
GAZİ ÜNİVERSİTESİ
Gazi
1926

İKİ ODACIKLI MİKROBİYAL YAKIT HÜCRESİNDE KENTSEL ATIK SU ARITIMI İÇİN YENİ ANOT GELİŞTİRİLMESİ

Şaziye Nehir İKİNCİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ
KİMYA MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MAYIS 20

ETİK BEYAN

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmasında;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmasında yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,

bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Şaziye Nehir İKİNCİ

25/05/2021

İKİ ODACIKLI MİKROBİYAL YAKIT HÜCRESİNDE KENTSEL ATIK SU ARITIMI İÇİN YENİ ANOT GELİŞTİRİLMESİ

(Yüksek Lisans Tezi)

Şaziye Nehir İKİNCİ

GAZİ ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Mayıs 2021

ÖZET

Mikrobiyal yakıt hücreleri (MYH), bakterilerin metabolik faaliyetlerini kullanarak elektrik üreten biyoreaktörlerdir. MYH'lerin atık su arıtımında kullanılması ise dünyada artan temiz enerji ihtiyacına yönelik umut vaat edici bir gelişmedir. Bu sebeple MYH ile atık su arıtımının verimliliğini arttırmaya yönelik birçok çalışma yapılmaktadır. Bu çalışmada Ankara Tatlar Atık Su Arıtma Tesisi'nden alınan kimyasal işlem görmemiş evsel atık su örnekleri, iki odacıklı, membranlı bir MYH'de kullanılmıştır. Anot bölmesinin içine yerleştirilen katot bölmesi ve reaktör tabanına paralel olacak şekilde konumlandırılan membran (Nafyon 115), yenilikçi bir tasarım olarak incelenmiştir. Karbon kumaş üzerine dikilmiş bakır elektrotlar anot ve katot olarak kullanılmış, karbon kumaşsız bakır elektrot kullanımı ile kıyaslanmıştır. Çalışma, (1) karbon kumaşa dikilmiş bakır elektrotların performans ölçümü, (2) aynı elektrotların, manyetik karıştırma uygulanarak, ardından (3) medyatör olarak metilen mavisi kullanılarak performansının değerlendirilmesi ve (4) son olarak bakırın karbon kumaşsız kullanımının performansının incelenmesi olmak üzere dört aşamada gerçekleştirilmiştir. Tüm aşamalarda katoda hava beslemesi yapılmıştır. Elde edilen en yüksek güç yoğunlukları sırasıyla 29,3, 37, 24,6, 23,5 mW/m^2 bulunmuştur. Karbon kumaşa dikimli ve dikimsiz bakır elektrotların KOİ giderimleri onuncu günün sonunda sırasıyla %83 ve %24,3 değerlerine ulaşırken, kolombik etkinlik değerleri %1,62 ve %1,85 olarak saptanmıştır.

Bilim Kodu	:	91203
Anahtar Kelimeler	:	Mikrobiyal Yakıt Hücresi, Kentsel Atık Su Arıtımı, Elektrot Tasarımı
Sayfa Adedi	:	84
Danışman	:	Prof. Dr. İrfan AR

DEVELOPMENT OF A NOVEL ANODE FOR URBAN WASTEWATER TREATMENT IN TWO CHAMBERS MICROBIAL FUEL CELL

(M. Sc. Thesis)

Şaziye Nehir İKİNCİ

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

May 2021

ABSTRACT

Microbial fuel cells are bioreactors that generate electricity by using the metabolic activities of bacteria. The use of MFC in wastewater treatment is a promising development for the increasing need for clean energy in the world. For this reason, many studies have been carried out to increase the efficiency wastewater treatment with MFC. In this study, untreated urban wastewater samples were used as fuel in a two-chamber microbial fuel cell. The cathode chamber placed inside the anode chamber and the membrane positioned parallel to the reactor bottom were examined as an innovative design. Copper wires sewn onto carbon fabric were used as anode and cathode then compared with unsewn copper electrodes. Study was carried out in four steps, namely, (1) measuring the efficiency of sewn electrodes separately, (2) with magnetic stirring, (3) then with methylene blue as a mediator, and finally, (4) by examining the performance of copper without sewing into carbon fabric. Air was supplied to the cathode at all steps. The highest power densities obtained were 29,3, 37, 24,6, 9,5 mW/m^2, respectively. COD removal of the sewn and unsewn electrodes reached 83% and 24,3% respectively at the end of the tenth day. Also, coulombic efficiency values were found as 1,62% and 1,85% respectively.

Science Code	:	91203
Key Words	:	Microbial Fuel Cell, Treatment of Urban Wastewater, Electrode Design
Page Number	:	84
Supervisor	:	Prof. Dr. İrfan AR

TEŞEKKÜR

Bu çalışmanın hazırlanmasındaki değerli katkıları ve yol göstericiliği ile zamanını ve desteğini esirgemeyen, saygıdeğer danışman hocam Prof. Dr. İrfan AR'a teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca çalışma boyunca yardımları ile önümü açan sayın Doç. Dr. Alpay ŞAHİN ve ASKİ Atık Su Arıtma Dairesi Başkanlığı personeli sayın Ahmet DİNÇ'e teşekkür ederim.

Son olarak, her zaman bir adım ötesine gidebileceğime inanan, annem Hale ÖZDEM'e, hangi yöne gidersem gideyim yanımda olacağını bildiğim babam, Fehmi Alper ÖZDEM'e ve her hayalimi gerçekliğimiz kabul ederek yaşanmasına destek olan eşim Safa İKİNCİ'ye teşekkürlerimi sunarım.

Bu tez çalışması, Gazi Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projesi, BAP 06/2018-2 kapsamında desteklenmiştir.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET iv

ABSTRACT v

TEŞEKKÜR vi

İÇİNDEKİLER vii

ÇİZELGELERİN LİSTESİ x

ŞEKİLLERİN LİSTESİ xii

RESİMLERİN LİSTESİ xiv

SİMGELER VE KISALTMALAR xv

1. GİRİŞ 1

2. MİKROBİYAL YAKIT HÜCRELERİ 3

2.1. Mikrobiyal Yakıt Hücreleri Hakkında Genel Bilgiler 3

2.2. Mikrobiyal Yakıt Hücresinin Bileşenleri ve Çalışma Prensibi 4

2.3. Mikrobiyal Yakıt Hücresinde Elektron İletim Mekanizmaları 5

2.3.1. Doğrudan elektron iletimi 6

2.3.2. Medyatörlü elektron iletimi 7

2.4. Mikrobiyal Yakıt Hücresi Sistemlerinin Farklı Kullanım Alanları 8

2.5. Mikrobiyal Yakıt Hücrelerinin Atık Su Arıtımında Kullanımı 8

2.6. Mikrobiyal Yakıt Hücresinde Performansı Etkileyen Faktörler 9

2.7. Mikrobiyal Yakıt Hücresinde Güç Üretimi 10

2.7.1. Voltaj üretimi 10

2.7.2. Güç üretimi 10

2.7.3. KOİ giderimi 11

2.7.4. Kolombik etkinlik 12

Sayfa

3. LİTERATÜR ÇALIŞMALARI 13
3.1. Reaktör Tasarımının MYH Performansı Üzerine Etkisi 13
3.1.1. Genel tasarımlar 13
3.1.2. Yenilikçi tasarımlar 15
3.2. Anot Tasarımının MYH Performansı Üzerine Etkisi 19
3.2.1. Anot materyalinin etkisi 19
3.2.2. Anot yüzey alanının etkisi 20
3.3. Substrat Çeşidinin MYH Performansı Üzerine Etkisi 21
3.4. Medyatör Kullanımının MYH Üzerine Etkisi 24
3.5. Karıştırmanın Performans Üzerine Etkisi 26
4. MATERYAL VE METOT 27
4.1. Mikrobiyal Yakıt Hücresi 27
4.2.Membranın Kullanıma Hazırlanması 27
4.3. Elektrotların Kullanıma Hazırlanması 28
4.4. Kullanılan Atık Suyun Özellikleri 29
4.5. Deney ve Yöntem 32
5. BULGULAR VE TARTIŞMA 37
5.1. MYH Tasarım Parametrelerinin Değerlendirilmesi 37
5.2. Karbon Kumaşa Dikili Bakır Elektrotların Değerlendirilmesi 38
5.3. Karbon Kumaşa Dikili Bakır Elektrotların Manyetik Karıştırma ile Değerlendirilmesi 44
5.4. Karbon Kumaşa Dikili Bakır Elektrotların Performansına Medyatör Etkisi 49
5.5. Bakır Elektrotların Karbon Kumaşsız Değerlendirilmesi 55
6. SONUÇ VE ÖNERİLER 67
KAYNAKLAR 69

Sayfa

EKLER..... 81

EK-1. Nafyon 115 empedans testi sonuçları..... 82

ÖZGEÇMİŞ .....
Hata! Yer işareti tanımlanmamış.

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge **Sayfa**

Çizelge 2.1. MYH'de substrat bileşenine göre anot tepkimeleri 5

Çizelge 2.2. MYH'de elektron alıcı bileşene göre katot tepkimeleri 5

Çizelge 4.1. Evsel atık su özellikleri..... 30

Çizelge 4.2. Ankara kentsel atık suyunun özellikleri 30

Çizelge 4.3. Organik madde bazında atık su karakterizasyonu 32

Çizelge 5.1. KKDB elektrotlar ile elde edilen akım, gerilim ve güç değerleri..... 39

Çizelge 5.2. Karbon kumaşa dikili bakır elektrotların manyetik karıştırma ile kullanılması ile elde edilen akım, gerilim ve güç değerleri..... 45

Çizelge 5.3. Karbon kumaşa dikili bakır elektrotların metilen mavisi ile kullanımı sonucu elde edilen akım, gerilim ve güç değerleri 50

Çizelge 5.4. Bakır elektrotlar ile elde edilen akım, gerilim ve güç değerleri 55

Çizelge 5.5. Çalışmadan elde edilen sonuçlar 64

Çizelge 5.6. Çeşitli literatür çalışmalarında kullanılan MYH yapısı ve elde edilen performans değerleri..... 65

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil **Sayfa**

Şekil 2.1. Mikrobiyal yakıt hücresinin temel bileşenleri 3

Şekil 2.2. Elektrojen bakterilerde hücre dışına elektron iletim mekanizmaları. (A) Medyatör kullanarak dolaylı iletim, (B) iletken hücre zarı ile doğrudan iletim, (C) nanoteller (pililer) ile doğrudan iletim..... 6

Şekil 3.1. Yığın mikrobiyal yakıt hücresi 17

Şekil 3.2. Mikrobiyal yakıt hücresinde kullanımı yaygın olan karbon esaslı malzemeler, (a) karbon kâğıt, (b) karbon kumaş, (c) karbon örme, (d) karbon elyaf, (e) grafit levha, (f) granül grafit, (g) retiküle edilmiş vitrifiye karbon ve (h) karbon fırça..... 20

Şekil 4.1. Ankara Atık Su Arıtma Tesisi'nin kirletici parametrelerinin olası değerleri . 31

Şekil 5.1. KKDB elektrotlar ile elde edilen gerilim değerleri 39

Şekil 5.2. KKDB elektrotlar ile elde edilen akım değerleri..... 40

Şekil 5.3. KKDB elektrotlar ile elde edilen güç değerleri 40

Şekil 5.4 KKDB elektrotlar ile elde edilen anot yüzey alanına bağlı güç yoğunluğu 41

Şekil 5.5 KKDB elektrotlar ile elde edilen anot hacmine bağlı güç yoğunluğu..... 41

Şekil 5.6. KKDB elektrotlar ile elde edilen anot yüzey alanına bağlı akım yoğunluğu . 42

Şekil 5.7. KKDB elektrotlar ile elde edilen anot hacmine bağlı güç yoğunluğu..... 42

Şekil 5.8. KKDB elektrotlar ile KOİ değerinin zamana bağlı değişimi 43

Şekil 5.9. KKDB elektrotlar ile zamana bağlı KOİ giderimi yüzdesi 43

Şekil 5.10. KKDB elektrotların manyetik karıştırma ile kullanılması sonucu elde edilen gerilim değerleri 45

Şekil 5.11. KKDB elektrotların manyetik karıştırma ile kullanılması sonucu elde edilen akım değerleri..... 46

Şekil 5.12. KKDB elektrotların manyetik karıştırma ile kullanılması sonucu elde edilen güç değerleri..... 46

Şekil 5.13. KKDB elektrotların manyetik karıştırma ile kullanılması sonucu elde edilen anot yüzey alanına bağlı güç yoğunluğu..... 47

Şekil **Sayfa**

Şekil 5.14. KKDB elektrotların manyetik karıştırma ile kullanılması sonucu elde edilen anot hacmine bağlı güç yoğunluğu 47

Şekil 5.15. KKDB elektrotların manyetik karıştırma ile kullanılması sonucu elde edilen anot yüzey alanına bağlı akım yoğunluğu 48

Şekil 5.16. KKDB elektrotların manyetik karıştırma ile kullanılması sonucu elde edilen anot hacmine bağlı akım yoğunluğu 48

Şekil 5.17. KKDB elektrotların 300 µM metilen mavisi ile kullanılması sonucu elde edilen gerilim değerleri 51

Şekil 5.18. KKDB elektrotların 300 µM metilen mavisi ile kullanılması sonucu elde edilen akım değerleri 51

Şekil 5.19. KKDB elektrotların 300 µM metilen mavisi ile kullanılması sonucu elde edilen güç değerleri 52

Şekil 5.20. KKDB elektrotların 300 µM metilen mavisi ile kullanılması sonucu elde edilen anot yüzey alanına bağlı güç yoğunluğu 52

Şekil 5.21. KKDB elektrotların 300 µM metilen mavisi ile kullanılması sonucu elde edilen anot hacmine bağlı güç yoğunluğu 53

Şekil 5.22. KKDB elektrotların 300 µM metilen mavisi ile kullanılması sonucu elde edilen anot yüzey alanına bağlı akım yoğunluğu 53

Şekil 5.23. KKDB elektrotların 300 µM metilen mavisi ile kullanılması sonucu elde edilen anot hacmine bağlı akım yoğunluğu 54

Şekil 5.24. Dikişsiz bakır elektrotların kullanılması sonucu elde edilen gerilim değerleri 56

Şekil 5.25. Dikişsiz bakır elektrotların kullanılması sonucu elde edilen akım değerleri 56

Şekil 5.26. Dikişsiz bakır elektrotların kullanılması sonucu elde edilen güç değerleri .. 57

Şekil 5.27. Dikişsiz bakır elektrotların kullanılması sonucu elde edilen anot yüzey alanına bağlı güç yoğunluğu 57

Şekil 5.28. Dikişsiz bakır elektrotların kullanılması sonucu elde edilen anot hacmine bağlı güç yoğunluğu 58

Şekil 5.29. Dikişsiz bakır elektrotların kullanılması sonucu elde edilen anot yüzey alanına bağlı akım yoğunluğu 58

Şekil **Sayfa**

Şekil 5.30. Dikişsiz bakır elektrotların kullanılması sonucu elde edilen anot hacmine bağlı akım yoğunluğu 59

Şekil 5.31. Dikişsiz bakır elektrotlar ile KOİ değerinin zamana bağlı değişimi 60

Şekil 5.32. Dikişsiz bakır elektrotlar ile zamana bağlı KOİ giderimi yüzdesi 60

Şekil 5.33. Çalışmanın dört farklı aşamasından elde edilen anot yüzey alanına bağlı güç yoğunlukları 61

Şekil 5.34. Çalışmanın dört farklı aşamasından elde edilen anot yüzey alanına bağlı akım yoğunlukları 61

Şekil 5.35. KKDB ve bakır elektrotların KOİ giderimi 62

Şekil 5.36. KKDB ve bakır elektrotların KOİ giderimi yüzdesi 62

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim **Sayfa**

Resim 3.1. Çeşitli mikrobiyal yakıt hücresi tasarımları, (A) tuz köprüsü kullanılan MYH, (B) Reaktif şişeleri ile yapılmış H-tipi MYH, (C) tipik iki odacıklı MYH 13

Resim 3.2. Membransız cam boncuk ve cam yünü ile ayrılmış iki bölmeli MYH 15

Resim 3.3. Düz plaka mikrobiyal yakıt hücresi 16

Resim 3.4. Biosolar mikrobiyal yakıt hücresi 16

Resim 3.5. P. australis kullanılarak oluşturulan wetland MYH (A) S1, S2, S3, S4 ve S5 her katmanda bulunan örnekleme portları olmak üzere reaktör diyagramı, (B) dört reaktörün fotoğrafı 18

Resim 3.6. Karbon kumaş üzerine Ti işlenmiş elektrot örneği 19

Resim 4.1. Tez çalışması için tasarlanan mikrobiyal yakıt hücresi 27

Resim 4.2. Nafyon 115 membranın empedans testinin gerçekleştirilmesi 28

Resim 4.3. (A) Karbon kumaşa dikilmiş bakır (KKDB) elektrotlar, (B) son aşamada kullanılan bakır elektrotlar, (C) KKDB anot elektrot 29

Resim 4.4. KKDB elektrotlar ile kurulan MYH sistemi 33

Resim 4.5. KKDB elektrotlarla atık su arıtımı, (A) birinci gün, (B) onuncu gün 33

Resim 4.6. KKDB elektrotların manyetik karıştırma ile performansının değerlendirilmesi, (A) deney düzeneği, (B) manyetik karıştırıcıların reaktör tabanındaki konumları 34

Resim 4.7. Metilen mavisi kullanılarak MYH performansının değerlendirilmesi, (A) MM eklendikten sonra sistem, (B) yedinci günün sonunda KKDB elektrotlar üzerinde gözlenen topaklanma 35

Resim 4.8. Bakır elektrotlar ile MYH performansının değerlendirilmesi, (A) birinci günde sistem, (B) on ikinci gün MYH yüzeyi 35

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	Açıklamalar
A	Amper
E_c	Kolombik etkinlik
F	Faraday sabiti
H^+	Hidrojen iyonu
I	Akım, Amper
L	Litre
M	Molarite
mA	Miliamper
mL	Mililitre
mM	Milimolar
mV	Milivolt
mW	Miliwatt
NH_4-N	Amonyum azotu
^oC	Celsius derece
P	Güç, [Watt]
pH	Hidrojen iyonu derişiminin logaritması
PO_4-P	Fosfat fosforu
R	Direnç, [Ohm]
rpm	Dakikadaki devir sayısı
t	Süre
V	Gerilim, Volt
W	Watt
µ	Mikro
µM	Mikromolar

Kısaltmalar	Açıklamalar
AKM	Askıda katı madde
BOİ	Biyolojik oksijen ihtiyacı
diğ.	Diğerleri
KKDB	Karbon kumaşa dikili bakır
KOİ	Kimyasal oksijen ihtiyacı
MM	Metilen mavisi
MYH	Mikrobiyal yakıt hücresi
TKN	Toplam Kjeldahl azotu
TOK	Toplam organik karbon
TP	Toplam fosfat

1. GİRİŞ

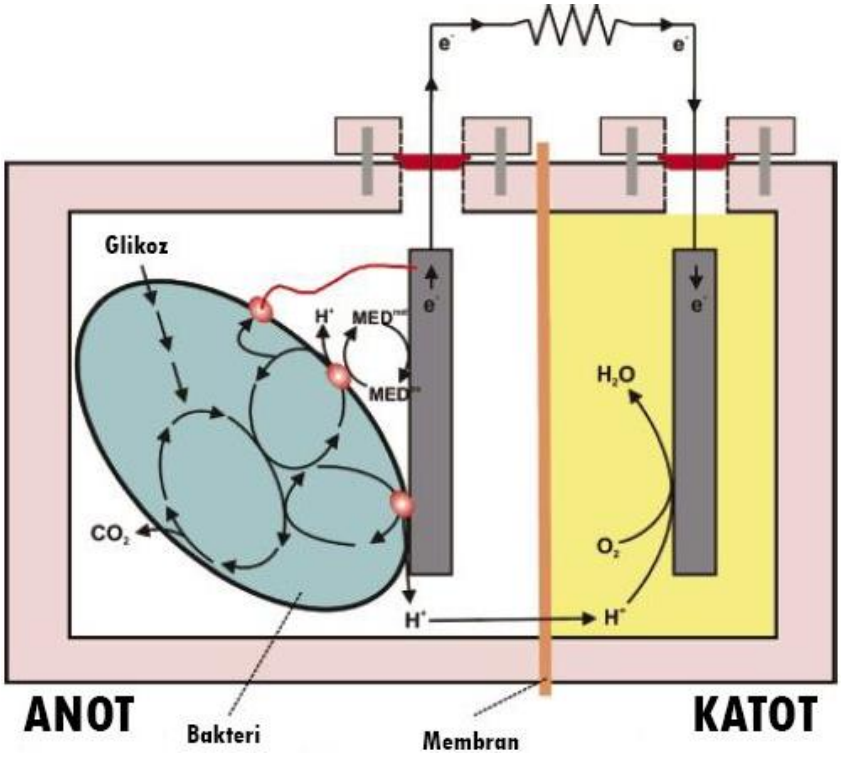
Hızla artan dünya nüfusu ve sanayinin gelişmesi ile artmakta olan enerji ihtiyacının karşılanması için, birçok ülke daha temiz enerji politikaları geliştirme sürecindedir. Buna rağmen rezervleri hızla azalmakta olan fosil yakıtlar hala dünyada en yüksek paya sahip enerji kaynağıdır ve bu durumunun yakın bir zamanda değişim göstermesi beklenmemektedir. Mevcut politikalar senaryosuna göre 2040 yılında, küresel elektrik talebinin %80 oranında artması beklenirken, yenilenebilir enerji kaynaklarının payının%16,1 olacağı düşünülmektedir [1]. Dünya ekonomik ve siyasi yaşamının önemli bir belirleyicisi olan enerji arz güvenliğini korumak açısından, enerjide bağımsız olma yolunda, Türkiye'nin de yenilenebilir enerji kaynaklarında gelişimi hayati öneme sahiptir.
Bunun yanında ülkemizde atık su arıtma tesislerinin işletilmesinde tüketilen enerji sarfiyatının çok yüksek oluşu bir diğer aşılması gereken problemdir. 2017 sonu itibarîyle ülkemizde 1029 atık su arıtma tesisi vardı. Bu tesislere 2023 yılına kadar 1422 tesis daha eklenmesi plânlanırken, yapılacak yeni tesislerin ilk yatırım maliyetlerinin toplamı yaklaşık 9 milyar TL olarak hesaplanmıştır [2]. Atık su arıtma tesislerinin yüksek ilk yatırım maliyetleri olmasının yanı sıra işletme maliyetleri de oldukça fazladır. Büyükşehir belediyelerinde tesislerin çalışma durumunun iyi olmasına rağmen, küçük şehir belediyeleri, yüksek işletme giderleri nedeniyle tesisleri çalıştıramamaktadır. Resmi rakamlara göre Türkiye genelindeki tesislerin yüzde 14'ünün çalıştırılmadığı bilgisinin sunulduğu anket çalışması, durumun çevre ve şehircilik açısından vahametini gözler önüne sermektedir [3].

Bu tez çalışmasında, alternatif enerji kaynağı olması açısından umut vaat eden, düşük yatırım ve işletme maliyetlerine sahip, atık su arıtımı alanında kullanıldığında, arıtımın yanında elektrik enerjisi sunabilen mikrobiyal yakıt hücresinin (MYH) verimliliği incelenmiştir. MYH'lerinin enerji kaynağı olarak kullanılabilmesinin önündeki en büyük engel olan düşük elektriksel güç çıkışının iyileştirilmesinin yanı sıra daha ucuz, daha etkin bir atık su arıtım sisteminin geliştirilmesi amaçlanmıştır. Bu doğrultuda, Ankara Su ve Kanalizasyon İdaresi'ne bağlı ASKİ Tatlar Atık Su Arıtma Tesisinden alınan kentsel atık su örnekleri, ilgili bölümde ayrıntıları verilen kesikli tip mikrobiyal yakıt hücresinde farklı işletme şartlarında işleme tabi tutulmuş, sonuçlar ayrıntılı olarak yorumlanmıştır.

2. MİKROBİYAL YAKIT HÜCRELERİ

2.1. Mikrobiyal Yakıt Hücreleri Hakkında Genel Bilgiler

Yakıt hücresi; uygun bir yakıt ve oksitleyicinin elektrokimyasal tepkimesi ile kimyasal enerjiyi doğrudan elektrik enerjisine dönüştüren üreteçler olarak tanımlanabilir [4]. Mikrobiyal yakıt hücresi (MYH) ise organik veya inorganik bileşiklerde bulunan kimyasal enerjiyi, elektrik akımına dönüştürmek için biyokatalizörler olarak mikroorganizmaları kullanan, biyoelektrokimyasal cihazlardır [5]. Şekil 2.1'de bir MYH'nin işleyişi ve temel bileşenleri görülmektedir.



Şekil 2.1. Mikrobiyal yakıt hücresinin temel bileşenleri [6]

Yakıt hücresinin bir çeşidi olarak, kimyasal sürece mikroorganizmaların dahil olması ile mikrobiyal yakıt hücresi adını alan bu sistemde, kirletici organik maddelerin bakteriler tarafından kullanılması sonucu oluşan elektronlar elektrik enerjisi sağlar. Yatık olarak atık su kullanıldığında içerdiği organik ve inorganik maddeler mikroorganizmaların elektron kaynağı olarak kullanılırken, atık su da arıtılmış olunur. Mikrobiyal yakıt hücresinin başlıca kullanımı atık su arıtımı olsa da farklı alanlarda kullanımı da gün geçtikçe yaygınlaşmaktadır.

Mikroorganizmaların kullanımı ile elektrik üretimini ilk kez M.C. Potter, 1911 yılında tasarlamış ve çalışmasında, memelilerin kalın bağırsaklarında çok yüksek miktarlarda bulunan, koli basili olarak bilinen ve patojen olan *Escherichia coli* bakteri türünü kullanmıştır [7]. İlerleyen yıllarda mikrobiyal yakıt hücrelerinde verimliliğin arttırılmasına yönelik birçok çalışma yapılmıştır. Fakat mikrobiyal yakıt hücrelerinin ticarileşebilmesi ve yaygın olarak kullanılması için, üretilen birim akım başına maliyetin düşürülmesi konusunda iyileştirmeler gerekmektedir. MYH'lerinde performansın arttırılması için, dünya genelinde birçok parametre üzerine çalışmalar devam etmektedir.

2.2. Mikrobiyal Yakıt Hücresinin Bileşenleri ve Çalışma Prensibi

Mikrobiyal yakıt hücreleri birçok farklı tasarıma sahiptir. Tasarımlar MYH'nin kullanım alanına, kullanılan yakıt çeşidine ve sürecin amacına göre farklılık gösterebilir. MYH'nin farklı kullanım alanları hakkında bilgiler bölüm 2.4'te verilmiştir.

Mikrobiyal yakıt hücresi temelde anot ve katot olmak üzere iki bölmeden oluşur (Şekil 2.1). Bu iki bölme birbirlerinden membran (seçici geçirgen zar) ile ayrılır. MYH'de, anot bölümünde anaerob bakteriler, atık su içerisinde bulunan çevre için kirletici organik bileşenleri metabolik tepkimelerinde kullanarak elektron ve proton (hidrojen iyonu) üretirler. Membran anot bölmesindeki protonlar için geçiş sağlarken, elektronların geçişine izin vermez. Üretilen elektronlar bakterinin türüne bağlı olarak çeşitli elektron iletim mekanizmaları ile anot elektrotuna iletilir (elektron iletim mekanizmaları için bakınız bölüm 2.3). Anodun anaerob olması bu iletim sırasında elektronun, elektrota ulaşamadan önce oksijen gibi yüksek bir indirgenle karşılaşmaması açısından elzemdir. Üretilen proton ise proton değiştirici zardan geçerek katot bölmesine ulaşır. Burada katot bölmesine beslenen elektron alıcısı ile birleşerek suya dönüştürülür. Katot bölmesine genellikle saf oksijen ya da maliyeti düşürmek amacıyla hava beslemesi yapılır. Katot bölmesinde, kuvvetli elektron alıcısı olan oksijenin varlığı ve anot bölmesinden gelen H+ iyonları pozitif yük oluşturur. Bölmeler arasında oluşan yük gradyanı sayesinde, anottaki elektronlar katot bölmesine doğru akar. Elektron akışı, yüksek elektron alıcısı ve ileticisi olan anot elektrodu sayesinde dış devreden gerçekleşir ve böylece hat üzerinde elektrik akımı oluşmuş olur.

2.3. Mikrobiyal Yakıt Hücresinde Elektron İletim Mekanizmaları

Mikroorganizmalar yaşamlarını sürdürebilmek ve çoğalabilmek için elektron transferi yaparlar. İhtiyaç duydukları elektronları, solunum ile elektronca zengin substrat kaynağından temin ederler. Çizelge 2.1'de MYH'de kullanılan bazı elektron verici substratların yükseltgenme tepkimeleri gösterilmiştir.

Çizelge 2.1. MYH'de substrat bileşenine göre anot tepkimeleri

	Elektron verici	Yükseltgenme Reaksiyonları
Anot	Asetat	$C_2H_3O_2^- + 4H_2O \rightarrow 2HCO_3^- + 9H^+ + 8e^-$
	Glukoz	$C_6H_{12}O_6 + 12H_2O \rightarrow 6HCO_3 + 30H^+ + 24e^-$
	Malat	$C_4H_5O_5 + 7H_2O \rightarrow 4H_2CO_3 + 11H^+ + 12e^-$
	Gliserol	$C_3H_8O_3 + 6H_2O \rightarrow 3HCO_3^- + 17H^+ + 14e^-$
	Sitrat	$C_6H_5O_7^{-3} + 11H_2O \rightarrow 6H_2CO_3 + 15H^+ + 18e^-$

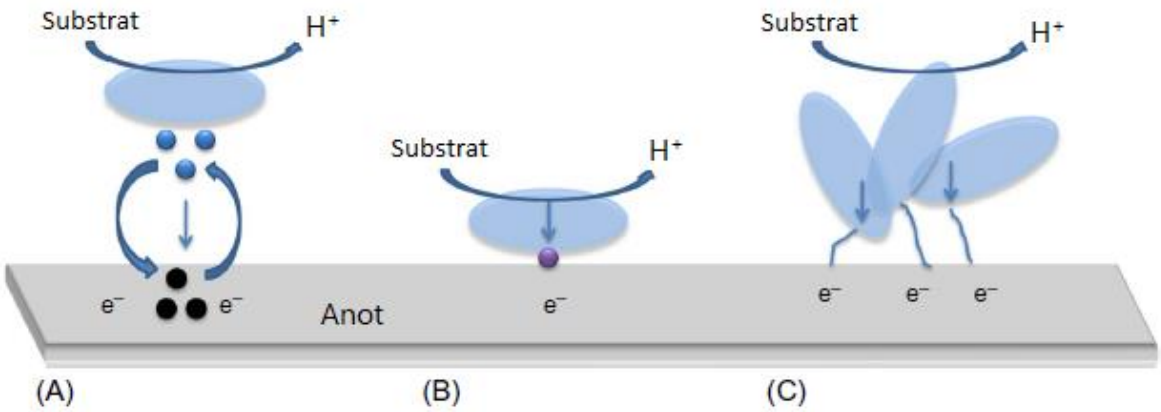
Çeşitli aşamalar sonucu, son elektron alıcının indirgendiği hücre zarına aktarılan bu elektronlar, doğrudan enerji temininde kullanılmaz. Bu elektronların membrandaki akışı membranın karşı tarafı ile proton gradyanı oluşturur. Bu gradyanın elektron alıcı ve vericiler arasında gerilim farkı oluşturması enerji üretimini sağlar. Bu solunum sürecinde mikroorganizmaların kullandığı başlıca elektron alıcıların arasında oksijen, nitrat, nitrit, permanganat ve demiri sayabiliriz. Çizelge 2.2'de bu elektron alıcıları ve daha fazlası için katotta gerçekleşen indirgenme tepkimeleri gösterilmiştir.

Çizelge 2.2. MYH'de elektron alıcı bileşene göre katot tepkimeleri

	Elektron alıcı	İndirgenme Reaksiyonları
Katot	Oksijen	$O_2 + 4e^- + 4H^+ \rightarrow 2H_2O$
	Nitrat	$2NO_3^- + 12H^+ + 10e^- \rightarrow N_2 + 6H_2O$
	Nitrit	$NO_2^- + 2e^- + 2H^+ \rightarrow N_2 + H_2O$
	Permanganant	$MnO_4^- + 4H^+ + 3e^- \rightarrow MnO_2 + 2H_2O$
	Mangan dioksit	$MnO_2 + H^+ + e^- \rightarrow MnOOH_{(S)}$
	Demir	$Fe^{+3} + e^- \rightarrow Fe^{+2}$
	Bakır (II)	$4Cu^{+2} + 8e^- \rightarrow 4Cu_{(s)}$
	Ferrisiyanür	$Fe(CN)_6^{-3} + e^- \rightarrow Fe(CN)_6^{-4}$

MYH'de elektron iletimi doğrudan elektron iletimi ve dolaylı elektron iletimi olmak üzere iki farklı mekanizma ile gerçekleşir. Bu ayrım mikroorganizmaların yapısal farklılıklarından

dolayı, sahip oldukları elektronları hücre zarından ne şekilde iletebildikleri ile ilgilidir. MYH'de anoda elektron transferinin bilinen mekanizmaları; elektron transferi sağlayan biyofilm ile doğrudan temas ya da bakteriler tarafından üretilen pililer (nanoteller) aracılığıyla ve elektron medyatörleri veya taşıyıcılarıyla şeklinde sıralanabilir. Sıralanan elektron transfer mekanizmalarının gösterimleri şekil 2.2'de verilmiştir.



Şekil 2.2. Elektrojen bakterilerde hücre dışına elektron iletim mekanizmaları. (A) Medyatör kullanarak dolaylı iletim, (B) iletken hücre zarı ile doğrudan iletim, (C) nanoteller (pililer) ile doğrudan iletim.

2.3.1. Doğrudan elektron iletimi

Doğrudan elektron transferinde, bakteriler MYH'de anot yüzeyinde biyofilm oluşturur. Bu biyofilm bir elektron alıcı olarak görev yapar ve bakterilerden aldığı elektronları doğrudan anoda iletir. Bunun haricinde bazı türler ise yüksek iletken nanoteller aracılığıyla hücre içinden hücre dışı alıcı anoda elektron transferini gerçekleştirebilir.

MYH'de anot yüzeyinde oluşturulmak istenen biyofilme birçok parametre etki eder. Bu parametreler sistem konfigürasyonu, çalışma koşulları ve biyolojik parametreler olarak üç kısma ayrılabilir.

Sistem konfigürasyonu; elektrot malzemesi, elektrot aralığı, membran tipi, elektrik devre materyalinin iletkenliği, çalışma hacmi gibi parametreleri kapsar. Bu etkenler hem biyofilm oluşumu için hem de buna bağlı olarak MYH'de son çıktı olan elektriksel güç için oldukça etkili olduğundan, araştırmaların çoğu MYH'de sistemin tasarımını geliştirmeye odaklıdır [9, 10].

Çalışma koşulları; pH, sıcaklık, substrat ve iyon derişimi vb. parametreleri kapsar. Bu parametreler hem bakterilere hem de MYH'de kullanılan materyal yüzeylerine etki eder [11].

Biyolojik parametreler; inokülümün kaynağı ve doğası, bakteriyel üreme hızı, mikroorganizma türü ve elektron iletim mekanizmaları gibi parametrelerini içerir.

Bugüne kadar incelenen elektoraktif biyofilmlerin çoğunda gram negatif bakterilerin baskın olduğu görülmüştür. Bunun nedeninin gram negatif ve pozitif bakteri hücre zarlarının bileşimindeki fark nedeniyle, elektrojen aktivitelerin, gram negatif bakterilerde daha fazla olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir [8].

Biyolojik parametreler arasındaki mikroorganizma türü MYH'de çok önemli bir role sahiptir. Günümüzde MYH'nin ticarileşmesi için en umut verici tür ekzoelektrojenler adı verilen, medyatör kullanımına ihtiyaç bırakmayan özel bir türdür. Ekzoelektrojenler elektrokimyasal olarak aktif bakterilerdir. Son elektron alıcısı olarak aerobik bakteriler oksijeni, anaerobik bakteriler diğer çözünür bileşikleri kullanır. Fakat ekzoelektrojenler son elektron alıcısı olarak güçlü bir yükseltgen madde ya da katı bir iletken kullanabilir. Bu da anoda elektron transferini sağlamada öncül bir avantajdır.

2.3.2. Medyatörlü elektron iletimi

Substrat oksidasyonunda rol alan birçok bakteri türü elektronlarını doğrudan hücre dışına iletmeye uygun değildir. Bu nedenler bakteri ile elektrot arasında elektron iletimini sağlaması amacıyla indirgenme ve yükseltgenme özelliğine sahip olan medyatör (aracı) bileşikler kullanılır. Medyatör bileşen hücre içine kolaylıkla girerek, elektron taşıma mekanizmalarında rol oynayan elektron taşıyıcılar tarafından indirgenir. Hücre içerisinde herhangi bir başka tepkimeye girmeden almış oldukları elektronu anot elektrota iletip yükseltgenir. Metilen mavisi, nötral kırmızı, tiyonin vb. medyatörler, mikroorganizmalar için zehirleyici etkileri olmaması nedeniyle sıklıkla kullanılan bileşikler arasındadır [12]. Bununla birlikte medyatörlerin kullanımı hem maliyet hem de çevre üzerine olumsuz etki yapmakta olduğu için önerilmemektedir.

2.4. Mikrobiyal Yakıt Hücresi Sistemlerinin Farklı Kullanım Alanları

Mikrobiyal yakıt hücrelerinin kullanıldığı başlıca alan atık su arıtımı olsa da birçok farklı alanda, farklı amaçlarda da kullanılabilir. Kullanılan yakıt çeşidine ve sürecin amacına göre sistemlerin tasarımları farklılık gösterir. Atık su arıtımı dışında mikrobiyal yakıt hücresinin kullanıldığı diğer alanlara örnekler aşağıda verilmiştir.

• Su altı izleme cihazlarında: Sisteme rutin olarak erişmenin zor olduğu nehir ve derin su ortamlarında, cihazlara güç vermek için sediment tipi MYH'leri kullanılır [16].

• Uzaktan kontrol sensörlerinde: Pillerin düzenli olarak değiştirilmesinin maliyetli, zaman alıcı ve pratik olmadığı bazı kimyasal sensör ve telemetri sistemlerinde güç kaynağı olarak kullanılır [15].

• BOİ sensörlerinde: MYH, kirletici analizini, süreç izleme ve kontrolünü, biyolojik oksijen ihtiyacını belirleyerek yapabilir [14].

• Biyoyakıt üretimi ve katma değerli kimyasalların sentezi: MYH modifikasyonu sonucu tasarlanmış mikrobiyal elektroliz hücrelerinde, temiz ve yenilenebilir elektro yakıtların ve kimyasalların üretimi üzerine çalışmalar mevcuttur [17]. Bu tip çalışmalarda hidrojen, metan üretimi ve karbondioksitin biyokatalitik indirgenmesi ile format, asetat ve biyoalkoller gibi değerli kimyasalların sentezi üzerine çalışılmaktadır [18, 81].

2.5. Mikrobiyal Yakıt Hücrelerinin Atık Su Arıtımında Kullanımı

Dünyada kullanılan 3 928 km^3/yıl tatlı suyun %70'i tarım alanında, %19'u sanayide ve %11'lik kısmı kentsel alanda tüketilmektedir [19]. Oluşan atık suların %80'lik bir kısmı alıcı ortamlara, uygun bir arıtma işleminden geçmeden boşaltılmaktadır. Yüksek gelişmişlik düzeyinde olan ülkelerde atık su arıtımı %70 iken, üst orta gelişmişlik düzeyinde %38, alt orta gelişmişlik düzeyinde %28 ve az gelişmiş ülkelerde ise %8 değerlerine sahiptir [20].
Türkiye'de ise su tüketimi 40,1 km^3/yıl olmakla birlikte, tüketimin %74'ü tarım, %15'i kentsel ve %11'i sanayi sektörüne aittir. TÜİK 2016 verilerine göre belediye şebekelerinden alıcı ortamlara deşarj edilen atık suyun %14,3 kadarı arıtım görmemiştir, bu miktar olarak 641,7 milyon m^3 suya eşittir.

Yine 2016 yılında yapılan hesaplamalara göre var 2023 yılına kadar yapılması plânlanan 1422 adet atık su arıtma tesisinin ilk yatırım maliyeti yaklaşık olarak 9 milyar TL'dir. Ülkemizde 2017 sonu itibarî ile mevcut olan 1029 arıtma tesisinin %14'ünün ise hiçbir şekilde çalıştırılmadığı bilgisi yapılan bir anket çalışmasında ortaya konmuştur [3]. Bu rakamın belediyesi tarafından bilgi gönderilmeyen ve yanlış beyan edilen tesislerin varlığı olabileceği düşünülerek, daha fazla olması beklenmektedir [21].

Atık su arıtma sistemlerinin geliştirilmesi enerji bağımsızlığı, ekonominin iyileştirilmesi, enerji ve su güvenliğinin artırılması, halk sağlığının ve çevrenin korunması gibi birçok alanda öneme sahiptir. Mikrobiyal yakıt hücrelerinin organik ve inorganik atıklardan temiz elektrik enerjisi üretirken, atık su arıtımını sağlaması, yenilenebilir enerji alanında umut vericidir [22]. MYH'ler mevcut tesislerin yüksek kurulum ve işletme giderine sahip olması sorununa, daha az alanda daha çevre dostu bir arıtım sağlayarak alternatif bir çözüm vaat etmektedir. Ayrıca mikrobiyal yakıt hücrelerindeki nispeten düşük biyokütle üretimi, geleneksel arıtım sistemlerinin en büyük sorunlarından biri olan aktif çamur atığı bertarafı açısından da cezbedicidir [6].

Mikrobiyal yakıt hücreleri evsel ve hayvansal atık suların yanı sıra gıda ve içki üretim süreçleri sonucu oluşan atık suları da arıtabilmektedir. Atık suyun bileşimi MYH performansında önemli bir rol oynadığı için, atık su içeriği elde edilen güç değerlerinde etkilidir. Atık su çeşitlerine göre performans kıyaslamasına bölüm 3.3'te daha detaylı yer verilmiştir.

2.6. Mikrobiyal Yakıt Hücresinde Performansı Etkileyen Faktörler

Mikrobiyal yakıt hücresinde elektrik üretimini, (i) mikroorganizmaların substrattan katabolik tepkimeler ile elektron elde etmesi, (ii) mikroorganizmanın elde ettiği elektronun anoda iletimi, (iii) anoda iletilen elektronun dış devreden katoda geçerken elektrik üretmesi, (iv) katotta elektron alıcısının indirgenmesi, (v) anotta oluşan protonların katoda iletimi, şeklinde evrelere ayırmak mümkündür. Mikrobiyal yakıt hücresinde performansın geliştirilmesi üzerinde yapılan çalışmalar, bu basamakların her birinin MHY verimine etki eden faktörleri üzerine yapılmaktadır. Bu faktörler sistem tasarımı, işletme koşulları ve biyolojik faktörler olarak gruplandırılabilir.

Tasarım faktörleri; reaktör tasarımı, elektrot tipi ve özellikleri, elektrotların aralığı, elektrot yüzey alanı ve hacme oranı, membran kullanımı, membran tipi, katot tipi olarak sıralanabilir.

İşletme koşulları; substrat türü ve derişimi, besleme hızı, karıştırma hızı, sıcaklık, pH, iletkenlik/iyonik kuvvet, dış direnç gibi parametreleri kapsar.

Biyolojik faktörler; aşı maddesinin kaynağı, kültürün çeşitliliği, saflığı, mikroorganizmaların hücresel yapısı gibi mikroorganizmaya dair parametreleri kapsar.

2.7. Mikrobiyal Yakıt Hücresinde Güç Üretimi

2.7.1. Voltaj üretimi

Mikrobiyal yakıt hücresi içerisindeki yük veya dış dirence karşı gelen direnç multimetre kullanılarak ölçülebilir.

$$V=IR \quad (1)$$

Burada,

V=Gerilim, Volt
I=Akım, Amper
R=Direnç, Ohm

2.7.2. Güç üretimi

Bir mikrobiyal yakıt hücresinde elde edilen güç ise aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$P=I.V \quad (2)$$

Burada,

P=Güç, Watt

Mikrobiyal yakıt hücreleri üzerine yapılan çalışmalarda güç yoğunluğu, anot yüzey alanı ve anot bölmesinin hacmi ile ilişkilendirilir.

Anot elektrot yüzey alanına bağlı güç yoğunluğu aşağıdaki gibi hesaplanır:

$P_{DA} = IV/A_A$ (3)

Burada,

P_{DA} = Elektrot alanına bağlı güç yoğunluğu (W/m^2)

A_A=Anot elektrot yüzey alanı (m^2)

Anot bölmesinin net hacmine bağlı güç yoğunluğu aşağıdaki gibi hesaplanır:

$P_{DV}=IV/\forall$ (4)

Burada,

P_{DV}= Anot net hacme bağlı güç yoğunluğu (W/m^3)

$\forall$ = Anot bölmesinin net hacmi (m^3)

2.7.3. KOİ giderimi

Mikrobiyal yakıt hücrelerinin kullanımının başlıca hedefi atık su arıtımı olduğu için, atık su arıtım verimliliğini ölçen kimyasal oksijen ihtiyacı (KOİ) parametresi, MYH için de önemli bir verimlilik ölçümüdür. Mikrobiyal yakıt hücresi hem çözünmüş hem de parçacıklı KOİ içerir. Bu nedenle ölçülen KOİ'nin ne kadarının hücrede mikroorganizmalar tarafından üretilen biyokütleden, ne kadarının hücreye yüklenen substrattan kaynaklandığını belirlemek zordur [6]. Literatür çalışmalarında genel olarak, atık su içerisindeki çökebilen parçacıkların çökelmesi ya da bertarafı sonucu, kalan atık su üzerinden, çözünmüş organik madde bazında değerler ölçülür.

2.7.4. Kolombik etkinlik

Kolombik etkinlik (E_c), anoda transfer edilen yükün, hücredeki mevcut substrattan kolomb cinsinden elde edilebilecek maksimum elektrik yüküne oranı olarak açıklanabilir.

Kesikli reaktörler için anoda transfer edilen teorik elektriksel yük (C_p) şu şekilde hesaplanır:

$$C_p=I.t \quad (5)$$

Burada,

I= t zamanında elde edilen akım
t= dengeli voltaj çıkışının olduğu zaman

Yakıtın endüstriyel ya da kentsel atık su olduğu durumlarda, içeriğin kesin olarak tanımlanamaması nedeni ile substratın her bir molü için transfer edilebilir elektron sayısı kesin olarak bilinemez. Bu durumda substratın tamamının elektron üretmek üzere parçalanması durumunda elde edilebilecek maksimum elektriksel yük:

$$C_{max}=F.f.S_{COD}.\cancel{V} \quad (6)$$

Denklemde, substrat derişimi (S_{COD}) KOİ olarak ifade edilerek, 8 g KOİ, bir mol elektron transferine eşdeğer alınır [23].

F=Faraday sabiti, (96 385 kolomb/ 1 elektron mol)
f=1 mol elektron/ 8 g KOİ faktörü
S_{COD}= Substrat derişimi, (g KOİ/L)

Kolombik etkinlik (E_c) bu durumda şu şekilde hesaplanır:

$$E_c=C_p/C_{max}.100\% \quad (7)$$

3. LİTERATÜR ÇALIŞMALARI

Bu bölümde yapılan çalışmaya ışık tutan ve çalışmanın sonuçlarının değerlendirilmesinde kullanabilecek literatür çalışmalarından bazılarına yer verilmiştir.

3.1. Reaktör Tasarımının MYH Performansı Üzerine Etkisi

Bir mikrobiyal yakıt hücresi tasarlarken en büyük zorluklardan birisi, performans açısından etkin bir tasarımı düşük maliyetli malzeme ve konfigürasyon belirleyerek oluşturmaktır. Bu amaçla hazırlanan reaktör tasarımlarını kolay inşa edilebilir genel tasarımlar ve yenilikçi tasarımlar olarak ikiye ayırarak inceleyebiliriz.

3.1.1. Genel tasarımlar

H-tipi MYH oluşturulması en kolay tasarımlardan biri olup birbirinden bir membran ya da tuz köprüsü ile ayrılmış iki bölmeden oluşur. Resim 3.1'de örnek H-tipi MYH'leri gösterilmiştir. Bu tip bir tasarımda yüksek iç direnç ve düşük yüzey alanı gibi dezavantajlara sahip olsa da deneysel gelişim için ilk aşamalarda tercih edilebilirdir [24].



Resim 3.1. Çeşitli mikrobiyal yakıt hücresi tasarımları, (A) tuz köprüsü kullanılan MYH, (B) Reaktif şişeleri ile yapılmış H-tipi MYH, (C) tipik iki odacıklı MYH [6].

J.R. Kim ve diğerleri (2007) yaptıkları bir çalışmada, nafyon membran kullanarak, yapı malzemesi cam olan H-tipi şişe reaktör MYH ve yapı malzemesi pleksiglas olan iki silindirik odalı MYH kullanmışlardır. Yapılan çalışmada elde ettikleri güç yoğunluğu sırası ile 38±1 mW/m^2 ve 514 mW/m^2'dir.

Hava katot MYH Liu ve Logan (2004) tarafından tasarlanmış, kübik reaktörün iki ucuna karşılıklı olarak konumlanmış elektrotların olduğu tek odalı bir tasarımdır. Yakıtla temas

halinde olan anot karbon kâğıttan oluşurken, hava ile temas halinde olan katot karbon kumaştan yapılmış, sayılabilir güç çıkışı elde etmek için farklı yüzdelerde platin katalizör ile desteklenmiştir. Bu tasarım membranlı ve membransız koşullarda denenmiştir. Yakıt olarak evsel atık suyun kullanıldığı membransız süreçte 146 mW/m^2 güç yoğunluğu elde edilmiştir.

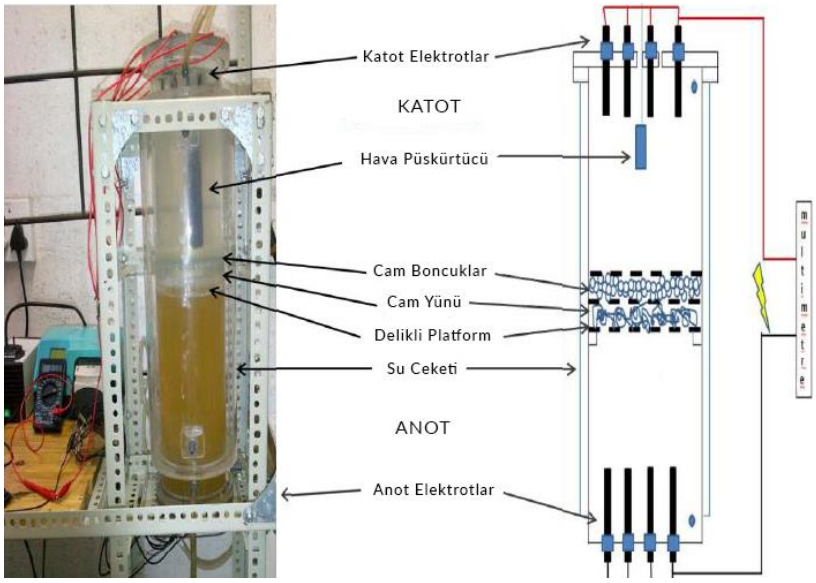
Hava katot MYH'leri basit tasarımları, düşük sermaye maliyeti ve ek havalandırma enerjisine ihtiyaç duymamaları ile avantajlı olsalar da membransız türlerinde katot üzerinde biyofilm oluşumu iç direnci artırarak performansı düşürmektedir [27]. Hava katot MYH'leri üzerindeki araştırmalar farklı tasarımlar ve katalizörlerle devam etmektedir.

Membransız tek odacıklı MYH'leri anot ve katodu tek bir odacık içerisinde olan ve membran ile ayrım yapılmayan bir tasarımdır. Her ne kadar membranın olmayışı iç dirençte azalmaya sebep olup maliyet açısından da avantaj sağlasa da anot bölümünde bulunan anaerobik mikroorganizmaların performansı, katot bölmesinde kullanılan yükseltgen maddenin anoda difüzyonundan dolayı zarar görebilir. Bu nedenle bu tip bir MYH'de elektrotlar arası mesafenin ve katoda yapılan hava beslemesi hızının optimizasyonu çok önemlidir. Bu noktada elektrotlar arası mesafe arttıkça iç direncin arttığı da unutulmamalıdır [12].

Membransız sistemlerde çözünmüş oksijenin anoda difüzyonunu engellemek amacıyla anot ve katot bölmesini birbirinden membran kullanmadan cam yünü, cam boncuk gibi malzemelerle ayırmaya yönelik çalışmalar yapılmaktadır.

Jang ve diğerleri (2004) yaptıkları bir çalışmada silindirik bir reaktörün üst kısmına katot, tabanına da anot elektrot yerleştirmiş, anodun hemen üzerine toplamda 10cm kalınlığında cam boncuk ve cam yünü yerleştirmişlerdir. Elektrotların ikisi de grafit keçeden yapılmıştır. MYH'de katot hava ile anot ise glikoz ve glutamat içeren yapay atık su ile sürekli beslenmiştir. Bu şartlar altında anot ile katot arasındaki toplam mesafe 10 ve 30 cm şeklinde ayarlanarak güç yoğunlukları kıyaslanmıştır. Mesafenin 10 cm olduğu durumda 30 cm olduğu duruma göre daha yüksek potansiyel sağlanmıştır. Elde edilen en yüksek güç yoğunluğu 1,3 mW/m^2 iken akım yoğunluğu 9 mA/m^2'dir. Çalışmada günlük 526,67 g/m^3 KOİ giderimine ulaşılmıştır. Yüksek direncin düşük akıma neden olduğu ve düşük iç dirence sahip koşullarda daha fazla KOİ giderimi sağlandığı sonucuna varılmıştır.

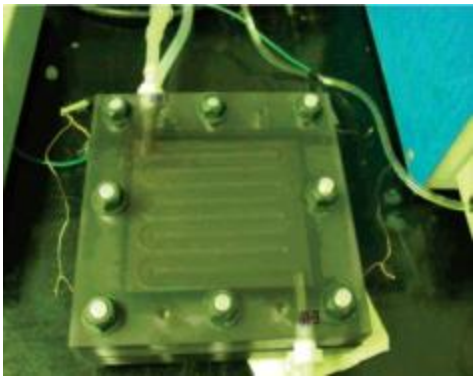
Mahlangu (2015) yaptığı çalışmada Jang ve diğerlerinin (2004) çalışmasına benzer yapıda bir reaktör kullanmıştır. Şekil 3.2'de gösterilmiş reaktörde yakıt olarak endo-sakkaroz besiyeri bazlı sentetik atık su ile membransız olarak çalışılmıştır. Hem anot hem katot materyali olarak grafit karbon çubuklar kullanılarak aralarındaki mesafe 60 cm olarak ayarlanmıştır. Çalışmada, kesikli besleme şartlarında 2000 sürekli besleme şartında ise 2904 mW/m^2 güç yoğunluğu elde edilmiştir.



Resim 3.2. Membransız cam boncuk ve cam yünü ile ayrılmış iki bölmeli MYH [31]

3.1.2. Yenilikçi tasarımlar

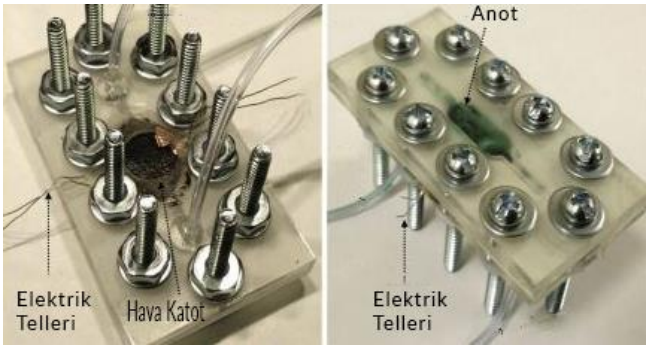
Düz Plaka MYH'leri, elektrotlar arası mesafenin azaltılarak, iç direncin azaltılmasını dolayısıyla güç yoğunluğunun artırılmasını hedeflemektedir. Membran elektrotların arasına konumlanır. Tasarım olarak serpantin yakıt hücrelerine benzerler. Bu tip MYH'lerinin dezavantajı, elektrotlar arası mesafenin azaltılması ile elektrojen bakterilerin gelişiminin sınırlanmasıdır. Resim 3.3'de örnek bir düz plaka MYH gösterilmiştir.



Resim 3.3. Düz plaka mikrobiyal yakıt hücresi [32]

Min ve Logan (2004) yapmış oldukları çalışmada, anotta gözenekli karbon kâğıdı, katotta platin katalizörü ile desteklenmiş karbon kumaş kullanmışlardır. Yakıt olarak evsel atık su kullanılan çalışmada, en yüksek güç yoğunluğu değeri 63 mW/m^2, 1,03 mA'lik akım sırasında kaydedilmiştir.

Bio-solar MYH bir türün, diğer türlerin ürünleri ile yaşaması olarak tanımlanabilecek sentrofik etkileşimin, mikrolitre ölçekli bir hücrede uygun mikroorganizmalarca gerçekleşmesine dayanır. Heterotrof ekzoelektrojenik ile fotototrof mikroorganizmalar arasında kurulan bu etkileşim ile yakıt hücresi kendi kendine yetebilmekte, dışarıdan yakıta ihtiyaç duymamaktadır. Resim 3.4'de örnek bir biosolar MYH gösterilmiştir.



Resim 3.4. Biosolar mikrobiyal yakıt hücresi [33]

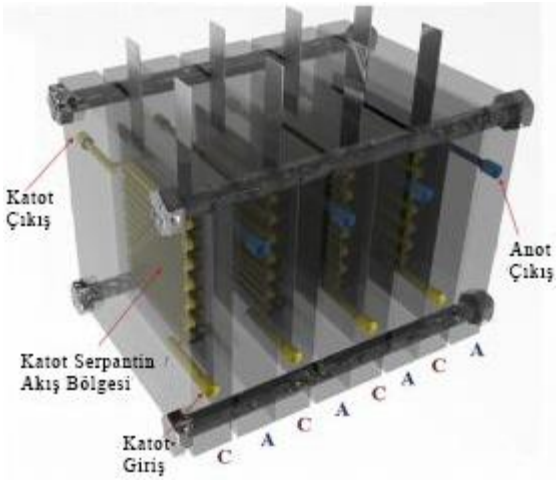
Silindirik Dolgulu Yatak MYH'leri sürekli besleme yapılmak amacı ile tasarlanmıştır. Yakıt hücresinin performansını arttırmak için özel anot ve katot tasarımları geliştirilmektedir. Çevresel nedenlerden dolayı kullanımı tercih edilmiyor olsa da gözenekli ve yüksek iletken materyaller ile ferrisiyanür kullanımı da performansa olumlu etkide bulunmuştur.

Subha ve diğ. (2019) yukarı akışlı silindirik bir mikrobiyal yakıt hücresinde, çikolata üretimi sonrası oluşan atık su ile sürekli besleme şeklinde çalışmıştır. Elde edilen en yüksek güç yoğunluğu 98 mW/m^2, KOİ giderimi ise 15 saatlik süreçte %70'tir.

Deng ve diğ. (2010) gerçekleştirdikleri çalışmada ise silindirik yukarı akışlı bir reaktörde sentetik atık su kullanarak, çeşitli katot yapılarını performans açısından kıyaslamıştır. Katalizör eklentisi yapılmamış aktif karbon fiber keçe ile (315 mW/m^2), karbon kâğıdı (67 mW/m^2), karbon keçe (77 mW/m^2) ve platin destekli karbon kağıdına (124 mW/m^2–0,2 mg Pt/cm^2) göre daha yüksek güç yoğunluğu elde etmiştir.

Yığın (stack) MYH'leri, geleneksel elektrik güç kaynaklarına kıyasla çok düşük güce sahip mikrobiyal yakıt hücrelerinde performansı artırmak adına hazırlanmış bir başka tasarımdır.

Zhang ve diğ. (2017) yapmış oldukları çalışmada yığın MYH'lerinde, hücre sayısı, bağlantı tipi, değişken yükler ve elektrolit akış hızı parametrelerinin performans üzerine etkisini incelemişlerdir. Çalışmada en yüksek güç 22,2 mW olarak seri bağlamada gözlemlenirken, bunu 19,8 mW ile paralel, 17,2 mW ile hibrit bağlantı takip etmiştir. Şekil 3.1'de yığın MYH gösterilmiştir.



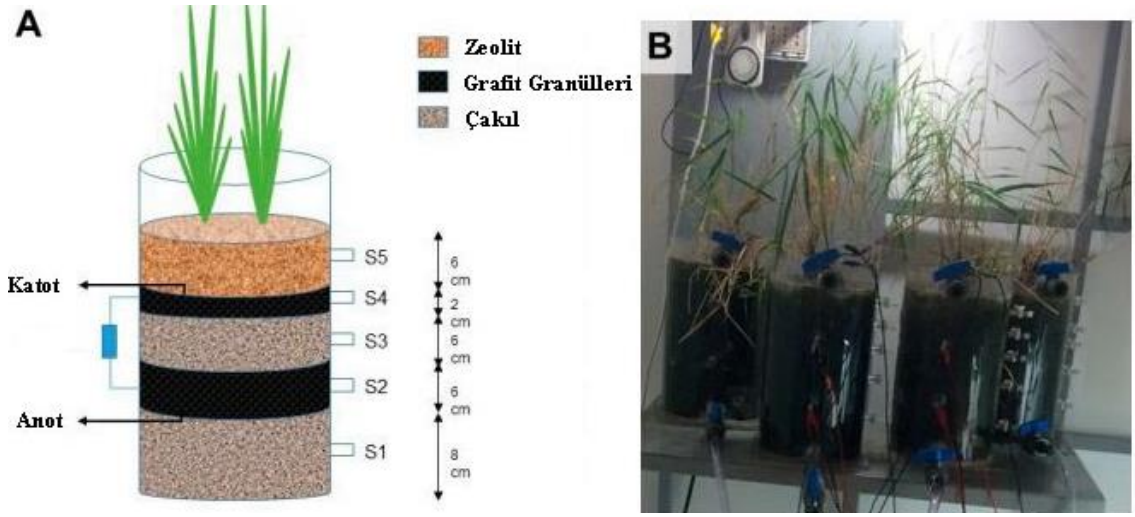
Şekil 3.1. Yığın mikrobiyal yakıt hücresi [36]

Estrada-Arriaga ve diğ. (2018) yapmış oldukları çalışmada 40 adet birbirinden bağımsız hava katot MYH kullanarak evsel atık su arıtımı gerçekleştirmiştir. Seri bağlı sistem şartlarında en yüksek 2500 mW/m^2 güç yoğunluğu ve 500 mA/m^2 akım yoğunluğu elde ederlerken gerilim değeri 4,9 V olmuştur. Paralel bağlı sistem şartlarında ise en yüksek

değerler 5,8 mW/m^2 ve 24 mA/m^2'dir. Yine en yüksek KOİ giderimi %84 ile seri bağlı sistemde gerçekleşmiştir.

Spiral sarımlı elektroda sahip MYH'leri, performans artışında başarıya ulaşmış yenilikçi tasarımların arasında sayılabilir. Mardanpour ve diğ. (2012) yapmış oldukları çalışmada dairesel tek odacıklı bir MYH kullanmışlardır. Grafit kaplamalı paslanmaz çelik ağ anodu ve 0,5 mg/cm^2 Pt yüklenmiş karbon kumaş katodu kullanılan çalışmada yakıt olarak süt endüstrisi atık suyu kullanılmıştır. 450 saat süren çalışma sonucunda elde edilen en yüksek güç yoğunluğu 20,2 W/m^3 iken KOİ giderimi değeri %91 olmuştur.

Wetland-MYH'leri doğal sulak alanlarda bulunan ekolojik sistemlere dayalı bir atık su arıtma sistemi olarak tanımlanabilen wetland sistemi ile MYH'lerinin birleştirilmiş halidir. Resim 3.5'de wetland MYH örneği görülmektedir. Bu sistemlerde farklı türde bitkilerin ve atık su kaynaklarının kullanımı ile verim arasındaki ilişki incelenmektedir. Araneda, Allende ve Varga (2018) yapmış oldukları çalışmada bir wetland – MYH kullanarak sentetik gri su arıtımını Phragmites australis (Kamış) bitki türünün ekimi ile gerçekleştirmiştir. Ulaşılan en yüksek güç yoğunluğu 719,57 ± 67,67 mW/m^3, KOİ giderimi ise %91,7 ± 5,1 olmuştur.



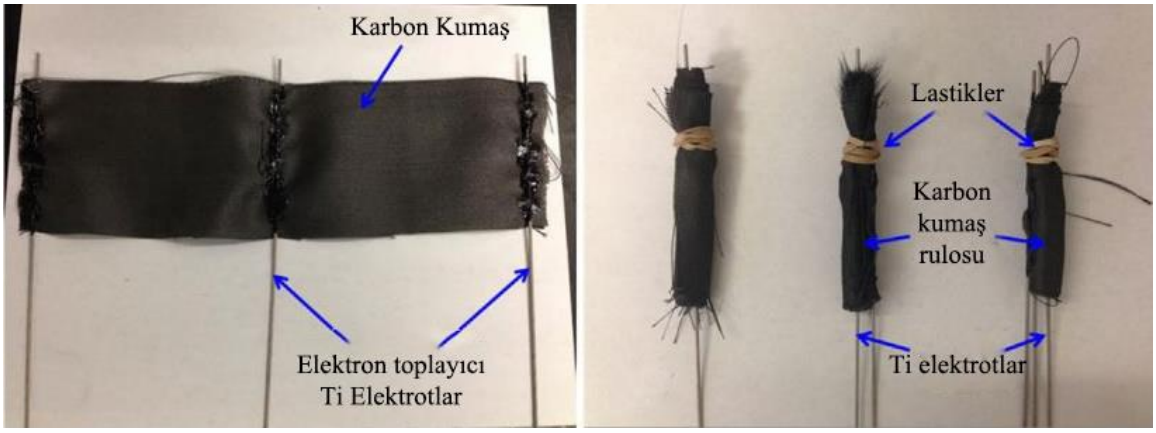
Resim 3.5. P. australis kullanılarak oluşturulan wetland MYH (A) S1, S2, S3, S4 ve S5 her katmanda bulunan örnekleme portları olmak üzere reaktör diyagramı, (B) dört reaktörün fotoğrafı [106]

3.2. Anot Tasarımının MYH Performansı Üzerine Etkisi

3.2.1. Anot materyalinin etkisi

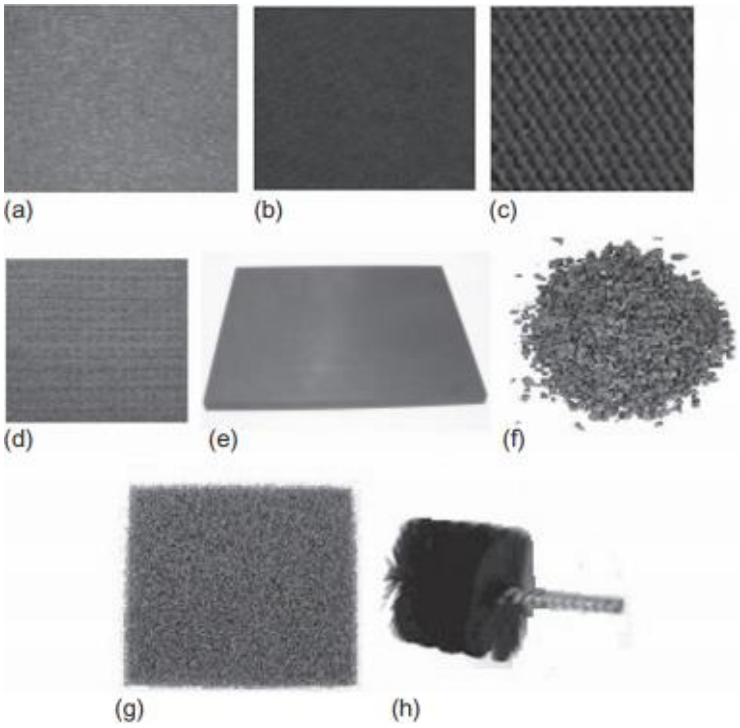
Mikrobiyal yakıt hücresinde anot elektrodun sahip olması gereken temel ve elzem birkaç özellik bulunmaktadır. İyi iletkenlik göstermesi, düşük iç dirence sahip olması, anolit içerisinde korozif özellik göstermemesi ve kimyasal kararlılığını koruması, yüksek yüzey alanına sahip olarak biyofilm oluşumunu desteklemesi ve bakteriler için zehirleyici olmaması, ideal bir anot elektrot için sayılabilecek başlıca gereksinimlerdir.

Karbon kumaş [32, 39], köpük [40] ve keçe [41, 42], hem iletken olmaları hem de bakteriyel tutunma için elverişli olmaları nedeniyle büyük ilgi görmektedir. Bu malzemelerin diğer materyallere göre görece ekonomik olmaları da bir diğer avantajlarıdır. Ayrıca grafite göre mukavemeti daha yüksek olduğu için fiziksel olarak farklılaştırılması daha kolaydır. Karbon kumaşın örülerek [44] ya da bu tez çalışmasında olduğu gibi, üzerine iletken metal dikilerek [45] kullanıldığı çalışmalar mevcuttur. Resim 3.6'da karbon kumaş üzerine Ti işlenmiş elektrotlar gösterilmiştir.



Resim 3.6. Karbon kumaş üzerine Ti işlenmiş elektrot örneği [45]

Karbon dışında yüksek yüzey alanı ve görece ekonomik oluşu ile tercih edilen bir diğer materyal grafittir. Grafitin, çubuk [48], levha [47], keçe [49] ve fırça [43] gibi birçok çeşidi mikrobiyal yakıt hücrelerinde kullanılmaktadır. Şekil 3.2'de MYH'de kullanımı yaygın olan karbon yapılı malzemelere örnekler gösterilmiştir.



Şekil 3.2. Mikrobiyal yakıt hücresinde kullanımı yaygın olan karbon esaslı malzemeler, (a) karbon kâğıt, (b) karbon kumaş, (c) karbon örme, (d) karbon elyaf, (e) grafit levha, (f) granül grafit, (g) retiküle edilmiş vitrifiye karbon ve (h) karbon fırça [46]

Bir başka kullanılan anot materyali ise metal elektrotlardır. İşletim maliyetlerini düşürmeyi vaat eden metal elektrotlar nispeten ucuz olsalar da karbon malzemelere kıyasla daha az kullanılmaktadırlar. Yapılan çalışmalarda genellikle metal olarak paslanmaz çelik [50] ve titanyum [51] kullanılmıştır. Sunduğu avantajlara rağmen, bakterilerin pürüzsüz metal yüzeye tutunmaları daha zor olduğu için, karbon malzemelere kıyasla yüksek güç yoğunlukları elde edilememiştir.

3.2.2. Anot yüzey alanının etkisi

Anot elektrot yüzey alanının artması ile sağlanan güç artışında, sınırlayıcı faktör olarak, anot yüzeyine elektron transferi göz önüne alınmalıdır. Ghangrekar ve Shinde (2006) yapmış oldukları çalışmada tek bir elektrot kullanımı yerine anotta iki elektrot kullanımı ile net güç (mW) üzerinde %28,6'lık bir artış gözlerken, iki elektrot kullanımı yerine üç elektrot kullanıldığında ise net güç %8,9 artmıştır. Bu da tek ve üçlü elektrot arasında net güçte %40'lık bir artış olduğunu ortaya koymuştur.

Logan ve diğerleri (2005) yılında yapmış oldukları çalışmada anot yüzey alanının güç üzerine etkisini incelemek amacı ile anotta elektrot olarak karbon kâğıt kullanmıştır. Aynı yapı ve boyutta olan elektronlar tek tek kullanıldığında 0,115 V ve 0,088 V gerilim sağlarken güç yoğunlukları sırasıyla 12 mW/m^2 ve 7,4 mW/m^2 olmuştur. İki elektrot birlikte kullanıldığında 13,4 mW/m^2 güç yoğunluğu elde edilmiştir. Bu da elektrot yüzey alanı iki katına çıktığında güç yoğunluğunun da iki katına çıkmadığını göstermektedir [28]. Sonuç olarak güç yoğunluğunun anot yüzey alanı dışında başka faktörlerce de sınırlandığı çıkarımı yapılabilir.

3.3. Substrat Çeşidinin MYH Performansı Üzerine Etkisi

Mikrobiyal yakıt hücrelerinde elektrik üretimi için yakıt olarak organik substratlar kullanılır. Bu substratlar basit veya karmaşık yapıda tanımlanmış içerikte olabildiği gibi atık su gibi karmaşık ve içeriği tam olarak tanımlanmamış da olabilir. Karmaşık organik substratlar farklı tür mikroorganizmaların büyümesinde olumlu etki yapsa da kültür farklı türden mikroorganizmalar içerdiğinde, substratın etkinliği, tek bir mikroorganizma türü üzerindeki etkisi gibi parametreleri incelemek zorlaşır. Bir diğer önemli husus, substrat derişimini optimize etmektir. Substrat derişimi büyümeyi engellememesi için ne çok az ne çok fazla olmalıdır.

MYH'de substrat ile üretim çıktılarının arasında bağlantı kurmaya izin vermesi açısından glikoz ve asetat en sık kullanılan basit substratlardandır [52]. Mateo ve diğ. (2018) yapmış oldukları çalışmada yakıt olarak asetat, laktat, glikoz ve oktanoat kullanarak MYH performansı üzerine etkilerini incelemiştir. Tüm durumlarda, KOİ giderimi oranı yaklaşık olarak 650 mg KOİ/L. gün olsa da asetat kullanımında daha yüksek elektrokimyasal değerler (20 A/m^2, 2 W/m^2, 0,376 V açık devre gerilimi) elde edilmiştir. Özpek (2012) ise yapmış olduğu yüksek lisans çalışmasında substrat beslemesi optimizasyonu yapmak amacı ile iki odacıklı MYH'de glikoz ve asetat kullanarak 5, 10, 25 ve 50 mM değerlerinde 12 saat aralıklarla kesikli besleme yapmıştır. Glikoz için en yüksek gerilim (0,78 mV), hacimsel akım yoğunluğu (253,53mA/m^3) ve hacimsel enerji yoğunluğu (12,13 mW/m^3), 10 mM besleme değerinde elde edilirken, en yüksek güç yoğunluğu (27,8 mW/m^2) 50 mM besleme değerinde elde edilmiştir. Asetat içinse en yüksek değerler (1,819 mV, 598, 364 mA/m^3, 67, 62 mW/m^3, 162, 3 mW/m^2) 50 mM besleme değerinde elde edilirken, 10 ve

25 mM'lık asetat beslemesi ile elde edilen hacimsel enerji yoğunlukları 5 mM'lık besleme değerinden daha düşüktür.

Karmaşık olarak tanımlanmış substratlar ise genelde mikroorganizmaların, doğal kaynaklardan elde edilen substratı okside edip edemeyeceğini araştırmak için kullanılır. Mikrobiyal yakıt hücresinde elektrik üretimi için nişasta [72], selüloz [73, 74], lignoselülozlar [75], bütirat [76], propiyonat [77], metanol [78], etanol [78, 79], gliserol [80] gibi karmaşık substratların etkileri araştırılmıştır [52].

Ebadinezhad ve diğ. (2019) yapmış oldukları çalışmada mikrobiyal yakıt hücresinde, farklı substratların ardışık kesikli besleme etkisini araştırmıştır. Güç yoğunluğu için ortalama değerler asetat, ethanol, laktoz, sukroz, nişasta, melas ve methanol için sırası ile 513, 376, 388, 349, 315, 328 ve 10 mW/m^2 değerinde bulunmuştur.

Herrero-Hernandez, Smith ve Akid (2013) yapmış oldukları çalışmada medyatörsüz mikrobiyal yakıt hücresinde, patates ekstratının sentetik atık suyu ile *Escherichia coli* aktif bakteriyel bileşenini kullanarak, 502 mW/m^2 güç yoğunluğu değeri elde etmiştir. KOİ gideriminin ise %61 oranında olduğu tespit edilmiştir.

Uno ve diğ. (2017) yapmış oldukları çalışmada, laktik asitten elektrik üretebilen fakat nişastayı kullanamayan *Shewanella oneidensis* türü ile nişastayı kullanarak laktik asit üretebilen *Streptococcus bovis* türünü, paralel fermantasyon ve iki aşamalı fermantasyon süreçleri ile sınamıştır. Sırası ile elde edilen en yüksek güç yoğunlukları 12,1 mW/m^2 ve 49,9 mW/m^2, en yüksek akım yoğunlukları ise 140-200 mA/m^2 ve 560 mA/m^2'dir.

Substrat olarak atık su kullanıldığında, mikroorganizmalar organik malzemeleri okside ederek, atık sudaki kirletici yükünü azaltıp suyu arıtırken, elektrik üretimi gerçekleştirir. Atık su bileşimi atık su türüne ve kaynağına göre farklılık göstermektedir fakat genel olarak içerik karmaşık hidrokarbonlardan oluşur. Bunun yanı sıra MYH performansını olumsuz etkileyebilecek tıbbi ilaç kalıntıları ya da böcek ilacı gibi sentetik organik bileşikler ve ağır metaller de bulunabilir.

Evsel ve kentsel atık su arıtma tesisleri [104, 105], bira [82, 83], süt [85, 86, 90] ve peynir [91, 92], gıda [87, 89] ve gıda işleme [88], ilaç [93, 94], tekstil [95, 98], kâğıt [96, 97], tarım

[99, 100,101] ve hayvancılık [84] ve petrokimya [102, 103] gibi farklı kaynaklardan gelen birçok atık su mikrobiyal yakıt hücrelerinde yakıt olarak kullanılabilmektedir.

Colombo ve diğ. (2017) yapmış oldukları çalışmada dört farklı atık su çeşidini mikrobiyal yakıt hücresi yakıtı olarak kullanarak kesikli süreçte, KOİ giderimi ve kolombik verim değerlerine göre karşılaştırmıştır. Karma mutfak artıkları, süt endüstrisinden peynir altı suyu, yağ geri kazanımı için ön işlem görmüş balıkçılık artıkları ve narenciye suyu üretiminden kalan posa atığı ile gerçekleştirilen çalışmada en yüksek KOİ giderimleri sırasıyla %84,37, %96,9, %89,2 ve %93,52 olmuştur. Kolombik verimlilik ise en yüksek %9,91 ile mutfak atıklarından, en düşük %0,76 ile peynir altı suyu kullanımından gözlenmiştir.

Liu ve diğ. (2012) ise yapmış oldukları çalışmada steroidal ilaç üretim atık sularını, tek odacıklı, membransız, hava katot MYH'de yakıt olarak kullanmıştır. KOİ gideriminin %82'ye ulaştığı çalışmada en yüksek güç yoğunluğu 22,3 W/m^3, kolombik etkinlik ise %30 olmuştur.

Nimje ve diğ. (2012) atık su çeşitlerinin kıyaslandığı bir başka çalışma gerçekleştirmiş, atık su çeşitleri ile farklı mikroorganizma kültürlerinin uyumunu incelemiştir. Tek odacıklı MYH'de yürütülen çalışmada, tarımsal, kentsel, kâğıt ve gıda/süt endüstrisi atık su çeşitleri, atık su endojen mikroorganizmaları (MYH1), Shewanella oneidensis MR-1 (MYH2) ve MR-1 içeren atık su endojen mikroorganizmaları (MYH3) ile çalışılmıştır. En yüksek güç yoğunluğu gıda/süt endüstrisi atık suyu ile (0,013, 0,013, 0,015 mW/cm2) sağlanmıştır. Diğer tüm kombinasyonlarda güç yoğunluğu 0,01 değerinin altında kalmıştır. Yine en yüksek akım değerlerine gıda/süt endüstrisi atık suyu ile (0,65, 0,66, 0,84 mA) ulaşılmıştır.

Ayrıca atık su arıtma tesisleri için çözümü araştırılan en büyük problemlerden biri olan çamur bertarafı için de mikrobiyal yakıt hücreleri alternatif çözüm olarak geliştirilmektedir. Arıtma çamurlarının tasfiyesi için kurulan ünitelerin yatırım bedeli, toplam sistem maliyetinin %30-40'ı, işletme maliyeti ise tüm işletme maliyetinin %50'si kadardır [53]. Atık su arıtma tesislerinde uygulanan arıtma tipine ve amacına göre, oluşan arıtma çamurlarının cinsleri farklılık gösterir. Atık sulardaki koloidal, çözülmüş ve çökelemeyen halde bulunan maddelerin, biyolojik artıma işlemleri sonucu, çökebilen biyolojik yumaklara dönüştürülmüş haline "aktif çamur" denir. Aktif (biyolojik) çamur, flok ağırlıklı,

kahverengi, iyi şartlarda oluştuğunda toprak kokusuna sahip bir yapıdadır [54]. Fakat ham atık su içerisindeki organik maddelerden farklı bir yapıda olan bu çamur kolayca bozunup, kokuşmaya meyillidir. Ayrıca çamurun sadece küçük bir kısmının katı maddeden oluşup kalanının sudan oluşması, büyük hacimler işgal etmesi problemini de beraberinde getirir.

Mikrobiyal yakıt hücresinde aktif çamurun yakıt olarak kullanımının geliştirilmesi bu problemleri çözmeye yönelik umut vaat etmektedir. Yapılan çalışmalarda aktif çamurun MYH'deki performansına etki edebilecek birçok varyasyon incelenmiştir. Ömeroğlu (2019) yapmış olduğu doktora çalışmasında, kentsel, kümes hayvanları, içecek, petrokimya ve tekstil tesisleri kaynaklı farklı sistem çamurlarını MYH'de yakıt olarak kullanarak performanslarını kıyaslamıştır. En yüksek güç yoğunluğu 360,91 mW/m^2 ile içecek çamurundan elde edilirken, bu değeri 20 dakika sonikasyon uygulanmış kentsel çamur (281 mW/m^2) takip etmiştir. Kümes hayvanları tesisinden alınan çamurdan 45,88 mW/m^2, tekstil çamurundan 31,44 mW/m^2, petrokimya çamurundan ise 21,17 mW/m^2 en yüksek güç yoğunluğu değerleri elde edilmiştir.

Yusoff ve diğ. (2013) yapmış oldukları çalışmada aktif çamura, farklı sürelerde ozonlama işlemi ve mikrodalga işlemi uygulanmıştır. İşlem görmemiş aktif çamurda en yüksek gerilim 105 mV ve en yüksek güç yoğunluğu 10 mW/m^2 olurken, mikrodalga ile ön işleme alınmış aktif çamurdan en yüksek 170 mV gerilim ve 42 mW/m^2 güç yoğunluğu elde edilmiştir. Çalışmada 2 saat ön ozonlama işlemi görmüş aktif çamur (154 mV, 21 mW/m^2), 4 saat ön ozonlama işlemi görmüş aktif çamura (125 mV, 10 mW/m^2) göre daha yüksek performans göstermiştir. Rashid ve diğ. (2013) ise yapmış oldukları çalışmada aktif çamura sonikasyon yöntemi ile ön işlem uygulanmasının olumlu etkileri olduğunu bildirmişlerdir.

3.4. Medyatör Kullanımının MYH Üzerine Etkisi

Mikroorganizmaların anot elektronuna elektronlarını iletim mekanizması, anot ve dolayısıyla MYH performansını etkileyen temel parametrelerden biridir. Heterotrof mikroorganizmalar, organik bileşikleri iki metabolik ana yol olan solunum ve fermantasyon ile okside ederek, Gibbs serbest enerjisi kazanırlar. Substratlardan kazanılan bu kimyasal enerji, mikroorganizma tarafından elektrik enerjisine dönüştürülür fakat Gibbs serbest enerjisinin önemli bir kısmını mikroorganizma kendi dayanıklılığı için kullanır. Elde edilen elektronlar ise hücre içinden dış yüzeyine, indirgenmiş bileşiklerin fiziksel transferi ile ya

da hücre zarına bağlı redoks enzimleri kullanarak elektron sıçraması (elektron hopping) ile olmak üzere iki yol ile iletilir. Membrandan elektrota elektron transferi ise çeşitli nedenlerle doğrudan yapılamadığında, aracı diyebileceğimiz medyatör olarak bilinen, redoks aktif maddelerce gerçekleştirilir. Medyatörler, hücre zarı dışındaki redoks aktif proteinler olabildiği gibi bakteri hücresini elektroda bağlayan indirgenmiş primer metabolitler de olabilir [60]. Bu medyatörler elektrojen mikroorganizmaların dış zarındaki, solunumda rol alan protein için oksidasyon ajanı olarak görev alıp, proteinden aldığı elektronları anot elektroda aktarır. Bu aktarım sırasında elektron alıp indirgenirken, aldığı elektronu elektroda ileterek yükseltgenir, başka bir deyişle mikroorganizma ile elektrot arasında mekik dokur. Potasyum ferrisiyanür [63, 64] ve metilen mavisi [65, 66, 68, 70, 71], nötral kırmızı [63, 66, 67, 71], tiyonin gibi çeşitli boyalar MYH'de sıklıkla kullanılan medyatörlerden bazılarıdır.

Medyatör çeşitlerinin performans üzerine etkilerinin araştırıldığı araştırmaların yanı sıra, medyatör derişiminin optimizasyonu üzerine de araştırmalar devam etmektedir. Rahimnejad ve diğ. (2011) yapmış oldukları çalışmada, karbon kaynağı olarak glikozu, medyatör olarak ise metilen mavisini kullanmışlardır. İki odacıklı MYH'de metilen mavisinin 50, 100, 200, 300 ve 400 μM derişimlerinde kullanılmasının performans üzerine etkisi incelenmiştir. En yüksek güç ve akım 300μM metilen mavisi derişiminde kaydedilmiştir.

Medyatörlerin MYH'de kullanımının performans üzerine etkilerini araştıran çalışmalar ortaya olumlu sonuçlar koyabilse de medyatörlerin pahalı ve toksik maddeler olabildiğinden sürekli kullanımının arzulanmadığını unutmamak gerekir [61].

Medyatör kullanımının getirdiği bir diğer etki ise kullanılan medyatörün çeşidine bağlı olarak anolit pH'ının değişmesidir. Anolitteki pH dengesinin korunması için medyatör kullanılan MYH'lerinde tampon çözelti kullanılabilmektedir. Fakat işletme maliyetinin artmaması ve kimyasal madde kullanımının arttırılmasının istenmemesi gibi nedenlerden, tampon çözeltisiz MYH üzerine çalışmalar da devam etmektedir [62].

3.5. Karıştırmanın Performans Üzerine Etkisi

Mikrobiyal yakıt hücrelerinde performansı artırmaya yönelik bir diğer girişim de reaktörde manyetik karıştırıcı ile karıştırma yapılmasıdır. Burada amaç, reaktör içerisinde homojen bir derişim dağılımı yakalamak [109] ve anolit içerisindeki difüzyon iç direncini azaltmaktır [110].

Raman ve Lan (2012) yapmış oldukları çalışmada, foto mikrobiyal yakıt hücresinde (FMYH) farklı elektrot mesafelerinde farklı manyetik karıştırma hızlarının performans üzerine etkisini incelemiştir. Sonuçlar göz önüne alındığında, anot bölmesindeki karıştırıcının karıştırma hızının, performansı etkilediği kuvvetle ortaya konmuştur. 380 ve 100 rpm karıştırma hızında elde edilen en yüksek güç yoğunlukları sırasıyla 1,82 ve 0,73 mW/m^2 bulunmuştur.

Wang ve Lim (2017) yapmış oldukları çalışmada ise, gıda sızıntı atık suyu ile hava katot mikrobiyal yakıt hücresinde çalışmışlardır. Kesikli süreç ile yapılan çalışmada anolitte manyetik karıştırma yapılmıştır. Elde edilen en yüksek güç yoğunluğu 1,86 W/m3 olmuştur.

4.MATERYAL VE METOT

4.1. Mikrobiyal Yakıt Hücresi

Çalışmada kullanılan MYH'nin tasarımı Prof. Dr. İrfan Ar'a aittir. Yapı malzemesi pleksiglastır (Önder Kimya, Ankara). Anot bölmesinin içine yerleştirilmiş katot bölmesi ile difüzyon iç direncinin azaltılması amaçlanmıştır. Anot bölmesinin toplam hacmi 25 litre, katot bölmesinin toplam hacmi ise 2 litredir. Katot bölmesinin tabanına yerleştirilen resim 4.1'de görülebilen delikli plaka, anolit içerisinde bulunabilecek katı partiküllerin membrana ulaşmasını kısmen engelleyebilmek ve karıştırma sırasında parçacıkların membrana olası bir zarar vermesini önlemek amacıyla yerleştirilmiştir.

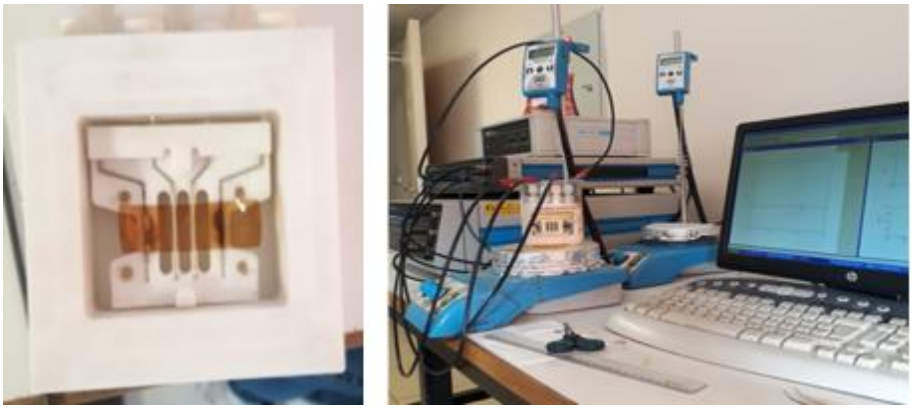


Resim 4.1. Tez çalışması için tasarlanan mikrobiyal yakıt hücresi

4.2.Membranın Kullanıma Hazırlanması

Çalışmanın her aşamasında anot ve katot bölmelerini birbirinden ayırmak amacıyla nafyon 115 membran (Ion Power Nafion Store # N115-US) kullanılmıştır. Membranın iyonik iletkenliğinin aktifleştirilip, test edilmesi amacı ile membrana bir dizi işlem uygulanmıştır. Bu işlemler sırasıyla (1) membranın 80^{o}C distile su içerisinde bir saat bekletilmesi, bekletilmesi, (2) 1M'lık sülfürik asit çözeltisi hazırlanılarak (Carlo Erba %96) membranın bir saat içerisinde bekletilmesi, (3) membranın 80oC distile su içinde yeniden bir saat

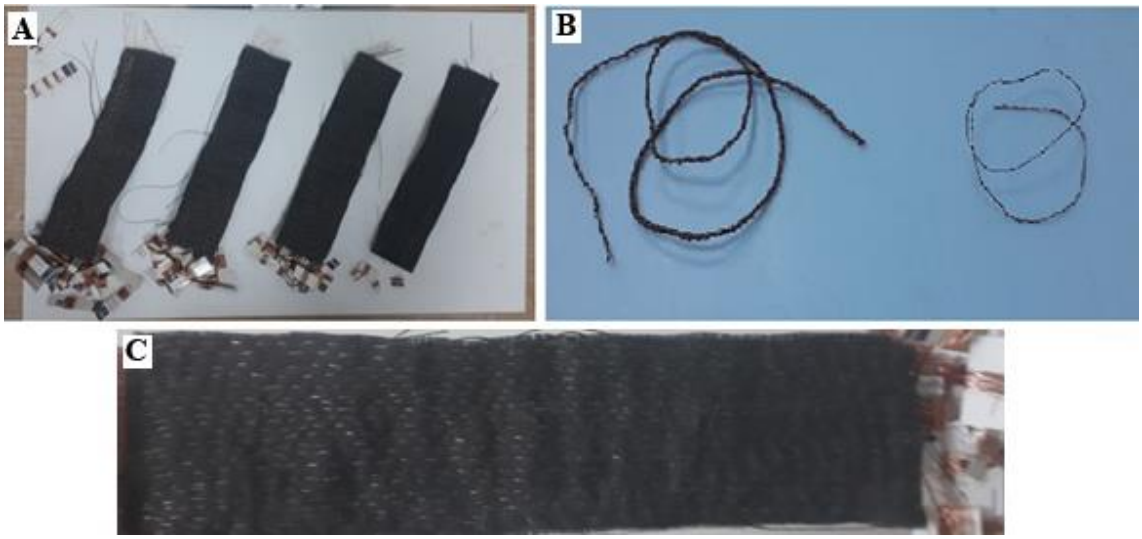
bekletilmesi, şeklindedir. Aktifleştirme işlemlerinin ardından membran, iyonik iletkenliğinin yeterliliğinin doğrulanması için empedans denemesi uygulanmıştır. Membranın iyonik iletkenliğinin ölçümünde, empedans deneylerinde 4-prob tekniği kullanılmıştır. Yapılan denemelerin ardından membranın kullanımı uygun görülerek (empedans denemesi sonuçları için bakınız Ek 1), katot bölmesinin tabanına yerleştirilmiştir.



Resim 4.2. Nafyon 115 membranın empedans testinin gerçekleştirilmesi

4.3. Elektrotların Kullanıma Hazırlanması

Deney için 20 x 5 cm karbon kumaştan (Fuel Cell Store) dört parça kesilmiştir. Kesilen kumaşlardan üç tanesi anot olarak kullanılmak üzere ayrılarak, üzerlerine 32 sıra halinde bakır tel (Kema Keur H05VV2) dikilmiştir. Kalan parçaya ise 4 sıra bakır tel dikilerek katot olarak hazırlanmıştır. Hazırlanan bu 4 elektrot, çalışmanın ilk üç aşamasında kullanılmıştır. Karbon kumaş üzerine dikilmiş bakır miktarına eşdeğer olacak şekilde, bakır tellerin birbirine dolanarak bükülmesi ile elde edilen bakır anot ve katot ise çalışmanın son aşamasında kullanılmış, bu iki tip elektrodun performansları arasındaki farklılık elektriksel ve arıtımsal olarak değerlendirilmiştir. Hazırlanan elektrotlar resim 4.3'de gösterilmiştir.



Resim 4.3. (A) Karbon kumaşa dikilmiş bakır (KKDB) elektrotlar, (B) son aşamada kullanılan bakır elektrotlar, (C) KKDB anot elektrot

4.4. Kullanılan Atık Suyun Özellikleri

Çalışmada Ankara Tatlar Atık Su Arıtma Tesisi'nden alınan, fiziksel ayrımlardan geçmiş olup, kimyasal işlem görmemiş olan kentsel atık su örnekleri kullanılmıştır. Tesisin günlük kapasitesi 765 000 m^3 atık su olup, bu atık suyun kaynağı şehrin kanalizasyon sistemidir. Kentsel (Evsel) atık sular, askıda, koloidal ve çözünmüş halde organik ve inorganik maddeler içermektedir. Atık suyun bileşimi ve özellikleri, iklimsel koşullardan, insanların yaşam ve beslenme kültürlerinden, çevresel faktörlerden ve daha birçok parametreden etkilenebilmektedir. Dolayısıyla atık su özelliği yalnız ülkeden ülkeye, şehirden şehre değil, incelenen yerleşim alanı için mevsimden mevsime, hatta saatten saate değişiklik gösterebilmektedir [111].

Çalışmada kullanılan atık suyun karakterizasyonuna ışık tutması için çizelge 4.1'de evsel atık su özellikleri verilmiştir. Bu veriler genel olarak, evsel atık sulardaki kirletici maddelere, bulunan mikroorganizmalara ve sayılarına dair yaklaşımda bulunulması için kullanılabilir. Yayınlanan son istatistiklere göre Ankara için kişi başı deşarj edilen günlük ortalama atık su miktarı 126 litredir (TÜİK, 2018).

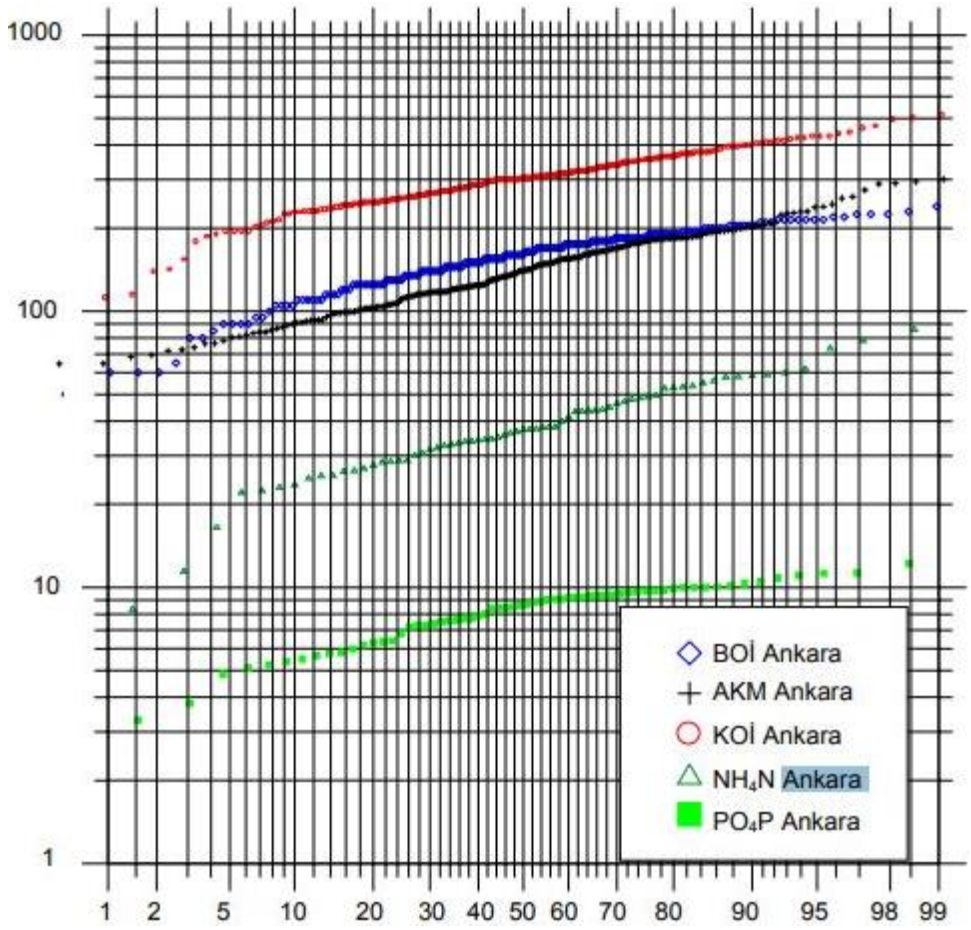
Çizelge 4.1. Evsel atık su özellikleri [112]

Madde	Atıklarda Bulunma Değeri (g/kişi-gün)
BOI, 5 günlük, 20^{o}C	45-54
KOI	1,6-1,9 x BOI_5
Toplam organik karbon	0,6-1,0 x BOI_5
Toplam katı maddeler	170-220
Askıda katı maddeler	70-145
Grit (inorganik, 0,2 mm ve yukarısı)	5-15
Makine yağı	10-30
Alkalinite (kalsiyum karbonat olarak, $CaCO_3$)	20-30
Kloridler	4-8
Toplam azot, N	6-12
Organik azot	~ 0,4 x toplam N
Serbest azot	~ 0,6 x toplam N
Nitrit	-
Nitrat	~ 0,0-0,5 x toplam N
Toplam fosfor, P	0,6-4,5
Organik fosfor	~ 0,3 x toplam P
İnorganik (ortho- ve polifosfatlar)	~ 0,7 x toplam P
Potasyum (potasyum oksit olarak, K_2O)	2,0-6,0
Atık suda bulunan mikroorganizmalar (100 ml atık su içinde)	
Toplam bakteri	10^9 -10^{10}
Koliformlar	10^9 -10^{10}
Feacal Streptococci	10^5 -10^6
Salmonella typhosa	10^1 -10^4
Protozoa kistleri	10^3 miktarına kadar
Helminth yumurtaları	10^3 miktarına kadar
Virüsler (plak oluşturan birimler)	10^2 -10^4

Türkiye'deki bazı şehirlerin atık su karakterizasyonunun belirlenmesine dair yapılan bir başka çalışmada [113], Ankara kentsel atık suyuna dair veriler çizelge 4.2'de sunulmuştur. Şekil 4.1'de ise Ankara atık su arıtma tesisine ait KOİ, BOİ, AKM, NH_4-N, PO_4-P parametrelerinin olası değerleri yarı logaritmik eksende yüzde (%) olarak gösterilmiştir.

Çizelge 4.2. Ankara kentsel atık suyunun özellikleri [113]

Tesis	KOİ (mg/l)		$BOİ_5$ (mg/l)		AKM (mg/l)		TKN (mg/l)		TP (mg/l)	
	Aralık	Ortalama	Aralık	Ortalama	Aralık	Ortalama	Aralık	Ortalama	Aralık	Ortalama
Ankara Arıtma Tesisi	109-528	305	50-245	159	65-380	147	8-87	40	3.3-12.2	8.2



Şekil 4.1. Ankara Atık Su Arıtma Tesisi'nin kirletici parametrelerinin olası değerleri (%) [113]

Literatür çalışmalarında, genel olarak evsel atık suların karakterizasyonu hakkında bilgi verebilmek için, kuvvetli, orta, zayıf ve seyreltik atık su şeklinde sınıflandırma yapılmaktadır. Çalışmanın deney aşamalarında ölçülen başlangıç KOİ değerleri sırasıyla 302, 312, 322 ve 346 mg/L KOİ olarak kaydedilmiştir. Çizelge 4.3'te verilen verilere göre, çalışmadaki atık su örnekleri zayıf-orta bandında değerlendirilerek, organik madde bazında, içeriği hakkında genel bilgi edinilebilmektedir. Kullanılan atık su örneklerinin pH değeri ise 7±0,3 düzeyindedir.

Çizelge 4.3. Organik madde bazında atık su karakterizasyonu [114]

Parametre (mg/l)	Atıksu Tipi Kuvvetli	Orta	Zayıf	Seyreltik
BOİ				
Nihai	530	380	230	150
7 günlük	400	290	170	115
5 günlük	350	250	150	100
Çözünmüş	140	100	60	40
Çöz., kolay ayrışan	70	50	30	
Çökelmiş	250	175	110	70
KOİ				
Toplam	740	530	320	210
Çökelmiş	530	370	230	150
Çözünmüş	300	210	130	80
TOK	250	180	110	70
Karbonhid-rat	40	25	15	10
Protein	25	18	11	7
Yağ asitleri	65	45	25	18
Yağlar	25	18	11	7
Deterjan	15	10	6	4
Yağ-gres	100	70	40	30
Fenol	0.2	0.15	0.10	0.05
Deterjan (anyonik)	15	10	6	

4.5. Deney ve Yöntem

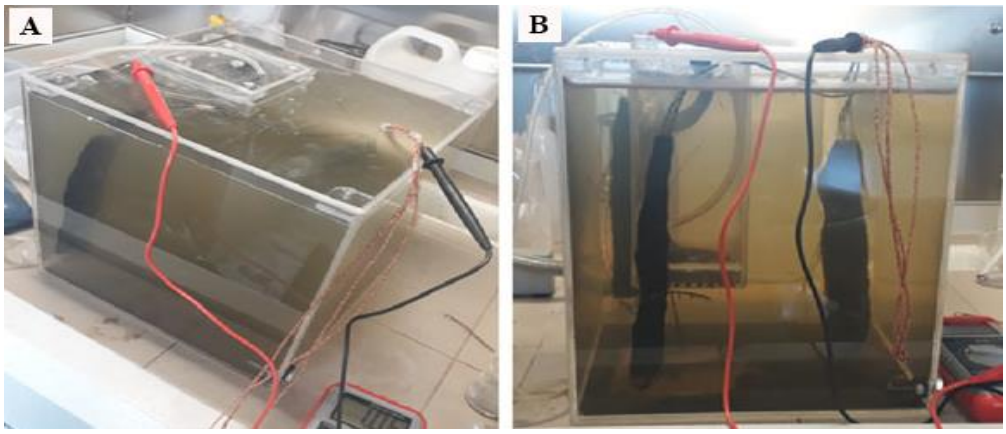
Yapılan çalışma dört aşamadan oluşmaktadır. Birinci aşamada, herhangi bir ilave etkide bulunulmadan, karbon kumaşa dikili bakır (KKDB) elektrotların performansı elektriksel güç ve arıtım bakımından değerlendirilmiştir. İkinci aşamada sistem parametreleri aynı tutularak manyetik karıştırma yapılmış, üçüncü aşamada karıştırma kaldırılmış, sisteme medyatör olarak 300 μM metilen mavisi ilavesi yapılmış, bu iki aşamada performans elektriksel güç kıstasında incelenmiştir. Son aşamada ise sistem ilk aşamadaki gibi kurularak, KKDB elektrotların yerine, kullanılan bakıra eşdeğer olacak şekilde, dikişsiz bakır elektrotlar kullanılmıştır. Her aşamada sistem kesikli olarak işletilmiş ve yakıt olarak Ankara Tatlar Atık Su Arıtma Tesisi'nden alınan, kimyasal işlem görmemiş kentsel atık su kullanılmıştır. Her aşamanın sonunda reaktördeki kullanılmış atık su bertaraf edilerek, yerine yeni atık su yüklenmiştir. İlk üç aşamada kullanılan karbon kumaşa dikili bakır elektrotların mesafesi 18 cm olarak ayarlanmıştır. Deney süresince anodun aktif hacmi 23,4 L'dir. Katot her aşamada deiyonize su ile doldurularak, süreç boyunca hava ile beslenmiştir. Deney süresince sıcaklık

26 ± 3°C aralığında kalmıştır. Kullanılan reaktörün, KKDB elektrotların ve membranın yerleştirildiği, atık su yüklemesi yapılmadan önceki durumu resim 4.4'de gösterilmiştir.



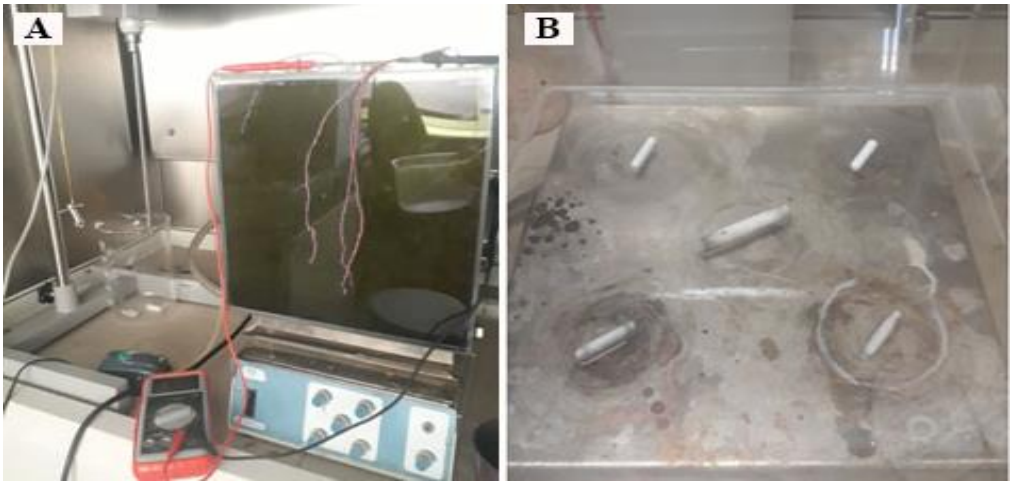
Resim 4.4. KKDB elektrotlar ile kurulan MYH sistemi

Çalışmanın birinci aşamasında sistem kurulumundan sonra, atık su tanka yüklenerek başlangıç KOİ değeri ölçülmüştür (302 mg/L KOİ). Akım ve gerilim değerleri zamana bağlı olarak, belirli aralıklarla kayıt altına alınmıştır. Ayrıca 24 saat aralıkla, reaktörün orta kesiminden alınan atık su örnekleri ile KOİ değerleri sistematik olarak ölçülmüştür. Deney onuncu günün sonunda akım değerlerinde düşüş nedeniyle sonlandırılmıştır. Resim 4.5'de birinci aşamanın, birinci ve onuncu günü çekilmiş fotoğraflar gösterilmektedir.



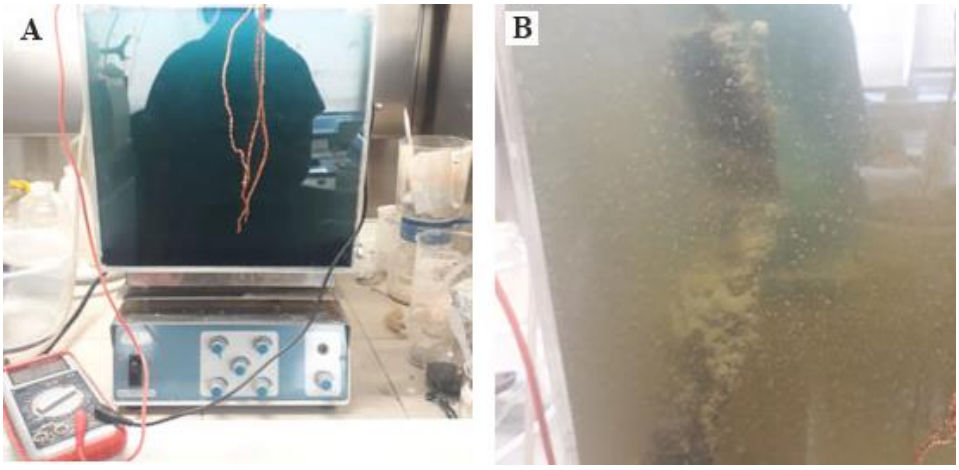
Resim 4.5. KKDB elektrotlarla atık su arıtımı, (A) birinci gün, (B) onuncu gün

İkinci aşamada, sistem manyetik karıştırıcı üzerine kurulmuştur. Anot hücresi tabanına, homojen derişim profili elde etmek amacıyla, beş adet manyetik karıştırıcı çubuk yerleştirilmiştir. Sistemde başka bir değişiklik yapılmadan atık su yüklenerek deneye hazır hale getirilmiştir. Karıştırma saat başı onar dakikalık periyotlar halinde, 425±25 rpm karıştırma hızında yapılmıştır. Anot elektrot üzerinde oluşan biyofilmi deforme etmemek amacı ile karıştırma sürekli olarak değil periyodik aralıklarla uygulanmıştır. Zamana karşı akım ve gerilim değerleri ölçülmüş, karıştırma öncesi ve sonrası kaydedilen değerler kıyaslanmıştır. Deney yedinci günün sonunda, akım değerlerindeki düşüş nedeniyle sonlandırılmıştır. Resim 4.6'da ikinci aşamanın sistem kurulumu ve manyetik karıştırıcıların reaktör tabanındaki konumları gösterilmiştir.



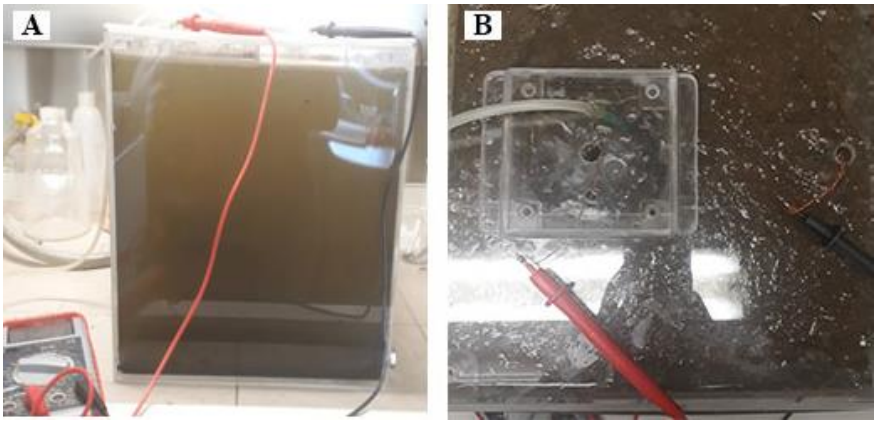
Resim 4.6. KKDB elektrotların manyetik karıştırma ile performansının değerlendirilmesi, (A) deney düzeneği, (B) manyetik karıştırıcıların reaktör tabanındaki konumları

Üçüncü aşamada sistem, birinci aşamadakine benzer şekilde kurulmuştur. İlk verilerin ölçümünün ardından sisteme medyatör olarak 300 μM metilen mavisi ilave edilmiştir. Sistemdeki akım ve gerilim değerleri zamana bağlı olarak kaydedilmiş, sistemin performansı elektriksel güç kıstasında incelenmiştir. Deney yedinci günün sonunda, akım değerlerindeki düşüş nedeniyle sonlandırılmıştır. Resim 4.7'de metilen mavisi ilavesinden sonra sistem ve yedinci günün sonunda KKDB elektrot üzerinde gözlemlenen topaklanma gösterilmektedir. Topaklanma, tampon çözeltinin kullanılmaması nedeniyle, medyatör ilavesinden sonra gerçekleşen pH değişiminin, anottaki biyofilmi deforme etmesi sonucu oluşmuştur. Ayrıntılara bulgular bölümünde yer verilmiştir.



Resim 4.7. Metilen mavisi kullanılarak MYH performansının değerlendirilmesi, (A) MM eklendikten sonra sistem, (B) yedinci günün sonunda KKDB elektrotlar üzerinde gözlenen topaklanma

Dördüncü aşamada ise, sistem birinci aşamadaki ile benzer kurularak, KKDB elektrotların yerine, kullanılan bakıra eşdeğer olacak şekilde, dikişsiz bakır elektrotlar kullanılmıştır. Burada amaçlanan, karbon kumaşın sağladığı yüksek yüzey alanı ve bakteriyel tutunuma elverişlilik gibi avantajlar olmaksızın, bakır elektrodun performansının değerlendirilmesidir. Zamana bağlı alınan akım ve gerilim değerlerinin yanında 24 saat aralıklarla KOİ değerleri de ölçülerek, performans arıtım verimliliği açısından da incelenmiştir. KKDB elektrotlar ile bakır elektrotların performansı kıyaslanmıştır. Deney, elektriksel güç düşüşünün kesin bir şekilde gözlenebilmesi için, on iki gün boyunca sürdürülmüştür. Resim 4.8'de dördüncü aşamanın ilk günündeki reaktör fotoğrafı ve on ikinci günde MYH yüzeyinde görülen tabaka gösterilmiştir.



Resim 4.8. Bakır elektrotlar ile MYH performansının değerlendirilmesi, (A) birinci günde sistem, (B) on ikinci gün MYH yüzeyi

5.BULGULAR VE TARTIŞMA

5.1. MYH Tasarım Parametrelerinin Değerlendirilmesi

Bu tez kapsamında yapılan çalışmalar, mikrobiyal yakıt hücresinde, yakıt olarak kentsel atık su kullanılması durumunda hem arıtımsal hem elektriksel verimliliği artırmaya yönelik girişimleri hedeflemiştir.

Bu doğrultuda, MYH performansının iyileştirilmesine yönelik tasarımsal parametreler arasında olan, reaktör tasarımı, anot ve katot elektrotların tasarımı ile elektrot yüzey alanı üzerinde çalışılmıştır. Ayrıca işletme parametreleri arasında olan medyatör kullanımı ve manyetik karıştırmanın da MYH performansı üzerine etkisi incelenmiştir. Bu çalışma kapsamında tasarlanan MYH, kesikli besleme ile bu tez çalışmasında ilk kez kullanılmıştır. MYH tasarımının literatürde çalışılmış olunan tasarımlardan belirgin farklılığı, katot ve anot bölmelerinin ayrı değil, iç içe konumlandırılmasıdır. Bu farklılık ile amaçlanan, anottan katoda membran boyunca geçmekte olan H+ iyonlarının difüzyonuna karşı olan direnci azaltmaktır. Tasarımda bir diğer dikkat çeken farklılık, membranın reaktör tabanına paralel olarak konumlandırılmasıdır. Silindirik reaktörlerde, kullanılması durumunda, membranın yatay olarak konumlandırılması genel bir tutum olsa da çalışmada kullanılan reaktöre benzer tasarımlar için yenilikçi bir seçimdir.

Çalışmada kullanılacak elektrotların tasarımı için dikkat edilen hususlardan biri, elektrik üretiminde oynadığı önemli rol nedeniyle, anot elektrot yüzey alanının yüksek tutulması olmuştur. Karbon kumaş hem bakteriyel tutunmaya elverişliliği hem de görece ekonomik olması sebebiyle tercih edilmiştir. Elektriksel iletimi desteklemesi ve elektrot tarafından yakalanan elektron miktarını artırması için seçilen bakır tel, karbon kumaş üzerine otuz iki paralel sıra halinde dikilmiştir. Elektrota dikildikten sonra, kalan kısımlar birbirine dolanarak dış devreden katot bağlantısı sağlanmıştır. Katot elektrota, elektron akışı için dört sıra halinde dikilen bakır tel yeterli görülmüş, anotta olduğu gibi, karbon kumaş dışında kalan kısımlar da birleştirilerek dış devreye bağlanmıştır. Anot reaktör büyüklüğü göz önüne alınarak, tek bir anot elektrot kullanılması yerine, üç adet kullanılarak, 18 cm mesafe ile yerleştirilmiştir.

Anot ve katot bölmelerinin birbirinden ayrımı nafyon 115 membran ile sağlanmıştır. Membran sisteme yerleştirilmeden önce 80^{o}C de sırasıyla distile su, 1M sülfürik asit ve tekrar distile su içerisinde olmak üzere birer saat bekletilmiş, iyonik iletkenliğinin yeterliliğinin ölçülmesi için empedans denemesi uygulanmıştır. Özellikle manyetik karıştırma esnasında atık suda bulunan parçacıkların membran yüzeyine hasar vermesini önlemek ve membranın yüzeyinin tıkanmalardan korunmasını sağlamak için, anot ile membran arasına delikli bir ızgara yerleştirilmiştir. Katoda çalışma süresince hava beslemesi yapılmıştır.

Karbon kumaşa dikili bakır elektrotların performansının hem farklı işletim koşulları ile gözlenebilmesi, hem de karbon kumaşın sağladığı avantajların olmadığı durumda, eş miktarda bakır kullanılan elektrotlarla performansın kıyaslanması için, deney dört aşamada gerçekleştirilmiştir. Aşamalar, güç düşüşünün kesin olarak gözlendiği zamana kadar sürdürülmüştür.

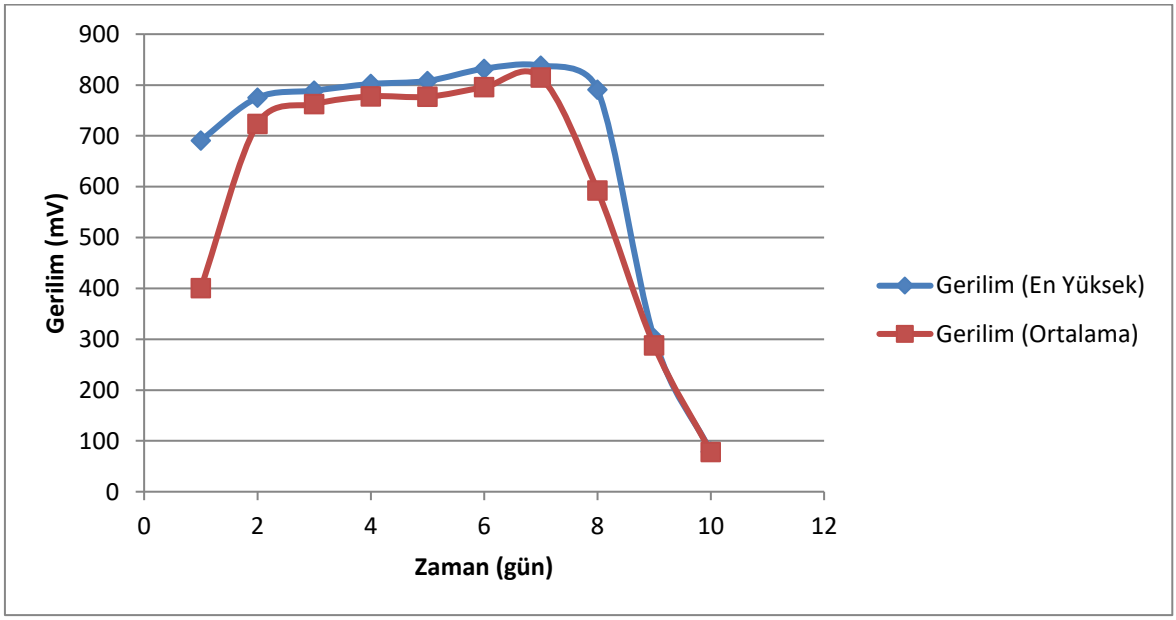
5.2. Karbon Kumaşa Dikili Bakır Elektrotların Değerlendirilmesi

Birinci aşamada sisteme yüklenen atık su, KKDB elektrotlarca, on gün boyunca işlenmiştir. Bu süreçte sisteme herhangi bir müdahalede bulunulmamış, akım ve gerilim değerleri ile KOİ değerleri zamana bağlı olarak kayıt altına alınmıştır. KOİ ölçümü için alınan atık su örnekleri, anodun orta bölümünden, dibe çöken parçacıkları içermeyecek şekilde alınmıştır. Çizelge 5.1’de deney aşaması sürecince kaydedilen akım, gerilim ve güç miktarı, günün en yüksek ve ortalama değerlerini ifade edecek biçimde verilmiştir.

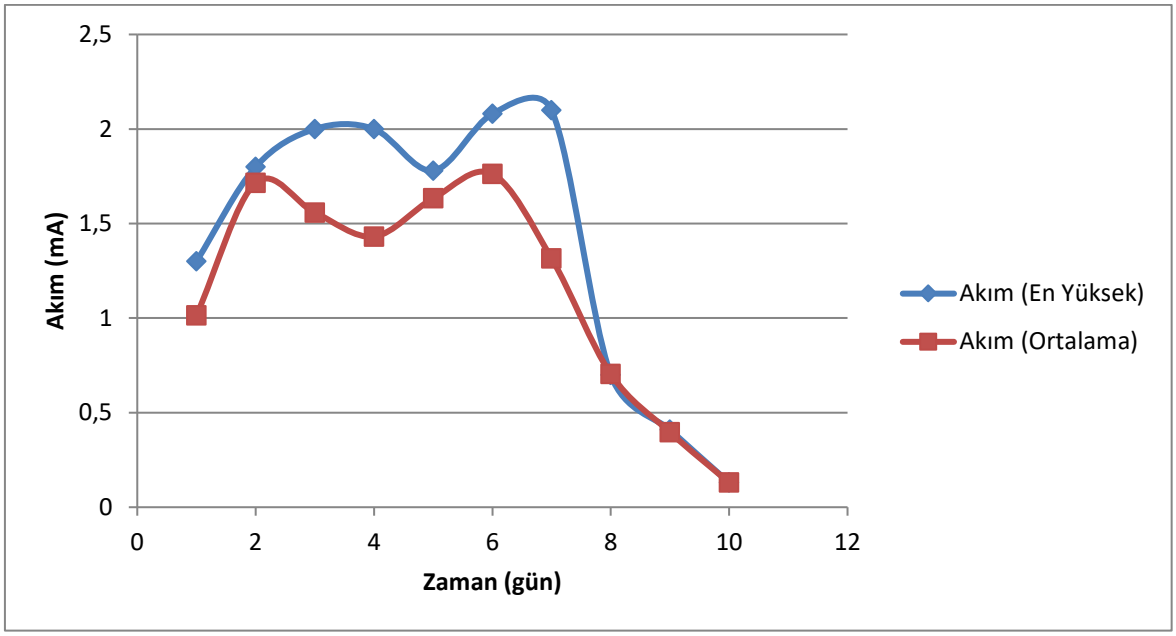
Çizelge 5.1. KKDB elektrotlar ile elde edilen akım, gerilim ve güç değerleri

GÜNLER	EN YÜKSEK			ORTALAMA		
	Akım (mA)	Gerilim (mV)	Güç (mW)	Akım (mA)	Gerilim (mV)	Güç (mW)
1	1,3	691	0,898	1,01	400	0,515
2	1,8	775	1,395	1,72	723	1,245
3	2	789	1,578	1,56	762	1,191
4	2	802	1,604	1,43	777	1,118
5	1,78	808	1,438	1,63	776	1,271
6	2,08	832	1,731	1,76	795	1,406
7	2,1	838	1,760	1,32	814	1,076
8	0,7	791	0,554	0,7	592	0,434
9	0,41	302	0,124	0,4	287	0,115
10	0,13	79	0,010	0,13	78	0,010

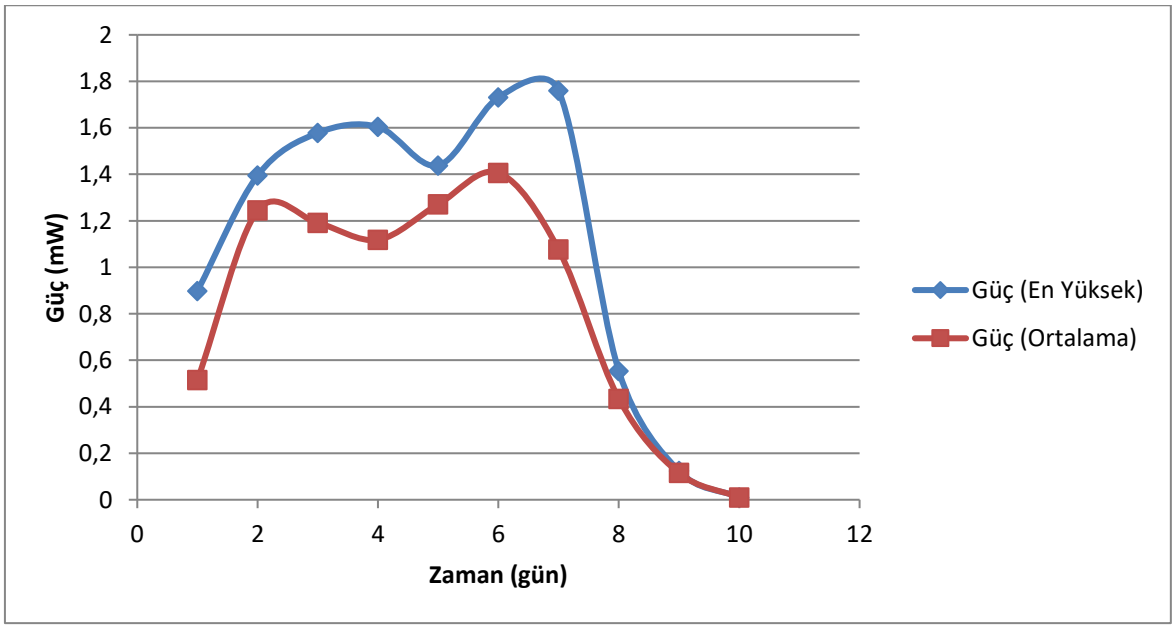
Şekil 5.1, 5.2 ve 5.3 MYH'de elde edilen gerilim (mV), akım (mA) ve güç (mW) değerlerini göstermektedir. Elde edilen en yüksek değerler, 838 mV, 2,1 mA ve 1,76 mW olarak kaydedilmiştir. Bu değerler, mikrobiyal kültürün durağan fazda olduğu yedinci günde elde edilmiştir. Takip eden günlerdeki düşüş eğilimi, mikrobiyal kültürde ölüm fazına geçişi işaret etmektedir.



Şekil 5.1. KKDB elektrotlar ile elde edilen gerilim değerleri



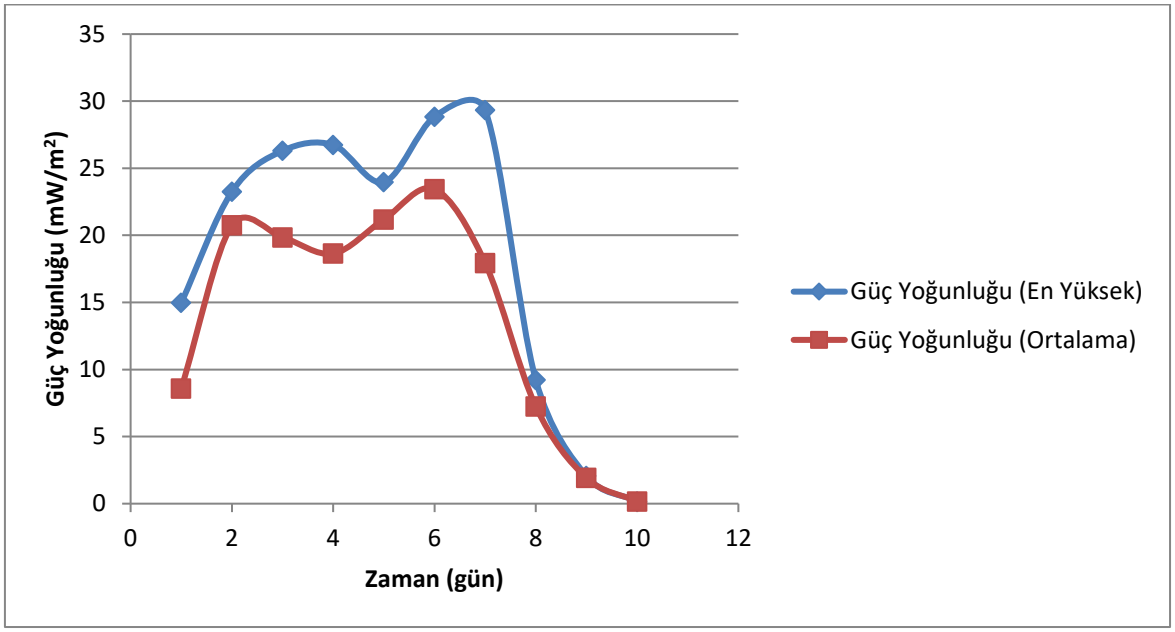
Şekil 5.2. KKDB elektrotlar ile elde edilen akım değerleri



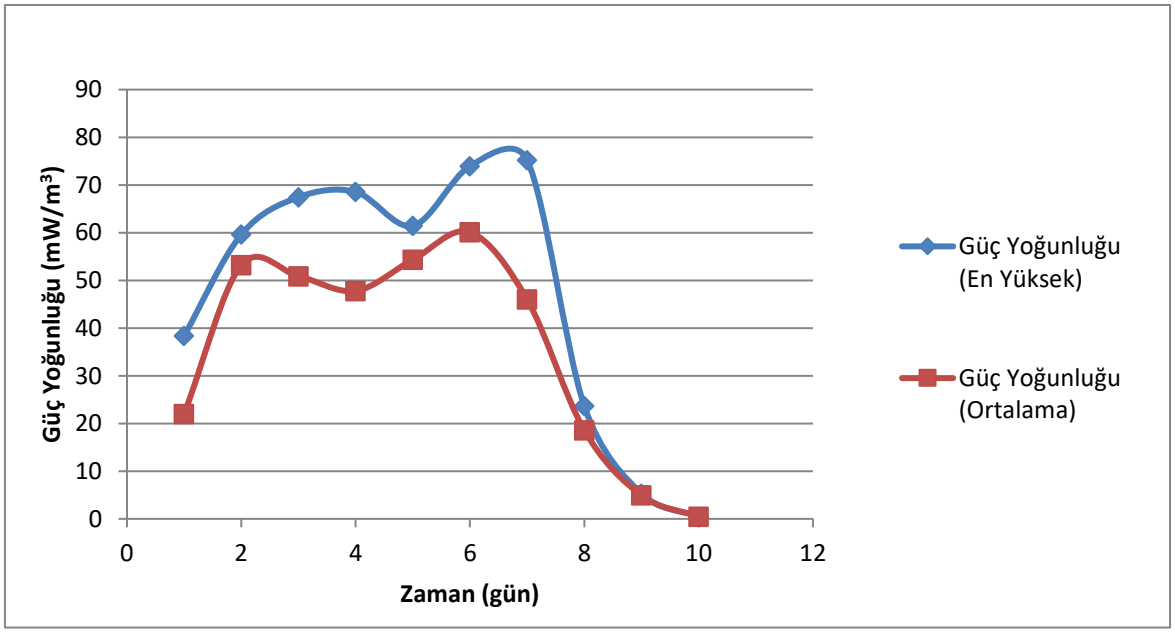
Şekil 5.3. KKDB elektrotlar ile elde edilen güç değerleri

Şekil 5.4 ve Şekil 5.5'de MYH'de, bölüm 2.7.2'deki ilgili eşitlikler ile elde edilen, anot yüzey alanına ve anot aktif hacmine bağlı güç yoğunluğu değerleri sunulmaktadır. Anot elektrotların toplam yüzey alanı 0,06 m^2, anot bölmesinin net hacmi ise 0,0234 m^3'tür. Grafikler gün içerisinde elde edilmiş en yüksek değerleri ve günlük ortalama değerleri göstermektedir. Mikroorganizmaların ortama uyum sağlaması ve elektrot üzerinde zamanla biyofilm oluşumunun artmasıyla birlikte güç yoğunluğu zamanla artış göstermektedir.

Onuncu günün sonunda durdurulan deneyde, en yüksek güç yoğunlukları 29,33 mW/m^2 ve 75,2 mW/m^3 ile yedinci günde gözlenmiştir.



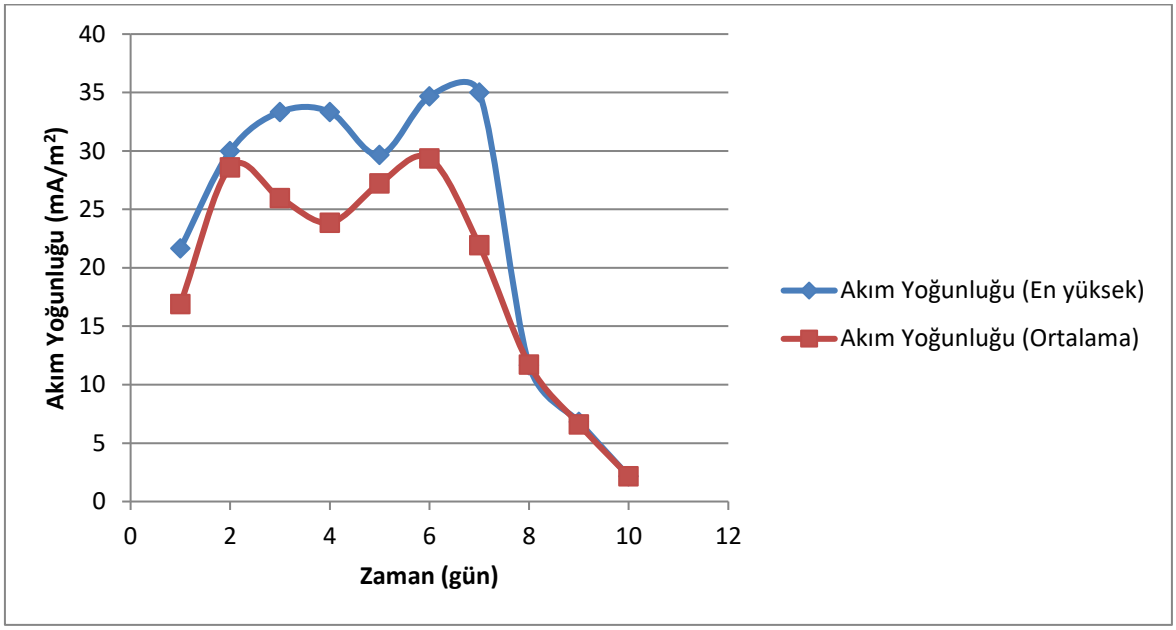
Şekil 5.4 KKDB elektrotlar ile elde edilen anot yüzey alanına bağlı güç yoğunluğu



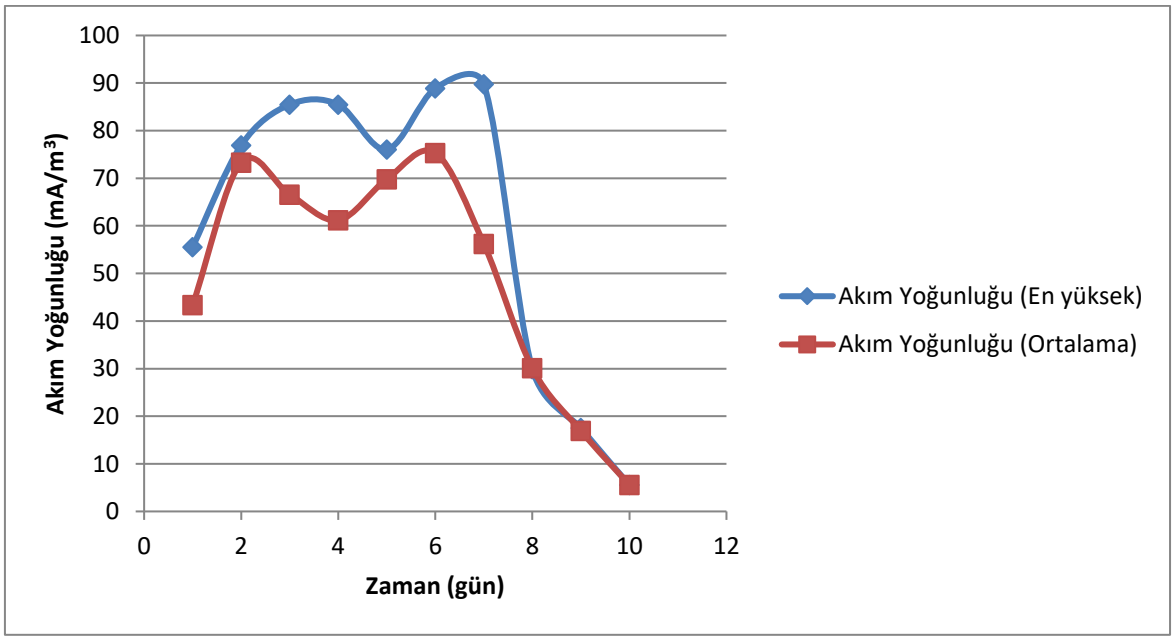
Şekil 5.5 KKDB elektrotlar ile elde edilen anot hacmine bağlı güç yoğunluğu

Şekil 5.6 ve Şekil 5.7'de MYH'de elde edilen akım yoğunluğu anot yüzey alanına ve hacmine bağlı olarak sunulmaktadır. Anot elektrotların toplam yüzey alanı 0,06 m^2, anot

bölmesinin net hacmi ise 0,0234 m^3'tür. En yüksek akım yoğunlukları, güç yoğunluğunda olduğu gibi yedinci günde, 35 mA/m^2 ve 89,7 mA/m^3 olarak gözlenmiştir.



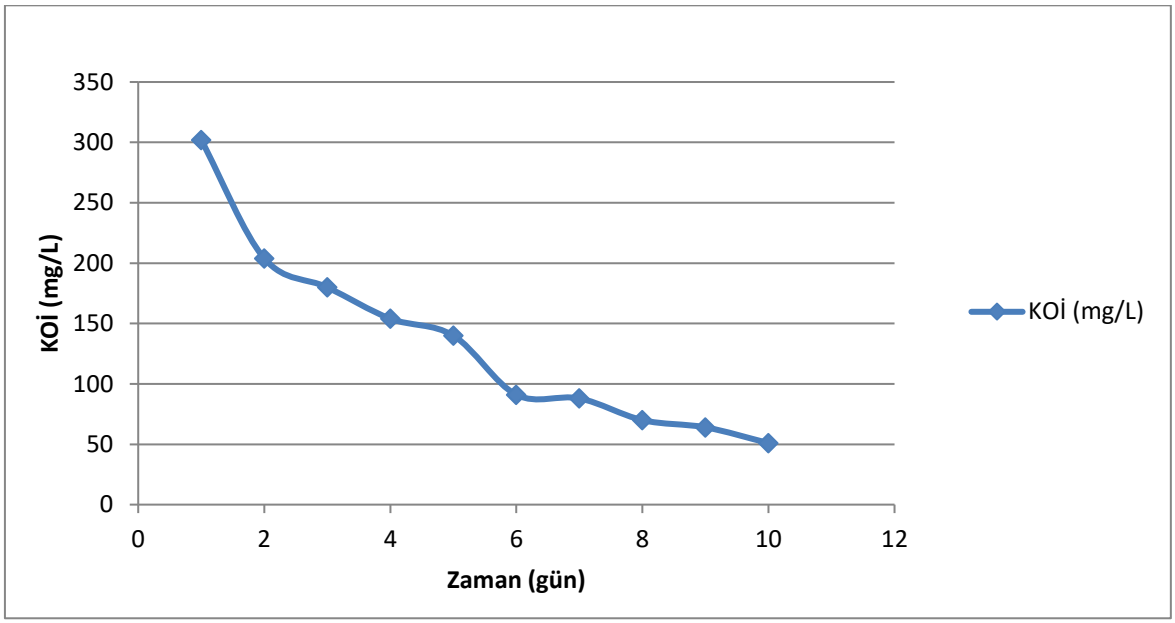
Şekil 5.6. KKDB elektrotlar ile elde edilen anot yüzey alanına bağlı akım yoğunluğu



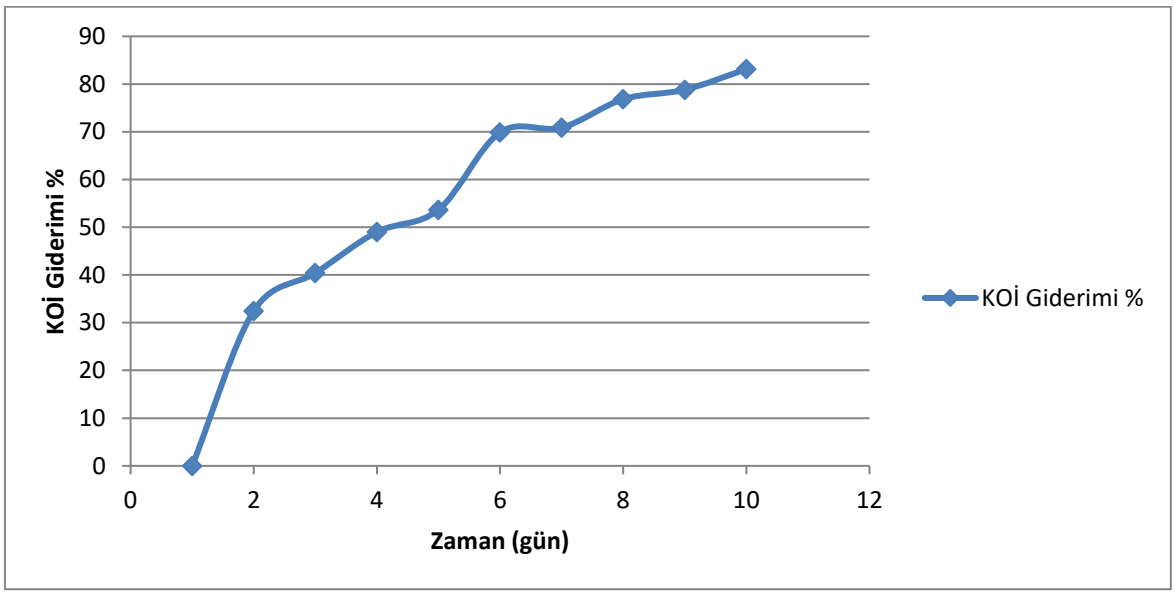
Şekil 5.7. KKDB elektrotlar ile elde edilen anot hacmine bağlı güç yoğunluğu

Şekil 5.8'de MYH'de yakıt olarak kullanılan atık suyun KOİ değerinin, başlangıç değeri olan 302 mg/L'den zamana bağlı olarak düşüşü görülmektedir. Şekil 5.9 ise atık sudaki KOİ gideriminin ilk güne kıyasla giderim yüzdesini vermektedir. Atık su içerisinde bulunan

mikroorganizmaların, metabolik gereksinimleri ile ortamda bulunan organik maddeleri tüketmeleri sonucu KOİ değerinde zamana bağlı bir düşüş gözlenmektedir. Deneyin ilk iki gününde, diğer günlere kıyasla daha fazla organik madde tüketilmesi, mikroorganizma kültürünün çoğalması ile ilişkilendirilebilir. Atık suyun artımının bir ölçüsü olan KOİ gideriminin, yedinci günün sonunda %70,8'lik giderim ile 88 mg/L KOİ'ye, onuncu günün sonunda ise %83'lük giderim ile 51 mg/L KOİ'ye düştüğü görülmektedir.



Şekil 5.8. KKDB elektrotlar ile KOİ değerinin zamana bağlı değişimi



Şekil 5.9. KKDB elektrotlar ile zamana bağlı KOİ giderimi yüzdesi

Bölüm 2.7.4'te verilen eşitlik 5.7 kullanılarak hesaplanan kolombik verimlilik, KKDB elektrotlarla yapılan bu aşamada, onuncu günün sonunda %1,62 olarak bulunmuştur. Bu değer on gün boyunca giderilen 251 mg/L KOİ'den elde edilebilecek en yüksek teorik elektriksel yük miktarının (1150 kolomb), on gün boyunca anoda iletilen toplam elektriksel yük miktarına (70 836 kolomb) yüzdesel olarak oranlanması ile bulunmuştur. Gerçek atık sular ile yapılan MYH çalışmalarında, bu tip düşük kolombik verimliliklere rastlamak şaşırtıcı değildir. Bunun başlıca nedeni, atık su içerisinde bulunan metanojenlerin, ekzoelektrojenlerle organik madde rekabetine girerek, elektrik akımı yerine metan üretimi yapmaya çalışmasıdır. Bu da MYH'de kolombik etkinliğin azalmasına neden olur. Kolombik verimlilik üzerine diğer etkenler bulgular bölümünde tartışılmıştır.

5.3. Karbon Kumaşa Dikili Bakır Elektrotların Manyetik Karıştırma ile Değerlendirilmesi

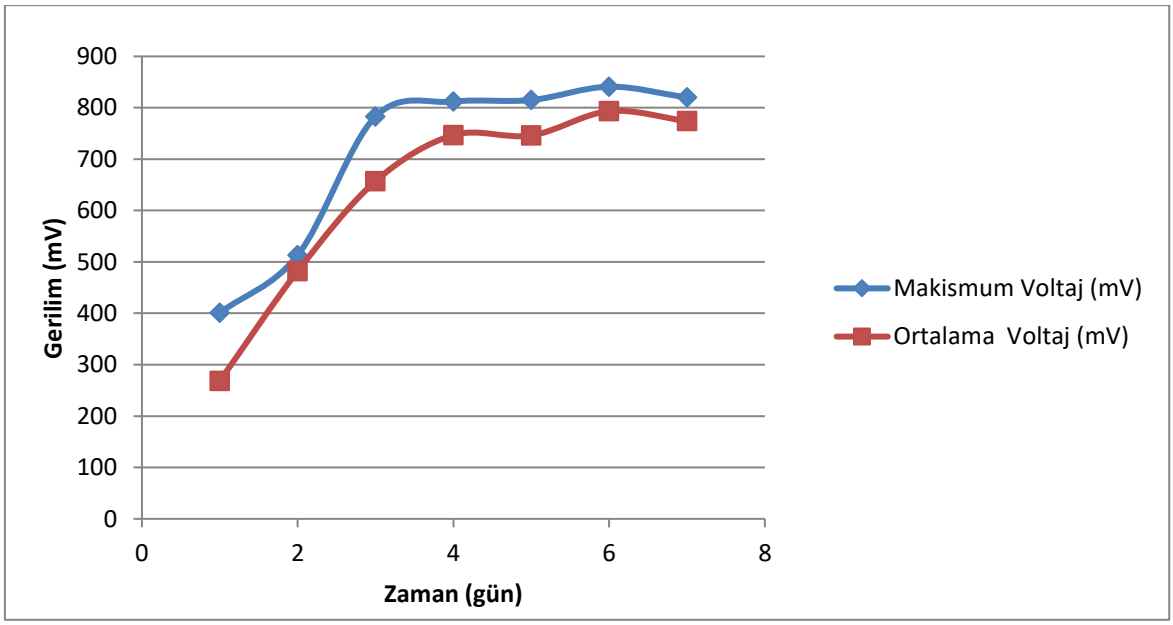
İkinci aşamada, KKDB elektrotların performansına manyetik karıştırmanın etkisi araştırılmıştır. Manyetik karıştırmanın, anot üzerindeki biyofilmin parçalanmasına neden olmaması için, karıştırma hızı 425±25 rpm olarak ayarlanmıştır. Aynı nedenden ötürü, karıştırma sürekli olarak yapılmamış, onar dakikalık periyotlar halinde saat başı uygulanmıştır. Zamana bağlı akım ve gerilim değerleri ölçülmüştür. Atık suyun başlangıç KOİ değeri bu aşama için 312 mg/L KOİ olarak ölçülmüştür. Karıştırmanın etkisinin araştırıldığı bu aşama, yedinci günün sonunda, akım değerlerindeki düşüş nedeniyle sonlandırılmıştır.

Çizelge 5.2'de deney aşaması sürecince kaydedilen akım, gerilim ve güç miktarı, günün en yüksek ve ortalama değerlerini ifade edecek biçimde verilmiştir.

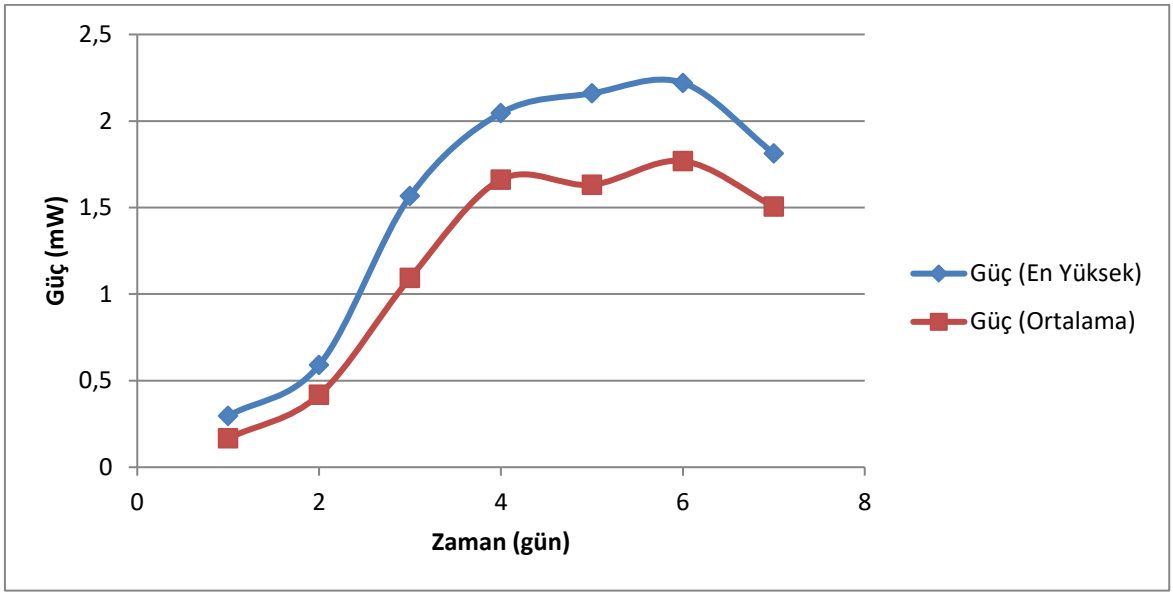
Çizelge 5.2. Karbon kumaşa dikili bakır elektrotların manyetik karıştırma kullanılması ile elde edilen akım, gerilim ve güç değerleri

GÜNLER	EN YÜKSEK			ORTALAMA		
	Akım (mA)	Gerilim (mV)	Güç (mW)	Akım (mA)	Gerilim (mV)	Güç (mW)
1	0,74	401	0,297	0,61	268	0,167
2	1,15	513	0,590	0,86	482	0,418
3	2,03	783	1,566	1,62	657	1,094
4	2,55	812	2,046	2,20	747	1,662
5	2,65	815	2,160	2,17	746	1,631
6	2,64	841	2,220	2,22	793	1,768
7	2,26	820	1,813	1,93	774	1,506

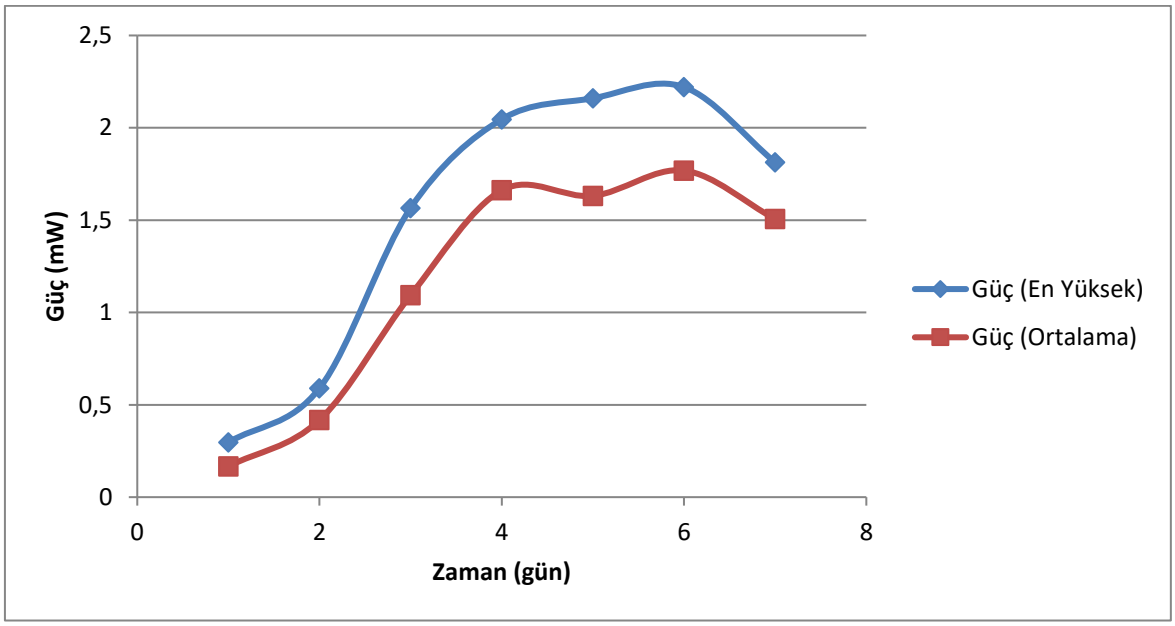
Şekil 5.10, 5.11 ve 5.12'de, MYH'de elde edilen gerilim (mV), akım (mA) ve güç (mW) değerleri sunulmuştur. Elde edilen en yüksek değerler sırasıyla 841 mV (altıncı günde), 2,65 mA (beşinci günde) ve 2,22 mW (altıncı günde) olarak gözlenmiştir. Birinci aşamada, deneyin en yüksek elektriksel verilerine daha geç ulaşılması (yedinci günde), manyetik karıştırmanın taşınım etkinliğini arttırdığını gösteren bir başka bulgudur.



Şekil 5.10. KKDB elektrotların manyetik karıştırma ile kullanılması sonucu elde edilen gerilim değerleri



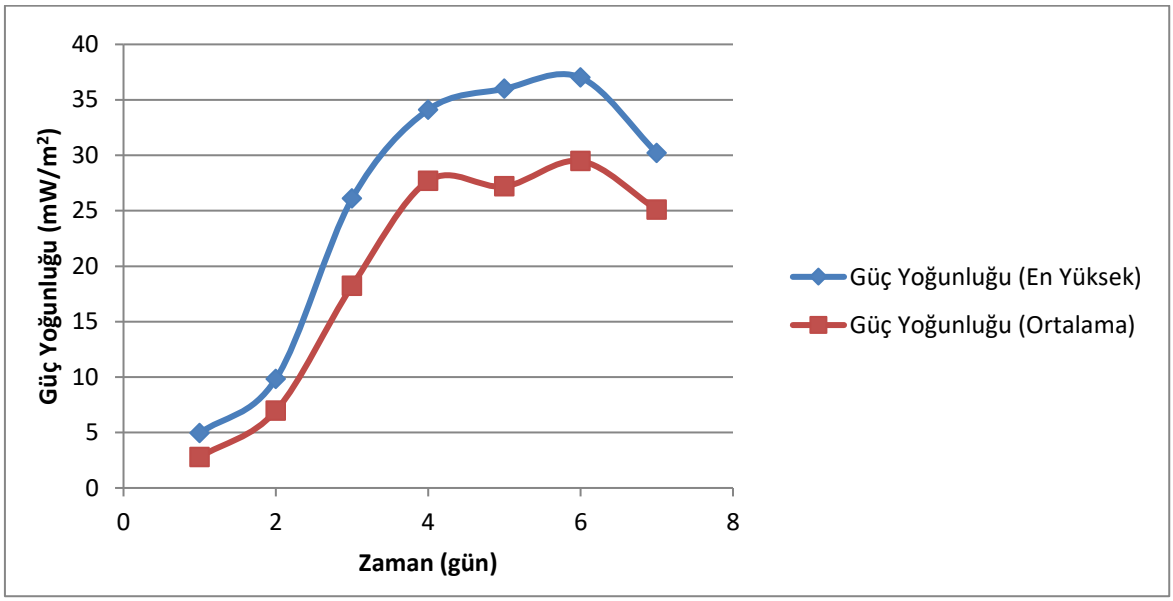
Şekil 5.11. KKDB elektrotların manyetik karıştırma ile kullanılması sonucu elde edilen akım değerleri



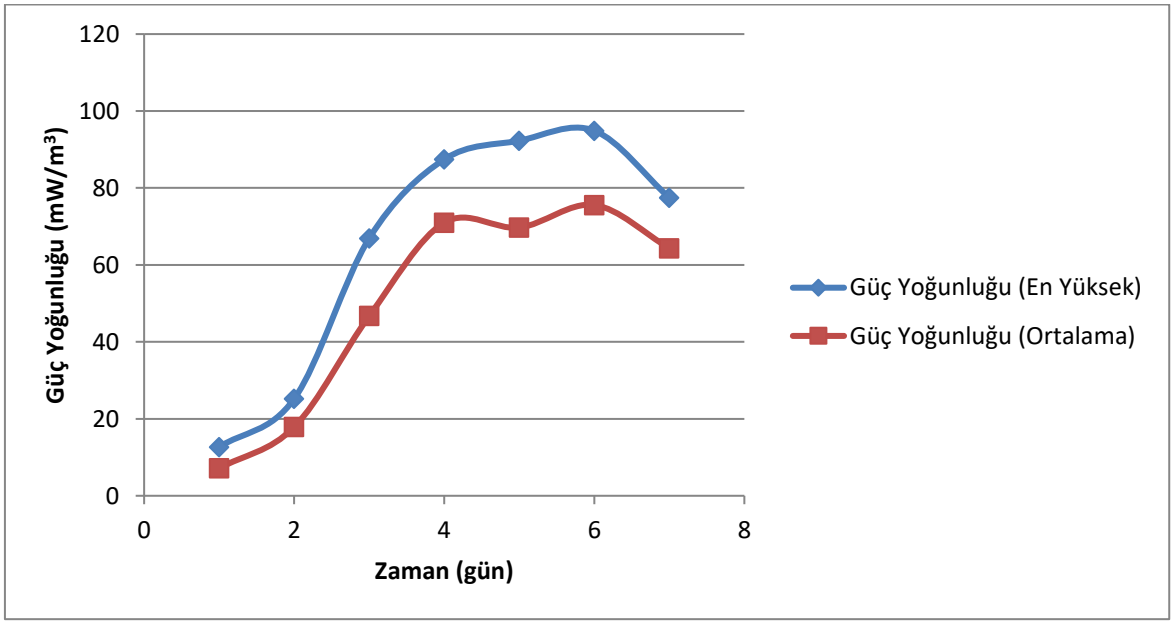
Şekil 5.12. KKDB elektrotların manyetik karıştırma ile kullanılması sonucu elde edilen güç değerleri

Şekil 5.13 ve Şekil 5.14'de, bölüm 2.7.2'deki ilgili eşitlikler ile elde edilen, anot yüzey alanına ve anot aktif hacmine bağlı güç yoğunluğu değerleri sunulmaktadır. Anot elektrotların toplam yüzey alanı 0,06 m^2, anot bölmesinin net hacmi ise 0,0234 m^3'tür. Değerler gün içerisinde elde edilmiş en yüksek değerleri ve günlük ortalama değerleri

göstermektedir. Mikroorganizmaların ortama uyum sağlaması ve elektrot üzerinde zamanla biyofilm oluşturması, güç artışı için çok önemlidir. Çalışma aşamasında kaydedilen en yüksek güç yoğunlukları (altıncı günde) 37 mW/m^2 ve 94,9 mW/m^3'tür.

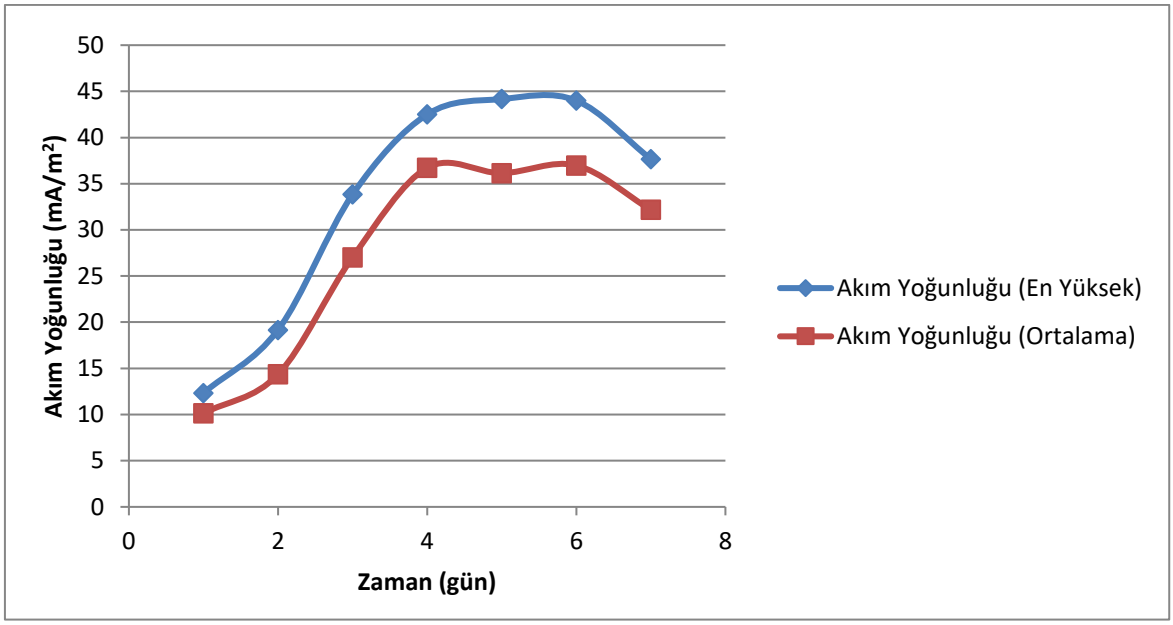


Şekil 5.13. KKDB elektrotların manyetik karıştırma ile kullanılması sonucu elde edilen anot yüzey alanına bağlı güç yoğunluğu

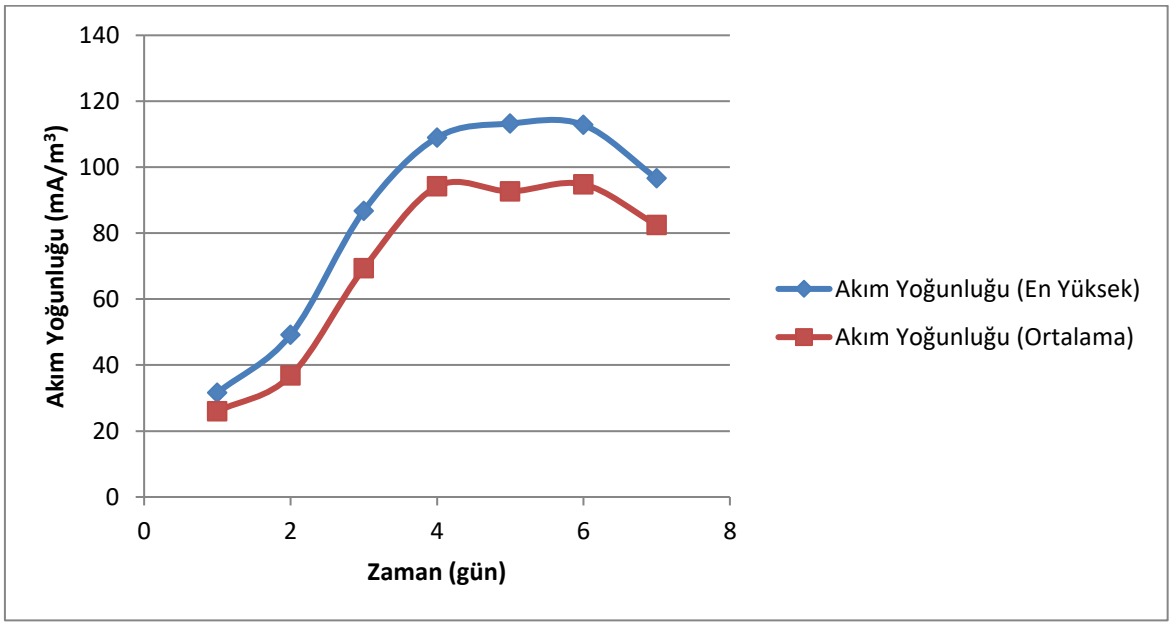


Şekil 5.14. KKDB elektrotların manyetik karıştırma ile kullanılması sonucu elde edilen anot hacmine bağlı güç yoğunluğu

Şekil 5.15 ve Şekil 5.16'de, MYH'de elde edilen akım yoğunluğu anot yüzey alanına ve hacmine bağlı olarak sunulmaktadır. En yüksek akım yoğunlukları sırasıyla 44,2 mA/m^2 ve 113,2 mA/m^3 olarak beşinci günde kaydedilmiştir. Altıncı günde ise beşinci güne çok yakın olmakla beraber değerler 44 mA/m^2 ve 112,8 mA/m^3 olarak gözlenmiştir.



Şekil 5.15. KKDB elektrotların manyetik karıştırma ile kullanılması sonucu elde edilen anot yüzey alanına bağlı akım yoğunluğu



Şekil 5.16. KKDB elektrotların manyetik karıştırma ile kullanılması sonucu elde edilen anot hacmine bağlı akım yoğunluğu

Çalışma boyunca elde edilen en yüksek, anot yüzey alanına ve anot hacmine bağlı, güç ve akım yoğunlukları KKDB elektrotların manyetik karıştırma ile kullanılması sonucu elde edilmiştir. Bu değerlerde manyetik karıştırma yapılmayan koşullara göre %26'lık artış elde edilmiştir. Bu artışın sebebi manyetik karıştırmanın, anot içerisinde homojen derişim dağılımı sağlaması [109] ile difüzyon polarizasyonunu azalatması [116], reaktörün ölü hacim bölgelerindeki H^+ ve elektronların membrana ve akım toplayıcıya iletimini sağlaması ayrıca anolitteki difüzyon iç direncini azaltmasıdır [110]. KKDB elektrotların manyetik karıştırma ile kullanıldığında, kullanılmadığı duruma göre, daha salınımsız güç ve akım değerleri sağladığı şekil 5.33 ve şekil 5.34'te görülmektedir. Manyetik karıştırma olmadığı durumda, bu değerlerin salınım gerçekleştirmesinin nedeninin, biyofilmde belirli bir derişime kadar taşınımı sağlanamayan H^+ iyonları olduğu düşünülmektedir. Manyetik karıştırma uygulandığı durumda ise hem sağlanan homojen derişim profili hem de biyofilm üzerindeki iyon difüzyon direncinin karıştırma etkisi ile azalması, güç ve akım değerlerinde daha dengeli değerler gözlenmesine neden olmuştur.

5.4. Karbon Kumaşa Dikili Bakır Elektrotların Performansına Medyatör Etkisi

Üçüncü aşamada, KKDB elektrotlar ile sistem aynı şekilde kurulmuştur. Başlangıç KOİ değeri ölçüldükten sonra, akım ve gerilim değerleri de ilk üç saat boyunca kaydedilmiştir. Metilen mavisi MYH çalışmalarında en sık kullanılan kimyasallardan biridir. Yapılan literatür çalışmaları sonucu 300 µM metilen mavisinin performans üzerine en olumlu etkiyi yapan derişim olduğu görülerek, deneyde kullanılmasına karar verilmiştir [62]. Medyatör kullanılarak yapılan çalışmalarda genel olarak, sisteme tampon çözelti de ilave edilerek anolitteki pH değeri korunur. Bu çalışmalarda kullanılan reaktörlerin anot hacimleri mililitre bandında seçildiği zaman, düşük miktarlarda tampon çözelti, sistemi stabilize etmek için yeterlidir. Bu çalışmada kullanılan aktif anot hacminin 23,4 litre olması nedeniyle, literatüre benzer oranlarda tampon çözelti eklenmesi durumunda, hem arıtılacak atık su miktarından önemli ölçüde feragat edilerek anot hacminin yarısı kadar bir bölümün tampon çözeltiye ayrılması, hem de yüksek miktarda kimyasal madde kullanımının kabul edilmesi gerekmektedir. Ayrıca seyrelmiş anolitte iyon difüzyon direncinin artması da söz konusudur. Bunun yerine bu çalışmada, medyatör kullanımı tampon çözeltisiz bir şekilde gerçekleştirilerek, sonuçların değerlendirilmesine karar verilmiştir. İlk üç saatin ardından sisteme metilen mavisi 300 µM derişimde olacak şekilde, medyatör olarak eklenmiş ve sisteme homojen bir şekilde dağılması için iki dakika boyunca 425±25 rpm hızda manyetik

karıştırma uygulanmıştır. Metilen mavisinin katılması ile değişen pH'ın biyofilm üzerinde yarattığı olumsuz etkiden kaynaklandığı düşünülen, anot üzerindeki topaklanmalar resim 4.7'de görülebilmektedir. Akım ve gerilim değerleri zamana bağlı olarak kaydedilmiş.

Elde edilen sonuçlar grafikler halinde sunulmuştur. Başlangıç KOİ değeri 322 mg/L olarak ölçülmüştür. Deney aşaması yedinci günün sonunda, akım değerlerindeki düşüş nedeniyle sonlandırılmıştır. Performans elektriksel güce bağlı olarak değerlendirilmiştir.

Çizelge 5.3'de deney aşaması sürecince kaydedilen akım, gerilim ve güç miktarı, günün en yüksek ve ortalama değerlerini ifade edecek biçimde verilmiştir. Ayrıca sistem kurulumundan medyatör ilavesine kadar geçen sürede alınan verilere de yer verilmiştir.

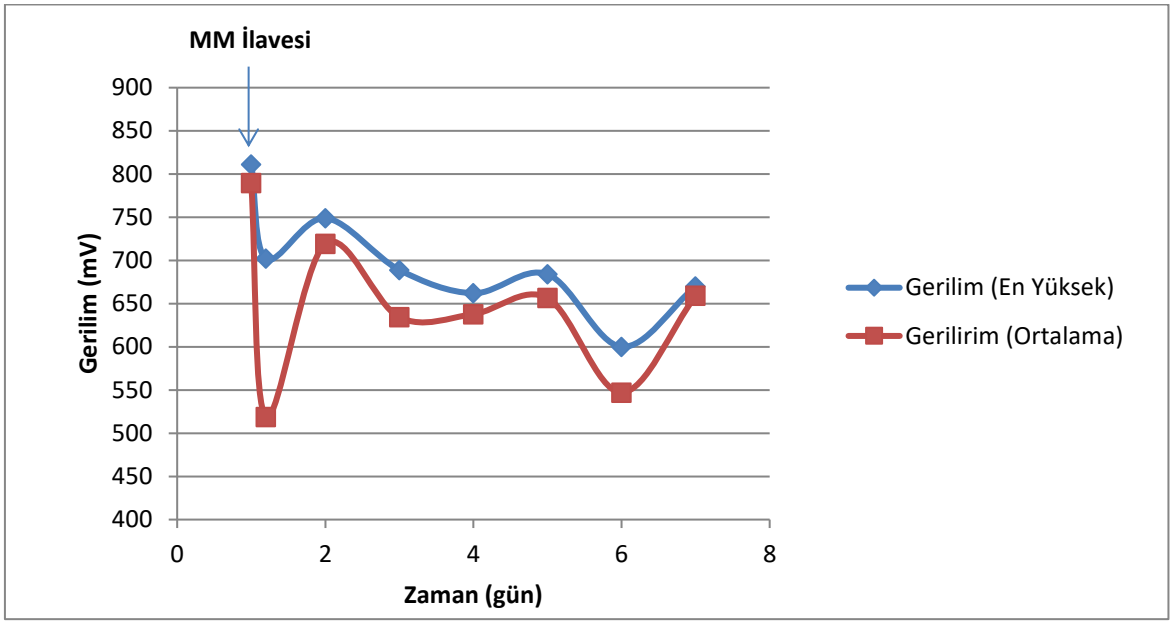
Çizelge 5.3. Karbon kumaşa dikili bakır elektrotların metilen mavisi ile kullanımı sonucu elde edilen akım, gerilim ve güç değerleri

GÜNLER	EN YÜKSEK			GÜNLÜK ORTALAMA		
	Akım (mA)	Gerilim (mV)	Güç (mW)	Akım (mA)	Gerilim (mV)	Güç (mW)
medyatörsüz	2,04	811	1,654	1,98	790	1,566
1	1,33	702	0,934	1,05	519	0,566
2	1,97	749	1,476	1,71	719	1,231
3	1,55	689	1,068	1,38	634	0,880
4	1,35	662	0,894	1,21	638	0,776
5	1,42	684	0,971	1,33	657	0,876
6	1,34	600	0,732	1,27	547	0,696
7	1,43	670	0,944	1,31	659	0,863

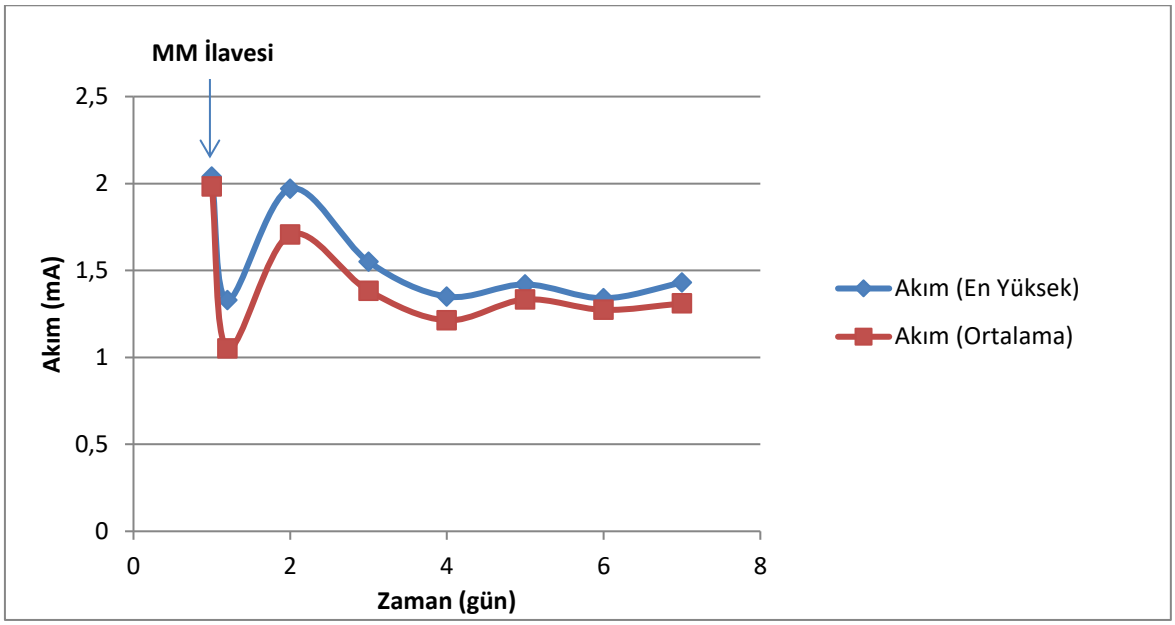
KKDB elektronların tampon çözelti ilavesiz, 300 µM metilen mavisi ile kullanıldığı aşamada performans üzerine pozitif bir etki kaydedilememiştir. Sistem kurulumu tamamlandıktan sonraki ilk 3 saat, medyatör ilave edilmeden elektriksel veriler kaydedilmiştir. Metilen mavisinin eklenmesi ile birlikte bu verilerdeki ani düşüş grafiklerde gözlenebilmektedir. Bu düşüşten sonra değerler düzenli olarak artış gösterse de medyatör ilavesi öncesindeki değerlere ulaşılamamıştır.

Şekil 5.17, 5.18 ve 5.19, MYH'de elde edilen gerilim (mV), akım (mA) ve güç (mW) değerlerini göstermektedir. Medyatör ilavesinden önce gözlemlenen veriler, metilen mavisinin eklenmesi ile beraber ani bir düşüş göstermiştir. Bunun nedeni ani pH değişimi ile birlikte, anottaki mikrobiyal kültürün zarar görmesidir. Medyatörlü sistemde elde edilen

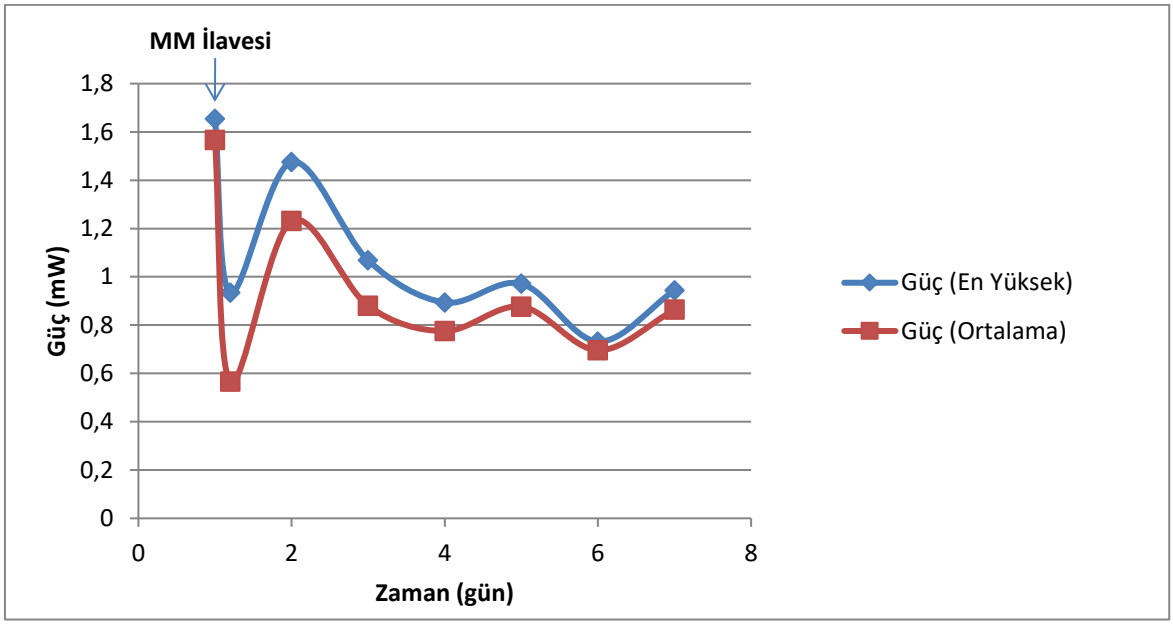
en yüksek değerler, 719,3 mV, 1,71 mA ve 1,23 mW olarak, deney aşamasının ikinci gününde gözlenmiştir.



Şekil 5.17. KKDB elektrotların 300 µM metilen mavisi ile kullanılması sonucu elde edilen gerilim değerleri

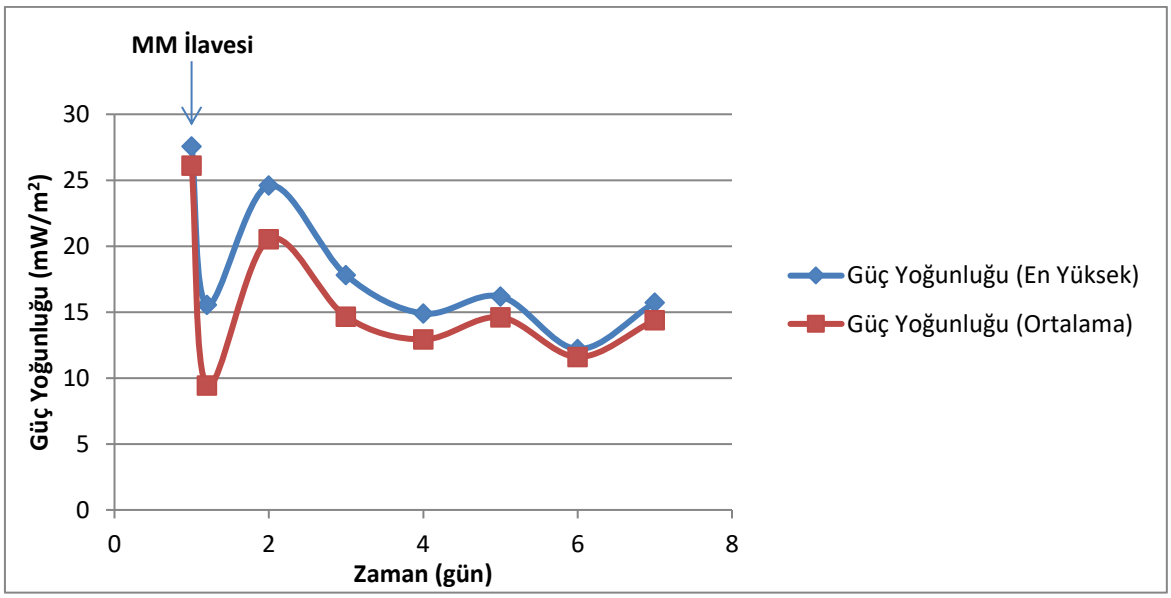


Şekil 5.18. KKDB elektrotların 300 µM metilen mavisi ile kullanılması sonucu elde edilen akım değerleri

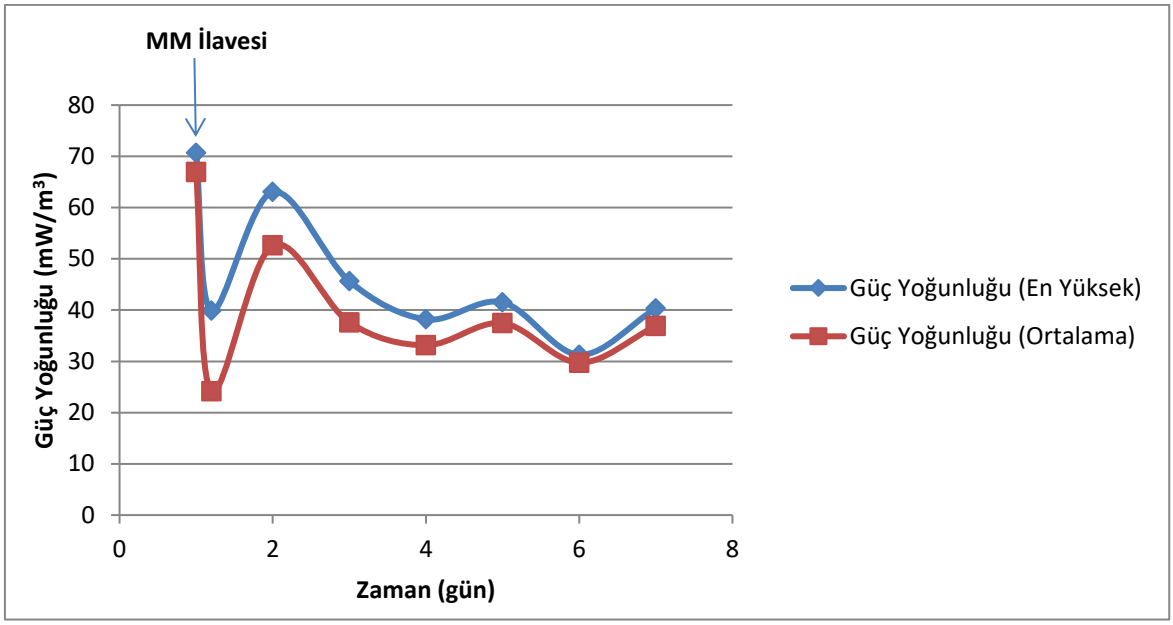


Şekil 5.19. KKDB elektrotların 300 µM metilen mavisi ile kullanılması sonucu elde edilen güç değerleri

Şekil 5.20 ve Şekil 5.21'de MYH'de elde edilen güç yoğunluğu anot yüzey alanına ve hacmine bağlı olarak verilmiştir. Değerler gün içerisinde elde edilmiş en yüksek değeri ve günlük ortalama değeri göstermektedir. Elde edilen en yüksek güç yoğunlukları 24,6 mW/m^2 ve 63,1 mW/m^3 olarak metilen mavisi ilavesinden 25 saat sonra, deneyin ikinci gününde gözlenmiştir.

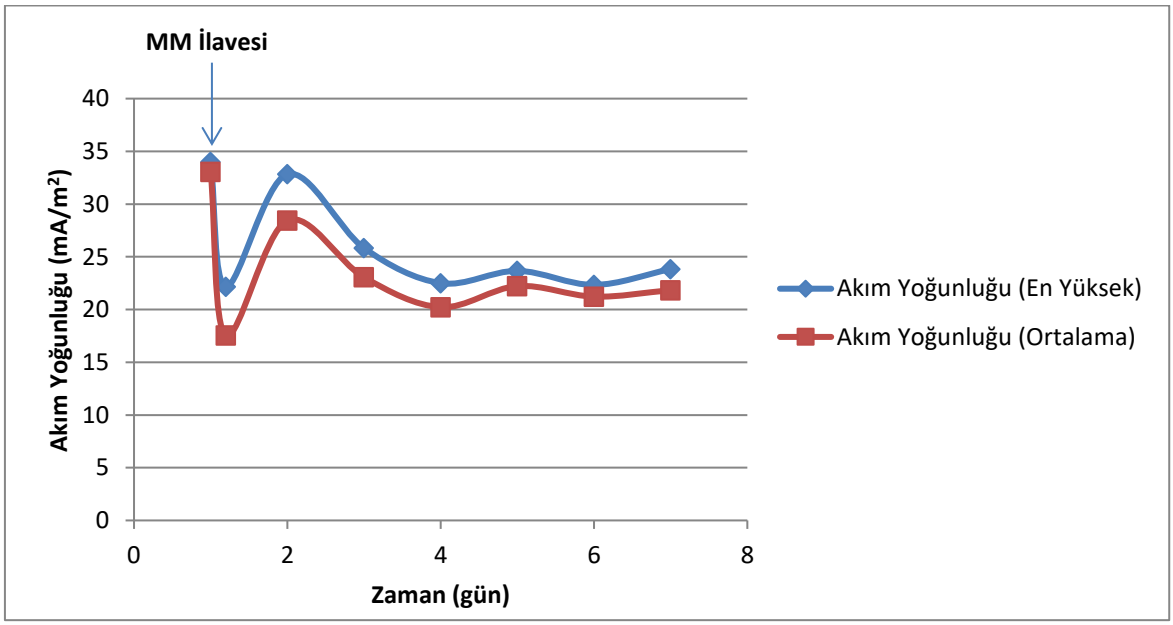


Şekil 5.20. KKDB elektrotların 300 µM metilen mavisi ile kullanılması sonucu elde edilen anot yüzey alanına bağlı güç yoğunluğu

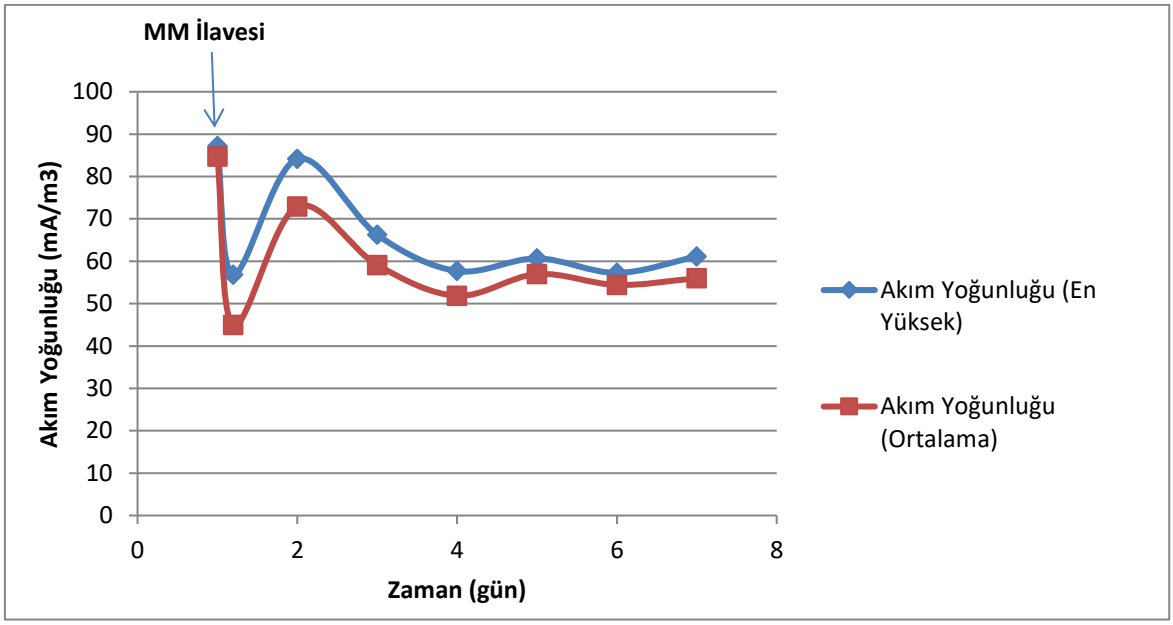


Şekil 5.21. KKDB elektrotların 300 µM metilen mavisi ile kullanılması sonucu elde edilen anot hacmine bağlı güç yoğunluğu

Şekil 5.22 ve Şekil 5.23 MYH'de elde edilen akım yoğunluğunu anot yüzey alanına ve hacmine bağlı olarak sunmaktadır. En yüksek akım yoğunlukları, güç yoğunluğunda olduğu gibi ikinci günde, 32,8 mA/m^2 ve 84,2 mA/m^3 olarak gözlenmiştir.



Şekil 5.22. KKDB elektrotların 300 µM metilen mavisi ile kullanılması sonucu elde edilen anot yüzey alanına bağlı akım yoğunluğu



Şekil 5.23. KKDB elektrotların 300 µM metilen mavisi ile kullanılması sonucu elde edilen anot hacmine bağlı akım yoğunluğu

Zamana bağlı kaydedilen elektriksel verilerin en dengesiz olduğu durumun, bu aşamada kaydedildiği söylenebilir. Bu değerler yorumlanırken pH değerinin MYH performansı üzerine etkisinin ve tampon çözeltinin işlevinin anlaşılması gerekmektedir.

Anottaki düşük pH'ın substrat oksidasyonu için derişim polarizasyonuna neden olduğu bilinmektedir. Ayrıca H^+ iyonları biyofilm üzerinden yüksek oranda taşınamadığı için, H^+ aktarımı, kullanılan tamponun eşlenik bazının protonlanması ile gerçekleşir [117]. Tampon çözeltinin bulunmadığı durumda, bu nedenlerden dolayı potansiyel kaybı yaşanır. Literatürdeki çalışmaların birçoğunda, anottaki alkali pH'ın atık su arıtımı sırasında güç üretimini desteklediği savunulsa da katı elektrotlara doğrudan elektron transferine dayanan biyofilmlerin elektrokatalitik aktivitesinin, anodik pH'dan etkilenip etkilenmediği tartışmalı bulunmaktadır [118]. Yuan ve diğ. (2011) yapmış oldukları çalışmada en yüksek güç yoğunluğunu pH 9 iken 1170±58 mW/m^2 olarak elde etmiştir. Bu değeri takiben pH 7'de 833±40 mW/m^2 olan güç yoğunluğu, pH 5'e düştüğünde dramatik bir şekilde azalarak 129±6 mW/m^2 değerine gerilemiştir. Bu tez çalışmasında kullanılan atık suyun pH değeri nötral seviyede iken, 300 µM metilen mavisi eklenmesi ile 1 birim kadar düşerek ~ pH 6 seviyelerine gerilemiştir. Hem tampon çözelti kullanılmaması hem de pH değerinin nötral seviyeden ani olarak düşürülmesi ile elektrot üzerinde bulunan biyofilmin olumsuz olarak etkilenmesi, elektriksel performansın düşmesine neden olmuştur. Diğer hiçbir aşamada

görülmeyen, anot elektrot yüzeyindeki topaklanmaların (resim 4.7) da biyofilmin olumsuz etkilenmesinin bir sonucu olduğu düşünülmektedir.

5.5. Bakır Elektrotların Karbon Kumaşsız Değerlendirilmesi

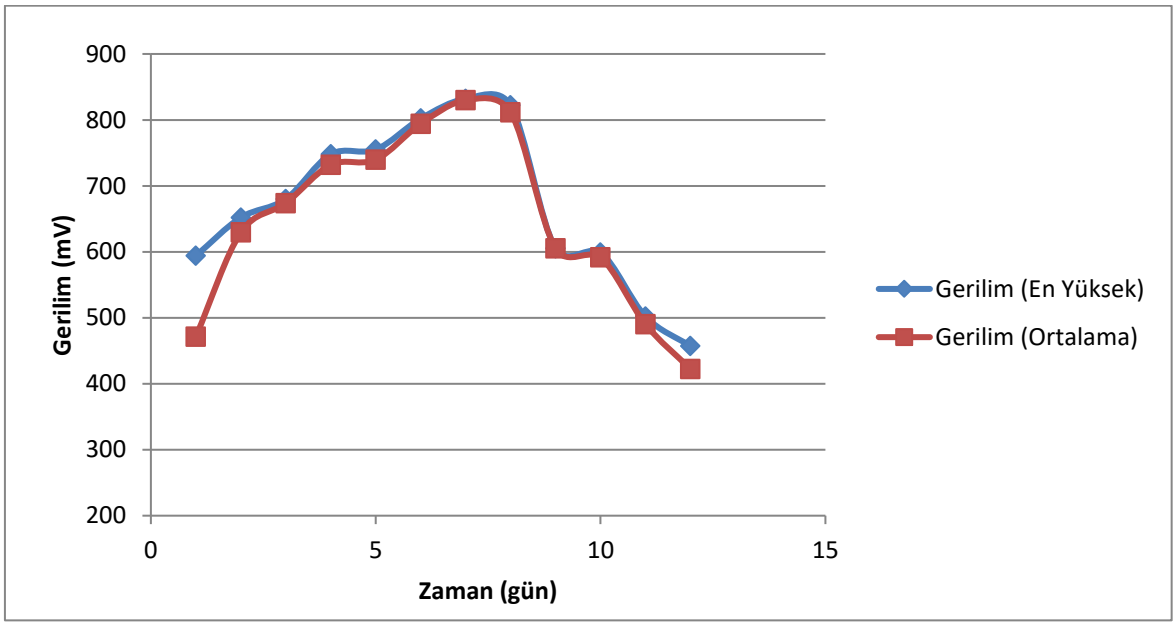
Çalışmanın son aşamasında, KKDB elektrotların performansının kıyaslanabilmesi için, bu elektrotlarda kullanılan bakır miktarına eş değer miktarda bakır tek başına elektrot olarak kullanılmıştır. Şekil 4.3 (B)'de kullanılan anot ve katot bakır elektrotlar görülmektedir. Bakır elektrotlarla gerçekleştirilen bu aşamada anot için kullanılan bakır miktarı, KKDB anot eletrodun bakır miktarına, katot için kullanılan bakır ise KKDB katot elektrodun bakır miktarına eşit tutulmuştur. İnce bakır teller birbirine dolanarak etkileştirilmiştir, ardında sisteme bir anot ve bir katot olacak şekilde yerleştirilmiştir.

Birinci aşama ile bu aşamada sistem kurulumu, elektrot değişikliği dışında aynı tutulmuştur. Elektriksel güç değerlerindeki kesin düşüşün gözlenebilmesi için deney onikinci günün sonuna kadar devam etmiştir. Başlangıç atık su KOİ değeri 346 mg/L KOİ olarak ölçülmüştür. Sistem hem arıtımsal hem de elektriksel olarak performans değerlendirmesine tabi tutulmuştur. Deney, elektriksel güç düşüşünün uygun şekilde gözlenmesi için on ikinci günün sonunda sonlandırılmıştır. Çizelge 5.4'de deney aşaması sürecince kaydedilen akım, gerilim ve güç miktarı, günün en yüksek ve ortalama değerlerini ifade edecek biçimde verilmiştir.

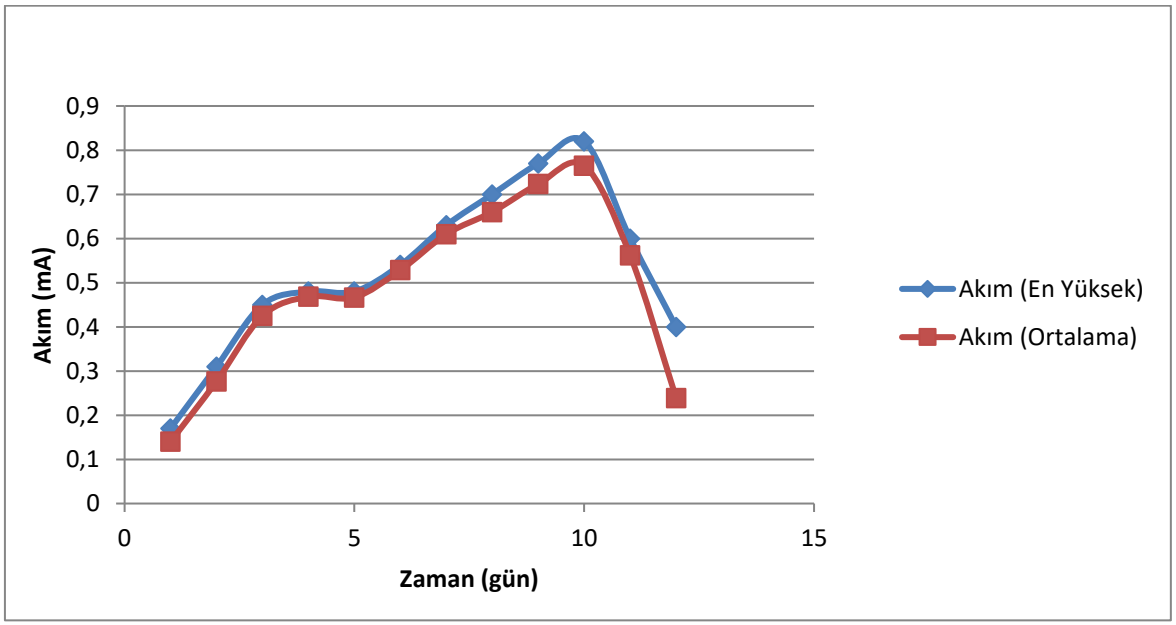
Çizelge 5.4. Bakır elektrotlar ile elde edilen akım, gerilim ve güç değerleri

GÜNLER	EN YÜKSEK			GÜNLÜK ORTALAMA		
	Akım (mA)	Gerilim (mV)	Güç (mW)	Akım (mA)	Gerilim (mV)	Güç (mW)
1	0,17	594	0,101	0,14	472	0,069
2	0,31	652	0,202	0,28	629	0,174
3	0,45	680	0,306	0,43	674	0,287
4	0,48	748	0,353	0,47	732	0,343
5	0,48	755	0,362	0,47	740	0,345
6	0,54	802	0,433	0,53	794	0,420
7	0,63	832	0,524	0,61	830	0,506
8	0,7	822	0,567	0,66	811	0,536
9	0,77	605	0,466	0,72	605	0,438
10	0,82	599	0,489	0,77	592	0,453
11	0,6	502	0,301	0,56	490	0,276
12	0,4	457	0,181	0,24	422	0,105

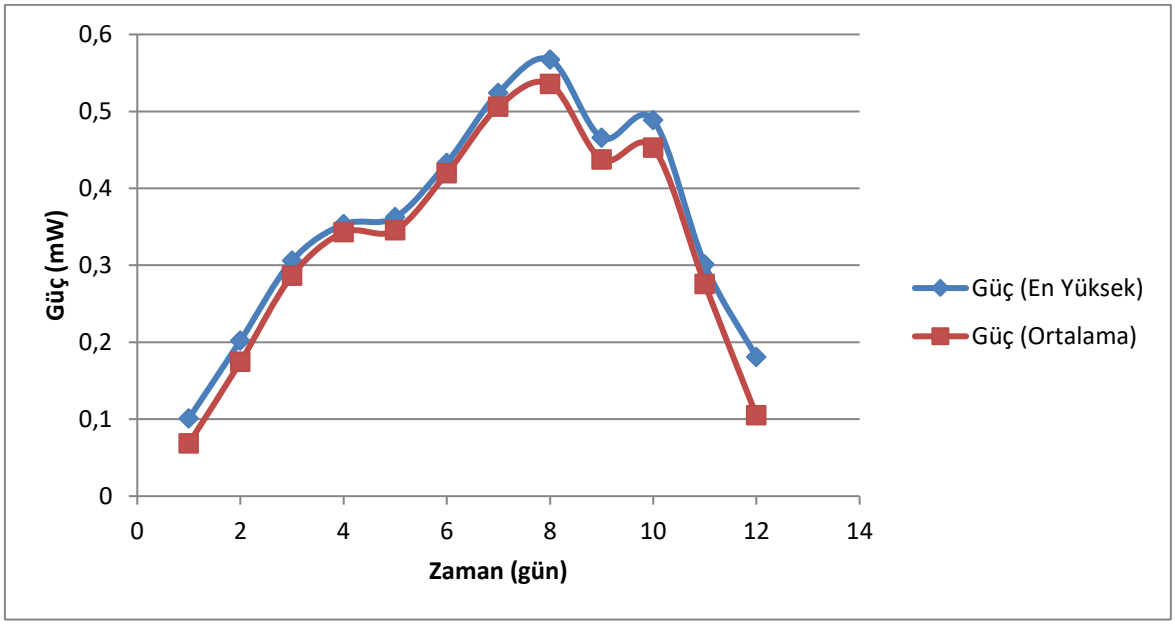
Şekil 5.24 ve 5.25, 5.26'da MYH'de elde edilen gerilim (mV), akım (mA) ve güç (mW) değerleri görülmektedir. Elde edilen en yüksek değerler, 832 mV (yedinci gün), 0,82 mA (onuncu gün) ve 0,57 mW (sekizinci gün) olarak belirlenmiştir.



Şekil 5.24. Dikişsiz bakır elektrotların kullanılması sonucu elde edilen gerilim değerleri

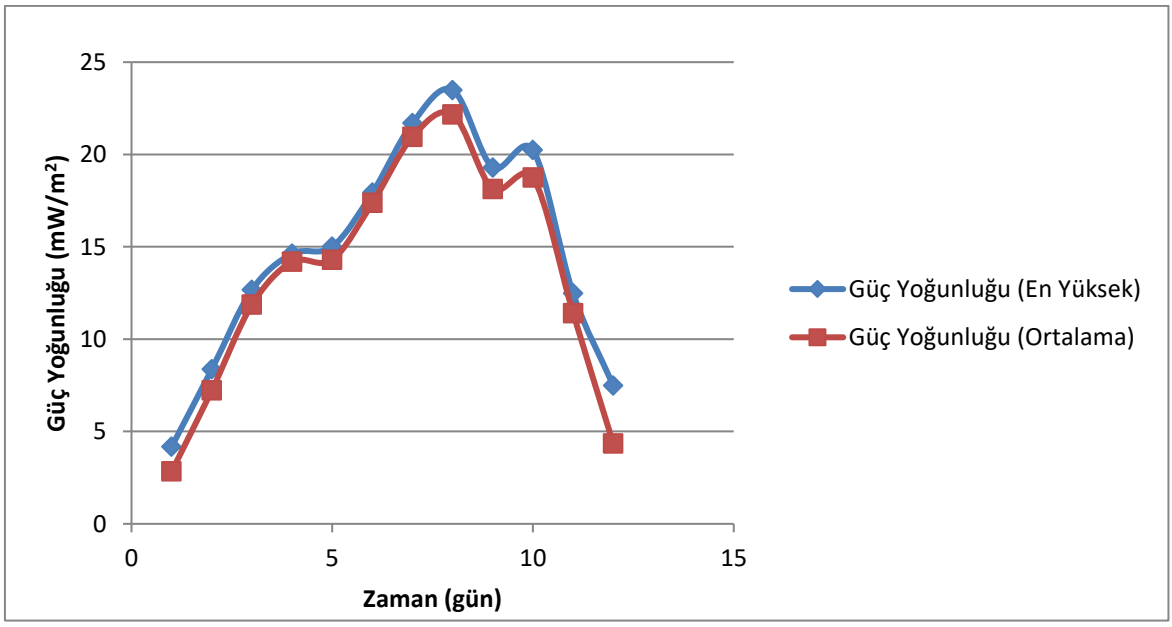


Şekil 5.25. Dikişsiz bakır elektrotların kullanılması sonucu elde edilen akım değerleri

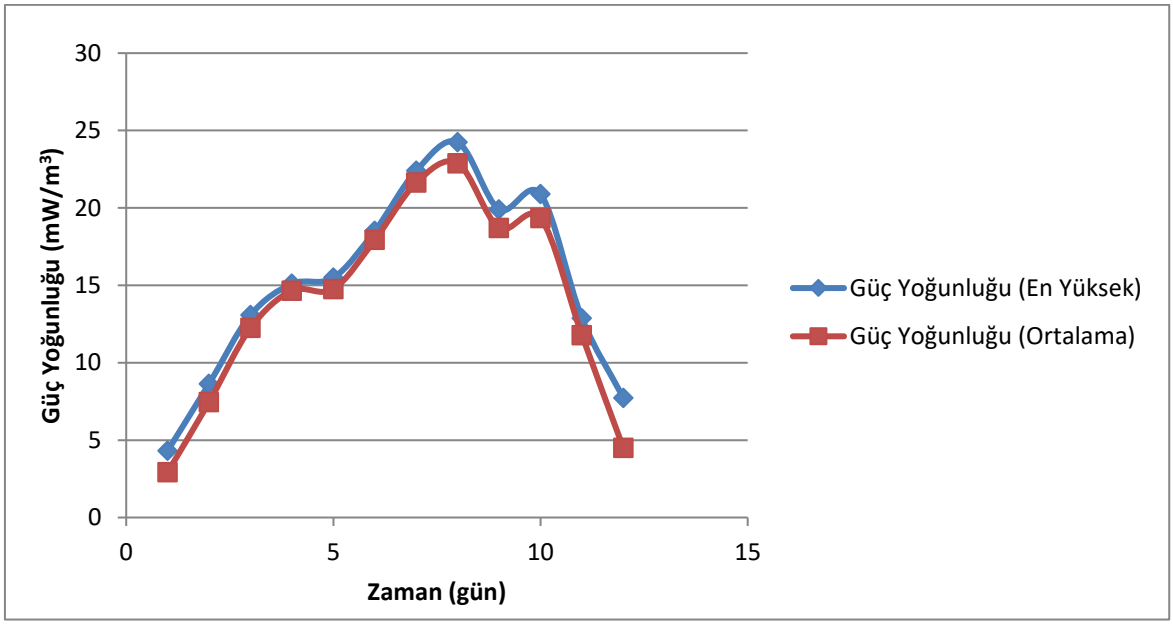


Şekil 5.26. Dikişsiz bakır elektrotların kullanılması sonucu elde edilen güç değerleri

Şekil 5.27 ve Şekil 5.28'de MYH'de elde edilen güç yoğunluğu anot yüzey alanına ve hacmine bağlı olarak sunulmuştur. Değerlerdeki düşüşün kesin bir şekilde gözlenebilmesi için on ikinci günün sonunda durdurulan deneyde, elde edilen en yüksek güç yoğunlukları sekizinci günde 23,5 mW/m^2 ve 24,2 mW/m^3 olarak kaydedilmiştir.

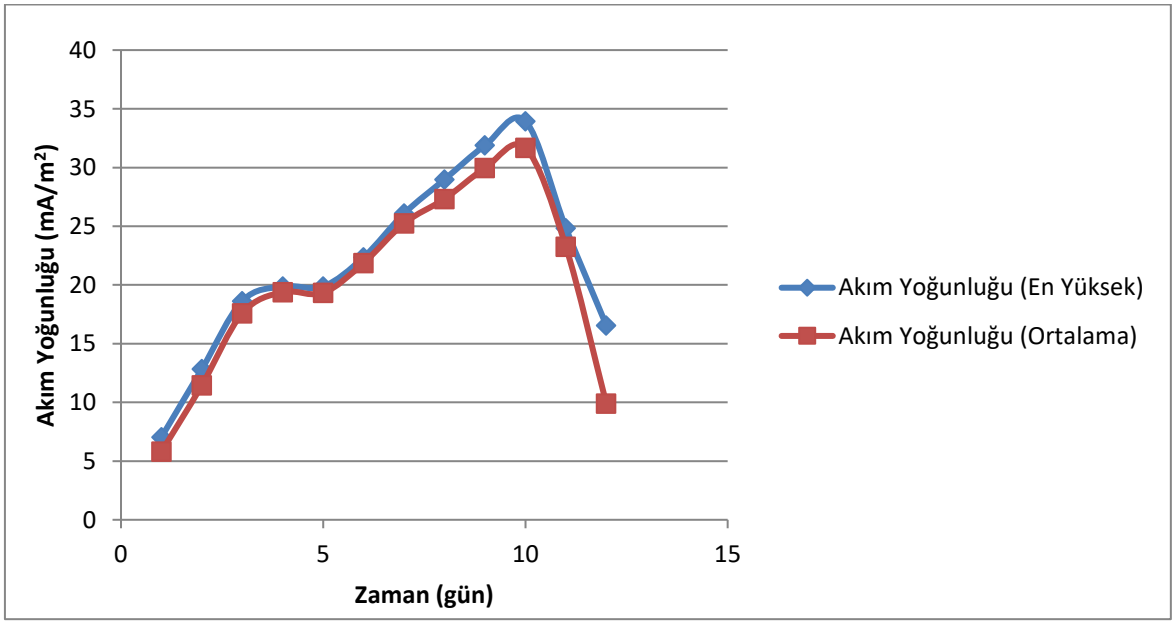


Şekil 5.27. Dikişsiz bakır elektrotların kullanılması sonucu elde edilen anot yüzey alanına bağlı güç yoğunluğu

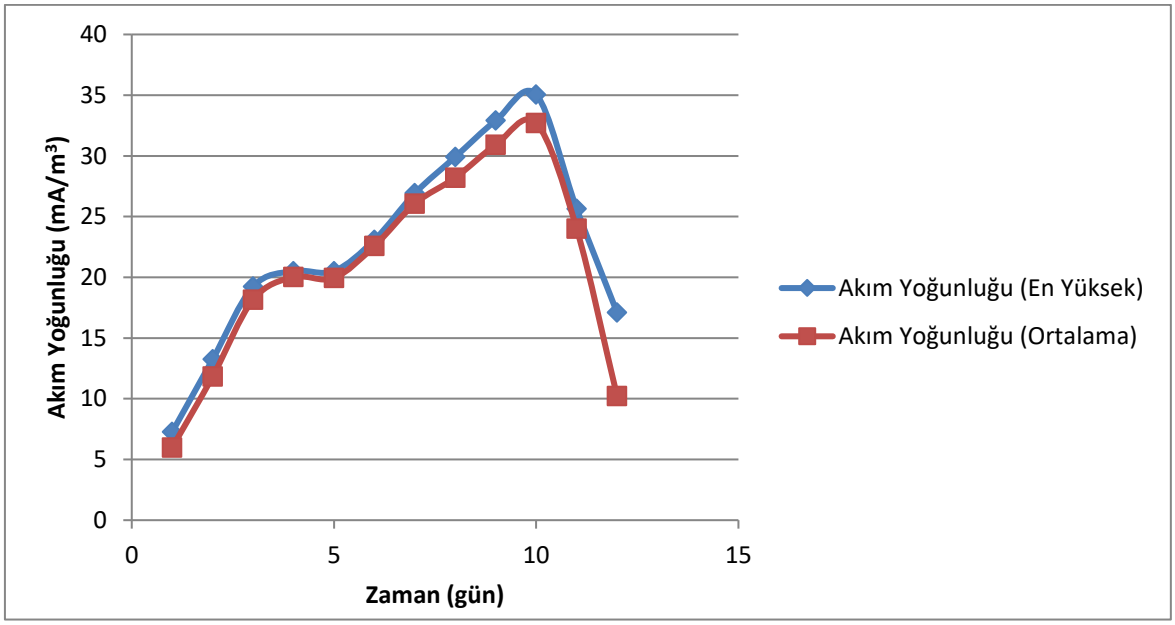


Şekil 5.28. Dikişsiz bakır elektrotların kullanılması sonucu elde edilen anot hacmine bağlı güç yoğunluğu

Şekil 5.29 ve Şekil 5.30'de, MYH'de elde edilen akım yoğunluğu anot yüzey alanına ve hacmine bağlı olarak sunulmuştur. En yüksek akım yoğunlukları, onuncu günde, 34 mA/m^2 ve 35 mA/m^3 olarak gözlenmiştir.

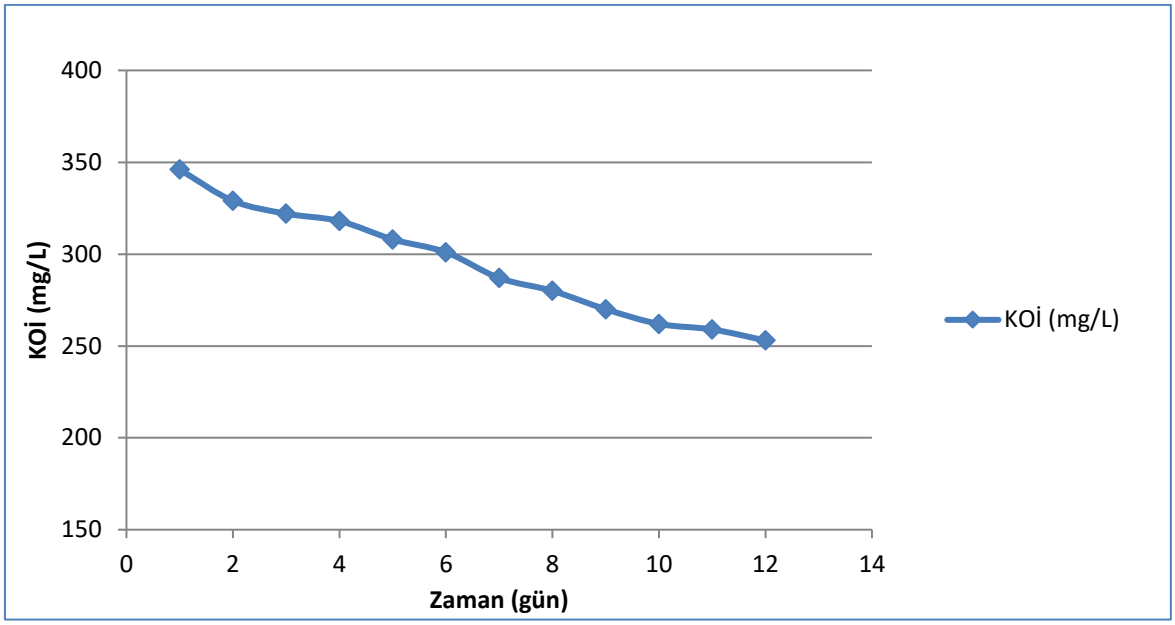


Şekil 5.29. Dikişsiz bakır elektrotların kullanılması sonucu elde edilen anot yüzey alanına bağlı akım yoğunluğu

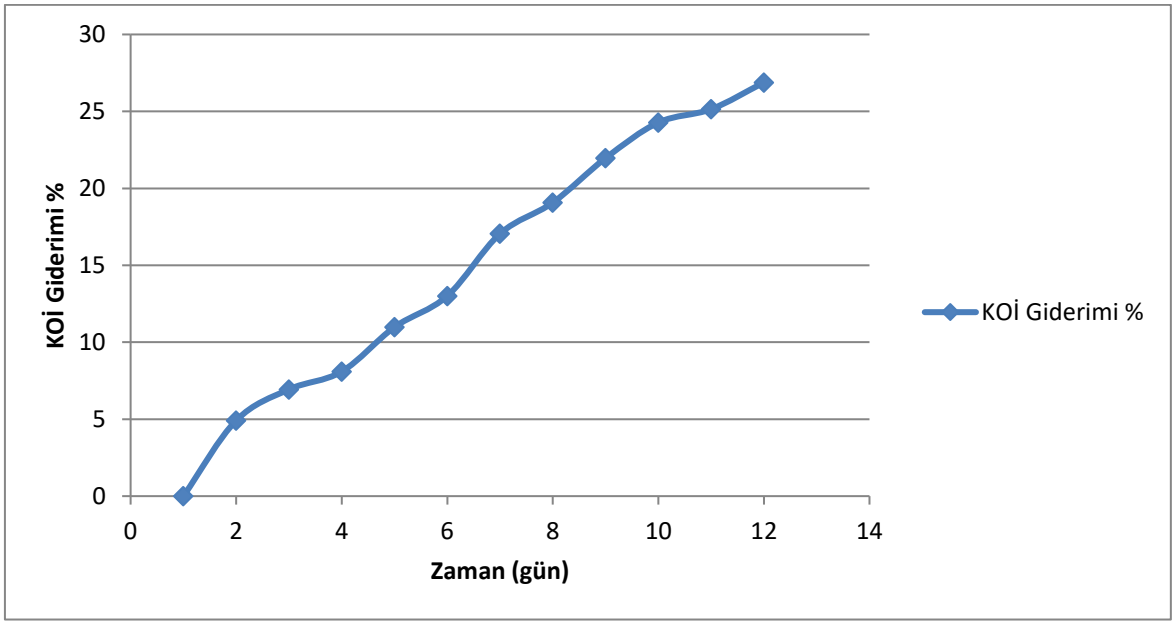


Şekil 5.30. Dikişsiz bakır elektrotların kullanılması sonucu elde edilen anot hacmine bağlı akım yoğunluğu

Şekil 5.31 MYH'de yakıt olarak kullanılan atık suyun, başlangıç değeri olan 346 mg/L KOİ'nin zamana bağlı düşüşünü göstermektedir. Şekil 5.32 ise atık sudaki KOİ gideriminin ilk güne kıyasla giderim yüzdesini vermektedir. Atık suyun artımının bir ölçüsü olan KOİ değerinin, yedinci günün sonunda %17,1'lik giderim ile 287 mg/L KOİ'ye, onuncu günün sonunda ise %24,3'lük giderim ile 262 mg/L KOİ'ye düştüğü görülmektedir. Deney süresi bitimi olan on ikinci günün sonunda ise %26,9'luk giderim ile ulaşılan son değer 252 mg/L KOİ olmuştur.



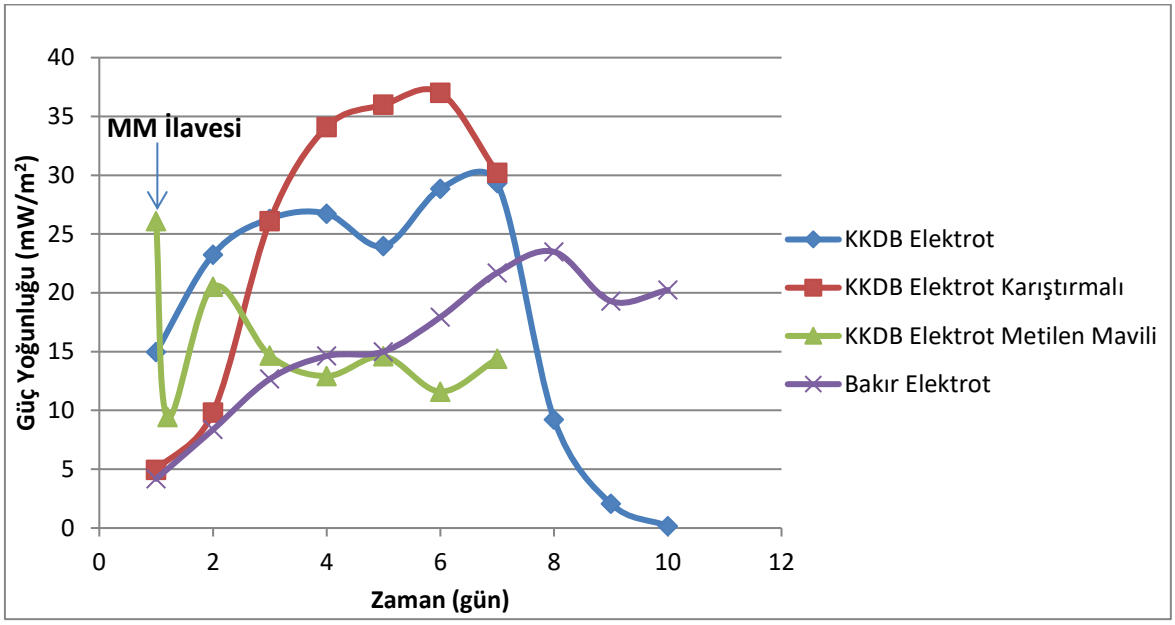
Şekil 5.31. Dikişsiz bakır elektrotlar ile KOİ değerinin zamana bağlı değişimi



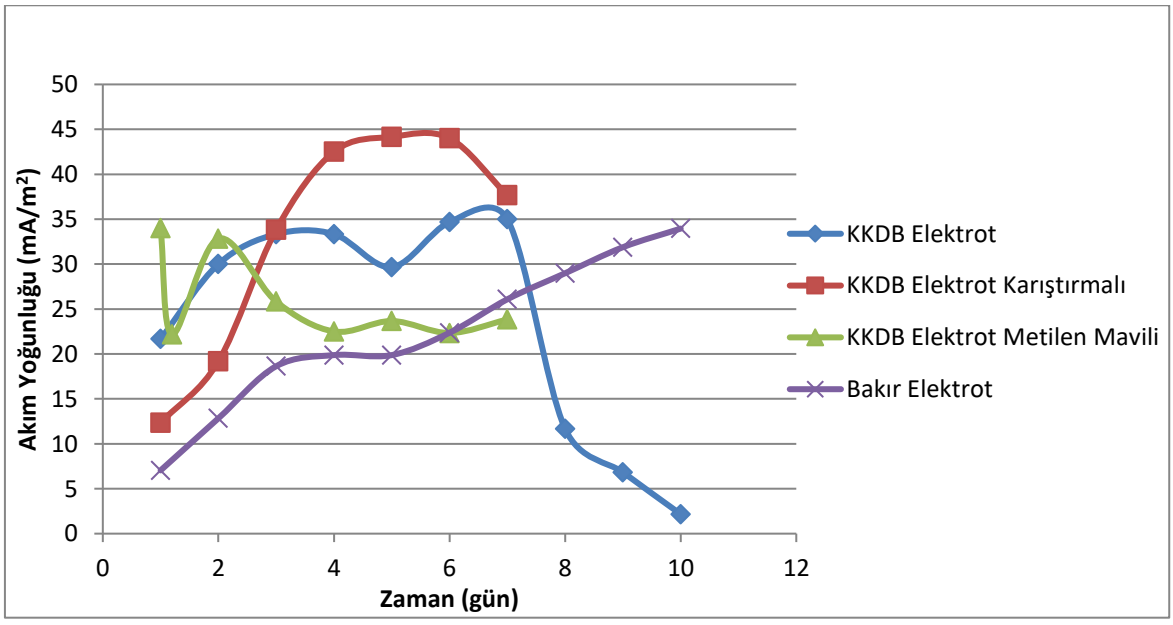
Şekil 5.32. Dikişsiz bakır elektrotlar ile zamana bağlı KOİ giderimi yüzdesi

Bölüm 2.7.4'te verilen eşitlikler ile hesaplanan kolombik verimlilik, bakır elektrotlarla yapılan bu aşamada, onuncu günün sonunda %1,85 iken onikinci günün sonunda %1,89 olarak bulunmuştur. Bu değerler onuncu günün sonunda giderilen toplam 84 mg/L ve onikinci günün sonunda giderilen toplam 93 mg/L KOİ'den elde edilebilecek en yüksek teorik elektriksel yük miktarlarının (23 706 kolomb ve 26 246 kolomb), bu sürelerde anoda iletilen toplam elektriksel yük miktarına (437 kolomb ve 496 kolomb) yüzdesel olarak oranlanması ile bulunmuştur.

Şekil 5.33 ve şekil 5.34 deneyin dört aşamasında elde edilen anoda bağlı güç ve akım yoğunluklarını göstermektedir.

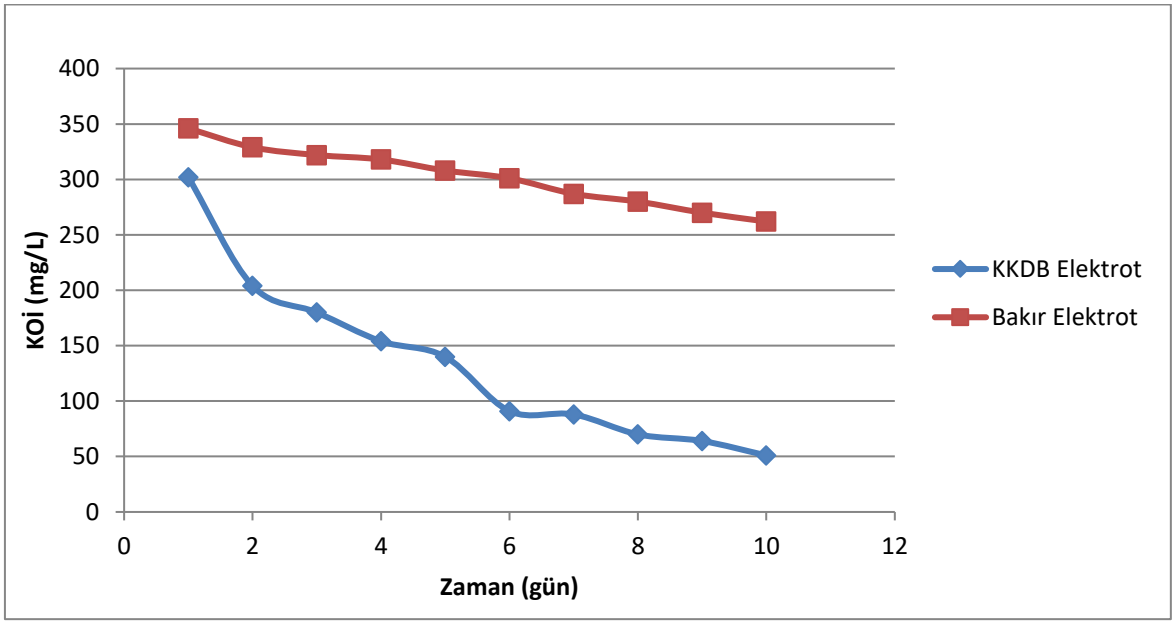


Şekil 5.33. Çalışmanın dört farklı aşamasından elde edilen anot yüzey alanına bağlı güç yoğunlukları

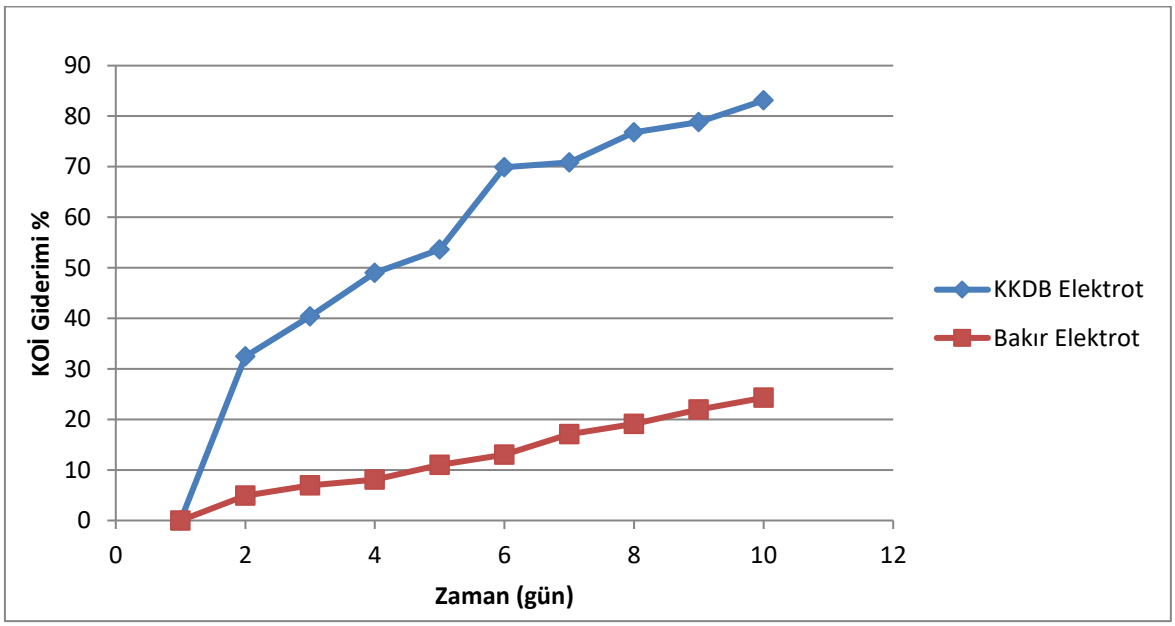


Şekil 5.34. Çalışmanın dört farklı aşamasından elde edilen anot yüzey alanına bağlı akım yoğunlukları

Şekil 5.35 ve şekil 5.36 ise KKDB ve bakır elektrotların KOİ giderimi ve KOİ giderim yüzdelerini sunmaktadır.



Şekil 5.35. KKDB ve bakır elektrotların KOİ giderimi



Şekil 5.36. KKDB ve bakır elektrotların KOİ giderimi yüzdesi

Elde edilen bulgular Çizelge 5.5'de bir arada sunulmuştur. KKDB elektrotlar hem elektriksel güç hem de atık su arıtım performansı bakımından, bakır elektrotlara kıyasla daha yüksek sonuçlar ortaya koymuştur. KKDB elektrotlar, bakır elektrotlara kıyasla, anot yüzey alanına bağlı güç yoğunluğunda %20, anot hacmine bağlı güç yoğunluğunda %68'lik artış

göstemiştir. Karbon kumaşın sağladığı bakteriyel tutunmaya elverişli ve daha yüksek yüzey alanı göz önüne alındığında bu sonuçlar şaşırtırcı değildir. KKDB elektrotların tek bir adet kullanılması yerine, anotun içerisine üç farklı noktadan daldırılması da anot hacminin daha etkin kullanılmasını sağlamıştır. Bu nedenle hacme bağlı güç yoğunluğunda daha yüksek farkta artış elde edilmiştir. KKDB elektrotların güç ve akım grafikleri, bakır elektrotların kullanıldığı aşama ile kıyaslandığında, bakır elektrotlardan elde edilen sonuçların görece daha dengeli olduğu görülmektedir. Bunun nedeninin KKDB elektrotlarda oluşan yüksek biyofilm yüzeyinin getirdiği daha karmaşık iyon taşınımı sürecinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Ayrıca onuncu gün sonundaki KOİ giderim yüzdelerine bakıldığında, KKDB elektrotların, bakır elektrotlara kıyasla %58,7 daha fazla giderim sağladığı görülmektedir. Bu farklılık deney sırasında anottaki bulanıklığın, KKDB elektrotlarla yüksek oranda giderilebilirken, bakır elektrotlarla, aynı süre içerisinde giderilmediği gözlemi ile de desteklenmektedir. KKDB elektrotlarda, biyofilm oluşumuna izin veren yüzey alanının, KOİ giderimini arttırdığı böylece kanıtlanmıştır.

İki elektrot kolombik etkinlik bakımından kıyaslandığında, aralarındaki fark yüksek olmasa da KKDB elektrotlardan elde edilen %1,62'lik verimlilik, bakır elektrotlardan elde edilen %1,85 değerin altında kalmıştır. KOİ giderim verimliliği daha yüksek olan KKDB elektrotların kolombik verimliliğinin daha düşük çıkması, KOİ giderimi sonucu elde edilen elektronların büyük çoğunluğunun akım üretimine katılmadığını, KOİ giderimi sırasında açığa çıkan elektronların büyük çoğunluğunun anota iletilmediğini göstermektedir. Bu da anot bölmesinde elektron iletimi ile ilgili sorunların giderilmesine yönelik iyileştirmeler yapılması gerektiğine işaret eder. Diğer yandan bakır elektrotlarla daha az KOİ giderimi yapılırken, giderilen KOİ sonucu elde edilen elektronların akım üretimine daha yüksek oranda katıldığı söylenebilir. Kolombik verimliliğin düşük çıkmasının birçok nedeni olabilir. Kolombik verimlilik, yakıt türü, derişimi ve besleme hızı, mikroorganizma kültürü, membran tipi ve kalınlığı, anolitteki oksijen derişimi gibi çeşitli parametrelerden etkilenmektedir [12, 118, 119]. En önemli etkenlerden biri, atık su çeşidine bağlı olarak, mikroorganizma kültüründe yer alan metanojenlerin, ekzoelektrojenlerle organik madde rekabetine girerek, elektrik akımı yerine metan üretimi yapmaya çalışmasıdır. Bu da MYH'de kolombik etkinliğin azalmasına neden olur [115]. MYH'lerinde gerçek atık su ile çalışıldığında karşılaşılan düşük kolombik etkinliğin genel bir sorun olduğu literatür tartışmalarında mevcuttur [121]. Daha önce yapılmış çalışmalar incelendiğinde atık su arıtımında kolombik verimliliğin %1 ve altında sonuçlar verdiği çalışmalara sıkça

rastlanabilir [120, 121, 122]. Çalışmada kullanılan atık su örneklerinin de metanojen mikroorganizmalar içerdiği bilinmektedir. Elde edilen görece düşük kolombik etkinliğin nedenlerinden birinin bu mikroorganizmalar olabileceği aşikârdır. Ayrıca her ne kadar anot ve katot bölmeleri arasındaki membran, katoda beslenen havanın anoda geçişi için fiziksel bir bariyer olsa da belirli oranda oksijen difüzyonu, membran tipine bağlı olarak gerçekleşmektedir. Bu oksijen, anot bölmesindeki elektronları tüketmesi, aerobik solunum yapan mikroorganizmaların büyümesini teşvik ederek substrat kaybını arttırması ve zorunlu anaerobların büyümesini engelleyerek, kolombik verimde düşüşe neden olur [131]. Bu dezavantajların giderilmesi üzerine çalışarak görece yüksek kolombik verimliliğe ulaşmış, gerçek atık su kullanılan çalışmalar da göz ardı edilmemelidir [123, 124, 125].

Çizelge 5.5. Çalışmadan elde edilen sonuçlar

	KKDB Elektrot	KKDB ve 425±25 rpm Manyetik Karıştırma	KKDB ve 300 µM Metilen Mavisi	Bakır Elektrot
Deney Süresi (Gün)	10	7	7	12
Başlangıç KOİ Değeri (mg/L)	302	312	322	346
% KOİ Giderimi (Onuncu Gün Sonu)	83	-	-	24,3
KOİ Değeri (Onuncu Gün Sonu) (mg/L)	51	-	-	262
% Kolombik Verimlilik (Onuncu Gün Sonu)	1,62	-	-	1,85
En Yüksek Güç (mW)	1,76	2,22	1,23	0,57
En Yüksek Güç Yoğunluğu (mW/m^2)	29,33	37	24,6	23,5
En Yüksek Güç Yoğunluğu (mW/m^3)	75,2	94,9	63,1	24,2
En Yüksek Gerilim (mV)	838	841	719,3	832
En Yüksek Akım (mA)	2,1	2,65	1,71	0,82
En Yüksek Akım Yoğunluğu (mA/m^2)	35	44,2	32,8	34
En Yüksek Akım Yoğunluğu (mA/m^3)	89,7	113,2	84,2	35

Bu çalışmada elde edilen bulguların, ortak parametreler içeren, benzer çalışmalar ile kıyaslanabilmesi için çeşitli literatür çalışmalarının özeti, çizelge 5.6'da sunulmuştur.

Çizelge 5.6. Çeşitli literatür çalışmalarında kullanılan MYH yapısı ve elde edilen performans değerleri

	MYH	Elektrot	İşletme Şartları	Güç Yoğunluğu	KOİ Giderimi	Kolombik Etkinlik
Kentsel Atık Su [Bu çalışma]	İki Odacıklı	KKDB Elektrot		29,33 mW/m^2 75,2 mW/m^3	%83	
			400rpm	37 mW/m^2 94,9 mW/m^3		
			300µM MM	24,6 mW/m^2 63,1 mW/m^3		
		Bakır Elektrot		23,5 mW/m^2 24,2 mW/m^3	%26,9	
Kentsel Atık Su [122]	İki Odacıklı	Grafit Çubuk		25 mW/m^2	%30	%0,25
Kentsel Atık Su [126]	Hava Katot	Grafit Çubuk		26 mW/m^2		<%12
Aktif Çamur [127]	İki Odacıklı	Bakır Örgü Anot, Bakır Çubuk Katot	Manyetik Karıştırma	79,4 W/m^3		
İnsan Dışkısı Atık Su [128]	İki Odacıklı	Karbon Kâğıt (%40 Pt Katot)		70 mW/m^2	%88	%3,4
Okyanus Suyu ve Tortusu [45]	Bentik	Karbon Kumaş Üzerine İşlenmiş Ti		2,55 W/m^2		
Evsel Atık Su [130]	Tek Odacıklı	Karbon Kumaş (0,5 mg/cm^2 Pt Katot)		320 mW/m^2		

Çizelge 5.6. (devam) Çeşitli literatür çalışmalarında kullanılan MYH yapısı ve elde edilen performans değerleri

	MYH	Elektrot	İşletme Şartları	Güç Yoğunluğu	KOİ Giderimi	Kolombik Etkinlik
İçki Fabrikası Atık Suyu [132]	İki Odacıklı	Grafit Plaka		45,7 ± 0,6 mW/m^2		
Sentetik Atık Su [133]	Hava Katot	Yüzey Aktif Karbon Kumaş		0,51 mW/cm^2		
Dekstroz [134]	İki Odacıklı	Retiküle Camsı Karbon	Metilen Mavisi (1 mM)	400 mW/m^2		
			Nötr Kırmızı (1 mM)	80 mW/m^2		
			Metilen Mavisi + Nötr Kırmızı (0,5 + 0,5 mM)	500 mW/m^2		
Evsel Atık Su [135]	Hava Katot	Karbon Kâğıt Anot, (0,5 mg/cm^2) Pt Karbon Kumaş	Membranlı	28 ± 3 mW/m^2	%28	
			Membransız	146 ± 8 mW/m^2	%20	
Kentsel Atık Su [129]	Yığın (50 Modül)	Granül Aktif Karbon			%70-90	
Mikroalg Kültürü [110]	İki Odacıklı	Grafit	100 rpm	0,73 mW/m^2		
			380 rpm	1,82 mW/m^2		
Glikoz [136]	İki Odacıklı	Polipirol Kaplı Karbon Nano Tüp	Manyetik Karıştırmalı	228 W/m^2		

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmadan elde edilen sonuçlar aşağıda maddeler halinde verilmiştir:

- Mikrobiyal yakıt hücreleri, yakıt olarak atık su kullanılması durumunda, hem atık su arıtım tesislerindeki yüksek yatırım ve işletme maliyetlerine, hem de dünyamızda giderek artan temiz enerji gereksinimine çözüm olması için umut vaat edicidir.
- MYH'lerinin enerji kaynağı olarak kullanılması ise tasarım, maliyet etkinliği ve performans verimliliğinde yapılacak iyileştirmeler ile mümkün olacaktır.
- Bu tez kapsamında yapılan çalışmalar, mikrobiyal yakıt hücresinde, yakıt olarak kentsel atık su kullanılması durumunda hem arıtımsal hem elektriksel verimliliği artırmaya yönelik araştırmaları içermektedir. Anot yüzey alanını karbon kumaş kullanarak artırmak, bakteriyel tutunmaya yardımcı olarak, biyofilm oluşumu üzerinde olumlu etki yaratmış, beklendiği gibi hem arıtımsal hem de elektriksel verimliliği artırmıştır.
- Anotta yapılan manyetik karıştırmanın, biyofilm bozunmasına neden olmayacak şekilde ayarlanması ile elektriksel verimliliğin artırılabileceği kanıtlanmıştır.
- Tampon çözelti kullanımı olmadan, medyatör olarak metilen mavisi kullanımının ise, biyofilm üzerinde bozunmaya neden olan pH değişimi yaratması, elektriksel verimliliği olumsuz etkilemiştir.

Bu çalışmadan elde edilen sonuçlar göz önüne alınarak, ileride yapılacak çalışmalarda:

- Kullanılan MYH'de, tasarımın getirdiği avantaj ve dezavantajların daha net anlaşılabilmesi için, benzer çalışma koşullarında farklı MYH konfigürasyonlarında çalışılarak, sonuçlar karşılaştırılabilir.
- Bakır uzun süreli işletim sürelerinde, anottaki mikroorganizmalar için zehirleyici etkiye sahip olabilir. Bu nedenle sürekli besleme yapılacak süreçlerde, bakır yerine karbon kumaşa titanyum gibi daha az korozif materyallerin dikilerek kullanılması önerilmektedir.

- Bu çalışmada, MYH'de atık su arıtımında karıştırmanın performans üzerine olumlu etkisi kesin bir şekilde gözlenmiştir. Benzer anot tasarımında farklı karıştırma hızlarının kullanılması ile optimizasyon çalışması yapılabilir. Karbon kumaşın sağladığı, bakteriyel tutunmaya elverişliliğin olmadığı elektrotlarda, karıştırma hızının biyofilm üzerine daha olumsuz etkide bulunabileceği unutulmamalıdır.
- Kullanılan MYH'de, membranın tabana paralel konumlanmasının, manyetik karıştırma kullanılan aşama için ek üstünlük sağladığı düşünülmektedir. Farklı katot ve membran boyutlarında benzer deneylerin yapılması, bu düşüncenin ele alınmasında etkin rol oynayabilir.
- Tampon çözelti kullanmaksızın medyatör kullanımının, peformans üzerine olumlu etki yapmasının mümkün olup olmadığı, sentetik atık sular ile saf kültür kullanılan çalışmalarla araştırılabilir. pH değişimine töleransı daha yüksek olan mikroorganizmaların, gerçek kentsel atık sular ile kullanılması sonucu elde edilen değerler daha umut vaat edici olabilir. Ayrıca farklı derişimlerde tampon çözelti kullanılan ve tampon çözelti kullanılmayan süreçler kıyaslanarak, MYH performansı için en uygun şartlar araştırılabilir. Farklı tür medyatörlerden oluşturulan çözeltiler ile tek bir medyatör kullanımından daha yüksek değerler elde edilebildiğini kanıtlayan çalışmalar mevcuttur. Bu nedenle tampon çözelti kullanımını azaltmakta olumlu etkiye neden olacak medyatör çözeltiler geliştirilebilir. Tampon çözelti konusunda bu tip bir optimizasyon, özellikle büyük ölçekli MYH arıtım sistemleri için oldukça yararlı olabilir.

KAYNAKLAR

1. T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, (2017). *Dünya ve Türkiye Enerji ve Tabii Kaynaklar Görünümü*. Ankara: Strateji Geliştirme Başkanlığı, 15.

2. Akdeniz, R. (2018, 22-24 Mart). *Türkiye'de Atık Su Arıtımı*, Uluslararası Su ve Çevre Kongresinde sunuldu, Bursa.

3. Rahmanlar, M. (2017). *Atık Su Arıtma Tesisleri ve Türkiye için Uygun Bir İşletim Yönetim Model Önerisi*, Ankara: T.C. Kalkınma Bakanlığı, 2975.

4. Yılmaz, Y. (2011). *Yakıt Pilleri Ders Notları*, T.C. Zonguldak Karaelmas Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Çevre Mühendisliği Bölümü.

5. Aelterman P., Rabaey, K., Pham, T.H., Boon, N. and Verstraete, W. (2006). Continuous Electricity Generation at High Voltages and Currents Using Stacked Microbial Fuel Cells. *Environmental Science & Technology*, 40(10), 3388–3394.

6. Logan, B.E., Aelterman, P., Hamelers, B., Rozendal, R., Schroder, U., Keller, J., Freguiac, S., Verstraete, W. and Rabaey, K. (2006). Microbial fuel cells: methodology and technology. *Environmental Science and Technology*, 40(17), 5182.

7. Potter, M.C., (1911). Electrical Effects Accompanying The Decomposition Of Organic Compounds. *Proceedings of the Royal Society*, 84, 260–276.

8. Juang, D.F., Yang, P.C., Lee, C.H., Hsueh, S.C. and Kuo, T.H. (2011). Electrogenic Capabilities of Gram Negative and Gram Positive Bacteria in Microbial Fuel Cell Combined with Biological Wastewater Treatment. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 8, 781–792.

9. Di Lorenzo, M., Scott, K., Curtis, T.P. and Head, I.M. (2010). Effect of Increasing Anode Surface Area on The Performance of A Single Chamber Microbial Fuel Cell. *Chemical Engineering Journal*, 156, 40–48.

10. Pons, L., Delia, M.L. and Bergel, A. (2011). Effect of Surface Roughness, Biofilm Coverage and Biofilm Structure on The Electrochemical Efficiency of Microbial Cathodes. *Bioresource Technology*, 102, 2678–2683.

11. Guo, K., (2014). *The Effects of Electrode Surface Modifications on Biofilm Formation and Electron Transfer in Bioelectrochemical Systems*. Unpublished PhD thesis, School of Advanced Water Management Centre, The University of Queensland. Australia.

12. Choudhury, P., Uday, U.S.P., Mahata, N., Tiwari, O.N., Ray, R.N., Bandyopadhyay, T.K. and Bhunia, B. (2017). Performance Improvement of Microbial Fuel Cells for Wastewater Treatment Along with Value Addition: A Review on Past Achievements and Recent Perspectives. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 79, 372-389.

13. Liu, H., Grot, S. and Logan, B.E. (2005). *Electrochemically Assisted Microbial Production of Hydrogen from Acetate*. Unpublished PhD thesis, Penn State University, Pennsylvania.

14. Kim, B.H., Chang, I. S. and Moon, H. (2006). Microbial Fuel Cell-Type Biochemical Oxygen Demand Sensor, Bioelectrochemistry Laboratory, Water Environment & Remediation Research Center. *Korea Institute of Science and Technology*, 27-28.

15. Ivars-Barceló, F., Zuliani, A., Fallah, M., Mashkour, M., Rahimnejad, M. and Luque, R. (2018). Review Novel Applications of Microbial Fuel Cells in Sensors and Biosensors. *Applied Sciences*, 2(2), 128-132.

16. Bond, D. R., Holmes, D. E., Tender, L. M. and Lovley, D. R. (2002). Electrode-Reducing Microorganisms That Harvest Energy from Marine Sediments. *Science*, 295, 483-485.

17. Zhen, G., Lu, X., Kumar, G., Bakonyi, P., Xu, K. and Zhao, Y. (2017). Microbial Electrolysis Cell Platform For Simultaneous Waste Biorefinery and Clean Electrofuels Generation: Current Situation. *Challenges And Future Perspectives. Progress in Energy and Combustion Science*, 63, 119–145.

18. Guangyin, Z. and Youcai, Z. (2017). Pollution Control and Resource Recovery for Sewage Sludge. *Elsevier*, 196-197.

19. İşgenç, F., (2018). *Atıksu Arıtma Tesislerinde Enerji Yönetimi*, İzmir: TMMOB Elektrik Mühendisleri Odası, 33-35.

20. Birleşmiş Milletler (2015, Mart). *Sürdürülebilir Bir Dünya İçin Su*, Birleşmiş Milletler Dünya Su Gelişim Raporu, Paris, 8-9.

21. Samsunlu, A. (2018, Nisan). Atıksu Arıtımında Yenilenebilir Enerji Kullanımı. *Su ve Çevre Dergisi*, 117, 22-24.

22. Gude, V. G., Kundu, P. P. and Dutta K. (2018). Progress and Recent Trends in Microbial Fuel Cells. *Microbial Fuel Cells as a Platform Technology for Sustainable Wastewater Treatment*. Elsevier, 375.

23. Özpek, Ö. (2012). *Atıksu kullanılarak mikrobiyal yakıt hücresi ile elektrik üretimi*, Yayımlanmamış Yüksek Lisans Tezi, T.C Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.

24. Nandy, A., Kundu, P. P. and Dutta K. (2018). Progress and Recent Trends in Microbial Fuel Cells. *Configurations of Microbial Fuel Cells.* Elsevier, 25-40.

25. Kim, J. R., Cheng, S., Oh, S. and Logan, B. E. (2007). Power Generation Using Different Cation, Anion and Ultrafiltration Membranes in Microbial Fuel Cells. *Environmental Science & Technology*, 41, 1004-1009.

26. Liu, H. and Logan, B. E. (2004). Elecrticity Generation Using an Air-Cathode Single Chamber Microbial Fuel Cell in the Presence and Absence of a Proton Exchange Membrane. *Environmental Science & Technology*, 38, 4040-4046.

27. Lawati, M. J. A., Jafary, T., Baawain M. S. and Mamun, A. (2019). Biocatalysis and Agricultural Biotechnology. *A mini review on biofouling on air cathode of single chamber microbial fuel cell; prevention and mitigation strategies.* Elsevier, 52-57.

28. Jang, J. K., Pham, T. H., Chang, I. S., Kang, K. H., Moon, H., Cho, K. S. and Kim, B. H. (2004). Construction and operation of a novel mediator and membrane-less microbial fuel cell.. *Process Biochemistry*, 39(8), 1007–1012.

29. Ghangrekar, M. M. and Shinde, V. B. (2007). Performance of membrane-less microbial fuel cell treating wastewater and effect of electrode distance and area on electricity production. *Bioresource Technology*, 98(15), 2879–2885.

30. Logan, B. E., Murano, C., Scott, K., Gray, N. D., and Head, I. M. (2005). Electricity generation from cysteine in a microbial fuel cell. *Water Research*, 39(5), 942–952.

31. Mahlanhu, W. M. (2015). *Design, construction and operation of a membrane and mediator-less Microbial Fuel Cell to generate electrical energy from artificial wastewater with a concomitant bio-remediation of the wastewater*. Unpublished master thesis, Faculty of Science, University of the Witwatersrand, Johannesburg.

32. Min, B. and Logan, B. E. (2004). Continuous Electricity Generation from Domestic Wastewater and Organic Substrates in a Flat Plate Microbial Fuel Cell. *Environmental Science & Technology*, 38, 5809-5814.

33. Liu, L. and Choi, S. (2017). Self-Sustaining, Solar-Driven Bioelectricity Generation in Micro-Sized Microbial Fuel Cell Using Co-Culture of Heterotrophic and Photosynthetic Bacteria. *Journal of Power Sources*, 348, 138–144.

34. Subha, C., Kavitha, S., Abisheka, S., Tamilarasan, K., Arulazhagan, P. and Rajesh, B. J. (2019). Bioelectricity Generation and Effect Studies From Organic Rich Chocolaterie Wastewater Using Continuous Upflow Anaerobic Microbial Fuel Cell. *Fuel*, 251, 224–232.

35. Deng, Q., Li, X., Zuo, J., Ling, A. and Logan, B. E. (2010). Power generation using an activated carbon fiber felt cathode in an upflow microbial fuel cell. *Journal of Power Sources*, 195(4), 1130–1135.

36. Zhang, L., Li, J., Zhu, X., Ye, D., Fu, Q. and Liao, Q. (2017). Response of Stacked Microbial Fuel Cells with Serpentine Flow Fields to Variable Operating Conditions. *International Journal of Hydrogen Energy*, 42(45), 27641–27648.

37. Estrada-Arriaga, E. B., Hernández-Romano, J., García-Sánchez, L., Guillén Garcés, R. A., Bahena-Bahena, E. O., Guadarrama-Pérez, O. and Moeller Chavez, G. E. (2018). Domestic Wastewater Treatment and Power Generation in Continuous Flow Air-Cathode Stacked Microbial Fuel Cell: Effect of Series and Parallel Configuration. *Journal of Environmental Management*, 214, 232–241.

38. Mahdi, M. M., Nasr, E. M., Behzad, T. and Sedaqatvand, R. (2012). Single Chamber Microbial Fuel Cell with Spiral Anode for Dairy Wastewater Treatment. *Biosensors and Bioelectronics*, 38(1), 264–269.

39. Fernando, E., Keshavarz, T., Kyazze, G. and Fonseka, K. (2016). Treatment of Colour Industry Wastewaters with Concomitant Bioelectricity Production in A Sequential Stacked Monochamber Microbial Fuel Cells-Aerobic System. *Environmental Technology*, 37:255–264.

40. Zhang, L., He, W., Yang, J., Sun, J., Li, H., Han, B., Zhao, S., Shi, Y., Feng, Y., Tang, Z. and Liu, S. (2018). Bread-Derived 3D Macroporous Carbon Foams as High Performance Free-Standing Anode in Microbial Fuel Cells. *Biosensors and Bioelectronics*, 48-55.

41. Estrada-Arriaga, E., Guillen-Alonso, Y., Morales-Morales, C., Garcı´a-Sa´nchez, L., Bahena-Bahena, E., Guadarrama-Pe´rez, O. and Loyola-Morales, F. (2016). Performance of Air-Cathode Stacked Microbial Fuel Cells Systems for Wastewater Treatment and Electricity Production Performance of Air-Cathode Stacked Microbial Fuel Cells Systems for Wastewater Treatment and Electricity Production. *Water Science Technology*, 3–4:683–693.

42. Estrada-Arriaga, E., Guillen-Alonso, Y., Morales-Morales, C., Garcı´a-Sa´nchez, L., Bahena-Bahena, E., Guadarrama-Pe´rez, O. and Loyola-Morales, F. (2016). Performance of Air-Cathode Stacked Microbial Fuel Cells Systems for Wastewater Treatment and Electricity Production Performance of Air-Cathode Stacked Microbial Fuel Cells Systems for Wastewater Treatment and Electricity Production. *Water Science Technology*, 3–4:683–693.

43. Logan, B. E. and Cheng, S. (2007). Graphite Fiber Brush Anodes for Increased Power Production In Air-Cathode Microbial Fuel Cells. *Environmental Science & Technology*, 41 (9), 3341–3346.

44. Wang, X., Cheng, S., Feng, Y., Merrill, M. D., Saito, T. and Logan, B. E. (2009). Use of Carbon Mesh Anodes and the Effect of Different Pretreatment Methods on Power Production in Microbial Fuel Cells. *Environmental Science & Technology,* 43(17), 6870–6874.

45. Liu, B., Williams, I., Li, Y., Wang, L., Bagtzoglou, A., McCutcheon, J. and Li, B. (2016). Towards High Power Output of Scaled-Up Benthic Microbial Fuel Cells (BMFCS) Using Multiple Electron Collectors. *Biosensors and Bioelectronics,* 79, 435–441.

46. Dumitru, A. and Scott, K. (2016). Anode Materials for Microbial Fuel Cells. *Microbial Electrochemical and Fuel Cells,* 117–152.

47. Heijne, A. T., Liu, F., Weijden, R. V. D., Weijma, J., Buisman, C. J. N. and Hamelers, H. V. M. (2010). Copper Recovery Combined with Electricity Production in a Microbial Fuel Cell. *Environmental Science & Technology,* 44(11), 4376–4381.

48. Liu, H., Ramnarayanan, R. and Logan, B. E. (2004). Production of Electricity During Wastewater Treatment Using A Single Chamber Microbial Fuel Cell. *Environmental Science & Technology*, 38 (7), 2281–2285.

49. Pinto, D., Coradin, T. and Laberty-Robert, C. (2018). Effect of Anode Polarization on Biofilm Formation and Electron Transfer in Shewanella Oneidensis/Graphite Felt Microbial Fuel Cells. *Bioelectrochemistry,* 120, 1–9.

50. Dumas, C., Basseguy, R. and Bergel, A. (2008). Electrochemical Activity of Geobacter Sulfurreducens Biofilms on Stainless Steel Anodes. *Electrochimica Acta,* 53, 5235–5241.

51. Ter, H. A., Hamelers, H. V. M., Saakes, M. and Buisman, C. J. N. (2008). Performance of Non-Porous Graphite and Titanium-Based Anodes in Microbial Fuel Cells. *Electrochimica Acta*, 53(18), 5697–5703.

52. Chu, N., Liang, Q., Jiang, Y. and Zeng, R. J. (2019). Microbial Electrochemical Platform For The Production of Renewable Fuels and Chemicals. *Biosensors and Bioelectronics*, 111-112.

53. Öztürk, İ., Timur, H. ve Koşkan, U., (2005). *Atıksu Arıtımının Esasları-Evsel, Endüstriyel Atıksu Arıtımı ve Arıtma Çamurlarının Kontrolü* (İkinci Baskı). Ankara: T.C. Çevre ve Orman Bakanlığı, 275-276.

54. Öztürk, İ., Çallı, B., Arıkan, O., Altınbaş, M., (2015). *Atıksu Arıtma Çamurlarının İşlenmesi ve Bertarafı* (Birinci Baskı). Ankara: Türkiye Belediyeler Birliği, 113.

55. Mohd, Y. M. Z., Hu, A., Feng, C., Maeda, T., Shirai, Y., Hassan, M. A. and Yu, C. P. (2013). Influence of Pretreated Activated Sludge for Electricity Generation in Microbial Fuel Cell Application. *Bioresource Technology*, 145, 90–96.

56. Rashid, N., Cui, Y. F., Saif, U. R. M. and Han, J. I. (2013). Enhanced Electricity Generation by Using Algae Biomass and Activated Sludge in Microbial Fuel Cell. *Science of The Total Environment*, 456-457, 91–94.

57. Ömeroğlu, S., (2019). *Wastewater sludge in bioelectricity generation using microbial fuel cells.* Unpublished PhD thesis, The Graduate School Of Natural and Applied Sciences of Middle East Technical University, Ankara.

58. Mateo, S., Cañizares, P., Rodrigo, M. A. and Fernandez-Morales, F. J. (2018). Driving Force Behind Electrochemical Performance of Microbial Fuel Cells Fed with Different Substrates. *Chemosphere*, 207, 313–319.

59. Herrero-Hernandez, E., Smith, T. J. and Akid, R. (2013). Electricity Generation from Wastewaters with Starch as Carbon Source Using a Mediatorless Microbial Fuel Cell. *Biosensors and Bioelectronics*, 39(1), 194–198.

60. Kundu, P. P. ve Dutta K. (Editörler). (2018). *Progress and Recent Trends in Microbial Fuel Cells*. Amsterdam: Elsevier, 167-178.

61. Varma, A., Behera, B. K. (2016). Microbial Resources for Sustainable Energy. *Microbial Fuel Cell*, 181-189.

62. Rahimnejad, M., Najafpour, G. D., Ghoreyshi, A. A., Shakeri, M. and Zare, H. (2011). Methylene Blue As Electron Promoters in Microbial Fuel Cell. *International Journal of Hydrogen Energy*, 36(20), 13335–13341.

63. Lin, C. W., Wu, C. H., Chiu, Y. H. and Tsai, S. L. (2014). Effects of Different Mediators on Electricity Generation and Microbial Structure of A Toluene Powered Microbial Fuel Cell. *Fuel*, 125, 30–35.

64. Wei, L., Han, H. and Shen, J. (2012). Effects of Cathodic Electron Acceptors and Potassium Ferricyanide Concentrations on The Performance of Microbial Fuel Cell. *International Journal of Hydrogen Energy*, 37(17), 12980–12986.

65. Erenler, A. Ş. ve Ülke, E. N. (2018). Mikrobiyal Yakıt Hücre Teknolojisini Kullanarak Gıda Endüstrisi Atıklarından Elektrik Enerjisi Üretimi. *Batman Üniversitesi Yaşam Bilimleri Dergisi*, 8(2), 7-12.

66. Christwardana, M., Frattini, D., Accardo, G., Yoon, S. P. and Kwon, Y. (2018). Effects of Methylene Blue and Methyl Red Mediators on Performance of Yeast Based Microbial Fuel Cells Adopting Polyethylenimine Coated Carbon Felt as Anode. *Journal of Power Sources*, 396, 1–11.

67. Park, D. H. and Zeikus, J. G. (2002). Improved Fuel Cell and Electrode Designs for Producing Electricity from Microbial Degradation. *Biotechnology and Bioengineering*, 81 (3), 348-355.

68. Sevda, S. and Sreekrishnan, T. R., (2012). Effect of Salt Concentration and Mediators in Salt Bridge Microbial Fuel Cell for Electricity Generation from Synthetic Wastewater. *Journal of Environmental Science and Health, Part A Toxic/Hazardous Substances and Environmental Engineering*, 47 (6), 878-886.

69. Rahimnejad, M., Najafpour, G. D., Ghoreyshi, A. A., Shakeri, M. and Zare, H. (2011). Methylene Blue as Electron Promoters in Microbial Fuel Cell. *International Journal of Hydrogen Energy*, 36(20), 13335–13341.

70. Rossi, R., Fedrigucci, A., Setti, L., (2015). Characterization of Electron Mediated Microbial Fuel Cell by Saccharomyces Cerevisiae. *Chemical Engineering Transactions.* 43, 337-342.

71. Öztürk, M. and Onat, T. A. (2017). The Usage of Molasses and Mediators in Microbial Fuel Cells. *Journal of the Turkish Chemical Society, Section B: Chemical Engineering*, 77–84.

72. Uno, M., Phansroy, N., Aso, Y. and Ohara, H. (2017). Starch-Fueled Microbial Fuel Cells by Two-Step and Parallel Fermentation Using Shewanella Oneidensis MR-1 and Streptococcus Bovis 148. *Journal of Bioscience and Bioengineering*, 124(2), 189–194.

73. Takeuchi, Y., Khawdas, W., Aso, Y. and Ohara, H. (2017). Microbial Fuel Cells Using Cellulomonas Spp with Cellulose as Fuel. *Journal of Bioscience and Bioengineering*, 123(3), 358–363.

74. Khawdas, W., Watanabe, K., Karatani, H., Aso, Y., Tanaka, T. and Ohara, H. (2019). Direct Electron Transfer of Cellulomonas Fimi and Microbial Fuel Cells Fueled by Cellulose. *Journal of Bioscience and Bioengineering*, 25-32.

75. Catal, T., Liu, H., Fan, Y. and Bermek, H. (2018). A Clean Technology to Convert Sucrose and Lignocellulose in Microbial Electrochemical Cells into Electricity and Hydrogen. *Bioresource Technology Reports*, 102-106.

76. Gurav, R., Bhatia, S. K., Choi, T. R., Jung, H. R., Yang, S. Y., Song, H. S., Yang, Y. H. (2019). Chitin Biomass Powered Microbial Fuel Cell for Electricity Production Using Halophilic Bacillus Circulans BBL03 Isolated from Sea Salt Harvesting Area. *Bioelectrochemistry*, 130, 107-329.

77. Sun, M., Mu, Z. X., Sheng, G. P., Shen, N., Tong, Z. H., Wang, H. L. and Yu, H. Q. (2010). Hydrogen Production from Propionate in A Biocatalyzed System with In-Situ Utilization of The Electricity Generated from A Microbial Fuel Cell. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 64(5), 378–382.

78. Ebadinezhad, B., Ebrahimi, S. and Shokrkar, H. (2019). Evaluation of Microbial Fuel Cell Performance Utilizing Sequential Batch Feeding of Different Substrates. *Journal of Electroanalytical Chemistry*, 55-78.

79. Kim, J., Jung, S., Regan, J. and Logan, B. (2007). Electricity Generation and Microbial Community Analysis of Alcohol Powered Microbial Fuel Cells. *Bioresource Technology*, 98(13), 2568–2577.

80. Nimje, V. R., Chen, C. Y., Chen, C. C., Chen, H. R., Tseng, M. J., Jean, J. S. and Chang, Y. F. (2011). Glycerol Degradation in Single-Chamber Microbial Fuel Cells. *Bioresource Technology*, 102(3), 2629–2634.

81. Szollosi, A., Nguyen, Q. D., Kovacs, A. G., Fogarasi, A. L., Kun, S. and Hegyesne-Vecseri, B. (2016). Production of Low or Non-Alcoholic Beer in Microbial Fuel Cell. *Food and Bioproducts Processing*, 98, 196–200.

82. Köroğlu, E. O., Özkaya, B., Denktaş, C. and Çakmakci, M. (2014). Electricity Generating Capacity and Performance Deterioration of A Microbial Fuel Cell Fed with Beer Brewery Wastewater. *Journal of Bioscience and Bioengineering*, 118(6), 672–678.

83. Wen, Q., Wu, Y., Cao, D., Zhao, L. and Sun, Q. (2009). Electricity Generation and Modeling of Microbial Fuel Cell from Continuous Beer Brewery Wastewater. *Bioresource Technology*, 100(18), 4171–4175.

84. Zhang, G., Zhao, Q., Jiao, Y., Wang, K., Lee, D. J. and Ren, N. (2012). Biocathode Microbial Fuel Cell for Efficient Electricity Recovery from Dairy Manure. *Biosensors and Bioelectronics*, 31(1), 537–543.

85. Faria, A., Gonçalves, L., Peixoto, J. M., Peixoto, L., Brito, A. G. and Martins, G. (2017). Resources Recovery in The Dairy Industry: Bioelectricity Production Using A Continuous Microbial Fuel Cell. *Journal of Cleaner Production*, 140, 971–976.

86. Mansoorian, H. J., Mahvi, A. H., Jafari, A. J. and Khanjani, N. (2016). Evaluation of Dairy Industry Wastewater Treatment and Simultaneous Bioelectricity Generation in A Catalyst-Less and Mediator-Less Membrane Microbial Fuel Cell. *Journal of Saudi Chemical Society*, 20(1), 88–100.

87. Asefi, B., Li, S. L., Moreno, H. A., Sanchez-Torres, V., Hu, A., Li, J. and Yu, C. P. (2019). Characterization of Electricity Production and Microbial Community of Food Waste-fed Microbial Fuel Cells. *Process Safety and Environmental Protection*, 2(2), 92-106.

88. Mansoorian, H. J., Mahvi, A. H., Jafari, A. J., Amin, M. M., Rajabizadeh, A. and Khanjani, N. (2013). Bioelectricity Generation Using Two Chamber Microbial Fuel Cell Treating Wastewater from Food Processing. *Enzyme and Microbial Technology*, 52(6-7), 352–357.

89. Xin, X., Ma, Y. and Liu, Y. (2018). Electric Energy Production From Food Waste: Microbial Fuel Cells Versus Anaerobic Digestion. *Bioresource Technology*, 255, 281–287.

90. Faria, A., Gonçalves, L., Peixoto, J. M., Peixoto, L., Brito, A. G. and Martins, G. (2017). Resources Recovery in The Dairy Industry: Bioelectricity Production Using A Continuous Microbial Fuel Cell. *Journal of Cleaner Production*, 140, 971–976.

91. Rivera, I., Bakonyi, P., Cuautle-Marín, M. A. and Buitrón, G. (2017). Evaluation of Various Cheese Whey Treatment Scenarios in Single-Chamber Microbial Electrolysis Cells for Improved Biohydrogen Production. *Chemosphere*, 174, 253–259.

92. Tremouli, A., Antonopoulou, G., Bebelis, S. and Lyberatos, G. (2013). Operation and Characterization of A Microbial Fuel Cell Fed with Pretreated Cheese Whey at Different Organic Loads. *Bioresource Technology*, 131, 380–389.

93. Ismail, Z. Z. and Habeeb, A. A. (2017). Experimental and Modeling Study of Simultaneous Power Generation and Pharmaceutical Wastewater Treatment in Microbial Fuel Cell Based on Mobilized Biofilm Bearers. *Renewable Energy*, 101, 1256–1265.

94. Liu, R., Gao, C., Zhao, Y. G., Wang, A., Lu, S., Wang, M., Huang, Q. (2012). Biological Treatment of Steroidal Drug Industrial Effluent and Electricity Generation in The Microbial Fuel Cells. *Bioresource Technology*, 123, 86–91.

95. Üçgül, İ. ve Yılmaz, F., (2015). Tekstil Atık Suları Kullanarak Mikrobiyal Yakıt Hücresi ile Elektrik Üretiminin Araştırılması. *Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 20(2), 22-36.

96. Huang, L. and Logan, B. E. (2008). Electricity Generation and Treatment of Paper Recycling Wastewater Using A Microbial Fuel Cell. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 80(2), 349–355.

97. Huang, L., Cheng, S., Rezaei, F. And Logan, B. E. (2009). Reducing Organic Loads in Wastewater Effluents from Paper Recycling Plants Using Microbial Fuel Cells. *Environmental Technology*, 30(5), 499–504.

98. Mise, S. R. and Saware. S., (2016). Electricity Generation Using Textile Wastewater by Single Chambered Microbial Fuel Cell. International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET), 3(2), 133-198.

99. Zuo, Y., Maness, P. C. and Logan, B. E. (2006). Electricity Production from Steam-Exploded Corn Stover Biomass. *Energy & Fuels*, 20(4), 1716–1721.

100. Carvalho, W., Silva, S. S., Converti, A. and Vitolo, M. (2002). Metabolic Behavior of Immobilized *Candida Guilliermondii* Cells During Batch Xylitol Production From Sugarcane Bagasse Acid Hydrolyzate. *Biotechnology and Bioengineering*, 79(2), 165–169.

101. Wang, R., Dominguez-Espinosa, R. M., Leonard, K., Koutinas, A. and Webb, C. (2002). The Application of A Generic Feedstock from Wheat for Microbial Fermentations. *Biotechnology Progress*, 18(5), 1033–1038.

102. Marashi, S. K. F. and Kariminia, H. R. (2012). Electricity Generation from Petrochemical Wastewater Using A Membrane-Less Single Chamber Microbial Fuel Cell. *2012 Second Iranian Conference on Renewable Energy and Distributed Generation*, 2(2), 78-155.

103. Sarmin, S., Ethiraj, B., Islam, M. A., Ideris, A., Yee, C. S. and Khans, M. M. R. (2019). Bio-Electrochemical Power Generation in Petrochemical Wastewater Fed Microbial Fuel Cell. *Science of The Total Environment*, 133-820.

104. Puig, S., Serra, M., Coma, M., Balaguer, M. D. and Colprim, J. (2011). Simultaneous Domestic Wastewater Treatment and Renewable Energy Production Using Microbial Fuel Cells (MFCs). *Water Science and Technology*, 64(4), 904–909.

105. Tatinclaux, M., Gregoire, K., Leininger, A., Biffinger, J. C., Tender, L., Ramirez, M., Kjellerup, B. V. (2018). Electricity Generation from Wastewater Using a Floating Air Cathode Microbial Fuel Cell. *Water-Energy Nexus*, 277-289.

106. Araneda, I., Tapia, N., Lizama Allende, K. and Vargas, I. (2018). Constructed Wetland-Microbial Fuel Cells for Sustainable Greywater Treatment. *Water*, 10(7), 940.

107. Colombo, A., Schievano, A., Trasatti, S. P., Morrone, R., D'Antona, N. and Cristiani, P. (2017). Signal Trends of Microbial Fuel Cells Fed with Different Food-Industry Residues. *International Journal of Hydrogen Energy*, 42(3), 1841–1852.

108. Nimje, V. R., Chen, C. Y., Chen, H. R., Chen, C. C., Huang, Y. M., Tseng, M. J., Chang, Y. F. (2012). Comparative Bioelectricity Production from Various Wastewaters in Microbial Fuel Cells Using Mixed Cultures and A Pure Strain Of *Shewanella Oneidensis*. *Bioresource Technology*, 104, 315–323.

109. Foad Marashi, S. K. and Kariminia, H. R. (2015). Performance of A Single Chamber Microbial Fuel Cell at Different Organic Loads and pH Values Using Purified Terephthalic Acid Wastewater. *Journal of Environmental Health Science and Engineering*, 13(1).

110. Raman, K. and Lan, J. C. W., (2012). Performance and Kinetic Study of Photo Microbial Fuel Cells (PMFCs) with Different Electrode Distances. *Applied Energy*, 100, 100–105.

111. Azman, H. E., (2005). *Evsel Atıksuların Arıtılmasında Arıtma Verimi, Enerji İlişkisinin İncelenmesi*. Yayımlanmamış yüksek lisans tezi, Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana.

112. Arceivala, S. J. (2002). *Çevre Kirliliği Kontrolünde Atıksu Arıtımı* (Çeviren: V. Balman). Ankara: Tata McGraw Hill Yayınevi. (Eserin orjinali 1986'da yayımlandı), 225-339.

113. Erdoğan, A. O., (2004). *Türkiye'de Optimum Maliyete Dayalı Atıksu Arıtma Tesisi Tasarımı*, Doktora Tezi, İTÜ, İstanbul.

114. Henze, M., Gujer, W., Mino, T., Matsuo, T., Wentzel, C. M., Marias, G., (1995). Activated Sludge Model 2 IAWQ. *Science and Technology*, 25-95.

115. Wang, Z. J., Lim, B. S., (2017). Electric Power Generation from Treatment of Food Waste Leachate Using Microbial Fuel Cell. *Enviromental Engineering Reasearch*, (22)2.

116. Sugiura, K., Hayami, H., Yamauchi, M. and Nishioka, M. (2012). Improvement of Microbial Fuel Cells Using A Mechanical Approach. *The Electrochemical Society, ECS Transactions*, (42)1.

117. Torres, C. I., Kato Marcus, A. and Rittmann, B. E. (2008). Proton Transport Inside The Biofilm Limits Electrical Current Generation by Anode-Respiring Bacteria. *Biotechnology and Bioengineering*, 100(5), 872–881.

118. Cheng, S., Liu, H. and Logan, B. E. (2006). Increased Performance of Single-Chamber Microbial Fuel Cells Using An Improved Cathode Structure. *Electrochemistry Communications*, 8(3), 489–494.

119. Bakonyi, P., Koók, L., Kumar, G., Tóth, G., Rózsenberszki, T., Nguyen, D. D. and Nemestóthy, N. (2018). Architectural Engineering of Bioelectrochemical Systems from The Perspective of Polymeric Membrane Separators: A Comprehensive Update on Recent Progress and Future Prospects. *Journal of Membrane Science*, 564, 508–522.

120. Nam, J. Y., Kim, H. W., Lim, K. H. and Shin, H. S. (2010). Effects of Organic Loading Rates on The Continuous Electricity Generation from Fermented Wastewater Using A Single-Chamber Microbial Fuel Cell. *Bioresource Technology*, 101(1), 33–37.

121. Li, X., Zhu, N., Wang, Y., Li, P., Wu, P. and Wu, J. (2013). Animal Carcass Wastewater Treatment and Bioelectricity Generation in Up-Flow Tubular Microbial Fuel Cells: Effects of HRT and Non-Precious Metallic Catalyst. *Bioresource Technology*, 128, 454–460.

122. Rodrigo, M. A., Cañizares, P., Lobato, J., Paz, R., Sáez, C. and Linares, J. J. (2007). Production of Electricity from The Treatment of Urban Waste Water Using A Microbial Fuel Cell. *Journal of Power Sources*, 169(1), 198–204.

123. Rabaey, K., Clauwaert, P., Aelterman, P. and Verstraete, W. (2005). Tubular Microbial Fuel Cells for Efficient Electricity Generation. *Environmental Science & Technology*, 39(20), 8077–8082.

124. Min, B., Kim, J., Oh, S., Regan, J. M. and Logan, B. E. (2005). Electricity Generation from Swine Wastewater Using Microbial Fuel Cells. *Water Research*, 39(20), 4961–4968.

125. Sciarria, T. P., Tenca, A., D'Epifanio, A., Mecheri, B., Merlino, G., Barbato, M. and Adani, F. (2013). Using Olive Mill Wastewater to Improve Performance in Producing Electricity from Domestic Wastewater by Using Single-Chamber Microbial Fuel Cell. *Bioresource Technology*, 147, 246–253.

126. Liu, H., Ramnarayanan, R. and Logan, B. E. (2004). Production of Electricity During Wastewater Treatment Using A Single Chamber Microbial Fuel Cell. *Environmental Science & Technology*, 38(7), 2281–2285.

127. Hayder, M. H. H., (2018), *10x10 ve 11x11cm^2'lik Membranlı Mikrobiyal Yakıt Hücresi Tasarımı, İmalatı ve Performansının Deneysel Olarak İncelenmesi*. Yayınlanmamış Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya.

128. Fangzhou, D., Zhenglong, L., Shaoqiang, Y., Beizhen, X. and Hong, L. (2011). Electricity Generation Directly Using Human Feces Wastewater for Life Support System. *Acta Astronautica*, 68(9-10), 1537–1547.

129. Liang, P., Duan, R., Jiang, Y., Zhang, X., Qiu, Y. and Huang, X. (2018). One-Year Operation of 1000 L Modularized Microbial Fuel Cell for Municipal Wastewater Treatment. *Water Research*, 141, 1–8.

130. Sivasankaran, A. and Sangeetha, D. (2015). Influence of Sulfonated SiO_2 in Sulfonated Polyether Ether Ketone Nanocomposite Membrane in Microbial Fuel Cell. *Fuel*, 159, 689–696.

131. Kim, H., Chang, I. S. and Moon, H., (2006). Microbial Fuel Cell-Type Biochemical Oxygen Demand Sensor. *Encyclopedia Of Sensors*, 15-33.

132. Samsudeen, N., Radhakrishnan, T. K. and Matheswaran, M. (2015). Bioelectricity Production from Microbial Fuel Cell Using Mixed Bacterial Culture Isolated from Distillery Wastewater. *Bioresource Technology*, 195, 242–247.

133. Zhao, F., Rahunen, N., Varcoe, J. R., Chandra, A., Avignone-Rossa, C., Thumser, A. E. and Slade, R. C. T. (2008). Activated Carbon Cloth as Anode for Sulfate Removal in A Microbial Fuel Cell. *Environmental Science & Technology*, 42(13), 4971–4976.

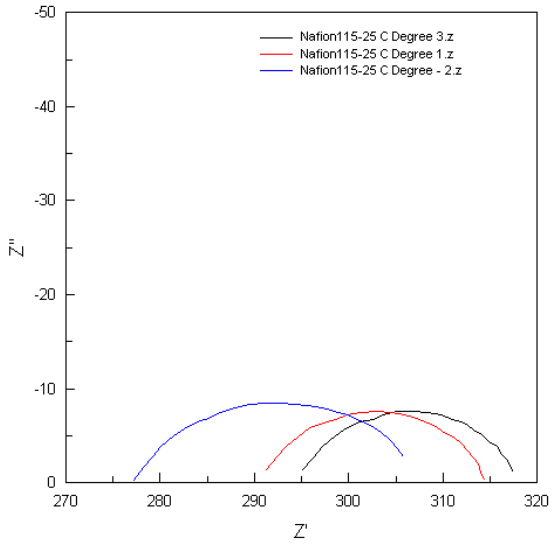
134. Wilkinson, S., Klar, J. and Applegarth, S. (2006). Optimizing Biofuel Cell Performance Using a Targeted Mixed Mediator Combination. *Electroanalysis*, 18(19-20), 2001–2007.

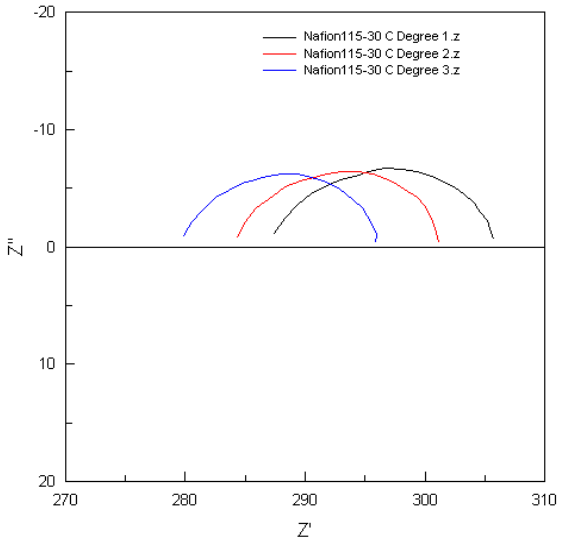
135. Liu, H. and Logan, B. E. (2004). Electricity Generation Using an Air-Cathode Single Chamber Microbial Fuel Cell in the Presence and Absence of a Proton Exchange Membrane. *Environmental Science & Technology*, 38(14), 4040–4046.

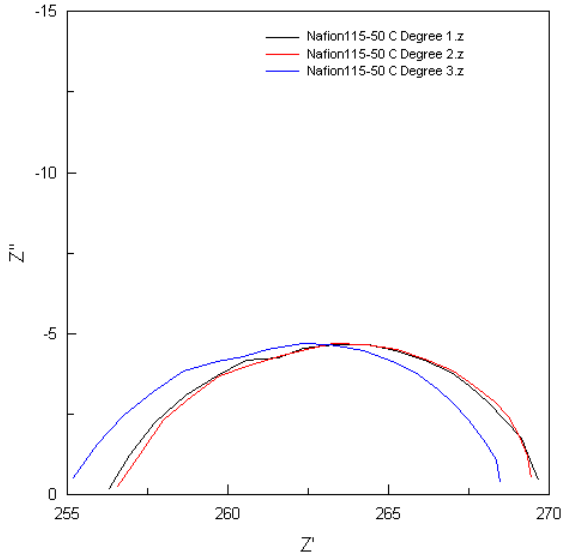
136. Zou, Y., Xiang, C., Yang, L., Sun, L. X., Xu, F. and Cao, Z. (2008). A Mediatorless Microbial Fuel Cell Using Polypyrrole Coated Carbon Nanotubes Composite as Anode Material. *International Journal of Hydrogen Energy*, 33(18), 4856–4862.

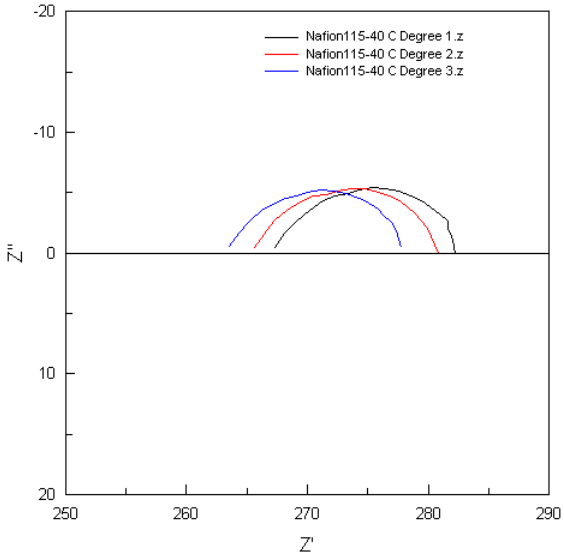
EKLER

EK-1. Nafyon 115 empedans testi sonuçları

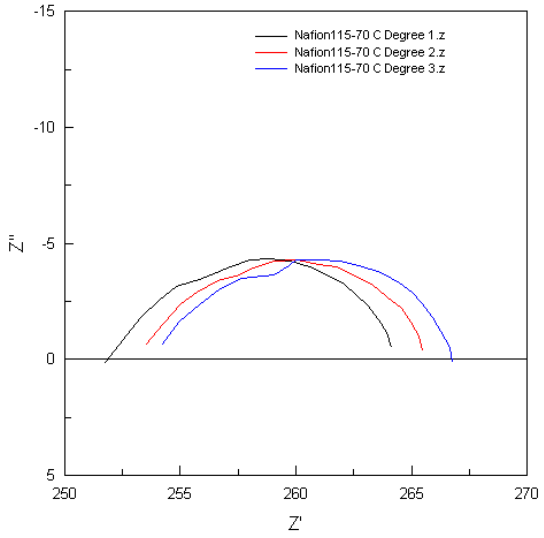


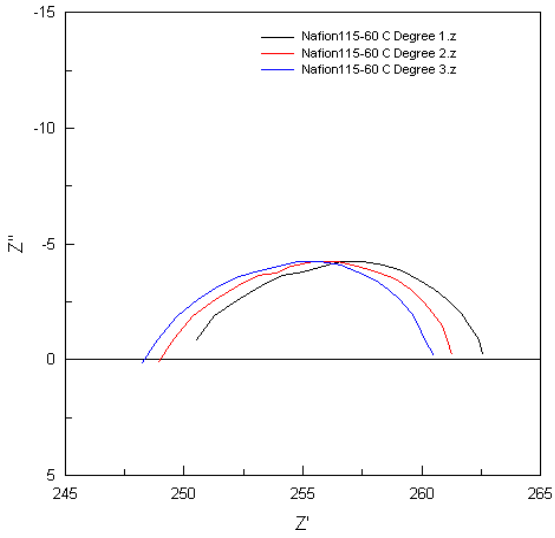


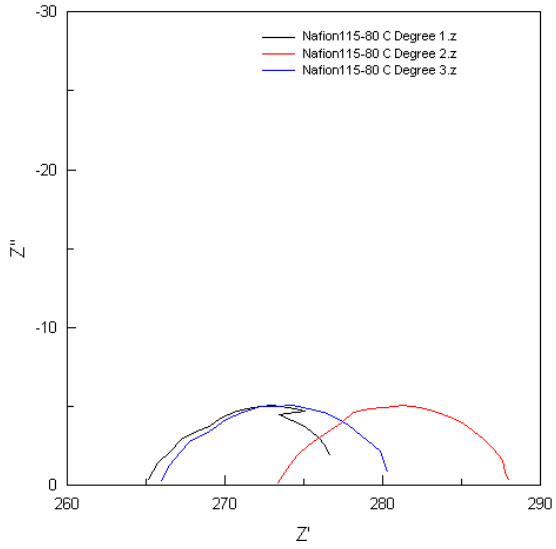




EK-1. (devam) Nafyon 115 empedans testi sonuçları









GAZİ GELECEKTİR..