

*sp.*türünün elektron transfer etkinliğinin diğer türlere kıyasla yüksek olduğunu gösterip elde edilen güç sonuçlarını desteklemektedir.

- BFBH reaktörlerine uygulanan EIS analizlerinde çift bölmeli ve tek bölmeli (hava katot) BFBH reaktörlerinde özellikle anot biyofilm dirençlerinin yüksek olması algler tarafından üretilen elektronların elektrot yüzeyine transferinin kısıtlandığını göstermektedir. Anot biyofilm dirençlerinin düşük olması ise üretilen elektronların elektrot yüzeyine transferinin arttığını göstermektedir.

- Çift bölmeli ve tek bölmeli (hava katot) BFBH reaktörlerinde kullanılan anot elektrotu yüzeyinden alınan SEM görüntülerinde elektrot yüzeyinde iyi bir biyofilm tabakasının mevcut olduğu görülmüştür. Daha yüksek büyütmelede biyofilm yapısındaki alg hücreleri net bir şekilde tespit edilmiştir. Bu durum kalay oksit kaplı bakır mesh anot materyalinin biyofilm oluşturma yeteneğinin yüksek olduğunu ve bu durumun güç üretimine katkı sağladığını net bir şekilde ispatlamaktadır.

- Bu sonuçlar değerlendirildiğinde gelecekteki çalışmalarda BFBH'lerde üretilen elektrik miktarını etkileyen önemli faktörlerden biri olan anot elektrotu üzerine yoğunlaşılabilir. Farklı materyallerden yapılmış yeni elektrot malzemelerinin kullanılması bu sistemlerde üretilen elektrik miktarını artırabileceği gibi enerji kaynaklarından uzak bölgelerde kullanılabilirliğinin mümkün hale gelebileceği düşünülmektedir.

KAYNAKLAR

- Anderson, A., Laohavisit, A., Blaby, I. K., Bombelli, P., Howe, C. J., Merchant, S. S., Davies, J. M. and Smith, A.G.** 2015. Exploiting algal NADPH oxidase for biophotovoltaic energy. *Plant Biotechnol. Journal*. 14, 22–28.
- Badalamenti, J.P., Torres, C.I and Krajmalnik-Brown, R.** 2013. Light- responsive current generation by phototrophically enriched anode biofilms dominated by green sulfur bacteria. *Biotechnol. Bioeng.*, 110, 1020–1027.
- Baicha, Z., Salar-García, M.J., Ortiz-Martínez, V.M. et al.** 2016. A critical review on microalgae as an alternative source for bioenergy production: a promising low cost substrate for microbial fuel cells. *Fuel Process. Technol.* 154, 104-116.
- Bajracharya, S., Sharma, M., Mohanakrishna, G., Benneton, X.D., Strik, D. P., Sarma, P. M., Pant, D.** 2016. An overview on emerging bioelectrochemical systems (BESs): technology for sustainable electricity, waste remediation, resource recovery, chemical production and beyond. *Renew. Energy* 98, 53-170.
- Billini, M., K. Stamatakis and V. Sophianopoulou,** 2008. Two Members of a Network of Putative Na⁺/H⁺ Antiporters Are Involved in Salt and pH Tolerance of the Freshwater Cyanobacterium *Synechococcus elongatus*. *J. Bacteriol.*, 190(19), 6318–6329.
- Bombelli, P., Müller, T., Herling, T. W., Howe, C. J. & Knowles, T. P. J.** 2014. A High Power-Density, Mediator-Free, Microfluidic Biophotovoltaic Device for Cyanobacterial Cells. *Advanced Energy Materials*, 5(2), 1401299.
- Bombelli, P., R. W. Bradley, A. M. Scott, A. J. Philips, A. J. McCormick, S. M. Cruz, A. Anderson, K. Yunus, D. S. Bendall, P. J. Cameron, J. M. Davies, A. G. Smith, C. J. Howe and A. C. Fisher.** 2011. Quantitative analysis of the factors limiting solar power transduction by *Synechocystis* sp. PCC 6803 in biological photovoltaic devices. *Energy Environ. Sci.*, 4, 4690-4698.
- Bombelli, P., Thomas, M., Herling, T. W., Howe, C. J. and Tuomas, P. J.** 2015. A High Power-Density, Mediator-Free, Microfluidic Biophotovoltaic Device for Cyanobacterial Cells. *Adv. Energy Mater.*, 5, 1-6.

- Bombelli, P., Zarrouati, M., Thorne, R. J., Schneider, K., Rowden, S. J. L., Ali, A., Yunus, K., Cameron, P.J., Fisher, A.C., Wilson, D., Howe, C. J. and McCormick, A. J.** 2012. Surface morphology and surface energy of anode materials influence power outputs in a multi-channel mediatorless biophotovoltaic (BPV) system. *Physical Chemistry Chemical Physics*, 14(35): p. 12221-12229.
- Bradley, R.W., Bombelli, P., Lea-Smith D. J., and Howe, C. J.** 2013. Terminal oxidase mutants of the cyanobacterium *Synechocystis* sp. PCC 6803 show increased electrogenic activity in biological photo-voltaic systems. *Phys. Chem. Chem. Phys.*, 15(32),13611-8.
- Bradley, R.W., Bombelli, P., Rowden, S. J. L. and Howe, C. J.** 2012. Biological photovoltaics: intra- and extra-cellular electron transport by cyanobacteria. *Biochem. Soc. Trans.*, 40, 1302–1307.
- Butti, S.K. , Velvizhi, G., Sulonen, M.L., Haavisto, J.M., Koroglu, E.O., Cetinkaya, A.Y.** 2016. Microbial electrochemical technologies with the perspective of harnessing bioenergy: maneuvering towards upscaling. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 53, 462-476.
- Cereda, A, Hitchcock, A., Symes, M. D., Cronin, L., Bibby, T. S. and Jones, A. K.** 2014. A Bioelectrochemical Approach to Characterize Extracellular Electron Transfer by *Synechocystis* sp. PCC6803. *PLoS One*, 9, 1–8.
- Chandra, R., Subhash, G.V. and Mohan, S.V.** 2012. Mixotrophic operation of photo-bioelectrocatalytic fuel cell under anoxygenic microenvironment enhances the light dependent bioelectrogenic activity. *Bioresour. Technol.*, 109, 46–56.
- Chandrasekhar, K, Lee, Y. and Lee, D.** 2015. Biohydrogen Production: Strategies to Improve Process Efficiency through Microbial Routes *Int. J. Mol. Sci.*, 16, 8266–8293.
- Chen, S., Jing, X., Tang, J., Fang, Y., & Zhou, S.** 2017. Quorum sensing signals enhance the electrochemical activity and energy recovery of mixed-culture electroactive biofilms. *Biosensors and Bioelectronics*, 97, 369–376.

- Chiao M., Lam, K. B., Lin, L.** 2006. Micromachined microbial and photosynthetic fuel cells *Journal of Micromechanics and Microengineering*. 16, 2547.
- Commault, A.S., Lear, G. , Novis, P.** 2014. Photosynthetic biocathode enhances the power output of a sediment-type microbial fuel cell. *New Zealand Journal of Botany*. 52, 48-59.
- Darus, L., Sadakane, T., Ledezma, P., Tsujimura, S., Osadebe, I., Leech, D., Gorton, L. and Freguia, S.** 2017. Redox-Polymers Enable Uninterrupted Day/Night Photo-Driven Electricity Generation in Biophotovoltaic Devices. *J. Electrochem. Soc.*,164, H3037–H3040.
- Driver A, Bombelli, P.** 2011. Biophotovoltaics Energy from algae. *Catalyst*.
- European Commission Science for Environment Policy,** 2013. *Futur. Briefs*.
- FadelMadkour F., Abd El-WahabKamil, ShafikNasr, H.** 2012. Production and nutritive value of *Spirulina platensis* in reduced cost media. *The Egyptian Journal of Aquatic Research*.38 (1), 51-57.
- Fu, C. C., Hung, T. C., Wu, W. T., Wen, T. C. and C.-H. Su, C. H.** 2010. Current and voltage responses in instant photosynthetic microbial cells with *Spirulina platensis*. *Biochemical Engineering Journal*, 52, 175-180.
- Fu, C. C., Su, C. H., Hung, T. C.,Hsieh, C. H., Suryani, D. and Wu, W. T.** 2009. Effects of biomass weight and light intensity on the performance of photosynthetic microbial fuel cells with *Spirulina platensis*. *Bioresour. Technol.*,100, 4183–6.
- Gude, V.G., B. Kokabian, V. Gadhamshetty.** 2013. Beneficial bioelectrochemical systems for energy, water, and biomass production. *J. Microb. Biochem. Technol.*S6, 005.
- He, Z. , Kan, J., Mansfeld, F., Angenent, L.T., Nealson, K.H.** 2009. Self-sustained phototrophic microbial fuel cells based on the synergistic cooperation between photosynthetic microorganisms and heterotrophic bacteria. *Environ. Sci. Technol.* 43,1648-1654.

- Ho, S., Chen, C. and Chang, J.** 2012. Effect of light intensity and nitrogen starvation on CO₂ fixation and lipid/carbohydrate production of an indigenous microalga *Scenedesmus obliquus* CNW-N. *Bioresour. Technol.*, 113, 244–252.
- Inglesby, A.E., Beatty, D. A. and Fisher, A. C.** 2012. Rhodospseudomonas palustris purple bacteria fed Arthrospira maxima cyanobacteria: demonstration of application in microbial fuel cells. *RSC Adv.*, 2, 4829-4838.
- Inglesby, A.E., Fisher, A.C.** 2012. Enhanced methane yields from anaerobic digestion of Arthrospira maxima biomass in an advanced flow-through reactor with an integrated recirculation loop microbial fuel cell. *Energy Environ. Sci.*, 2012,5, 7996-8006.
- Inglesby, A.E., Yunus, K. and Fisher, A. C.** 2013. In situ fluorescence and electrochemical monitoring of a photosynthetic microbial fuel cell . *Phys. Chem. Chem. Phys.*, 15, 6903- 6911.
- Jin, C.W., S. T. Du, S. T., Chen, W. W., Li, G. X., Zhang, Y. S. and Zheng, S. J.** 2009. Elevated carbon dioxide improves plant iron nutrition through enhancing the iron-deficiency-induced responses under iron-limited conditions in tomato. *Plant Physiol.*, 150, 1, 272-280.
- Kargul, J., Bubak, G., & Andryianau, G.** 2017. Biophotovoltaic Systems Based on Photosynthetic Complexes. Reference Module in Chemistry, Molecular Sciences and Chemical Engineering. doi:10.1016/b978-0-12-409547-2.13517-6 .
- Kelly, P.T., He, Z.** 2014. Nutrients removal and recovery in bioelectrochemical systems:a review. *Bioresour. Technol.* 153, 351-360.
- Lan, J. C. W., Raman ,K., Huang , C. M., Chang ,C. M.** 2013. The impact of monochromatic blue and red LED light upon performance of photo microbial fuel cells (PMFCs) using Chlamydomonas reinhardtii transformation F5 as biocatalyst . *Biochem. Eng.J.* 78 , 39 ., 2013.
- Laohavisit, A., A. Anderson, P. Bombelli, M. Jacobs, C. J. Howe, J. M. Davies and A. G. Smith.** 2015. Enhancing plasma membrane NADPH oxidase activity increases current output by diatoms in biophotovoltaic devices. *Algal Res.*, 12, 91–98.

- Lee, B. D., Apel, W. A., & Walton, M. R.** 2004. Screening of cyanobacterial species for calcification. *Biotechnology Progress*, 20(5), 1345–1351.
- Lin, C. C, Wei, C. H., Chen, C. I., Shieh C. J. and Liu, Y. C.** 2013. Characteristics of the photosynthesis microbial fuel cell with a *Spirulina platensis* biofilm. *Bioresour Technol.*, 135, 640–643.
- Logan, B.E., Hamelers, B. , Rozendal, R., Schröder, U., Keller J., Freguia, S., Aelterman, P., Verstraete W. and Rabaey, K.** 2006. Microbial Fuel Cells: Methodology and Technology *Environ. Sci. Technol.*, 40, 5181–92.
- Luimstra, V. M., Kennedy, S. J., Güttler, J., Wood, S. A., Williams, D. E., Packer, M. A.** 2013. A cost-effective microbial fuel cell to detect and select for photosynthetic electrogenic activity in algae and cyanobacteria. *J. Appl. Phycol.* 26 , 15 .
- Luo, F.L. , Hong Y.** 2013. In *Renewable Energy Systems: Advance Conversion Technologies and Applications*. CRC Press, Taylor&Francis Group, New York, pp. 813–814.
- Lynnes, J.A. , Derzaph, T. L. M. and Weger, H. G.** 1998. Iron limitation results in induction of ferricyanide reductase and ferric chelate reductase activities in *Chlamydomonas reinhardtii*. *Planta*, 204, 360–365.
- Ma, J., Wang, Z., Zhang, J. et al.** 2017. Cost-effective *Chlorella* biomass production from dilute wastewater using a novel photosynthetic microbial fuel cell (PMFC). *Water Res.* 108, 356-364.
- Madiraju, K. S., Lyew , D., Kok , R., Raghavan, V.** 2012. Carbon neutral electricity production by *Synechocystis* sp. PCC6803 in a microbial fuel cell. *Biores. Technol.* 110, 214 .
- McCormick, A.J., Bombelli, P., Lea-Smith, D. J., Bradley, R. W., Scott, A. M., Fisher, A. C., Smith, A. G. and Howe, C. J.** 2013. Hydrogen production through oxygenic photosynthesis using the cyanobacterium *Synechocystis* sp. PCC 6803 in a bio-photoelectrolysis cell (BPE) system. *Energy Environ. Sci.*, 6, 2682-2690.

- McCormick, A.J., Bombelli, P., Scott, A. M., Philips, A. J., Smith, A. G., Fisher, A. C. and Howe, C. J.** 2011. Photosynthetic biofilms in pure culture harness solar energy in a mediatorless bio-photovoltaic cell (BPV) system. *Energy Environ. Sci.*,4, 4699-4709.
- McKendry, P.** 2002. Energy production from biomass (part 2): conversion technologies. *Bioresour. Technol.*, 83, 47–54.
- Mo, Y., Liang, P., Huang, X., Wang, H., Cao, X.** 2009. Enhancing the stability of power generation of single-chamber microbial fuel cells using an anion exchange membrane. *J. Chem. Technol. Biotechnol.* 84: 1767-1772.
- Muñoz, R., Jacinto, M., Guieysse, B., Mattiasson, B .** 2005. Combined carbon and nitrogen removal from acetonitrile using algal-bacterial bioreactors. *Appl Microbiol Biotechnol* 67(5):699–707.
- Ng, F.-L. , Phang, S. M., Periasamy, V., Yunus, K. and Fisher, A.C.** 2014. Evaluation of algal biofilms on indium tin oxide (ITO) for use in biophotovoltaic platforms based on photosynthetic performance. *PLoS One*, 9 (5), e97643.
- Nimje, R., Chien-Yen Chen, Hau-Ren Chen, Chien-Cheng Chen, Yuh Ming Huang, Min-Jen Tseng, Kai-Chien Cheng.** 2012. Comparative bioelectricity production from various wastewaters in microbial fuel cells using mixed cultures and a pure strain of *Shewanella oneidensis*. *Bioresour. Technol.*, 104, 315–323.
- Nishio, K., Hashimoto, K. and Watanabe, K.** 2013. Light/electricity conversion by defined cocultures of *Chlamydomonas* and *Geobacter*. *J. Biosci. Bioeng.*, 115(4), 412–7.
- Pisciotta, J.M., Y. Zou, Y. and Baskakov, I. V.** 2010. Light-Dependent Electrogenic Activity of Cyanobacteria. *PLoS One*, 5, e10821.
- Powell, E.E., Evitts, R.W., Hill, G.A.** 2011. A microbial fuel cell with a photosynthetic microalgae cathodic half cell coupled to a yeast anodic half cell. *Energy Sources Part A* 33, 440-448.
- Quintana, N., Van der Kooy, F., Van de Rhee, M.D., Voshol, G.P., and Verpoorte, R.** 2011. Renewable energy from Cyanobacteria: energy production optimization by

- metabolic pathway engineering . *Applied Microbiology and Biotechnology*, 91, 471–90.
- Rosenbaum, M., Cotta, M.A. and Angenent, L.T.** 2010. Aerated *Shewanella oneidensis* in continuously fed bioelectrochemical systems for power and hydrogen production. *Biotechnol. Bioeng.*, 105(5), 880–8.
- Schuerger, N., C. Werlang, C. M. Ajo-Franklin and A. A. Boghossian,** 2017. A synthetic biology approach to engineering living photovoltaics. *Energy Environ. Sci.*, 10, 1102–1115.
- Sekar N., Umasankar, Y., Ramasamy, R. P.** 2014. Photocurrent generation by immobilized cyanobacteria via direct electron transport in photo-bioelectrochemical cells. *Phys. Chem. Chem. Phys.* 16 , 7862 .
- Senthilkumar, N., Sunirmal Sheet, Y. Sathishkumar, Yang Soo Lee, Siew-Moi Phang, Vengadesh Periasamy G. Gnana kumar.** 2018. Titania/reduced graphene oxide composite nanofibers for the direct extraction of photosynthetic electrons from microalgae for biophotovoltaic cell applications. *Applied Physics* . 124:769.
- Seselj, N., Engelbrekt, C., & Zhang, J.** 2015. Graphene-supported platinum catalysts for fuel cells. *Science Bulletin*, 60(9), 864–876.
- Sivakumar P., K. Ilango, N. Praveena, A. Sircar, R. Balasubramanian, A. Sakthisaravanan and R. Kannan.,** 2018. Algal fuel cell. *Microalgal Biotechnology*.
- Strik B., Timmers, R. A., Helder, M., Steinbusch, K. J. J. , Hamelers, H. V. M and Buisman, C. J. N.** 2011. Microbial solar cells: applying photosynthetic and electrochemically active organisms. *Trends Biotechnol.*, 29, 41–49.
- Strik, B., Terlouw, H., Hamelers, H. V. M. and Buisman, C. J. N.** 2008. Renewable sustainable biocatalyzed electricity production in a photosynthetic algal microbial fuel cell (PAMFC). *Appl. Microbiol. Biotechnol.*, 81, 659–68.
- Thorne, R., Hu, H. , Schneider, K., Bombelli, P., Fisher, A., Peter, L. M. , Dent , A .Cameron , P. J.** 2011. Porous ceramic anode materials for photo-microbial fuel cells. *J. Mater. Chem.* 21 , 18055-18060 .

- Thorne, R. J., Hu, H., Schneider, K. and Cameron, P. J.** 2014. Trapping of redox-mediators at the surface of *Chlorella vulgaris* leads to error in measurements of cell reducing power. *Phys. Chem. Chem. Phys.*, 16(12), 5810–6.
- Torres, C.I., R. Krajmalnik-Brown, P. Parameswaran, A. K. Marcus, G. Wanger, Y. a Gorby and B.E. Rittmann,** 2009. Selecting Anode-Respiring Bacteria Based on Anode Potential: Phylogenetic, Electrochemical, and Microscopic Characterization. *Environ. Sci. Technol.*, 43, 9519–24.
- URL 1** , <https://www.ccap.ac.uk> , 20 Augustos 2019.
- Watson, V.J., Logan, B.E.** 2010. Power production in MFCs inoculated with *Shewanella oneidensis* MR- 1 or mixed cultures. *Biotechnol. Bioeng.*, 105, 489–98.
- Wu vd. X.Y., T.S. Song, X.J. Zhu, P. Wei, C. Zhou.** 2013. Construction and operation of microbial fuel cell with *Chlorella vulgaris* biocathode for electricity generation. *Appl. Biochem. Biotechnol.* 171, 2082-2092.
- Wu, Y., Wang, Z., Zheng, Y., Xiao, Y., Yang, Z. and Zhao, F.** 2014. Light intensity affects the performance of photo microbial fuel cells with *Desmodesmus* sp. A8 as cathodic microorganism. *Appl. Energy*, 116, 86–90.
- Xing, D., Cheng, S. Regan J.M. and Logan, B.E.** 2009. Change in microbial communities in acetate- and glucose-fed microbial fuel cells in the presence of light. *Biosens. Bioelectron.*, 25, 105–11.
- Xing, D., Cheng, S., Zuo, Y., Regan J. M. and Logan, B.E.** 2008. Electricity Generation by *Rhodospseudomonas palustris* DX-1. *Environ. Sci. Technol.*, 42, 4146–51.
- Xue, X., Collins, C. M., Weger, H. G. and Fecn-r, A.** 1998. The energetics of extracellular Fe(III) reduction by iron-limited *Chlamydomonas reinhardtii* (Chlorophyta) . *J. Phycol.*, 34(6), 939–944.
- Zhou, M. ,He, H., Jin, T and Wang, H.** 2012. Power generation enhancement in novel microbial carbon capture cells with immobilized *Chlorella vulgaris*. *J. Power Sources*, 214, 216–219.

ÖZGEÇMİŞ

Merve BAKIR, 1991 yılında ELAZIĞ’da doğdu. İlk, orta ve lise eğitimini ELAZIĞ’da tamamlayan BAKIR, 2015 yılında Fırat Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Çevre Mühendisliği Bölümü’nde lisans eğitimini tamamladı. 2017 yılında Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı Çevre Teknolojisi Programı’nda yüksek lisans eğitimine başladı.

