

T.C.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



**ELEKTROT YAPISININ VE ORTAM KOŞULLARININ BİR
MİKROBİYAL YAKIT HÜCRESİNİN ELEKTRİKSEL
PERFORMANSI ÜZERİNDEKİ ETKİLERİNİN DENEYSEL VE
YSA YAKLAŞIMI İLE BELİRLENMESİ**

Yusuf DOĞAN

Yüksek Lisans Tezi

OTOMOTİV MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Taşıt Dinamiği ve Kontrol Bilim Dalı

ŞUBAT 2024

T.C.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Otomotiv Mühendisliği Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

**ELEKTROT YAPISININ VE ORTAM KOŞULLARININ BİR
MİKROBİYAL YAKIT HÜCRESİNİN ELEKTRİKSEL PERFORMANSI
ÜZERİNDEKİ ETKİLERİNİN DENEYSEL VE YSA YAKLAŞIMI İLE
BELİRLENMESİ**

Tez Yazarı
Yusuf DOĞAN

Danışman
Prof. Dr. Hanbey HAZAR

ŞUBAT 2024
ELAZIĞ

T.C.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Otomotiv Mühendisliği Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Başlığı:	Elektrot Yapısının ve Ortam Koşullarının Bir Mikrobiyal Yakıt Hücresinin Elektriksel Performansı Üzerindeki Etkilerinin Deneysel ve YSA Yaklaşımı ile Belirlenmesi
Yazarı:	Yusuf DOĞAN
İlk Teslim Tarihi:	12.01.2024
Savunma Tarihi:	12.02.2024

TEZ ONAYI

Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına göre hazırlanan bu tez aşağıda imzaları bulunan jüri üyeleri tarafından değerlendirilmiş ve akademik dinleyicilere açık yapılan savunma sonucunda OYBİRLİĞİ ile kabul edilmiştir.

Danışman:	Prof. Dr. Hanbey HAZAR Fırat Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi	<i>İmza</i> Onayladım
Başkan:	Doç. Dr. Turan GÜRGENÇ Fırat Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi	Onayladım
Üye:	Dr. Öğr. Üyesi Tahsin YÜKSEL Cumhuriyet Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi	Onayladım

Bu tez, Enstitü Yönetim Kurulunun/...../20..... tarihli toplantısında tescillenmiştir.

İmza

Prof. Dr. Burhan ERGEN
Enstitü Müdürü

BEYAN

Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım “ Elektrot Yapısının ve Ortam Koşullarının Bir Mikrobiyal Yakıt Hücresinin Elektriksel Performansı Üzerindeki Etkilerinin Deneysel ve YSA Yaklaşımı ile Belirlenmesi ” Başlıklı Yüksek Lisans Tezimin içindeki bütün bilgilerin doğru olduğunu, bilgilerin üretilmesi ve sunulmasında bilimsel etik kurallarına uygun davrandığımı, kullandığım bütün kaynakları atıf yaparak belirttiğimi, maddi ve manevi desteği olan tüm kurum/kuruluş ve kişileri belirttiğimi, burada sunduğum veri ve bilgileri unvan almak amacıyla daha önce hiçbir şekilde kullanmadığımı beyan ederim.

12.02.2024

Yusuf DOĞAN



ÖNSÖZ

Dünyada yaşanan enerji krizleri, çevre kirliliği, küresel ısınma ve emisyon kaynaklı hastalıklar araştırmacıları temiz ve yenilenebilir enerji kaynaklarına yönlendirmiştir. Bu enerji kaynaklarından biri olan mikrobiyal yakıt hücreleri bakterilerin biyokatalizör özelliklerinden yararlanarak organik maddelerin enerjiye dönüşümünü gerçekleştirmektedir. Fakat mikrobiyal yakıt hücrelerinin düşük güç çıkışı ve maliyeti nedeniyle geliştirilmeye açık olmuştur. Bu tez çalışmasının hedefi mikrobiyal yakıt hücrelerinde enerji verimliliğinin yükseltilmesi, farklı yapısal yönlerinin aydınlatılması, öngörülse sistemlerin incelenmesi ve gelecekte çalışma yapacak araştırmacılara ışık tutulması hedeflenmiştir.

Tez çalışması boyunca tecrübeleriyle yol gösteren ve motivasyon sağlayan danışmanım Prof. Dr. Hanbey HAZAR'a teşekkürü borç bilirim. Çalışmalarımın literatür araştırması ve deneysel sistemlerin kurulmasında destekte bulunan Arş. Gör. Hüseyin SEVİNÇ'e teşekkürlerimi sunarım. Tüm eğitim süresi boyunca beni maddi ve manevi olarak destekleyen aileme teşekkür ederim.

Bu tez çalışması, Fırat Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi (FÜBAP) tarafından **TEKF.23.02** protokol numaralı proje ile desteklenmiştir.

Yusuf DOĞAN
ELAZIĞ, 2024

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	iv
İÇİNDEKİLER	v
ÖZET	vi
ABSTRACT	vii
ŞEKİLLER LİSTESİ	viii
TABLolar LİSTESİ	x
SİMGELER VE KISALTMALAR	xi
1. GİRİŞ	1
2. MİKROBİYAL YAKIT HÜCRELERİ	4
2.1. Mikrobiyal Yakıt Hücresinin Çalışması	4
2.1.1. Mikrobiyal Yakıt Hücresinin Modelleri ve Türleri	6
3. MİKROBİYAL YAKIT HÜCRESİNDE ELEKTROT, ORTAM KOŞULLARI, BESİN VE BESLEME REJİMİNİN ETKİSİ	13
3.1. MYH’lerde Elektrot Yapısının ve Türünün Etkileri	13
3.2. MYH’lerde Ortam Koşulları	15
3.3. MYH’lerde Besin ve Besleme Rejimi	17
3.4. Yapay Sinir Ağları.....	19
4. MATERYAL VE METOT	21
4.1. Kullanılan Materyaller.....	21
4.2. Tasarım Çalışması ve Prototipleme Aşaması	24
4.3. DeneySEL Sistemlerin Kurulumu	26
4.3.1. Besinlerin Hazırlanması	28
4.3.2. Elektrotların Hazırlanması	30
4.3.3. FizikSEL Şartların Hazırlanması	31
4.3.4. Ortam Şartlarının Hazırlanması.....	32
4.3.5. Yapay Sinir Ağlarının Oluşturulması	33
4.3.6. Ölçüm ve Örneklem	35
5. BULGULAR VE TARTIŞMA	37
5.1. Elektrot Konfigürasyonları Sonuçları.....	37
5.2. Besleme Sistemi Sayısal Sonuçlar	42
5.3. Ortam Koşulları Sayısal Sonuçları	47
5.4. FizikSEL Deneylerin Sayısal Sonuçları	50
5.5. YSA Analizi	53
6. SONUÇLAR.....	58
ÖNERİLER	61
KAYNAKLAR.....	62
ÖZGEÇMİŞ	

ÖZET

Elektrot Yapısının ve Ortam Koşullarının Bir Mikrobiyal Yakıt Hücresinin Elektriksel Performansı Üzerindeki Etkilerinin Deneysel ve YSA Yaklaşımı ile Belirlenmesi

Yusuf DOĞAN

Yüksek Lisans Tezi

FIRAT ÜNİVERSİTESİ
Fen Bilimleri Enstitüsü

Otomotiv Mühendisliği Anabilim Dalı

Şubat 2024, Sayfa: xii + 71

Mikrobiyal yakıt hücreleri, alternatif enerji kaynakları için popüler olan bir çalışma alanıdır. Biyokimyasal enerjiyi elektrik enerjisine çevirebilen ve birçok çalışma alanı sunan alternatif enerji kaynağıdır. Bu tez çalışmasında mikrobiyal yakıt hücrelerinin yaygınlaşmasının ve ticarileşmesinin önünde engel teşkil eden çalışma parametrelerinin iyileştirilmesi ve gelecek için öngörülse sistemlerin tahmin edilmesi planlanmıştır. Oksidasyon hızı, elektrot verimliliği, ortam şartları ve fiziksel şartlar gibi parametreler hücrelerin enerji performansını düşürmektedir. Çalışma kapsamında elektrotların yapısal olarak ağ yapılı, köpük yapılı ve levha yapılı olarak incelenmesi çalışmanın ilk kısmını oluşturmaktadır. Bu yapısal çalışmalarda elektrot geometrisinin öneminin anlaşılabilmesi için farklı geometriler kullanılıp analiz edilmiştir. Çalışmanın bir diğer kısmında farklı besin çeşitleri kendi aralarında karşılaştırılmıştır. Sabit bir besinin farklı besleme oranları ile beslenerek en uygun besleme oranının tespit edilmesi ve farklı besleme tipleri kullanılarak en uygun besleme tipinin bulunması amaçlanmıştır. Çalışmanın bir diğer kısmı olarak ortam şartları ele alınmıştır. Bu kapsamda farklı sıcaklık koşullarında hücreler test edilmiş ve farklı ışık koşullarında davranışı incelenmiştir. Son olarak mikrobiyal yakıt hücrelerinde elektrot adedinin önemi ve elektrot konumunun performansa etkisi araştırılmıştır. Elde edilen veriler MATLAB ortamında YSA eğitimi yapılarak tahmin edilebilirliği test edilmiştir. Mikrobiyal yakıt hücrelerinde elektrotların hacimsel olarak etkili olduğu ve yoğun hacimlerin daha başarılı çıkış verdiği görülmüştür. Yapısal olarak elektrotların ağ yapılı olması, yüksek yüzey alanı ve verimli enerji çıkışı oluşturmuştur. Ortam şartları çalışmaları yüksek sıcaklığın ve düşük ışık dalga boylarının hücre performansına pozitif etki ettiğini göstermiştir. Elektrot adedinin artışı hücre performansına pozitif etki gösterdiği ve elektrot konumu mikrobiyal aktivitenin yoğunluğuna göre etki gösterebildiği sonucuna varılmıştır. YSA eğitimi başarılı bir şekilde gerçekleştirilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Mikrobiyal yakıt hücreleri, Elektrot geometrisi ve konumu, Besleme rejimi ve sıcaklık, Yapay sinir ağları, Yapısal elektrotlar

ABSTRACT

Determination of the Effects of Electrode Structure and Environmental Conditions on the Electrical Performance of a Microbial Fuel Cell by Experimental and ANN Approach

Yusuf DOĞAN

Master's Thesis

FIRAT UNIVERSITY
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Automotive Engineering

February 2024, Pages: xii + 71

Microbial fuel cells are a popular field of study for alternative energy sources. It is an alternative energy source that can convert biochemical energy into electrical energy and offers many fields of study. In this thesis, it is planned to improve the operating parameters that hinder the widespread use and commercialization of microbial fuel cells and to predict predictive systems for the future. Parameters such as oxidation rate, electrode efficiency, ambient conditions and physical conditions reduce the energy performance of the cells. Within the scope of the study, the first part of the study is to examine the electrodes structurally as network structure, foam structure and plate structure. In these structural studies, different geometries were used and analyzed to understand the importance of electrode geometry. In another part of the study, different food types were compared among themselves. It was aimed to determine the optimum feeding rate by feeding a fixed food with different feeding rates and to find the optimum feeding type by using different feeding types. Another part of the study was environmental conditions. In this context, the cells were tested under different temperature conditions and their behavior was examined under different light conditions. Finally, the importance of the number of electrodes in microbial fuel cells and the effect of electrode position on performance were investigated. The obtained data were tested for predictability by ANN training in MATLAB environment. It was observed that the electrodes in microbial fuel cells are volumetrically effective and dense volumes give more successful output. Structurally, the network structure of the electrodes created high surface area and efficient energy output. Ambient conditions studies have shown that high temperature and low light wavelengths have a positive effect on cell performance. It was concluded that the increase in the number of electrodes has a positive effect on cell performance and the electrode position can be affected by the intensity of microbial activity. ANN training was performed successfully.

Keywords: Microbial fuel cells, Electrode geometry and location, Feeding regime and temperature, Artificial neural networks, Structural electrodes

ŞEKİLLER LİSTESİ

	Sayfa
Şekil 1.1. Mikrobiyal yakıt hücrelerinde kullanılan bazı elektrot malzemeleri	2
Şekil 1.2. Mikrobiyal yakıt hücresi biyosensör verisi	3
Şekil 2.1. MYH genel yapısı	5
Şekil 2.2. MYH Kategorizasyonu	6
Şekil 2.3. Çift odacıklı mikrobiyal yakıt hücresi.	8
Şekil 2.4. Tek odacıklı mikrobiyal yakıt hücresi.	9
Şekil 2.5. Çok odacıklı mikrobiyal yakıt hücresi	9
Şekil 2.6. Hibrit mikrobiyal yakıt hücresi	10
Şekil 2.7. Yığın mikrobiyal yakıt hücresi.....	11
Şekil 2.8. Minyatür mikrobiyal yakıt hücresi.....	12
Şekil 3.1. Dalga boyuna göre sınıflandırma	16
Şekil 3.2. Yapay sinir ağının temel yapısı.....	19
Şekil 4.1. Nafion HP membran.....	22
Şekil 4.2. Yapısal elektrotlar	22
Şekil 4.3. Akvaryum tipi hava pompası	23
Şekil 4.4. Anot odası için çamur temini.	24
Şekil 4.5. Catia V5 ortamında hücre mimarisi tasarımı.....	24
Şekil 4.6. Pleksiglas lazer kesim için AUTOCAD teknik çizimler	25
Şekil 4.7. Pleksiglas lazer kesim	25
Şekil 4.8. Pleksiglas hücre inşası.....	26
Şekil 4.9. Deneysel sistem genel şeması	27
Şekil 4.10. Bitkisel gliserin tabanlı pazar atığı özü hazırlanış parametreleri.....	28
Şekil 4.11. Bitkisel gliserin tabanlı pazar atığı özü	29
Şekil 4.12. Plaka geometri levha yapılı elektrot	29
Şekil 4.13. Deneysel elektrotlar.....	30
Şekil 4.14. Mikrobiyal yakıt hücresi elektrot konumu konfigürasyonu elektrot pozisyonları.....	31
Şekil 4.15. Mikrobiyal yakıt hücresi elektrot adedi konfigürasyonu elektrotları 2 adet elektrot.....	31
Şekil 4.16. Mikrobiyal yakıt hücresi elektrot adedi konfigürasyonu elektrotları 3 adet elektrot.....	32
Şekil 4.17. Mikrobiyal yakıt hücrelerinde ışık konfigürasyonları	32
Şekil 4.18. Matlab YSA modülü eğitim şeması	33
Şekil 4.19. Mikrobiyal yakıt hücresi YSA eğitimi için temel algoritma şeması.....	33

Şekil 4.20. Deneyisel düzenek hücrelerin genel yapısı.....	35
Şekil 4.21. Deneyisel düzenek katot görünümü.	36
Şekil 4.22. Deney düzeneği ölçümleme sistemi	36
Şekil 5.1. Plaka geometrili elektrotların zamana göre güç yoğunluğu değişimi.....	37
Şekil 5.2. Silindir geometrili elektrotların zamana göre güç yoğunluğu değişimi.....	39
Şekil 5.3. Piramit geometrili elektrotların zamana göre güç yoğunluğu değişimi.	40
Şekil 5.4. Mikrobiyal yakıt hücrelerinde besin türünün zamana göre güç yoğunluğu değişimi.	42
Şekil 5.5. Mikrobiyal yakıt hücrelerinde besleme miktarının zamana göre güç yoğunluğu değişimi.	44
Şekil 5.6. Mikrobiyal yakıt hücrelerinde besleme tipinin zamana göre güç yoğunluğu değişimi	45
Şekil 5.7. Mikrobiyal yakıt hücrelerinde sıcaklığın zamana göre güç yoğunluğu değişimine etkisi	47
Şekil 5.8. Mikrobiyal yakıt hücrelerinde ışık dalga boyunun zamana göre güç yoğunluğu değişime etkisi	49
Şekil 5.9. Mikrobiyal yakıt hücrelerinde elektrot adedinin zamana göre güç yoğunluğu değişimine etkisi	51
Şekil 5.10. Mikrobiyal yakıt hücrelerinde elektrot konumunun zamana göre güç yoğunluğu değişimine etkisi.....	52
Şekil 5.11. Matlab yapay sinir ağı modülü eğitim sonucu ortalama kare hatası grafiği.	54
Şekil 5.12. Matlab yapay sinir ağı modülü eğitim sonucu eğitim, doğrulama, test ve total regresyon grafiği	55
Şekil 5.13. Matlab yapay sinir ağı modülü eğitim sonucu eğitim, doğrulama ve test verilerinin hata histogramı.	56

TABLÖLAR LİSTESİ

	Sayfa
Tablo 3.1. MYH'lerde kullanılan bazı elektrot malzemelerinin yüzey alanları.....	13
Tablo 3.2. Karbonlu anot elektrotları üzerindeki araştırmalar	14
Tablo 3.3. Renklerin dalga boyu aralığı ve frekans aralığı tablosu.	16
Tablo 3.4. Bazı Substratların MYH akım yoğunluğuna etkisi	18
Tablo 3.5. Yapay sinir ağının insan sinir sistemi karşılığı	19
Tablo 4.1. Standart hücre giriş parametreleri.....	27
Tablo 4.2. Mikrobiyal yakıt hücresi YSA eğitimi için kullanılacak parametreler.	34
Tablo 4.3. Mikrobiyal yakıt hücresi YSA eğitimi için örnek parametre tablosu	35
Tablo 5.1. Deneysel çalışmada hücrelerin maksimum ve ortalama güç yoğunlukları	41
Tablo 5.2. Deneysel çalışmada hücrelerin maksimum ve ortalama güç yoğunlukları	46
Tablo 5.3. Deneysel çalışmada hücrelerin maksimum ve ortalama güç yoğunlukları	50
Tablo 5.4. Deneysel çalışmada hücrelerin maksimum ve ortalama güç yoğunlukları	53

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

nm	: Nanometre
THz	: Tetra hertz
C ₆ H ₁₂ O	: Glikoz
A _{ağ}	: Ağ yapılı elektrot yüzey alanı
A _{köpük}	: Köpük yapılı elektrot yüzey alanı
A _{levha}	: Levha yapılı elektrot yüzey alanı
m ² /m ³	: Metreküp başına düşen metrekare yüzey alanı
m ² /g	: Gram başına düşen metrekare yüzey alanı
mW/m ²	: Metrekare başına düşen mili watt güç
mW/cm ²	: Santimetrekare başına düşen mili watt güç
W/m ³	: Metreküp başına düşen watt güç
H ₂ O	: Su
CO ₂	: Karbon dioksit
H	: Hidrojen
e ⁻	: Elektron
O ₂	: Oksijen
V _{çal}	: Çalışma gerilimi
E _{termo}	: Tahmin edilen termodinamik voltaj
η _{akt}	: Aktivasyon kayıpları
η _{ohmik}	: Ohmik Kayıplar
η _{kons}	: Konsantrasyon kayıpları
m ²	: Metrekare
m ³	: Metreküp
g	: Gram
L	: Litre
mg	: Miligram
mA	: Miliamper
cm ²	: Santimetrekare
pH	: Asitlik veya bazlık derecesini tarif eden ölçü birimi
μW	: Mikro Watt
mW	: Mili Watt
μA	: Mikroamper
mL	: Mililitre
cm	: Santimetre
w/v	: Ağırlığın suyun hacmine oranı

Kısaltmalar

MYH	: Mikrobiyal Yakıt Hücresi
PDMYH	: Proton Değişim membranlı yakıt hücreleri
DMYH	: Doğrudan Metanol Yakıt Hücresi
KOYH	: Katı Oksit Yakıt Hücresi
AYH	: Alkali Yakıt Hücresi
EKYH	: Erimiş Karbonat Yakıt Hücresi
FAYH	: Fosforik Asit Yakıt Hücresi
EYH	: Enzimatik Yakıt Hücresi
ABH	: Abiyotik Biyoyakıt Hücresi
EES	: Elektrokimyasal Empedans Spektroskopisi
YSA	: Yapay Sinir Ağı
ÇGGP	: Çok Genli Genetik Programlama
DVR	: Destek Vektör Regresyonu
MEH	: Mikrobiyal Elektroliz Hücresi
MB	: Membran Biyoreaktör
KOI	: Kimyasal Oksijen İhtiyacı
ACK	: Ağsı Camsı Karbon
G.Y.	: Güç Yoğunluğu
A.Y.	: Akım Yoğunluğu
LED	: Işık Saçan Diyot
AC	: Alternatif Akım
DC	: Doğru Akım
BG	: Bitkisel Gliserin Tabanlı Pazar Atığı Özü
ŞS	: Şekerli Su
MYÖ	: Maya Tabanlı Pazar Atığı Özü
GP	: Giriş Parametresi
GN	: Gizli Nöron
ÇP	: Çıkış Parametresi
MSE	: Ortalama Kare Hatası

1. GİRİŞ

Son zamanlarda endüstrinin gelişmesi, içten yanmalı motorların yaygınlaşması, her evde elektronik tabanlı cihazların sayısının artması ve sanayinin büyümesi gibi durumlar enerji ihtiyacını artırmış olup yöneticileri enerji üretim endüstrisi artışına itmiştir. Sanayi enerji tüketimi incelenirse küresel anlamda enerji tüketimi 2000 yılından 2016 yılına doğru hızlı bir artış göstermiştir [1]. Genel bir çerçeveden bakıldığında elektrik enerjisi kömür, doğal gaz, nükleer ve petrol türevleri gibi kirletici ve risk taşıyan yöntemlerin tercih edildiği görülmektedir. Bunun yanı sıra hidroelektrik gibi emisyonuz yöntemlerde büyük bir yüzde elde etmiştir. Dünyada elektrik üretimi için kullanılan kaynak için 2015 yılı verilerine bakıldığında %41 ile en yüksek kömür, %22 ile ikinci sırada doğalgaz ve üçüncü sırada ise %16 ile hidroelektrik santralleri gelmektedir. Türkiye’de ise birinci sırada %41 ile doğalgaz olduğu görülmektedir. Nükleer enerji santrallerinin oluşturduğu risk, kömür santrallerinin çevreye verdiği zararlı kükürt dioksit ve diğer termal enerji kaynaklarının çevreye verdiği zararların korkunç seviyede olduğu bilinmektedir [2].

Küresel ısınma, enerji kaynaklarının azalması ve insan sağlığına olan zararı nedeniyle toplumlar yenilebilir enerji kaynaklarına yönelim göstermiştir. Dünya ülkeleri bu zararları göz önünde bulundurarak daha yaşanabilir yarımlar için yenilenebilir enerji kaynaklarına yatırımları artırmışlardır. Bu enerji kaynaklarını genel olarak sıralarsak güneş enerjisi, rüzgâr enerjisi, dalga enerjisi, gelgit, jeotermal ve biyokütle gibi kaynaklar sayılabilir. Bu enerji kaynaklarından elde edilen elektrik enerjisi bataryalarda depolanarak kullanılabilir [3]. Fakat bu kaynakların kullanımında tüm proseslerin maliyeti hesaplandıktan sonra birim maliyet en önemli unsurlardandır. Genel yapıya bakıldığında fosil yakıtlardan elde edilen enerjinin birim fiyatı diğer enerji kaynaklarına göre daha düşüktür. Bu durum toplumlara cazip gelmekte ve o yöne doğru yönlendirmektedir [4]. Bu sebeple günümüzde insanların karbon ayak izini azaltmak için öncelikle temiz enerji kaynaklarının birim maliyetinin düşürülmesi gerekmektedir. Bu çalışılan enerji kaynaklarına ek olarak alternatif enerji kaynakları da mevcuttur. Alternatif enerji kaynakları insanların enerji ihtiyaçlarını karşılamaya, gelecek ve temiz bir çevre için umut oluşturmuştur. Bu enerji kaynaklarına son zamanlarda üzerinde yoğunlaşılın ve geleceğe karşı bir umut ışığı doğuran yakıt hücreleri teknolojisi eklenmiştir [3]. Yakıt hücreleri genel anlamda kimyasal enerjiyi elektrik enerjisine çeviren ve kirletici emisyonları sıfıra yakın olan bir enerji jeneratörüdür. Yakıt hücreleri kendi içinde birçok türevden oluşmaktadır. Yakıt hücreleri ve biyoyakıt hücreleri olarak iki farklı grupta değinilebilir. Proton değişim membranlı yakıt hücreleri (PDMYH), doğrudan metanol yakıt hücreleri (DMYH), katı oksit yakıt hücreleri (KOYH), alkali yakıt hücreleri (AYH), erimiş karbonat yakıt hücreleri (EKYH) ve fosforik asit yakıt hücreleri (FAYH) yakıt hücrelerine örnek gösterilebilir. Mikrobiyal yakıt hücreleri (MYH), enzimatik yakıt hücreleri (EYH) ve abiyotik biyoyakıt hücreleri (ABH) biyoyakıt hücrelerine örnek gösterilebilir [3].

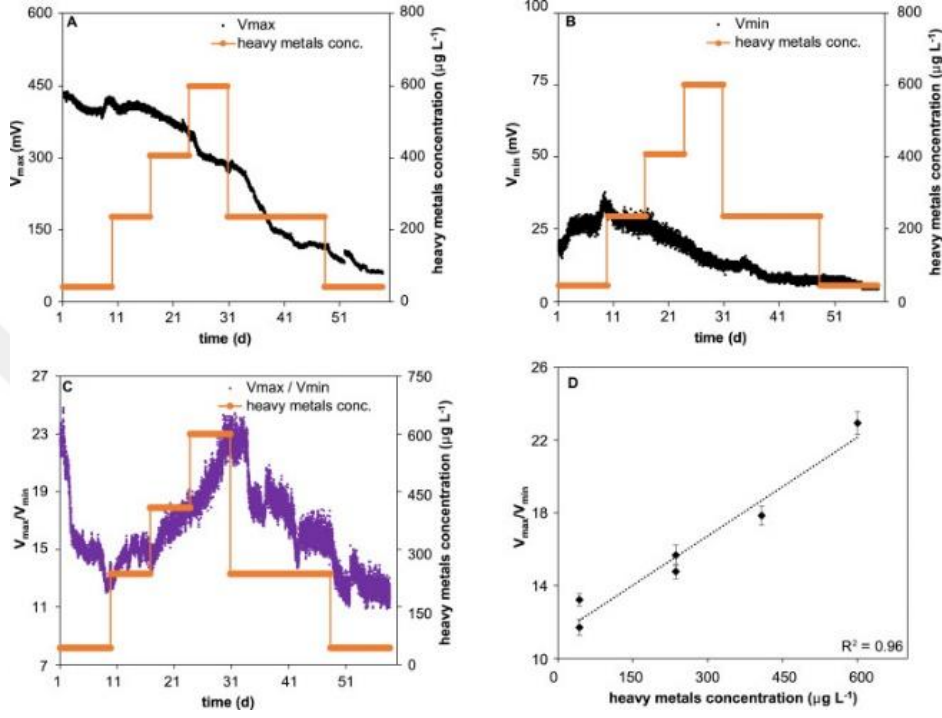
Alternatif enerji kaynaklarından olan mikrobiyal yakıt hücrelerinde en büyük problemlerden birkaçı yetersiz güç çıkışı ve maliyettir. Hücresinin temel yapı taşları elektron toplayıcı olarak iletken elektrot, proton değişim membranı, bakteri kültürü ve besin kaynağıdır. Literatür incelendiğinde hücre performansına etki eden ana faktörlerin başlıca besin maddesinin oksidasyonu, elektroda elektron transferi, iç direnç, proton difüzyonu, katot reaksiyonu, oksijen difüzyonu ve besin akış hızıdır [5]. Elektrot yapısı hücresinin performansını kısıtlayan en önemli faktörlerdendir. Bakteri kültürleri biyokatalizör görevi yapıp elektron ve proton açığa çıkarmasıyla, salınan elektronların elektrot yüzeyine ulaşarak biyofilm oluşturup anot odasından katot odasına en az kayıpla ulaşması beklenir [6]. Elektrotların bu iletim performansı elektrodun iletkenliği ve anot odasındaki bakterilerin temas edeceği yüzey alanına bağlıdır. Çünkü elektrot üzerinde ne kadar çok yüzey var ise o kadar çok elektron transferi sağlanacaktır. Farklı bir açıdan incelenirse iletkenlik ne kadar yüksek olursa elektron kayıpları o kadar az olacaktır. Anot odasına yerleştirilen bakteri kültürü çökmeden dolayı aşağı inildikçe yoğunlaşmaktadır. Besleme amacıyla verilen besin yoğunluğuna göre ve yerçekimi ivmesine göre aşağı doğru hareket edeceği varsayılır. Bu durum aşağı doğru yoğunlaşan bir biyofilm yükselimi sağlamaktadır. Aşağı yoğunlaşan yoğunluğu düzeltmek ve homojenliği sağlamak için bazı çalışmalarda manyetik balık yardımı ile karıştırma yapılmıştır [7]. Literatürde yapılan çalışmalarda genellikle aktif karbon, grafit bazlı veya nadiren de olsa aktif katalizörlü malzemeler çalışılmıştır. Yapılan bu çalışmalarda Şekil 1.1’de görüldüğü gibi yüzey alanı artırılması için karbon kağıt, grafit levha, karbon kumaş, karbon örgü, parçacıklı grafit, parçacıklı aktif karbon, karbon keçe, ağsı camsı karbon, karbon fırça ve paslanmaz çelik örgü gibi materyaller kullanılmaktadır [8].



Şekil 1.1. Mikrobiyal yakıt hücrelerinde kullanılan bazı elektrot malzemeleri: (A) karbon kağıdı; (B) grafit levha; (C) karbon bezi; (D) karbon örgü; (E) tanecikli grafit; (F) taneli aktif karbon; (G) karbon keçe; (H) ağsı vitrifiye karbon; (I) karbon fırçası; (J) paslanmaz çelik örgü [8]

Bu materyaller yüksek başarılar elde etmiş olsa da henüz yeterli seviyeye ulaşılmış değildir. Elektrodun verimliliğin artırılması üzerine yüzey alanı, iletkenlik ve düşük maliyet bu teknolojinin geleceği için hayati öneme sahiptir. Hücresinin anot kısmında gerçekleşen yükseltgenme tepkimeleri akım çıkışına ciddi etkiler yapmaktadır. Bu tepkimelerin iyileştirilmesi gerekmektedir. Oksidasyon hızı bire bir güç verimliliğiyle ilgilidir. Yapılan çalışmalarda biyosensör teknolojilerinin de temeli

olan besin oksidasyonu enerji çıkışı ile yapılan önceki çalışmalardan alınmış biyosensör verisi olan Şekil 1.2’de görüldüğü gibi doğru orantılıdır [9], [10]. Bu çıkış verilerinin karakteristik özelliklerine göre verilen besin maddesinin türünü tespiti yapılan çalışmalar ile ispatlanmıştır. Bu sebeple oksidasyonun önemi yüksektir ve iyileştirilmesi gereken önemli faktörlerdendir.



Şekil 1.2. Mikrobiyal yakıt hücresi biyosensör verisi [11]

Bu çalışmada mikrobiyal yakıt hücrelerinde farklı elektrot geometrileri kendi aralarında farklı elektrot yapıları ile karşılaştırılması, hücre içinde elektrot konumunun elektriksel performansa olan etkisi, elektrot adedinin hücre performansına olan etkisi, ortam şartları ve besleme miktarı gibi parametrelerin mikrobiyal yakıt hücrelerinde güç çıkışı üzerindeki etkilerinin araştırılması amaçlanmıştır. Bu parametrelerin sayısal olarak dönüştürülüp MATLAB ortamında yapay sinir ağı (YSA) ile eğitilip eğitilemeyeceği, regresyon oranları sapmalar araştırılıp, araştırma ve geliştirme kapsamında kullanılabilirliği tespit edilecektir.

2. MİKROBİYAL YAKIT HÜCRELERİ

Mikrobiyal yakıt hücreleri, anot odasında anaerobik bakterilerin çoğalması ve organik besinlerle beslenip parçalanması yoluyla oksidasyon gerçekleştirir. Bu süreçte, proton değişim membranından geçen protonlar ve bir yük üzerinden geçirilen elektronlar, katot odasında oksijenle tepkimeye girerek su bileşenine indirgenir ve böylece enerji üretimi gerçekleşmiş olur. Bu sayede temiz enerji ve birçok kullanım alanı sunmaktadır.

2.1. Mikrobiyal Yakıt Hücresinin Çalışması

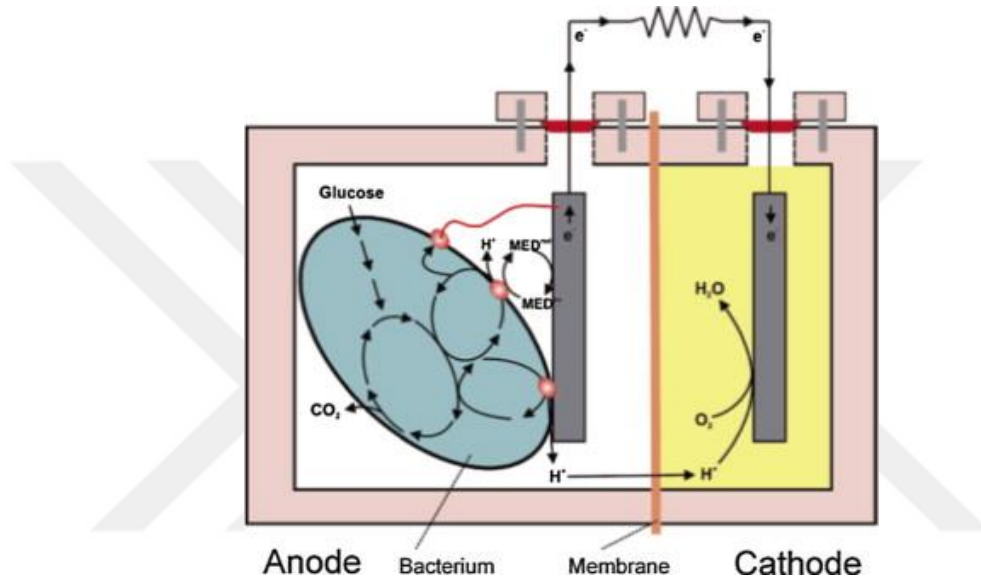
Biyolojik yakıt hücreleri enerji üretimini enzimler veya enzim dışı proteinleri kullanarak, enzimatik katalizör veya biyokatalizör özelliği ile besinleri parçalayarak elektrokimyasal işlemlerle enerji üretimi sağlamaktadır. Tarihe bakıldığında biyoloji ile elektrik arasındaki bağ için ilk çalışmalar 1791 yılında kayıtlarda görünmektedir. Kurbağa bacağına verilen statik elektriğin kurbağa bacağına hareketlendirmesi ile başlayan deneylerle öne çıkmıştır [12]. Bu serüvenin devamında elektroliz işlemi ile parçalanmış hidrojen ve oksijen atomu tekrar birleştirilerek elektrik enerjisine dönüştürülmüştür. Bu çalışmaların temelinde gerçekleştirilen çalışmalarda mikrobiyal yakıt hücreleri üzerine çalışmalar gerçekleştirilmiştir [13]. Biyoelektriği bir yakıt hücresinde kullanma olasılığı, devamında yapılan çalışmalardan sonra genişlemiştir [14]. Geçen yüzyılda MYH'lerin gelişimi açısından birkaç önemli atılımlar gerçekleştirilmiştir. Bunlar aşağıdaki gibi sıralanabilir;

- Mediyatörlü MYH'lerden mediyatörsüz MYH'lere
- Membranlı MYH'ler ve membran sız MYH'ler arası
- MYH'lerin performansını ve pratik uygulamasını ticari yollarla iyileştirmeyi amaçlayan elektron transferi yapabilen bakterilerin mekanizmalarının altında yatan keşifler

Mikrobiyal yakıt hücreleri biyoelektrik üretimi için anaerobik bir anot bölmesinde biyokatalizör olarak aktif bir mikroorganizma kullanan yakıt hücresidir. Her ne kadar bakteriler tarafından üretilen elektrik akımı 1911'de gözlemlenmiş olsa da sonraki 50 yıl içinde bu alanda sınırlı uygulanabilir sonuçlar elde edilmiştir [15], [16]. Bununla birlikte, 1990'ların başında, yakıt hücreleri çok daha çekici cihazlar haline gelmiştir. Ayrıca MYH'lerin araştırma alanı, arabulucunun MYH'ler içinde zorunlu bir bileşen olmadığı 1999'da keşfedildikten sonra çok daha genişlemiştir [17], [18].

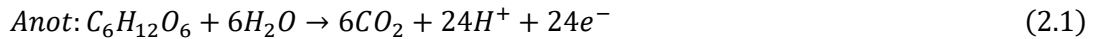
Yapısal olarak MYH'lere bakıldığında bir anot bir katot odacığından oluşmaktadır. Anot ve katot odalarında elektron toplayıcı bir sistem olan elektrot ve bu ikisini birbirine dış devre aracılığı ile bağlayan yük mevcuttur. Anot tarafına biyokatalizör olarak bir bakteri kültürü konulmaktadır. Konulan bu bakteri kültürüne beslenen organik substratları bakterilerin parçalaması ile oksidasyon gerçekleşir. Bu oksidasyon sonucunda proton ve elektron açığa çıkar. Bu iki odayı ayıran bir proton

değişim membranı bulunmaktadır. Bu membran elektronların geçişine izin vermeyip, sadece protonların geçişini sağlayacak şekilde tasarlanmıştır. Anot tarafında oluşan bu protonlar, proton değişim membranından katot bölmesine geçer. Oluşan elektronlar ise devreyi elektrotlar üzerinden dış devre aracılığıyla tamamlayarak katot bölgesinde suya paralel oksijenle tepkimeye girerek su oluşumu sağlar. Anot odasında oksijen bulunması anodik tepkimeye engel olup elektrik üretimini engelleyeceğinden anot anaerobik olmalıdır. Katot bölgesinde ise oksijenle indirgeme tepkimesi olduğu için aerobik olmalıdır [19]. MYH'nin genel yapısı Şekil 2.1'de verilmiştir.



Şekil 2.1. MYH genel yapısı [19]

Glikoz örnek substrat olarak alınırsa MYH'de gerçekleşen tepkime şu şekildedir;



Glikozun anot odasındaki tepkimesinde glikoz bileşiği ve 6 adet su bileşiği oksidasyon tepkimesine girerek 6 adet karbonmonoksit, 24 adet hidrojen protonu ve 24 adet elektron açığa çıkarmaktadır. Hidrojen protonu, proton değişim membranı vasıtasıyla katot odasına geçmektedir. Elektronlar elektrot vasıtasıyla dış devreye ve oradan katoda akmaktadır. Katot odasında, proton değişim membranından geçen hidrojen protonu, dış devreden gelen elektron ve havadaki 6 adet oksijen elementi ile redüksiyon tepkimesine girerek su ve enerji oluşumu gerçekleşmektedir.

Genel uygulamalarda MYH'nin voltaj performansını aktivasyon kayıpları, ohmik kayıplar ve kütle transfer kayıpları etkiler. Bu enerji kayıpları, anot ve katot bölmelerinde gerçekleşen elektrokimyasal reaksiyonlar, yük taşınması ve kütle transfer işlemleri nedeniyle kaybedilen akımı telafi etmek için gereken voltaj olarak tanımlanabilir. Bu kayıplar sistemden sisteme göre farklılık

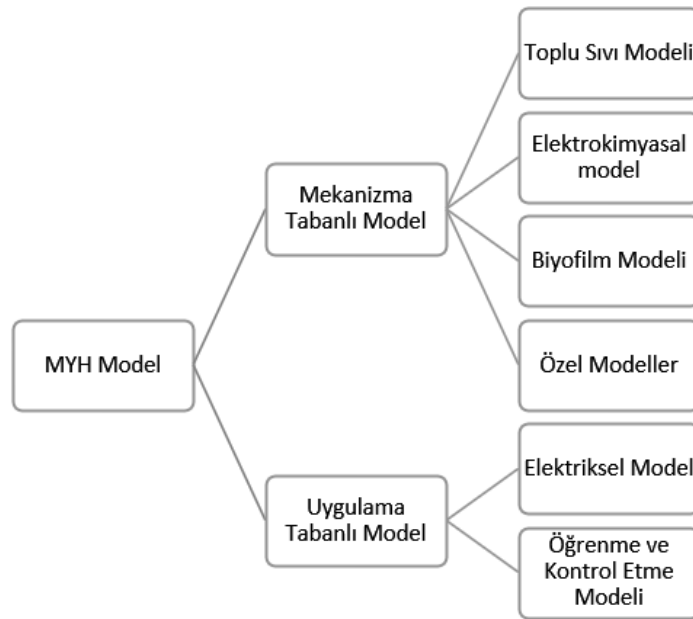
gösterebilir. Gerçek çalışma voltajı çıkışı ($V_{\text{çal}}$) bir MYH'nin, her bölmedeki kayıplarının çıkarımı aşağıdaki denklemdeki gibi çıkarılabilir;

$$V_{\text{çal}} = E_{\text{termo}} - [(\eta_{\text{akt}} + \eta_{\text{ohmik}} + \eta_{\text{kons}})_{\text{anot}} + (\eta_{\text{akt}} + \eta_{\text{ohmik}} + \eta_{\text{kons}})] \quad (2.3)$$

Burada E_{termo} termodinamik olarak tahmin edilen voltajdır, η_{akt} reaksiyon kinetiğinden kaynaklanan aktivasyon kaybıdır ve η_{ohmik} iyonik ve elektronik dirençlerden kaynaklanan ohmik kayıp olduğunu söylenebilir. Diğer bir parametre olan η_{kons} ise kütle transferi sınırlamalarından kaynaklanan konsantrasyon kaybıdır [20].

2.1.1. Mikrobiyal Yakıt Hücresinin Modelleri ve Türleri

Mikrobiyal yakıt hücreleri mekanizma tabanlı ve uygulama tabanlı olarak iki grupta değerlendirilebilir. Mekanizma tabanlı modellerde daha çok substrat hızı, elektrokimyasal çalışma, biyofilm gibi temel konular üzerinde durulmaktadır. Uygulama tabanlı yaklaşımda ise elektriksel çalışma ve kontrolör sistemli çalışmalar ele alınmıştır. Burada mekanizma tabanlı model genellikle substrat ve bakteri topluluğunun bulunduğu sistemler çalışması, elektrokimyasal modellerde çıkış voltajı akım veya güç gibi parametreler üzerine odaklı çalışmalar, biyofilm oluşumunu etkileyen fiziksel ve kimyasal özellikleri üzerine yapılan çalışmalar ve diğer özel modeller üzerinde çalışmaların kategorize edilmiş toplamıdır [21]. Bu sınıflandırmalar Şekil 2.2'de kategorize edilmiştir.

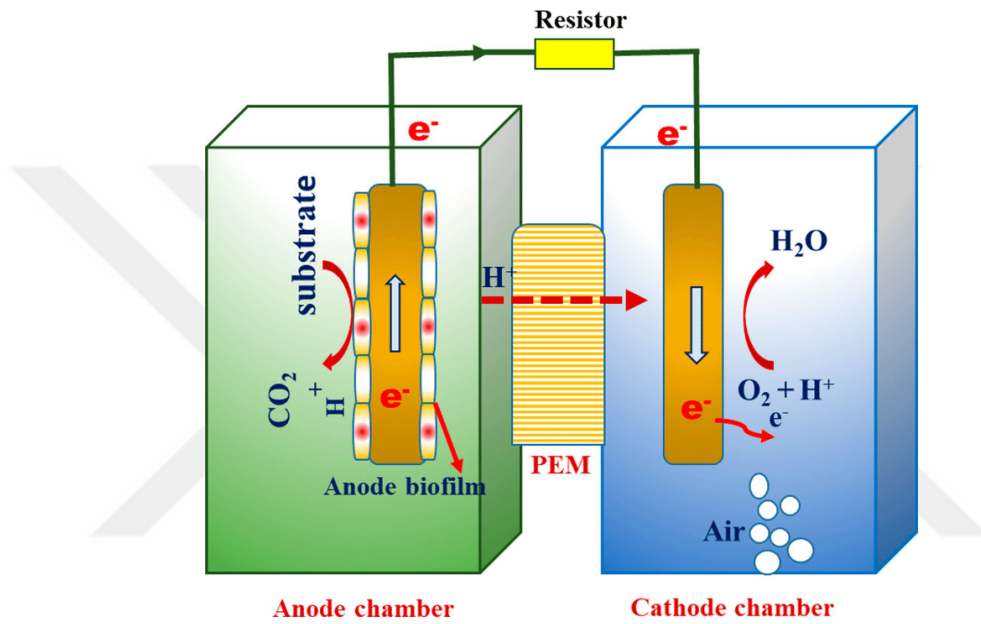


Şekil 2.2. MYH Kategorizasyonu

Esfandyari ve arkadaşları, bakterilere özgü büyüme oranını, yani Monod, Blackman ve Tessier'i tanımlayan üç tür ifadeyi karşılaştırmıştır. Deneysel sonuçlar, Monod denkleminin, substrat tüketimine bağlı olan bakteriyel büyüme oranını sunmak için önemli bir uygulanabilirlik sergilediğini ortaya koymuştur [22]. Zeng ve arkadaşları zardan sadece katyonların aktarıldığı varsayarak türlerin zardan geçen iyon akışını, türlerin yük sayısı ile çarparak akım yoğunluğunu belirlemişlerdir [23]. Kato Marcus ve arkadaşları MYH'lerin iletim mekanizmasına dayalı bir model sunmuş ve iki tür mikroorganizma tanımlamışlardır: Bunlar aktif biyokütle ve aktif olmayan biyokütledir. Birincisi substratı oksitlemiştir ve büyümesi için güce dönüştürmüştür. İkincisi, elektronları doğrudan aktarmak için iletken malzemeleri oluşturmuştur [24]. Oyetunde ve arkadaşları nispeten hızlı bir hesaplama ile tahmin yapmak için uygulanabilecek basit bir model oluşturmuşlardır. Mekanizmanın ayrıntılı gösterimini kaybetmeden uygulamanın karmaşıklığını azaltmayı amaçlayan model, birden fazla elektrotta meydana gelen reaksiyonları tanımlamışlardır. Farklı kimyasal veya biyolojik türlerin akımın tüketimi ve üretimi üzerindeki etkisini tanımlamışlardır [25]. Sindhuja ve arkadaşları iki bölmeli bir MYH için farklı elektrot malzemeleri için iki eşdeğer devre modeli oluşturmuşlardır. Hem katot hem de anot için sırasıyla Elektrokimyasal empedans spektroskopisi (EES) ölçümü ve anot aşırı geriliminin hesaplanması yoluyla, aktif kömür elektrotu için toplu bir eşdeğer devre modeli ve grafit elektrot için uydurma eşdeğer devre modeli oluşturulmuştur. Deneyler, aktivasyon aşırı potansiyelinin bir MYH'nin aktif kömür elektrotlu reaksiyon hızında önemli bir rol oynadığını ancak grafit elektrot ile göz ardı edildiğini doğrulamıştır [26]. Oysa Garg ve arkadaşları Yapay sinir ağının modelleme performansını çok genli genetik programlama (ÇGGP) ve destek vektör regresyonu (DVR) ile karşılaştırmışlardır. Prosedürde daha az giriş değişkeni, yani sıcaklık ve demir sülfat konsantrasyonları seçilmiştir. Bu girdi etkili faktörlerin çıkış voltajı üzerindeki etkisi, bir MYH'nin yıldız yükselme öncesi ve sonrası döneminde tartışılmıştır. Üç yaklaşımda doğrulama deneyinin korelasyon katsayısı değerlendirilmiş, üç yöntem arasında daha iyi genelleme yeteneği ve daha az hesaplama süresi sunan ÇGGP yönteminin üstünlüğü tanımlanmıştır. DVR yönteminden daha iyi performans gösteren YSA doğrulanmıştır. Buna göre, giriş değişkenlerinin düzenlenmesiyle çevrimdışı mod altında MYH'nin voltajının tahmin edilmesi ve maksimize edilmesinin fizibilitesi önerilmiştir [27]. MYH'nin performansını, kullanım kolaylığını ve pratik yardımcı programını geliştirmek için, MYH'nin farklı konfigürasyonları gösterilmiştir. Biyoremediasyon, elektrik üretimi, biyoyakıt üretimi, çeşitli yan ürün geri kazanımı, güç kaynağı olarak ve biyosensör olarak hareket etmede potansiyel uygulama için geleneksel olarak çeşitli konfigürasyonlar geliştirilmiştir. MYH yapılandırmalarının çoğu, çalışma ve araştırma amacıyla laboratuvar ölçeği ile sınırlıdır. Yine de endüstriyel ölçekli MYH'ler için dikkate alınması gerekmektedir. Çünkü bir MYH türü çeşitli uygulamalar için yeterli şekilde kullanılamayacağı düşünülmektedir.

Çift Odacıklı Mikrobiyal Yakıt Hücresi

Esas olarak sırasıyla anot ve katot olmak üzere iki farklı odadan oluşur. Her iki odada iyonik iletkenlik için bir membran veya tuz köprüsü, elektron akışı için harici bir devre ile birleştirilir. Mikroorganizmalar veya elektrojenler anot elektrodunun yüzeyinde büyür. Yapılandırılmış MYH'lerden bazıları Şekil 2.3'te gösterildiği gibi H şeklinde çift odacıklı MYH, küboid şekilli MYH'ler (düz plakalı MYH'ler olarak da adlandırılır), yukarı akışlı çift odacıklı ve eş merkezli boru şeklindeki MYH'lerdir.

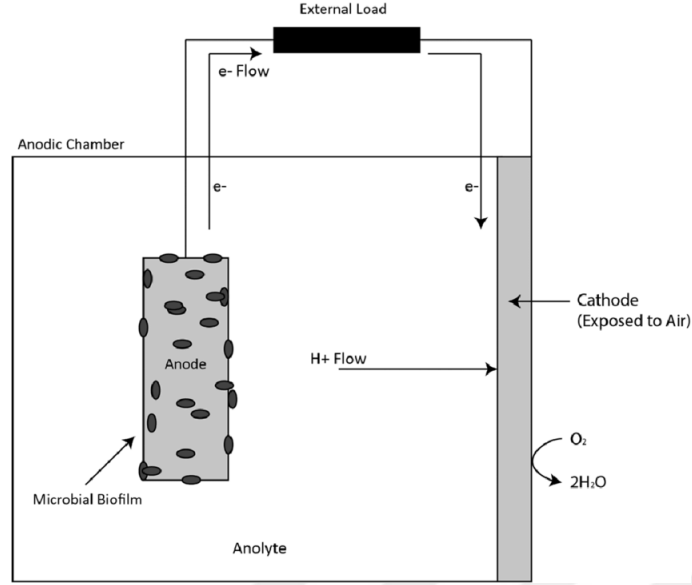


Şekil 2.3. Çift odacıklı mikrobiyal yakıt hücresi [28].

Bu hücre tipi literatürde en çok tercih edilen hücre tipidir. Çalışması basit ve gözlemlenebilirliği ile ilgi çekmektedir. Problem oluşması durumunda müdahale etmek kolaydır. Önemli yönleri olarak katodik reaksiyonun performans açısından sınırlayıcı en önemli faktör olduğu ve besleme oranı değişiklikleri performansı artırabileceği söylenebilir [29].

Tek Odacıklı Mikrobiyal Yakıt Hücresi

Tek odacıklı MYH'lerde, ayrı anodik ve katodik odalar yoktur ve bu nedenle farklı elektrolitler de gerekli değildir. Elektron transferi yapabilen mikroplar tarafından üretilen elektronlar Şekil 2.4'te gösterildiği gibi anoda doğru ve daha sonra katoda doğru akar. Tek odacıklı MYH'nin çok sayıda konfigürasyonu önerilmiştir, örneğin yukarı akışlı tek odacıklı, basit hava-katot konfigürasyonu, küp tipi MYH, silindirik Hava katot MYH, konsantrik boru şeklindeki MYH gibi çalışmalar literatürde mevcuttur [30].

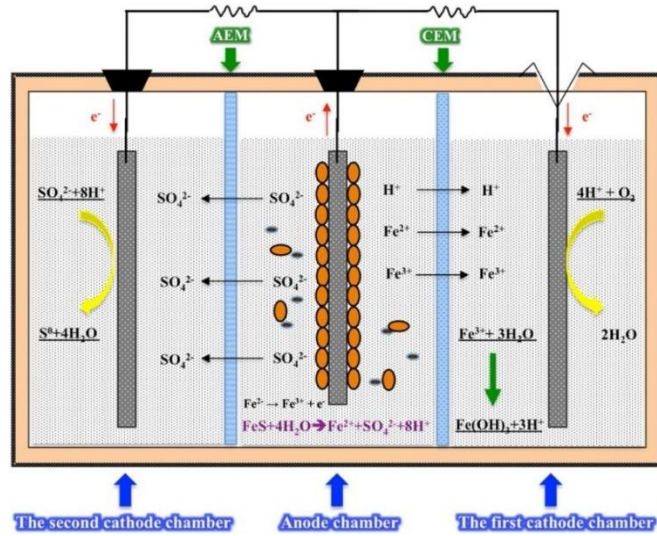


Şekil 2.4. Tek odacıklı mikrobiyal yakıt hücresi [31].

Çalışma basitliği ile bu hücre yapısı düşük maliyet avantajı sağlamaktadır. Bu yapıdaki mikrobiyal yakıt hücreleri çift odacıklı mikrobiyal yakıt hücresi kadar ilgi görmektedir.

Çok Odacıklı Mikrobiyal Yakıt Hücresi

Güç çıkışını artırmak için çok bölmeli MYH'ler üzerinde çalışmalar yapılmıştır. Öncelikle, bu MYH tasarımı, sırasıyla anot ve katot için iki dış hazneden ve bir tampon bölge için bir iç bölmeden oluşur. Her bölme Şekil 2.5'teki gibi diyaliz membranı ile ayrılmıştır.

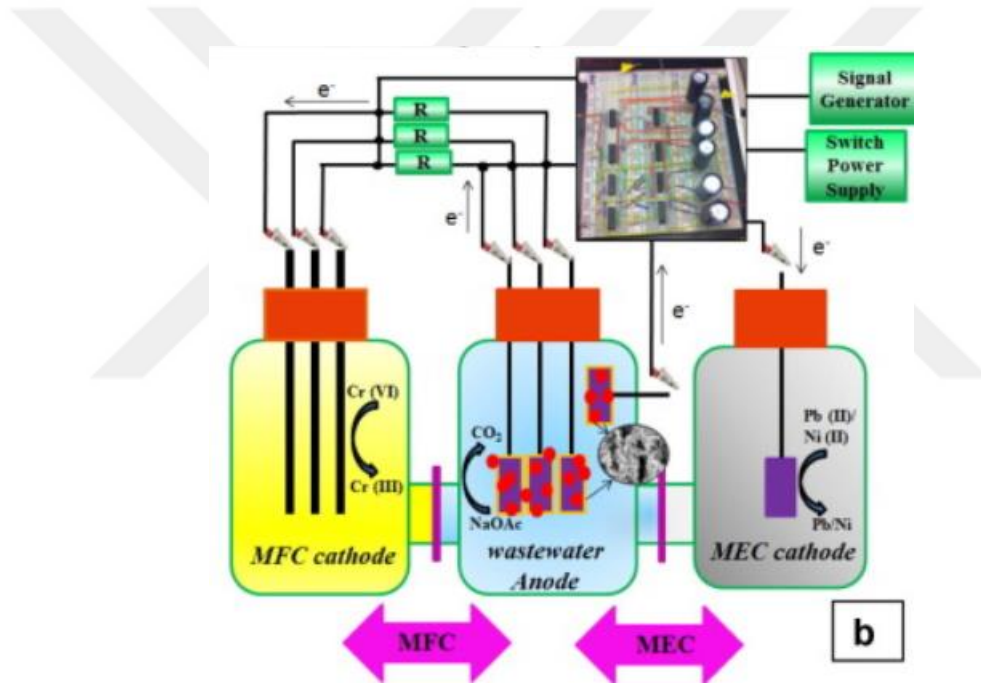


Şekil 2.5. Çok odacıklı mikrobiyal yakıt hücresi [32].

Bu hücre tipinin elektrot alanı, şekiller ve katolit konsantrasyonu gibi katodik parametrelerin güç üretimini etkileyen faktörler olduğu araştırmacılar tarafından öne sürülmüştür [33].

Hibrit Mikrobiyal Yakıt Hücresi

Hibrit MYH'ler, bağımsız süreçlerde meydana gelen enerji kaybının üstesinden gelmek için ortaya çıkmakta ve hala erken gelişim aşamasındadır. İki tekniği bir sistem konfigürasyonu olarak birleştirmek, bazı ortak parçaları veya bileşenleri paylaşarak toplam maliyeti azaltılması sağlanabilmektedir. Şekil 2.6'da olduğu gibi hidrojen üretimi ve elektrik üretimi için MYH-MEH (Mikrobiyal Elektroliz Hücresi) bağlantılı sistemi ve atık su arıtımı için MYH-MB (Membran Biyoreaktör) bağlantılı sistemi içerir [34]. Tek odacıklı-çift odacıklı hibrit sistemler de çeşitli prosesler için incelenmiştir [35].



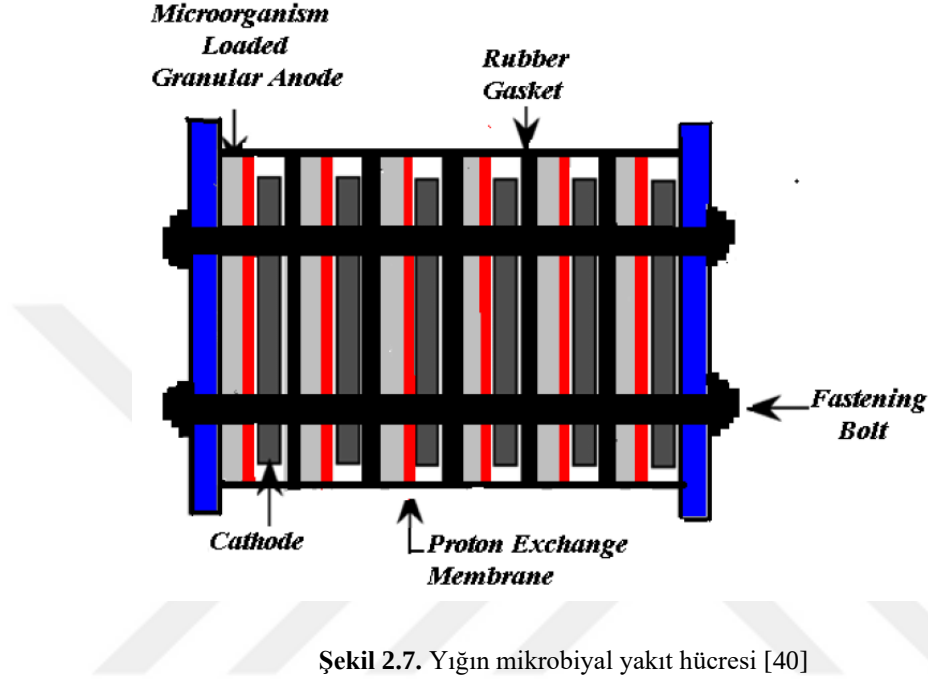
Şekil 2.6. Hibrit mikrobiyal yakıt hücresi [36].

Hibrit mikrobiyal yakıt hücresi tek ve çift odacıklı hücrelere karşı daha yüksek operasyonel kararlılık ve yığılda iyileşmiş performans göstermektedir [37]. Araştırmacılar hibrit sistemin bağımsız sistemlerden daha umut verici olduğu, biyoelektrik, biyoürünler üretmek ve biyolojik iyileştirme için kullanılabileceğini öne sürmektedirler. Hibrit sistemlerin pratik hale gelebilmesi için bir çok engelin aşılması gerektiği düşünülmektedir [38].

Yığın Mikrobiyal Yakıt Hücresi

Yığın konfigürasyonu, Şekil 2.7'de gösterildiği gibi seri veya paralel olarak birbirine istiflenen pil olarak bir yakıt hücresi gerektiren bir MYH türüdür. Her iki durumda da verimli güç üretimi

gözlemlenebilir ve güç kaynağında pratik uygulama için kullanılabilir. Bu, sırasıyla seri bağlantılarda yüksek voltaj ve paralel bağlantılarda akım verir. Gerekli verimliliğe bağlı olarak, iki kutuplu elektrot yığını, yatay yığın, dikey yığın, modüler MYH yığını, vb. alt bölümlere ayrılmaktadırlar [39].

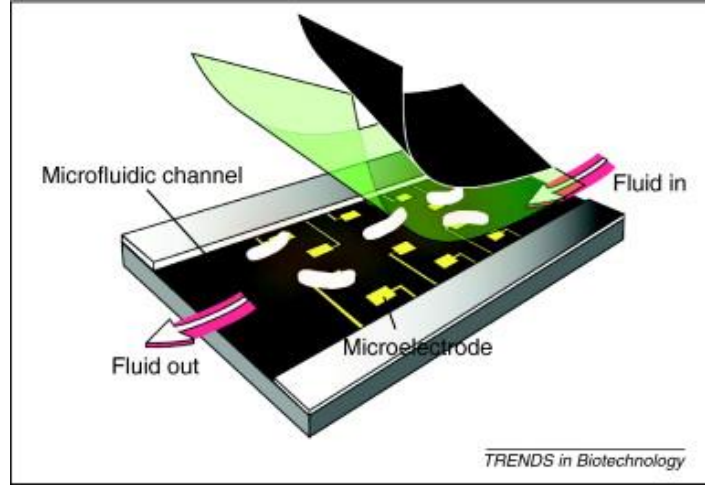


Şekil 2.7. Yığın mikrobiyal yakıt hücresi [40]

Yığın hücreler sürekli enerji ihtiyacı talep edilen durumlar için umut verici bir yöntem olarak tercih edilebilmektedir.

Minyatür Mikrobiyal Yakıt Hücresi

Minyatürleştirilmiş MYH veya küçük boyutlu MYH'ler, genellikle Şekil 2.8'de gösterildiği gibi mikrolitre veya mililitre aralığında daha düşük bir hacimle çalışacak şekilde geliştirilmiştir. Birkaç küçük boyutlu MYH'de yüksek akım yoğunluğu çıktısı gösterilmiştir. Bunun dışında, elektronların elektrik üreten mikroplardan elektrot yüzeyine transferinin arkasındaki mekanizmayı anlamak için etkili bir şekilde kullanılabilmektedirler. Küçük boyutlu olduklarından, bu tür MYH'lerde anot-mikrop teması olasılığı nispeten daha yüksektir. Dolayısıyla hücre içindeki mikro çevreyi hassas bir şekilde kontrol etmek oldukça mümkündür [41]. Minyatür mikrobiyal yakıt hücreleri düşünülenin aksine iyi performans gösterebilmektedir. Araştırmacılar yaptıkları çalışmalarda yüksek performans ve gelecek konusunda umut verici olarak görmüşlerdir [42], [43], [44].



Şekil 2.8. Minyatür mikrobiyal yakıt hücresi [45].

3. MİKROBİYAL YAKIT HÜCRESİNDE ELEKTROT, ORTAM KOŞULLARI, BESİN VE BESLEME REJİMİNİN ETKİSİ

3.1. MYH’lerde Elektrot Yapısının ve Türünün Etkileri

MYH’lerde anot kısmı anot bölmesi, mikrobiyal kültür, substrat ve anot elektrodun kapsandığı kısımdır. Bu kısım üç boyutlu olarak tasarlanır ve performansa etkisi ölçüm bazındadır. Performans kapsamı birimsel değerlemede alınan güç, voltaj veya akımdır. Bu birim anaerobiktir. Oksidasyon sonucunda ortaya sera gazı olan CO₂ ortaya çıkmaktadır [46]. Pleksiglas, cam vb. sızdırmaz bir materyal ile oluşturulabilir. Geometrik olarak etkisi, çalışma alanı olarak incelendiğinde zayıf kaldığı görülmektedir.

Anot elektrotları bakterilerin substratları oksitledikten sonra oluşan elektronları üzerine alan ve yüke ulaştıran komponenttir. MYH teknolojisinde üzerine en çok çalışılan konulardan bir tanesidir. Bu elektrotlarda önemi vurgulanan parametreler Tablo 3.1’ de gösterilen yüzey alanı, gözeneklilik, kirlenme ve zehirlenme azaltılması, iletkenlik, biyoyumluluk, kararlılık ve dayanıklılık, maliyet gibi sıralanabilir.

Tablo 3.1. MYH’lerde kullanılan bazı elektrot malzemelerinin yüzey alanları [47], [48], [49], [50], [51]

Anot malzemeleri	Yüzey alanı (m ² /g)
Karbon bez	0,0045
Karbon fiberler	7,11
Grafit köpük	0,0061
Grafit çubuk	0,0065
Grafit keçe	0,020
Grafit elyaf fırça	9600 m ² /m ³
Grafen	264

Elektrotların gözenekliliği ve yüzey alanı yüksekliği bakterilerin yataklanması ve daha etkin oksidasyon üretilip elektron transferi yapmasını sağlayacaktır. Elektrotların uzun süreli kullanımlarında kirlenme ve zehirlenme oluşmaktadır. Bunun sebebi tekrarlayan döngülerdir. Zehirlenme ve tıkanma olmaması için daha fazla alana ihtiyaç duyulmuştur. MYH’lerde elektroda aktarılan elektronlar yüke ve oradan katoda taşınması gerekmektedir. Bu sebeple elektrodun iç direncinin en az olması bu taşınımı daha kolay hale getirecek olup verimliliği artıracaktır. Mikroorganizmalar anotta elektrotla uyumlu çalışması gerekmektedir. Bazı elektrot tipleri mikro organizmalar için Sitotoksik olmaktadır. Bunun için biyoyumluluğa uygun elektrotlar seçilmektedir. MYH ortamında sulu ve asidik ortam bulunmaktadır. Bu durum anot malzemesi üzerinde kabarmalara neden olabilir ve elektriksel aktiviteyi düşürür. Bu yüzden kabarmalara

dayanabilecek malzemeler seçilmesi ömür ve verimlilik açısından daha uygun olacağı düşünülmektedir [47], [48], [49], [50], [51]. MYH'ler yapısal anlamda hidrojen yakıt hücreleri kadar pahalı olmasa da maliyetleri yüksektir. Bu nedenle yapılan çalışmalar çoğunlukla birim maliyet başına düşen enerji üretimini yükseltmeyi hedeflemiştir. Şu an mevcut durumdaki maliyeti ticarileşmesi ve yaygınlaşması önünde engel teşkil etmektedir. Tablo 3.2'de karbonlu anot elektrotları üzerindeki araştırmaların genel derlemesi görülmektedir.

Tablo 3.2. Karbonlu anot elektrotları üzerindeki araştırmalar [47], [48], [49], [50], [52], [53], [54], [55], [56], [57], [58], [59], [60], [61], [62], [63], [64], [65], [66], [67], [68], [69], [70]

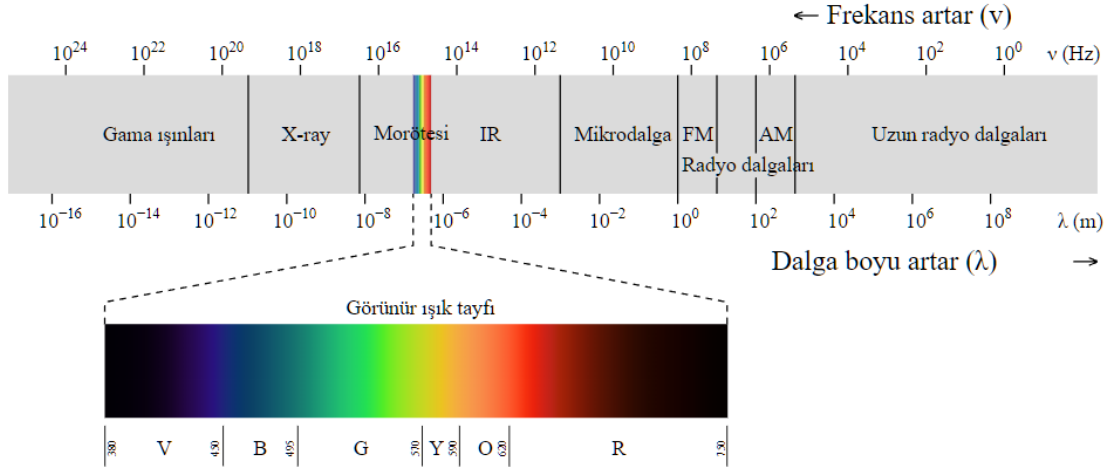
Anot Elektrodu	Katot Elektrodu	Biyokatalizör	Substrat	Reaktör tipi	MYH Verimliliği
Karbon bez	Pt yüklü karbon bez	Anaerobik çamur	Asetat	Çift odalı	G.Y.=610 mW/m ²
	Pt yüklü karbon kağıt	Deniz tortusu	—	Tek odalı	G.Y.=112 mW/m ²
	Pt yüklü karbon bez	<i>Desulfovibrio desulfurikanlar</i>	Na_2SO_4 , $MgSO_4$, $FeSO_4$	Tek odacıklı hava katot	G.Y.=0.51 mW/cm ² A.Y.=2,2 mA/cm ²
	Karbon bez	Evsel atık su	Sodyum asetat	Çift odalı	G.Y.=5 W/m ³
	Karbon bez	Atıksu	Asetat	Çift odalı	G.Y.=1292±69 mW/m ²
Karbon kağıt	Pt yüklü karbon bez	Atık su	Glikoz	Tek odacıklı hava katot	G.Y.=262±10 mW/m ²
	Pt yüklü karbon kağıt	<i>Geobacter metallireductens</i>	Asetat	Çift odalı	G.Y.=38 mW/m ²
Karbon keçe	Karbon fiber keçe	Anaerobik çamur	Glikoz	Yukarı akış	G.Y.=784 mW/m ²
	Karbon keçe ve paslanmaz çelik	Acı sudaki mikroplar	—	Tek odalı	G.Y.=12.3 µW/cm ²
Karbon Keçe	Karbon keçe	Anaerobik çürütücü çamur	Sodyum asetat	Çift odalı	G.Y.=285 mW/m ²
Retiküle vitreus karbon	Retiküle vitreus karbon	Bira fabrikası atık suyundan anaerobik kızak granüler	Sakaroza	Yukarı akış	G.Y.=170 mW/m ²
Karbon fırça	Gaz difüzyon katmanlı karbon bez	Çamur	Sodyum asetat	Çift odalı	G.Y.=4,25 W/m ²
Grafit keçe	Grafit keçe	<i>S. putrefaciens</i>	Glikoz ve laktat	Çift odalı	Akım = 0,04 mA
	Grafit keçe	<i>Rhodoferrax ferrireducens</i>	Glikoz ve fumarat	Çift odalı	A.Y.=74 mA/m ²
	Grafit keçe	<i>S. oneidensis</i>	—	Diyaliz tüpü MYH'leri	Güç≈0,02 mW
	Pt yüklü grafit keçe	<i>S. oneidensis MR-1</i>	Laktat	Çift odalı	—
	Grafit granülleri	Sentetik	Sodyum asetat	Çift odalı	G.Y.=300±46 W/m ³
Grafit plakalar	Mn katkılı Pt örgü	<i>S. oneidensis</i>	Laktat	Çift odalı	G.Y.=0,329 mW/cm ³
	Paslanmaz çelik teller	Nehir çöktirilerindeki mikroplar	—	Tek odalı	G.Y.=12 mW/m ³
Granüler grafit	Grafit paspas	Sentetik	Glikoz ve asetat	Borulu MYH	G.Y.=90 W/m ³
	MgO_2 İşlenmiş grafit keçe	Çamur ve tortu	Sodyum asetat	Borulu MYH	G.Y.=83 W/m ³

Anot elektrodu mikrobiyal yakıt hücresinde ciddi öneme sahiptir. Bu nedenle yukarıdaki özellikleri taşıyan birçok malzeme türü ile çalışılmıştır. Bunları sıralayacak olursak platinyum, altın, paladyum, gümüş gibi yüksek iletken elementler ve rodyum, iridyum, nikel bakır gibi yaygın elementler kullanımı denenmiştir. Bu yapılan çalışmaların dışında Tablo 3.2’de olduğu gibi elektrotlar üzerine yapısal çalışmalarda yapılmıştır. Bunların enerji yoğunlukları incelenmiştir. Karbon bez, karbon kâğıt, grafit plakalar, karbon örgü ve fiberler düz elektrot konfigürasyonuna girmektedir. Karbon keçe, retiküler vitre us karbon, camsı karbon, granül aktif karbon, granüler grafit ve grafit diskler gibi bazı türler üzerine çalışılmıştır [71].

3.2. MYH’lerde Ortam Koşulları

Mikrobiyal yakıt hücreleri biyokimyasal enerjinin elektrik enerjisine dönüşümü konusunda araştırmacıların ilgi alanı olmuştur. Hücrenin anot odası yaşayan bakterilerden oluşmaktadır. Bu bakterilerin biyokatalizör özelliklerinden yararlanılarak oksidasyon tepkimesi gerçekleştirilmekte ve katot odasında redüksiyon tepkimesi ile enerji döngüsü sağlanmaktadır. Yaşayan bu canlı yapı döngüsel işlevlerini yerine getirebilmesi için uygun yaşam koşullarının sağlanması gerekmektedir [72]. MYH’lerde sıcaklık etkin bir parametre olduğu araştırmacılar tarafından tespit edilmiştir. Çoğu araştırmacı sıcaklık artışı ile birlikte performans artışı olduğunu gözlemlemiştir [73], [74], [75]. Bu durum araştırmacılar tarafından membran geçirgenliğinde iyileşme, sıvı çözeltinin iletkenliğin artması ve ohmik direncin düşmesi gibi nedenlere bağlanmıştır [73], [76], [77], [78]. Yapılan bazı çalışmalar ise sıcaklık artışının biyoaktiviteyi artırdığı ve biyofilm oluşumunu desteklediğini göstermektedir [79], [80]. Martin ve arkadaşları yaptıkları çalışmada sıcaklığı mikrobiyal yakıt hücresinde enerji çıkışı ve metan üretimine olan etkisini araştırmak için ısıtıcı kullanarak deneysel çalışma yapmışlardır. Yapılan çalışma sonucunda katodun 62 °C’a yükseltilmesi metan üretimine önemsiz derecede artış ve enerji üretiminde artış sağlamıştır [81]. Mikrobiyal yakıt hücrelerinde ışık hücre performansını etkileyebileceği araştırmalarca değerlendirilmiştir [82]. MYH’lerde fotosentetik bakterilerin varlığı ışık ile artış göstermektedir [83], [84], [85]. Yapılan bu araştırmalar ışık etkisinin mikrobiyal aktivite üzerinde pozitif etkiye sahip olduğunu göz önüne sermektedir. Mikrobiyal yakıt hücrelerinin ışık altında uygun çalışma koşullarında olması güç çıkışı olarak pozitif etki gösterebilmektedir. Xing ve arkadaşları yaptıkları çalışmada fotosentetik bakterilerin ışık şiddetlerine göre davranışlarını incelemişlerdir. Çalışma sonucunda mor kükürtsüz fotosentetik bakterilerinin yüksek ışık şiddetlerinde güç üretimini artırdıklarını doğrulamışlardır [86]. Fraiwan ve arkadaşları yaptıkları çalışmada *Synechocystis sp. PCC 6803* bakterisinin ışığa pozitif tepki verdiği ve diğer hücrelerdeki çalışmaların ihmal edilebilir ışık tepkisine sahip olduğu rapor etmişlerdir [87].

MYH teknolojisinde araştırmacılar ışığın farklı dalga boylarını mikrobiyal yakıt hücrelerinde uygulayarak performans çıkışı incelemiştir. Işık dalga boyuna göre farklı durumlarda olabilmektedir. Şekil 3.1’de ışığın dalga boylarına göre hangi formlarda olduğu görülmektedir. [88]



Şekil 3.1. Dalga boyuna göre sınıflandırma [88].

Yukarıdaki şekilde görünür ışığın dalga boyu olarak 400-700 nanometre aralığında olduğu görülmektedir. Tablo 3.3’de bazı renklerin dalga boyu aralığı görülmektedir [88]. Tabloda nm nanometre ve THz tetrahertz’dir

Tablo 3.3. Renklerin dalga boyu aralığı ve frekans aralığı tablosu [88].

Renk	Dalga Boyu Aralığı	Frekans Aralığı
Kırmızı	~ 700–635 nm	~ 430–480 THz
Turuncu	~ 635–590 nm	~ 480–510 THz
Sarı	~ 590–560 nm	~ 510–540 THz
Yeşil	~ 560–490 nm	~ 540–610 THz
Mavi	~ 490–450 nm	~ 610–670 THz
Mor	~ 450–400 nm	~ 670–750 THz

Mikrobiyal yakıt hücrelerinde ışık ile yapılan deneysel çalışmalar dışında araştırmacılar ışığın dalga boyuna göre enerji çıkışı ile ilgilenmişlerdir. Bandarov ve arkadaşları yaptıkları çalışmada mikrobiyal yakıt hücresinin performansına etkisini araştırmak için farklı dalga boylarına sahip monokromatik ışık ile deneysel çalışma yapmışlardır. Yaptıkları çalışma sonucunda akım artışının şiddeti foto periyodun süresine ve uygulanan monokromatik ışık kaynağının dalga boyuna bağlı olduğu ve ışık ışınlamının en yüksek etkisi, oksijenli fotosentez yapan mikroorganizmaların ışık toplama sistemindeki temel pigmentlerin absorpsiyon zirvelerine karşılık gelen dalga boylarında

elde edildiğini deneysel olarak tespit etmişlerdir [89]. Fadhil ve arkadaşları fotosentetik mikrobiyal yakıt hücrelerinde ışık dalga boyunun etkisini araştırmışlardır. Çalışma kapsamında sarı kırmızı ve mavi LED lambalar kullanılmıştır. Sarı, kırmızı ve mavi LED'ler altında sırasıyla 28,41 mW/m², 171,08 mW/m² ve 21,65 mW/m² güç çıkışı elde edildiğini gösterilmiştir. Maksimum güç çıkışı floresan ışık altında 217,04 mW/m² elde etmişlerdir [90]. Trinh ve arkadaşları yaptıkları çalışmada, ışık radyasyonunun süresi ve dalga boyunun bakteriler aracılığıyla mikrobiyal yakıt hücresi performansı üzerindeki etkileri araştırmışlardır. Deneysel çalışmalar floresan ve LED lambaların kullanıldığı iki ışıma modu altında gerçekleştirilmiştir. LED lambaların içeriği kırmızı, sarı, yeşil ve mavidir. Sonuçlar, tam zamanlı ışımanın elektrik üretimini normal güneş ışımasından daha fazla artırdığını göstermektedir. Sarı LED'in diğer renklere göre daha yüksek güç yoğunluğu sağladığını deneysel olarak ortaya konulmuştur [91].

3.3. MYH'lerde Besin ve Besleme Rejimi

Substrat biyolojik olarak biyokimyasal enzimlerin tepkimelerinde birleşen veya ayrışan maddelerdir [92]. Mikrobiyal yakıt hücrelerinde bakteri kültürünün beslenmesi için kullanılan besin olarak tanımlanabilir. MYH'lerde karbon ve enerji kaynağı olarak hizmet etmektedir. Substratların enerji verimliliği substrat türüne göre farklılık göstermektedir. Substratlar güç yoğunluğu, Kolombik verimlilik ve mikrobiyal yakıt hücresi verimliliğini doğrudan etkilemektedir [93]. Aşağıdaki Tablo 3.4'de bazı substratların MYH akım yoğunluğuna etkisi gösterilmiştir. Tablo incelendiğinde en yüksek akım 1,18 mA/cm² akım yoğunluğu ile Catal ve arkadaşlarının kullandığı Glukuronik asit substratından alınmıştır. Başka tür substratlarda daha fazla akım yoğunluğu da alınmıştır. Fakat burada etken sadece substrat değil elektrot yüzey alanı, tipi, türü, bakteri kültürü gibi birçok etken etkilidir. MYH'lerde enerji kaynağı olarak kullanılacak substratların belli bir akış oranı ile anoda beslenmesi gerekmektedir. Akışın az olması düşük güç çıkışı fazla olması ise anotta kirlenmeye sebep olabilir. Bu nedenle optimal seviyede bir akış hızı olması gerekmektedir. Diğer bir açıdan bakıldığında ise hızlı reaksiyon vermesi yani hızlı şekilde enerjiye çevirmesi istenilen bir davranıştır. Bunun faydaları büyük hacimli atık suların temizlenmesi kolaylaşacak ve yüksek hızlardaki verim düşüklüğünün önüne geçilecektir. Bu nedenle MYH'ler sürekli akışta optimize edilmede hidrodinamik zorluklarla baş başadır [94]. Literatürde iki farklı bakış açısıyla besleme oranı incelenmektedir. Bunlar aralıklı akış ve sürekli akıştır. Bu akış türleri alanında bazı çalışmalar mevcuttur. Rahimnejad ve arkadaşları yaptıkları çalışmada sürekli akış ve aralıklı akış oranının performansa etkisini incelemişlerdir. Araştırmaları sonucunda sürekli akış ile aralıklı akışın benzer sonuçlar gösterdiğini tespit etmişlerdir [95]. Yapılan bir başka çalışmada sulak alan mikrobiyal yakıt hücresinin aralıklı beslemede olduğu gibi atık su arıtma kabiliyetini yerine getirip

getiremeyeceğinin bulunması amaçlanmıştır. Yapılan çalışma sonucu sürekli akışta MYH görevini yerine getirebilmektedir [96].

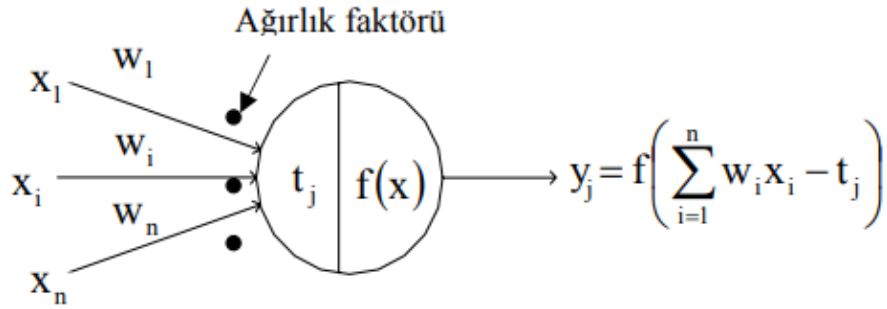
Tablo 3.4. Bazı Substratların MYH akım yoğunluğuna etkisi [97], [98], [99], [100], [101], [102], [103], [104], [105], [106], [107], [108], [109], [110], [111]

Substrat tipi	Akış debisi	MYH tipi (elektrot yüzey alanı veya hücre hacmine göre)	A.Y (mA/cm ²)
Asetat	1 g/L	Grafit fiber fırça anotlu küp şekilli tek odacıklı MYH (7170 m ² /m ³ fırça hacmi)	0,8
Arabitol	1220 mg/L	Tek odacıklı hava katot MYH (12mL), anot olarak ıslak geçirmez karbon bez ile (2 cm ²) ve katot olarak ıslak geçirmez karbon bez (7 cm ²)	0,68
Glikozlu Azo boyası	300 mg/L	Karbon kağıt anotlu tek odacıklı hava katot MYH (36 cm ²)	0,09
Karboksimetil selüloz (CMC)	1 g/L	Elektrot olarak grafit plakalı iki odacıklı MYH (16 cm ²) ve ferrisiyanür katolit	0,05
Selüloz parçacıkları	4 g/L	Karbon bez anotlu U-tüp MYH (1,13 cm ²) ve katot olarak karbon fiberler	0,02
Mısır sapı biyokütlesi	1g/L KOİ	Tek odacıklı, membransız hava katot MYH, karbon kağıt anotlu (7,1 cm ²) ve karbon bez katot	0,15
Sistein	385 mg/L	Elektrot olarak karbon kağıtlı iki odacıklı MYH (11,25 cm ²)	0,0186
1,2-Dikloroetan	99 mg/L	Grafit plaka anotlu iki odacıklı MYH (20 cm ²) ve grafit granülleri katot	0,008
Etanol	10 mM	Karbon kağıt elektrotlu iki odacıklı sulu katot MYH (22,5 cm ²)	0,025
Çiftlik gübresi	3kg suda (%20 w/v)	Alta anot ve gübrenin üstünde katot bulunan bir gübre reaktör kabı; karbon bez elektrotlar (256 cm ²)	0,004
Furfural	6,8 mM	Karbon kağıt anot ve katot (7 cm ²) ile tek odacıklı hava katot MYH	0,17
Galaktitol	1220 mg/L	Tek odacıklı hava katot MYH (12mL), anot olarak ıslak geçirmez karbon bez ile (2 cm ²) ve katot olarak ıslak geçirmez karbon bez (7 cm ²)	0,78
Glikoz	6,7 mM	Tek odacıklı hava katot MYH (12mL), anot olarak ıslak geçirmez karbon bez ile (2 cm ²) ve katot olarak ıslak geçirmez karbon bez (7 cm ²)	0,70
Glukuronik asit	6,7 mM	Tek odacıklı hava katot MYH (12mL), anot olarak ıslak geçirmez karbon bez ile (2 cm ²) ve katot olarak ıslak geçirmez karbon bez (7 cm ²)	1,18
Laktat	18 mM	Grafit keçe elektrotlu iki odacıklı MYH (20 cm ²)	0,005
Çöp sahası sızıntı suyu	6000 mg/L	Karbon peçe elektrotlu iki odacıklı MYH (30 cm ²)	0,0004
Makro algler, Ulva lactuca	2500mg/L KOİ	Grafit fırça anotlar ve platinize katot ile tek odacıklı hava katot MYH (25mL)	0,25
Malt özü, maya ekstresi ve glikoz	1%	Arabulucular ve elektrot olarak grafit plakalı iki odacıklı tuz köprüsü MYH (15 cm ²)	0,067
Mannitol	1220 mg/L	Tek odacıklı hava katot MYH (12mL), anot olarak ıslak geçirmez karbon bez ile (2 cm ²) ve katot olarak ıslak geçirmez karbon bez (7 cm ²)	0,58

Yapılan bir başka çalışmada C. Arjantin ve arkadaşları sürekli ve parçalı beslemenin hücre performansına etkilerini incelemişlerdir. Sonuç olarak substrat besleme hızını kontrol ederek substrat konsantrasyonunun MYH performansını artırabileceği sonucuna ulaşılmıştır [112]. Bu çalışmalar ışığında mikrobiyal yakıt hücrelerinde substrat türünün hücre performansını doğrudan etkilediği görülmüştür. Tablodaki farklı substratlara ait yapılan çalışmalara istinaden mikrobiyal yakıt hücrelerinde besinin önemli parametre olduğu düşünülmektedir.

3.4. Yapay Sinir Ağları

Yapay zekanın türevi olan yapay sinir ağları matematiksel modeller oluşturularak girdi parametreleri vasıtasıyla tahmin yürütme işlemi yapabilen bilgi işleme sistemidir [113]. Geçmişten günümüze yapay sinir ağları endüstri, havacılık ve bankacılık gibi sektörlerde kullanılmaya başlanılmıştır [114], [115]. Yapay sinir ağları görüntü işleme ve ses tanıma gibi işlemlerde kullanımı yapılmıştır [116], [117]. Bunun dışında biyolojik ve kimyasal araştırmalara da konu olmuştur [118], [119], [120]. Şekil 3.2’de örnek bir yapay sinir ağı türü görülmektedir.



Şekil 3.2. Yapay sinir ağının temel yapısı [121].

Şekilde yapay sinir hücreleri arasındaki bağlantılar biyolojik nöronlardaki akson ve dendritlere benzemektedir. Bu bağlantılardaki ağırlık faktörleri sinaps görevi görürken, sınır değerleri hücrenin kararlı durumunu temsil eder. Her bir yapay sinir hücresi gelen uyarıyı alır, bunları ağırlık faktörlerinin etkisini ve hücre içi denge durumunu içeren doğrusal olmayan bir aktivasyon fonksiyonu aracılığıyla çıkış uyarılarına dönüştürür. Yapay sinir ağları, genellikle katmanlar halinde düzenlenmiş, birbirine bağlı yapay sinir hücrelerinden oluşur. Bu bağlantıların ağırlık faktörleri, biyolojik "öğrenme" kavramına benzer bir süreçte, uyarılara dayalı olarak belirlenir [121]. Aşağıdaki Tablo 3.5’te yapay sinir ağlarının insan sinir sistemindeki karşılıkları görülmektedir.

Tablo 3.5. Yapay sinir ağının insan sinir sistemi karşılığı [122].

Sinir Sistemi Yapısı	Yapay Sinir Ağı Yapısı
Sinir hücresi	Yapay Sinir Ağı
Nöron	İşlemci Elemanı
Dentrit	Toplama Fonksiyonu
Hücre Gövdesi	Aktivasyon Fonksiyonu
Aksonlar	Yapay Nöron Çıkışı
Sinapslar	Ağırlıklar

Yapay sinir ağıları mikrobiyal yakıt hücrelerinin uygulamalarında kullanımı görülmektedir. Bu çalışmaların bazıları biyosensör verisi tanımlama olarak öne çıkmaktadır [123], [124], [125]. Çalışmaların sonucunda mikrobiyal yakıt hücrelerinin biyolojik besine karşı davranışlarının farklı seviyelerde olduğu ve bu davranışların yapay sinir ağı ile hangi biyolojik ürün olduğu tahmin edilebileceği gösterilmiştir. Yapılan bazı çalışmalar güç çıkışı verisi tahmini yönünde ilerlemiştir [126], [127]. Jaeel ve arkadaşları yaptıkları çalışmada gerçek süt ürünleri atık sularının arıtımı için çift odacıklı MYH'lerin verimliliği üzerinde anot elektrotunun eğim açısının etkisini, iki farklı besleme akış hızında kimyasal oksijen ihtiyacını giderimi ve güç üretimi açısından değerlendirmişlerdir. Çalışmada MYH'lerin güç üretimi davranışını tanımlamak için yapay sinir ağı kullanılmıştır. Anot eğiminin MYH performansı üzerinde etkisi olduğu deneysel olarak ispatlanmıştır. 0°, 45° ve 90° açılarında akış yönüne bağlı olarak anot eğimi incelenmiş, maksimum güç üretimi ve kimyasal oksijen ihtiyacı giderimi değerlerinin anot akış yönüne dik olarak konumlandırıldığında en yüksek olduğu araştırmacılar tarafından görülmüştür. Besleme akışına bağlı olarak 0° ve 45° konumlandırılan anot elektrotları ile tasarlanan MYH'lerin daha düşük performans gösterdiğini ortaya koyulmuştur. YSA modeli kullanılarak MYH'nin güç üretimi verimliliği tahmin edilmiş ve bu tahminlerin gerçek verilerle uyumlu olduğu gözlemlenmiştir [128]. Lim ve arkadaşları yaptıkları çalışmada YSA kullanarak mikrobiyal yakıt hücrelerinde bulunan biyofilm topluluklarını ve güç üretimini tahmin etmenin bir yolunu geliştirmeyi amaçlamışlardır. Çalışmada biyofilm topluluklarını MYH'lerle ilişkilendirmek için bir YSA modeli geliştirmiştir. Yapılan deneysel doğrulamalarla, YSA modelinin bakteri cinslerinin bolluğunu doğru bir şekilde tahmin edebildiği gösterilmiştir. Ayrıca, atık sudan enerji üretimini tahmin etmek için bir YSA modeli daha geliştirilmiştir. Sonuçlar, YSA'nın biyofilm topluluklarını ve MYH'lerden güç üretimini tahmin etmek için etkili bir araç olduğunu ve gelecekteki çalışmalara yardımcı olabileceğini göstermektedir. Yapılan bu çalışma, mikrobiyal değerlendirmeler ile teknik perspektifler arasındaki boşluğu doldurmak için bir başvuru noktası olarak hizmet ettiğini göstermektedir [129].

4. MATERYAL VE METOT

Yapılan bu tez çalışmasında deneysel sistemlerin oluşturulması için öncelik olarak standartlaştırılmış hücre geometrilerinden olan çift odacıklı mikrobiyal yakıt hücresi seçimi yapılmıştır. Seçilen bu hücre tipinde deneysel incelemeler için sabit bir hacim seçilmiş ve bu hacme uygun tasarım gerçekleştirilmiştir. Tasarımı tamamlanan hücrenin imal edilmesi için gerekli materyallerin temini gerçekleştirilip imal işlemi yapılmıştır. İmal edilen hücreler deney düzeneğine yerleştirilip konfigürasyonların kurulumu yapıp veriler için ölçümler yapılmıştır.

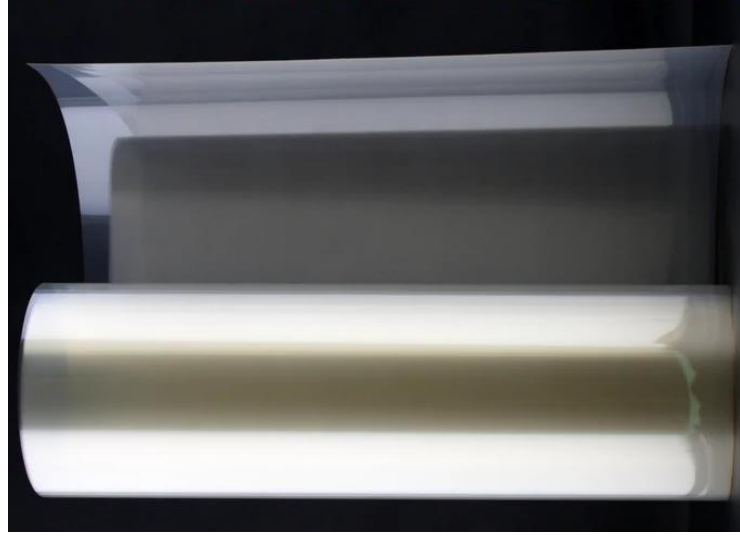
Hücrenin voltajı ile elde edilen enerji parametresi güç yoğunluğu literatürde genellikle elektrot yüzey alanı üzerinden hesaplanıp metrekare başına düşen güç (W/m^2) veya toplam hücre hacmine göre metreküp başına düşen güç (W/m^3) olarak hesaplanmaktadır. Bu çalışmada standartlaştırılmış metreküp başına düşen güç hesabı yapılarak sınıflandırılmıştır [130], [131].

$$\text{Güç Yoğunluğu} = \frac{G}{H} = \frac{V^2}{RH} \quad (4.1)$$

Burada G güç, H hacim, V voltaj ve R direnci temsil etmektedir. Alınan voltaj verileri bu formüle göre düzenlenmiştir.

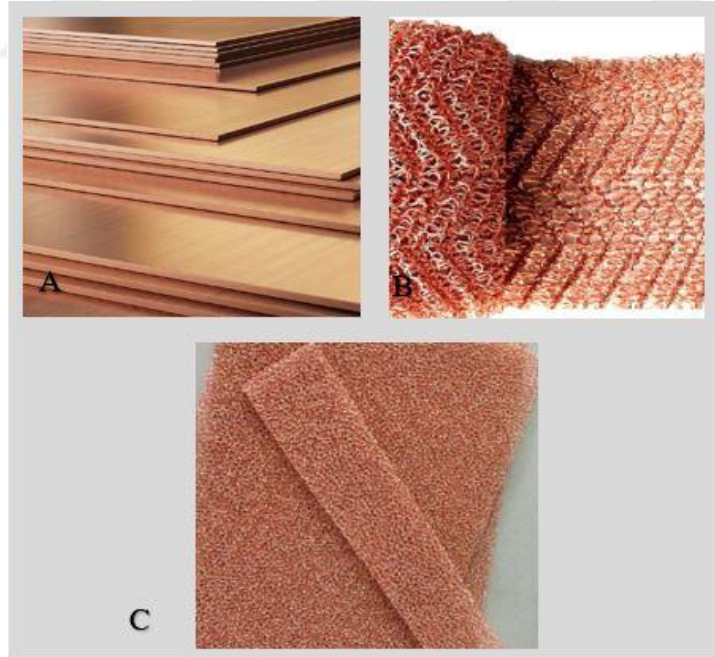
4.1. Kullanılan Materyaller

Çalışmanın merkezinde olan hücrenin deneyler sırasında içinde gelişebilecek olumsuz olayların gözlemlenebilir olması için 4 mm kalınlığında pleksiglas cam seçilmiştir. Pleksiglas cam hem sızdırmazlık hem de esneklik yönünden sağlam bir materyaldir. İşlenebilirlik, iyi bir yalıtkanlık, düşük kırılma katsayısı gibi temel özelliklerinden dolayı bu malzeme deneysel süreçte kullanımı tercih edilmiştir. Hücrenin en temel parçalarından biri olan proton değişim membranı hücre verimliliği açısından hayati öneme sahiptir. Kötü bir membran iç direnç oluşturup hücrenin verimliliğini düşürecektir. Seçilebilecek verimsiz membranlar elektron geçişine izin verebilecek olup bu durum hücrenin kısa devre olmasına neden olacaktır. Bu çalışmada ticari bir ürün olan Şekil 4.1 görüldüğü gibi Nafion HP proton değişim membranı tercih edilmiştir. Hücre içi ve dışı kabloları için çok damarlı bakır kablo kullanılmıştır. Multimetreler voltmetre, ampermetre gibi elektronikte kullanılan ölçüm cihazlarının bir cihazda toplanması ile elde edilen cihazdır. Bu cihaz AC (alternatif akım) veya DC (doğru akım) akım voltaj ölçümü yapabilir. Dirençleri ölçebilir. Opsiyonel olarak kapasitör veya bobin ölçümü yapabilen cihazlar da mevcuttur. Deneysel süreçte seçilecek olan dirençlerin doğruluğunun test edilmesi, voltaj ölçümü ve akım ölçümü gibi parametrelerin düzenli kontrolü sağlanması ve kayıt altına alınabilmesi için kullanılmıştır. Çalışmada literatürde bulunan çalışmaların aksine karbon veya grafit bazlı değil iyi iletkenlik değerine sahip bakır temelli elektrot tercih edilmiştir.



Şekil 4.1. Nafion HP membran [132].

Yapısal olarak bakırın enerji çıkışı etkilerini gözle görülür şekilde anlayabilmek için levha yapılı, ağ yapılı ve köpük yapılı olarak kullanılması fikir vermesi amacıyla tercih edilmiştir. Şekil 4.2’de levha yapılı, ağ yapılı ve köpük yapılı elektrotlar görülmektedir.



Şekil 4.2. Yapısal elektrotlar A) levha yapılı, B) ağ yapılı, C) köpük yapılı bakır materyalleri.

Levha yapılı elektrot tek vücut olması sebebiyle yüzey alanı basit yapıdadır. Yüzey alanı geometrik alanı ile sınırlıdır. Fakat ağ yapılı elektrotta ağ yapısının yoğunluğu ile birlikte yüzey alanı her ağ kablosunun tüm çevresi katıldığı için yüzey alanı artmaktadır. Köpük elektrotta levha yapılı

elektrottan farklı olarak gözenekleri sebebiyle daha fazla yüzey alanına sahiptir. Bu yapılara istinaden göreceli olarak elektrotların yüzey alanları aşağıdaki gibi sıralanabilir;

$$A_{ağ} > A_{köpük} > A_{levha} \quad (4.2)$$

Burada $A_{ağ}$ ağ yapılı elektrodun yüzey alanı, $A_{köpük}$ köpük yapılı elektrodun yüzey alanı ve A_{levha} levha yapılı elektrodun yüzey alanıdır.

Hücresinin katot tarafından gerçekleşecek olan redüksiyon tepkimesi için oksijene ihtiyaç vardır. Bu oksijen havada belirli bir miktar bulunmaktadır. Katot tarafına verilecek olan fazla hava hem redüksiyon tepkimesini artıracak olup hem de proton difüzyonunu hızlandıracaktır. Bu çalışmada Şekil 4.3’de görülen akvaryum tipi hava pompası ve hava hortumu kullanılarak katot tarafı belirli süre hava ile beslenilmiştir.



Şekil 4.3. Akvaryum tipi hava pompası

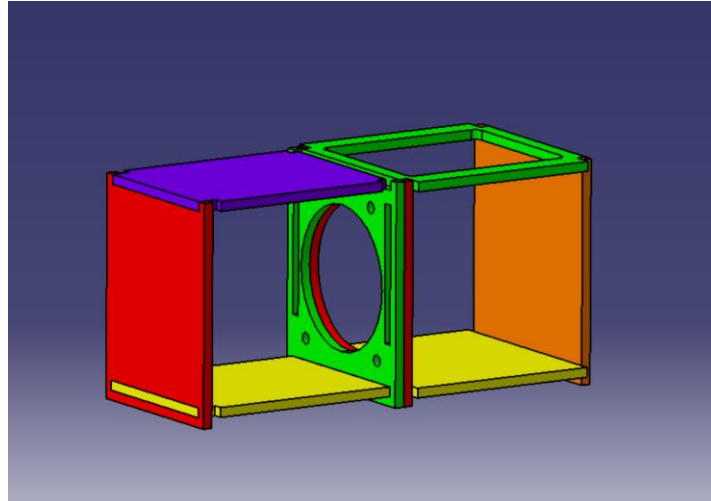
Hücresinin anot odası anaerobik bakteriler ile tesis edileceğinden hava almaması hayati öneme sahiptir. Bu sebeple montaj yapılırken havasızlık sağlanmalıdır. Sızdırmazlığı garanti altına alınması için yapıştırıcı ve silikon contalar kullanılmıştır. Hücrede kullanılan çamur Elazığ bölgesine ait Şekil 4.4’te görüldüğü gibi sulak bölgelerden temin edilmiştir. Bu duruma bakterilerde karışık kültürün olgun olması ve daha güçlü oksidasyonuna temel hazırlaması motive etmiştir. Hücrelerde ortam şartlarının oluşturulabilmesi için temel renkler olan kırmızı mavi ve yeşil renklere sahip renkli lambalar tercih edilmiştir. Bu lambalar ile farklı dalga boylarına sahip ışıklı ortamlar oluşturulup inceleme yapılabilir. Bakterilerin farklı dalga boylarına farklı tepkiler vereceği beklenilmektedir. Renkli lambaların uygun ortamları oluşturulabilmesi için kapalı bir kutu tercih edilmiştir. Farklı sıcaklık derecelerinden testlerin yapılabilmesi için farklı sıcaklık ortamları sağlanıp deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda 24 °C, 28 °C ve 31 °C sıcaklığa sahip ortamlar tercih edilmiştir.



Şekil 4.4. Anot odası için çamur temini.

4.2. Tasarım Çalışması ve Prototipleme Aşaması

Mikrobiyal yakıt hücresi tasarımı için kullanılacak materyal ve üretim prosesi belirlenmesi bu çalışmada öncelik olarak belirlenmiştir. Kullanılacak olan pleksiglas kesimi yapılmadan önce tasarımı ve hacmi netleştirilmelidir. Şekil 4.5'te görülen CATİA V5 ortamında 80x80x80 mm ölçülerinde çalışma hacmi tasarımı yapılan hücrenin montajı sanal ortamda denenmiş ve doğrulanmıştır.



Şekil 4.5. Catia V5 ortamında hücre mimarisi tasarımı

Pleksiglastan fiziki montaj için kesilecek olan parçalar AUTOCAD ortamında Şekil 4.6'da görüldüğü gibi teknik resmi kesim plakasına göre çizilip lazer kesim operasyonu için hazırlanmıştır.



Şekil 4.6. Pleksiglas lazer kesim için AUTOCAD teknik çizimler.

Şekil 4.7’de görüldüğü gibi lazer kesimi yapılmıştır. Yapılan kesimdeki parçalar birbirine yapıştırıcı ile montajı yapılmıştır. Yapıştırma işleminden sonra sızdırmazlık sağlanması için birleşme noktalarına silikon conta ile takviye yapılmıştır.



Şekil 4.7. Pleksiglas lazer kesim

Lazer kesim operasyonu tamamlanan hücre parçalarının Şekil 4.8’de gösterildiği gibi hücre odaları inşa edilmiştir. Tasarımsal çalışması yanlış montajların önüne geçecek şekilde tasarlanmıştır. Hücreler sızdırmazlık öncesi ön yapıştırma ile montajlanmıştır.



Şekil 4.8. Pleksiglas hücre inşası

Montajı yapılan hücre odaları aralarına proton değişimi membranı yerleştirilmiş ve silikon conta ile kapatılmıştır. Sistemin sağlamlığı ve sızdırmazlığının artırılması için plastik cıvatalar ile bağlantı yapılmıştır.

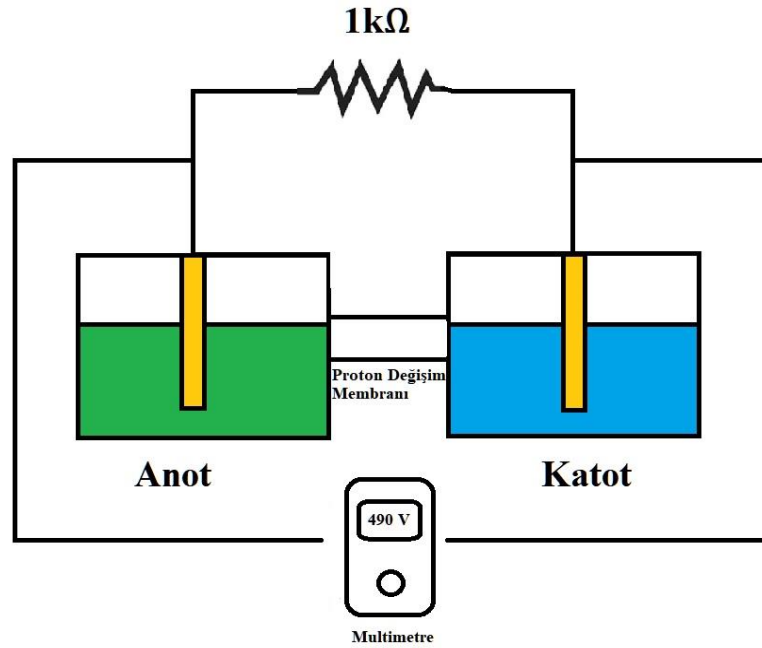
4.3. Deneysel Sistemlerin Kurulumu

Tasarımı yapılan hücreler sızdırmazlık kontrolü sonrasında deneysel çalışmaya hazır olduğu görülmüştür. Hücrenin içine konumlandırılan çamur her bir çalışma için eşit miktarda yerleştirilerek elektrot daldırma işlemi yapılmıştır. Hücrenin anot odasının üst kapağı conta ile sızdırmazlık sağlanarak kapatılmıştır. Deneysel olarak çalışma parametreleri içinde elektrot yapısı, elektrot geometrisi besin çeşidi, besleme miktarı, besleme tipi, sıcaklık ve ışık gibi parametrelerin değerlendirilmesi planlanmıştır. Bu parametreler içinde değerlendirmenin en doğru yapılabilmesi için bütün parametreler sabit bir parametre değiştirilerek karşılaştırılması gerekmektedir. Bu çalışmada belirlenen standart parametreler Tablo 4.1’de verilmiştir. Çalışılması planlanan bu parametreler sadece ilgili parametrenin değişikliği yapılacak parametreye kadar sabit tutulması planlanmıştır. Çalışma parametreleri için katot elektrodu, hava besleme ve hava debisi sabit olarak planlanmıştır. Besleme miktarı, besin türü, ortam sıcaklığı, ışık dalga boyu ve anot elektrodu ilgili çalışma içinde değişim gösterecek şekilde planlanmıştır. Fakat kalan parametreler belirlenen standart parametre olarak kalacaktır.

Tablo 4.1. Standart hücre giriş parametreleri

Parametre	Değeri
Besleme Miktarı	30 ml/gün
Besin Türü	BG
Ortam Sıcaklığı	30 °C
Işık Dalga Boyu	0 nm
Katot Elektrodu	Levha yapılı plaka geometri
Katot Elektrot Ölçüsü	40x40x2 mm
Hava Beslemesi	10 dk/gün
Hava Debisi	2,5 L/dak
Anot elektrodu	Levha yapılı plaka geometri
Anot elektrot ölçüsü	40x40x2 mm

Deneysel sistemin temel yapısı Şekil 4.9’da gösterildiği üzere hücre anot ve katot odasından oluşmaktadır. Anot odasına temin edilen çamur, katot odasına ise standart oranda tuzlu su yerleştirilmiştir. Katot odasına levha yapılı plaka geometrili bakır elektrot yerleştirilmiştir.



Şekil 4.9. Deneysel sistem genel şeması

Tüm deneyler için katot elektrodu değişmeyecek şekilde planlanmıştır. Anot odası için elektrot konfigürasyonları haricinde standart katot ile aynı yapıda, ölçüde ve geometride bakır elektrot yerleştirilmiştir. Sıcaklık konfigürasyonları dışında hücreler sabit sıcaklığa sahip 30 °C sıcaklıkta deneysel çalışma icra edilmiştir. Işık konfigürasyonları dışında hücreler karanlık bir ortamda ışıksız bir şekilde çalıştırılmıştır. Bu durum 0 nm ışık dalga boyuna karşılık gelmektedir. Hava beslemesi her hücre için günde 10 dakika 2,5 L/dak ile hava pompası ile beslenmiştir. Anot ve katot odaları

bir dış devre ve $1k\Omega$ direnç ile birbirine bağlanmıştır. Hücre ölçümü için anot ve katot odasına paralel bir multimetre bağlanarak gerilim ölçümleri yapılmıştır.

4.3.1. Besinlerin Hazırlanması

Hücre besleme için izlenecek temel yol olan bitkisel gliserin tabanlı pazar atığı özü çalışması için Şekil 4.10 A’da görülen pazar alanına ait atıkların Şekil 4.10 B’deki gibi toplanması yapılmıştır.



Şekil 4.10. Bitkisel gliserin tabanlı pazar atığı özü hazırlanış parametreleri

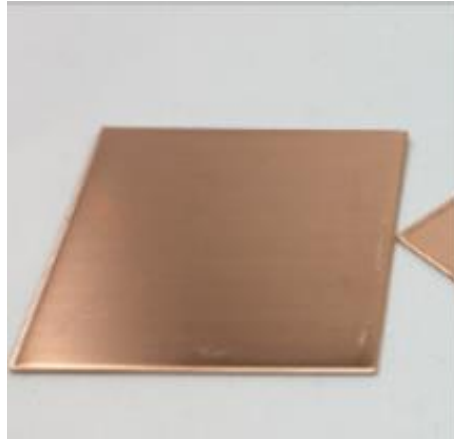
Toplanan pazar atıkları için Şekil 4.10 C’deki gibi blenderde parçaları ayrılıp için Şekil 4.10 D’de görüldüğü üzere bitkisel gliserin ile karışımı yapılmıştır. Yapılan bu karışım bir haftalık süre ile bekletilip katı partiküllerinden ayrıştırılmıştır. Bir kap içerisinde hücre aşılması için depolanmıştır. İkinci tür besin olarak maya özü pazar atığı kullanılmıştır. Parçalarına ayrılmış pazar atıklarının maya ile mayalanması sağlanmıştır. Hava kilidi ile bir haftalık süre bekletilmiş ve katı partiküllerinden ayrıştırılmıştır. Hücreye aşılacak üzere Şekil 4.11’de görüldüğü gibi bir kap içinde depolanmıştır. Üçüncü besin olarak şekerli su tercih edilmiştir. Deneysel çalışmada ikinci grup çalışma olarak bu hücrelerin sabit bir besin ile farklı oranlarda beslenmesi planlanmıştır. Toplamda sekiz günlük deney süresi boyunca hücrelere 20 ml/gün, 30 ml/gün ve 40 ml/gün şeklinde besleme yapılması planlanmıştır. Bu besleme türlerinin güç yoğunluğu çıktıları kayıt altına alınmıştır. Çalışmanın üçüncü grubunda besleme tipi deneyi planlanmıştır. Hücrelere tek

seferlik besleme yerine farklı besleme tipleri ile besleyerek güç yoğunluğu çıktısı gözlemlenmesi ve en verimli yöntemin tespit edilmesi hedeflenmiştir. Deneysel sistemlerin kurulumundan sonra üç adet hücreye ayrı ayrı besleme yapılmıştır. Birinci hücreye günde bir defa 30 ml besin, ikinci hücreye günde iki defa 15 ml besin, üçüncü hücreye günde üç defa 10 ml besin verilmiştir.



Şekil 4.11. Bitkisel gliserin tabanlı pazar atığı özü

Çalışmada parametrelerin değişimini net bir şekilde gözlemlenebilmesi için tüm hücrelerde hem anot hem de katot odalarında Şekil 4.12’de görüleceği üzere sabit tip plaka geometri levha yapılı 2 mm kalınlığında 40x40mm en ve boy oranına sahip bakır elektrot kullanılmıştır. Hücrenin ölçümleri multimetre ile yapılmıştır.



Şekil 4.12. Plaka geometri levha yapılı elektrot

Plaka geometriye levha yapılı elektrotlar sabit ve ölçülebilir yüzey alanına sahip olduğundan dolayı tercih edilmiştir.

4.3.2. Elektrotların Hazırlanması

Hücrelerde anot ve katot odası dış devre aracılığı ile 1 k Ω direnç ile bağlanmıştır. Hücrelerin anot odasındaki bakterilerin beslenmesi günlük 30 ml BG solüsyonu ile gerçekleştirilmiştir. Deneysel çalışmalarda elektrot olarak bakır tabanlı materyal tercih edilmiştir. Bakırın yüksek iletkenlik katsayısı iç direncinin düşük olması bakırın daha fazla elektron toplama, kayıpları minimize etmesi ve maliyeti bakımından bakırın çalışmada ön plana çıkmasını sağlamıştır [133]. Şekil 4.13'te çalışmada kullanılacak olan tüm elektrotların görselleri isimleri ile verilmektedir.



Şekil 4.13. Deneysel elektrotlar, A) plaka geometrili levha yapılı, B) plaka geometrili ağ yapılı, C) plaka geometrili köpük yapılı, D) silindir geometrili levha yapılı, E) silindir geometrili ağ yapılı, F) silindir geometrili köpük yapılı, G) piramit geometrili levha yapılı, H) piramit geometrili ağ yapılı, I) piramit geometrili köpük yapılı elektrot.

Şekilde birinci sırada plaka geometriye sahip levha yapılı, ağ yapılı ve köpük yapılı elektrotlar görülmektedir. İkinci sırada ise silindir geometriye sahip levha yapılı, ağ yapılı ve köpük yapılı elektrot kullanılmıştır. Üçüncü sırada ise piramit geometriye sahip levha yapılı, ağ yapılı ve piramit yapılı elektrot oluşturulup deneysel çalışma planlanmıştır.

Deneysel çalışma, hücrenin kurulum gününden itibaren 8 günlük ölçüm süresince gerçekleştirilmiştir. Her gün yapılan ölçümler sonucunda alınan veriler kayıt altına alınıp değerlendirilmiştir.

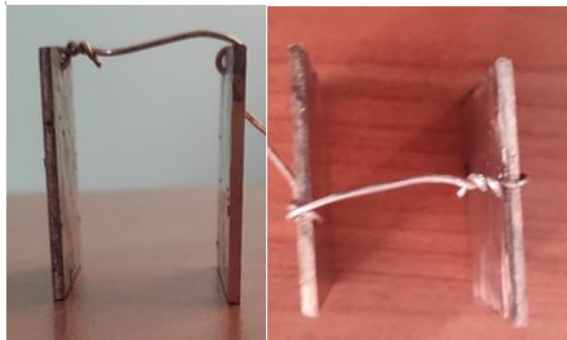
4.3.3. Fiziksel Şartların Hazırlanması

Çalışmanın bu kısmında mikrobiyal yakıt hücresinin performansı üzerindeki etkisinin deneysel olarak bulunabilmesi için elektrotların hücre içinde konumu ve sayısı ile ilgili çalışma yapılması planlanmıştır. Şekil 4.14'te hücre içine 40x40x2 mm ölçülerine sahip elektrodun ilk görselde membrana yakın olarak konumlandırıldığı görülmektedir. İkinci görselde ise hücrenin en arka alanına, membrana uzak bir konuma yerleştirildiği görülmektedir. Üçüncü çalışma olarak hücrenin standardı olan orta kısmına elektrot konumlandırılmıştır. Bu durum bize hücrenin çalışması durumunda elektrodun konumsal olarak nasıl reaksiyon göstereceği hakkında bilgi verebilecektir.



Şekil 4.14. Mikrobiyal yakıt hücresi elektrot konumu konfigürasyonu elektrot pozisyonları

Fiziksel şartlar çalışmasının ikinci kısmında elektrot adedinin hücre performansına olan etkisi araştırılmıştır. Bu çalışma hücrenin elektrot sayısına göre nasıl davrandığının anlaşılabilmesi için bir fikir oluşturması amaçlanmıştır. Üç adet hücre kullanılarak birinci hücreye 1 adet orta bölgeye 40x40x2 mm ölçülerine sahip plaka geometri levha yapılı elektrot konumlandırılması, ikinci hücrede 2 adet elektrot konumlandırılması ve üçüncü hücrede ise 3 adet elektrot yerleştirilerek deneysel çalışma planlanmıştır. Şekil 4.15'de 2 adet çift elektrot konfigürasyonuna ait elektrotların yandan ve üstten görünümü görülmektedir.



Şekil 4.15. Mikrobiyal yakıt hücresi elektrot adedi konfigürasyonu elektrotları 2 adet elektrot.

Bu elektrot yapısı bir elektrotlu yapıdan daha fazla yüzey alanına sahip olduğundan dolayı daha fazla elektron toplama ve transferi sağlayacağı öngörülmektedir. Şekil 4.16’da 3 adet üçlü elektrot grubuna ait elektrotların görünüşleri görülmektedir. Bu yapıdaki elektrot sistemi tekli ve ikili elektrottan daha fazla yüzey alanı oluşturduğu için daha fazla elektron toplama işlemi yapması ve enerji yoğunluğunu artırması amaçlanmıştır.



Şekil 4.16. Mikrobiyal yakıt hücresi elektrot adedi konfigürasyonu elektrotları 3 adet elektrot.

4.3.4. Ortam Şartlarının Hazırlanması

Mikrobiyal yakıt hücreleri içinde yaşayan bakteriler bulundurması nedeniyle yaşam için uygun koşulların oluşması gerekmektedir [134]. Uygun ortam şartlarının oluşturulması hücre performansı açısından kaçınılmazdır. Çalışmanın bu kısmında mikrobiyal yakıt hücresinin ortam şartlarına göre davranışını incelemek için sıcaklık ve ışık deneyleri planlanmıştır. Şekil 4.17’de farklı dalga boyları ile hazırlanmış ışık odaları bulunmaktadır. Hücreler tüm operasyon boyunca ışıklandırılmış çalışma odasında ışıklar tamamen çalışır durumda bekletilmesi planlanmıştır.

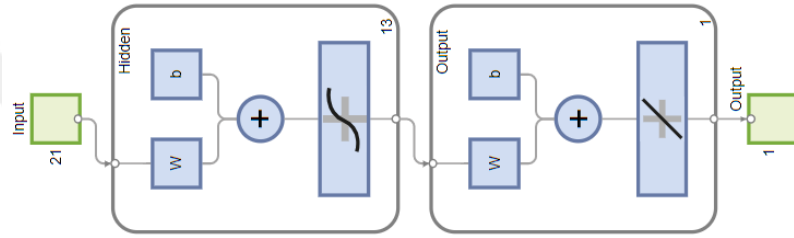


Şekil 4.17. Mikrobiyal yakıt hücrelerinde ışık konfigürasyonları.

Çalışmanın diğer parametresi olan sıcaklık için sabit sıcaklık değerlerine sahip 24°C, 28 °C ve 31 °C çalışma ortamları deneysel çalışma için planlanmıştır. Çalışma boyunca hücreler bu ortamda bulunmuş ve operasyon süresi boyunca düzenli aralıklarla ölçümler alınıp kaydedilmiştir.

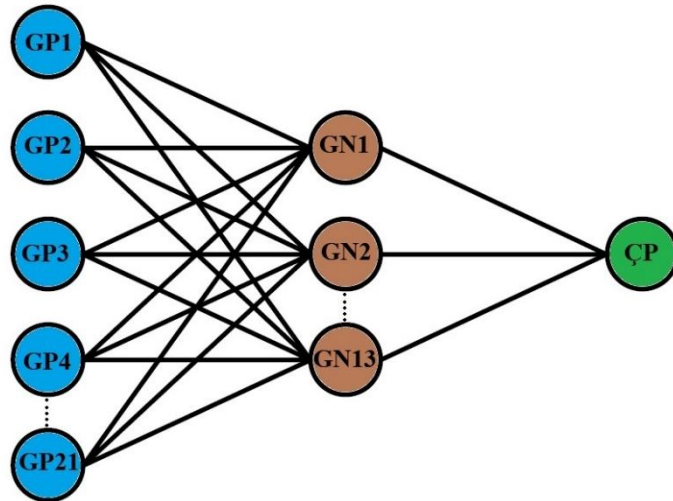
4.3.5. Yapay Sinir Ağlarının Oluşturulması

Bu tez çalışmasında araştırma parametreleri ve veriler derlenerek YSA’da tahmine dayalı bir sistem oluşturulup oluşturulamayacağı araştırılması planlanmıştır. YSA sistemi geçmişte elde edilen verileri derleyip geleceğin tahmin edilmesine yardım edebilecek bir yazılım mühendisliği alanıdır. Çalışmanın temelinde Şekil 4.18’de görüleceği üzere 21 adet girdi parametresi belirlenmiştir. Çıkış verisi olarak çalışmalarda tercih edilen güç yoğunluğu verisi kullanılmıştır.



Şekil 4.18. Matlab YSA modülü eğitim şeması

Çalışmanın yapay sinir ağı yapısı aşağıdaki Şekil 4.19’da görülmektedir.



Şekil 4.19. Mikrobiyal yakıt hücresi YSA eğitimi için temel algoritma şeması

Şekilde görüleceği üzere temel yapıyı 21 adet GP (giriş parametresi), 13 adet GN (gizli nöron) ve 1 adet ÇP (çıkış parametresi) oluşturmaktadır. Girdi verileri Tablo 4.2’de görüldüğü üzere plaka geometri levha yapılı elektrot, plaka geometri ağ yapılı elektrot, plaka geometri köpük yapılı elektrot, silindir geometri levha yapılı elektrot, silindir geometri ağ yapılı elektrot, silindir geometri köpük yapılı elektrot, piramit geometri levha yapılı elektrot, piramit geometri ağ yapılı elektrot, piramit geometri köpük yapılı elektrot, maya özü pazar atığı, şekerli su, membranı önü konumu, hücre arkası konumu, besleme, sıcaklık, 2 adet elektrot, 3 adet elektrot, günde 2 defa 15 ml besleme, günde 3 defa 10 ml besleme, ışık dalga boyu ve gün verileridir.

Tablo 4.2. Mikrobiyal yakıt hücresi YSA eğitimi için kullanılacak parametreler.

Parametre Adı	Parametreler
Giriş Parametresi 1	Plaka Geometri Levha Yapılı
Giriş Parametresi 2	Plaka Geometri Ağ Yapılı
Giriş Parametresi 3	Plaka Geometri Köpük Yapılı
Giriş Parametresi 4	Silindir Geometri Levha Yapılı
Giriş Parametresi 5	Silindir Geometri Ağ Yapılı
Giriş Parametresi 6	Silindir Geometri Köpük Yapılı
Giriş Parametresi 7	Piramit Geometri Levha Yapılı
Giriş Parametresi 8	Piramit Geometri Ağ Yapılı
Giriş Parametresi 9	Piramit Geometri Köpük Yapılı
Giriş Parametresi 10	Maya Özü Pazar Atığı
Giriş Parametresi 11	Şekerli Su
Giriş Parametresi 12	Membran Önü Konumu
Giriş Parametresi 13	Hücre Arkası Konumu
Giriş Parametresi 14	Besleme
Giriş Parametresi 15	Sıcaklık
Giriş Parametresi 16	2 Adet Elektrot
Giriş Parametresi 17	3 Adet Elektrot
Giriş Parametresi 18	Günde 2 Defa 15 ml Besleme
Giriş Parametresi 19	Günde 3 Defa 10 ml Besleme
Giriş Parametresi 20	Işık Dalga Boyu
Giriş Parametresi 21	Gün
Çıkış Parametresi	Güç Yoğunluğu

Yapay sinir ağı modellerinde birçok matematiksel yöntem bulunmaktadır. Bu çalışma kapsamında MATLAB R2021b sürümünde uygulama olarak bulunan “Neural Network Fitting” bölümünden yararlanılmıştır. Bu uygulama bize “Levenberg-Marquardt”, “Bayesian regularization” ve “Scaled conjugate gradient backpropagation” YSA algoritmalarını sunmaktadır [135]. Bu çalışmada “Levenberg-Marquardt” algoritması tercih edilmiştir. Tablo 4.2’de gösterilen parametrelerin aşağıdaki Tablo 4.3’de kısmi olarak verilen verileri işlenerek MATLAB ortamına kaydedilmesi sağlanmıştır. Bu tablo biçimi ile verilerin YSA algoritmasının anlayabileceği bir dile çevrilmesi gerçekleştirilmiştir.

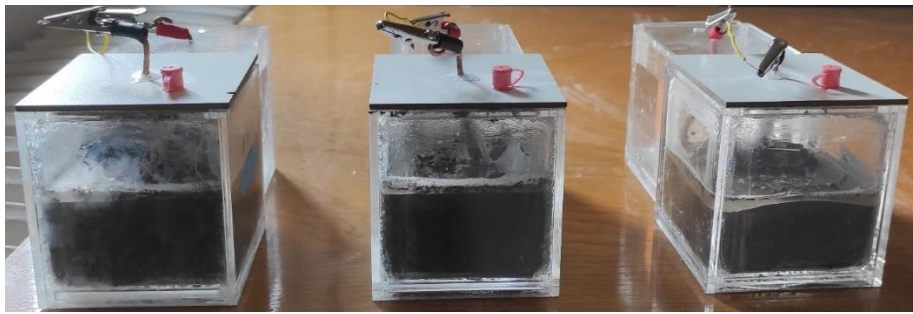
Tablo 4.3. Mikrobiyal yakıt hücresi YSA eğitimi için örnek parametre tablosu

Piramit Ağ	Piramit Köpük	MYÖ	ŞS	Hücre Arka	Hücre Ön	Besleme Miktarı	Sıcaklık	Işık	Gün	Değer
1	0	0	0	0	0	30	30	450	1	74,5
1	0	0	0	0	0	30	30	450	2	29,98
1	0	0	0	0	0	30	30	450	3	56
1	0	0	0	0	0	30	30	450	4	72,21
1	0	0	0	0	0	30	30	450	5	102,1
1	0	0	0	0	0	30	30	450	6	119,8
1	0	0	0	0	0	30	30	450	7	137,1
1	0	0	0	0	0	30	30	450	8	148,6

Tablo incelendiğinde sayısal değere sahip olan parametrelerin sayısal değerleri girilmiştir. Fakat sayısal değere sahip olmayan değerlerin lojik olarak yazılımı yapılmıştır. Özetlenirse eğer değer 1 ise o parametre vardır. Eğer değer 0 ise o parametre yoktur. Mantıksal olarak tüm temeller oturtulmuştur. YSA eğitimi için ihtiyaç olan diğer parametreler ise eğitim, doğrulama ve test parametrelerinin yüzdesel değerlerinin seçilmesidir. Çalışma kapsamında eğitim verileri için %70, doğrulama verileri için %15 ve test verileri için %15 değeri tercih edilmiştir. Diğer bir değer ise katman sayısının belirlenmesidir. Bu katman sayısı en yüksek regresyonun bulunması için gereklidir. Bunun için deneme yanılma yolu tercih edilerek bulunması gerekmektedir. Yapılan çalışmada totalde en iyi regresyon değerlerine 13 katman ile ulaşılmıştır.

4.3.6. Ölçüm ve Örneklem

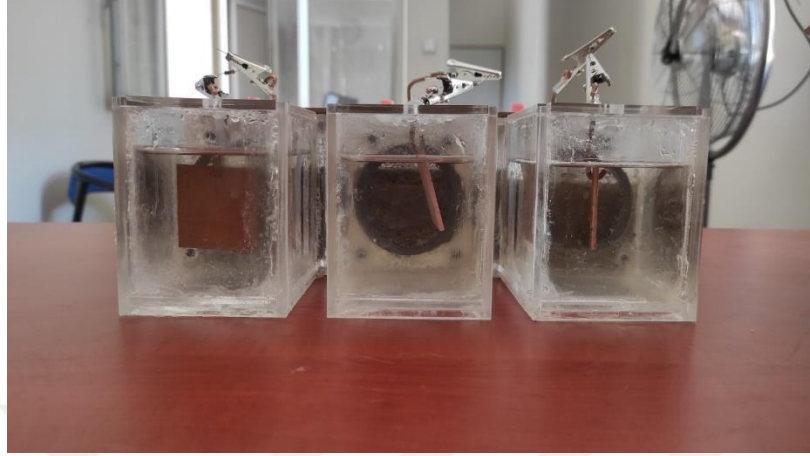
Şekil 4.20’de deneysel düzenek görülmektedir



Şekil 4.20. Deneysel düzenek hücrelerin genel yapısı

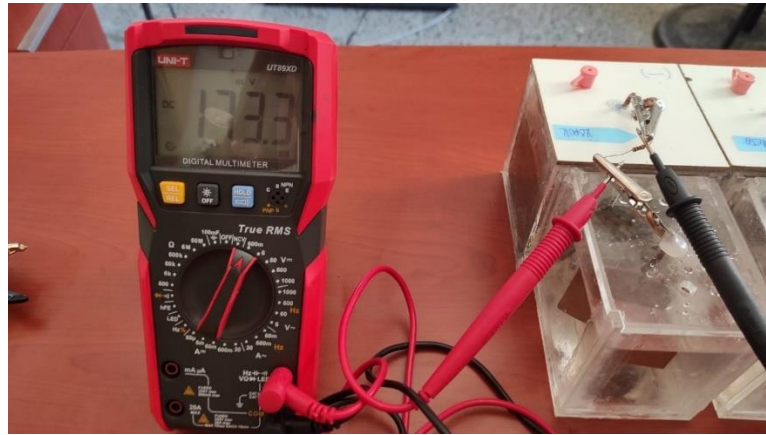
Bu tez çalışmasında ölçümler 8 günlük ölçüm olarak planlanmıştır. Her gün 10 dakika hava ile beslenen hücrenin voltajını ölçümü yapıp veri dosyasına kaydedilmiştir. Yukarıdaki tabloda belirlenen besleme tipine göre günlük olarak ilgili besleme yapılmıştır. Çalışması yapılan bu

hücrelerin Şekil 4.21’de ise katot odalarının görüntüsü bulunmaktadır. Her deney grubu için 3 adet hücre hazırlanıp deneysel çalışma icra edilmiştir.



Şekil 4.21. Deneysel düzenek katot görünümü.

Deneysel çalışmada ölçümler Şekil 4.22’de görüldüğü gibi multimetre ile yapılmaktadır. Şekilde görülen hücrelerin anot ve katot odası birbirlerine $1k\Omega$ direnç ile bağlanmıştır. Ölçüm zamanı gelmiş hücrelerin anot ve katot odasına multimetre paralel bir şekilde bağlanıp ölçüm alınmıştır. Alınan ölçümler değerlendirilmek üzere kaydedilmiştir.



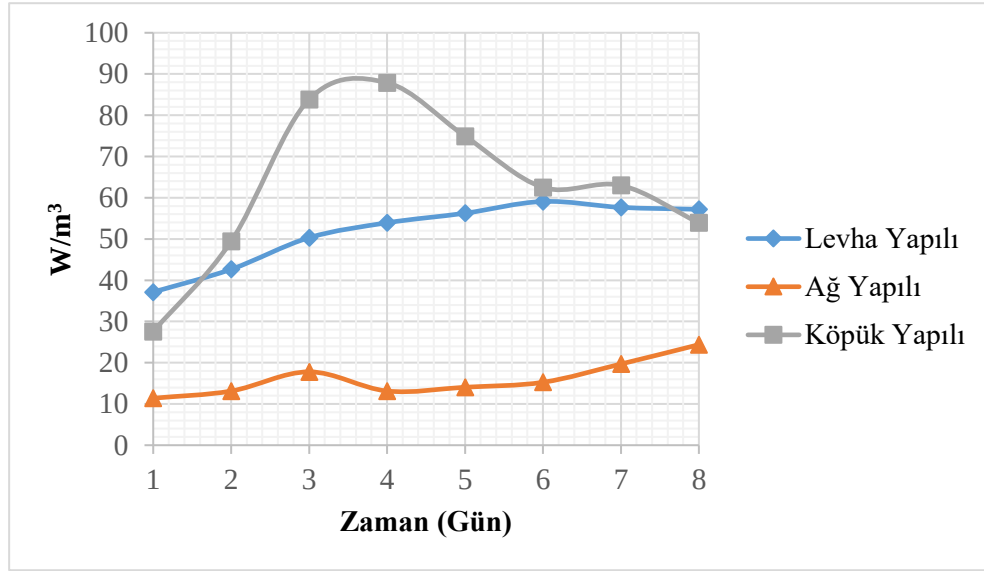
Şekil 4.22. Deney düzeneği ölçümleme sistemi.

5. BULGULAR VE TARTIŞMA

Deneysel çalışmanın tamamlanması sürecinde elde edilen veriler, titizlikle işlenmiş ve çeşitli analitik yöntemlerle grafiksel bir formata dönüştürülmüştür. Bu evre, çalışmanın temelini oluşturan veri setlerinin kapsamlı bir değerlendirmesini içermekte olup, özellikle maksimum güç yoğunluğu noktaları ile ortalama güç yoğunlukları üzerinde detaylı bir inceleme gerçekleştirilmiştir. Grafikler aracılığıyla hücrelerin elektriksel hareketlilikleri görselleştirilerek, bu hücrelerin birbirleriyle olan etkileşimleri derinlemesine karşılaştırılmıştır. Ele alınan veriler, hücre davranışlarının karmaşıklığını anlamak adına önemli bir temel oluşturmuştur. Ayrıca, bu kısmın önemli bir bölümü, karşılaşılan durumların kökenlerine inmek ve bu durumların nedenlerini sistemli bir şekilde tartışmaktır. Tüm bu aşamalar, elde edilen sonuçların bilimsel bir bağlamda daha kapsamlı bir anlam kazanmasına olanak tanımaktadır. Çalışmanın bu bölümü, veri analizi ve yorumlamada derinlemesine bir bakış sunarak, elde edilen bulguların bilimsel literatürdeki yerini sağlamlaştırmayı amaçlamaktadır.

5.1. Elektrot Konfigürasyonları Sonuçları

Plaka geometrili elektrotların zamana göre güç yoğunluğu değişimi Şekil 5.1’de görülmektedir.



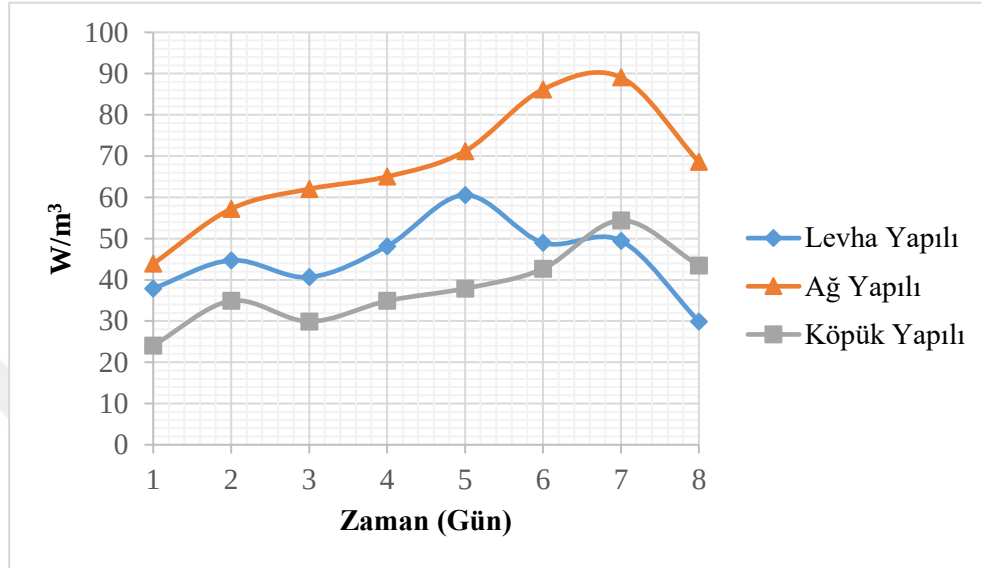
Şekil 5.1. Plaka geometrili elektrotların zamana göre güç yoğunluğu değişimi.

Veriler ışığında plaka tipi geometriye sahip elektrotlar için en yüksek güç yoğunluğu oluşturan elektrot tipi 87,89 W/m³ ile köpük yapılı elektrodun 4. günü olduğu görülmektedir. Çalışmanın ilk gününden 4’üncü gününe kadar köpük yapılı elektrot %219 güç yoğunluğu artışı gerçekleştirmiştir.

Fakat 4. gün alınan maksimum güç yoğunluğunun 8. güne kadar %39 kademeli olarak düşüş yaşadığı görülmektedir. Levha yapılı elektrot ve ağ yapılı elektrot bulunan hücrelerde maksimum güç yoğunluğu değerleri sırasıyla 59,10 W/m³ ve 24,38 W/m³'dür. Levha yapılı elektrot deneysel çalışmanın 6. gününe kadar %59 artış göstermiştir. Artışın devamındaki iki gün boyunca %3 düşüş gerçekleştirmiştir. Ağ yapılı elektrot deneysel çalışmanın başlangıcından itibaren genellikle kararlı performans artışı izlemiştir. Toplamda %114 artış ile deneysel periyodunu tamamlamıştır. Hücrelerin sergilediği bu çeşitli davranışlar incelendiğinde, köpük yapılı elektrotun bu çalışmada ortalama güç yoğunluğu açısından en üstün performansı sergilediği gözlemlenmektedir. Ancak, levha yapılı elektrot daha kararlı bir davranış göstermiştir. Ağ yapılı elektrot, ortalama plaka geometrisi performansını düşük bir seviyede tamamlamış olmasına rağmen, çalışma süresince kararlı bir artış sergilemiştir. Bu çalışmadaki davranışların temelinde, ağ yapılı elektrodun düşük performans gösterdiği ana sebep olarak elektrot hacminin yetersizliği görülmektedir. Diğer taraftan, köpük yapılı elektrodun düşük performans gösterdiği durumu açıklamak için ise yüzey alanının fazlalığı ve hacimsel yoğunluğunun etkili olduğu düşünülmektedir. Özellikle köpük yapılı elektrotun düşük performans gösterdiği durumda, elektrotun geniş yüzey alanına rağmen hacimsel yoğunluğunun az olması, etkin bir elektron taşıma kapasitesine sahip olmamasına yol açabilir. Bu durum, elektrotun enerji depolama ve iletim kapasitesini sınırlayabilir. Diğer taraftan, ağ yapılı elektrodun düşük performans gösterdiği durumda ise, elektrotun yeterli hacimsel yoğunluğa sahip olmaması nedeniyle daha fazla enerji depolama potansiyeli kaybedebilir. Bu gözlemler, elektrot tasarımında hacimsel yoğunluk, yüzey alanı ve geometrik konfigürasyon gibi faktörlerin dikkate alınması gerekliliğini vurgular. Bu faktörlerin dengeli bir şekilde optimize edilmesi, elektrotların genel performansını artırabilir ve belirli uygulamalarda daha etkili hale getirebilir. Araştırmacılar tarafından yapılan çalışmalar da bu yaklaşımı desteklemektedir [136], [137]. Köpük yapılı elektrot çalışmasının keskin yükselişin ana faktörünün mikrobiyal kültürün başlangıç aşamasında çoğalma eğilimi ve oksidasyon artışı olarak düşünülmektedir. Plaka geometriye sahip köpük yapılı elektrot hacimsel doygunluk, yüzey alanı fazlalığı ve yüksek biyofilm taşıma kapasitesi ile bu karşılaştırmalı çalışmada maksimum enerji yoğunluğu oluşumuna destek oluşturmuştur. Yaşanılan pik düşüşün mikrobiyal aktivitenin azalması ve oksidasyonun düşmesi ile bağdaştırabilir. Mikroorganizmaların yüksek yoğunluğa sahip oksidasyonun sonucu olarak sert düşüş gelişmiştir. Bu durumun bakırın korozyona karşı direncinin zayıf olması ve mikrobiyal aktiviteyi düşürmesiyle alakalı olabileceği düşünülmektedir. Araştırmacılar korozyona uğrayabilen bakır içeren MYH'ler, korozyona dayanıklı paslanmaz çelik ve karbon bez anot elektrotları kullanılarak karşılaştırmalı araştırma yapmışlardır. Bakır anotlu MYH'ler başlangıçta yüksek akım üretimi göstermiş ancak daha sonra çok az güç üretmiştir. Paslanmaz çelik ve karbon bez anotlar ise daha yüksek güç üretmiş fakat sonrasında düşük güç çıkışı tespit edilmiştir. Sonuç olarak bakırın korozyona

dayanıklı bir anot malzemesi olmadığını ve olası bakır toksisitesi nedeniyle uygun olmadığı rapor edilmiştir [138].

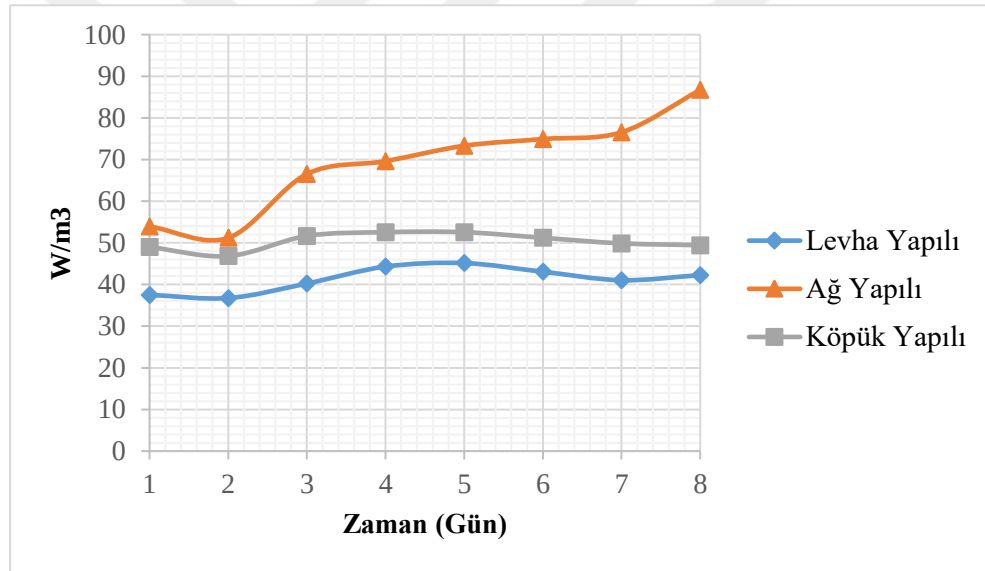
Şekil 5.2’de silindir geometrili elektrotların zamana göre güç yoğunluğu değişimi görülmektedir.



Şekil 5.2. Silindir geometrili elektrotların zamana göre güç yoğunluğu değişimi.

Silindir geometriye sahip yapısal olarak en yüksek güç yoğunluğu 89,07 W/m³ ile ağ yapılı elektrotta 7. günde görülmüştür. Ağ yapılı elektrot başlangıç gününden itibaren maksimum güç noktasına %103 artış ile ulaşmıştır. Maksimum noktasına ulaştıktan bir gün sonra yani son deney gününde %23 düşüş kaydedilmiştir. Sırasıyla levha yapılı ve köpük yapılı elektrotların maksimum güç yoğunluğu çıktısı 60,55 W/m³ ve 54,39 W/m³'tür. Levha yapılı elektroda ait deney düzeneğinde maksimum güç noktasına 5. günde ulaşılmıştır. Başlangıç günü ile maksimum güç noktası arası hücre %60 güç yoğunluğu artışı göstermiştir. Maksimum güç noktası ile son deney günü arasında %51 performans kaybı görülmektedir. Köpük yapılı elektrot çalışmasında maksimum güç noktasına 7. günde % 126 artış ile ulaşılmıştır. Fakat 7. günden 8. güne geçişte %20 düşüş gerçekleşmiştir. Deney grubu incelediğinde bu çalışmada ağ yapılı elektrot yüksek performans gösterip çoğunlukla artış kaydettiği apaçık ortadadır. Geriye kalan hücreler ise genellikle ani artış göstermeyip bir süre normal örüntüde ilerleme sağlayıp, deneysel çalışmanın son ölçüm periyotlarında tüm hücreler düşüş göstermiştir. Silindir geometriye sahip ağ yapılı elektrot hacim olarak yeterli dolgunluğa ulaşmıştır. Yüzey alanı yeterliliği sağlaması sebebiyle kayda değer performansı öne çıkmaktadır. Düşük toksit oran, yüksek oksidasyon çoğunlukla performans artışını desteklemiştir. Bazı araştırmacılar ağ yapılı bakır elektrodun grafit elektroda göre üç kat daha fazla güç çıkışı verdiğini ve bu durumun örgü yapısının elektro-biyofilm bağlanmasını kolaylaştırmasıyla açıklanmaktadır [139]. Haavisto ve arkadaşları mikrobiyal yakıt

hücrelerinde ksiloz içeren sentetik atık suyun elektrik üretimi ve KOİ giderimi için en uygun anot malzemesini belirlemeyi ve termomekanik hamurlaştırma atık suyunun arıtılması için uygunluğunu araştırmışlardır. Test edilen anot malzemeleri arasında karbon bazlı elektrotlar, metal bazlı elektrotlar ve bir metal-karbon düzeneği yer almaktadır. Çalışmada, farklı karbon bazlı anot malzemeleri kullanılarak mikrobiyal yakıt hücrelerinin sürekli işletiminde ksilozdan elde edilen güç yoğunluklarının 265 mW/m^2 ile 333 mW/m^2 arasında olduğu görülmüştür. Yarı sürekli çalışmalarda ise, 2. günde kalay kaplı ağ yapılı bakır elektrot ile 358 mW/m^2 'lik biraz daha yüksek bir günlük ortalama güç yoğunluğuna ulaşılmıştır. Ancak, 3. günde bakır oksidasyonu ve çözündürme nedeniyle güç yoğunluğunda azalma meydana geldiğini raporlamışlardır. Bakır elektrik iletkenliği açısından iyi bir malzeme olmasına rağmen, oksidatif ortamlarda stabil olmaması ve mikroorganizmalar için toksik bakır oksitler oluşturduğu öne sürülmüştür [140]. Şekil 5.3'te piramit geometriye sahip deneysel çalışmaların güç yoğunluğu çıktıları görülmektedir.



Şekil 5.3. Piramit geometriye sahip deneysel çalışmaların zamana göre güç yoğunluğu değişimi.

Yapılan bu çalışmada alınan verilere göre hücreler genellikle çok az artış kaydetmiş olup genellikle stabil bir ilerleme kaydetmiştir. Deneysel çalışmalar içinde sadece ağ yapılı elektrot deneylerin sonuna kadar artış trendini bozmamıştır. Deneysel çalışma içinde en yüksek güç yoğunluğuna $86,72 \text{ W/m}^3$ ile ağ yapılı bakır elektrot ile ulaşılmıştır. Piramit geometriye sahip ağ yapılı elektrot başlangıç gününden itibaren deneysel çalışmanın son gününe kadar sürekli olarak artış göstermiştir. Çalışmanın tamamlanması ile toplam artışın %61 olduğu görülmüştür. Diğer hücrelerden alınan maksimum güç değeri levha yapılı ve köpük yapılı elektrotlarda sırasıyla $45,14 \text{ W/m}^3$ ve $52,56 \text{ W/m}^3$ 'dür. Piramit geometriye sahip ağ yapılı elektrotun maksimum güç noktasına çalışmanın 5. gününde %20 artış ile ulaşılmıştır. Deney düzeneğinin son çalışma gününe kadar ise %6 düşüş

gözlemlenmiştir. Bu durum doygunluk noktasına kısa sürede ulaşıp neredeyse stabil davranışa geçtiğini göstermektedir. Piramit geometriye sahip köpük yapılı elektrot maksimum güç noktasına çalışmanın 4. Gününde %7 artış ile ulaşmıştır. Çalışmanın 4. günü ile son günü arasında %6 düşüş ile neredeyse stabil olarak tamamlanmıştır. Çalışma grubu gösteriyor ki ağ yapılı elektrot başlangıçtan itibaren artış trendindedir. Levha yapılı elektrot ve köpük yapılı elektrot ise çoğunlukla kararlı ilerleme kaydetmiştir. Bu durum ağ yapılı elektrodun daha fazla oksidasyon ile biyoaktivite fazlalığı ile alakalı olabileceği düşünülmektedir. Köpük yapılı elektrot düşük açıklıktaki gözenekleri ile bakteri nüfuziyetini zayıflattığını fakat levha yapılı elektroda göre daha fazla yüzey alanı bulundurması sebebiyle ikinci sırada olduğu düşünülmektedir. Levha yapılı elektrotta ise iç gözenekleri olmaması sebebiyle yüzey alanı düşüktür. Bu sebeple en kötü performansı sergilemiştir.

Deneysel çalışmada hücrelerin maksimum ve ortalama güç yoğunlukları Tablo 5.1’de görülmektedir.

Tablo 5.1. Deneysel çalışmada hücrelerin maksimum ve ortalama güç yoğunlukları

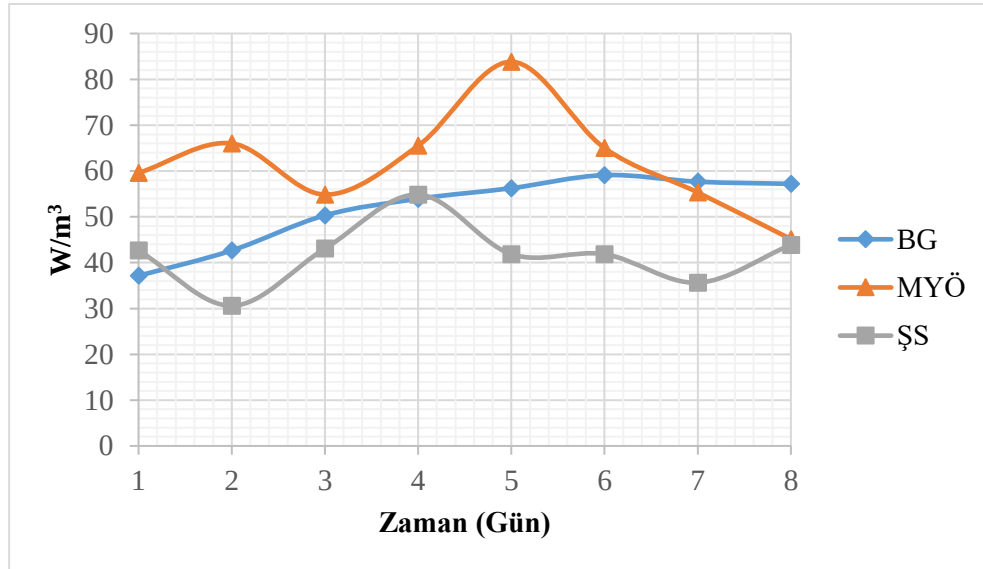
	Plaka levha Yapılı	Plaka ağ Yapılı	Plaka köpük Yapılı	Silindir levha yapılı	Silindir ağ yapılı	Silindir köpük yapılı	Piramit levha yapılı	Piramit ağ yapılı	Piramit köpük yapılı
Maksimum (W/m ³)	59,10	24,38	87,89	60,55	89,07	54,39	45,14	86,72	52,56
Ortalama (W/m ³)	51,78	16,11	62,89	45,04	67,89	37,77	41,29	69,10	50,39

Plaka geometrili deneylerde, levha yapılı, ağ yapılı ve köpük yapılı elektrotların sekiz günlük ortalama güç yoğunlukları sırasıyla 51,78 W/m³, 16,11 W/m³ ve 62,89 W/m³’dür. Silindir geometrili deneylerde levha yapılı, ağ yapılı ve köpük yapılı elektrot deneylerinden sekiz günlük ortalama güç yoğunlukları 45,04 W/m³, 67,89 W/m³ ve 37,77 W/m³’dür. Piramit geometrili deneylerde levha yapılı, ağ yapılı ve köpük yapılı elektrot deneylerinden sekiz günlük ortalama güç yoğunlukları 41,29 W/m³, 69,10 W/m³ ve 50,39 W/m³’dür. En yüksek ortalama güç yoğunluğuna sahip deneysel çalışmalar sırasıyla piramit geometrili ağ yapılı bakır elektrot, silindir geometrili ağ yapılı bakır elektrot ve plaka geometrili köpük yapılı bakır elektrottur. Bian ve arkadaşları mikrobiyal yakıt hücreleri için üç boyutlu gözenekli elektrotların üretilmesi ve performansının değerlendirilmesi üzerine odaklanmışlardır. UV ile kürlenebilen reçine ve 3 boyutlu baskı tekniği kullanılarak gözenekli elektrotlar üretilmiş ve ardından bakır akımsız kaplama yapılmıştır. Çalışma sonucunda 3 boyutlu baskılı gözenekli bakır anotlara sahip MYH’lerde, bakır örgü elektrotlara kıyasla daha yüksek bir voltaj ve güç yoğunluğu elde edilmiştir. Bu sonuçlar, 3 boyutlu baskılı gözenekli bakır anot elektrotlarının daha düşük bakır içeriği göstermesiyle birleştiğinde, MYH’deki bakır çözme davranışını doğrulamıştır. Bununla birlikte, bakır anot elektrotlarında biyofilm

oluşumunun azaldığı gözlemlenmiştir. Çalışma, 3 boyutlu baskı teknolojisi ve gözenekli yapıların gelecekteki ölçek büyütme için umut verici bir potansiyele sahip olduğunu gösterdiği, ancak biyoyumculuk açısından daha fazla çalışma gerektiğini raporlamıştır [141]. Hidalgo ve arkadaşları yaptıkları çalışmada doğal olarak bulunan mikrobiyal popülasyonun, anot elektrotları olarak kullanılan 2 boyutlu karbon keçe veya 3 boyutlu karbon kaplı Berl selelerindeki elektrokimyasal davranışlarının karşılaştırmasını yapmışlardır. Keçe tabanlı hücrenin performansının 5 ayda düştüğü, eyer tabanlı MYH'nin ise performansını 2 ay sonra aştığı ve bu performansı tüm testler için koruduğu ifade edilmiştir. Elektrokimyasal empedans spektroskopisi, MYH'lerin kayıplarını kontrol etmek için kullanılmış ve biyofilm-elektrolit arayüzündeki kütle taşıma sınırlamalarının iç dirençlere büyük katkısı olduğu (%95'ten fazla) gösterilmiştir. Berl selelerdeki aktivasyon direncinin karbon keçeye göre daha düşük olması, yüksek yüzey alanına sahip 3 boyutlu elektrotlarda bakteri popülasyonundaki artışa bağlı olarak gelişmiş bir yük aktarımı olduğuna işaret ettiği raporlanmıştır [142]. Bu çalışmalar 3 boyutlu elektrotların performans konusunda başarılı sonuçlar verebileceğini göstermektedir.

5.2. Besleme Sistemi Sayısal Sonuçlar

Şekil 5.4'de mikrobiyal yakıt hücrelerinde besin türünün zamana göre güç yoğunluğu değişimi görülmektedir.



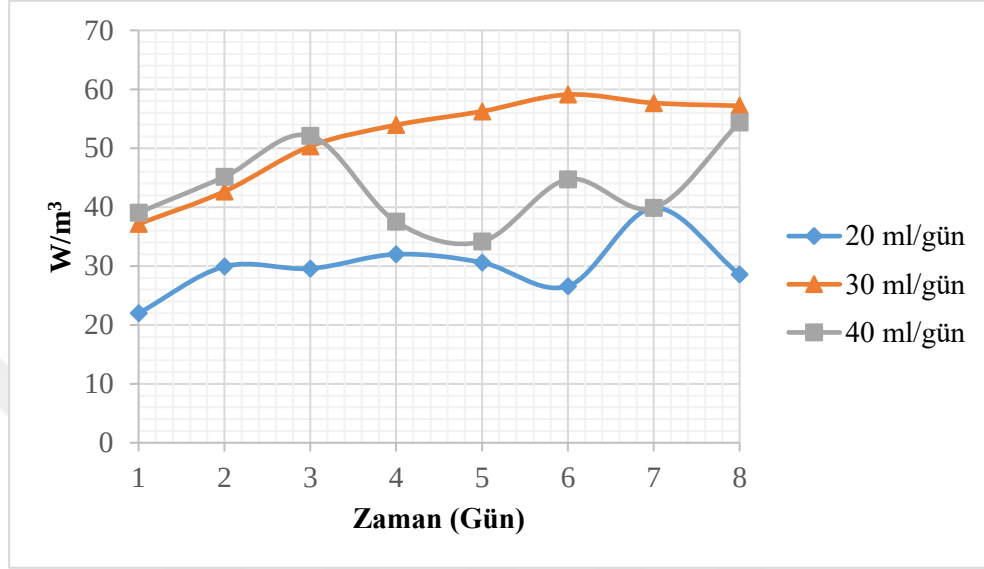
Şekil 5.4. Mikrobiyal yakıt hücrelerinde besin türünün zamana göre güç yoğunluğu değişimi.

Elde edilen verilere göre uygulanan besinlerden en yüksek güç yoğunluğu oluşumu sağlayan maya özlü pazar atığı besini olduğu görülmektedir. Maya özlü pazar atığı besininde maksimum güç

noktası olarak 83,84 W/m³ ile 5. günde elde edildiği görülmektedir. Maya özlü pazar atığı başlangıç gününden maksimum güç noktasına ulaştığı deneysel güne kadar %41 artış göstermiştir. Deney hücresi maksimum güç noktası ile son ölçüm gününe kadar %46 değer kaybı yaşamıştır. Bitkisel gliserin tabanlı pazar atığı özü ve şekerli su çalışmalarında maksimum güç yoğunluğu sırasıyla 59,10 W/m³ ve 54,85 W/m³'dür. Bitkisel gliserin tabanlı pazar atığı çalışması maksimum güç noktasına 6. günde ulaşmıştır. Başlangıç günü itibariyle maksimum güç noktasına %59 artış ile ulaşılmıştır. Maksimum güç noktası ile son deney ölçüm günü arasında %3 düşüş kaydedilmiştir. Şekerli su deney çalışmasında maksimum güç noktası 4. günde görülmüştür. Başlangıç gününden itibaren maksimum güç noktasına %29 artış ile ulaşılmıştır. Maksimum güç noktasından son deney ölçüm gününe kadar %20 performans kaybı gözlemlenmiştir. Çalışma verileri yakıt hücrelerinde maya tabanlı pazar atığı ile beslenmiş hücre hem ortalama olarak hem de maksimum güç noktası olarak en iyi performansı göstermiştir. Deney hücresinin voltaj çıktısı maya bakterilerinin desteği ile, yüksek oksidasyon ve elektron transferi vasıtasıyla maksimum güç noktasına ulaşmıştır. Bu durum maya tabanlı pazar atığı özütünün maya bakterilerinin varlığı sebebiyle daha fazla güç yoğunluğu oluşturduğunu düşündürmektedir. Yapılan çalışmalar bu değerlendirmeyi desteklemektedir. [143]. Araştırmacılar tarafından düşük biyo-çözünürlüğe sahip çöp sızıntı suyunun ön fermantasyonu, mikrobiyal elektroliz hücresinin performansı açısından değerlendirilmiştir. Fermantasyon sürecinde, karmaşık organik maddeler basit uçucu yağ asitlerine dönüştürülmüş, özellikle süksinat ve asetat gibi yağ asitlerine yoğunlaşmıştır. Karbonhidratlar en çok fermante olan bileşenler olurken, proteinler ve lipitler de fermantasyon sürecine dahil olmuştur. MEH'nin akım yoğunluğu, Kolombik verimlilik, Kolombik geri kazanım ve biyolojik oksijen ihtiyacı giderimi, fermante sızıntı suyunu besleyen bir MEH'de çok daha yüksek bulunmuştur. Sonuçlar, ön fermantasyonun MEH performansını artırdığını ve zorlu atık suların elektron geri kazanımı ile arıtılmasında etkili olduğunu göstermektedir [144]. Bir başka araştırmacının yaptığı çalışma da bu durumu desteklemektedir [145]. Çalışmanın diğer deney düzeneği bitkisel gliserin tabanlı besinde stabil ve düşük bir ivme ile artış kaydedilmiştir. Fakat ortalama güç yoğunluğu olarak ikinci sırada olmasına rağmen kararlı olması ilgi çekmektedir. Bu durum pazar atıklarının organik besin gücüne ve mikro organizmalarının yaşam şartlarının güçlendiğine işaret etmektedir. Bir grup araştırmacı MYH sistemini kullanarak atık su arıtma ve enerji üretim teknolojisini geliştirmeyi amaçlamışlardır. Anot yüzeyindeki biyofilmden bazı biyokatalizörleri belirlemek için karakterizasyonlar yapılmıştır. Kronoamperometri kullanılarak yapılan deneyler sonucunda, biyokatalizörlerin enerji üretimi için umut verici bir yenilenebilir kaynak olduğu ve yeşil kimya teknolojisi için alternatif bir teknoloji olduğu belirlenmiştir. MYH'nin uzun süreli performansını korumak için anot koşullarının optimizasyonu da incelenmiştir. Araştırmacıların yaptığı bu çalışmada, evsel atık suyun verimli bir şekilde işlenmesini sağlama potansiyeline sahip olan mikroorganizmaların enerji üretimi alanında kullanılabilirliği vurgulanmıştır [146]. Şekerli su

karişımı çalışma grubunda en düşük ortalama güç yoğunluğuna sahip hücre olmuştur. Genellikle dalgalı bir patern oluşturmıştır.

Şekil 5.5'te besleme miktarının güç yoğunluğu çıkışına etkileri grafiği görölmektedir.

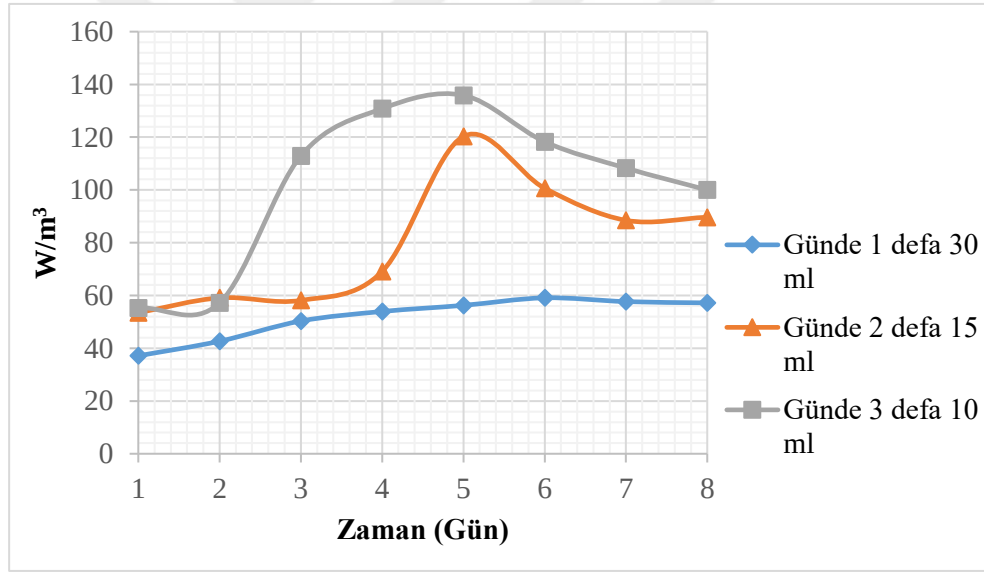


Şekil 5.5. Mikrobiyal yakıt hücrelerinde besleme miktarının zamana göre güç yoğunluğu değişimi.

Veriler incelendiğinde güç çıkışı olarak en yüksek değere 30 ml/gün besleme parametresi bulunan hücre ulaşmıştır. Bu hücre maksimum güç noktası olarak 59,10 W/m³ güç yoğunluğu çıkışını vermiştir. Hücre maksimum güç noktasına 6. günde %59 artış ile ulaşmıştır. Hücrenin devam eden deneysel periyot süresinde %3 düşüş gözlemlenmiştir. Deneysel çalışma grubunda 20 ml/gün ve 40 ml/gün besleme oranlarının güç çıkışları sırasıyla 39,85 W/m³ ve 54,39 W/m³'dür. Besleme oranı olarak 40 ml/gün parametresine sahip hücre çalışma başlangıcından çalışmanın 3. gününe %33 artış ile ulaşmıştır. Bu artış sonrasında 5. güne ulaşıldığında minimum noktasına %34 düşüş ile ulaşılmıştır. Deney hücresi bu noktadan sonra %59 artış ile çalışmanın son günü maksimum güç noktasına ulaşmayı başarmıştır. En düşük besleme oranı olan 20 ml/gün çalışması maksimum güç noktasına 7. günde %81 artış ile ulaşmıştır. Maksimum güç noktasının akabinde %28 düşüş kaydedilmiştir. Grafik incelendiğinde besin miktarı parametreleri içinde 20 ml/gün parametresi en düşük performansı göstermiştir. En yüksek performansa sahip olan 30 ml/gün optimal besleme noktasının en iyi performansı verebileceğini düşündürmektedir. 40 ml/gün parametresi deneysel çalışmaya artış ile başlayıp sonrasında düşüşe geçmiştir. Kalan deney periyotlarında dalgalanmalı güç çıkışı mevcuttur. Veriler ışığında hücreye verilen besin miktarı her zaman pozitif etki gösteremeyeceğini ve optimal değerin daha iyi performans göstereceği düşünölebilir. Bazı araştırmacılar akış hızının farklı mikrobiyal konsorsiyumlar üzerindeki etkisi, aerobik veya anaerobik bakterileri zenginleştirmek için kullanılan aşılarda incelemiştir. MYH'lerin erken

aşamalarda yüksek akış hızlarında düşük performans gösterdiği ancak aerobik bakterilerin anodik biyofilm gelişiminden sonra daha belirgin bir iyileşme sergilediği ifade edilmektedir. Biyofilm oluşumunda bazı farklılıklar olduğu ve topaklı büyümenin düşük güçle ilişkilendirildiği belirtilmektedir. Zamanla düşük akış hızları için güç, iç direnci arttığı ve bu durumun gelişen mikroflora tarafından redoks potansiyelini değiştirerek açıklanabileceği belirtilmektedir. Güç eğrilerinde, artan iç direncin iyonik veya mikrobiyal tükenme nedeniyle atfedilen bir aşım olduğu görülmektedir. Bu tür olayların ilk kez iç direnç perspektifinden açıklandığı ifade edilmektedir [147]. Bir başka araştırmacı ise besleme oranındaki artışın güç çıkışında artışa yol açtığı, ancak çok yüksek bir besleme oranı güç yoğunluğunu azaltabileceğini rapor etmiştir. Ayrıca, besleme oranındaki artışın kimyasal oksijen ihtiyacı giderimi ve Kolombik verimliliği olumsuz etkileyebileceği ifade edilmektedir [148].

Besleme tipinin mikrobiyal yakıt hücrelerinde güç yoğunluğu çıkışına etkileri Şekil 5.6'daki grafikte görülmektedir.



Şekil 5.6. Mikrobiyal yakıt hücrelerinde besleme tipinin zamana göre güç yoğunluğu değişimi

Veriler ışığında gözle görülür bir şekilde en yüksek güç yoğunluğuna sahip olan konfigürasyonun günde 3 defa 10 ml beslemeli olan hücre olduğu görülmektedir. Bu hücre çalışma süresince maksimum olarak $135,87 \text{ W/m}^3$ güç yoğunluğunu elde etmiştir. Günde 10 ml beslemeye sahip hücre maksimum güç noktasına %146 artış ile 5. günde ulaşmıştır. Maksimum güç noktasına ulaştıktan sonra deneysel çalışmanın son gününe %26 düşüş ile ulaştığı görülmektedir. Deney grubunun diğer konfigürasyonlardan günde 1 defa 30 ml ve günde 2 defa 15 ml besleme tiplerindeki maksimum güç çıkışları sırasıyla $59,10 \text{ W/m}^3$ ve $120,31 \text{ W/m}^3$ 'dür. Günde 1 defa 30 ml beslemeye sahip hücre maksimum güç noktasına 6. günde %59 artış ile ulaşmıştır. Maksimum güç noktasından

deneysel çalışmanın son evresine kadar %3'lük düşüşü takip etmiştir. Günde 2 defa 15 ml beslemeye sahip hücre maksimum güç noktasına %125 artış ile 5. günde ulaşmıştır. Maksimum güç noktasından deneysel çalışmanın son ölçüm gününde %25 düşüş olduğu görülmüştür. Grafik incelendiğinde günde 2 defa beslemeli ve 3 defa beslemeli konfigürasyonlar stabil bir başlangıç yaptıktan sonra artış gösterdiği ve bir süre sonra güç yoğunluğu kaybedip stabil davranış sergilediği görülmektedir. Bu durum mikroorganizma aktivitesinin kısa zaman için yüksek ivmeye ulaştığına işaret etmektedir. Sonrasında doygunluk seviyesine ulaşp kararlı duruma geçtiği görülmüştür. Günde 3 defa 10 ml besleme sistemine sahip konfigürasyon şüphesiz en iyi performans göstermesiyle öne çıkmaktadır. Bu durum bize aralıklı beslemenin daha iyi performans göstermesiyle bir ilişki olduğunu göstermektedir. Bazı araştırmacılar fenolün mikrobiyal yakıt hücreleri aracılığıyla biyolojik bozunumunu değerlendirmiştir. Yapılan çalışmada kesikli çalışan MYH'lerde, grafit granüller kullanıldığında fenolün biyolojik olarak bozunması daha hızlı gerçekleştiği görülmüştür. Sürekli çalışan MYH'lerde ise granül ve tek çubuklu elektrotlara sahip sistemlerde en yüksek biyolojik bozunumu oranları elde edilmiştir. Sürekli akışlı MYH'ler, tek çubuklu elektrotlara göre daha yüksek maksimum akım ve güç yoğunluklarına ulaşıldığını rapor edilmiştir [149]. Besin miktarı çalışma grubundan çıkarılan sonuçlar ile bu grup birlikte değerlendirildiğinde hücre fazla ve düzensiz beslenildiğinde biyokirlenme olgusuna işaret edebilir. Biyokirlenme hücrenin çalışmasıyla ve kötü şartlar altında olması durumunda membranda tıkanıklıklara neden olması olarak tanımlanabilir. Araştırmacılar yaptıkları çalışmalar ile bu olguyu desteklemişlerdir [150], [151], [152].

Deneysel çalışmalar tamamlanması ile Tablo 5.2'deki maksimum güç yoğunluğu noktaları ve ortalama güç yoğunluklarına ulaşılmıştır.

Tablo 5.2. Deneysel çalışmada hücrelerin maksimum ve ortalama güç yoğunlukları

	BG	MYÖ	ŞS	20 ml/gün	30 ml/gün	40 ml/gün	Günde 1 defa 30 ml	Günde 2 defa 15 ml	Günde 3 defa 10 ml
Maksimum (W/m ³)	59,10	83,84	54,85	39,85	59,10	54,39	59,10	120,31	135,87
Ortalama (W/m ³)	51,78	61,91	41,80	29,88	51,78	43,37	51,78	79,86	102,33

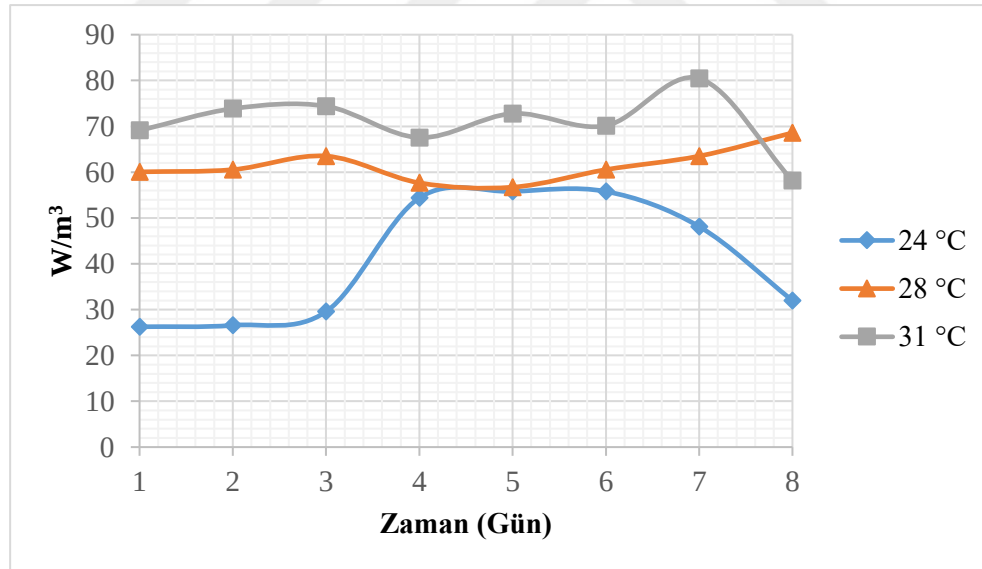
Çalışmalardan alınan verilere göre BG, MYÖ ve ŞS çalışmalarından alınan sekiz günlük ortalama güç yoğunluğu sırasıyla 51,78 W/m³, 61,91 W/m³ ve 41,80 W/m³'dür. Günlük besleme oranı 20 ml, 30 ml ve 40 ml olan çalışmalardan alınan sekiz günlük ortalama güç yoğunlukları sırasıyla 29,88 W/m³, 51,78 W/m³ ve 43,37 W/m³'dür. Besleme tipi çalışmasında günde 1 defa 30 ml, günde 2 defa 15 ml ve günde 3 defa 10 ml deneylerinden alınan sekiz günlük ortalama güç yoğunlukları sırasıyla 51,78 W/m³, 79,86 W/m³ ve 102,33 W/m³'tür. Bu veriler ışığında en yüksek ortalama güç

yoğunluğuna sahip ilk üç çalışma günde 3 defa 10 ml besleme, günde 2 defa 15 ml besleme ve MYÖ çalışmasıdır. Çalışılan veriler mikrobiyal yakıt hücrelerinde ön fermentasyonun güç yoğunluğu üzerinde etkin olduğunu göstermiştir. Bu durum bakteri popülasyonunun artışı güçlendirmiştir. Besin maddesi olarak kullanılan substratın organik madde içeriği enerji veremliliğinin artışına sebep olduğu ve pazar atıklarının değerlendirilip kullanılabileceği fikri güçlenmektedir. Hücrelerin aşırı beslenmesi veya az beslenmesi hücre performansı açısından negatif sonuç oluşacağı sonucuna yapılan deneyler ile ulaşılmıştır. Her zaman optimal değer hücre performansını pozitif etkileyebileceği düşünülmektedir.

5.3. Ortam Koşulları Sayısal Sonuçları

Mikrobiyal yakıt hücrelerinin temelini oluşturan bakteriler canlı olduklarından dolayı yaşamsal şartlara ihtiyaç duyarlar [134]. Bu nedenle ortam şartları hücre performansı için hayati öneme sahiptir. Bu çalışmada bakteriler için farklı sıcaklık değerleri ve farklı ışık dalga boyları ile deneysel çalışma yapıp elektriksel performansları incelemeye alınmıştır.

Şekil 5.7'deki grafikte farklı sıcaklıklara göre hücrelerin elektriksel performansları görülmektedir.

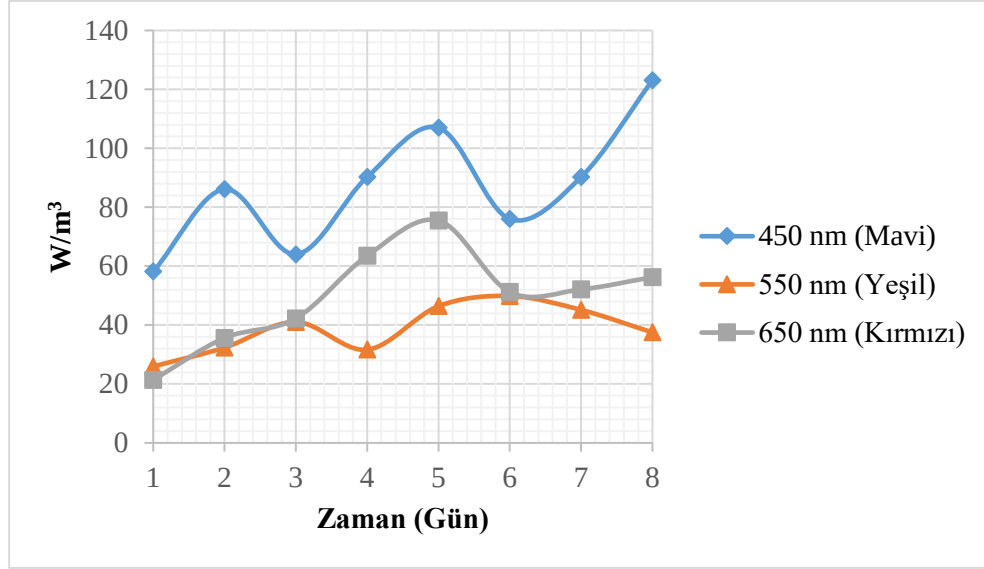


Şekil 5.7. Mikrobiyal yakıt hücrelerinde sıcaklığın zamana göre güç yoğunluğu değişimine etkisi.

Veriler ışığında maksimum güç yoğunluğu noktasını 80,44 W/m³ ile 31 °C dereye sahip hücre ulaşılmıştır. Hücre maksimum güç noktasına %16 artış ile 7. günde ulaşmıştır. Maksimum güç noktasından bir sonraki deney gününü %28 düşüş izlemiştir. 24 °C ve 28 °C'a sahip konfigürasyonların maksimum güç yoğunluğu noktası sırasıyla 68,58 W/m³ ve 55,78 W/m³'tür. 24 °C'a sahip deney hücresi maksimum güç noktasına %112 artış ile 5. günde ulaşılmıştır. Maksimum

güç noktası ile son deneysel çalışma gününe kadar %43 düşüş gerçekleşmiştir. 28 °C'a sahip deneysel hücre maksimum güç noktasına % 14 artış ile son deney günü olan 8. günde ulaşmıştır. Hücrede kısmi bir düşüş gerçekleşmiştir. Bu düşüş dışında genellikle artış davranışı göstermiştir. Deneysel çalışmalar incelendiğinde en iyi performansın en yüksek sıcaklık derecesinde elde edildiği açıkça görülmektedir. Bu durum bize hücrenin performansının belli sıcaklık aralığında sıcaklıkla doğru orantılı olduğunu göstermektedir. Hücrede bulunan bakteri kültürleri yüksek sıcaklık ortamında daha iyi çoğalma ve oksidasyon gerçekleştirmesiyle bağlantılı olduğu düşünülmektedir. Min ve arkadaşları yaptıkları çalışmada sıcaklığın önemli bir rol oynadığı ve güç üretimini etkilediğini belirtmektedir. Araştırmanın sonuçları, MYH'nin orta sıcaklıklarda başlatılmasının, uzun bir gecikme dönemi olmasına rağmen atık su arıtımı için pratik bir şekilde çalışabileceğini göstermektedir. Bununla birlikte, düşük sıcaklıkta çalışan MYH başarılı olmamış ve düşük güç çıkışı elde edilmiştir. Ayrıca ham evsel atık suyun, mikrobiyal büyümeyi ve elektrik üretimini destekleyebildiği belirtilmektedir. Güç üretimi, işletme sıcaklığından da etkilendiği ve artan sıcaklıklarda daha yüksek bir güç elde edilebildiği raporlanmıştır [153]. Li ve arkadaşları biyobozunur malzemelerden doğrudan elektrik üretebilen mikrobiyal yakıt hücresinin sıcaklık değişiminin farklı etkilerini incelemişlerdir. Araştırmacılar tarafından MYH'nin güç yoğunluğu, elektrot potansiyeli, Kolombik verimlilik, kimyasal oksijen ihtiyacının giderilmesi ve iç direnç gibi faktörler üzerinde sıcaklığın etkisi araştırılmıştır. Sonuçlar, MYH'nin maksimum güç yoğunluğunun 37 °C'de elde edildiğini göstermiştir. Daha düşük olan 10 °C sıcaklıkta güç yoğunluğunun düşük olduğu ancak anot potansiyelinin büyük ölçüde etkilendiği görülmüştür. Öte yandan, daha yüksek olan 43 °C sıcaklığında MYH'nin katot performansı üzerinde belirgin bir etkisi olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca, sıcaklık artışının MYH'nin iç direncini artırdığı ve dolayısıyla güç yoğunluğunu azalttığı belirlenmiştir. Kolombik verimlilik açısından ise, MYH'nin geniş bir sıcaklık aralığında etkin bir şekilde çalışabileceği gösterilmiştir [154]. Bahera ve arkadaşları çift odacıklı mikrobiyal yakıt hücresinin performansını farklı çalışma sıcaklıkları altında analiz etmişlerdir. Sakkaroz içeren sentetik atıksu kullanılarak yapılan deneylerde, 5 °C'lık sıcaklık artışıyla birlikte 20 ila 55 °C arasında farklı sıcaklıklarda MYH performanslarını deneysel olarak incelemesi hedeflenmiştir. Sıcaklık, koliform ve enerji verimliliği için önemli bir faktör olarak belirtilmiştir. 40 °C'de en yüksek KOİ giderim verimliliği %84 ve anot yüzey alanına normalize edilmiş güç yoğunluğu 34,38 mW/m² olduğu tespit edilmiştir. Maksimum Kolombik ve enerji verimlilikleri sırasıyla %7,39 ve %13,14 ile 40 °C'de elde edildiği bildirilmiştir. Ayrıca, MYH'nin iç direnci sıcaklık arttıkça azaldığı raporlanmıştır [155].

Işığın mikrobiyal yakıt hücrelerinde zamana göre güç yoğunluğu değişimi etkisi grafiği Şekil 5.8'de görülmektedir.



Şekil 5.8. Mikrobiyal yakıt hücrelerinde ışık dalga boyunun zamana göre güç yoğunluğu değişime etkisi.

Veriler ışığında maksimum güç yoğunluğu noktasına 123,07 W/m³ ile 450 nm (mavi ışık) dalga boyuna sahip deneysel hücrede ulaşılmıştır. Mavi ışık altında çalıştırılan hücre maksimum güç noktasına %112 artış ile son deney günü ulaşmıştır. Birkaç güç yoğunluğu kaybı dışında genellikle artış eğiliminde olduğu görülmektedir. 550 nm (yeşil ışık) ve 650 nm (kırmızı ışık) dalga boylarına ait deneysel hücrelerin maksimum güç yoğunluğu noktaları sırasıyla 49,88 W/m³ ve 75,47 W/m³'dür. Yeşil ışık altında çalıştırılan deneysel hücre maksimum güç noktasına %92 artış ile 6. günde ulaşmıştır. Maksimum güç noktasından son deneysel çalışma gününe kadar %25 düşüş kaydedilmiştir. Kırmızı ışık altında çalıştırılan deneysel hücre maksimum güç noktasına %253 artış ile 5. günde ulaştığı görülmüştür. Maksimum güç noktasından son deney gününe %25 güç yoğunluğu düşüşü gözlemlenmiştir. Veriler açık ara farkla en düşük dalga boyuna sahip ışık daha fazla enerji üretebileceğini göstermiştir. Orta dalga boyu ve yüksek dalga boyu genellikle birbirlerini takip edecek şekilde performans göstermiştir. Işığa olan tepki fotosentetik mikroorganizmaların hareketlenmesiyle olabileceği düşünülmektedir. Bazı araştırmacılar bunu desteklemiştir [156]. Rong ve arkadaşları yaptıkları çalışmada kırmızı, mavi ve beyaz LED ışıkları ile deneysel çalışma gerçekleştirmişlerdir. Yaptıkları çalışmanın sonuçları, beyaz LED ışığının anot için etkili bir faktör olduğunu, hücre voltajının yükseldiğini, güç yoğunluğunun arttığını, kırmızı ve mavi ışığın voltaj üzerinde olumlu bir etkisi olduğunu göstermiştir [157]. Bu veriler bize bakterilerin yaşam standartları ile ışık dalga boyunun bir korelasyonu olabileceğini göstermektedir. Kuo ve arkadaşları tarafından ışık kaynaklarının fotosentetik bakterilerin büyümesi ve karotenoid içeriği üzerindeki etkisi incelenmiştir. Sekiz farklı ışık kaynağı kullanılmıştır. Bunlar akkor lamba, halojen lamba, floresan lamba, beyaz, sarı, kırmızı, mavi ve yeşil LED'ler olarak tercih edilmiştir. Karanlık koşul kontrol olarak kullanılmıştır. Işık kaynaklarının bakteriyel büyüme

üzerindeki etkisi, ışık şiddeti azaldıkça azaldığı gözlemlenmiştir. En yüksek büyümeyi sağlayan ışık kaynağı mavi LED, en düşük ise floresan lamba olduğu rapor edilmiştir [158].

Aşağıdaki Tablo 5.3’de ortam şartlarına ait çalışmaların maksimum güç noktaları ve ortalama güç yoğunluğu değerleri gösterilmektedir.

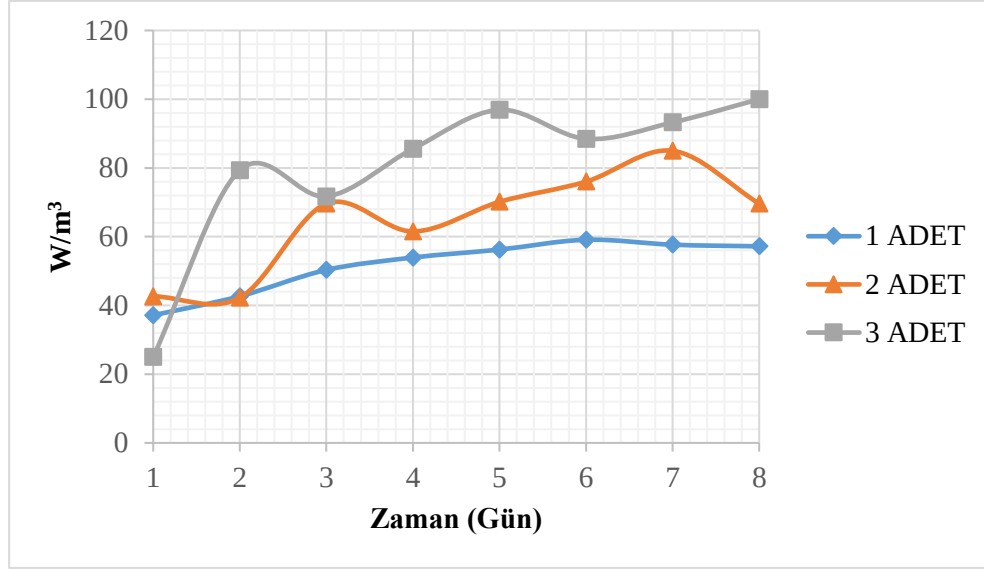
Tablo 5.3. Deneysel çalışmada hücrelerin maksimum ve ortalama güç yoğunlukları

	24 °C	28 °C	31 °C	450 nm	550 nm	650 nm
Maksimum (W/m ³)	55,78	68,58	80,44	123,07	49,88	75,47
Ortalama (W/m ³)	41,06	61,39	70,80	86,86	38,74	49,73

Tablo incelendiğinde sıcaklık olarak 24 °C, 28 °C ve 31 °C’a sahip deneysel çalışmalardan elde edilen ortalama güç yoğunlukları sırasıyla 41,06 W/m³, 61,39 W/m³ ve 70,80 W/m³’dür. Işık dalga boyu olarak yapılan çalışmada 450 nm (mavi ışık), 550 nm (yeşil ışık) ve 650 nm (kırmızı ışık) ile çalışılan hücrelerde ortalama güç yoğunlukları sırasıyla 86,86 W/m³, 38,74 W/m³ ve 49,73 W/m³ olduğu görülmektedir. Bu veriler mikrobiyal yakıt hücrelerinin performanslarının sıcaklık ve ışık dalga boyu ile bağlantılı olduğunu göstermektedir. Mikrobiyal yakıt hücrelerinde maksimum güç yoğunluğunun elde edilebilmesi için optimal ışık dalga boyu ve sıcaklığı önemi öne çıkmaktadır.

5.4. Fiziksel Deneylerin Sayısal Sonuçları

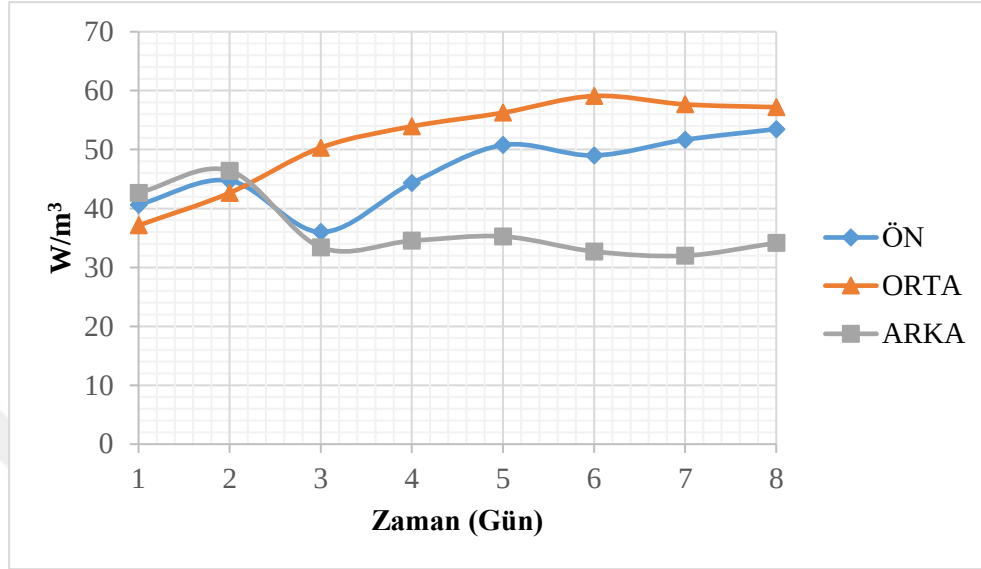
Bu bölümde, mikrobiyal yakıt hücresinin fiziksel şartlarındaki değişikliklerin, performans çıkışındaki potansiyel etkilerinin detaylı bir şekilde incelenmesi amaçlanmıştır. Çalışmanın bu evresinde, hücrenin performansını tek bir elektrot kullanımının ötesine taşımak adına 2 adet ve 3 adet aynı tip elektrota sahip deney düzenekleri titizlikle hazırlanıp test edilmiştir. Buna ek olarak, elektrodun konumunun mikrobiyal yakıt hücresinin elektriksel performansı üzerindeki etkileri detaylı bir şekilde araştırılmıştır. Hücre ortası, membran yanı ve hücre arkası olmak üzere üç farklı konum belirlenmiş ve bu konumların elektriksel performans üzerindeki etkileri sistemli bir şekilde incelenmiştir. Bu önemli aşamalar, elektrot sayısı ve konumunun mikrobiyal yakıt hücresi performansına olan katkısını anlamak adına değerli bir perspektif sunmaktadır. Mikrobiyal yakıt hücrelerinde elektrot adedinin zamana göre güç yoğunluğu üzerindeki etkisi Şekil 5.9’da görülmektedir.



Şekil 5.9. Mikrobiyal yakıt hücrelerinde elektrot adedinin zamana göre güç yoğunluğu değişimine etkisi.

Grafikte görüldüğü üzere maksimum güç yoğunluğu noktasına 100 W/m^3 ile 3 adet elektroda sahip hücre ile ulaşılmıştır. Deneysel hücre maksimum güç noktasına %300 artış ile 8. gün ulaşmıştır. Hücre nadir düşüşler dışında genellikle artış trendini bozmamıştır. Çalışma grubundaki 1 adet ve 2 adet elektroda sahip hücrelerde maksimum güç noktası sırasıyla $59,10 \text{ W/m}^3$ ve $84,99 \text{ W/m}^3$ 'dür. 1 adet elektrota sahip deneysel çalışmada maksimum güç noktası %59 artış ile 6. günde görülmüştür. Hücre maksimum güç noktasından deneysel çalışmanın son gününe %3 düşüş ile ulaşmıştır. 2 adet elektrota sahip hücre maksimum güç noktasına %99 artış ile 7. gün ulaşmıştır. Hücre deneysel çalışmanın son gününe %18 düşüş ile ulaşmıştır. Veriler incelendiğinde hücre performansının elektrot adedi ile korelasyonu olduğu açıkça görülmektedir. Elektrot adedi artışı oksidasyon yüzeyini artırması ile daha fazla elektroda elektron transferi sağlamak ve performans artışı gösterdiği düşünülmektedir. Hücreler içinde 3 elektroda sahip olan çalışma güçlü bir ivmeyle artış gerçekleştirmiş ve artışını devam ettirmiştir. Bir araştırmacı elektrotları, bakır tellerle birbirine bağlayarak çoklu elektrot sistemi tasarımı için kullanmıştır. Çoklu elektrotlu sistemlerin paralel bağlantısı, akımda daha fazla artışa neden olduğu görülmüştür. Bu çalışmada, üç adet çok elektrotlu bitki mikrobiyal yakıt hücresi seri bağlantıya geçirilmiştir. Birden çok elektrotlu sistemlerin karmaşık paralel-seri bağlantısıyla, farklı bağlantı şekillerini birleştirerek bitki mikrobiyal yakıt hücresi biyoelektrik üretim verimliliğini artırma potansiyeli ortaya çıktığı raporlanmıştır [159]. Ghadge ve arkadaşları tarafından 26 L hacimli bir kil silindir kullanılarak yapılan çoklu elektrotlu bir mikrobiyal yakıt hücresinin performansı değerlendirilmiştir. Elektrotlar paralel olarak 100Ω dirençle bağlandığında $11,46 \text{ mW}$ güç üretilmiş, bu değer tek elektrot çiftinden ve seri bağlantıdan daha yüksek bulunduğu rapor edilmiştir [160].

Mikrobiyal yakıt hücrelerinde elektrot konumunun zamana göre güç yoğunluğu değişim grafiği Şekil 5.10'da görülmektedir.



Şekil 5.10. Mikrobiyal yakıt hücrelerinde elektrot konumunun zamana göre güç yoğunluğu değişimine etkisi.

Elektrot konumu konfigürasyonlarında maksimum güç noktası $59,10 \text{ W/m}^3$ ile hücrenin orta konumudur. Hücrenin maksimum güç noktasına %59 artış ile 6. gün ulaşılmıştır. Maksimum güç noktasından deneysel çalışmanın son gününe %3 düşüş gerçekleşmiştir. Membran önü ve hücre arkası konfigürasyonlarından elde edilen maksimum güç noktaları sırasıyla $53,47 \text{ W/m}^3$ ve $46,41 \text{ W/m}^3$ 'dür. Membran önü deneysel çalışmasında maksimum güç noktasına %32 artış ile deneysel çalışmanın son gününde ulaşılmıştır. Hücre arkası deneysel çalışmasında maksimum güç noktasına %9 artış ile 2. günde ulaşılmıştır. Maksimum güç noktasından deneysel çalışmanın son gününe kadar %26 düşüş olduğu görülmüştür. Grafikteki verilerden yola çıkarak hücrenin ortasında bulunan elektrot konfigürasyonu daha kararlı bir güç çıkışı sağladığı görülmüştür. Membran önü konfigürasyonu arka konuma göre daha yüksek performans göstermiştir. Arka konum deneysel çalışma içinde en düşük performans gösterdiği saptanmıştır. Hücre arkası deneysel çalışması yüksek artış gerçekleştiremeden daha fazla düşüş olduğu gözlemlenmiştir. Hücrenin orta konumu ve membran konumu yakın değerler göstermektedir. Bu durum hücrenin membrana yakın olan kısımlarında biyokimyasal tepkimelerin daha yüksek olduğuna işaret etmektedir. Bir araştırmacı mikrobiyal yakıt hücrelerinde elektrot konumu üzerine deneysel çalışma gerçekleştirmiştir. Çalışma sonucunda optimal elektrot konumu teorisini raporlamıştır [156]. Raman ve arkadaşları foto mikrobiyal yakıt hücrelerinde elektrot mesafelerinin performans üzerindeki etkisini incelemeyi hedeflemişlerdir. Araştırmada, 10,3 cm, 12,5 cm ve 14,7 cm elektrot mesafeleri kullanılmıştır. Sonuçlar, daha yüksek güç yoğunluğu ve daha düşük iç direnç gözlemlenen 12,5 cm elektrot

mesafesine kıyasla 14,7 cm ve 10,3 cm elektrot mesafelerinde gözlenmiştir. Bununla birlikte, 14,7 cm ve 10,3 cm elektrot mesafelerinde daha yüksek değişim akımı yoğunluğu ve aşırı potansiyel, ancak daha düşük elektron transfer katsayısı tespit edilmiştir. Ayrıca, farklı karıştırma hızlarında yapılan deneylerde, artan karıştırma hızının güç yoğunluğunu artırdığı ve iç direnci azalttığı araştırmacılar tarafından raporlanmıştır [161]. Ghangrekar ve arkadaşları yaptıkları çalışmada elektrotlar arasındaki mesafenin ve anot elektrodunun toplam yüzey alanının elektrik üretimi üzerindeki etkisini değişken dış direnç altında değerlendirmişlerdir. Çalışma sonucunda elektrotlar arası mesafenin kısaldığı deneysel çalışmalarda en iyi performansın görüldüğünü raporlamıştır [162].

Aşağıdaki Tablo 5.4’de hücrenin fiziksel parametreleri ile yapılan deneysel çalışmalara ait maksimum güç yoğunluğu noktası ve ortalama güç yoğunlukları görülmektedir.

Tablo 5.4. Deneysel çalışmada hücrelerin maksimum ve ortalama güç yoğunlukları

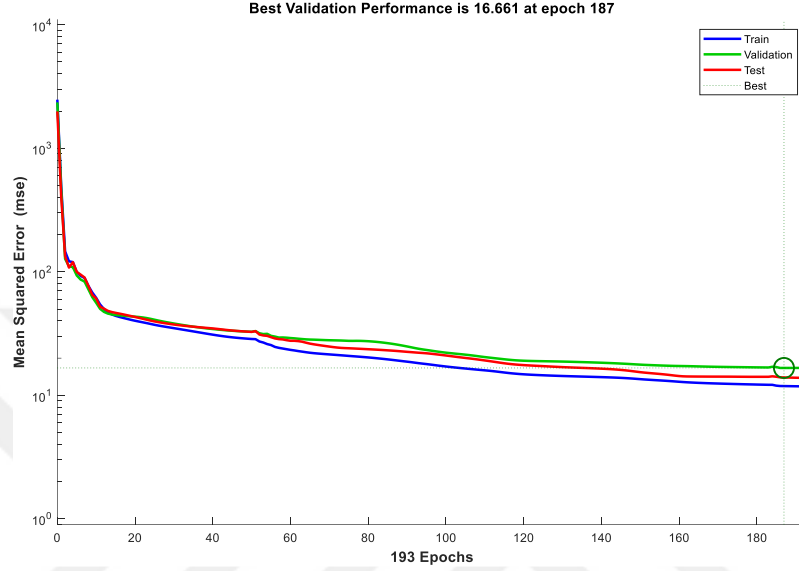
	Membran Önü	Hücre Ortası	Hücre Arkası	1 Adet Elektrot	2 Adet Elektrot	3 Adet Elektrot
Maksimum (W/m ³)	53,47	59,10	46,41	59,10	84,99	100,00
Ortalama (W/m ³)	46,32	51,78	36,39	51,78	64,60	80,03

Tabloya göre elektrot konumu konfigürasyonlarında membran önü, hücre ortası ve hücre arkası deneylerinin ortalama güç yoğunlukları sırasıyla 46,32 W/m³, 51,78 W/m³ ve 36,39 W/m³’dür. Elektrot adedine ait 1 adet elektrot, 2 adet elektrot ve 3 adet elektrot deneylerinde ortalama güç yoğunlukları sırasıyla 51,78 W/m³, 64,60 W/m³ ve 80,03 W/m³’dür. Hücrelerin elektrot sayılarının artırılması ve maksimum biyokimyasal tepkimenin gerçekleştiği bölgelerde elektrot kullanımı maksimum verimliliğe ulaşılması için bir yol olabileceği düşünülmektedir. Deneysel çalışmalar mikrobiyal yakıt hücrelerinde elektrot yüzey alanının önemini vurgulamaktadır. Bakterilerin yaşam döngülerini devam ettirebilmesi için çoğaldıkları ve mevcut besinlerin oksidasyonu ile gerçekleştirmesi bir biyoaktif bölgenin varlığına işaret etmektedir. Oksidasyon sonucu açığa çıkan elektronlar tutunabilecekleri elektrot yüzeyinde biyofilm oluşturarak dış devre aracılığıyla katot bölmesine geçmeye çalışırlar. Bu durum yüzey alanı artıkça elektroda elektron transferini artırmaktadır.

5.5. YSA Analizi

Çalışmanın bu kısmında elde edilen verilerin YSA sonuçları incelenerek regresyon analizinin yorumlanması yapılacaktır. YSA, karmaşık ilişkileri belirleme ve modelleme yeteneğiyle bilinir ve bu özellikleriyle elde edilen verilerin daha ayrıntılı bir şekilde anlaşılmasına olanak tanır. Elde

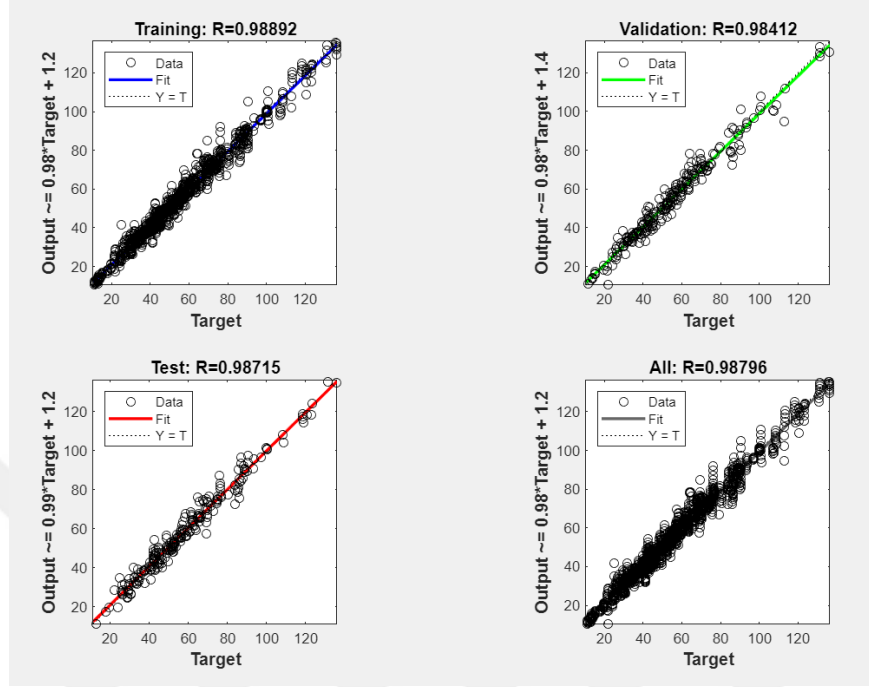
edilen veri setleri, YSA'nın öğrenme algoritmalarına tabi tutulup, mikrobiyal yakıt hücresinin performansını etkileyen faktörlerin tahmin edilebilirliği analizi için grafikler oluşturulmuştur. Şekil 5.11'de Matlab yapay sinir ağı modülü eğitim sonucu ortalama kare hatası grafiği görülmektedir.



Şekil 5.11. Matlab yapay sinir ağı modülü eğitim sonucu ortalama kare hatası grafiği.

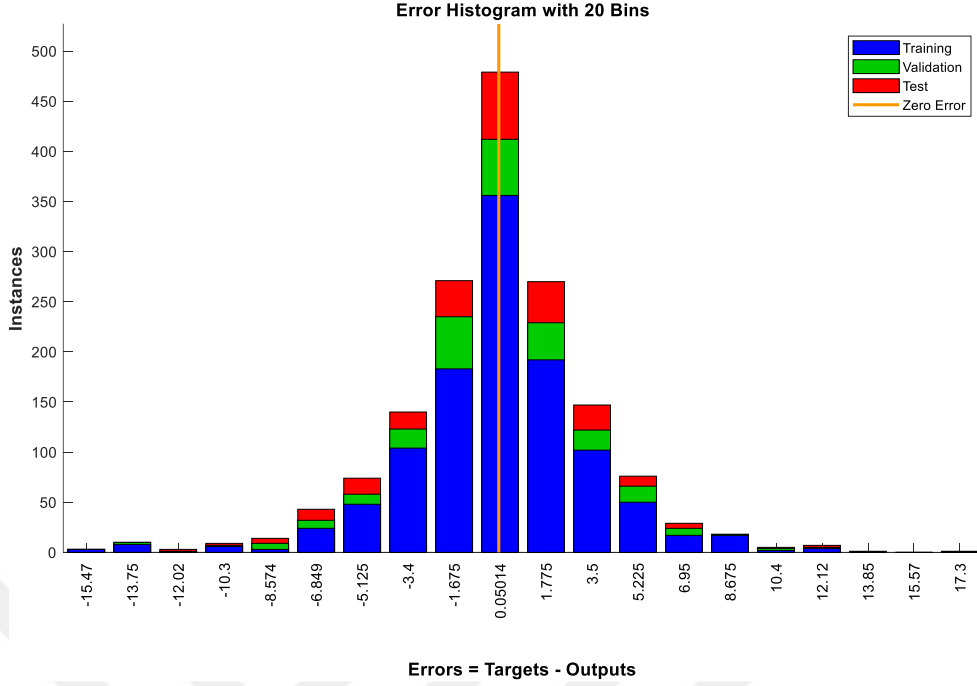
Şekilde görüldüğü üzere eğitim için en iyi performansın 187'inci eğitimde ulaşıldığı görülmektedir. Çalışmanın bu kısmında yapılan tüm deneysel çalışmaların sayısal verilerinin bir araya getirilip YSA eğitimi yapılarak tahmin algoritması oluşturulması hedeflenmiştir. Eğitim için kullanılan toplam veri girdisi 21 adet ve tek çıktı olan güç yoğunluğu değeridir. Yukarıdaki şekilde kurulan ağın performans grafiği görülmektedir. Grafiğe göre doğrulama testlerinin en iyi performansı 187 eğitim denemesinde 16,661 ortalama kare hatası (MSE) ile elde edilmiştir. Eğitim başlangıcında gözlemlenen yüksek ortalama kare hatalarının, öğrenme sürecinin karmaşıklığına ve başlangıçtaki belirsizliklere işaret ettiği açıktır. Ancak, eğitim döngüleri ilerledikçe, bu başlangıç zorluğu aşılabilir bir süreç haline gelmiştir. Eğitim verileri, doğrulama verileri ve test verileri üzerindeki hata grafiği zaman içinde belirgin bir şekilde iyileşmiş ve daha küçük eğimlere evrilmiştir. Bu süreçte, sistemin güçlü ve tutarlı bir öğrenme yeteneği geliştirdiği gözlenmiştir. Eğitim döngülerinin ilerlemesiyle birlikte, hata grafiği düzensiz dalgalanmaların ötesine geçmiş ve stabil bir seviyeye ulaşmıştır. Bu, modelin öğrenme sürecinin istikrarlı bir şekilde ilerlediğini ve elde edilen sonuçların güvenilir olduğunu göstermektedir. Sonuç olarak, eğitim sürecinin başlangıcındaki zorluklara rağmen, sistem istikrarlı bir şekilde optimize olmuş ve hedeflenen performans seviyesine ulaşmıştır.

Aşağıdaki Şekil 5.12’de çalışması yapılan YSA’nın eğitim doğrulama ve test verilerinin regresyon grafikleri görülmektedir.



Şekil 5.12. Matlab yapay sinir ağı modülü eğitim sonucu eğitim, doğrulama, test ve total regresyon grafiği.

Grafik üzerinden elde edilen regresyon değerleri incelendiğinde, en yüksek regresyon değeri olan 0,98892'nin eğitim verilerinde elde edildiği görülmektedir. Ayrıca, grafikte yer alan doğrulama verilerinin regresyon değeri 0,98412 ve test verilerinin regresyon değeri ise 0,98715 olarak belirlenmiştir. Bu değerlerin birleştirilerek hesaplanan ortak regresyon değeri ise 0,98796 olarak bulunmuştur. Bu regresyon değerleri, modelin eğitim, doğrulama ve test verileri üzerinde tutarlı ve yüksek bir doğrulama yeteneği sergilediğini göstermektedir. Özellikle, tüm veri seti üzerinde elde edilen 0,98796'lık regresyon değeri, modelin verilere uygun bir şekilde adapte olduğunu ve neredeyse mükemmel bir doğrulama sağladığını yansıtmaktadır. Regresyon değerinin 1'e yakın olması, modelin veri setine uygun bir şekilde genellenmiş olduğunu ve verilerle tutarlı bir doğrulama gerçekleştirdiğini göstermektedir. Bu regresyon değerleri, modelin veri setindeki karmaşıklıkları yakalayarak başarılı bir şekilde açıklama ve tahmin yapabildiğini göstermektedir. Tüm bu bulgular, oluşturulan tahmin algoritmasının güçlü, güvenilir ve genel anlamda başarılı bir performans sergilediğini desteklemektedir. Bu nedenle, elde edilen yüksek regresyon değerleri, modelin gerçek dünya verilerine uygulandığında güçlü ve doğru tahminler yapma kapasitesini güçlendirmektedir. Şekil 5.13'te Matlab yapay sinir ağı modülü eğitim sonucu eğitim, doğrulama ve test verilerinin hata histogramı görülmektedir.



Şekil 5.13. Matlab yapay sinir ağı modülü eğitim sonucu eğitim, doğrulama ve test verilerinin hata histogramı.

Şekil eğitim, doğrulama ve test verilerinin doğrulamaları yapılırken YSA'nın verdiği cevap ile beklenen gerçek verinin arasındaki farkı gösteren hata histogramı görülmektedir. Grafikte bunlara ek olarak sıfır hata veren sonuçların adedi de verilmiştir. Grafik incelendiğinde sıfır hata veren test sayısının tüm testlere göre en fazla olduğu açıkça görülmektedir. Grafik en çok sapmanın eğitim verilerinde olduğunu en az sapmanın test verilerinde olduğunu göstermektedir. Verilerin sapma yapma aralığının yoğun olduğu aralık (-8,574) ile 8,675 aralığı olmuştur. Mikrobiyal yakıt hücreleri gibi komplike ve birçok dinamiğe sahip yapılarda kabul edilebilir bir aralık olduğu söylenebilir. Farklı bakış açısı ile ele alındığında bu kadar sapmanın çok normal olduğu 21 adet girdi değeri sonucunda alınan bir çıktı değerine bağlanabilir. Literatürde yapılan araştırmalarda bu kadar dinamiğe sahip kapsamlı YSA analizine rastlanılmamıştır. Literatürde yapılan çalışmalarda kullanılan parametre sayısı ve türü çalışmaya göre değişiklik göstermektedir [163], [164], [165], [166]. Yapay sinir ağları vaat ettiği umutlu gelecek ile tahmine dayalı çalışmalarda kullanılabileceğini göstermektedir. Bir araştırmacı tarafından YSA, mikrobiyal yakıt hücrelerinin enerji üretimini tahmin etmek için kullanılmıştır. Yapılan bir çalışmada, YSA modeli kullanılarak MYH'ler için yedi ekzoelektrojen bakterinin toplam bolluğu tahmin edilmiştir. Bu model, çamur aşısının özelliklerine dayanarak %62-92 doğrulukla tahmin yapabilmektedir. Bu model, atık sudan enerji üretimini %84 doğrulukla tahmin edebilmektedir. Sonuçlar, YSA'nın biyofilm topluluklarını ve MYH'lerden güç üretimini tahmin etmek için kullanışlı bir araç olduğunu göstermektedir [167]. Farklı bir çalışmada, üçlü girdi olarak konsantrasyon, zaman ve direnç kullanan bir hücrenin

Üretilen gücünü tahmin etmek için çok katmanlı bir sinir ağı kullanılmıştır. Sinir ağının optimize edilmesi için yanıt yüzeyi metodolojisi kullanılmıştır. Elde edilen YSA, mükemmel bir tahmin yeteneğine sahip olup regresyon değerı %98 olarak tespit edilmiştir [168].



6. SONUÇLAR

Bu tez çalışmasında mikrobiyal yakıt hücrelerinin verimlilik ve pozitif yönlerini güçlendirmek amacı ile besin, elektrot, fiziksel şartlar ve ortam şartları gibi önemli performans parametreleri kapsamında deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmanın besin yönetim tarafı için üç farklı besin çeşidi kendi aralarında deneysel olarak karşılaştırılmış ve değerlendirilmiştir. Çalışmanın besin sistemini tam anlamıyla kapsamı amacıyla ikinci aşamada besin miktarı etkilerinin analizi için üç farklı besleme miktarı kendi aralarında deneysel olarak test edilmiştir. Sonraki aşamada ise besleme tipinin hücreye olan etkisinin anlaşılabilmesi için üç farklı besleme tipi deneysel olarak çalışılmış ve karşılaştırılmıştır. Elektrotların önemi elektriksel performans için hayati önem taşımaktadır. Çalışmada bakır temelli elektrot kullanılarak farklı yapılarda ve geometrilerde fiziksel olarak hazırlanıp mikrobiyal yakıt hücresinde deneysel çalışma yapılarak güç yoğunluğu analizi yapılmıştır. İncelemeler geometrik şekillere göre kategorize edilmiştir. Levha yapılı, ağ yapılı ve köpük yapılı bakır materyalleri kullanılarak plaka geometrili, silindir geometrili ve piramit geometrili olmak üzere dokuz adet elektrot hazırlanmıştır. Sekiz gün boyunca güç çıkışı incelenmiştir. Mikrobiyal yakıt hücrelerinin çalışması kullanılacağı coğrafyalar farklı olabileceğinden ortam şartları önemli parametre olarak karşımıza çıkmaktadır. Ortam sıcaklığı bakterilerin yaşamsal faaliyetlerini idame etmesi için optimal seviyede olması kaçınılmazdır. Bu sebeple bu çalışmada ortam şartlarına deneysel olarak yer verilmiştir. Hazırlanan hücreler farklı sıcaklıklarda ve farklı ışık dalga boyları altında deneysel olarak test edilmiştir. Mikrobiyal yakıt hücrelerinin fiziksel şartlar altında davranışının anlaşılabilmesi için somut verilere ihtiyaç duyulmaktadır. Çalışma kapsamında bu konuda da deneysel çalışma gerçekleştirilmiştir. Çalışmada mikrobiyal yakıt hücrelerinde farklı elektrot adetlerinde çalışmalar gerçekleştirilip sayısal çıktıları üzerinde incelemeler yapılmıştır. Çalışmanın diğer bir bölümünde ise fiziksel şart olan elektrot konumu hücre performansı üzerinde etkili olabileceği düşünüldüğü sebebiyle çalışma gerçekleştirilmiştir. Bu sebeple hücre içine farklı konumlarda elektrot yerleştirilerek elektriksel performanslar kaydedilip incelenmiştir. Yapılan tüm bu çalışmalardan elde edilen veriler derlenip ileri süreç tahmini yapıp yapılamayacağı görülebilmesi için YSA eğitilmesi test edilmiştir. Sonuç olarak aşağıdaki çıkarımlar elde edilmiştir;

Piramit geometrili elektrotlar daha fazla yüzey alanı ile daha fazla güç yoğunluğu elde edilmesini sağlayabilmektedir. Piramit yapılı elektrotların artan yüzey alan yoğunluğu ile çökelmiş bakteriyel yoğunluğunda daha iyi performans yakalayabilmesine bağlandığı tespit edilmiştir. Performans çıkışı olarak piramit elektrotu takip eden silindir geometrili elektrodun hacimsel ve yüzey alanı fazlalığı ile plaka geometrili elektrottan daha iyi performans gösterdiği incelenmiştir. Literatürde standart olarak kullanılan plaka geometri elektrotların performans olarak düşük kaldığı gözlemlenmiştir. Yapısal olarak incelendiğinde ağ yapılı elektrotlar yüzey alanı fazlalığı ve

bakterilerin daha iyi nüfuziyet sağlaması için yeterli gözenekliliğe sahip olduğu için güç yoğunluğunu artırabildiği anlaşılmıştır. Bu durumun köpük yapılı elektrotlarda da gerçekleşmesi beklenilir bir durumdur. Fakat yüzey alanı yüksek olmasına rağmen dar gözeneklere sahip olduğu göz ardı edilemez. Dar gözeneklerden dolayı nüfuziyeti zayıflattığı ve verimliliği düşürdüğü görülmüştür. Ağ yapılı elektrotlar bu duruma karşılık olarak daha açık gözenekleri ile nüfuziyeti artırabildiği gözlemlenmiştir.

Besleme tipi üzerine yapılan çalışma sonucunda günde üç defa 10 ml besleme hem maksimum güç noktası olarak hem de ortalama en iyi performans gösteren konfigürasyon olarak öne çıkmaktadır. En iyi performans değerleri içinde ikinci deneyin günde iki defa 15 ml besleme olması nedeniyle aralıklı besleme daha iyi performans gösterdiği söylenebilir. Bu durum aralıklı beslemenin en iyi besleme rejimi olduğunu ortaya koymaktadır. Bakterilerin performans oluşumu için en iyi oksidasyon ivmesine ulaşılması elzemdir. Aralıklı besleme bakterilerin zengin karışım olarak değil de optimal karışım ile performansının artırılacağı çıkarımı yapılabilir. Deneysel verilere göre en yüksek besleme en iyi performansı veremeyeceği sonucunu düşündürmüştür. Besleme tipi çalışmasının da destekleyeceği üzere oksidasyonun olumsuz etkilenme durumu bulunmaktadır. Bu durumdan yola çıkarak besleme oranları içinde hücreye en iyi performansı verebilecek olan optimal besleme miktarı hücre performansını artırmada iyi bir etken olabileceği tespit edilmiştir. Diğer bir oksidasyon parametresi ise besin türüdür. Hücrede besin türlerine göre en iyi performans maya özlü pazar atığı ile elde edilmiştir. İkinci en iyi performans ise bitkisel gliserin tabanlı pazar atığı özüdür. En iyi performansın maya ile hazırlanan ekstrakta olması durumu maya bakterilerinin oksidasyona yardımcı olmasıyla alakalı olabileceği görülmüştür. Bu durum dışında bitkisel gliserin tabanlı pazar atığı özü şekerli su konfigürasyonundan daha iyi performans gösterdiği açıkça söylenebilir. Pazar atıklarının yüksek organik madde potansiyeli barındırması ve bakteriler için yüksek beslenme kaynağı olması performans açısından pozitif bir durum sergilemektedir.

MYH'lerde ortam koşulları olarak sıcaklık artışının performans parametresi üzerinde doğrudan ilişkili olduğu açıkça görülmektedir. Araştırma verileri sıcaklık yükselmesi, oksidasyonun artması ve bakterilerin yaşam faaliyetlerini daha iyi icra etmesi konusunda ikna edici emareler sunmaktadır. Ortam şartları olarak ışığın etkisi incelendiğinde ışığın dalga boyunun düşmesi durumunda hücre performansının pozitif etkilendiği görülmektedir. Bu durum kızıl ötesi mikrodalga gibi şartlar altında daha iyi performans gösterebileceğini düşündürmektedir. Fakat doğru bir yaklaşım içim deneysel olarak test edilmesi daha doğru olacağı kabul edilmektedir. Dalga boyunun artması performans açısından kötüye gittiğini göstermektedir. Daha yüksek dalga boyları insan sağlığı için zararlı olan morötesi, x ışınları ve gama ışınları gibi zararlı ışığa doğru evrilmesi ve bakterilerinde canlı oldukları için olumsuz etkilenecekleri düşüncesine varılabilir.

Fiziksel şartlar MYH performansı üzerinde önem arz etmektedir. Elektrotun yapısal ve geometrik konfigürasyonları çalışması elektrotun bakteriler ile temas yüzeyinin önemi hakkında fikir

vermektedir. Bu durum elektrot adedi çalışmasında görülmektedir ki elektrot adedinin artması hücre performansı ile doğru orantılı olmakla birlikte gözle görülür performans artışı oluşturmuştur. Elektrot konumu çalışmasında hücrenin en iyi performansının orta konumda, ikinci en iyi performansın membran önünde alındığı görülmektedir. Bu durum oksidasyon tepkimesinin katot hücresine yakın olan konumlarda daha yüksek olduğunu ortaya çıkarmıştır. Biyokatalizör oluşum ve biyofilm oluşum için en uygun konumun membrana yakın optimal nokta olduğu anlaşılmıştır. Yapay sinir ağları gelecek için insan hayatını kolaylaştıracak bir yazılım alanı olmayı sürdürmektedir. Çalışma kapsamında yapılan deneylerin sayısal verileri uygun formatta YSA eğitimi kullanımı durumunda regresyon oranının yüksek olduğu görülmektedir. Bu durum gelecek için yapılacak araştırma ve geliştirme aşamalarında öncülük edebilecek potansiyele sahip olduğunu göstermektedir. Fakat her ne kadar derin öğrenme temeline sahip olsa da yakıt hücreleri birçok dinamiğe göre çalışmaktadır. Bu duruma rağmen hata histogramında hata oranının yükselmesine göre hata adedi düştüğü görülmektedir. Bu durum yapay sinir ağının mikrobiyal yakıt hücrelerinde araştırma ve geliştirme çalışmalarında kullanılabileceğini göstermektedir.

ÖNERİLER

Mikrobiyal yakıt hücreleri küresel olarak yaşanan enerji krizleri ve çevre kirliliği sebebiyle temiz ve kolay enerji alanında dünyaya daha yaşanabilir alan bırakabilecek potansiyel gösterebilir. Yapılan bu tez çalışması mikrobiyal yakıt hücrelerin bazı parametreleri üzerinde fikir sahibi olmayı amaçlamıştır. Çalışmaların tamamlanması ile bu çalışma mikrobiyal yakıt hücrelerinin birçok alanında fikir vermektedir. Bu bilgiler ışığında aşağıdaki durumlar değerlendirmeye alınması araştırmacılara ışık tutabilir;

- ✓ Elektrotlar için optimal yapı ve geometri seçilmesi performans açısından pozitif etki edebileceği tespit edilmiştir.
- ✓ Gözenekli elektrot çalışmaları için uygun gözenek veya ppi (inç başına gözenek) değeri araştırmacılar için fikir verecektir.
- ✓ Oksidasyon performansının iyileştirilmesi için optimal besleme tipi ve optimal besleme oranının belirlenmesi hücre performansını iyileştirebileceği tespit edilmiştir.
- ✓ Hücre ön hazırlığında hazır bakteri yoğun maddelerin kullanılması veya bakterilerin önceden oluşturulması hücre performansını yükselteceği öngörülmüştür.
- ✓ Pazar atıkları gibi organik maddelerin uygun formlarda enerji olarak dönüşümü için mikrobiyal yakıt hücreleri düşünülebilir.
- ✓ Endüstriyel veya evsel atıklar için kullanılacak mikrobiyal yakıt hücrelerinin optimum sıcaklık ortamlarında çalıştırılması performans açısından pozitif etki gösterebileceği ortaya konulmuştur.
- ✓ Mikrobiyal yakıt hücrelerinin bu çalışma dışında kalan ışık dalga boyları ile deneysel olarak araştırılması en optimal dalga boyunun anlaşılması ve bilime ışık tutulması sağlanabilir.
- ✓ Hücreler için biyoaktivitenin yoğun olduğu bölgelerin elektrot konumu olarak değerlendirilmesi performans açısından iyileştirme sağlayabileceği tespit edilmiştir.
- ✓ Birçok dinamiğe sahip mikrobiyal yakıt hücrelerinin daha fazla parametresi değerlendirmeye katılarak YSA eğitimi yapılması durumunda araştırma ve geliştirme dünyasına farklı bir boyut kazandırılabilceği tespit edilmiştir.

KAYNAKLAR

- [1] W. Cai, C. Liu, K. hung Lai, L. Li, J. Cunha, and L. Hu, "Energy performance certification in mechanical manufacturing industry: A review and analysis," *Energy Convers Manag*, vol. 186, pp. 415–432, Apr. 2019, doi: 10.1016/J.ENCONMAN.2019.02.041.
- [2] N. Bilim, "Türkiye'nin elektrik enerjisi üretimindeki dışa bağımlılığın azaltılması için uygulanması gereken politikalar," *Selcuk University Journal of Engineering ,Science and Technology*, vol. 4, no. 2, pp. 145–145, Jun. 2016, doi: 10.15317/scitech.2016218526.
- [3] E. Katz and P. Bollella, "Fuel Cells and Biofuel Cells: From Past to Perspectives," *Isr J Chem*, vol. 61, no. 1–2, pp. 68–84, Jan. 2021, doi: 10.1002/IJCH.202000039.
- [4] R. Gross, M. Leach, and A. Bauen, "Progress in renewable energy," *Environ Int*, vol. 29, no. 1, pp. 105–122, 2003, doi: 10.1016/S0160-4120(02)00130-7.
- [5] G. C. Gil *et al.*, "Operational parameters affecting the performannce of a mediator-less microbial fuel cell," *Biosens Bioelectron*, vol. 18, no. 4, pp. 327–334, Apr. 2003, doi: 10.1016/S0956-5663(02)00110-0.
- [6] A. M. Speers and G. Reguera, "Electron donors supporting growth and electroactivity of geobacter sulfurreducens anode biofilms," *Appl Environ Microbiol*, vol. 78, no. 2, pp. 437–444, Jan. 2012, doi: 10.1128/AEM.06782-11.
- [7] M. Akram *et al.*, "10x10 ve 11x11 cm²'lik membranlı mikrobiyal yakıt hücresi tasarımı, imalatı ve performansının deneysel olarak incelenmesi," Nov. 2018, Accessed: Feb. 01, 2023. [Online]. Available: <https://acikbilim.yok.gov.tr/handle/20.500.12812/459022>
- [8] J. Wei, P. Liang, and X. Huang, "Recent progress in electrodes for microbial fuel cells," *Bioresour Technol*, vol. 102, no. 20, pp. 9335–9344, 2011.
- [9] J. M. Tront, J. D. Fortner, M. Plötze, J. B. Hughes, and A. M. Puzrin, "Microbial fuel cell biosensor for in situ assessment of microbial activity," *Biosens Bioelectron*, vol. 24, no. 4, pp. 586–590, 2008.
- [10] J. Chouler, Á. Cruz-Izquierdo, S. Rengaraj, J. L. Scott, and M. Di Lorenzo, "A screen-printed paper microbial fuel cell biosensor for detection of toxic compounds in water," *Biosens Bioelectron*, vol. 102, pp. 49–56, 2018.
- [11] A. Adekunle, V. Raghavan, and B. Tartakovsky, "On-line monitoring of heavy metals-related toxicity with a microbial fuel cell biosensor," *Biosens Bioelectron*, vol. 132, pp. 382–390, May 2019, doi: 10.1016/J.BIOS.2019.03.011.
- [12] L. Galvani, "De Viribus Electricitatis in Motu Musculari. Bologna, Italy: Typographia Instituti Scientiarum (RM Green, Trans.)," *Commentary on the Effect of Electricity on Muscular Motion*, pp. 66–67, 1791.
- [13] R. A. Bullen, T. C. Arnot, J. B. Lakeman, and F. C. Walsh, "Biofuel cells and their development," *Biosens Bioelectron*, vol. 21, no. 11, pp. 2015–2045, May 2006, doi: 10.1016/J.BIOS.2006.01.030.
- [14] B. Cohen, "The bacterial culture as an electrical half-cell," *J. Bacteriol*, vol. 21, no. 1, pp. 18–19, 1931.
- [15] K. Lewis, "Symposium on Bioelectrochemistry of Microorganisms, IV. Biochemical Fuel Cells," *Bacteriological reviews*, 1966, Accessed: Dec. 06, 2022. [Online]. Available: <https://journals.asm.org/journal/br>
- [16] "Electrical effects accompanying the decomposition of organic compounds," *Proceedings of the Royal Society of London. Series B, Containing Papers of a Biological Character*, vol. 84, no. 571, pp. 260–276, Sep. 1911, doi: 10.1098/RSPB.1911.0073.
- [17] R. M. Allen and H. P. Bennetto, "Microbial fuel-cells," *Appl Biochem Biotechnol*, vol. 39, no. 1, pp. 27–40, 1993.
- [18] B. H. Kim, D. H. Park, P. K. Shin, I. S. Chang, and H. J. Kim, "Mediator-less biofuel cell."

Google Patents, Nov. 02, 1999.

- [19] M. Rahimnejad, A. Adhami, S. Darvari, A. Zirepour, and S. E. Oh, "Microbial fuel cell as new technology for bioelectricity generation: A review," *Alexandria Engineering Journal*, vol. 54, no. 3, pp. 745–756, Sep. 2015, doi: 10.1016/J.AEJ.2015.03.031.
- [20] H. Rismani-Yazdi, S. M. Carver, A. D. Christy, and O. H. Tuovinen, "Cathodic limitations in microbial fuel cells: An overview," *J Power Sources*, vol. 180, pp. 683–694, 2008, doi: 10.1016/j.jpowsour.2008.02.074.
- [21] C. Xia, D. Zhang, W. Pedrycz, Y. Zhu, and Y. Guo, "Models for Microbial Fuel Cells: A critical review," *J Power Sources*, vol. 373, pp. 119–131, Jan. 2018, doi: 10.1016/J.JPOWSOUR.2017.11.001.
- [22] M. Esfandyari, M. A. Fanaei, R. Gheshlaghi, and M. Akhavan Mahdavi, "Mathematical modeling of two-chamber batch microbial fuel cell with pure culture of *Shewanella*," *Chemical Engineering Research and Design*, vol. 117, pp. 34–42, Jan. 2017, doi: 10.1016/J.CHERD.2016.09.016.
- [23] Y. Zeng, Y. F. Choo, B. H. Kim, and P. Wu, "Modelling and simulation of two-chamber microbial fuel cell," *J Power Sources*, vol. 195, no. 1, pp. 79–89, Jan. 2010, doi: 10.1016/J.JPOWSOUR.2009.06.101.
- [24] A. K. Marcus, C. I. Torres, and B. E. Rittmann, "Conduction-based modeling of the biofilm anode of a microbial fuel cell," *Biotechnol Bioeng*, vol. 98, no. 6, pp. 1171–1182, Dec. 2007, doi: 10.1002/BIT.21533.
- [25] T. Oyetunde, P. M. Sarma, F. Ahmad, and J. Rodríguez, "A Multiple Reaction Modelling Framework for Microbial Electrochemical Technologies," *International Journal of Molecular Sciences* 2017, Vol. 18, Page 86, vol. 18, no. 1, p. 86, Jan. 2017, doi: 10.3390/IJMS18010086.
- [26] M. Sindhuja, N. S. Kumar, V. Sudha, and S. Harinipriya, "Equivalent circuit modeling of microbial fuel cells using impedance spectroscopy," *J Energy Storage*, vol. 7, pp. 136–146, Aug. 2016, doi: 10.1016/J.EST.2016.06.005.
- [27] A. Garg, V. Vijayaraghavan, S. S. Mahapatra, K. Tai, and C. H. Wong, "Performance evaluation of microbial fuel cell by artificial intelligence methods," *Expert Syst Appl*, vol. 41, no. 4, pp. 1389–1399, Mar. 2014, doi: 10.1016/J.ESWA.2013.08.038.
- [28] "Schematic illustration of the double -chamber microbial fuel cell. | Download Scientific Diagram." Accessed: Dec. 15, 2022. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/figure/Schematic-illustration-of-the-double-chamber-microbial-fuel-cell_fig1_341523558
- [29] Y. Zeng, Y. F. Choo, B. H. Kim, and P. Wu, "Modelling and simulation of two-chamber microbial fuel cell," *J Power Sources*, vol. 195, no. 1, pp. 79–89, Jan. 2010, doi: 10.1016/J.JPOWSOUR.2009.06.101.
- [30] W. E. Thung *et al.*, "Sustainable green technology on wastewater treatment: The evaluation of enhanced single chambered up-flow membrane-less microbial fuel cell," *Journal of Environmental Sciences*, vol. 66, pp. 295–300, Apr. 2018, doi: 10.1016/J.JES.2017.05.010.
- [31] "Generalised structure of a single chamber microbial fuel cell,... | Download Scientific Diagram." Accessed: Dec. 15, 2022. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/figure/Generalised-structure-of-a-single-chamber-microbial-fuel-cell-displaying-a-cathode_fig2_329809415
- [32] Y. Zheng, L. Wang, Y. Zhu, X. Li, and Y. Ren, "A triple-chamber microbial fuel cell enabled to synchronously recover iron and sulfur elements from sulfide tailings," *J Hazard Mater*, vol. 401, p. 123307, Jan. 2021, doi: 10.1016/J.JHAZMAT.2020.123307.
- [33] N. Samsudeen, A. Sharma, T. K. Radhakrishnan, and M. Matheswaran, "Performance investigation of multi-chamber microbial fuel cell: An alternative approach for scale up system," *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, vol. 7, no. 4, Jul. 2015, doi: 10.1063/1.4923393/1013241.
- [34] Y. Li *et al.*, "Self-sustained reduction of multiple metals in a microbial fuel cell–microbial

- electrolysis cell hybrid system,” *Bioresour Technol*, vol. 192, pp. 238–246, Sep. 2015, doi: 10.1016/J.BIORTECH.2015.05.030.
- [35] A. Shahi, B. N. Rai, and R. S. Singh, “Biodegradation of Reactive Orange 16 Dye in Microbial Fuel Cell: An Innovative Way to Minimize Waste Along with Electricity Production,” *Appl Biochem Biotechnol*, vol. 192, no. 1, pp. 196–210, Sep. 2020, doi: 10.1007/S12010-020-03306-W/TABLES/2.
- [36] Y. Li *et al.*, “Self-sustained reduction of multiple metals in a microbial fuel cell–microbial electrolysis cell hybrid system,” *Bioresour Technol*, vol. 192, pp. 238–246, Sep. 2015, doi: 10.1016/J.BIORTECH.2015.05.030.
- [37] W. Yang, J. Li, D. Ye, L. Zhang, X. Zhu, and Q. Liao, “A hybrid microbial fuel cell stack based on single and double chamber microbial fuel cells for self-sustaining pH control,” *J Power Sources*, vol. 306, pp. 685–691, Feb. 2016, doi: 10.1016/J.JPOWSOUR.2015.12.073.
- [38] Y. Zhang, M. Liu, M. Zhou, H. Yang, L. Liang, and T. Gu, “Microbial fuel cell hybrid systems for wastewater treatment and bioenergy production: Synergistic effects, mechanisms and challenges,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 103, pp. 13–29, Apr. 2019, doi: 10.1016/J.RSER.2018.12.027.
- [39] H. Mehravanfar, M. A. Mahdavi, and R. Gheshlaghi, “Economic optimization of stacked microbial fuel cells to maximize power generation and treatment of wastewater with minimal operating costs,” *Int J Hydrogen Energy*, vol. 44, no. 36, pp. 20355–20367, Jul. 2019, doi: 10.1016/J.IJHYDENE.2019.06.010.
- [40] “Schematic design of stacked type microbial fuel cell. | Download Scientific Diagram.” Accessed: Dec. 15, 2022. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/figure/Schematic-design-of-stacked-type-microbial-fuel-cell_fig3_308333548
- [41] P. Parkhey and S. V. Mohan, “Biosensing Applications of Microbial Fuel Cell: Approach Toward Miniaturization,” *Biomass, Biofuels, Biochemicals: Microbial Electrochemical Technology: Sustainable Platform for Fuels, Chemicals and Remediation*, pp. 977–997, Jan. 2019, doi: 10.1016/B978-0-444-64052-9.00040-6.
- [42] B. R. Ringeisen *et al.*, “High Power Density from a Miniature Microbial Fuel Cell Using *Shewanella oneidensis* DSP10,” *Environ Sci Technol*, vol. 40, no. 8, pp. 2629–2634, May 2006, doi: 10.1021/ES052254W.
- [43] Y. P. Chen *et al.*, “An innovative miniature microbial fuel cell fabricated using photolithography,” *Biosens Bioelectron*, vol. 26, no. 6, pp. 2841–2846, Feb. 2011, doi: 10.1016/J.BIOS.2010.11.016.
- [44] I. A. Ieropoulos, J. Greenman, and C. Melhuish, “Miniature microbial fuel cells and stacks for urine utilisation,” *Int J Hydrogen Energy*, vol. 38, no. 1, pp. 492–496, Jan. 2013, doi: 10.1016/J.IJHYDENE.2012.09.062.
- [45] F. Qian and D. E. Morse, “Miniaturizing microbial fuel cells,” *Trends Biotechnol*, vol. 29, no. 2, pp. 62–69, Feb. 2011, doi: 10.1016/j.tibtech.2010.10.003.
- [46] M. Li, M. Zhou, C. Tan, and X. Tian, “Enhancement of CO₂ biofixation and bioenergy generation using a novel airlift type photosynthetic microbial fuel cell,” *Bioresour Technol*, vol. 272, pp. 501–509, Jan. 2019, doi: 10.1016/J.BIORTECH.2018.10.078.
- [47] O. A. Ogunseitan, “Biotechnology and industrial ecology: new challenges for a changing global environment,” *Afr J Biotechnol*, vol. 2, no. 12, pp. 596–601, 2003.
- [48] Y. Zhang *et al.*, “A graphene modified anode to improve the performance of microbial fuel cells,” *J Power Sources*, vol. 196, no. 13, pp. 5402–5407, 2011.
- [49] B. Logan, S. Cheng, V. Watson, and G. Estadt, “Graphite fiber brush anodes for increased power production in air-cathode microbial fuel cells,” *Environ Sci Technol*, vol. 41, no. 9, pp. 3341–3346, 2007.
- [50] F. Rezaei, T. L. Richard, R. A. Brennan, and B. E. Logan, “Substrate-enhanced microbial fuel cells for improved remote power generation from sediment-based systems,” *Environ Sci*

Technol, vol. 41, no. 11, pp. 4053–4058, 2007.

- [51] Y. Feng, Q. Yang, X. Wang, and B. E. Logan, “Treatment of carbon fiber brush anodes for improving power generation in air–cathode microbial fuel cells,” *J Power Sources*, vol. 195, no. 7, pp. 1841–1844, 2010.
- [52] X. Zhang, S. Cheng, X. Wang, X. Huang, and B. E. Logan, “Separator characteristics for increasing performance of microbial fuel cells,” *Environ Sci Technol*, vol. 43, no. 21, pp. 8456–8461, 2009.
- [53] F. Li, Y. Sharma, Y. Lei, B. Li, and Q. Zhou, “Microbial fuel cells: the effects of configurations, electrolyte solutions, and electrode materials on power generation,” *Appl Biochem Biotechnol*, vol. 160, no. 1, pp. 168–181, 2010.
- [54] H. Liu and B. E. Logan, “Electricity generation using an air-cathode single chamber microbial fuel cell in the presence and absence of a proton exchange membrane,” *Environ Sci Technol*, vol. 38, no. 14, pp. 4040–4046, 2004.
- [55] B. Min, S. Cheng, and B. E. Logan, “Electricity generation using membrane and salt bridge microbial fuel cells,” *Water Res*, vol. 39, no. 9, pp. 1675–1686, 2005.
- [56] Q. Deng, X. Li, J. Zuo, A. Ling, and B. E. Logan, “Power generation using an activated carbon fiber felt cathode in an upflow microbial fuel cell,” *J Power Sources*, vol. 195, no. 4, pp. 1130–1135, 2010.
- [57] L. de Schamphelaire, P. Boeckx, and W. Verstraete, “Evaluation of biocathodes in freshwater and brackish sediment microbial fuel cells,” *Appl Microbiol Biotechnol*, vol. 87, no. 5, pp. 1675–1687, 2010.
- [58] C. Li, L. Ding, H. Cui, L. Zhang, K. Xu, and H. Ren, “Application of conductive polymers in biocathode of microbial fuel cells and microbial community,” *Bioresour Technol*, vol. 116, pp. 459–465, 2012.
- [59] C. Li, L. Ding, H. Cui, L. Zhang, K. Xu, and H. Ren, “Application of conductive polymers in biocathode of microbial fuel cells and microbial community,” *Bioresour Technol*, vol. 116, pp. 459–465, 2012.
- [60] Z. He, S. D. Minteer, and L. T. Angenent, “Electricity generation from artificial wastewater using an upflow microbial fuel cell,” *Environ Sci Technol*, vol. 39, no. 14, pp. 5262–5267, 2005.
- [61] C. Choi and Y. Cui, “Recovery of silver from wastewater coupled with power generation using a microbial fuel cell,” *Bioresour Technol*, vol. 107, pp. 522–525, 2012.
- [62] H. J. Kim, H. S. Park, M. S. Hyun, I. S. Chang, M. Kim, and B. H. Kim, “A mediator-less microbial fuel cell using a metal reducing bacterium, *Shewanella putrefaciens*,” *Enzyme Microb Technol*, vol. 30, no. 2, pp. 145–152, 2002.
- [63] O. A. Ogunseitan, “Biotechnology and industrial ecology: new challenges for a changing global environment,” *Afr J Biotechnol*, vol. 2, no. 12, pp. 596–601, 2003.
- [64] J. C. Biffinger, R. Ray, B. Little, and B. R. Ringeisen, “Diversifying biological fuel cell designs by use of nanoporous filters,” *Environ Sci Technol*, vol. 41, no. 4, pp. 1444–1449, 2007.
- [65] O. Bretschger *et al.*, “Current production and metal oxide reduction by *Shewanella oneidensis* MR-1 wild type and mutants,” *Appl Environ Microbiol*, vol. 73, no. 21, pp. 7003–7012, 2007.
- [66] P. Aelterman, M. Versichele, M. Marzorati, N. Boon, and W. Verstraete, “Loading rate and external resistance control the electricity generation of microbial fuel cells with different three-dimensional anodes,” *Bioresour Technol*, vol. 99, no. 18, pp. 8895–8902, 2008.
- [67] A. Dewan, H. Beyenal, and Z. Lewandowski, “Scaling up microbial fuel cells,” *Environ Sci Technol*, vol. 42, no. 20, pp. 7643–7648, 2008.
- [68] C. Donovan, A. Dewan, D. Heo, and H. Beyenal, “Batteryless, wireless sensor powered by a sediment microbial fuel cell,” *Environ Sci Technol*, vol. 42, no. 22, pp. 8591–8596, 2008.

- [69] P. Clauwaert *et al.*, “Open air biocathode enables effective electricity generation with microbial fuel cells,” *Environ Sci Technol*, vol. 41, no. 21, pp. 7564–7569, 2007.
- [70] K. Rabaey, P. Clauwaert, P. Aelterman, and W. Verstraete, “Tubular microbial fuel cells for efficient electricity generation,” *Environ Sci Technol*, vol. 39, no. 20, pp. 8077–8082, 2005.
- [71] G. Gnana Kumar, V. G. S. Sarathi, and K. S. Nahm, “Recent advances and challenges in the anode architecture and their modifications for the applications of microbial fuel cells”, doi: 10.1016/j.bios.2012.12.048.
- [72] R. Goswami and V. K. Mishra, “A review of design, operational conditions and applications of microbial fuel cells,” *Biofuels*, vol. 9, no. 2, pp. 203–220, Mar. 2018, doi: 10.1080/17597269.2017.1302682.
- [73] G. S. Jadhav and M. M. Ghangrekar, “Performance of microbial fuel cell subjected to variation in pH, temperature, external load and substrate concentration,” *Bioresour Technol*, vol. 100, no. 2, pp. 717–723, 2009.
- [74] E. Martin, O. Savadogo, S. R. Guiot, and B. Tartakovsky, “The influence of operational conditions on the performance of a microbial fuel cell seeded with mesophilic anaerobic sludge,” *Biochem Eng J*, vol. 51, no. 3, pp. 132–139, 2010.
- [75] B. Min, Ó. B. Román, and I. Angelidaki, “Importance of temperature and anodic medium composition on microbial fuel cell (MFC) performance,” *Biotechnol Lett*, vol. 30, pp. 1213–1218, 2008.
- [76] A. L. Guerrero *et al.*, “Effect of Temperature on the Performance of Microbial Fuel Cells,” *Chem Eng Trans*, vol. 21, pp. 463–468, 2010.
- [77] L. Qiang, L. J. Yuan, and Q. Ding, “Influence of buffer solutions on the performance of microbial fuel cell electricity generation,” *Huan Jing Ke Xue*, vol. 32, no. 5, pp. 1524–1528, 2011.
- [78] A. G. del Campo, J. Lobato, P. Cañizares, M. A. Rodrigo, and F. J. F. Morales, “Short-term effects of temperature and COD in a microbial fuel cell,” *Appl Energy*, vol. 101, pp. 213–217, 2013.
- [79] S. Cheng, D. Xing, and B. E. Logan, “Electricity generation of single-chamber microbial fuel cells at low temperatures,” *Biosens Bioelectron*, vol. 26, no. 5, pp. 1913–1917, 2011.
- [80] I. S. Michie, J. R. Kim, R. M. Dinsdale, A. J. Guwy, and G. C. Premier, “Operational temperature regulates anodic biofilm growth and the development of electrogenic activity,” *Appl Microbiol Biotechnol*, vol. 92, pp. 419–430, 2011.
- [81] E. Martin, O. Savadogo, S. R. Guiot, and B. Tartakovsky, “The influence of operational conditions on the performance of a microbial fuel cell seeded with mesophilic anaerobic sludge,” *Biochem Eng J*, vol. 51, no. 3, pp. 132–139, 2010, doi: <https://doi.org/10.1016/j.bej.2010.06.006>.
- [82] X. Cao, X. Huang, N. Boon, P. Liang, and M. Fan, “Electricity generation by an enriched phototrophic consortium in a microbial fuel cell,” *Electrochem commun*, vol. 10, no. 9, pp. 1392–1395, Sep. 2008, doi: 10.1016/J.ELECOM.2008.07.008.
- [83] D. Xing, Y. Zuo, S. Cheng, J. M. Regan, and B. E. Logan, “Electricity generation by *Rhodospseudomonas palustris* DX-1,” *Environ Sci Technol*, vol. 42, no. 11, pp. 4146–4151, Jun. 2008, doi: 10.1021/ES800312V/SUPPL_FILE/ES800312V-FILE002.PDF.
- [84] S. Malik *et al.*, “A self-assembling self-repairing microbial photoelectrochemical solar cell,” *Energy Environ Sci*, vol. 2, no. 3, pp. 292–298, Mar. 2009, doi: 10.1039/B816417G.
- [85] Z. He, J. Kan, F. Mansfeld, L. T. Angenent, and K. H. Nealson, “Self-sustained phototrophic microbial fuel cells based on the synergistic cooperation between photosynthetic microorganisms and heterotrophic bacteria,” *Environ Sci Technol*, vol. 43, no. 5, pp. 1648–1654, Mar. 2009, doi: 10.1021/ES803084A/SUPPL_FILE/ES803084A_SI_001.PDF.
- [86] D. Xing, S. Cheng, J. M. Regan, and B. E. Logan, “Change in microbial communities in acetate-and glucose-fed microbial fuel cells in the presence of light,” *Biosens Bioelectron*,

vol. 25, no. 1, pp. 105–111, 2009.

- [87] A. Fraiwan, D. J. Hassett, and S. Choi, “Effects of light on the performance of electricity-producing bacteria in a miniaturized microbial fuel cell array,” *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, vol. 6, no. 6, 2014.
- [88] “Işık - Vikipedi.” Accessed: Dec. 31, 2023. [Online]. Available: <https://tr.wikipedia.org/wiki/I%C5%9F%C4%B1k>
- [89] I. Bardarov, M. Mitov, D. Ivanova, and Y. Hubenova, “Light-dependent processes on the cathode enhance the electrical outputs of sediment microbial fuel cells,” *Bioelectrochemistry*, vol. 122, pp. 1–10, Aug. 2018, doi: 10.1016/J.BIOELECTCHEM.2018.02.009.
- [90] S. H. Fadhil and Z. Z. Ismail, “Influence of Light Color on Power Generation and Microalgae Growth in Photosynthetic Microbial Fuel Cell with Chlorella Vulgaris Microalgae as Bio-Cathode,” *Curr Microbiol*, vol. 80, no. 5, p. 177, 2023.
- [91] T. H. Trinh, Y. Uemura, and N. T. T. Tran, “Effect of Light Duration and Wavelength on Electricity Generation of a Microbial Fuel Cell (MFC) Using Activated Sludge,” *Journal of the Japan Institute of Energy*, vol. 98, no. 10, pp. 242–245, 2019.
- [92] “Substrat - Vikipedi.” Accessed: Nov. 22, 2022. [Online]. Available: <https://tr.wikipedia.org/wiki/Substrat>
- [93] D. Pant, G. van Bogaert, L. Diels, and K. Vanbroekhoven, “A review of the substrates used in microbial fuel cells (MFCs) for sustainable energy production,” *Bioresour Technol*, vol. 101, pp. 1533–1543, 2009, doi: 10.1016/j.biortech.2009.10.017.
- [94] I. Ieropoulos, J. Winfield, and J. Greenman, “Effects of flow-rate, inoculum and time on the internal resistance of microbial fuel cells,” *Bioresour Technol*, vol. 101, no. 10, pp. 3520–3525, May 2010, doi: 10.1016/J.BIORTECH.2009.12.108.
- [95] M. Rahimnejad, A. Asghar Ghoreyshi, G. Najafpour, and T. Jafary, “Power generation from organic substrate in batch and continuous flow microbial fuel cell operations,” 2011, doi: 10.1016/j.apenergy.2011.04.017.
- [96] Y. Zhao, S. Collum, M. Phelan, T. Goodbody, L. Doherty, and Y. Hu, “Preliminary investigation of constructed wetland incorporating microbial fuel cell: Batch and continuous flow trials”, doi: 10.1016/j.cej.2013.06.023.
- [97] T. Catal, S. Xu, K. Li, H. Bermek, and H. Liu, “Electricity generation from polyalcohols in single-chamber microbial fuel cells,” *Biosens Bioelectron*, vol. 24, no. 4, pp. 849–854, 2008.
- [98] Y. Mohan, S. M. M. Kumar, and D. Das, “Electricity generation using microbial fuel cells,” *Int J Hydrogen Energy*, vol. 33, no. 1, pp. 423–426, 2008.
- [99] S. B. Velasquez-Orta, T. P. Curtis, and B. E. Logan, “Energy from algae using microbial fuel cells,” *Biotechnol Bioeng*, vol. 103, no. 6, pp. 1068–1076, 2009.
- [100] J. Greenman, A. Gálvez, L. Giusti, and I. Ieropoulos, “Electricity from landfill leachate using microbial fuel cells: comparison with a biological aerated filter,” *Enzyme Microb Technol*, vol. 44, no. 2, pp. 112–119, 2009.
- [101] A. K. Manohar and F. Mansfeld, “The internal resistance of a microbial fuel cell and its dependence on cell design and operating conditions,” *Electrochim Acta*, vol. 54, no. 6, pp. 1664–1670, 2009.
- [102] T. Catal, K. Li, H. Bermek, and H. Liu, “Electricity production from twelve monosaccharides using microbial fuel cells,” *J Power Sources*, vol. 175, no. 1, pp. 196–200, 2008.
- [103] Y. Luo, G. Liu, R. Zhang, and C. Zhang, “Power generation from furfural using the microbial fuel cell,” *J Power Sources*, vol. 195, no. 1, pp. 190–194, 2010.
- [104] K. Scott and C. Murano, “A study of a microbial fuel cell battery using manure sludge waste,” *Journal of Chemical Technology & Biotechnology: International Research in Process, Environmental & Clean Technology*, vol. 82, no. 9, pp. 809–817, 2007.
- [105] J. R. Kim, S. H. Jung, J. M. Regan, and B. E. Logan, “Electricity generation and microbial

- community analysis of alcohol powered microbial fuel cells,” *Bioresour Technol*, vol. 98, no. 13, pp. 2568–2577, 2007.
- [106] H. Pham, N. Boon, M. Marzorati, and W. Verstraete, “Enhanced removal of 1, 2-dichloroethane by anodophilic microbial consortia,” *Water Res*, vol. 43, no. 11, pp. 2936–2946, 2009.
- [107] B. E. Logan, C. Murano, K. Scott, N. D. Gray, and I. M. Head, “Electricity generation from cysteine in a microbial fuel cell,” *Water Res*, vol. 39, no. 5, pp. 942–952, 2005.
- [108] Z. Ren, L. M. Steinberg, and J. M. Regan, “Electricity production and microbial biofilm characterization in cellulose-fed microbial fuel cells,” *Water Science and Technology*, vol. 58, no. 3, pp. 617–622, 2008.
- [109] F. Rezaei, D. Xing, R. Wagner, J. M. Regan, T. L. Richard, and B. E. Logan, “Simultaneous cellulose degradation and electricity production by *Enterobacter cloacae* in a microbial fuel cell,” *Appl Environ Microbiol*, vol. 75, no. 11, pp. 3673–3678, 2009.
- [110] Y. Zuo, P.-C. Maness, and B. E. Logan, “Electricity production from steam-exploded corn stover biomass,” *Energy & Fuels*, vol. 20, no. 4, pp. 1716–1721, 2006.
- [111] J. Sun, Y. Hu, Z. Bi, and Y. Cao, “Simultaneous decolorization of azo dye and bioelectricity generation using a microfiltration membrane air-cathode single-chamber microbial fuel cell,” *Bioresour Technol*, vol. 100, no. 13, pp. 3185–3192, 2009.
- [112] T. C. Pannell, R. Kannaiah Goud, D. J. Schell, and A. P. Borole, “Effect of fed-batch vs. continuous mode of operation on microbial fuel cell performance treating biorefinery wastewater,” *Biochem Eng J*, vol. 116, pp. 85–94, 2016, doi: 10.1016/j.bej.2016.04.029.
- [113] W. Sha and K. L. Edwards, “The use of artificial neural networks in materials science based research,” *Mater Des*, vol. 28, no. 6, pp. 1747–1752, 2007.
- [114] S. Lek and J. F. Guégan, “Artificial neural networks as a tool in ecological modelling, an introduction,” *Ecol Modell*, vol. 120, no. 2–3, pp. 65–73, Aug. 1999, doi: 10.1016/S0304-3800(99)00092-7.
- [115] T. G. Tekin and S. PATIR, “Amerikan doları kurunun yapay sinir ağları yöntemiyle tahminlenmesi: 2009–2021 DÖNEMİ,” *R&S-Research Studies Anatolia Journal*, vol. 6, no. 1, pp. 56–77, 2023.
- [116] D. DeKruger and B. R. Hunt, “Image processing and neural networks for recognition of cartographic area features,” *Pattern Recognit*, vol. 27, no. 4, pp. 461–483, 1994.
- [117] M. G. Rahim, C. C. Goodyear, W. B. Kleijn, J. Schroeter, and M. M. Sondhi, “On the use of neural networks in articulatory speech synthesis,” *J Acoust Soc Am*, vol. 93, no. 2, pp. 1109–1121, 1993.
- [118] B. Lerner, M. Levinstein, B. Rosenberg, H. Guterman, L. Dinstein, and Y. Romem, “Feature selection and chromosome classification using a multilayer perceptron neural network,” in *Proceedings of 1994 IEEE International Conference on Neural Networks (ICNN’94)*, IEEE, 1994, pp. 3540–3545.
- [119] J. Albiol, C. Campmajó, C. Casas, and M. Poch, “Biomass estimation in plant cell cultures: a neural network approach,” *Biotechnol Prog*, vol. 11, no. 1, pp. 88–92, 1995.
- [120] B. J. Wythoff, S. P. Levine, and S. A. Tomellini, “Spectral peak verification and recognition using a multilayered neural network,” *Anal Chem*, vol. 62, no. 24, pp. 2702–2709, 1990.
- [121] M. L. Koç, C. E. Balas, and A. Arslan, “Taş dolgu dalgakıranların yapay sinir ağları ile ön tasarımı,” *Teknik Dergi*, vol. 15, no. 74, 2004.
- [122] A. Makalesi, R. Article, M. Erhan Şahin, and A. Kelimeler Yapay Sinir Ağları Enerji Yönetimi Mikrodenetleyici Otomasyon, “Gaz Yakıtlı Kombi Sisteminin Yapay Sinir Ağı ile Yakıt Miktarı Tahmini Isparta Örneği,” *International Journal of Technological Sciences*, vol. 15, no. 1, pp. 11–18, May 2023, doi: 10.55974/UTBD.1164374.
- [123] Y. Feng and W. F. Harper, “Biosensing with microbial fuel cells and artificial neural networks: Laboratory and field investigations,” *J Environ Manage*, vol. 130, pp. 369–374,

Nov. 2013, doi: 10.1016/J.JENVMAN.2013.09.011.

- [124] A. M. Nasrabadi and M. Moghimi, "Energy analysis and optimization of a biosensor-based microfluidic microbial fuel cell using both genetic algorithm and neural network PSO," *Int J Hydrogen Energy*, vol. 47, no. 7, pp. 4854–4867, Jan. 2022, doi: 10.1016/J.IJHYDENE.2021.11.125.
- [125] S. Naik and J. S. Eswari, "Experimental and validation with neural network time series model of microbial fuel cell bio-sensor for phenol detection," *J Environ Manage*, vol. 290, p. 112594, Jul. 2021, doi: 10.1016/J.JENVMAN.2021.112594.
- [126] K. L. Lesnik and H. Liu, "Predicting Microbial Fuel Cell Biofilm Communities and Bioreactor Performance using Artificial Neural Networks," *Environ Sci Technol*, vol. 51, no. 18, pp. 10881–10892, Sep. 2017, doi: 10.1021/ACS.EST.7B01413/SUPPL_FILE/ES7B01413_SI_001.PDF.
- [127] Y. Feng, O. Kayode, and W. F. Harper, "Using microbial fuel cell output metrics and nonlinear modeling techniques for smart biosensing," *Science of The Total Environment*, vol. 449, pp. 223–228, Apr. 2013, doi: 10.1016/J.SCITOTENV.2013.01.004.
- [128] A. J. Jaeeel, A. I. Al-wared, and Z. Z. Ismail, "Prediction of sustainable electricity generation in microbial fuel cell by neural network: Effect of anode angle with respect to flow direction," *Journal of Electroanalytical Chemistry*, vol. 767, pp. 56–62, 2016, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jelechem.2016.02.015>.
- [129] C. E. Lim *et al.*, "Predicting microbial fuel cell biofilm communities and power generation from wastewaters with artificial neural network," *Int J Hydrogen Energy*, vol. 52, pp. 1052–1064, Jan. 2024, doi: 10.1016/J.IJHYDENE.2023.08.290.
- [130] B. E. Logan *et al.*, "Microbial fuel cells: Methodology and technology," *Environmental Science and Technology*, vol. 40, no. 17, pp. 5181–5192, Sep. 01, 2006, doi: 10.1021/es0605016.
- [131] B. E. Logan, "Essential data and techniques for conducting microbial fuel cell and other types of bioelectrochemical system experiments," *ChemSusChem*, vol. 5, no. 6, Wiley-VCH Verlag, pp. 988–994, 2012, doi: 10.1002/cssc.201100604.
- [132] "Nafion™ HP." Accessed: Jan. 02, 2024. [Online]. Available: <https://thesixtech.com/products/nafiction%E2%84%A2-hp>
- [133] "Elektriksel iletken - Vikipedi." Accessed: Dec. 13, 2023. [Online]. Available: https://tr.wikipedia.org/wiki/Elektriksel_iletken
- [134] M. T. Madigan, "Bacterial Habitats in Extreme Environments," *Journey to Diverse Microbial Worlds*, pp. 61–72, 2000, doi: 10.1007/978-94-011-4269-4_5.
- [135] "Solve fitting problem using two-layer feed-forward networks - MATLAB." Accessed: Dec. 28, 2023. [Online]. Available: https://www.mathworks.com/help/deeplearning/ref/neuralnetfitting-app.html?s_tid=srchtitle_site_search_1_nftool
- [136] P. Pushkar and A. K. Mungray, "Exploring the use of 3 dimensional low-cost sugar-urea carbon foam electrode in the benthic microbial fuel cell," *Renew Energy*, vol. 147, pp. 2032–2042, Mar. 2020, doi: 10.1016/J.RENENE.2019.09.142.
- [137] S. Cheng and J. Wu, "Air-cathode preparation with activated carbon as catalyst, PTFE as binder and nickel foam as current collector for microbial fuel cells," *Bioelectrochemistry*, vol. 92, pp. 22–26, Aug. 2013, doi: 10.1016/J.BIOELECHEMA.2013.03.001.
- [138] X. Zhu and B. E. Logan, "Copper anode corrosion affects power generation in microbial fuel cells," *Journal of Chemical Technology & Biotechnology*, vol. 89, no. 3, pp. 471–474, Mar. 2014, doi: 10.1002/JCTB.4156.
- [139] E. Taskan and H. Hasar, "Comprehensive Comparison of a New Tin-Coated Copper Mesh and a Graphite Plate Electrode as an Anode Material in Microbial Fuel Cell," *Appl Biochem Biotechnol*, vol. 175, no. 4, pp. 2300–2308, Feb. 2015, doi: 10.1007/S12010-014-1439-4/TABLES/2.

- [140] J. Haavisto *et al.*, “Effects of anode materials on electricity production from xylose and treatability of TMP wastewater in an up-flow microbial fuel cell,” 2019, doi: 10.1016/j.cej.2019.04.090.
- [141] B. Bian *et al.*, “Application of 3D printed porous copper anode in microbial fuel cells,” *Front Energy Res*, vol. 6, p. 50, 2018.
- [142] D. Hidalgo, A. Sacco, S. Hernández, and T. Tommasi, “Electrochemical and impedance characterization of Microbial Fuel Cells based on 2D and 3D anodic electrodes working with seawater microorganisms under continuous operation,” *Bioresour Technol*, vol. 195, pp. 139–146, Nov. 2015, doi: 10.1016/J.BIORTECH.2015.06.127.
- [143] R. Kanniah Goud and S. Venkata Mohan, “Pre-fermentation of waste as a strategy to enhance the performance of single chambered microbial fuel cell (MFC),” *Int J Hydrogen Energy*, vol. 36, no. 21, pp. 13753–13762, Oct. 2011, doi: 10.1016/J.IJHYDENE.2011.07.128.
- [144] D. Ki, P. Parameswaran, S. C. Popat, B. E. Rittmann, and C. I. Torres, “Effects of pre-fermentation and pulsed-electric-field treatment of primary sludge in microbial electrochemical cells,” *Bioresour Technol*, vol. 195, pp. 83–88, Nov. 2015, doi: 10.1016/J.BIORTECH.2015.06.128.
- [145] M. Mahmoud, P. Parameswaran, C. I. Torres, and B. E. Rittmann, “Fermentation pre-treatment of landfill leachate for enhanced electron recovery in a microbial electrolysis cell,” *Bioresour Technol*, vol. 151, pp. 151–158, Jan. 2014, doi: 10.1016/J.BIORTECH.2013.10.053.
- [146] S. Tinggi Ilmu Kesehatan Bakti Tunas Husada and W. Java, “Microbial fuel cell based biocatalyst from traditional market waste water for energy production,” *IOP Conf Ser Earth Environ Sci*, vol. 819, no. 1, p. 012016, Jul. 2021, doi: 10.1088/1755-1315/819/1/012016.
- [147] I. Ieropoulos, J. Winfield, and J. Greenman, “Effects of flow-rate, inoculum and time on the internal resistance of microbial fuel cells,” *Bioresour Technol*, vol. 101, no. 10, pp. 3520–3525, May 2010, doi: 10.1016/J.BIORTECH.2009.12.108.
- [148] V. B. Oliveira, M. Simões, L. F. Melo, and A. M. F. R. Pinto, “Overview on the developments of microbial fuel cells,” *Biochem Eng J*, vol. 73, pp. 53–64, Apr. 2013, doi: 10.1016/J.BEJ.2013.01.012.
- [149] L. Moreno, M. Nemati, and B. Predicala, “Biodegradation of phenol in batch and continuous flow microbial fuel cells with rod and granular graphite electrodes,” *Environ Technol*, vol. 39, no. 2, pp. 144–156, Jan. 2018, doi: 10.1080/09593330.2017.1296895.
- [150] S. G. A. Flimban, S. H. A. Hassan, M. M. Rahman, and S. E. Oh, “The effect of Nafion membrane fouling on the power generation of a microbial fuel cell,” *Int J Hydrogen Energy*, vol. 45, no. 25, pp. 13643–13651, May 2020, doi: 10.1016/j.ijhydene.2018.02.097.
- [151] M. Miskan, M. Ismail, M. Ghasemi, J. Md Jahim, D. Nordin, and M. H. Abu Bakar, “Characterization of membrane biofouling and its effect on the performance of microbial fuel cell,” *Int J Hydrogen Energy*, vol. 41, no. 1, pp. 543–552, Jan. 2016, doi: 10.1016/j.ijhydene.2015.09.037.
- [152] J. Xu, G. P. Sheng, H. W. Luo, W. W. Li, L. F. Wang, and H. Q. Yu, “Fouling of proton exchange membrane (PEM) deteriorates the performance of microbial fuel cell,” *Water Res*, vol. 46, no. 6, pp. 1817–1824, Apr. 2012, doi: 10.1016/j.watres.2011.12.060.
- [153] B. Min, Ó. B. Román, and I. Angelidaki, “Importance of temperature and anodic medium composition on microbial fuel cell (MFC) performance,” *Biotechnol Lett*, vol. 30, no. 7, pp. 1213–1218, Jul. 2008, doi: 10.1007/S10529-008-9687-4/TABLES/1.
- [154] L. H. Li, Y. M. Sun, Z. H. Yuan, X. Y. Kong, and Y. Li, “Effect of temperature change on power generation of microbial fuel cell,” *Environ Technol*, vol. 34, no. 13–14, pp. 1929–1934, Jul. 2013, doi: 10.1080/09593330.2013.828101.
- [155] M. Behera, S. S. R. Murthy, and M. M. Ghangrekar, “Effect of operating temperature on performance of microbial fuel cell,” *Water Science and Technology*, vol. 64, no. 4, pp. 917–922, Aug. 2011, doi: 10.2166/WST.2011.704.

- [156] J. C. W. Lan, K. Raman, C. M. Huang, and C. M. Chang, "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*, vol. 78, pp. 39–43, Sep. 2013, doi: 10.1016/J.BEJ.2013.02.007.
- [157] G. Rong, Q. Hu, G. Rong, and Q. Hu, "The Effect of Different Wavelength of Light for Microbial Fuel Cell with an Anode of *Rhodopseudomonas faecalis* (PSB-B)," *Open Access Library Journal*, vol. 4, no. 2, pp. 1–7, Feb. 2017, doi: 10.4236/OALIB.1103389.
- [158] F. S. Kuo, Y. H. Chien, and C. J. Chen, "Effects of light sources on growth and carotenoid content of photosynthetic bacteria *Rhodopseudomonas palustris*," *Bioresour Technol*, vol. 113, pp. 315–318, Jun. 2012, doi: 10.1016/J.BIORTECH.2012.01.087.
- [159] I. B. Rusyn, O. V Medvediev, and B. T. Valko, "Enhancement of bioelectric parameters of multi-electrode plant–microbial fuel cells by combining of serial and parallel connection," *International Journal of Environmental Science and Technology*, vol. 18, no. 6, pp. 1323–1334, 2021, doi: 10.1007/s13762-020-02934-3.
- [160] A. N. Ghadge and M. M. Ghangrekar, "Performance of low cost scalable air–cathode microbial fuel cell made from clayware separator using multiple electrodes," *Bioresour Technol*, vol. 182, pp. 373–377, Apr. 2015, doi: 10.1016/J.BIORTECH.2015.01.115.
- [161] K. Raman and J. C.-W. Lan, "Performance and kinetic study of photo microbial fuel cells (PMFCs) with different electrode distances," *Appl Energy*, vol. 100, pp. 100–105, 2012, doi: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.03.011>.
- [162] M. M. Ghangrekar and V. B. Shinde, "Performance of membrane-less microbial fuel cell treating wastewater and effect of electrode distance and area on electricity production," *Bioresour Technol*, vol. 98, no. 15, pp. 2879–2885, 2007, doi: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2006.09.050>.
- [163] A. J. Jael, A. I. Al-Wared, and Z. Z. Ismail, "Prediction of sustainable electricity generation in microbial fuel cell by neural network: Effect of anode angle with respect to flow direction," *Journal of Electroanalytical Chemistry*, vol. 767, pp. 56–62, Apr. 2016, doi: 10.1016/J.JELECHEM.2016.02.015.
- [164] C. E. Lim *et al.*, "Predicting microbial fuel cell biofilm communities and power generation from wastewaters with artificial neural network," *Int J Hydrogen Energy*, vol. 52, pp. 1052–1064, Jan. 2024, doi: 10.1016/J.IJHYDENE.2023.08.290.
- [165] E. T. Sayed, H. Rezk, M. A. Abdelkareem, and A. G. Olabi, "Artificial neural network based modelling and optimization of microalgae microbial fuel cell," *Int J Hydrogen Energy*, vol. 52, pp. 1015–1025, Jan. 2024, doi: 10.1016/J.IJHYDENE.2022.12.081.
- [166] A. Tardast *et al.*, "Use of artificial neural network for the prediction of bioelectricity production in a membrane less microbial fuel cell," *Fuel*, vol. 117, no. PART A, pp. 697–703, Jan. 2014, doi: 10.1016/J.FUEL.2013.09.047.
- [167] C. E. Lim *et al.*, "Predicting microbial fuel cell biofilm communities and power generation from wastewaters with artificial neural network," *Int J Hydrogen Energy*, vol. 52, pp. 1052–1064, 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.08.290>.
- [168] S. Malekmohammadi and S. A. Mirbagheri, "Optimization of an artificial neural network topology using response surface methodology for microbial fuel cell power prediction," *Biotechnol Prog*, vol. 38, no. 4, p. e3258, Jul. 2022, doi: 10.1002/BTPR.3258.

ÖZGEÇMİŞ

Yusuf DOĞAN

[illegible]

AKADEMİK FAALİYETLER

Bildiriler:

1. H. H. H. S. Yusuf Doğan, “Besin tipi ve besleme rejiminin mikrobiyal yakıt hücrelerinin güç yoğunluğu üzerindeki etkilerinin belirlenmesi,” in Tokyo Summit 8, 2024.
2. H. H. H. S. Yusuf Doğan, “Mikrobiyal yakıt hücrelerinde farklı elektrot yapılarının elektriksel performans üzerindeki etkilerinin araştırılması,” in Tokyo Summit 8, 2024.

Projeler:

1. Teknofest (862144):Mikrobiyal Yakıt Hücresi Uygulamalarında Piramit Elektrot ve Pazar Atığı Özü
2. FÜBAP (TEKF.23.02) : Elektrot Yapısının ve Ortam Koşullarının Bir Mikrobiyal Yakıt Hücresinin Elektriksel Performansı Üzerindeki Etkilerinin Deneysel ve YSA Yaklaşımı ile Belirlenmesi