

**T.C.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**MİKROBİYAL YAKIT HÜCRELERİNDE FARKLI
KİRLETİCİLERE GÖRE ELEKTRİK ÜRETİM
KAPASİTESİ VE MİKROBİYAL TÜR DEĞİŞİMİNİN
İNCELENMESİ**

**DOKTORA TEZİ
Yük. Müh. Ergin TAŞKAN**

**Anabilim Dalı: Çevre Mühendisliği
Danışman: Prof. Dr. Halil HASAR
İkinci Danışman: Doç. Dr. Bestamin ÖZKAYA**

TEMMUZ-2013

T.C.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**MİKROBİYAL YAKIT HÜCRELERİNDE FARKLI KİRLETİCİLERE GÖRE ELEKTRİK
ÜRETİM KAPASİTESİ VE MİKROBİYAL TÜR DEĞİŞİMİNİN İNCELENMESİ**

DOKTORA TEZİ

Yük. Müh. Ergin TAŞKAN

(091112201)

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 12.06.2013

Tezin Savunulduğu Tarih : 01.07.2013

Tez Danışmanı : Prof. Halil HASAR (FÜ) 

İkinci Danışman: Doç.Dr.Bestamin ÖZKAYA (YTÜ) - İzleyici olarak katılmıştır.

Diğer Jüri Üyeleri : Prof.Dr. Nusret ŞEKERDAĞ (FÜ) 

Prof. Dr. Mehmet KİTİŞ (SDÜ) 

Prof. Dr. Ubeyde İPEK (FÜ) 

Yrd. Doç. Dr. Mehmet TUZCU (FÜ) 

ELAZIĞ-2013

ÖNSÖZ

Tez çalışmam boyunca bilgi ve birikimini esirgemeyen, tezimin tüm aşamalarında yardımlarını gördüğüm değerli hocam Prof. Dr. Halil HASAR'a ve ikinci danışmanım Doç. Dr. Bestamin ÖZKAYA'ya içten teşekkürlerimi sunarım.

Ayrıca tez çalışması esnasında desteğini gördüğüm Dr. Serdar KARATAŞ'a, Uzm. Mehmet ŞAHİN'e ve diğer bölüm hocalarıma,

Doktora çalışmamın yürütülmesi için maddi destek sağlayan TÜBİTAK'a ve Fırat Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi'ne

Yaşamım ve eğitimim boyunca yanımda olan ve desteklerini eksiltmeyen babama, ablama ve eşim Arş. Gör. Banu TAŞKAN'a teşekkür ederim.

Tez çalışmam esnasında kaybettiğim annem Saliha TAŞKAN'ın anısına...

Ergin TAŞKAN
ELAZIĞ-2013

İÇİNDEKİLER

	Sayfa No
ÖNSÖZ	II
İÇİNDEKİLER.....	III
ÖZET	VIII
SUMMARY.....	IX
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	X
TABLolar LİSTESİ.....	XXI
KISALTMALAR LİSTESİ	XXIII
1. GİRİŞ	1
1.1 Genel Bilgi	1
1.2 Çalışmanın Amacı	2
2. LİTERATÜR.....	3
2.1 Mikrobiyal Yakıt Hücreleri.....	3
2.1.1 Mikrobiyal Yakıt Hücrelerinin Çalışma Prensipleri.....	5
2.1.2 Atıksu Arıtımında Mikrobiyal Yakıt Hücresi	6
2.2 MYH’lerde Elektron Transferi.....	6
2.2.1 Direkt Elektron Transferi.....	8
2.2.2 Yapay Mediyatörler ile Elektron Transferi.....	9
2.2.3 Mikrobiyal Ürünler ile Elektron Transferi.....	9
2.2.4 Mediyatörlerle İlgili Yapılmış Çalışmalar	10
2.3 Mikrobiyal Yakıt Hücrelerinde Kullanılan Substratlar	11
2.3.1 Asetat.....	12
2.3.2 Glikoz	21
2.3.3 Şarap Fabrikası Atıksuları	21
2.3.4 Nişasta İşleme Atıksuları.....	22
2.3.5 Boya Atıksuları	22
2.3.6 Çöp Sızıntı Suları.....	23
2.3.7 Substratlarla İlgili Yapılmış Çalışmalar	24
2.4 Mikrobiyal Yakıt Hücrelerinde Kullanılan Malzemeleri.....	25

2.4.1	Anot Elektrotu.....	26
2.4.2	Katot Elektrot.....	31
2.4.3	Elektrot Materyalleri İle İlgili Yapılmış Çalışmalar	32
2.5	Ayırma Mekanizmaları	33
2.5.1	Katyon Değiştirici Membran	33
2.5.2	Membranlar İle İlgili Sorunlar	36
2.6	Temel Elektriksel Parametreler	37
2.7	Moleküler Çalışmalar.....	38
2.7.1	Polimeraz Zincir Reaksiyonu (PCR).....	38
2.7.2	Agaroz Jel Elektroforezi.....	40
2.7.3	Denature Gradyan Jel Elektroforezi	40
2.7.4	MYH’lerde Mikrobiyal Tür Belirlenmesi ile İlgili Çalışmalar	42
3.	MATERYAL VE METOT	45
3.1	Çalışmada Kullanılan Mikrobiyal Yakıt Hücreleri	45
3.1.1	Çift Bölmeli Sandviç Tipi mikrobiyal Yakıt Hücresi.....	45
3.1.2	Çift Bölmeli H Tipi Mikrobiyal Yakıt Hücresi.....	46
3.2	Moleküler Çalışmalar.....	47
3.2.1	DNA Ekstraksiyonu	48
3.2.2	Polimeraz Zincir Reaksiyonu (PCR).....	49
3.2.3	Agaroz Jel Elektroforezi.....	51
3.2.4	Denatüre Gradyan Jel Elektroforezi (DGGE)	51
3.3	Voltaj İzleme Sistemi.....	52
3.3.1	FLUKE 8846A Dijital Multimetre ve Özellikleri	52
3.3.2	UNI-T UT71C Dijital Multimetre.....	55
3.4	Çalışmada Kullanılan Elektrot Tipleri	56
3.4.1	Grafit Elektrot	57
3.4.2	Ti-TiO ₂ Elektrot	58
3.4.3	Kalay ile Kaplanmış Bakır Kumaş Elektrot.....	58
3.4.4	Al-Ni Alaşımı Elektrot	58
3.5	Elektrotların MYH’lerde Kullanımı için Hazırlanması	58
3.6	Çalışmada Kullanılan Proton Değiştirici Membranlar	59

3.7	Kinetik Modelleme	60
3.8	Polarizasyon Eğrilerinin Oluşturulması ve Güç Hesabı	61
3.9	Membran ve Elektrotun Yüzey Özelliklerinin Belirlenmesi.....	62
3.10	Deneysel Çalışma Süreci	62
3.10.1	Sentetik Atıksular ile Yapılan Çalışmalar	62
3.10.1.1	Kesikli Beslemeler	63
3.10.1.2	Sürekli Beslemeler	64
3.10.2	Medyatör Çalışmaları.....	65
3.10.3	Gerçek Atıksular ile Yapılan Çalışmalar	65
3.10.4	Farklı Membranlar ile Yapılan Çalışmalar	66
3.10.5	Farklı Elektrotlar ile Yapılan Çalışmalar.....	67
4.	BULGULAR VE TARTIŞMA	69
4.1	Sentetik Atıksular ile Kesikli Beslemeli Çalışmalar	69
4.1.1	Birinci Seri Kesikli Besleme Sonuçları.....	69
4.1.2	İkinci Seri Kesikli Besleme Sonuçları.....	73
4.2	Sentetik Atıksular İle Yapılan Sürekli Çalışmalar	77
4.2.1	Asetat içeren sentetik atıksu	77
4.2.2	Glikoz İçeren Sentetik Atıksu	78
4.2.3	Glikoz+ laktat+benzoik asit ile Yapılan Sürekli Beslemeli Çalışmalar	80
4.2.4	Asetat+ laktat+benzoik asit ve ile Yapılan Sürekli Beslemeli Çalışmalar	82
4.3	Farklı Medyatörlerin Etkisi	84
4.3.1	Bakır Kumaş Elektrodunda Medyatörlü Çalışmalar	84
4.3.1.1	Metilen Mavisi Medyatörü ile Yapılan Çalışmalar	84
4.3.1.2	Nötral Kırmızı Medyatörü	89
4.3.1.3	HNQ Medyatörü	94
4.3.2	Ti-TiO ₂ Elektrodunda.....	99
4.3.2.1	Metilen Mavisi Medyatörü	99
4.3.2.2	Nötral Kırmızısı Medyatörü.....	104
4.3.2.3	HNQ Medyatörü	108
4.3.3	Grafit Elektrodunda Medyatörlü Çalışmalar	113
4.3.3.1	Metilen Mavisi Medyatörü	113
4.3.3.2	Nötral Kırmızısı Medyatörü.....	118

4.3.3.3	HNQ Medyatörü	123
4.4	Gerçek Atıksularla Yapılan Elektrik Üretim Çalışmaları	130
4.4.1	Evsel Atıksular	130
4.4.1.1	Bakır Kumaş Elektrodun Kullanılması	130
4.4.1.2	Al-Ni Elektrodunun Kullanılması	133
4.4.1.3	Grafit Elektrotun Kullanılması	136
4.4.2	Yağ Endüstrisi Atıksuları	141
4.4.2.1	Anaerobik Çamur ve Sediment çamuru ile Aşılana MYH'den Elde Edilen Sonuçlar	141
4.4.2.2	Sediment Ortamından Çamur ile Aşılana MYH'den Elde Edilen Sonuçlar	143
4.4.3	Mezbaha Atıksuyu	146
4.4.3.1	Al-Ni Elektrot ile Yapılan Çalışmalar	147
4.4.3.2	Bakır Kumaş Elektrot	148
4.5	Farklı Membranların Etkisi	151
4.5.1	Fumapem Membran	152
4.5.2	Nafion Membran	154
4.5.3	Ultrex Membran	157
4.6	SEM Görüntüleri ve EDX Sonuçları	162
4.6.1	Membranların Temiz Haldeki SEM ve EDX Sonuçları	162
4.6.2	Kullanılan Elektrotların Temiz Haldeki SEM ve EDX Sonuçları	167
4.6.2.1	Grafit Elektrot	167
4.6.2.2	Bakır Kumaş Elektrot	167
4.6.2.3	Al-Ni Alaşımı Elektrot	169
4.6.3	Evsel atıksu ile Yapılan Çalışmalarda Kullanılan Elektrot ve Membranların SEM ve EDX Sonuçları	170
4.6.3.1	Al-Ni Elektrot Yüzeyi Görüntüleri	170
4.6.4	Yağ Atıksuyu ile Yapılan Çalışmalardaki SEM Görüntüleri ve EDX Sonuçları	175
4.6.5	Mezbaha Atıksuyu ile Yapılan Çalışma Sonuçları	184
4.6.6	Farklı Membranlar Denemeleri	194
4.6.6.1	Fumapem F-1050 Membranı	194
4.6.6.2	Nafion 117 Membranı	198
4.6.6.3	Ultrex CMI-7000 membranı	200
4.7	Mikrobiyal Türlerin Tanımlanması	207

4.7.1	Asetat ve Glikoz Üçlü Karışım Sürekli ve Kesikli Beslemeler (KOİ 2000 mg/L)	207
4.7.2	Asetat ve Glikoz Üçlü Karışım Sürekli Beslemeler (50 mM)	215
4.7.3	Evsel Atıksu ile Yapılan Çalışmalar	224
4.7.4	Mezbaha Atıksuları ile Yapılan Çalışmalar.....	227
4.7.5	Yağ Endüstrisi Atıksuları ile Yapılan Çalışmalar	229
4.8	Biyoelektrokimyasal Modelleme.....	240
4.8.1	Kinetik Modelleme Sonuçları	240
4.9	Biyofilm Kinetiği.....	243
5.	SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	248
6.	KAYNAKLAR	254
	ÖZGEÇMİŞ	272

ÖZET

Bu çalışmada mikrobiyal yakıt hücresi (MYH) kullanılarak elektrik üretimi ve mikrobiyal türlerin belirlenmesi amacıyla farklı deneysel işlemler yürütülmüştür. Deneysel çalışmalar sırasında, farklı elektrot ve membran malzemeleri kullanılmış ve farklı mediyatörlerinin elektrik üretimine katkısı araştırılmıştır. Tez çalışması süresince MYH'deki baskın mikrobiyal türler tespit edilerek deneysel çalışmalar sonucunda elde edilen verileri kullanılıp mikrobiyal kinetikler belirlenmiştir.

Çalışmada evsel atıksu, yağ endüstrisi atıksuları ve mezbaha atıksuları kullanılarak elektrik üretim miktarları belirlenmiştir. Fumapem F-1050, Nafion 117 ve ULTREX CMI-7000 marka proton değişim membranlarının performansları araştırılmıştır.

Çalışmadan elde edilen sonuçlara göre optimum metilen mavisi mediyatörü konsantrasyonunun bütün elektrot malzemeleri için 300 μM olduğu görülmüştür. Bakır kumaş elektrot kullanılarak 300 μM metilen mavisi ilavesi ile 5,7 kat güç artışı sağlanarak 636 mW/m^2 güç yoğunluğu elde edilmiştir. 200 μM nötral kırmızı mediyatörü ilavesi yapılarak grafit elektrot ile 12 kat daha yüksek güç artışı sağlanmıştır. Bakır kumaş elektrot malzemesi kullanılarak üretilen güç miktarı klasik elektrot'a kıyasla 3 kat daha fazla olarak elde edilmiştir. Yağ endüstrisi atıksuları ile yapılan çalışmada sediment çamuruna kıyasla anaerobik aşı ile üç kat daha fazla güç üretilmiştir. Membran performanslarının araştırıldığı çalışmada en yüksek performans Fumapem F-1050 marka PDM ile elde edilmiştir. Çalışmada MYH'de elektrokimyasal olarak aktif olan *Geobacter*, *Shewanella* ve *Pseudomonas* gibi türlerin varlığı belirlenmiştir. Biyoelektrokimyasal modelleme sonucunda farklı atıksular için üretilen maksimum akım yoğunluğu (J_{max}) değerleri J_{max} Mezbaha < J_{max} Yağ < J_{max} Evsel ve yarı hız sabiti (K_s) değerleri K_s Evsel < K_s Yağ < K_s Mezbaha şeklinde elde edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Mikrobiyal yakıt hücresi, mediyatör, membran, elektrot, güç yoğunluğu, akım yoğunluğu, yarı hız sabiti

SUMMARY

ELECTRICITY GENERATION CAPACITY AND MICROBIAL COMMUNITY ACCORDING TO DIFFERENT POLLUTANTS IN MFC

In this study, different experimental procedures were carried out to electric generation and identify the microbial species by using Microbial Fuel Cell (MFC). Different electrodes and membrane materials were used and then the contribution of electric generation of different mediators was investigated during the experimental studies. Throughout the thesis work, dominant microbial species also were identified in MFC. The obtained experimental data were used to determine microbial kinetics.

Electric generation potential of domestic wastewater, oil industry wastewater and slaughterhouse wastewater were investigated. Performance of different proton exchange membranes, Fumapem F-1050, Nafion 117 and ULTREX CMI-7000, was investigated. According to the results of the study, the optimum concentration of methylene blue (MB) mediator were observed to be 300 μM for all electrode materials. Using copper fabric electrode, the addition of 300 μM MB provided the power density of 636 mW/m^2 with a 5.7 fold increase in power. By using graphite electrode, 12 fold power increase was obtained with adding 200 μM neutral red mediator. It was obtained three times higher power output using copper fabric electrode in comparison with classical electrode. MFC inoculated with anaerobic sludge produced 3 times higher power output than sediment sludge for oil wastewater. The highest performance was achieved with the Fumapem F-1050 in the study which the performances of the membrane were investigated.

In the MFC, it was identified the presence of electrochemically active microbial species such as *Geobacter*, *Shewanella* and *Pseudomonas*. As a result of bioelectrochemical modeling, the maximum current density and for different wastewater were ordered as $J_{\text{max slaughterhouse}} < J_{\text{max oil}} < J_{\text{max Domestic}}$, and half velocity constant values $K_s_{\text{Domestic}} < K_s_{\text{Oil}} < K_s_{\text{Slougerhouse}}$.

Key Words: Microbial fuel cell, mediator, membrane, electrode, power density, current density, half velocity constant.

ŞEKİLLER LİSTESİ

	Sayfa No
Şekil 2.1: Bir mikrobiyal yakıt hücresinin temel bileşenlerinin şeması	3
Şekil 2.2: Muhtemel elektron transfer yöntemlerinin görüldüğü basitleştirilmiş çift bölmeli mikrobiyal yakıt hücresi: (1) Direk elektron transferi (Hücre dışı membran sitokromu yoluyla), (2) Mediyatörler vasıtasıyla elektron transferi, (3) Nano kablolar vasıtasıylaelektron transferi	7
Şekil 2.3: Polarizasyon eğrisi (mavi), açık devre voltajı (ADV), , Güç performansı (kırmızı), maksimum güç yoğunluğu (P_{max}). Maksimum güç yoğunluğunun elde edildiği nokta, optimum akım yoğunluğu ve optimum voltajın elde edildiği noktadır (Clauwaert vd., 2008).	38
Şekil 2.4: Polimeraz zincir reaksiyonu basamaklarının şematik görünümü	39
Şekil 2.5: PCR-DGGE'nin çalışma prensibi.....	41
Şekil 3.1: Mikrobiyal yakıt hücresi sisteminin şematik görünümü (1:Anot Bölmesi, 2: Katot Bölmesi, 3:Referans elektrotlar, 4:Elektrotlar)	46
Şekil 3.2: MYH sisteminin genel görünümü	46
Şekil 3.3: Çalışmada kullanılan çift bölmeli H tipi mikrobiyal yakıt hücresi	47
Şekil 3.4 : PCR işleminde kullanılan TECHNE /TC-512 marka cihazın görünümü.....	49
Şekil 3.5: Thermo marka agaroz jel elektroforezinde DNA kontrolü	51
Şekil 3.6: DGGE cihazının genel görünümü	52
Şekil 3.7: Çalışmada kullanılan FLUKE marka multimetrenin görüntüsü	53
Şekil 3.8: Çalışmada kullanılan bilgisayar programının bir görüntüsü	54
Şekil 3.9: Çalışmada Kullanılan UNI-T Marka Dijital Multimetrenin Görünümü	55
Şekil 3.10 : Çalışmada kullanılan elektrot malzemelerinin görünümü (A: Bakır kumaş, B: Al-Ni alaşımı, C: Grafit, D: Ti-TiO ₂ , E: Platin kaplamalı Ti elektrot)	57
Şekil 3.11: Deneysel çalışma sürecinin şematik gösterimi	68
Şekil 4.1: Glikoz, laktat ve benzoik asit karışımı (toplam konsantrasyon A:5 mM, B:10 mM ve C:25 mM) kullanılarak yapılan kesikli beslemeler ile elde edilen akım yoğunluğu değerleri (mA/m ²).....	71
Şekil 4.2: Glikoz, laktat ve benzoik asit karışımı (toplam konsantrasyon A:5 mM, B:10 mM ve C:25 mM) kullanılarak yapılan kesikli beslemeler ile elde edilen akım yoğunluğu değerleri (mA/m ³).....	72

Şekil 4.3:	Glikoz, laktat ve benzoik asit karışımı (toplam konsantrasyon A:5 mM, B:10 mM ve C:25 mM) kullanılarak yapılan kesikli beslemeler ile elde edilen akım yoğunluğu değerleri (mA/m^2).....	75
Şekil 4.4:	Glikoz, laktat ve benzoik asit karışımı (toplam konsantrasyon A:5, B:10 ve C:25 mM) kullanılarak yapılan kesikli beslemeler ile elde edilen akım yoğunluğu değerleri (mA/m^3).....	76
Şekil 4.5:	Asetatın besin maddesi olarak kullanıldığı sürekli beslemeli MYH voltaj değerleri	77
Şekil 4.6:	Asetat'ın substrat olarak kullanıldığı çalışmada farklı HBS'ler için üretilen voltaj değerleri.....	78
Şekil 4.7:	Glikozun besin maddesi olarak kullanıldığı çalışmada üretilen voltajı değerleri.....	79
Şekil 4.8:	Glikozun besin maddesi olarak kullanıldığı çalışmada farklı HBS değerlerine karşılık üretilen voltajı değerleri.....	80
Şekil 4.9:	Glikoz+laktat+benzoik asit kullanılarak MYH'de üretilen voltaj değerleri.....	81
Şekil 4.10:	Glikoz+laktat+benzoik asit ile yapılan beslemede farklı HBS değerleri için üretilen voltajı değerleri	81
Şekil 4.11:	Asetat+laktat+benzoik asit ile yapılan beslemede MYH'de üretilen voltaj değerleri	82
Şekil 4.12:	Asetat+laktat+benzoik asit ile yapılan beslemede HBS ile üretilen pil voltaj değerleri	83
Şekil 4.13:	MYH'nin medyatörsüz olarak işletimi ile elde edilen güç eğrisi ($\square$ =Voltaj, mV; $\blacklozenge$ =Güç Yoğ. mW/m^2)	84
Şekil 4.14:	MYH'nin 50 μM metilen mavisi ilavesi ile işletimi sonucu elde edilen güç eğrisi ($\square$ =Voltaj, mV; $\blacklozenge$ =Güç Yoğ. mW/m^2).....	85
Şekil 4.15:	MYH'nin 100 μM metilen mavisi ilavesi ile işletimi sonucu elde edilen güç eğrisi ($\square$ =Voltaj, mV; $\blacklozenge$ =Güç Yoğ. mW/m^2).....	85
Şekil 4.16:	MYH'in 200 μM metilen mavisi ilavesi ile işletilmesi sonucu elde edilen güç eğrisi ($\square$ =Voltaj, mV; $\blacklozenge$ =Güç Yoğ. mW/m^2).....	86
Şekil 4.17:	MYH'nin 300 μM metilen mavisi ilavesi ile işletimi sonucu elde edilen güç eğrisi ($\square$ =Voltaj, mV; $\blacklozenge$ =Güç Yoğ. mW/m^2).....	87
Şekil 4.18:	MYH'nin 400 μM metilen mavisi ilavesi ile işletilmesi sonucu elde edilen güç eğrisi ($\square$ =Voltaj, mV; $\blacklozenge$ =Güç Yoğ. mW/m^2).....	87
Şekil 4.19:	Farklı metilen mavisi konsantrasyonları için elde edilen güç yoğunluğu ve iç direnç değerleri.....	88

Şekil 4.20:	MYH'nin medyatörsüz olarak işletimi sonucu elde edilen güç eğrisi ($\square$ =Voltaj, mV; $\blacklozenge$ =Güç Yoğ. mW/m ²)......	89
Şekil 4.21:	MYH'nin 50 μ M nötral kırmızısı ilavesi ile işletimi sonucu elde edilen güç eğrisi ($\square$ =Voltaj, mV; $\blacklozenge$ =Güç Yoğ. mW/m ²)......	90
Şekil 4.22:	MYH'nin 100 μ M nötral kırmızısı ilavesi ile işletimi sonucu elde edilen güç eğrisi ($\square$ =Voltaj, mV; $\blacklozenge$ =Güç Yoğ. mW/m ²)......	90
Şekil 4.23:	MYH'nin 200 μ M nötral kırmızısı ilavesi ile işletimi sonucu elde edilen güç eğrisi ($\square$ =Voltaj, mV; $\blacklozenge$ =Güç Yoğ. mW/m ²)......	91
Şekil 4.24:	MYH'nin 300 μ M nötral kırmızısı ilavesi ile işletimi sonucu elde edilen güç eğrisi ($\square$ =Voltaj, mV; $\blacklozenge$ =Güç Yoğ. mW/m ²)......	92
Şekil 4.25:	MYH'nin 400 μ M nötral kırmızısı ilavesi ile işletimi sonucu elde edilen güç eğrisi ($\square$ =Voltaj, mV; $\blacklozenge$ =Güç Yoğ. mW/m ²)......	92
Şekil 4.26:	Farklı neutral kırmızısı konsantrasyonları için elde edilen güç yoğunluğu-iç direnç değerleri.....	93
Şekil 4.27:	MYH'nin medyatörsüz olarak işletim sonucu elde edilen güç eğrisi ($\square$ =Voltaj, mV; $\blacklozenge$ =Güç Yoğ. mW/m ²).	94
Şekil 4.28:	MYH'nin 50 μ M HNQ ilavesi ile işletimi sonucu elde edilen güç eğrisi ($\square$ =Voltaj, mV; $\blacklozenge$ =Güç Yoğ. mW/m ²)......	95
Şekil 4.29:	MYH'nin 100 μ M HNQ ilavesi ile işletimi sonucu elde edilen güç eğrisi ($\square$ =Voltaj, mV; $\blacklozenge$ =Güç Yoğ. mW/m ²)......	95
Şekil 4.30:	MYH'nin 200 μ M HNQ ilavesi ile işletimi sonucu elde edilen güç eğrisi ($\square$ =Voltaj, mV; $\blacklozenge$ =Güç Yoğ. mW/m ²)......	96
Şekil 4.31:	MYH'nin 300 μ M HNQ ilavesi ile işletimi sonucu elde edilen güç eğrisi ($\square$ =Voltaj, mV; $\blacklozenge$ =Güç Yoğ. mW/m ²)......	96
Şekil 4.32:	MYH'nin 400 μ M HNQ ilavesi ile işletimi sonucu elde edilen güç eğrisi ($\square$ =Voltaj, mV; $\blacklozenge$ =Güç Yoğ. mW/m ²)......	97
Şekil 4.33:	Farklı HNQ konsantrasyonları için elde edilen güç yoğunluğu-iç direnç değerleri	97
Şekil 4.34:	Bakır kumaş elektrot kullanılan MYH'de üretilen güç ve iç direnç değerleri.....	99
Şekil 4.35:	MYH'nin medyatörsüz olarak işletilmesi sonucu elde edilen güç eğrisi ($\square$ =Voltaj, mV; $\blacklozenge$ =Güç Yoğ. mW/m ²)......	100
Şekil 4.36:	MYH'nin 50 μ M metilen mavisi ilavesi ile işletilmesi sonucu elde edilen güç eğrisi ($\square$ =Voltaj, mV; $\blacklozenge$ =Güç Yoğ. mW/m ²)......	100

Şekil 4.37:	MYH'nin 100 µM metilen mavisi ilavesi ile işletilmesi sonucu elde edilen güç eğrisi (□=Voltaj, mV; ◆=Güç Yoğ. mW/m ²).....	101
Şekil 4.38:	MYH'nin 200 µM metilen mavisi ilavesi ile işletilmesi sonucu elde edilen güç eğrisi (□=Voltaj, mV; ◆=Güç Yoğ. mW/m ²).....	102
Şekil 4.39:	MYH'nin 300 µM metilen mavisi ilavesi ile işletilmesi sonucu elde edilen güç eğrisi (□=Voltaj, mV; ◆=Güç Yoğ. mW/m ²).....	102
Şekil 4.40:	MYH'nin 400 µM metilen mavisi ilavesi ile işletilmesi sonucu elde edilen güç eğrisi (□=Voltaj, mV; ◆=Güç Yoğ. mW/m ²).....	103
Şekil 4.41:	Farklı Metilen mavisi konsantrasyonları için elde edilen güç yoğunluğu-iç direnç değerleri.....	103
Şekil 4.42:	MYH'nin medyatörsüz olarak işletilmesi sonucu elde edilen güç eğrisi (□=Voltaj, mV; ◆=Güç Yoğ. mW/m ²).....	104
Şekil 4.43:	MYH'nin 50 µM NR ilavesi ile işletilmesi sonucu elde edilen güç eğrisi (□=Voltaj, mV; ◆=Güç Yoğ. mW/m ²).....	105
Şekil 4.44:	MYH'nin 100 µM NR ilavesi ile işletilmesi sonucu elde edilen güç eğrisi (□=Voltaj, mV; ◆=Güç Yoğ. mW/m ²).....	105
Şekil 4.45:	MYH'nin 200 µM NK ilavesi ile işletilmesi sonucu elde edilen güç eğrisi (□=Voltaj, mV; ◆=Güç Yoğ. mW/m ²).....	106
Şekil 4.46:	MYH'nin 300 µM NK ilavesi ile işletilmesi sonucu elde edilen güç eğrisi (□=Voltaj, mV; ◆=Güç Yoğ. mW/m ²).....	106
Şekil 4.47:	MYH'nin 400 µM NK ilavesi ile işletilmesi sonucu elde edilen güç eğrisi (□=Voltaj, mV; ◆=Güç Yoğ. mW/m ²).....	107
Şekil 4.48:	Farklı NK konsantrasyonları için elde edilen güç yoğunluğu-iç direnç değerleri (□=Voltaj, mV; ◆=Güç Yoğ. mW/m ²).	108
Şekil 4.49:	MYH'nin medyatörsüz olarak işletilmesi sonucu elde edilen güç eğrisi.....	108
Şekil 4.50:	MYH'nin 50 µM HNQ ilavesi ile işletilmesi sonucu elde edilen güç eğrisi (□=Voltaj, mV; ◆=Güç Yoğ. mW/m ²).....	109
Şekil 4.51:	MYH'nin 100 µM HNQ ilavesi ile işletilmesi sonucu elde edilen güç eğrisi (□=Voltaj, mV; ◆=Güç Yoğ. mW/m ²).....	110
Şekil 4.52:	MYH'nin 200 µM HNQ ilavesi ile işletilmesi sonucu elde edilen güç eğrisi (□=Voltaj, mV; ◆=Güç Yoğ. mW/m ²).....	110
Şekil 4.53:	MYH'nin 300 µM HNQ ilavesi ile işletilmesi sonucu elde edilen güç eğrisi (□=Voltaj, mV; ◆=Güç Yoğ. mW/m ²).....	111

Şekil 4.54:	MYH'nin 400 μM HNQ ilavesi ile işletilmesi sonucu elde edilen güç eğrisi ($\square$ =Voltaj, mV; $\blacklozenge$ =Güç Yoğ. mW/m^2).....	111
Şekil 4.55:	Farklı HNQ konsantrasyonları için elde edilen güç yoğunluğu-iç direnç değerleri	112
Şekil 4.56:	Ti-TiO ₂ elektrotun kullanıldığı MYH'de üretilen güç ve iç direnç değerleri.....	113
Şekil 4.57:	MYH'nin medyatör ilavesiz olarak işletilmesi sonucu elde edilen güç eğrisi ($\square$ =Voltaj, mV; $\blacklozenge$ =Güç Yoğ. mW/m^2).....	114
Şekil 4.58:	MYH'nin 50 μM metilen mavisi ilavesi ile işletilmesi sonucu elde edilen güç eğrisi ($\square$ =Voltaj, mV; $\blacklozenge$ =Güç Yoğ. mW/m^2).....	114
Şekil 4.59:	MYH'nin 100 μM metilen mavisi ilavesi ile işletilmesi sonucu elde edilen güç eğrisi ($\square$ =Voltaj, mV; $\blacklozenge$ =Güç Yoğ. mW/m^2).....	115
Şekil 4.60:	MYH'nin 200 μM metilen mavisi ilavesi ile işletilmesi sonucu elde edilen güç eğrisi ($\square$ =Voltaj, mV; $\blacklozenge$ =Güç Yoğ. mW/m^2).....	115
Şekil 4.61:	MYH'nin 300 μM metilen mavisi ilavesi ile işletilmesi sonucu elde edilen güç eğrisi ($\square$ =Voltaj, mV; $\blacklozenge$ =Güç Yoğ. mW/m^2).....	116
Şekil 4.62:	MYH'nin 400 μM metilen mavisi ilavesi ile işletilmesi sonucu elde edilen güç eğrisi ($\square$ =Voltaj, mV; $\blacklozenge$ =Güç Yoğ. mW/m^2).....	117
Şekil 4.63:	Farklı metilen mavisi konsantrasyonları için MYH güç yoğunluğu-iç direnç değerleri	118
Şekil 4.64:	MYH'nin medyatör ilavesiz olarak işletilmesi sonucu elde edilen güç eğrisi ($\square$ =Voltaj, mV; $\blacklozenge$ =Güç Yoğ. mW/m^2).....	119
Şekil 4.65:	MYH'nin 50 μM NK ilavesi ile işletilmesi sonucu elde edilen güç eğrisi ($\square$ =Voltaj, mV; $\blacklozenge$ =Güç Yoğ. mW/m^2).....	119
Şekil 4.66:	MYH'nin 100 μM NK ilavesi ile işletilmesi sonucu elde edilen güç eğrisi ($\square$ =Voltaj, mV; $\blacklozenge$ =Güç Yoğ. mW/m^2).....	120
Şekil 4.67:	MYH'nin 200 μM NK ilavesi ile işletilmesi sonucu elde edilen güç eğrisi ($\square$ =Voltaj, mV; $\blacklozenge$ =Güç Yoğ. mW/m^2).....	120
Şekil 4.68:	MYH'nin 300 μM NK ilavesi ile işletilmesi sonucu elde edilen güç eğrisi ($\square$ =Voltaj, mV; $\blacklozenge$ =Güç Yoğ. mW/m^2).....	121
Şekil 4.69:	MYH'nin 400 μM NK ilavesi ile işletilmesi sonucu elde edilen güç eğrisi ($\square$ =Voltaj, mV; $\blacklozenge$ =Güç Yoğ. mW/m^2).....	121
Şekil 4.70:	Farklı NK konsantrasyonları için elde edilen güç yoğunluğu-iç direnç değerleri	122

Şekil 4.71:	MYH'nin medyatör ilavesiz olarak işletilmesi sonucu elde edilen güç eğrisi (□=Voltaj, mV; ◆=Güç Yoğ. mW/m ²).	123
Şekil 4.72:	MYH'nin 50 µM HNQ ilavesi ile işletilmesi sonucu elde edilen güç eğrisi (□=Voltaj, mV; ◆=Güç Yoğ. mW/m ²).	124
Şekil 4.73:	MYH'nin 100 µM HNQ ilavesi ile işletilmesi sonucu elde edilen güç eğrisi (□=Voltaj, mV; ◆=Güç Yoğ. mW/m ²).	124
Şekil 4.74:	MYH'nin 200 µM HNQ ilavesi ile işletilmesi sonucu elde edilen güç eğrisi (□=Voltaj, mV; ◆=Güç Yoğ. mW/m ²).	125
Şekil 4.75:	MYH'nin 300 µM HNQ ilavesi ile işletilmesi sonucu elde edilen güç eğrisi (□=Voltaj, mV; ◆=Güç Yoğ. mW/m ²).	125
Şekil 4.76:	MYH'nin 400 µM HNQ ilavesi ile işletilmesi sonucu elde edilen güç eğrisi (□=Voltaj, mV; ◆=Güç Yoğ. mW/m ²).	126
Şekil 4.77:	Farklı HNQ konsantrasyonları için elde edilen güç yoğunluğu-iç direnç değerleri	127
Şekil 4.78:	Grafit elektrotun kullanıldığı MYH'de üretilen güç ve iç direnç değerleri.....	128
Şekil 4.79:	Farklı medyatörler ile MYH'de voltaj üretimi	129
Şekil 4.80:	Bakır kumaş elektrot ile evsel atıksu kullanılarak sisteme verilen organik yük ve üretilen güç yoğunluğu	131
Şekil 4.81:	Bakır kumaş elektrot ile evsel atıksu kullanılarak sistemde giderilen organik madde miktarı ve üretilen güç yoğunluğu.....	131
Şekil 4.82:	Bakır kumaş elektrot ile farklı organik maddeler için üretilen maksimum güç yoğunluğu miktarları (□=Voltaj, mV; ◆=Güç Yoğ. mW/m ²).	132
Şekil 4.83:	Farklı organik madde değerlerinde MYH'den elde edilen maksimum güç yoğunluğu ve MYH iç direncinin değişimi.....	133
Şekil 4.84:	Al-Ni alaşımı elektrot ile evsel atıksu kullanılarak sisteme verilen organik madde miktarı ve üretilen güç yoğunluğu değerleri	134
Şekil 4.85:	Al-Ni alaşımı elektrot ile evsel atıksu kullanılarak sistemde giderilen organik madde miktarı ve üretilen güç yoğunluğu değerleri	134
Şekil 4.86:	Al-Ni alaşımı elektrot ile farklı organik maddeler için üretilen maksimum güç yoğunluğu değerleri (□=Voltaj, mV; ◆=Güç Yoğ. mW/m ²).	135
Şekil 4.87:	Farklı organik madde değerlerinde MYH'den elde edilen maksimum güç yoğunluğu ve MYH iç direncinin değişimi.....	136
Şekil 4.88:	Grafit elektrot ile evsel atıksu kullanılarak sisteme verilen organik madde miktarı ve üretilen güç yoğunluğu değerleri	137

Şekil 4.89:	Grafit elektrot ile evsel atıksu kullanılarak sistemde giderilen organik madde miktarı ve üretilen güç yoğunluğu değerleri	137
Şekil 4.90:	Grafit elektrot ile farklı organik maddeler için üretilen maksimum güç yoğunluğu miktarları ($\square$ =Voltaj, mV; $\blacklozenge$ =Güç Yoğ. mW/m ²).....	138
Şekil 4.91:	Sistemde üretilen güç miktarı ile MYH'nin iç direncinin değişimi.....	139
Şekil 4.92:	Anaerobik çamur ile aşılana MYH'de organik yük değerine karşılık güç yoğunluğu değerleri	142
Şekil 4.93:	Anaerobik çamur ile aşılana MYH'de elde edilen güç eğrisi.....	142
Şekil 4.94:	Anaerobik çamur ile aşılana MYH'de elde edilen ara ürün oluşumu	143
Şekil 4.95:	Sediment ile aşılana MYH'de organik yüke karşılık güç yoğunluğu değerleri	144
Şekil 4.96:	Sediment ile aşılana MYH'den elde edilen güç eğrisi	144
Şekil 4.97:	Sediment ile aşılana MYH'den elde edilen ara ürün oluşumu	145
Şekil 4.98:	Al-Ni elektrot kullanılan MYH'de güç yoğunluğu ve organik yük değerine karşılık güç yoğunluğu değerleri	147
Şekil 4.99:	Al-Ni elektrot kullanılan MYH'den elde edilen güç eğrisi.	148
Şekil 4.100:	Al-Ni elektrot kullanılan MYH'den elde edilen ara ürün oluşumu.	148
Şekil 4.101:	Bakır kumaş elektrot kullanılan MYH'de organik yüke karşı güç yoğunluğu değerleri	149
Şekil 4.102:	Bakır kumaş elektrotun kullanıldığı MYH'de elde edilen güç eğrisi	150
Şekil 4.103:	Bakır kumaş elektrot ile elde edilen ara ürün oluşumu	150
Şekil 4.104:	Fumapem membran kullanılarak MYH'de giderilen organik madde miktarına karşılık üretilen voltajı değerinin değişimi.....	152
Şekil 4.105:	Fumapem membranın kullanıldığı MYH'de işletme sürelerinin 1, 5, 9, 14, 20, 26, 30. günlerinde elde edilen polarizasyon eğrileri ($\square$ =Voltaj, mV; $\blacklozenge$ =Güç Yoğ. mW/m ²).	153
Şekil 4.106:	İşletme sürelerinin 1. 5. 9. 15. 22. 28. 33. ve membranın yenisi ile değiştirildiği süreçte (MD) MYH'de üretilen maksimum güç yoğunluğu değerleri ve iç direnç değerleri	154
Şekil 4.107:	Nafion 117 membran kullanılan MYH'de giderilen organik yük miktarı değişimi.....	155
Şekil 4.108:	Nafion 117 membranın kullanıldığı MYH'de işletme sürelerinin 1, 5, 9, 14, 20, 26, 30. için elde edilen polarizasyon eğrileri ($\square$ =Voltaj, mV; $\blacklozenge$ =Güç Yoğ. mW/m ²).	156
Şekil 4.109:	MYH'de üretilen maksimum güç yoğunluğu değerleri ile iç direnç değerleri.....	157

Şekil 4.110:	Ultrex membran kullanılan MYH’de giderilen organik yük miktarı	157
Şekil 4.111:	Ultrex CMI-7000 membranının kullanıldığı MYH’de işletme sürelerinin 1, 5, 9, 14, 20, 26, 30. günlerinde elde edilen güç eğrileri ($\square$ =Voltaj, mV; $\blacklozenge$ =Güç Yoğ. mW/m ²).	158
Şekil 4.112:	Farklı işletme sürelerinde MYH’de üretilen maksimum güç yoğunluğu ve iç direnç değerleri.....	159
Şekil 4.113:	Fumapem, nafion ve ultrex membranlar için işletme süresi boyunca meydana gelen güç azalması.....	160
Şekil 4.114:	Fumapem membranın temiz haldeki SEM görüntüsü (1: EDX alınan Bölge)	162
Şekil 4.115:	1. bölgeden alınan EDX analizi sonucu	163
Şekil 4.116:	Ultrex CMI-7000 membranın temiz haldeki SEM görüntüsü (1, 2 ve 3: EDX alınan Bölgeler)	163
Şekil 4.117:	1. Bölgeden alınan EDX analizi sonucu	164
Şekil 4.118:	2. bölgeden alınan EDX analizi sonucu	164
Şekil 4.119:	3. bölgeden alınan EDX analizi sonucu	165
Şekil 4.120:	Nafion 117 membranın temiz haldeki SEM görüntüsü (1:EDX alınan bölge).....	166
Şekil 4.121:	1. bölgeden alınan EDX analizi sonucu	166
Şekil 4.122:	Grafit elektrotun temiz haldeki SEM görüntüsü.....	167
Şekil 4.123:	Kullanılan membranın temiz haldeki SEM görüntüsü (1: EDX alınan bölge)	168
Şekil 4.124:	1. bölgeden alınan EDX analizi sonucu	168
Şekil 4.125:	Al-Ni alaşımı elektrotun SEM görüntüsü (1: EDX alınan bölge).....	169
Şekil 4.126:	1. bölgeden alınan EDX analizi sonucu	169
Şekil 4.127:	Al-Ni alaşımı elektrotun işletmeden sonraki SEM görüntüleri	171
Şekil 4.128:	Al-Ni alaşımı elektrotunun kullanıldığı reaktördeki membran yüzeyinin SEM görüntüsü.....	171
Şekil 4.129:	Al-Ni alaşımı elektrot yüzeyinden alınan SEM görüntüsü.....	172
Şekil 4.130:	Şekil 4.141’in tamamından alınan EDX analizi sonucu	172
Şekil 4.131:	Bakır kumaş elektrotun kullanıldıktan sonraki elektrot yüzeyi SEM görüntüleri	173
Şekil 4.132:	Grafit elektrotunun kullanıldıktan sonra elektrot yüzeyi sem görüntüleri	174
Şekil 4.133:	Sediment ile aşıl原因 reaktördeki elektrot yüzeyi SEM görüntüleri	175
Şekil 4.134:	Sediment ile aşıl原因 reaktördeki elektrot yüzeyinin SEM görüntüsü (1 ve 2: EDX alınan noktalar)	176
Şekil 4.135:	1. bölgeden alınan EDX analizi sonucu	176

Şekil 4.136:	2. bölgeden alınan EDX analizi sonucu	177
Şekil 4.137:	Sediment ile aşıl原因 MYH'deki membran yüzeyinin anot bölgeninin SEM görüntüsü.....	177
Şekil 4.138:	Sediment ile aşıl原因 reaktördeki membran yüzeyinin anot tarafının SEM görüntüsü (1,2 ve 3: EDX alınan noktalar)	178
Şekil 4.139:	1. bölgeden alınan EDX analizi sonucu	178
Şekil 4.140:	2. bölgeden alınan EDX analizi sonucu	179
Şekil 4.141:	3. bölgeden alınan EDX analizi sonucu	179
Şekil 4.142:	Sediment ile aşıl原因 reaktördeki membran yüzeyinin katot tarafının SEM görüntüsü ve EDX sonuçları	180
Şekil 4.143:	1. bölgeden alınan EDX analizi sonucu	180
Şekil 4.144:	2. bölgeden alınan EDX analizi sonucu	181
Şekil 4.145:	3. bölgeden alınan EDX analizi sonucu	181
Şekil 4.146:	Anaerobik çamur ile aşıl原因 reaktördeki elektrot yüzeyinin SEM görüntüsü	182
Şekil 4.147:	Anaerobik çamur ile aşıl原因 reaktördeki elektrot yüzeyinden alınan SEM görüntüsü (1,2 ve 3: EDX alınan noktalar)	183
Şekil 4.148:	1. bölgeden alınan EDX analizi sonucu	183
Şekil 4.149:	2. bölgeden alınan EDX analizi sonucu	184
Şekil 4.150:	3. bölgeden alınan EDX analizi sonucu	184
Şekil 4.151:	Al-Ni alaşıımı elektrot yüzeyi SEM görüntüleri	185
Şekil 4.152:	Al-Ni alaşıımı elektrot yüzeyi SEM görüntüsü(1,2,3 ve 4: EDX alınan noktalar).....	186
Şekil 4.153:	1. bölgeden alınan EDX analizi sonucu	186
Şekil 4.154:	2. bölgeden alınan EDX analizi sonucu	187
Şekil 4.155:	3. bölgeden alınan EDX analizi sonucu	187
Şekil 4.156:	4. bölgeden alınan EDX analizi sonucu	188
Şekil 4.157:	Al-Ni alaşıımı elektrotun kullanıldığı reaktördeki membran anot tarafı SEM görüntüleri.....	189
Şekil 4.158:	Al-Ni alaşıımı elektrotun kullanıldığı reaktördeki membranın katot tarafı SEM görüntüleri.....	190
Şekil 4.159:	Bakır kumaş elektrot yüzeyi SEM görüntüleri	191
Şekil 4.160:	Bakır kumaş elektrotun kullanıldığı reaktördeki membranın anot tarafı SEM görüntüleri.....	192

Şekil 4.161:	Bakır kumaş elektrotun kullanıldığı reaktördeki membranın anot tarafı SEM görüntüsü (1,2, ve 3: EDX alınan bölgeler)	193
Şekil 4.162:	1. bölgeden alınan EDX analizi sonucu	193
Şekil 4.163:	2. bölgeden alınan EDX analizi sonucu	194
Şekil 4.164:	3. bölgeden alınan EDX analizi sonucu	194
Şekil 4.165:	Fumapem membranın SEM görüntüsü	195
Şekil 4.166:	Fumapem F-1050 membran sem görüntüsü (1,2,3, ve 4: EDX alınan bölgeler).....	195
Şekil 4.167:	1. bölgeden alınan EDX analizi sonucu	196
Şekil 4.168:	2. bölgeden alınan EDX analizi sonucu	196
Şekil 4.169:	3. bölgeden alınan EDX analizi sonucu	197
Şekil 4.170:	4. bölgeden alınan EDX analizi sonucu	197
Şekil 4.171:	Nafion 117 membranın SEM görüntüleri.....	198
Şekil 4.172:	Nafion 117 membranın SEM görüntüsü (1 ve 2:EDX alınan bölgeler).....	199
Şekil 4.173:	1. bölgeden alınan EDX analizi sonucu	199
Şekil 4.174:	2. bölgeden alınan EDX analizi sonucu	200
Şekil 4.175:	Ultrex CMI-7000 membranın SEM görüntüleri	201
Şekil 4.176:	Ultrex CMI-7000 membranın SEM görüntüsü (1,2 ve 3: EDX alınan bölgeler)	202
Şekil 4.177:	1. bölgeden alınan EDX analizi sonucu	202
Şekil 4.178:	2. bölgeden alınan EDX analizi sonucu	203
Şekil 4.179:	3. bölgeden alınan EDX analizi sonucu	203
Şekil 4.180:	Katot bölmesinde kullanılan platin kaplamalı titanyum elektrotun SEM görüntüleri.....	204
Şekil 4.181:	Katot bölmesinde kullanılan platin kaplamalı titanyum elektrotun SEM görüntüsü (1: EDX alınan bölge).....	205
Şekil 4.182:	1. bölgeden alınan EDX analizi sonucu	205
Şekil 4.183:	Katot bölmesinde kullanılan platin kaplamalı titanyum elektrotun SEM görüntüsü (1 EDX alınan bölge).....	206
Şekil 4.184:	1. bölgeden alınan EDX analizi sonucu	206
Şekil 4.185:	Asetat ve glikoz üçlü karışım beslemeli reaktörlerden alınan biyofilm numunelerine ait DGGE jel görüntüsü.....	208
Şekil 4.186:	Asetat+laktat+benzoik asit ve glikoz+laktat+benzoik asit üçlü karışım beslemeli reaktörlerden alınan numunelerdeki baskın türlerin filogenetik ağacı	215
Şekil 4.187:	Asetat+laktat+benzoik asit ve glikoz+laktat+benzoik asit ile hazırlanmış sentetik atıksuda MYH reaktöründeki baskın tür sınıfları	215

Şekil 4.188:	Üçlü karışım sentetik atıksu (50 mM) ile beslenen MYH reaktöründe farklı işletme şartlarındaki DGGE bantları.....	217
Şekil 4.189:	Üçlü karışım sentetik atıksu ile beslenen MYH reaktöründe baskın türlerin filogenetik ağacı	224
Şekil 4.190:	Asetat+laktat+benzoik asit ve glikoz+laktat+benzoik asit ile hazırlanmış sentetik atıksu ile sürekli beslemeli halde MYH reaktöründeki baskın tür sınıfları	224
Şekil 4.191:	Evsel atıksu ile beslenen MYH reaktörlerinde DGGE bantları.....	226
Şekil 4.192:	Evsel atıksu ile beslenen MYH reaktörlerindeki baskın tür sınıfları	226
Şekil 4.193:	Evsel atıksu ile beslenen MYH reaktörlerinde baskın türlerin filogenetik ağacı	227
Şekil 4.194:	Mezbaha atıksu ile beslenen MYH reaktörlerinde DGGE bantları	228
Şekil 4.195:	Mezbaha atıksu ile beslenen MYH reaktörlerindeki baskın tür sınıfları.....	229
Şekil 4.196:	Mezbaha atıksu ile beslenen MYH reaktörlerinde baskın türlerin filogenetik ağacı.....	229
Şekil 4.197:	Yağ endüstrisi atıksuları ile beslenen MYH reaktörlerinde DGGE bantları	230
Şekil 4.198:	Yağ endüstrisi atıksu ile beslenen MYH reaktörlerindeki baskın tür sınıfları	231
Şekil 4.199:	Yağ endüstrisi atıksu ile beslenen MYH reaktörlerinde baskın türlerin filogenetik ağacı	231
Şekil 4.200:	Evsel atıksu çalışmasında bakır kumaş elektrotta MYH’de organik yük miktarına karşı akım yoğunluğu için elde edilen eğri.....	241
Şekil 4.201:	Yağ endüstrisi atıksuları çalışmasında sediment aşısının kullanıldığı MYH’de organik yük miktarına karşı akım yoğunluğu için elde edilen eğri	242
Şekil 4.202:	Mezbaha atıksularının kullanıldığı MYH’de Al-Ni elektrotun kullanıldığı MYH’de organik yük miktarına karşı akım yoğunluğu için elde edilen eğri	243
Şekil 4.203:	Evsel atıksuyun substrat olarak kullanıldığı çalışmada MYH’de deneysel veriler kullanılarak elde edilen kararlı haldeki biyofilm modeli	244
Şekil 4.204:	Mezbaha atıksuyun substrat olarak kullanıldığı çalışmada MYH’de Al-Ni alaşımı elektrotun kullanıldığı çalışmada deneysel veriler kullanılarak elde edilen kararlı haldeki biyofilm modeli.....	245
Şekil 4.205:	Yağ atıksuyun substrat olarak kullanıldığı çalışmada MYH’de anaerobik çamur aşısının kullanıldığı çalışmada deneysel verileri kullanılarak elde edilen kararlı haldeki biyofilm modeli	246

TABLÖLER LİSTESİ

Sayfa No

Tablo 2.1.	Mikrobiyal yakıt hücrelerinde kullanılan farklı besin maddeleri ve maksimum akım üretim değerleri.	14
Tablo 2.2.	MYH'lerdeki anot materyalleri, yapıları, aşırı kaynakları ve güç üretim performansları.....	27
Tablo 3.1.	PCR analizi için kullanılan malzemeler ve karışım oranları.....	50
Tablo 3.2.	PCR çalışmasında kullanılan primerlerin baz dizilimleri	50
Tablo 3.3.	PCR analizinin işlem basamakları.....	50
Tablo 3.4.	FLUKE 8846A Dijital Multimetrenin Teknik Özellikleri	54
Tablo 3.5.	UNI-T UT71C Multimetrenin teknik özellikleri.....	56
Tablo 3.6.	Grafit elektrotun teknik özellikleri	58
Tablo 3.7.	Fumapem F-1050 Proton Değişim Membranının Teknik Özellikleri	59
Tablo 3.8.	Nafion 117 Proton Değişim Membranının Teknik Özellikleri	59
Tablo 3.9.	Ultrex CMI-7000 Proton Değişim Membranının Teknik Özellikleri.....	60
Tablo 3.10.	Sentetik atıksuda kullanılan kimyasallar ve konsantrasyonları.....	63
Tablo 3.11.	Asetat, laktat ve benzoik asit kullanılarak hazırlanan besleme suyu bileşimi	64
Tablo 3.12 .	Glikoz, laktat ve benzoik asit kullanılarak hazırlanan besleme suyu bileşimi	64
Tablo 3.13.	Asetat veya glikoz+laktat+benzoik asit kullanılarak hazırlanan besleme suyu bileşimi (50 mM)	64
Tablo 3.14.	Asetat veya glikoz+laktat+benzoik asit kullanılarak hazırlanan besleme suyu bileşimi (KOİ:2000 mg/L).....	64
Tablo 3.15.	Çalışmada kullanılan atıksuların karakterizasyonları.....	66
Tablo 4.1.	DGGE akrilamit jel görüntüsünde kuyuları temsil eden numuneler	209
Tablo 4.2.	Asetat+laktat+benzoik asit ve glikoz+laktat+benzoik asit üçlü karışım beslemeli reaktörlerden alınan numunelere ait DGGE bantlarından elde edilen mikrobiyal türler	210
Tablo 4.3.	DGGE akrilamit jel görüntüsünde kuyuları temsil eden numuneler	217
Tablo 4.4.	Asetat+laktat+benzoik asit ve glikoz+laktat+benzoik asit üçlü karışım sürekli beslemeli reaktörlerden alınan numunelere ait DGGE bantlarından elde edilen mikrobiyal türler	218
Tablo 4.5.	Evsel atıksu çalışmalarında DGGE jel görüntüsünde farklı türleri temsil eden dikey yönde numaralandırılmış bantlar	225

Tablo 4.6.	Mezbaha atıksuyu ile yapılan çalışmada elde edilen DGGE jel görüntüsünde farklı türleri temsil eden dikey yönde numaralandırılmış bantlar	228
Tablo 4.7.	Yağ endüstrisi atıksuyu ile yapılan çalışmada elde edilen DGGE jel görüntüsünde farklı türleri temsil eden dikey yönde numaralandırılmış bantlar	230
Tablo 4.8.	Gerçek atıksuların kullanıldığı reaktörlerden alınan numunelere ait DGGE bantlarından elde edilen mikrobiyal türler	232
Tablo 4.9.	Evsel atıksu çalışmasında kullanılan MYH için elde edilen kinetik katsayılar	241
Tablo 4.10.	Yağ endüstrisi atıksularında kullanılan MYH için elde edilen kinetik katsayılar	242
Tablo 4.11.	Mezbaha endüstrisi atıksularında kullanılan MYH için elde edilen kinetik katsayılar.....	243

KISALTMALAR LİSTESİ

ADV	: Açık Devre Voltajı
ATP	: Adenezin trifosfat
BOİ	: Biyokimyasal oksijen ihtiyacı
BY	: Bromokresol yeşili
DGGE	: Denature gradyan jel elektroforezi
ED	: Enerji dönüşümü
EDTA	: Etilendiamin tetra asetik asit
ETS	: Elektron taşıma sistemi
HNQ	: 2-hydroxy-1,4-naphthoquinone
KDM	: Katyon değişim membranı
KOİ	: Kimyasal oksijen ihtiyacı
MK	: Metil kırmızısı
MM	: Metilen mavisi
mV	: Milivolt
mW	: Miliwatt
MYH	: Mikrobiyal yakıt hücresi
NADH	: Nikotinamid adenin dinükleotid hidrojen
NK	: Nötral kırmızısı
PCR	: Polimeraz zincir reaksiyonu
PDM	: Proton değişim membranı
V	: Volt
VFA	: Uçucu yağ asiti
W	: Watt

1. GİRİŞ

1.1 Genel Bilgi

Son yıllarda enerji ihtiyaçlarını karşılamak için fosil yakıtların kullanımındaki artış çevresel problemleri hızlandırmış ve yenilenebilir enerji ihtiyacını giderek arttırmıştır. Enerji insan yaşamının en büyük ihtiyaçlarından biri olduğundan bu ihtiyacı karşılamak için insanoğlu sürekli bir arayış içerisinde olmuştur. Bu arayışlar, güneş, rüzgar, biyoenerji gibi yenilenebilir enerji kaynaklarının bulunmasını sağlamıştır.

Yenilenebilir enerji kaynakları içerisinde biyoenerji son yıllarda oldukça ilgi görmüştür. Birçok teknoloji enerji bakımından zengin olan biyokütleden enerji elde etmek için kullanılmaktadır. Örneğin anaerobik çürütücüler biyokütleden biyogaz elde etmek için kullanılmaktadır. Fakat elde edilen enerjinin dönüşümü verimsiz olarak gerçekleştiğinden enerji kaybı yaşanmaktadır. Ayrıca bu teknolojinin uygulanabilirliği atığın sahip olduğu organik madde içeriği, pH, tamponlama kapasitesi gibi birçok faktöre bağlı olmaktadır. Bu tür problemlerden dolayı enerjinin dönüşümü sırasında kayıpların olmadığı ve enerjinin sorunsuz bir şekilde üretildiği sistemler tercih edilmelidir.

Mikrobiyal yakıt hücreleri (MYH) yenilenebilir enerji kazanımı için kullanılan yeni bir teknolojidir. MYH'ler bakterileri kullanarak organik maddelerden doğrudan elektrik üretiminin gerçekleştirildiği biyoelektrokimyasal reaktörlerdir. Bakterilerin elektrik üretebildiği ilk olarak 1900'lü yıllarda keşfedilmiştir. MYH'ler ile ilgili çalışmalar 90'lı yıllarda başlamış ve bu alanda yapılan çalışmaların sayısı günümüze kadar önemli düzeyde artarak devam etmiştir (Logan, 2008). MYH'ler organik maddelerden elektrik üretirken aynı zamanda atık arıtımı da yapabilmektedir. Atıksu arıtımı için klasik su ve atıksu arıtma tesisleri yüksek miktarda enerji gereksinimine ihtiyaç duymaktadır. Özellikle çamur arıtımı ve havalandırma önemli düzeyde enerji ihtiyacı duyulan proseslerdir. Bunun aksine MYH uygulamalarında temiz, yenilenebilir ve çevreyi kirletmeyen enerji üretimi söz konusudur. MYH'ler klasik atıksu arıtma proseslerine nazaran birçok avantaja sahiptir. Bu avantajlar;

- ✓ Atıktan elektrik enerjisi üretebilmesi,
- ✓ Üretilen elektrik enerjisinin insan aktivitelerinde direkt olarak kullanılabilmesi,

- ✓ Ortam sıcaklığında çalışılabilmesi ve reaktörü işletmek için ilave bir enerji ihtiyacının olmaması,
- ✓ Dış ortamı rahatsız edecek gürültü, koku gibi problemlerinin olmayışı şeklinde sıralanabilir.

1.2 Çalışmanın Amacı

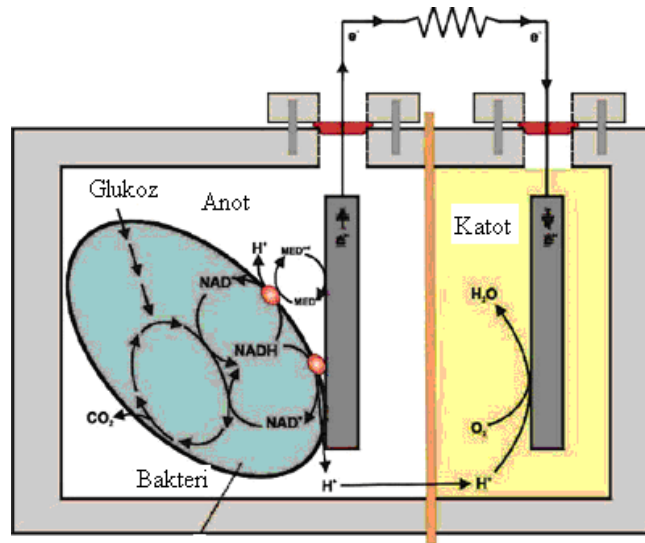
Bu tezin amacı, atıksulardan elektrik üretim potansiyeline sahip olan mikrobiyal yakıt hücrelerinde spesifik elektrik üretim potansiyelini belirlemek ve aşağıda sıralanan amaçları gerçekleştirmektir.

- 1- Farklı organik madde içeriğine sahip sentetik atıksuların MYH sisteminde elektrik üretim kapasitelerinin belirlenmesi,
- 2- Gerçek atıksuların MYH sistemindeki elektrik üretim kapasitelerinin belirlenmesi,
- 3- Farklı elektrot malzemeleri ve membran türlerinin MYH'deki elektrik üretim kapasitelerinin belirlenmesi,
- 4- Farklı elektron mediyatörlerinin MYH'nin elektrik üretimi üzerindeki etkisinin araştırılması,
- 5- MYH'de her bir aşamada mikrobiyal türlerin PCR-DGGE moleküler tekniklerle belirlenmesi,
- 6- Mikrobiyal kinetiklerin incelenmesi.

2. LİTERATÜR

2.1 Mikrobiyal Yakıt Hücreleri

Mikrobiyal yakıt hücreleri elektrik enerjisi üretmek için bakteriyel metabolizmaların kullanıldığı bir biyoelektrokimyasal reaktördür. Bakterilerin elektrik üretebilme yeteneği ilk olarak 1911 yılında Potter tarafından bulunmuştur (Potter, 1911). Fakat bu buluş 1980'li yıllara kadar düşük enerji üretiminden dolayı dikkat çekmemiştir. MYH reaktörü birbirinden proton değiştirici membran ile ayrılan, katot ve anot adı verilen iki bölmeden oluşmaktadır (Şekil 2.1). Anot bölgesinde bulunan mikroorganizmalar, organik maddeleri oksitleyerek elektron ve proton (hidrojen) üretirler. Anot bölgesinde üretilen elektronlar, bir devre ile katot bölgesine aktarılır. Hidrojen ise proton değiştirici zardan geçerek katot bölgesine ulaşır ve burada nihai elektron alıcısı (örneğin O_2 , Fe^{+3} gibi) ile birleşerek suya dönüşür. Kuvvetli bir e^- alıcısı olan O_2 'nin varlığı ve pozitif elektrik yükü oluşturan H^+ 'lar sayesinde, anottaki elektronlar katoda doğru çekilir ve böylece hat üzerinde bir elektrik akımı oluşur. Anot bölgesindeki mikroorganizmalar, organik maddeleri (elektron verici) oksitleyerek elektron ve H^+ üretirler. Elektrik enerjisi üretebilmek için anot bölgesinde oksijen ve başka bir elektron alıcı bulunmamalıdır. Tek elektron alıcı olarak anot elektrodunun bulunması ve anot bölgesinin tamamen anaerobik olması gerekmektedir.



Şekil 2.1. Bir mikrobiyal yakıt hücresinin temel bileşenlerinin şeması (Rabaey ve Verstraete, 2005c)

Anot bölgesinde bakteri büyümesi, oksitlenebilen organik madde, ortama serbest

bırakılan elektronlar ve çözeltiye bırakılan protonlar mevcuttur. Katot bölmesinde ise çözünmüş oksijen elektronların protonlar ile reaksiyonu için verilir (Logan, 2008).

1980’li yıllarda MYH kullanılarak üretilebilecek elektrik enerjisinin elektron araçları (elektron mediyatörleri) ile ciddi miktarda arttırılabileceği bulunmuştur. Anot bölgesinde bulunan bakteriler anot ortamına uyumlu olmadıkları sürece, mikroorganizmalar elektronları doğrudan doğruya anot elektrotuna aktaramazlar. Birçok bakteri yüzeyi iletken olmayan lipid membran bulunduğundan elektronların anot elektrotuna direk olarak transferi engellenmektedir. Bu durumda elektronların anot elektroduna transferini hızlandıran elektron taşıyıcılar kullanılmalıdır (Davis ve Higson, 2007). Oksitlenmiş durumdaki elektron taşıyıcılar, mikroorganizma zarından elektronları alarak indirgenirler. Daha sonra anot elektroduna giderek elektronları bırakırlar ve kendileri tekrar indirgenmiş duruma geçerek anot sıvısı içerisinde dağılırlar. Bu döngü, elektron transfer hızını arttırarak elektik üretim verimini yükselmektedir.

Bazı sentetik elektron taşıyıcılar; nötral kırmızı gibi boya ve metalorganikler, metilen mavisi, tionin (thionine) ve EDTA olarak sıralanabilir. Bazı bakteriler ise, doğal olarak üretilen maddeleri ve hatta mikrobiyal yan ürünleri elektron taşıyıcı olarak kullanabilmektedir. Hümik asit, antrakuinona ve tiyosülfat gibi elektron taşıyıcıları elektronları bakterilerin hücre zarının içerisinde anot elektroduna transfer edebilmektedir (Du vd., 2007).

MYH ile elektrik üretimindeki asıl gelişme ise bazı bakterilerin elektronları direk olarak anot elektrotuna transfer edebildiğinin bulunması ile olmuştur (Chaudhuri ve Lovley, 2003). Bu bakteriler, işletimde oldukça kararlı olup yüksek kolombik verime sahiptir. Bu bakterilere örnek verilecek olursa, en önemli türlerden bazıları *Geobacteraceae*, *Geobacter* ve *Rhodoferrax*’dır. Bu bakteriler anodofilikler olarak da bilinmekte ve anot yüzeyi üzerinde biyofilm oluşturarak elektronları anot elektroduna direkt aktarabilmektedirler. Anodofilik bakteriler kullanıldığında, anot elektrodu nihai elektron alıcısı olarak görev yapmaktadır.

Literatürde çok çeşitli MYH tipleri ile deneysel çalışmalar yapılmıştır. Genellikle en yaygın kullanılan MYH tipi iki hücreden oluşan H şeklindeki MYH’dir. Her iki bölmeyi birbirinden ayıran katyon geçiren membran, genellikle Nafion ya da Ultrex gibi katyon değişim zarından oluşmaktadır (Bond vd., 2002; Park vd., 1999; Min vd., 2005b; Rabaey

vd., 2003). Membranlar protonların geçişine izin vermeli fakat besin veya katot bölmesindeki elektron alıcısının anot bölmesine geçişine izin vermemelidir.

2.1.1 Mikrobiyal Yakıt Hücrelerinin Çalışma Prensibi

Bir organizmanın enerji ihtiyacını karşılamak için, organik molekülleri parçalayarak, karbon bağları arasındaki enerjiyi açığa çıkarma olayı solunum olarak tanımlanır. Solunumun, organizmadan organizmaya farklılık gösteren birçok şekli vardır ve hepsi de birçok karmaşık biyokimyasal reaksiyonlardan meydana gelmektedir. Oksijenli solunum sırasında, yakılacak olan bir organik molekül, önce glikolize olur. Ardından, sitrik asit döngüsüne aktarılır. Bu iki aşama sonunda, glikoz molekülü, CO_2 'ye kadar parçalanır. Ancak bu işlemler için O_2 kullanılmaz. Gerekli olan oksijen H_2O 'dan karşılanır. Bunun sonucunda, sudan ayrılan elektronlar ve H^+ 'lar NADH gibi moleküllerin yardımı ile elektron taşıma sistemine aktarılırlar. MYH'lerin anot bölmesinde oksijen olmadığından elektron taşıma sistemi (ETS)'nin son proteinindeki elektronlar O_2 'ye aktarılamaz. Anot ortamında başka bir elektron alıcısı da mevcut olmadığından elektronlar anot elektroduna aktarılır. ATP üretimi sırasında hücre içindeki H^+ 'lar, hem O_2 olmadığı için su oluşumuna katılamayacak, hem de ETS durduğu için dışarıya taşınamayacaktır. Bunun sonucu olarak da, oksijenli solunumla ATP üretimi duracaktır. Oksijenli solunum, normal olarak çalıştığında, hücre dışına taşınan H^+ 'lar, hücreden uzaklaşma fırsatı bulamadan, elektriksel hareket kuvveti ile hücre içine geçerler. Ancak, MYH'lerde bu durum sınırlandırıldığı için H^+ 'lar, anot çözeltisi içerisinde dağılırlar.

Hücre dışına aktarıldığı için anot bölmesinde yoğun bir şekilde bulunan H^+ 'lar, basit dağılma ve elektrik yükü nedeniyle proton değiştirici zardan geçerek katot bölmesine ulaşırlar. H^+ 'ların varlığı da elektronların katot üzerindeki yoğunluğunun artmasına sebep olur. Oksijen yokluğunda, bu durum bir denge oluşana kadar devam eder. Daha önce belirtildiği gibi katot bölmesi oksijenlidir. Elektronlar, kuvvetli bir elektron alıcısı olan oksijene doğru geçer ve bu kompleksin çözeltideki H^+ 'larla birleşmesi sonucu H_2O oluşur. Böylece oksijenli solunumun son basamağı, mikroorganizmalardan çok uzak katot bölmesinde tamamlanmış olur. Bu durumda, katot bölmesindeki H^+ 'lar tüketilerek yoğunluğu düşürüldüğü için, anot bölmesinden katot bölmesine H^+ geçişinin sürekliliği sağlanmış olur. Devrenin sürekliliğinin sağlanması ve katot üzerindeki elektronların

oksijene aktarılması ile katot elektrotunun pozitif yüklü olması sağlanacak ve devreye bir direnç takılması halinde üretilen elektrik enerjisi kullanılabilir hale gelecektir. Anotta biriken elektronların sürekli katoda aktarılmasıyla ETS'deki elektronlar sürekli olarak anot elektrotuna gönderildiğinden oksijensiz ortamda oksijenli solunumun sürekliliği de sağlanmış olur.

2.1.2 Atıksu Arıtımında Mikrobiyal Yakıt Hücresi

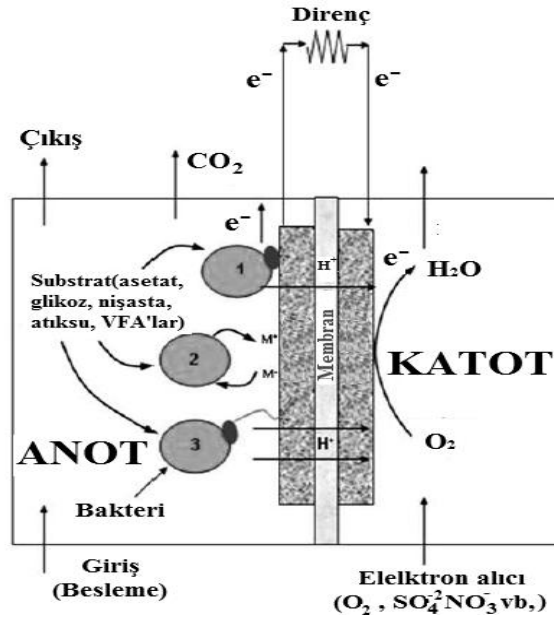
Mikrobiyal yakıt hücresi teknolojisi atıksu arıtma işlemi için elektrik enerjisi harcamak yerine elektrik enerjisi üretebilen bir yaklaşım olduğundan gelecek vaad etmektedir. Kim vd. (1990) biyoyakıt hücresi içerisindeki bakterileri suda bulunan laktatın konsantrasyonunu tespit etmek için kullanılabileceğini tespit etmişlerdir. Liu vd. (2004) evsel etiksuların pratik düzeyde arıtımı ve eş zamanlı olarak elektrik üretiminin tespiti ile mikrobiyal yakıt hücrelerini atıksu arıtımı ve elektrik üretimi en ileri seviyeye ulaştığını belirtmişlerdir. Bu çalışmada üretilen güç 26 mW/m^2 olmuştur. Bu değer daha önce yapılan çalışmalardan elde edilen güç değerlerden daha yüksektir.

Son yıllarda, mikrobiyal yakıt hücrelerinin pratik olarak kullanımı üzerine yoğunlaşmıştır. İlk amaç evsel, endüstriyel ve diğer atıkların arıtımı için uygun bir teknoloji geliştirmektir. Atıksudan elde edilen enerji bir şehir için gerekli olan enerjiyi karşılamaya yeterli olmazken bir arıtma tesisini çalıştırmak için yeterli olabilir. Mikrobiyal yakıt hücrelerinin işletimi ile elde edilen bu enerji kullanılarak su altyapı sistemlerinin enerji ihtiyacı karşılanabilir. Bu enerjiye örnek olarak bir şehirden elde edilen yüksek miktardaki atıksudan elde edilebilecek enerji gösterilebilir.

2.2 MYH'lerde Elektron Transferi

MYH'lerde elektrik üretimi için organik maddelerden serbest bırakılan elektronların elektrotlara transfer edilmesi önemli bir husustur. Birçok çevresel ortamda elektron alıcıların mikroorganizmalar tarafından kullanılabilirliği sınırlıdır, bu olay mikroorganizmaların solunum yollarının engellenmesi olarak gösterilir. Bu şekildeki çevre koşullarında fermentasyon organizmaları nadiren çoğalmaktadır. Fermentasyon; ayrışma ürünleri veya organik besinlerin (substratların) elektron verici ve aynı zamanda elektron

alıcı olarak görev yaptığı ve ATP'nin tekrar üretildiği metabolik bir prosesdir. Bu prosesin avantajı fermantasyon organizmaları, yalnızca solunum yollarını kullanan organizmaları desteklemeyen birçok ortamda gelişebilmeleridir. Çünkü uygun elektron alıcılar mevcut değildir. Fermantasyon enerji bakımından solunum sistemleri ile karşılaştırıldığında daha az verimlidir. Örneğin, glikozun anaerobik ayrışması sırasında 26-38 mol ATP oluşurken glikozun fermentasyonu sırasında yalnızca 1-4 mol ATP oluşmaktadır. Mikroorganizmalar elektronları transfer ederek enerji üreterek yaşamlarını sürdürür ve çoğalırlar. Üretilen elektronların anot elektrotuna transferi birkaç şekilde olabilmektedir. Pant vd. (2010) bir MYH'de gerçekleşebilecek muhtemel elektron transfer yöntemlerini basitleştirilmiş bir şekilde ifade etmişlerdir (Şekil 2.2).



Şekil 2.2. Muhtemel elektron transfer yöntemlerinin görüldüğü basitleştirilmiş çift bölmeli mikrobiyal yakıt hücresi: (1) Direk elektron transferi (Hücre dışı membran sitokromu yoluyla), (2) Mediyatörler vasıtasıyla elektron transferi, (3) Nano kablolar vasıtasıyla elektron transferi (Pant vd., 2010).

Solunum sırasında mikroorganizmalar düşük bir redoks potansiyelinde elektronca zengin olan bir besin maddesinden (substratdan) elektronları serbest bırakır ve bu elektronları birçok elektron transfer kompleksi vasıtasıyla son elektron alıcının indirgendiği hücre zarına (membranına) transfer ederler. Mikroorganizmalar elektronların akışı ile üretilen enerjiyi kullanamazlar. Elektronların akışı Mitchell tarafından tanımlandığı gibi membrandan karşı tarafa proton gradiyenti oluşturmak için kullanılmaktadır. Membran kompleksi (ATP sentezi) protonların iç kısma doğru akışı ile serbest bırakılan enerji taşıyıcı moleküller üretmek için kullanılır. Buna örnek olarak adenosin trifosfat (ATP) verilebilir. Proton gradiyenti oluşturularak elektron verici ve

elektron alıcı arasındaki potansiyel farklılık süreç içerisinde enerjinin üretimi için kullanılır. Mikroorganizmaların solunumunda farklı elektron alıcıların önemli bir kısmını kullanılabılır. Bunlar sırası ile oksijen, nitrat, mangan oksitler ve sülfattır. Bir MYH'nin anot bölmesinde üretilen elektronlar anot elektrotuna başlıca üç mekanizma ile aktarılır. Bunlar; direk elektron transferi, yapay mediyatörler ile elektron transferi ve mikroorganizmaların ürettiği mediyatörler ile elektron transferi şeklindedir (Şekil 2.2).

2.2.1 Direkt Elektron Transferi

MYH'lerde direk elektron transfer mekanizması organik maddenin oksitlenmesi ile açığa çıkan elektronların anot yüzeyine c-tipi sitokrom gibi taşıyıcı proteinler ile aktarılması şeklinde gerçekleşir. *Shewanella*, *Geobacteraceae*, *Geobacter* ve *Rhodospirillum rubrum* gibi bakteriler organik maddeleri parçalaması sonucu elde ettikleri elektronları direk olarak elektrot yüzeyine aktarabilirler (Liu vd. 2010a). Bu bakteriler anodofiller olarak da bilinmekte ve anot yüzeyinde biyofilm oluşturarak elektronları anot elektrotuna aktarabilmektedirler.

Gorby vd. (2005) *Geobacter* ve *Shewanella* türü bakterilerde “nano tel” adını verdikleri iletken uzantıların varlığını tespit etmişlerdir. Reguera vd. (2005) ise *Geobacter sulfurreducens* türü bakterilerin sahip olduğu iletken uzantıları keşfetmiş, fakat *Shewanella oneidensis* türü bakterilerin uzantılarının *Geobacter sulfurreducens* türü bakterilerin uzantılarından farklı olduğunu belirtmişlerdir. *Geobacter sulfurreducens* bakterileri tarafından üretilen uzantılar daha ince ipliklere sahipken *Shewanella oneidensis* bakterileri tarafından üretilenlerin birkaç iletken demet tel (kalın yapıda) şeklinde olduğu görülmüştür. Hücre membranı ile yapılan direk elektron transferi *Shewanella spp.* türlerinde görülürken pili aracılığı ile direk elektron transferi ise *Geobacter spp.* türlerinde görülmektedir. Pili ile yapılan elektron taşınımında yer alan proteinler diğer taşınımında yer alan proteinlerden farklılık göstermektedir. Hücre membranı ile yapılan elektron taşınımında mikroorganizma türleri anot elektrotu ile yüzeysel temas halinde iken, pili aracılığı ile yapılan elektron taşınımında bakterilerin anot elektrotu ile temasları gerekmektedir. Çünkü pili yapısı uzundur, pilinin ucunun anot elektrotu ile temas etmesi yeterlidir. Pili aracılığı ile elektronu ileten bakterilerin daha çok elektrik enerjisi üretmelerinin nedeni, aynı anot elektrot yüzey alanına membranları aracılığı ile taşınım yapan bakterilerden daha fazla bakterinin elektronlarını iletebilmeleridir. Yani pili aracılığı

ile elektronlarını ileten bakteriler, anot yüzeyinde daha kalın bir biyofilm tabakası oluşturmaktadır (Reguera vd., 2006).

2.2.2 Yapay Mediyatörler ile Elektron Transferi

Yapay mediyatörler ile elektronların transfer mekanizması elektron taşınımı olarak da adlandırılmaktadır. Bu elektron taşıyıcılar genellikle hücre içerisindeki bir veya daha fazla elektron taşıyıcıdan elektronları alıp hücre membranlarından geçme yeteneğine sahiptirler. Mediyatörler hücreden indirgenmiş formda çıkarak elektronları elektrot yüzeyine iletirler (Lovley, 2006). Mediyatörler elektronları hücre metabolizmasından hücre dışına iletemeyen *Escherichia coli*, *Pseudomonas*, *Proteus*, ve *Bacillus* türleri gibi mikroorganizmalar için önemlidir (Davis vd., 2007). MYH’lerde güç üretimini arttırmak için yaygın olarak kullanılan elektron taşıyıcıları sıralayacak olursak thionine, benzyliologen, 2,6-dichlorophenolindophenol, 2-hydroxy-1,4-naphthoquinone, farklı fenazinler, fenotiyazinler, fenoksazinler, demir şelatlar, metilen mavisi ve nötral kırmızısıdır. Etkin bir elektron taşınımı sağlamak için mediyatörlerin aşağıdaki özelliklere sahip olmaları gereklidir (Du vd., 2007).

- ✓ Hücre zarından (membranından) kolaylıkla geçebilmeli,
- ✓ Elektron transfer zincirinden elektronları alabilmeli,
- ✓ Yüksek elektrot reaksiyon hızına sahip olabilmeli,
- ✓ Anot sıvısı içerisinde yüksek çözünürlüğe sahip olmalı,
- ✓ Biyolojik olarak ayrışmamalı,
- ✓ Mikroorganizmalar üzerinde toksik olmamalı,
- ✓ Maliyeti düşük olmalıdır.

2.2.3 Mikrobiyal Ürünler ile Elektron Transferi

Bazı mikroorganizmaların hücre dışı elektron transferini sağlamak için kendi mediyatörlerini üretebildikleri bilinmektedir. *Shewanella oneidensis* bu mekanizmayı kullanabildiği ileri sürülen ilk bakteri türüdür (Park ve Zeikus, 2003). Ayrıca *Geothrix fermentans* (Newman ve Kolter, 2000) ve *Pseudomonas* türlerinin de elektron taşıyıcıları üretebildiği bilinmektedir. *Pseudomonas* türleri elektronları anot elektroduna transfer eden “pyocyanin”i ürettikleri belirlenmiştir (Rabaey vd. 2005a).

2.2.4 Mediyatörlerle İlgili Yapılmış Çalışmalar

Rahimnejad vd. (2011b) MYH'de glikozu karbon kaynağı olarak kullanıp elektrik enerjisi üretmişlerdir. Elektrik üretimini arttırmak amacıyla metilen mavisini MYH'de elektron taşıyıcı olarak kullanmışlardır. Metilen mavisini (MB) 50, 100, 200, 300 ve 400 μM konsantrasyonlarında sisteme ilave etmişlerdir. MYH'den maksimum güç ve akım yoğunluğunun 300 μM konsantrasyonundaki metilen mavisi ilavesinde elde etmişlerdir. Çalışmada elektrot olarak grafit elektrot vembran olarak Nafion 117 proton değişim membranı kullanılmıştır. 300 μM metilen mavisi ilavesi ile 12,3 μW maksimum güç ve 232 μA maksimum akım üretilmiştir. Ayrıca maksimum açık devre voltajı 250 mV olarak ölçülmüş ve 36 saat boyunca sabit akım elde edilmiştir.

İki bölmeli MYH'de asetat, glikoz ve ksiloz'dan elektrik üretiminin araştırıldığı bir başka çalışma Thygesen vd. (2009) tarafından gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada mediyatör olarak hümik asit kullanılmıştır. Mediyatör kullanılmaksızın asetat ile maksimum voltaj (570 mV, 1000 Ω) ve maksimum güç yoğunluğu (123 mW/m^2) elde edilmiştir. Glikoz için güç yoğunluğu ise 28 mW/m^2 ve voltaj 380 mV, ksiloz için güç yoğunluğu 32 mW/m^2 ve voltaj 414 mV olarak kaydedilmiştir. Mediyatör olarak hümik asit kullanılması (2 g/L) durumunda güç yoğunluğu glikoz için %84 ve ksiloz için %30 artmıştır.

Ho vd. (2011) karbon kumaş, karbon kağıt ve karbon keçe elektrotlar ile yaptıkları çalışmada farklı mediyatörlerin elektrik üretimi üzerindeki etkisini araştırmıştır. Karbon kumaş elektrot ile mikroorganizmadan elektrota elektron transferi iyi düzeyde gerçekleşmiştir. Karbon kağıt elektrot daha az pürüzlülüğe ve yüksek miktarda tortulu yüzeye sahip olduğundan ile daha düşük bir elektrik üretim performansı gözlenmiştir. Bu çalışmada 2-hydroxy-1,4-naphthoquinone ve thionin mediyatörü denenmiştir. Elektrot yüzeyine elektron transferi 2-hydroxy-1,4-naphthoquinone mediyatörünün kullanılmasına karşılık thionin mediyatörünün kullanılması ile daha fazla gerçekleşmiştir. Bunun sebebi 2-hydroxy-1,4-naphthoquinone mediyatörünün yüksek derecede çözünürlüğe sahip olması, stabilitesi ve elektrot yüzeyine adsorbe olma kapasitesinin düşük olması olarak gösterilmiştir.

Babanova vd. (2011) mikroorganizmalardan anot elektrotu yüzeyine elektron transferini hızlandırmak ve bu sayede üretilen elektrik miktarını arttırmak amacıyla çözünmüş elektron mediyatörlerini kullanmışlardır. Bu çalışmada her bir bölmenin efektif çalışma hacmi 13 ml olan çift bölmeli bir MYH kullanılmıştır. Anot ve katot bölmesini biri

birinden ayırmak için Nafion 117 proton değişim membranı kullanılmıştır. Metilen mavisi (MM), metil oranj (MO), bromokresol yeşili (BY), metil kırmızısı (MK) ve nötral kırmızısı (NK) mediyatörleri MYH sistemine ilave edilmiş ve elde edilen güç yoğunlukları sırası ile $BY < NK < MK < MO < MM$ şeklinde gerçekleşmiştir. En yüksek güç yoğunluğunu 640 mW/m^2 ile 0,8 mM metilen mavisi ilavesi ile elde etmişlerdir. Her bir mediyatör için optimum konsantrasyonu metil oranj için 0,3 mM, Metil kırmızısı için 0,6 mM, metilen mavisi için 0,8 mM, nötral kırmızı için 0,9 mM, bromokresol yeşili 0,6 mM olarak tespit edilmiştir.

Velasquez-Orta vd. (2010) çalışmalarında kullandıkları MYH'de *Shewanella* bakterisini kullanıp, flavin mediyatörünün optimum konsantrasyonunu ve elektrik üretimini araştırmışlardır. Çalışmada anot elektrotu olarak grafit elektrot ve proton değişim membranı olarak Nafion 117 kullanılmıştır. MYH'ye flavinlerin mikro molar konsantrasyonlarında ilavesi ile akım ve güç artışı olmuştur. 4,5-5,5 μM flavin konsantrasyonunda MYH'de üretilen maksimum akım miktarı 0,2–0,6 μM flavin konsantrasyonlarından dört kat daha fazla olmuştur. Yüksek flavin konsantrasyonlarında 150 mW/m^2 lik güç üretimi elde edilmiştir.

Literatürde yapılmış olan medyatör çalışmalarında MYH'de hali hazırda kullanılan mediyatörlerin farklı konsantrasyonlarda ilavesi ile MYH'de üretilen güç miktarını ne şekilde etkilediği açık bir şekilde tespit edilmemiştir. Ayrıca farklı medyatör türü ve konsantrasyonların farklı elektrotlar ile kullanıldığında güç üretimini ve MYH iç direncinin nasıl etkilendiği tam olarak tespit edilmemiştir. Ayrıca literatürde medyatör ile yapılmış çalışmalarda sentetik atıksular kullanılmıştır, gerçek atıksular kullanılarak medyatörlerin etkisinin tespit edildiği çalışma mevcut değildir. Literatürde bu noktada ciddi açık bulunmaktadır. Bu amaçla yapılan tez çalışmasında gerçek atıksu beslemeli bir MYH'de farklı mediyatör türü ve konsantrasyonlarının farklı elektrotlar kullanıldığında MYH'de üretilen güç miktarına ne şekilde katkı yapacağı belirlenmiştir.

2.3 Mikrobiyal Yakıt Hücrelerinde Kullanılan Substratlar

MYH'lerde elektrik üretimini etkileyen en önemli faktörlerden birisi kullanılan besin maddesidir (Liu vd., 2009). Saf bileşiklerden atıksu içerisinde bulunan kompleks bileşiklere kadar birçok besin maddesi MYH'lerde elektrik üretimi için kullanılabilir.

Başlıca arıtma prosesleri olan aktif çamur sistemlerinde atıksu arıtımı için oldukça fazla miktarda enerji harcanmaktadır. Amerika’da bulunan aktif çamur proseslerindeki oksijen gereksinimini karşılamak için gerekli olan elektrik ihtiyacı ülkenin elektrik tüketiminin %2’sine karşılık gelmektedir (Electric Power Research Institute, 2002). Günümüzde atıksu arıtımında önem verilen husus enerjinin geri kazanımı ve tekrar kullanımıdır. Bu konuda birçok alternatif mevcuttur. Mikrobiyal yakıt hücreleri atıksu arıtımı yapmasının yanı sıra enerji kazanımının da sağlanması açısından ciddi bir araştırma konusu olmuştur. Şimdiye kadar yapılan çalışmalarda birçok organik madde ve atıksu MYH’lerde mikroorganizmalar için besin kaynağı olarak kullanılmıştır.

Tablo 2.1 MYH çalışmalarında kullanılmış substratların kapsamlı bir listesini vermektedir. Literatüre bakılarak MYH’lerin performansını değerlendirmek zordur, çünkü farklı MYH’ler için farklı işletme şartları, farklı elektrot tipleri, farklı elektrot yüzey alanları ve farklı mikroorganizmalar söz konusu olabilir. Bu alanda yapılan çalışmalarda MYH’nin performansını belirtmek için farklı birimler kullanılmıştır. En genel olarak kullanılan birimlerden biri akım yoğunluğudur. Akım yoğunluğu MYH’de üretilen akımın kullanılan elektrotun birim yüzey alanı (mA/cm^2) veya MYH’nin birim hacminde üretilen akım miktarı (mA/m^3) olarak ifade edilmektedir. Tablo 2.2’de MYH performansları birim elektrot yüzey alanı başına üretilen akım miktarı (mA/cm^2) olarak verilmiştir. Ayrıca MYH’lerde kullanılan aşı kültürü ve elektrotlar hakkında bilgi verilmiştir. MYH’lerde yaygın olarak kullanılan bazı substratlar ve bu substratların MYH performansı üzerindeki etkisi aşağıda detaylıca tartışılmıştır.

2.3.1 Asetat

Asetat, şimdiye kadar yapılan birçok MYH çalışmasında elektrik üretimi için en fazla kullanılan substratlardan biridir. Asetat elektroaktif bakterileri geliştirmek için karbon kaynağı olarak yaygın bir şekilde kullanılmıştır (Bond vd., 2002). Liu vd. (2005) tek bölmeli MYH kullanarak asetat ile $506 \text{ mW}/\text{m}^2$ ($800 \text{ mg}/\text{L}$) güç üretmiştir. Bu değer bütirat kullanarak üretilen güç miktarından %66 daha fazladır. Chae vd. (2009) dört farklı besin maddesini kolombik etkinlik ve güç üretimini dikkate alarak kıyaslamıştır. Asetat ile beslenen MYH’de en yüksek kolombik verim gözlenmiştir. Kolombik verim asetat ile beslenen MYH’de %72,3 iken bütirat %43, propinat %36 ve glikoz %15 olarak belirlenmiştir. Aynı zamanda MYH’de besi maddesi olarak asetatın kullanımı protein

bakımından zengin atıksuların kullanımı ile kıyaslanmış, asetat ile beslenen MYH’de maksimum elektrik üretimi iki kat daha fazla olarak elde edilmiştir (Liu vd., 2009). Ancak, protein içeriği zengin olan atıksıyla beslenen MYH’nin asetat ile beslenen MYH’den daha fazla mikrobiyal çeşitliliğe sahip olduğu belirlenmiştir.

Tablo 2.1. Mikrobiyal yakıt hücrelerinde kullanılan farklı besin maddeleri ve maksimum akım üretim değerleri.

Substrat Tipi	Konsantrasyon	Aşı kaynağı	MYH tipi (elektrot yüzey alanı/veya hücre hacmi)	Akım yoğunluğu (mA/cm ²)	Referans
Asetat	1 g/L	Daha önce aşılanmış MYH'den alınan bakteri	Grafit fiber fırça (7170 m ² /m ³ fırça hacmi) anotlu küp şeklinde tek bölmeli MYH	0,8	Logan vd. (2007)
Arabitol	1220 mg/L	Daha önce aşılanmış MYH'den alınan bakteri	Tek bölmeli hava katotlu MYH (12 mL) 2 cm ² karbon kumaş anot 7 cm ² karbon kumaş katot	0,68	Catal vd. (2008)
Glikoz ile azo boyası	300 mg/L	Aerobik ve anaerobik çamur karışımı	Karbon kağıt (36 cm ²) kullanılan hava katotlu tek bölmeli MYH	0,09	Sun vd. (2009)
Karboksimetil selüloz (KMS)	1 g/L	<i>Clostridium cellulolyticum</i> ve <i>G. sulfurreducens</i>	Elektrot olarak grafit tabaka (16 cm ²) kullanılan ve katot bölmesinde ferrisiyanit kullanılan iki bölmeli MYH	0,05	Ren vd. (2008)
Selüloz parçacıkları	4 g/L	<i>Enterobacter Cloacae</i> saf kültürü	Karbon kumaşlı anot (1,13 cm ²) ve katot bölmesinde karbon fiber kullanılan U-Tüp MYH	0,02	Rezaei vd. (2009)

Substrat Tipi	Konsantrasyon	Aşı kaynağı	MYH tipi (elektrot yüzey alanı/veya hücre hacmi)	Akım yoğunluğu (mA/cm ²)	Referans
Sisteyn	385 mg/L	30 cm derinlikten alınmış sediment örneği	Karbon kağıdın (11,25 cm ²) elektrot olarak kullanıldığı iki bölmeli MYH	0.0186	Logan vd. (2005)
1,2-Dikloroethen	99 mg/L	Asetat kullanılmış MYH'den alınmış mikrobiyal kültür	Anot bölmesinde grafit tabakanın (20 cm ²) ve katot bölmesinde grafit granüllerin kullanıldığı iki bölmeli MYH	0,008	Pham vd. (2009)
Etanol	10 mM	Arıtma tesisinden alınan anaerobik çamur	Karbon kağıdın (22,5 cm ²) elektrot olarak kullanıldığı iki bölmeli MYH	0,025	Kim vd. (2007a)
Çiftlik gübresi	Su içerisinde 3 kg (%20 w/v)	Anaerobik ortamdan alınan aşı	Karbon kumaş elektrotlar (256 cm ²)	0,004	Scott ve Murano (2007)
Glikoz	6,7 mM	1 yıl süre boyunca sodyum asetatın kullanıldığı karışık bakteri kültürü	Tek bölmeli hava katotlu MYH (12 mL) 2 cm ² karbon kumaş anot 7 cm ² karbon kumaş katot	0,70	Catal vd. (2008)
Glukuronik asit	6,7 mM	Karışık bakteri kültürü	Tek bölmeli hava katotlu MYH (12 mL) 2 cm ² karbon kumaş anot 7 cm ² karbon kumaş katot	1,18	Catal vd. (2008)

Substrat Tipi	Konsantrasyon	Aşı kaynağı	MYH tipi (elektrot yüzey alanı/veya hücre hacmi)	Akım yoğunluğu (mA/cm ²)	Referans
Laktat	18 mM	<i>S. oneidensis</i> MR-1 saf kültürü	Grafit keçe elektrotlu (20 cm ²) iki ölmeli MYH	0,005	Manohar ve Mansfeld Greenman
Çöp sızıntı suyu	6000 mg/L	Çöp sızıntı suyu ve çamur	Karbon elektrot (30 cm ²) kullanılan iki bölmeli MYH	0,0004	vd. (2009)
Arpa özü, maya ekstraktı ve glikoz	%1	<i>E. cloacae</i> saf kültürü	Grafit kaplı elektrot (15 cm ²) ve mediyatör kullanılan çift bölmeli MYH	0,067	Mohan vd. (2008a)
Mikrosisteyn selüloz	7,5 g/L		Elektrot olarak grafit kaplama elektrot (84 cm ²) kullanıldığı çift bölmeli MYH	0,02	Rismani-Yazdi vd. (2007)
Fenol	400 mg/L	Karışık aerobik ve anaerobik aktif çamur	Karbon kağıt elektrot (25 cm ²) kullanılan çift bölmeli MYH	0,1	Luo vd. (2009)
Propinat	0,53 mM	Anaerobik çamur	Karbon kağıdın elektrot (22,5 cm ²) olarak kullanıldığı çift bölmeli MYH	0,035	Oh ve Logan (2005)

Substrat Tipi	Konsantrasyon	Aşı kaynağı	MYH tipi (elektrot yüzey alanı/veya hücre hacmi)	Akım yoğunluğu (mA/cm ²)	Referans
Ribitol	1220 mg/L	MYH'den alınmış aşı	Tek bölmeli hava katotlu MYH (12 mL) 2 cm ² karbon kumaş anot 7 cm ² karbon kumaş katot	0,73	Catal vd. (2008b)
Sodyum format	20 mM	Evsel atıksu arıtma tesisinden alınan sıvı	Karbon keçe (4,5 cm ²) kullanılmış çift bölmeli MYH	0,22	Ha vd. (2008)
Sodyum fumarat	25 mM	Saf <i>G. Sulfurreducens</i> kültürü	Paslanmaz çelik katot (2,5 cm ²)	2,05	Dumas vd. (2008)
Sorbitol	1220 mg/L	MYH'den alınmış aşı	Tek bölmeli hava katotlu MYH (12 mL) 2 cm ² karbon kumaş anot 7 cm ² karbon kumaş katot	0,62	Catal vd. (2008)
Nişasta	10 g/L	Saf <i>Clostridium Butyricum</i> kültürü	Katot bölmesinde ferrisiyanit kullanılmış dokunmuş grafit (7 cm ²) anoda sahip çift bölmeli MYH	1,3	Niessen vd. (2004)
Sakaroz	2674 mg/L	Septik tanktan alınmış anaerobik çamur	Paslanmaz çelik (213,29 cm ²) anot ve katot (176,45 cm ²) bölmesinde KMnO ₄ (0,2 g/L)	0,19	Behera ve Ghangrekar vd. ((22)

Substrat Tipi	Konsantrasyon	Aşı kaynağı	MYH tipi (elektrot yüzey alanı/veya hücre hacmi)	Akım yoğunluğu (mA/cm ²)	Referans
Ksilitol	1220 mg/L	MYH'den alınmış aşı	Tek bölmeli hava katotlu MYH (12 mL) 2 cm ² karbon kumaş anot 7 cm ² karbon kumaş katot	0,71	Catal vd. (2008b)
Ksiloz	6,7 mM	Karışık bakteri kültürü	Tek bölmeli hava katotlu MYH (12 mL) 2 cm ² karbon kumaş anot 7 cm ² karbon kumaş katot	0,74	Catal vd. (2008a)
Ksiloz ve humik asit	10 mM	Evsel atıksu	Elektrot olarak karbon kağıdın (76,5 cm ²) kullanıldığı iki bölmeli MYH	0,06	Huang ve Angelidaki (2008a)
Bira fabrikası atıksuları	2240 mg/L	Bira fabrikası atıksuyu	Anot bölmesinde karbon kumaşın kullanıldığı tek bölmeli MYH	0,2	Feng vd. (2008)
Bira fabrikası atıksuyu	600 mg/L	Anaerobik karışık kültür	Anot bölmesinde karbon fiber kullanılan tek bölmeli hava kataotlu MYH	0,18	Wen vd. (2009)
Çikolata endüstrisi atıksuları	1459 mg/L KOİ	Aktif çamur	Katot bölmesinde ferrisiyanit kullanılan grafit çubukların (16,485 cm ²) elektrot olarak kullanıldığı iki bölmeli MYH.	0,302	Patil vd. (2009)

Substrat Tipi	Konsantrasyon	Aşı kaynağı	MYH tipi (elektrot yüzey alanı/veya hücre hacmi)	Akım yoğunluğu (mA/cm ²)	Referans
Evsel atıksu	600 mg/L	Anaerobik çamur	Grafit elektrotun (50 cm ²) kullanıldığı mediyatörsüz çift bölmeli MYH	0,06	Wang vd. (2009)
Besin işleme endüstrisi	1672 mg/L KOİ	Anaerobik çamur	Elektrot olarak karbon kağıdın (22,5 cm ²) kullanıldığı iki bölmeli MYH	0,05	Oh ve Logan (2005)
Et işleme atıksuları	1420 mg/L	Evsel atıksu	Karbon kağıt elektrotların (25 m ² /m ³) kullanıldığı tek bölmeli MYH (28 mL)	0,115	Heilmann ve Logan (2006)
Kağıt gerikazanım atıksuları	2,452 g/L	Seyreltilmiş kağıt geri kazanım atıksuları	Anotta grafit fiber fırçanın (5418 m ² /m ³) kullanıldığı tek bölmeli MYH	0,25	Huang ve Logan (2008)
Protein içeriği olarak zengin atıksu	1,75 g/L KOİ	Mezofilik anaerobik çamur	Grafit çubukların (65 cm ²) elektrot olarak kullanıldığı iki bölmeli MYH	0,008	Liu vd. (2009)
Nişasta işleme atıksuları	4852 mg/L KOİ	Nişasta işleme atıksuyu	Anot bölgesinde karbon kağıdın (25 cm ²) kullanıldığı hava katotlu tek bölmeli MYH	0,09	Lu vd. (2009)

Substrat Tipi	Konsantrasyon	Aşı kaynağı	MYH tipi (elektrot yüzey alanı/veya hücre hacmi)	Akım yoğunluğu (mA/cm ²)	Referans
Domuz atıksuları	8320 mg/L KOİ	Domuz atıksuları	Toray karbon kağıdın (25 m ² /m ³) anot bölmesinde ve karbon kumaşın katot olarak kullanıldığı tek bölmeli MYH (28 ml)	0,015	Min vd. (2005a)
Sentetik asit-maden ocağı drenaj suyu	0,007 M Fe ⁺²	NaCl ve NaHCO ₃ ile doldurulup N ₂ ve CO ₂ ile oksijen giderilmiş	Karbon kumaş (7 cm ²) anot ve platinize edilmiş karbon kumaş katotlu çift bölmeli MYH	0,064	Cheng vd. (2007a)
Sentetik atıksu	12,1 g/L KOİ	Hidrojen üreten karışık anaerobik kültür	Grafit kaplı elektrot (83,56 cm ²) kullanılan çift bölmeli MYH	0,086	Venkata Mohan vd. (2008)
Sentetik atıksu	16 g KOİ/Gün	Yukarı akışlı ananerobik çamur yataklı reaktörden alınmış granüler çamur	Karbon elektrotun (160 cm ²) kullanıldığı membransız ve mediyatörsüz MYH	0,017	Aldrovandi vd. (2009)
Sentetik atıksu	510 mg/L	MYH'den alınmış anaerobik aşı	Paslanmaz çeliğin anot elektrotu (170 cm ²) olarak kullanıldığı ve grafit çubukların (150 cm ²) katot elektrotu olarak kullanıldığı çift	0,008	Jadhav ve Ghangrekar 2009
Melas ve üre içeren sentetik atıksu	1000 mg/L	Atıksu arıtma tesisinden alınan anaerobik karışım	Bakır kabloların (20,1 cm ²) anot elektrotu ve altın kaplama bakır kabloların katot olarak kullanıldığı çift bölmeli MYH	0,005	Kargi ve Eker (2007)

2.3.2 Glikoz

Glikoz MYH'lerde yaygın olarak kullanılan besin maddelerinden bir diğeridir. Kim vd. (2000) karbon kaynağı olarak glikozun kullanıldığı bir MYH'nin performansını incelemişler ve MYH'nin alışma periyodunun galaktoz ile besleme yapılan MYH ile kıyaslandığında daha kısa sürede elektrik ürettiğini belirtmişlerdir. Rabaey vd. (2003) diğer bir çalışmada katot bölmesinde 100 mM ferrisiyanit içeren ve kesikli olarak glikoz ile beslenen bir MYH'den 216 W/m^3 maksimum güç yoğunluğu elde etmişlerdir.

Hu (2008) anaerobik çamuru aşı kültürü olarak kullanıp MYH'de 96-960 mg/L KOİ aralığında %30'un üzerinde kolombik verim elde etmiştir. Aynı zamanda aynı sistemde glikoz ile 161 mW/m^2 maksimum güç üretimi elde etmiştir. Lee vd. (2008) MYH'de asetat ve glikozun enerji dönüşüm verimini (ED) kıyaslamış, asetatın ED'sini %42, glikozun ED'sinin ise %3 olarak belirlemiştir. Chae vd. (2009) bir mikrobiyal yakıt hücresine glikoz beslemesi yaparak düşük kolombik verim elde etmişlerdir. Düşük bir kolombik etkinlik elde edilmesinin sebebini ise glikoz fermentasyonu yapan bakterilerin ve metanojenlerin sistemde varlığından dolayı elektron akışının katot bölmesine değil de metan üretimine doğru olmasından kaynaklandığını belirtmişlerdir.

2.3.3 Şarap Fabrikası Atıksuları

Şarap fabrikalarında oluşan atıksuların MYH'lerde besin maddesi olarak kullanıldığı çalışmalar literatürde mevcuttur. Kolay ayrışabilen organik maddeleri içermesi ve inhibitör madde miktarının oldukça kısıtlı olması sebebiyle MYH'lerde elektrik üretimi için uygun bir atıksudur (Feng vd., 2008). Şarap fabrikası atıksularının KOİ konsantrasyonu 3000-5000 mg/L aralığında değişmektedir. Bu değerler evsel atıksuların konsantrasyonundan ortalama olarak on kat daha fazladır (Vijayaraghavan vd., 2006). Bu atıksuların yüksek karbonhidrat içeriği ve düşük amonyum azotu konsantrasyonuna sahip olması nedeniyle MYH'ler için ideal bir besin maddesidir. Feng vd. (2008) hava katotlu bir MYH kullanarak şarap fabrikası atıksularının arıtılmasını araştırmışlardır. Atıksuya 50 mM fosfat tamponu ilave ederek maksimum 528 mW/m^2 güç yoğunluğunu elde etmişlerdir. Bu çalışmalar dikkate alındığında şarap fabrikası atıksuları ile üretilen maksimum güç yoğunluğu aynı organik yükteki evsel atıksuyun kullanılması ile üretilen güç yoğunluğundan daha düşük

olduğu görülmektedir. Güç üretimi arasındaki bu fark iki atıksuyun iletkenliğinin farklı olmasından kaynaklanabilir. Wen vd. (2009) MYH için polarizasyon eğrisini kullanarak, şarap fabrikası atıksuları ile MYH performansını etkileyen en önemli faktörlerin reaksiyon kinetik ve kütle transfer kayıpları olduğunu belirtmişlerdir. Bu çalışmada, atıksuyun konsantrasyonunu arttırmak, reaksiyon sıcaklığını arttırmak ve yüzeyi pürüzlü elektrot kullanarak reaksiyon kinetik ve kütle transfer kayıplarından kaçınılabileceği vurgulanmıştır.

2.3.4 Nişasta İşleme Atıksuları

Nişasta işletme atıksuları diğer atıksulara nazaran yüksek miktarda karbonhidrat içermektedir. İçerisindeki karbonhidrat miktarı 2300–3500 mg/L, şeker miktarı %1,18-0,65, protein miktarı %0,12-0,15 ve nişasta miktarı 1500-2600 mg/L aralığındadır (Jin vd., 1998). Kim vd. (2004) nişasta işletme atıksularını besin maddesi olarak kullanıp 0,044 mA/cm² akım yoğunluğu elde etmişlerdir. Ayrıca 6 hafta içerisinde KOİ 1700 mg/L den 50 mg/L'ye düşmüştür. Lu vd. (2009) bir MYH'yi KOİ'si 4900 mg/L olan nişasta işleme atıksuları ile besleme yapmış ve 490,8 mV maksimum voltaj ve 239,4 mW/m² maksimum güç yoğunluğu elde etmiştir. Ayrıca, kolombik verim %7 olarak gerçekleşmiştir. Bu araştırmacılar düşük kolombik verimi oksijenin anot bölmesine difüzyonu sonucu diğer elektron alıcıların oksidasyonu, biyokütle oluşumu ve fermantasyonu ile ilişkilendirmişlerdir.

2.3.5 Boya Atıksuları

Azo boyası sentetik boyalar içerisinde en önemli sınıfı kapsamaktadır. Azo boyası boya üretimi ve tekstil endüstrisinde büyük ölçüde kullanılmaktadır. Bu atıksular alıcı ortamda ışık geçirgenliğini azaltması, oksijen transferini engellemesi gibi ciddi çevresel problemlere yol açabilmektedir (Pant vd., 2008). Bunun yanında bu boyalardan bazıları doğada toksik etki göstermektedir. Son yıllarda yapılan çalışmalar bu boyaları MYH'lerde besin maddesi olarak kullanıp boya atıksularından renk giderimi ve elektrik üretimini sağlamaya yöneliktir. Sun vd. (2009) bir azo boyası olan kırmızı X-3B (ABRX3) ile glikozu bir MYH içerisinde substrat olarak kullanmışlardır. Her ne kadar yüksek boya konsantrasyonuna (1500 mg/L) sahip olmasa da renk giderimi işleminin inhibe olmadığı

görülmüştür. Glikoz kullanılarak elektrik üretimi ABRX3'nin yüksek konsantrasyonundan (>300 mg/L) etkilenmektedir. Bu olay karbon kaynaklarından elde edilen elektronlar için anot elektrotu ve azo boyası arasındaki rekabetten kaynaklanmaktadır. Ayrıca, MYH'lerde azo boyası içeren atıksuların eş zamanlı arıtımı ve organik madde içeren atıksuların biyolojik olarak ayrışması iki farklı atıksuyu karıştırarak başarılabilir. Ayrıca, sistemin diğer karbon kaynakları ve boya karışımlarını kullanabilen bakteriyel popülasyonu tespiti ışığında önemli ölçüde geliştirilmeye ihtiyacı vardır.

2.3.6 Çöp Sızıntı Suları

Katı atık yığın halinde depolandığı zaman yağmur suyunun bu yığın içerisinden sızması sonucu oldukça yüksek kirliliğe sahip, nitel ve nicel olarak aşırı değişken sızıntı suları oluşmaktadır (Shu-Jun vd., 2008). Bu atıksular atıktan kaynaklanan nütrient ve kirleticileri bünyesinde barındırdığından dolayı ulaştığı alıcı ortama yüksek kirletici yükü taşımaktadır. Ayrıca, depolama alanında bulunan atığın tipine bağlı olarak toksik etkiye sahip çok çeşitli kirleticiler de içerebilirler (Olivero-Verbel, 2008). Çöp sızıntı suları başlıca dört grup kirleticiyi içermektedir. Bunlar; çözülmüş organik madde, inorganik makro bileşikler, ağır metaller ve ksenobiyotik organik bileşiklerdir (Kjeldsen vd., 2002). Çöp sızıntı suyunu KOİ giderimi için biyolojik yakıt hücrelerinde kullanımı Habermann ve Pommer (1991) tarafından rapor edilmiştir. Bu çalışmada akım üretimi değerinden söz edilmemiştir. Zhang vd. (2008) yukarı akışlı hava katotlu bir MYH'de 50 saatlik bir sürede çöp sızıntı suyundan 41 A/m^3 'lük akım yoğunluğu ve $12,8 \text{ W/m}^3$ maksimum güç üretimi elde etmiştir. Greenman vd. (2009) kolon şeklindeki bir MYH'de çöp sızıntı suyundan elektrik üretilebileceğini ve aynı zamanda arıtımının sağlandığını göstermiştir. Galvez vd. (2009) seri olarak bağlı üç adet MYH işletmiş, bu sayede elektrik üretimi ve KOİ giderimi elde etmişlerdir.

Özkaya vd. (2012) çift bölmeli bir MYH'de genç çöp sızıntı suyu kullanarak elektrik üretim potansiyelini araştırmışlardır. Yapılan çalışmada, Ti-TiO₂ elektrot ve grafit elektrot kullanılmıştır. Ti-TiO₂ elektrot kullanılarak elde edilen akım yoğunluğu değeri 476 mA/m^2 , grafit elektrot için elde edilen maksimum güç yoğunluğu değeri ise 31 mA/m^2 olarak elde edilmiştir. Anot elektrot yüzeyindeki baskın mikroorganizma türlerinin *Shewanella haliotis*, *Enterococcus sp.*, ve *Enterobacter sp.* olduğu rapor edilmiştir.

2.3.7 Substratlarla İlgili Yapılmış Çalışmalar

Ahn ve Logan (2011) yaptıkları çalışmada hava katotlu bir MYH'yi iki farklı sıcaklıkta (23 ± 3 °C ve 30 ± 1 °C) işleterek evsel atıksuların arıtımını ve MYH'nin elektrik üretim kapasitesini araştırmışlardır. Anot elektrotu olarak grafit fiber fırça kullanmışlardır. Mezofilik şartlarda 54 g KOİ/l-gün lük organik yüklemde %25,8 KOİ giderimi ve 422 mW/m^2 güç üretimi elde etmişlerdir. Sıcaklığın MYH'de güç üretimi ve arıtım verimliliği üzerinde önemli bir faktör olduğunu belirtmişlerdir.

Antonopoulou vd. (2010) tarafından yapılan bir çalışmada, iki bölmeli medyatörsüz MYH'de seyreltilmiş peynir altı suyu kullanılarak elektrik üretimi potansiyeli araştırılmıştır. Glikoz ve laktoz gibi sentetik substratlar MYH karakterizasyonu ve anot bölgesinde mikrobiyal alıştırma için kullanılmıştır. Seyreltilmiş peynir altı suyu ile elde edilen maksimum güç yoğunluğu $18,4 \text{ mW/m}^2$ iken buna karşılık gelen akım yoğunluğu 80 mA/m^2 ve voltaj 0,23V olarak belirlenmiştir. Söz konusu çalışmada oldukça düşük bir kolombik verim (%1,9) elde edilmiştir. Bu da peynir altı suyunun bir ön arıtmadan geçmesi gerektiğini göstermektedir. Aynı çalışmada, glikoz ve laktoz ile elde edilen maksimum güç yoğunlukları sırasıyla $15,2 \text{ mW/m}^2$ (kolombik verim %28) ve $17,2 \text{ mW/m}^2$ (kolombik verim % 22) olarak belirlenmiştir. Çalışma sonunda, peynir altı suyundan güç üretiminin iki bölmeli medyatörsüz MYH ile mümkün olduğu sonucuna varılmıştır.

Chae vd. (2009) tarafından yapılan bir başka çalışmada ise, iki bölmeli dört adet mikrobiyal yakıt hücresi, dört farklı substrat kullanılarak bir yıl süreyle işletilmiş, aşı olarak anaerobik çamur kullanılmıştır. Proton değiştirici membran olarak Nafion 117, anot elektrot karbon keçe (25 cm^2), katot elektrotu olarak ise $0,5 \text{ mg/cm}^2$ platin içeren gözenekli titanyum plaka (25 cm^2) kullanılmıştır. Atıksulardaki asetat, bütirat, propiyonat ve glikoz farklı konsantrasyonlardadır. Kolombik verim ve güç değerleri substrat tipine göre farklılık gösterirken bakteri çeşitliliği açısından benzer sonuçlar elde edilmiştir. Glikoz ile beslenen MYH'de maksimum 156 mW/m^2 güç yoğunluğu elde edilmiştir. Asetat ile beslenen MYH'de $64,3 \text{ mW/m}^2$, propiyonatta 58 mW/m^2 ve bütiratta $51,4 \text{ mW/m}^2$ güç yoğunluğu elde edilmiştir. Kolombik verim açısından ise en yüksek değer asetat ile beslenen MYH'de elde edilmiştir (%72,3). Bu değer bütiratta %43, propiyonatta %36 ve glikozda %15 olarak gerçekleşmiştir. Çalışma kapsamında, reaktörlerdeki bakteri tür dağılımı da incelenmiştir.

Anot biyofilminde tek başına baskın bir tür görülmemişken, en geniş tür çeşitliliği glikoz ile beslenen MYH'de görülmüştür.

Wen vd. (2010) bira fabrikasının atıksu arıtma tesisinden alınan atıksu ile beslenen tek bölmeli hava katotlu MYH'de elektrik üretimini araştırmışlardır. Çalışma sonunda elde edilen maksimum güç $24,1 \text{ W/m}^3$ 'tür. Ayrıca çalışmada, fosfat tampon çözeltisi ilavesinin ve substrat konsantrasyonun yükselmesinin reaktörün elektrokimyasal performansına ve substrat giderim verimine olumlu etkisinin olduğu görülmüştür.

Katuri vd. (2012) çift bölmeli bir MYH'de mezbaha atıksuyu kullanarak elektrik üretim kapasitesi ve mikrobiyal komünite incelemesi yapmışlardır. 100Ω 'luk dış direnç kullanarak MYH'de maksimum güç üretimi 578 mW/m^2 ve dış direncin $1 \text{ M}\Omega$ olduğunda ise MYH'de 277 mW/m^2 lik maksimum güç üretimi elde etmişlerdir. PCR-DGGE analizleri ile 100Ω 'luk dış direnç kullanılan reaktörde $1 \text{ M}\Omega$ dış direnç kullanılan MYH'den daha az mikrobiyal çeşitliliğe sahip olduğu görülmüştür. Anot biyofilminde *Geovibrio ferrireducens* bakterisinin baskın olduğu görülmüştür.

2.4 Mikrobiyal Yakıt Hücrelerinde Kullanılan Malzemeleri

MYH'de kullanılan elektrotların performansı ve maliyeti MYH'lerin tasarımındaki en önemli kriterlerden biridir. Son yıllarda MYH'lerin performansını arttırmak ve malzeme maliyetini düşürmek için birçok elektrot materyali ve elektrot şekli denenmiştir. Aynı zamanda, anot elektrotu yüzey değişiklikleri bakterilerin yüzeye tutunmasını ve bakteriden elektroda elektron transferini arttırmak için kullanılmıştır.

Bütün elektrotlar için bazı özel gereksinimler mevcuttur. Biyo elektrotların işlevi yalnızca iletken olmayıp aynı zamanda bakterileri taşıyabilmelidir. Ayrıca yüksek bir biyokatalitik aktivite için geniş yüzey alanı, iyi bir biyolojik uyumluluk ve bakteriden elektrot yüzeyine etkili bir elektron transferi sağlaması gerekir. Bakteriyel tutunmayı ve elektron transferini arttırmak için elektrot yüzey şekilleri MYH araştırmalarında ilgi çekmeye başlamıştır. Bir katalist ile hava katotlar için elektrot materyali bağlayıcı ve su geçirmez bir tabakanın birleşmesinden oluşmuştur. Elektrot materyalinin karakteristikleri ve fonksiyonları oldukça önemlidir. Taban materyali genellikle elektrot materyalini ve akım toplayıcıyı destekler. Yüksek iletkenlik ve mekanik güç elektrot materyali için kritik

öneme sahiptir. Fakat bakterilerin tutunması için özel bir gereksinime ihtiyaç yoktur. Hava katotlu MYH'ler için katalist tamamen gerekli olmamasına rağmen önemlidir. Hava katotların maliyetini düşürmek için kataliste gerek duymayan aktif karbon gibi özel materyaller kullanılır. (Deng vd., 2010; Zhang vd., 2009).

MYH tasarımında diğer önemli noktalardan biri elektrot şeklidir. Yaygın kullanılan elektrotlar şekillerine göre sınıflandırılır. Düz (yassı) elektrotlar ve üç boyutlu elektrotlar olarak iki kısma ayrılır. Biyo-elektrotlar için iyi bir şekile sahip olması bakteriyel tutunma için geniş bir yüzey alanı ve etkili bir şekilde akım toplamalıdır. Düz (yassı) elektrotlar hava katotlu MYH'lerde yaygın olarak kullanılmaktadır. Hava kullanılan elektrot; kimyasal bir katalist içerdiği zaman hava ve suyu içeren üç aşamalı reaksiyonda oksijen indirgenmesini sağlamak için etkili bir şekile sahip olmalıdır (Logan, 2007).

Şimdiye kadar MYH'lerde kullanılan elektrot materyalleri anot ve katot materyalleri olarak başlıca iki kategoriye ayrılmıştır.

2.4.1 Anot Elektrotu

Laboratuvar çalışmalarında kullanılan MYH'lerde genel olarak kullanılan elektrotlar karbon malzemeler ve farklı metal malzemelerden yapılmıştır. Bu elektrot malzemeleri farklı şekillere ve yüzey alanlarına sahiptirler. Anot bölmesinde bulunan mikroorganizmaların türü ve miktarı MYH'den elde edilen güç yoğunluğunu ciddi bir şekilde etkilediği iyi bilinmektedir.

Logan (2006) iyi bir anot materyalinin aşağıdaki özelliklere sahip olması gerektiğini belirtmiştir.

- ✓ İyi bir elektrik iletkenliği ve düşük direnç sahip olmalı,
- ✓ Mikroorganizma ile biyolojik uygunluğa sahip olmalı,
- ✓ Kimyasal stabilite ve korozyona karşı dayanıklılığa sahip olmalı,
- ✓ Geniş yüzey alanına sahip olmalıdır,
- ✓ Mekanik olarak dayanıklılığa sahip olmalıdır,

Karbon materyaller MYH çalışmalarında en yaygın olarak kullanılan anot materyalleridir. Bu elektrotlar genel olarak karbon kağıt, karbon keçe, grafit fiber fırça ve grafit çubuk şeklinde kullanılmaktadır. Şimdiye kadar literatürde rastlanılan ve MYH'de kullanılan elektrotların özellikleri Tablo 2.2'de verilmiştir.

Tablo 2.2. MYH'lerdeki anot materyalleri, yapıları, aşı kaynakalrı ve güç üretim performansları

Anot materyalleri/alan (cm²)	Katot materyaller/alan (cm²)	Atıksu tipi	MYH tipi/ hacmi (ml)	Mak. Güç Yoğ. (mW/m²)	KOI giderimi (%)	Referans
Karbon kağıt/100	Karbon kumaş (0,5 mg/cm ² , pt)/100	Evsel atıksu	Yatık MYH/ 22	43	79	Min vd., (2004)
Karbon kağıt/22,5	Karbon kumaş (0,5 mg/cm ² , pt)/22,5	Besin işleme atıksuları	Çift bölmeli MYH/125	81	95	Oh vd., (2005)
Karbon kağıt/7	Karbon kağıt (0,35 mg/cm ² , pt)/7	Domuz atıksuları	Tek bölmeli MYH/250	261	92	Min vd., (2005a)
Karbon kağıt/25	Karbon kağıt (1,12 mg/cm ² , pt)/17	Nişasta atıksuları	Tek bölmeli MYH	239,4	98	Lu vd., (2009)
Karbon kumaş/7	Karbon kumaş (0,5 mg/cm ² , pt)/7	İlk çökeltim atıksuları	Tek bölmeli MYH	464	40-50	Yuan vd., (2010)
Karbon kumaş/7	Karbon kumaş (0,35mg/cm ² , pt)/7	Bira fabrikası atıksuları	Tek bölmeli MYH	205	87	Wang vd., (2008)
Grafit çubuk	Karbon kumaş (0,5 mg/cm ² , pt)	İlk çökeltim atıksuları	Tek bölmeli MYH	26	80	Liu vd., (2004)

Anot materiyalleri/alan (cm²)	Katot materiyaller/alan (cm²)	Atıksu tipi	MYH tipi/ hacmi (ml)	Mak. Güç Yoğ. (mW/m²)	KOİ giderimi (%)	Referans
Grafit silindir/20	Gözenekli grafit çubuk/20	Evsel atıksu	Tübüler MYH	25	~50	Rodrigo vd., (2007)
Grafit tabakalar/25	Grafit tabakalar/25	İçki fabrikası atıksuları	Tek bölmeli MYH/500	124,35	72,8	Mohanakrishna vd., (2010)
Düz grafit elektrot	Düz grafit elektrot	Kimyasal atıksu	Çift bölmeli MYH/750	~125	35,4	Mohan vd., (2008b)
Grafit taneler+grafit çubuk	Dokunmuş grafit keçe	Hastane atıksuları	Tek bölmeli MYH	48*		Rabaey vd., (2005b)
Karbon fiber/7	Paslanmaz çelik kafes (0,8 mg/cm ² , pt)/7	Bira fabrikası atıksuları	Tek bölmeli MYH/28	264	40	Cheng vd., (2006)
Karbon keçe/10	Grafit fiber/10	Kaplama atıksuları	Çift bölmeli MYH/220	1600	99,5	Li vd., (2008)
Karbon fiber fırça	Karbon fiber fırça	Kömür sanayi atıksuları	Çift bölmeli MYH/18	51,2*	~100	Luo vd., (2010)
Grafit fiber fırça	Grafit fiber fırça	Kağıt geri dönüşüm endüstrisi	Tek bölmeli MYH/300	672	29	Huang vd., (2008)

* W/m³

Grafit çubuk çok iyi elektriksel iletkenlik ve elektrokimyasal kararlılığa sahip olması nedeniyle MYH'ler içerisinde en yaygın kullanılan elektrot materyalidir. Grafit çubuk kullanılarak yapılmış çalışmalardan biri Liu (2004) tarafından yapılmıştır. Bu çalışmada anot bölmesinde sekiz adet grafit çubuk içeren hava katotlu bir MYH kullanmışlardır. Besin maddesi olarak bir arıtma tesisinin ön çökeltim havuzundan alınan evsel atıksu kullanılmış, %80 KOİ giderimi ve 26 mW/m^2 maksimum güç yoğunluğu elde edilmiştir. Grafit çubukların kullanımını sınırlayan etkenler ise düşük yüzey alanı ve porozite oranıdır.

Bu nedenle lovley (2006) grafit çubuk yerine grafit keçe kullanmışlar ve daha yüksek güç üretimi elde etmişlerdir. Bu olay elektrot yüzey alanındaki artışın MYH'nin performansını arttırdığının kanıtıdır. Grafit materyali elektrotların yüzey alanını arttırmak için Ahn ve Logan (2010) tarafından yapılan çalışmada grafit fiber fırça kullanılmış ve 422 mW/m^2 güç yoğunluğu elde edilmiştir.

Grafit fiber fırçalar, grafit fiberden yapılmakta ve iletken korozyona daha dayanıklı metal teller (titanyum kablolar) ile çevrilidir. Grafit fiber fırça geniş yüzey alanı ve düşük elektrot direncine sahip olduğu için tercih edilmiştir. Diğer bir çalışmada ise anot elektrotu olarak grafit fırça ve katot elektrotu olarak karbon kumaşın kullanıldığı bir MYH'de 2400 mW/m^2 'nin üzerinde güç yoğunluğu elde edilmiştir. Bu güç yoğunluğu anot materyali olarak karbon kağıdın kullanıldığı çalışmadan elde edilen güç yoğunluğundan (600 mW/m^2) dört kat daha fazladır (Logan vd., 2007).

Karbon kağıt ve karbon kumaş şimdi tabaka şeklinde elektrotlar olarak MYH'lerde kullanılmıştır. MYH'nin performansını arttırmak için iki elektrot arasındaki uzunluğun azaltılmasından dolayı bu tür elektrotların kullanılması avantajlıdır. Kim vd. (2007b) karbon kağıdın elektrot olarak kullanıldığı iki bölmeli bir MYH'de 140 mW/m^2 'nin üzerinde güç yoğunluğu elde etmişlerdir. Wang vd. (2008) tek bölmeli bir MYH'de karbon kumaş elektrot ile bira fabrikası atıksularından 483 mW/m^2 maksimum güç yoğunluğu elde etmişlerdir.

Karbon kağıt, grafit tabaka, levha ve karbon kumaş gibi düz (yassı) elektrotlar MYH'lerde en sık kullanılan materyallerdir (Min ve Logan, 2004; Zhang vd., 2012). Karbon kağıt çok ince ve genellikle sert yapılı olup kırılındır. Grafit tabakalar veya levhalar karbon kağıtlardan daha dayanıklıdır. Bu iki materyal sıkı bir yapıya ve genellikle düz bir yüzeye sahiptir. Düşük özgül alanları ve yüksek maliyetlerinden dolayı bunların büyük ölçekli MYH'lerde kullanımını kısıtlanmaktadır. Karbon levhalar ile

karşılaştırıldıklarında karbon kumaşlar daha esnek ve daha gözeneklidir. Fazla yüzey alanına sahip olmasından dolayı bakteriyel büyüme için oldukça elverişlidir. Daha fazla bakteriyel büyümeye imkan tanınması nedeni ile pürüzlü grafit elektrotların düz grafit elektrotlardan daha fazla güç elde edildiği belirtilmiştir (ter Heijne et al., 2008).

Düz (yassı) materyallerin yanı sıra nadiren grafit folyo, karbon fiber tül, aktif karbondan yapılmış kumaş, gözenekli materyaller MYH'lerin anot bölmesinde sülfat oksidasyonu için denenmiştir (Zhao vd., 2008). Aktif karbon kumaşın yüksek özgül alanı ve adsorpsiyon kapasitesine sahip olması nedeniyle çalışmalarda kullanılan elektrotlar arasında en fazla sülfat giderimi ve güç üretimi sağladığı belirtilmiştir.

Grafit veya karbon keçe çok daha ince bir fiber kumaştır. Bunların dokumasındaki boşluklar karbon kumaş ve grafit levhalardan daha fazla olduğu için bakterilerin büyümesi için daha uygun bir yüzey alanı sunmaktadır. Fakat bakterilerin gelişmesi için yüzeydeki besin maddesi ve ürünlerin kütle transferi ile kısıtlanmıştır. Chaudhuri ve Lovley (2003) grafit çubuğu, grafit keçeyi ve grafit elektrotları elektrik üretimi açısından karşılaştırmıştır. Grafit köpük elektrodun grafit çubuk elektrottan 2,4 kat daha fazla akım ve 2,7 kat daha fazla mikroorganizma yoğunluğuna sahip olduğu belirtilmiştir.

Grafit elektrotun yanında metal ve metal oksit malzemeler de anot malzemesi olarak kullanılabilir. Metal materyaller karbon materyallerden daha iletken olmasına rağmen MYH'lerde karbon materyaller kadar yaygın kullanılmamıştır. Birçok materyal anot materyaller için korozif olma özelliğine sahip olduğundan kullanılamamıştır. Şimdiye kadar yalnızca paslanmaz çelik ve titanyum anot bölmesinde kullanım için yaygınca kullanılmıştır.

Genellikle pürüzsüz yüzeye sahip elektrotlar bakterilerin tutunmasını zorlaştırmaktadır. Paslanmaz çelik gibi bazı korozif olmayan materyaller, karbon materyaller ile karşılaştırıldığında yüksek güç üretimi sağlayamamaktadırlar. Dumas vd. (2007) paslanmaz çelik tabaka şeklindeki elektrotu anot ve biyokatot elektrot olarak kullanmıştır. Söz konusu çalışmada 23 mW/m^2 'lik sınırlı bir güç yoğunluğu elde edildiğini belirlemiştir. Bunun aksine Erable ve Bergel (2009) paslanmaz çelik ızgara elektrotun düz grafit elektrottan daha yüksek miktarda elektrik ürettiğini belirlemiştir.

Titanyum MYH'lerde anot elektrotu olarak kullanılan metal malzemesidir. Ter Heijne vd. (2008) titanyum ve grafit elektrotları MYH'ler içerisinde anot elektrotu olarak kullanmışlardır. Elde edilen akım sonuçları dikkate alındığında güç üretimi pürüzlü

grafit> platin kaplı titanyum>düz grafit> kaplanmayan titanyum şeklinde elde edilmiştir. Kaplanmamış titanyum elektrotta akım elde edilememiştir. Diğer üç materyal için özgül alanları ve biyokütle aktivitesi bu elektrotlar arasındaki akım yoğunluğuna bağlı olarak değişmiştir.

Altın elektrotlar literatürde birkaç çalışmada kullanılmıştır (Crittenden vd., 2006; Richter vd., 2008). Richter vd. (2008) *Geobacter sulfurreducens* bakterilerinin altın elektrotlar üzerinde çoğalabildiğini belirlemiş, ayrıca altın elektrot kullanılarak üretilen akımın grafit elektrottaki kadar olduğunu belirtmiştir.

MYH'de kullanılan elektrot malzemesi elektrik üretimini etkileyen en önemli faktördür. Literatürde birçok malzeme MYH'de elektrot malzemesi olarak kullanılmış ve elektrik üretim performansı araştırılmıştır. Literatürde yapılmış çalışmalarda, MYH'de kullanılan elektrot malzemelerinin elektrik iletkenliğinin yüksek, elektrot yüzeyinin mikroorganizmaların tutunmasını kolaylaştıracak özellikte, az alan kaplayarak yüksek yüzey alanı özelliğine sahip olma ve iyi bir biyofilm oluşumuna imkân tanıyacak elektrot malzemelerinin kullanılmasının gerektiği vurgulanmaktadır. Bu amaçla yapılan tez çalışmasında elektrik iletkenliği yüksek, elektrot yüzeyinde mikroorganizma tutunmasını arttıracak yüzey özelliklerine sahip farklı modifikasyonlardaki elektrot malzemeleri kullanılarak elektrik üretim potansiyelleri araştırılmıştır.

2.4.2 Katot Elektrot

Katot elektrotu olarak platinin kullanılması katot maliyetini önemli ölçüde arttırmaktadır. Katot materyallerinin maliyeti hava katotlu MYH'lerin maliyetinin %47 sini içermektedir (Rozendal vd., 2008). Birçok araştırmacı yüksek özgül alana sahip karbon materyallerin kullanımının katot bölmesinde katalist kullanımından daha uygun olacağını düşünmektedir. Katalist içermeyen sulu hava katotlu bir MYH'de granüler grafiti anot bölmesinde kullanmış ve 50 W/m³'lük güç yoğunluğu elde etmişlerdir (Freguia vd., 2007). Deng vd. (2010) aktif karbon fiber keçe elektrodunu yukarı akışlı MYH'de kava katot elektrodu olarak kullanmış 315 mW/m² güç yoğunluğu elde edilmiştir. Bu değerleri platin kaplı karbon kağıt ile karşılaştırmış ve platin kaplı karbon kağıt ile 124 mW/m² (0,2 mg-pt/cm²) güç yoğunluğu elde etmiştir.

Genel karbon materyallerinin katot bölmesinde oksijen indirgeme aktivitesini arttırmak için kullanılmaktadır. Erable vd. (2009) ısı vererek aktifleştirilmiş aktif karbon

ve nitrik asidin kullanımı daha yüksek açık devre voltajının (1050 mV) elde edilmesini sağlamıştır. Bu olay metal yüzey alınının artışı ve yüzeyde azot gruplarının ortaya çıkması ile ilgilidir. Park ve Zeikus (2003) demir sülfatı ince grafit tozu, kaolin ve nikel klorit ile karıştırarak F^{+3} grafit içeren hava katot bölmesi yapmıştır. Fe^{+3} katot üzerinde elektron mediyatörü olarak görev yaptığı için Fe^{+3} grafit katot grafit elektrot ile karşılaştırıldığında daha yüksek bir performans elde edilmiştir. Buna benzer olarak Duteanu vd. (2010) HNO_3 , H_3PO_4 , KOH ve H_2O_2 gibi değişik kimyasalları içeren toz karbonun oksijen indirgeme aktivitesini karşılaştırmıştır. HNO_3 ile muamele edilmiş toz karbondan en yüksek akım yoğunluğu elde edilmiştir (5,6 mV'da 1115 mA/m²). Akım yoğunluğu bakımından platin ile desteklenen (muamele edilmemiş) karbon katot ile kıyaslandığında daha yüksek akım elde edilmiştir. Sonuç olarak, hava katotlarda aktif karbon ve HNO_3 ile muamele edilmiş toz karbon elektrot ile yüksek güç yoğunluğu elde edilmiştir.

2.4.3 Elektrot Materyalleri İle İlgili Yapılmış Çalışmalar

Srikanth vd. (2011) grafit, alüminyum, pirinç, bakır, nikel ve paslanmaz çelik gibi 6 farklı elektrot kullanarak MYH performansı ve elektrot üzerindeki mikrobiyal popülasyonu gram boyama tekniği kullanarak araştırmışlardır. 60 günlük işletme sonucunda grafit elektrot yüzeyinde iyi bir mikrobiyal büyüme gerçekleştiği ve gram pozitif bakterilerin baskın olduğu belirlenmiştir. Diğer taraftan alüminyum ve bakır elektrot yüzeyinde gram negatif bakterilerin baskın olduğunu belirtmişlerdir. Ayrıca nikel ve paslanmaz çelik elektrotun grafit elektrota nazaran iyi bir biyolojik uyumluluğa sahip olduğu görülmüştür.

Deng vd. (2010) yaptıkları çalışmada, aktif karbon fiber keçe, düz karbon kağıt, karbon keçe ve platin kaplanmış karbon kağıt şeklinde dört farklı katot malzemesi kullanmışlar ve yukarı akışlı MYH'de güç üretimini araştırmışlardır. Aktif karbon fiber keçe elektrot ile maksimum güç yoğunluğunu 315 mW/m² olarak elde etmişlerdir. Diğer üç elektrotta bu değerler oldukça düşük olup, karbon kağıt için 67 mW/m², karbon keçe için 77 mW/m² ve platin kaplanmış karbon kağıt için 124 mW/m² olduğu tespit edilmiştir. Çalışmada ayrıca aktif karbon fiber keçe elektrot platin ile kaplanarak güç üretimine etkisi incelenmiş ve güç üretimi %24 artarak 392 mW/m²'ye yükselmiştir.

Rahimnejad vd. (2011a) çift bölmeli bir MYH'de grafit tabakalarını elektrot olarak kullanıp besin maddesi olarak 30 g/L glikoz kullanmışlardır, 200 µM nötral kırmızısını elektron mediyatörü olarak anot bölmesine ilave etmişlerdir. Anot ve katot bölmesi 1000

Ω 'luk dirençle sabitlenmiş ve kararlı halde 400 mV voltaj üretmişlerdir. Sürekli besleme yaparak MYH performansı için optimim HBS'yi araştırmışlar ve 7 saatlik HBS'de 1210 mA/m² akım yoğunluğu, 283 mW/m² güç yoğunluğu elde etmişlerdir.

2.5 Ayırma Mekanizmaları

Mikrobiyal yakıt hücrelerinde ayırma mekanizması önemli bir rol oynar. Ayırıcı malzemeler anot ve katot bölmelerini fiziksel olarak birbirinden ayırmak için kullanılmaktadırlar. Son yıllarda ayırıcı malzemelerdeki hızlı gelişmelere rağmen proton transfer sınırlamaları ve oksijen kaçağı gibi sınırlayıcı etkenler MYH'lerde iç direnci arttırmakta ve MYH'nin performansını düşürmektedir (Fan vd., 2008). Ayrıca substrat difüzyonunun hızlandırılması hızlı bir biyolojik tıkanıklığa sebep olmakta ve MYH performansını düşürmektedir (Tartakovsky ve Guiot, 2006).

2.5.1 Katyon Değiştirici Membran

Günümüzde katyon değiştirici membranlar (KDM) mikrobiyal yakıt hücreleri için yaygın olarak kullanılan ayırıcı malzemelerdir. Bu malzemeler MYH'lerde protonların transferini sağlamak için kullanılmaktadırlar. En yaygın kullanılan katyon değişim membranları nafiondur (Chae vd., 2008). Nafion hidrofilik florokarbon yapı ($-\text{CF}_2-\text{CF}_2-$) ihtiva eden ve hidrofilik sülfonat gruplarının (SO_3^-) bağlanmış olduğu perfluorosülfonik asit membrandır (Mauritz ve Moore, 2004). Hidrojen, elektronunu platin ile asidik membran üzerindeki aktif sitelerin ki genelde sülfon ($-\text{SO}_3\text{H}^+$) gruplarıdır, temas ettiği yerlerde iletilir. Membran bünyesindeki su molekülleri, proton ile zayıf bağlar oluşturarak hidrojen iyonunun anot bölgesinden katot bölgesine ilerlemesini sağlar. Başka bir deyişle, membran üzerindeki aktif siteler sadece hidrojenden elektronun koparılması, membran bünyesindeki su ise, hidrojen iyonunun anottan katoda ilerlemesi ile sorumludur. Nafion membranlar negatif yüklü sülfonat gruplarının olması nedeniyle değişik katyonlar için yüksek iletkenlik göstermektedir (Oh ve Logan, 2006).

Yaygın olarak kullanılan diğer bir KDM ise Ultrex CMI 7000 (Membranes Inc., USA) membrandır (He vd., 2005; Rabaey vd., 2005b; Kim vd., 2007a; Harnisch vd., 2008). CMI 7000 jel polisitren ve divinilbenzen'in karşılıklı olarak bağlı olduğu ve aynı zamanda fazla miktarda sülfonik asit grupları içeren güçlü asit polimer bir membrandır.

Ultrex CMI 7000 membranları nafion ile karşılaştırılabilir derecede katyon iletkenliği ve mekanik dayanıklılığa fakat genellikle yüksek ohm'luk dirence sahiptir (Harnisch vd., 2008).

Diğer bazı KDM'ler de mevcuttur, bunlardan Fumapem membranlar yüksek proton iletkenliğine sahip ve 95 °C'lik uygulamalara kadar işlevi bozulmamaktadır. Fumapem membranlar da SO₃H grubu içermektedir ve perflorlu sülfonik asit polimerleri kimyasal olarak oldukça kararlı ve dayanıklıdır.

Katyon değişim membranlarının bileşimlerinin farklı olmasına rağmen bazı sınırlamalara sahiptirler. Bu sınırlamalardan en önemlisi zayıf proton transfer yeteneğidir. Birçok mikrobiyal yakıt hücresi anot bölmesinde bakteriyel büyümeyi optimize etmek için nötral pH'da işletilmektedir. Bu durumda anot bölmesinde Na⁺, K⁺, Ca⁺², Mg⁺² ve NH₄⁺ iyonları protonlardan 10⁵ kat daha fazla bulunmaktadır (Rozendal vd., 2006). Bu katyonlar nafionun sülfanat grupları ile birleşip substrat parçalanması sonucu oluşan protonların geçişini engellemekte ve MYH'nin performansını düşürmektedir.

Polimer elektrolit olarak kullanılan membranlar ile ayırma proseslerinde kullanılan membranlar arasında büyük farklılık vardır. Ayırma proseslerinde ortamdaki gazlar geçirilirken yakıt hücrelerinde kullanılan membranlarda gazların geçişi istenmez. Yakıt hücresinde kullanılan membranların gazları iyonlarına ayırıp o şekilde iletmesi istenir. Böylece elektrik enerjisi elde edilir. Membranlar yakıt hücrelerinde elektrolit olarak bulunmalarının yanı sıra; ayırma işlemleri ve sıvı saflaştırma gibi çok çeşitli amaçlar için kullanılabilirler.

İyon değiştiren membranları diğer membranlardan ayıran karakteristik özellik polimer yapılarının içinde proton iletkenliğini sağlayan iyonik grupların bulunmasıdır. Bünyesinde negatif yüklü sabit aktif kısımlar bulunduran membranlar katyon değiştiren membranlar, pozitif yüklü sabit aktif kısımlar bulunduran membranlar ise anyon değiştiren membranlar olarak adlandırılmaktadır. Bu koşullarda iyon değiştiren membranlarda istenen en önemli özellik, membran bünyesindeki sabit zıt yüklü iyonları geçirmesi, ve benzer yüklü iyonları geçirmemesidir. Bu, ancak membranın sahip olması istenen yüksek iyon değişim kapasitesi ve düşük direnç özellikleri ile sağlanmaktadır.

Nafion'un yakıt hücreleri uygulamalarında iyi seviyede kimyasal ve fiziksel özelliklere sahip olmasına rağmen onu sınırlayan üç teknik sınırlama vardır.

1. Yüksek maliyete sahip olması,
2. Düşük nem ya da yüksek sıcaklıkta iletkenliğinin düşük olması,
3. Hücre verimini azaltan yüksek metanol geçirgenliğidir.

Bu sebeplerden dolayı Nafion yerine farklı polimerlerden oluşan membran sentezleri önem kazanmıştır.

Yakıt hücrelerinde kullanılan membranlar; organik, inorganik ve kompozit membranlar olmak üzere 3'e ayrılır. Organik membranlar ucuz, kolay işlenebilir ve şekil verilebilir olması gibi avantajlara sahiptirler. Bunun yanı sıra, termal ve mekanik dayanımının az olması nedeniyle bu membranlara alternatif olabilecek membranlar geliştirilmiştir.

İnorganik membranlar ise uzun ömürlü, yüksek basınç altında mekanik kararlılığının, organik çözücülere karşı kimyasal kararlılığının kolay olması, gözenek boyutlarının ve dağılımının iyi kontrol edilebilir olmalarının yanında; maliyetinin yüksek ve yapısının gevşek olması nedeniyle tercih edilmezler.

Kompozit membranlar, hem organik hem de inorganik yapıları bünyesinde beraber bulundurduğu için her iki yapının özellikleri taşımakla beraber, sülfonasyon gibi bir takım işlemlerle istenilen özellik kazanılarak daha etkin duruma getirilebilir.

Yukarıda belirtilen hususlara ilaveten yakıt hücresi membranlarında bulunması gerekli özellikler genel hatları ile aşağıdaki şekilde özetlenebilir.

- ✓ Membran protonlara karşı geçirgen olmasına karşın elektronları iletmemeli,
- ✓ Su, yakıt (hidrojen, metanol vs.), oksijen ve havadaki diğer gazları geçirmemeli,
- ✓ Mekanik dayanımları yüksek olmalı,
- ✓ Uzun süreli kullanımda ısı ve kimyasal direnci yüksek olmalı,
- ✓ Teknolojik olarak yaygın bir şekilde kullanılabilmesi için emniyetli ve ucuz olmalıdır.

2.5.2 Membranlar İle İlgili Sorunlar

Organik maddelerin oksidasyonu sırasında protonlar ve elektronlar ortaya çıkmaktadır. Elektronlar iletken biyofilm ve MYH'nin elektriksel devresi yardımıyla ani olarak uzaklaşmaktadır. Protonlar ise biyofilmden dışarı çıkarak proton değişim membranından katot bölmesine geçerler. Bu olay yavaş bir hızda meydana gelir ve güç üretiminin yavaşlamasına sebep olabilir. Akım şeklinde üretilen her elektron için biyofilm içerisinde bir proton üretilmektedir. Bir MYH ve bir florometrik pH'a duyarlı boya kullanılarak anot yüzeyi ve sıvısı arasında biyofilme doğru bir proton gradiyenti gözlenmiştir (Franks vd., 2009). MYH içerisinde mikroorganizmalar tarafından spesifik akım üretimi proton konsantrasyonunun 10 kat artışına neden olmaktadır. Bu artış 1 pH birimine denk gelmektedir. Bir MYH sıvısındaki pH'ın düşüşü güç üretiminin düşüşüyle sonuçlanır (Nevin vd., 2009; Torres vd., 2008b). Modelleme çalışmaları proton birikiminin biyofilm içerisindeki metabolik aktiviteyi bölgelere ayıracağı tahmin edilmektedir (Torres vd., 2008a), fakat metabolik boyama aktivitenin tüm biyofilme olduğunu işaret etmiştir (Lee vd., 2009; Franks vd., 2010).

Franks vd. (2012) elektrot yüzeyine yakın olan ve elektrot yüzeyinden uzakta olan mikroorganizmaların akım üretimi arasında ciddi bir farkın olmadığını işaret etmişlerdir. Bu çalışmada elde edilen diğer ilginç bir gözlem ise *G. Sulfurreducens* ile meydana gelmiş bir biyofilmin yapı itibarı ile heterojen yapıda olduğudur. Diğer taraftan, strain KN400 daha homojen bir biyofilm olmasına rağmen daha fazla güç üretmiştir (Yi vd., 2009).

Xu vd. (2012) MYH'de proton değişim membranının tıkanma karakteristiklerini ve buna bağlı olarak MYH performansındaki azalmayı incelemişlerdir. Çalışma sonucunda proton değişim membranının iyon değişim kapasitesinde, iletkenliğinde ve katyonlarının difüzyon katsayılarında tıkanmadan sonra önemli miktarda azalma olduğu görülmüştür. Görüntüleme analizleri FTIR analizleri ile birleştirilmiş ve elde edilen sonuçlar proton değişim membranının üzerinde hücre dışı polimerlerin ve inorganik tuzların çökeldiği görülmüştür. Bu sonuçlara göre proton değişim membranında proton geçişinde meydana gelen azalmanın MYH performansını ciddi ölçüde azalttığı ve MYH'lerin uzun süreli işletmelerinde problem yaşanabileceği görülmüştür.

2.6 Temel Elektriksel Parametreler

MYH'lerde dış dirence karşı voltaj bir multimetre kullanılarak ölçülebilir. Voltaj ölçümleri ohm kanunları kullanılarak akım değerine dönüştürülebilir.

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

Burada;

V= voltaj, V

I=akım, A

R=direnç, Ω

Bir MYH'de güç çıkışı aşağıdaki formül ile hesaplanabilir.

$$P = IV \quad (2)$$

Burada,

P= Güç, Watt

Güç Yoğunluğu anot bölgesindeki elektrot yüzey alanı veya anot bölgesi hacmine bağlı olarak elde edilen güç ile ilgilidir. Güç yoğunluğunun elektrot yüzey alanına göre hesaplanması aşağıda gösterilmiştir.

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

Burada; P_{DA} =elektrot alanına bağlı olarak güç yoğunluğu, W/m^2

A_A =Anot yüzey alanı, m^2

Güç Yoğunluğu anot bölgesinin net hacmine bağlı olarak aşağıdaki şekilde hesaplanabilir.

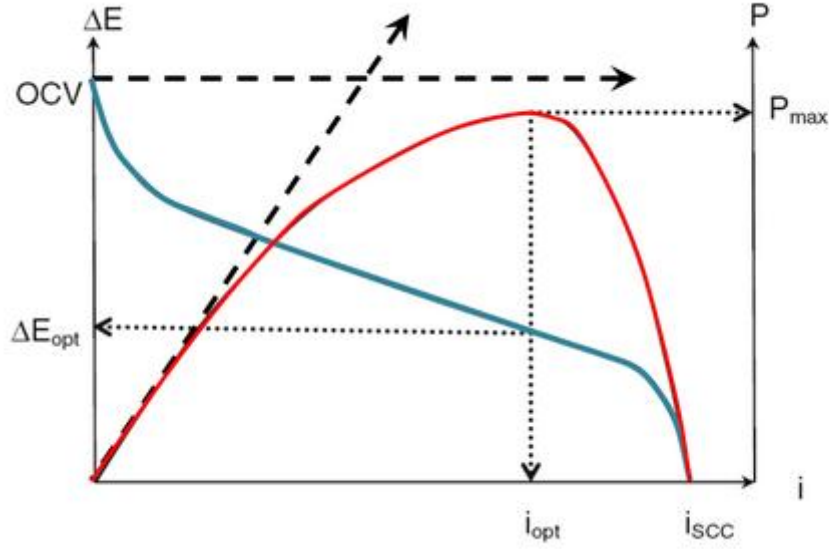
$$P_{DV} = IV/ \quad (4)$$

Burada;

P_{DV} =Hacim dikkate alındığında üretilen güç yoğunluğu, W/m^3

V = Anot bölgesinin hacmi, L veya m^3

Hücre voltaj ve akımı arasındaki bağıntı polarizasyon eğrisi kullanılarak görselleştirilebilir (Şekil 2.3). Polarizasyon eğrisinden güç performansı eğriside (kırmızı çizgi) hesaplanabilir. Bir yakıt hücresi sisteminde yakıt hücresi tarafından üretilen güç miktarı iç direnç ile dış direncin eşit olduğu noktada maksimum değerindedir (Halliday vd., 2004).

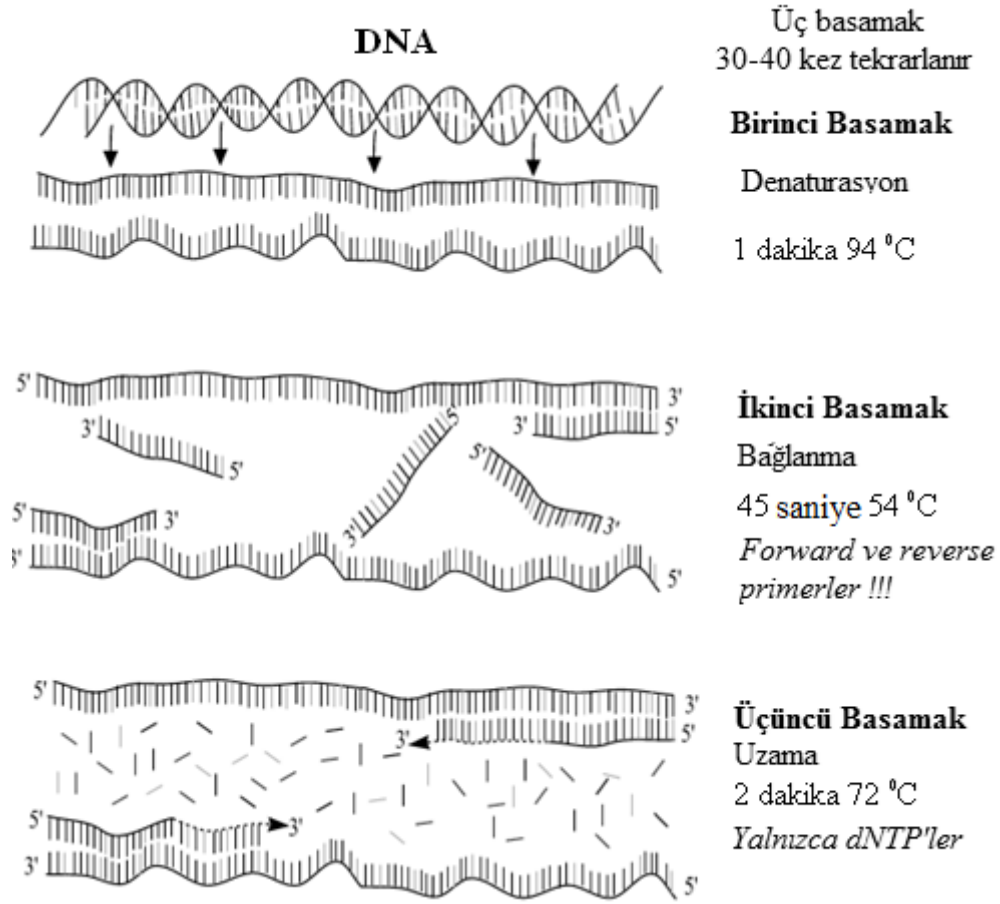


Şekil 2.3: Polarizasyon eğrisi (mavi), açık devre voltajı (ADV), , Güç performansı (kırmızı), maksimum güç yoğunluğu (P_{max}). Maksimum güç yoğunluğunun elde edildiği nokta, optimum akım yoğunluğu ve optimum voltajın elde edildiği noktadır (Clauwaert vd., 2008).

2.7 Moleküler Çalışmalar

2.7.1 Polimeraz Zincir Reaksiyonu (PCR)

İlk kez 1985'de bilim dünyasına sunulan polimeraz zincir reaksiyonu (PCR); hem araştırmada hem de klinik laboratuvarlarında tanıda yeni bir çıkış açmıştır. Metot basitçe tüpte nükleik asitlerin uygun koşullarda çoğaltılmasıdır. Bu buluşundan dolayı K.Mullis, 1993 yılı Nobel Kimya ödülüne hak kazanmıştır. PCR, bir çeşit "*in vitro* klonlama"dır. PCR, reaksiyonu DNA'nin iki zincirinin yüksek ısı ile birbirinden ayrılması (denatürasyon); daha sonra sentetik oligonükleotidlerin hedef DNA'ya bağlanması (hibridizasyonu); sonra zincirin uzaması (polimerizasyonu) (çift sarmallı DNA'ların sentezi) ve bu siklusların belirli sayıda tekrarlanmasına dayanır (Şekil 2.4). Bu üç adım (denatürasyon / primer bağlanması / DNA sentezi) bir PCR siklusunu oluşturur. Her adım farklı ısılarda sırasıyla 94°C-98°C; 37°C-65°C; 72°C gerçekleştirilir. PCR tekniği tek veya çift sarmallı DNA'yı RNA'ya hedef olarak kullanabilir (<http://www.bio.itu.edu.tr>).



Şekil 2.4: Polimeraz zincir reaksiyonu basamaklarının şematik görünümü (<http://genotyping.wordpress.com>).

Yöntemin temeli, çoğaltılmak istenen bölgenin iki ucuna özgü, bu bölgedeki baz dizilerine tamamlayıcı bir çift sentetik oligonükleotid primer (18-20 baz uzunluğunda) kullanılarak; bu iki primer ile sınırlandırılan genin enzimatik olarak sentezlenmesine dayanır. Bu nedenle PCR tekniği, çok az miktarda DNA ile çalışmaya olanak sağlamaktadır. PCR tekniği ile laboratuvar tanısında çok büyük bir hız ve kesinlik kazanılmıştır. PCR teknolojisi aşağıda belirtilen beş temel maddeye gereksinim duymaktadır.

- ✓ DNA örneği, genelde genomik DNA,
- ✓ Çoğaltılacak olan bölgeyi sağdan ve soldan çevreleyen bir çift sentetik primer,
- ✓ dNTP'ler (A,T,C,G),
- ✓ Isıya dayanıklı DNA-Polimeraz enzimi,
- ✓ Uygun pH ve iyon koşullarını (Mg^{+2}) sağlayan tampon karışım.

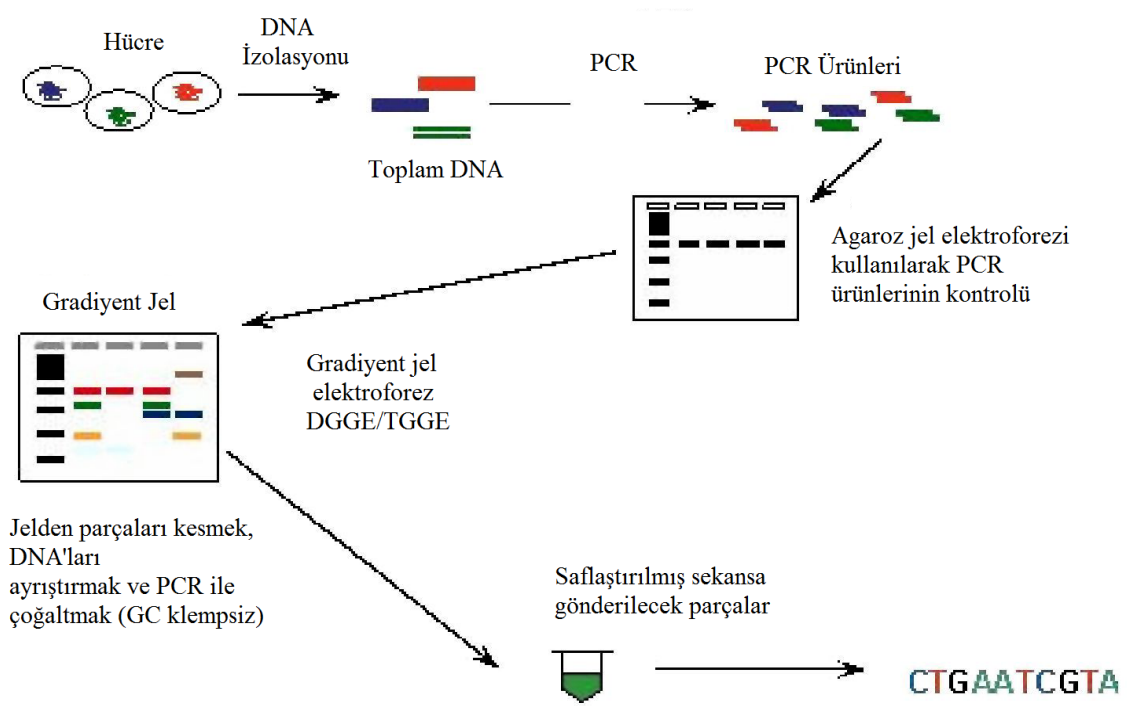
2.7.2 Agaroz Jel Elektroforezi

Jel elektroforezi, makromolekülleri büyüklük, elektrik yükü ve diğer fiziksel özellikler temelinde ayıran bir yöntemdir. Elektroforez terimi yüklü partiküllerin elektrik akımı etkisi altında hareketini açıklamaktadır. Jel elektroforezi elektrik varlığında hareketlenen moleküllerin jel boyunca hareketinden oluşmaktadır. Elektroforez için gerekli güç jelin iki ucunda bulunan elektrotlara uygulanan voltajdır. Bir elektrik akımının bir molekülü hangi hızla jel ortamında hareket ettirdiği moleküllerin özelliğine bağlıdır

Birçok önemli biyolojik makromolekül iyonlaşabilen gruplara sahiptir ve pH'ya bağlı olarak çözeltide katyon (+) ya da anyon (-) biçiminde elektrik yükü taşıyan türler olarak bulunurlar. Net yükün özelliğine bağlı olarak, yüklü partiküller katoda veya anoda doğru hareket etmektedir. Örneğin, elektrik alanının uygulandığı jel nötral pH'da ise, DNA'nın negatif yüklü fosfat grupları anoda doğru hareket eder (Westermeier, 1997). Ayrıca DNA'nın jeldeki konumu, düşük konsantrasyonlarda floresan veren etidyum bromür ile boyanarak belirlenebilmektedir (Sambrook ve Ark, 1989).

2.7.3 Denature Gradyan Jel Elektroforezi

Muyzer vd. (1993) DGGE tekniğini mikrobiyal ekolojiye kazandırmıştır. Bu ayrımın teorik yönleri ise Fisher ve Lerman tarafından ortaya konmuştur. PCR-DGGE'nin çalışma prensibi Şekil 2.5'de görülmektedir.



Şekil 2.5: PCR-DGGE'nin çalışma prensibi (<http://wiki.biomine.skelleftea.se/>).

DGGE jeline yüklenen DNA parçaları genellikle PCR ürünleridir. Bu teknikte öncelikle birçok organizmayı içeren bir örnekten direk DNA izolasyonu yapıldıktan sonra hedef bölgeler PCR tekniği ile amplifiye edilir. Hedef bölge olarak 16S rRNA'nın değişik bölgeleri seçim olarak kullanılabilir. Bu fragmentler daha sonra DGGE analizine tabi tutulur. DGGE jeline denatürasyon koşullarını üre ve formamid oluşturur. %100 denatürasyon jeli %40 formamid ve 7M üre içerir. Akrilamid solüsyonuna düşük ve yüksek konsantrasyonda denaturant eklenip düşük solüsyondan yükseğe doğru aşamalı denaturant gradyenti oluşturmak için cam plakalar arasına dökülür. Jel döküldükten sonra DNA'ların yükleneceği kuyucukları oluşturacak tarak yerleştirilir ve jelin polimerik yapısını kazanması için belirli bir süre beklenir. DGGE, DNA moleküllerinin birbirinden ayrılmasını sağlamak için 60 °C civarında sabit bir sıcaklıkta gerçekleştirilen jel elektroforez tipidir. Dolayısıyla DNA, proteinler ve RNA gibi moleküllerin elektriksel yük ve molekül ağırlığına dayalı bir ayırma tekniği olan elektroforezin temel prensipleri geçerlidir.

2.7.4 MYH’lerde Mikrobiyal Tür Belirlenmesi ile İlgili Çalışmalar

Mikrobiyal yakıt hücresinde anot yüzeyinde bulunan elektrojenik mikroorganizmalar sisteme verilen substratı parçalayarak elektrik üretirler. Son yıllarda mikrobiyal yakıt hücrelerinde MYH’lerde elektrik üretebilen mikroorganizmalar ile ilgili yapılmış çalışmaların sayısı giderek artmaktadır. MYH’lerde kullanılan elektrotjen bakteriler çoğunlukla doğada bulunmaktadır. Literatürde doğadan mikroorganizma numunesi alınarak MYH sistemlerine aşılama yapılarak elektrik üretilen çalışma sayısı oldukça fazladır. Ayrıca şu ana kadar yapılan çalışmalarda anaerobik atıksular kullanılarak (Min vd. 2005b; Ki vd. 2008), nehir tabanından sediment alınarak ve toprak numuneleri kullanılarak MYH sistemine aşılama yapılmıştır (Bond vd. 2002; Ieropoulos vd. 2010) . Karışık kültürlerin yanı sıra saf kültürler kullanılarak MYH sistemlerinden elektrik üretildiği çalışmalar da mevcuttur (Nevin vd. 2008, Ishi vd. 2008a). MYH’de birçok farklı mikroorganizma türü elektrik üretmesine rağmen, saf kültür kullanılarak yapılan bazı çalışmalarda daha az miktarda elektrik üretilmiştir (Kim vd. 2008b). Literatürde yapılmış çalışmalarda moleküler teknikler kullanılarak elektrot yüzeyindeki aktif mikroorganizma türlerinin *Geobacteraceae*, *Desulfuromonas*, *Alcaligenes faecalis*, *Enterococcus faecium*, *Pseudomonas aeruginosa*, *Proteobacteria*, *Clostridia*, *Bacteroides* ve *Aeromonas* türlerinin olduğu belirtilmiştir. Karışık ve saf kültürler kullanılarak MYH’lerde üretilen maksimum güç miktarları karşılaştırıldığında, güç üretiminde etkin olan faktörlerin MYH yapısı ve elektrot boyutu olduğu görülmektedir. Ishii vd. (2008a) yaptıkları çalışmada tek bölmeli hava katotlu bir MYH’de karışık kültür ile aşılama yapılarak üretilen güç miktarının *Geobacter sulfurreducens* saf kültürü kullanılan MYH’den %22 daha fazla (576 mW/m^2) olduğunu belirtmişlerdir. Nevin vd. (2008) tarafından elektrot boyutu eşit olan diğer bir MFC’de *G. Sulfurreducens* 240 mW/m^2 güç üretilmiştir Ref. Fakat güç üretimi karışık kültür ile aşılama MYH ile karşılaştırılmaz. Anot boyutu düşürüldüğünde ve ferrisiyanür oksijenin yerine katot elektrotu olarak kullanıldığında *G. Sulfurreducens* $1,9 \text{ W/m}^2$ güç üretmiştir, bu değer karışık kültür kullanılan MYH’de üretilen güç miktarından %19 daha fazladır ($1,6 \text{ W/m}^2$). *Shewanella putrefaciens* dışarıdan mediyatör ilavesi yapılmadan elektrik üretebilen bir mikroorganizma olduğu belirtilmektedir (Kim vd. 1999). *Shewanella spp.* hücre dışı sitokromlara sahiptir ve elektrotla dokunarak direk elektron transferi yapabilir, bu mikroorganizmalar aynı zamanda iletken nanokablolarla sahiplerdir, bu nanokablolar sayesinde elektron akışı sağlanabilir (Gorby vd., 2006; Myers

vd., 1992). Literaytürde *S. Oneidensis* türü bakterilerin elektron transferinin yanı sıra aynı zamanda flavin adındaki elektron taşıyıcıları üretebildikleri belirtilmektedir (Canstein vd., 2008). Bu bakteriler birçok şekilde hücre dışı elektron transferi yapabilmesine rağmen *S. Oneidensis* kullanan bir MYH’de atıksuyun aşı kaynağı olarak kullanıldığı hava katotlu bir MYH’de kesikli besleme yapılarak %56 daha az güç üretilmiştir (Watson, 2008).

Quan vd. (2012) tarafından yapılmış bir çalışmada anaerobik şartlar altında zenginleştirilmiş hava katotlu bir MYH sisteminin anot bölmesine kesikli olarak hava verilmiş ve MYH’deki güç üretiminin ciddi bir şekilde etkilemediğini belirlenmiştir. Anot bölgesindeki mikrobiyal komunitiyi tamamen anaerobik şartların hakim olması durumunu kesikli olarak hava verilmesi durumu ile kıyaslamış ve mikrobiyal komünitenin anot bölmesine hava verildiği süreçte ciddi bir şekilde azaldığını tespit etmişlerdir. Anot bölgesinin havalandırıldığı süreçte etkin olan mikrobiyal türleri *Burkholderia sp.*, *Bacteroidetes sp.*, *Simplicispira sp.*, *Rhodocyclaceae sp.*, ve *Microbacterium sp.* olarak tespit etmişlerdir.

Diğer bir çalışmada Sun vd. (2012) propionatın substrat kaynağı olarak kullanıldığı bir MYH’de mikrobiyal komunitiyi araştırmışlardır. Anot elektrot yüzeyi ve anot sıvısında mikrobiyal tür çalışmaları yapılmış ve elektrot yüzeyinde *Geobacter sp.* türü bakterilerin baskın olduğunu belirtmişlerdir. Ayrıca anot sıvısında daha az baskın mikroorganizma türünün mevcut olduğunu tespit etmişlerdir. Yapılan çalışmada *Achromobacter* ve *Azovibrio* genlerinin varlığını tespit etmişlerdir.

Kiely vd. (2011) MYH sisteminde substratların ve katot performansının mikrobiyal komunitiyi nasıl etkilediğini araştırmışlardır. Fermente olabilen substratların besleme yapıldığı MYH’de *Geobacter sp.* türü mikroorganizmaların varlığını belirlemişlerdir. Diğer bir çalışmada Bond ve Lovley (2003) *Geobacteraceae* türü bakterilerin MYH sisteminde organik maddeleri parçalaması sonucu üretilen elektronları anot yüzeyine yüksek etkinlikte transfer ettiği belirtilmiştir. Bir başka çalışmada anoksik sedimetlerden izole edilen *Rhodoferrax* türlerinin glikozun karbon kaynağı olarak kullanıldığı çalışmada üretilen elektronların grafit elektrotta etkili bir şekilde transfer ettiği belirtilmiştir (Chaudhuri ve Lovley, 2003).

Ha vd. (2008) yaptığı çalışmada mikrobiyal yakıt hücresinde besin maddesi olarak format kullanmışlardır. DGGE analizi sonucunda anot elektrot yüzeyinde format tüketen asetojen mikroorganizma *Acetobacterium sp.*, asetat oksitleyen metal indirgeyici *Geobacter sp.*, ve diğer format oksitleyici *Arcobacter sp.* türlerinin dominant olduğunu

belirtmişlerdir. Çalışma sonucunda asetojenik bakterilerin asetat ürettikleri ve asetat tüketen elektrokimyasal olarak aktif bakteriler (*Geobacter sp.*) tarafından tüketildiği belirtilmiştir.

Wang vd. (2012) mikrobiyal yakıt hücresinde kullanılarak penteklorofenolün ayrıştırmasında etkin olan mikrobiyal türleri incelemiştir. Asetat ve glikozu ilave besin maddesi olarak kullanıp etkin olan mikroorganizma türlerini araştırmışlardır. Çalışma sonucunda etkin olan mikroorganizma türlerini *Alphaproteobacteria* (sürekli-asetat beslemesinde % 33,9; kesikli-asetat beslemesinde % 31,3), *Gammaproteobacteria* (sürekli-glikoz beslemesinde % 44,1) ve *Firmicutes* (kesikli-glikoz beslemesinde, %31,8). *Sedimentibacter* geninin tüm işletme periyodunda mevcut iken *Spirochaetes* sadece sürekli asetat ve sürekli glikoz beslemesinin olduğu peryotta tespit etmişlerdir.

3. MATERYAL VE METOT

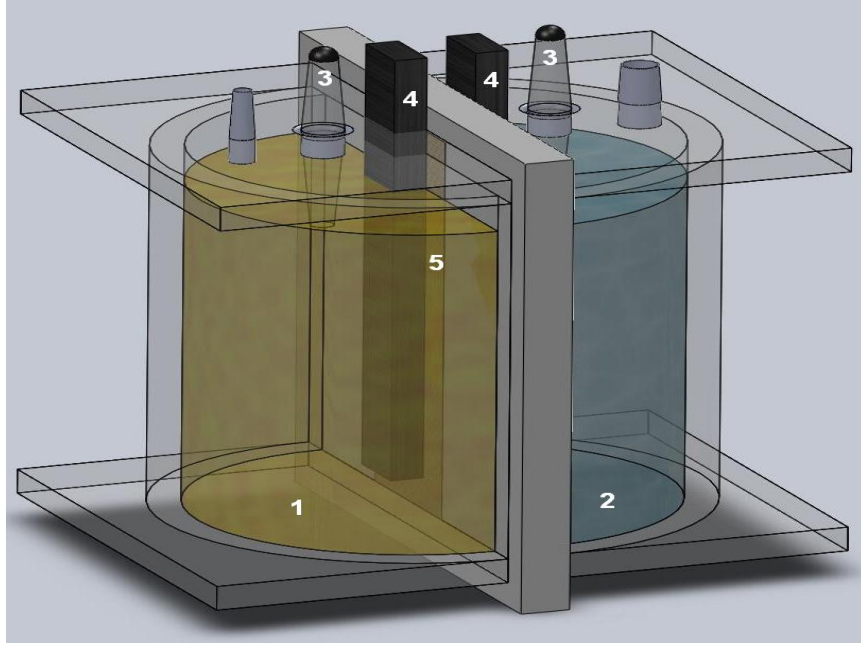
Bu tez çalışmasında iki farklı mikrobiyal yakıt hücresi tipi kullanılmıştır. Bunlardan birincisi literatürde sandviç modeli olarak bilinen çift bölmeli MYH, diğeri ise H tipi olarak bilinen MYH'dir. Sentetik atıksu beslemelerinin yapıldığı çalışmalarda sandviç modeli olarak adlandırılan MYH'ler kullanılmıştır. Diğer çalışmalarda ise H tipi MYH'ler kullanılarak çalışma tamamlanmıştır.

3.1 Çalışmada Kullanılan Mikrobiyal Yakıt Hücreleri

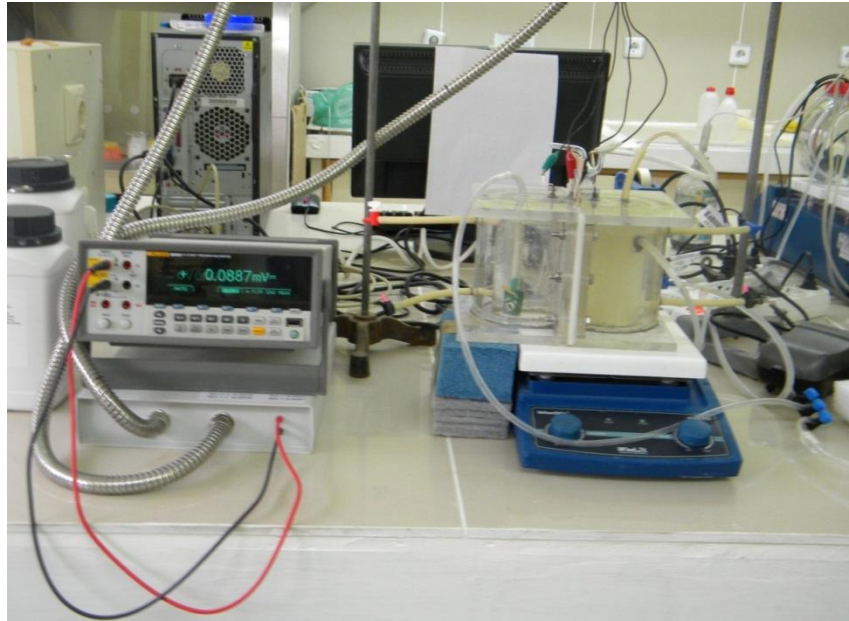
3.1.1 Çift Bölmeli Sandviç Tipi mikrobiyal Yakıt Hücresi

Bu reaktörler pleksiglas malzemeden yapılmış olup anot ve katot olacak şekilde iki bölmeli olarak dizayn edilmiştir. Her bir bölmenin yüksekliği 12 cm ve çapı 6,4 cm'dir. Anot ve katot bölmesinin her birinin efektif çalışma hacmi 300 mL'dir. MYH'nin anot ve katot bölmeleri proton değiştirici membran ile birbirinden fiziksel olarak ayrılmaktadır. Anot ve katot bölmesinde mevcut olan potansiyelleri ölçmek amacıyla elektrotlara yakın olacak şekilde Ag/AgCl referans elektrotlar yerleştirilmiştir (Şekil 3.1). Anot ve katot bölmelerine besleme yapmak ve besleme yapılan sıvının çıkışını sağlamak amacıyla iki adet hortum her bir bölmeye yerleştirilmiştir. Katot bölmesi saf su ile doldurulmuş ve oksijen kazandırmak amacıyla bir hava pompası havalandırma yapılmıştır. Proton değiştirici membran iki bölme arasında kalacak şekilde anot ve katot bölmeleri 6 adet civata yardımıyla birbirine birleştirilmiştir. Silikon conta her iki bölmenin birleştiği noktalara bırakılarak MYH'de meydana gelecek su sızıntısı engellenmiştir. Sandviç tipli

mikrobiyal yakıt hücresi sisteminin genel görünümü Şekil 3.2’de görülmektedir.



Şekil 3.1: Mikrobiyal yakıt hücresi sisteminin şematik görünümü (1:Anot Bölmesi, 2: Katot Bölmesi, 3:Referans elektrotlar, 4:Elektrotlar)



Şekil 3.2: MYH sisteminin genel görünümü

3.1.2 Çift Bölmeli H Tipi Mikrobiyal Yakıt Hücresi

Bu reaktörler cam malzemedendir yapılmıştır. Anot ve katot bölmesi olacak şekilde iki bölmeli olarak dizayn edilmiştir (Şekil 3.3). Her bir bölmenin efektif çalışma hacmi 300 ml’dir. Proton değişirici membran anot ve katot bölmesini biri birinden fiziksel olarak

ayırmaktadır. Bir kısaç yardımıyla anot ve katot bölgesi birbirine birleştirilmiş ve silikon conta kullanılarak olabilecek su sızıntısı engellenmiştir. MYH içerisinde fotosentetik mikroorganizmaların üremesini engellemek amacıyla MYH'ler alüminyum folyo ile kapatılmıştır. Katot bölgesi saf su ile doldurulmuş ve hava pompası kullanılarak suya O₂ kazandırılmıştır. Sıvı beslemesi yapmak ve sıvının reaktörden çıkışını sağlamak amacıyla her iki bölmede giriş ve çıkış hortumları mevcuttur.



Şekil 3.3: Çalışmada kullanılan çift bölmeli H tipi mikrobiyal yakıt hücresi

3.2 Moleküler Çalışmalar

Farklı zaman ve işletme şartlarında anot bölgesinde elektrot biyofilm numunesi ve anot sıvısı (1 ml) alınarak muhafaza edilmiştir. Numuneler DNA ekstraksiyon kitlerine alınmış ve 3.7.1 Başlığı altında detaylıca anlatılan ekstraksiyon prosedürü uygulanmıştır. Bu işlemde sonra elde edilen saf DNA'lar için PCR işlemi uygulanarak 16SrRNA genleri çoğaltılmış ve DGGE işlemi ile örneklerdeki DNA'lar tespit edilmiştir.

3.2.1 DNA Ekstraksiyonu

Alınan örneklerin DNA ekstraksiyonu için UltraClean Soil DNA izolasyon kiti kullanılmıştır. Ekstraksiyon işlemi aşağıda detaylıca anlatılan protokole göre gerçekleştirilmiştir.

1. DNA ekstraksiyon tüpü yavaşça vortekste karıştırılmıştır.
2. C1 çözeltisi kontrol edilmiş ve C1 çökelmiş ise kullanmadan önce 60 °C'ye kadar ısıtılmıştır.
3. 60 µL C1 çözeltisi DNA ekstraksiyon tüpüne ilave edilmiş ve birkaç kez ters düz edilip yavaşça vortekste karıştırılmıştır.
4. Vorteks için kullanılan Mo Bio vorteks adaptör tüp tutucunun yatay olarak kullanılmış DNA ekstraksiyon tüpü 10 dakika maksimum hızda vortekste karıştırılmış ve daha sonra oda sıcaklığında 30 saniye 10000 rpm'de santrifüjlenmiştir.
5. Tüp içerisindeki üst sıvı 400-500 µL olacak şekilde temiz bir tüpe aktarılmıştır.
6. 250 µL C2 çözeltisi tüplere ilave edilmiş ve 5 saniye vortekslenmiştir. Daha sonra tüpler 4 °C'de 5 dakika inkübe edilmiştir.
7. Tüpler oda sıcaklığında 10000 rpm'de 1 dakika santrifüjlenmiştir.
8. Tüp içerisindeki üst sıvı 600 µL'yi aşmayacak şekilde alınarak 2 ml'lik temiz tüpe aktarılmıştır.
9. C3 çözeltisinden 200 µL alınarak bir tüpe ilave edilmiş ve kısa süre vortekslenmiştir.
10. Tüpler oda sıcaklığında 10000 rpm'de 1 dk santrifüjlenmiştir.
11. Tüp içerisindeki üst sıvı 750 µL'yi aşmayacak şekilde 2 ml'lik temiz tüpe aktarılmıştır.
12. C4 çözeltisi kullanılmadan önce karıştırılmış, 1200 µL C4 çözeltisi tüpe ilave edilmiş ve 5 saniye vortekslenmiştir.
13. Tüp içerisinde 675 µL alınarak spin filtreye ilave edilmiş ve oda sıcaklığında 1 dakika 10000 rpm'de santrifüjlenmiştir. Spin filtreden geçen kısım uzaklaştırılarak işlem tekrarlanmıştır. Her örnek için yükleme yapılmıştır.
14. C5 çözeltisinden 500 µL spin filtreye ilave edilerek ve oda sıcaklığında 10000 rpm'de 1 dakika santrifüjlenmiş ve geçen kısım uzaklaştırılmıştır.
15. Spin filtre oda sıcaklığında 10000 rpm'de 1 dakika santrifüjlenmiştir.

16. Spin filtre 2 ml'lik temiz bir tüpe yerleştirilmiştir. Bu esnada spin filtre üzerindeki C5 çözeltisinin sıçramasından kaçınılmalıdır.
17. C6 çözeltisinden 100 µL spin filtredeki beyaz membranın merkezine ilave edilmiştir.
18. Spin filtre oda sıcaklığında 10000 rpm'de 30 saniye santrifüjlenmiştir.
19. Spin filtre uzaklaştırılmış ve tüp içerisindeki DNA numunesi PCR işlemi için - 20 °C'de saklanmıştır.

3.2.2 Polimeraz Zincir Reaksiyonu (PCR)

DNA ekstraksiyonu tamamlanan numuneler için PCR uygulaması yapılarak 16S rRNA bölgesi çoğaltılmıştır. Hedef genin çoğaltılması amacıyla TECHNE /TC-512 marka PCR cihazı kullanılmıştır (Şekil 3.4). PCR reaksiyonu Tablo 3.1'de gösterildiği miktarda PCR bileşenleri ilave edilerek toplamda 25 µL olarak gerçekleştirilmiştir. Çalışmada kullanılan primerlerin dizilimi Tablo 3.2'de verilmiştir. PCR işlemi Tablo 3.3'de gösterilen basamaklar uygulanarak gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.4 : PCR işleminde kullanılan TECHNE /TC-512 marka cihazın görünümü

Tablo 3.1. PCR analizi için kullanılan malzemeler ve karışım oranları

Kimyasal Adı	Konsantrasyon	Miktar (µL)
Taq Buffer	10X	2,5
MgCl ₂	25 mM	0,5
dNTP	10 mM	0,5
Forward Primer	10 mM	0,5
Reverse Primer	10 mM	0,5
Taq polimeraz	—	0,125
DNA	—	1
Nükleaz free su	—	19,375
Toplam	—	25

Tablo 3.2. PCR çalışmasında kullanılan primerlerin baz dizilimleri

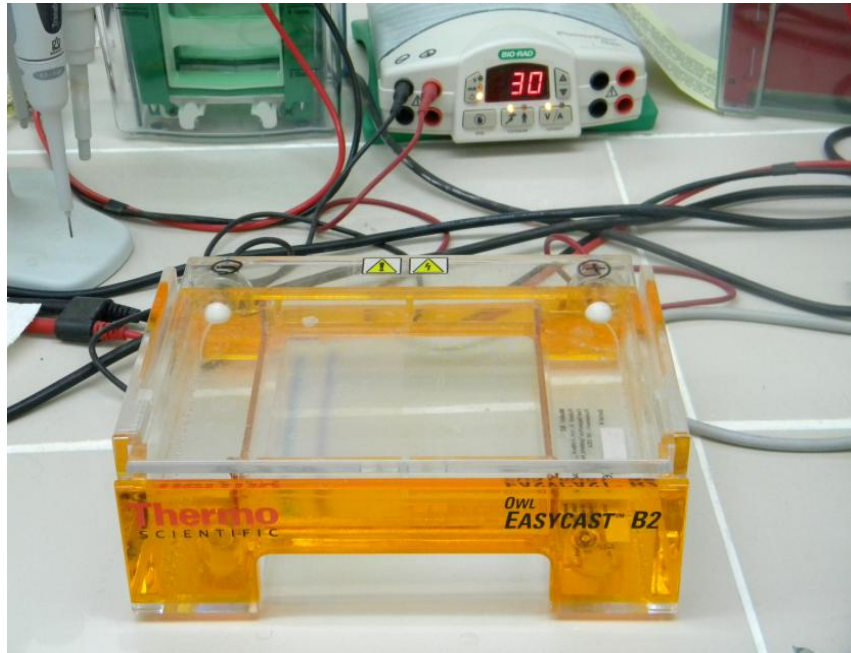
Primer	Baz Dizilimi
Forward (968f)	(5'-AAC GCG AAG AAC CTT AC- 3')
Reverse (1401r)	(5'-CGGTGTGTACAAGACCC-3')
GC-Forward	(5'- CGC CCG GGG CGC GCC CCG GGC GGG GCG GGG GCA CGG GGG G AAC GCG AAG AAC CTT AC –3')

Tablo 3.3. PCR analizinin işlem basamakları

İşlem Basamağı	Sıcaklık °C	Süre
İlk Denaturasyon	95	5 dk
Denaturasyon	95	30 sn
Tutunma	56	40 sn
Uzama	72	1dk

3.2.3 Agaroz Jel Elektroforezi

PCR işlemi tamamlandıktan sonra işlemin başarısını görmek amacıyla elde edilen PCR ürünleri %1'lik agaroz jelde koşturulmuştur (Şekil 3.5). Bu işlem için 10X konsantre TBE (fermentas marka) tamponu kullanılmıştır. Mikrodalga fırında kaynatılarak agarozun TBE içerisinde çözünmesi sağlanmıştır. Daha sonra 5 μ L etidyum bromür ilave edilerek jel tepsisine dökülmüştür. 5 μ L PCR ürünü ve 2 μ L yükleme boyası ile karıştırılarak kuyulara yükleme yapılmıştır. PCR ürünleri 90 V'da 20 dakika yürütülmüştür. Yürütme işleminden sonra jel görüntüleme cihazı (Vilber Lourmat) ile hedeflenen genin çoğaltılıp çoğaltılmadığı belirlenmiştir. Çoğaltıldığı tespit edilen PCR ürünleri denature gradyent jel elektroforezinde kullanılmıştır.

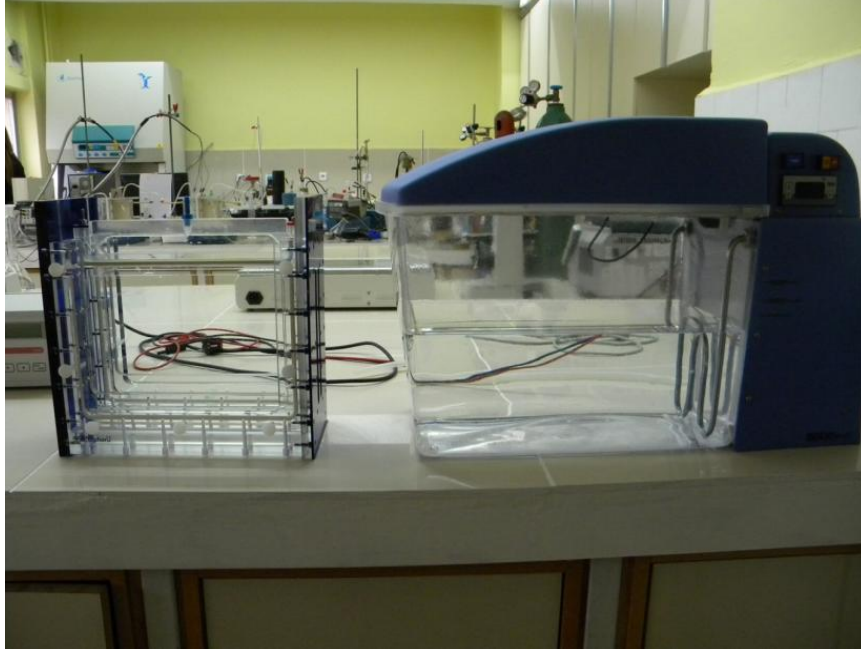


Şekil 3.5: Thermo marka agaroz jel elektroforezinde DNA kontrolü

3.2.4 Denatüre Gradyan Jel Elektroforezi (DGGE)

PCR işlemi ile karışık kültür içerisindeki saf DNA'ların hedef bölgeleri çoğaltıldıktan sonra DGGE işlemine tabi tutularak saf DNA'ların elde edilebilmesi sağlanmıştır. DGGE işlemi INGENY Phoru JL031 cihazı ile yapılmıştır (Şekil 3.6). Denatürant konsantrasyonu %40-%60 olacak şekilde jel gradyanı oluşturulmuştur. DGGE rezervuarı 1XTAE ile doldurulmuş ve DNA örnekleri 60°C ve 85 V'da 16 saat süreyle yürütülmüştür. 16 saat süre sonunda jel 30 dk 1X sybr gold (Invitrogen marka) boyası

içerisinde bekletilmiştir. Boyama işlemi tamamlandıktan sonra jel UV görüntüleme sistemine alınarak görüntüsü alınmıştır. Daha sonra karanlık odada UV ışığı altında her bir DNA bant steril bistüriler yardımıyla kesilerek PCR tüplerine alınmıştır. Her bir örnek üzerine 20 µl nükleaz içermeyen su ilave edilmiştir. Saf DNA örnekleri GC klampsiz primerler kullanılarak aynı PCR protokolü ile çoğaltılmıştır. Elde edilen PCR ürünleri DNA sekans analizine gönderilmiştir.



Şekil 3.6: DGGE cihazının genel görünümü

3.3 Voltaj İzleme Sistemi

MYH'lerden üretilen akım iki farklı multimetre kullanılarak ölçülmüştür. Bunlardan biri FLUKE marka 8846A model multimetre, diğeri ise UNI-T marka UT71C model multimetredir.

3.3.1 FLUKE 8846A Dijital Multimetre ve Özellikleri

Şekil 3.7'de görülen FLUKE marka dijital multimetre ile yapılan voltaj ölçümlerinde MYH'nin anot ve katot bölmeleri arasına 10 Ω luk direnç bağlanmıştır. MYH üzerinden voltaj dataları kanallar arası izole 24 bit hassasiyetli analog giriş modülleri ile okunmuştur.

MYH'nin üretmiş olduğu akım kapalı devreye bağlanan akım direnci üzerindeki voltaj okunup akım değerine dönüştürülerek hesaplanmıştır. Anot-Ref, Katot-Ref, Ref-Ref voltaj ölçümleri direk bağlanmıştır.

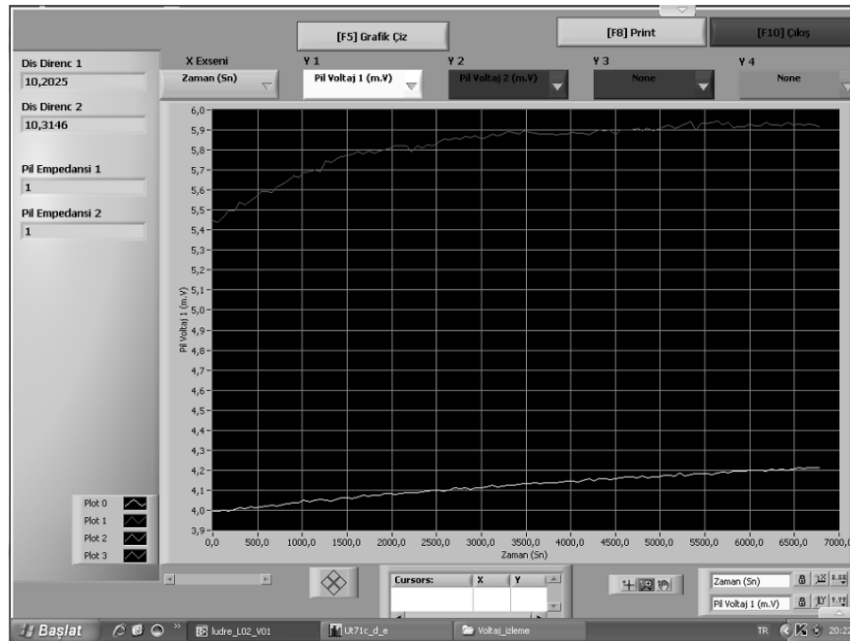
Kapalı devre üzerine yerleştirilmiş dijital direnç değiştirme düzeneği 8 bit hassasiyetinde olup direnç değeri 0-256 ohm arasında ayarlanabilecek şekilde dizayn edilmiştir. Bu düzenek sayesinde MYH üzerindeki yük direnç istenilen değere ayarlanabilir veya otomatik değiştirilerek MYH'den sabit akım çekilebilmesi mümkün olabilmektedir. MYH'den elde edilen veriler bir software (Şekil 3.8) yardımıyla on-line sistemde okunarak voltaj, akım, akım yoğunluğu, güç şekline dönüştürülerek bilgisayara excel dosyası olarak kaydedilmiştir. Multimetrenin teknik özellikleri Tablo 3.4'de verilmiştir.



Şekil 3.7: Çalışmada kullanılan FLUKE marka multimetrenin görüntüsü

Tablo 3.4. FLUKE 8846A Dijital Multimetrenin Teknik Özellikleri

Özellik	Değer
Hassasiyet	6,5 Dijit
Voltaj (DC)	Aralıklar: 100 mV -1000 V
	Hassasiyet 8845A: 0,0035 + 0,0005 8846A: 0,0024 + 0,0005
Voltaj (AC)	Aralıklar: 8845A: 100 mV - 750 V
	8846A: 100 mV -1000 V
	Max. Çözünürlük: 100 nV
	Hassasiyet: 8845A: 0.06 + 0.03 8846A: 0,06 + 0,03
Rezistans	Frekans: 3 Hz -100 KHz
	Aralıklar: 8845A: 100 Ω - 100 M Ω
	8846A: 10 Ω - 1 G Ω
	Max. Çözünürlük: 8845A: 100 $\mu\Omega$ 8846A: 10 $\mu\Omega$
Amper (DC)	Hassasiyet: 8845A: 0,010 + 0,001 8846A: 0,010 + 0,001
	Aralıklar: 100 μ A - 10 A
Amper (AC)	Hassasiyet: 0,050 + 0,005
	Aralıklar: 8845A: 10 mA den 10 A
	8846A: 100 mA den 10 A
	8846A: 100 pA
	Hassasiyet: 0,10 + 0,04
	Frekans: 3 Hz to 10 kHz



Şekil 3.8: Çalışmada kullanılan bilgisayar programının bir görüntüsü

3.3.2 UNI-T UT71C Dijital Multimetre

Şekil 3.9’da görülen UNI-T marka dijital multimetre ile MYH’de üretilen voltajı ölçmek amacıyla multimetrenin iki ucu arasına 10 Ω luk direnç bağlanmıştır. MYH’de üretilen voltaj değerleri bilgisayar programı yardımıyla bilgisayara aktarılarak excel dosyası şeklinde kaydedilmiştir. MYH’lerde üretilen voltaj değerleri anlık olarak izlenmiş ve her 99 sn de bir ölçüm alınmıştır. Multimetrenin teknik özellikleri Tablo 3.9’da verilmiştir.



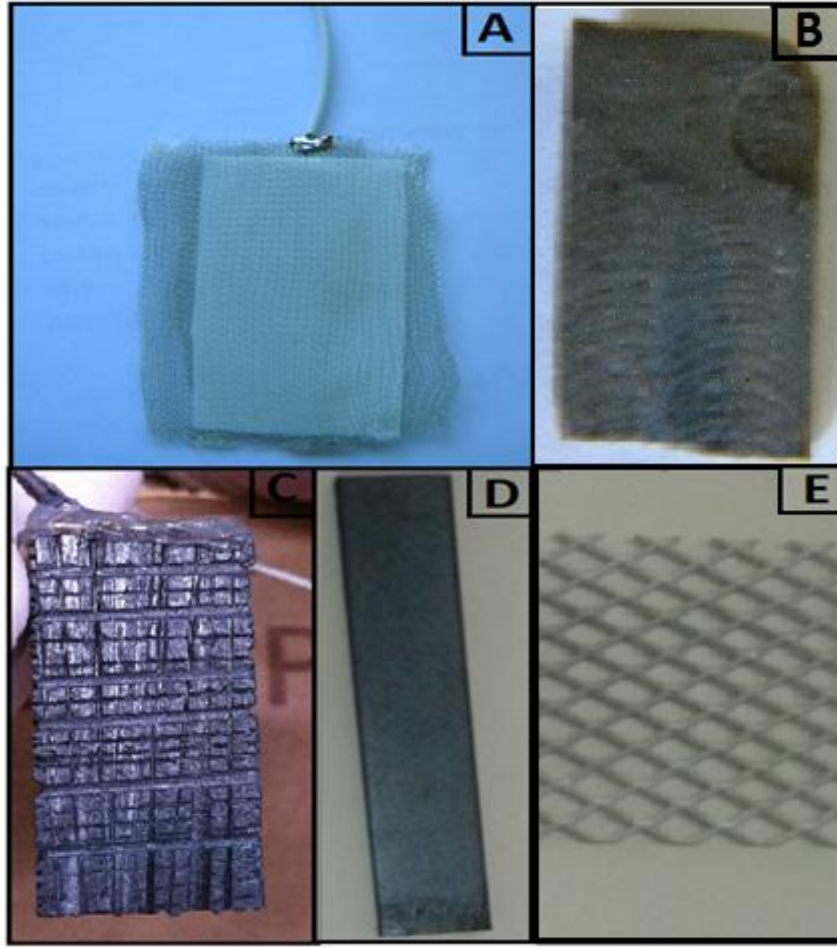
Şekil 3.9: Çalışmada Kullanılan UNI-T Marka Dijital Multimetrenin Görünümü

Tablo 3.5. UNI-T UT71C Multimetrenin teknik özellikleri

Fonksiyon	Özellik
Okuma	40000 Count
Çözünürlük	4 3/4 Dijit
DC Voltaj	1000 A
DC Voltaj Kademe	400mV, 4V, 40V, 400V, 1000V... ($\pm 0,025\%+5$)
AC Voltaj	1000 V
AC Voltaj Kademe	4V, 40V, 400V, 1000V... ($\pm 0,4\%+30$)
DC Akım	10 A
DC Akım Kademe	400 μ A, 4000 μ A, 40mA, 400mA, 10A... ($\pm 0,08\%+8$)
AC Akım	10 A
AC Akım Kademe	400 μ A, 4000 μ A, 40mA, 400mA, 10A... ($\pm 0,5\%+15$)
Direnç	40 M Ω
Direnç Kademe	400 Ω , 4k Ω , 40k Ω , 400k Ω , 4M Ω , 40M Ω ... ($\pm 0,3\%+8$)
Frekans	400 MHz
Kapasite	40 mF
Sıcaklık	-40 - 1000 °C
Boyut	200 X 93 X 40mm

3.4 Çalışmada Kullanılan Elektrot Tipleri

MYH sisteminde anot elektrotunda kalay kaplı bakır kumaş, grafit, Al-Ni alaşımı elektrot ve titanyum oksit kaplamalı titanyum elektrot (Ti-TiO₂) olarak dört farklı elektrot tipi kullanılmıştır Şekil 3.10. Katot bölmesinde ise platin kaplamalı titanyum elektrot kullanılmıştır. Kullanılan elektrotlar şekil de görülmektedir.



Şekil 3.10 : Çalışmada kullanılan elektrot malzemelerinin görünümü (A: Bakır kumaş, B: Al-Ni alaşımı, C: Grafit, D: Ti-TiO₂, E: Platin kaplamalı Ti elektrot)

3.4.1 Grafit Elektrot

Çalışmada kullanılan grafit elektrotlar Fuel Cell Store firmasından temin edilmiştir (www.fuelcellstore.com). Temin edilen elektrot 10x10 cm boyutlarındadır. Bu elektrotlar MYH’lerde kullanılmak amacıyla istenilen boyutlarda kesilerek anot bölgesinde kullanılacak şekle getirilmiştir. Çalışmada kullanılan grafit elektrotun teknik özellikleri Tablo 3.6’da verilmiştir.

Tablo 3.6. Grafit elektrotun teknik özellikleri

Özellik	Değer
Yoğunluk	1,90 g/cm
Basınç Dayanımı	>50 MPa veya 7250 psi
Elektriksel İletkenlik	110 S/cm
Elektriksel Direnç	90 mikro ohm/M

3.4.2 Ti-TiO₂ Elektrot

Elektro katalitik kaplama tekniği ile titanyum üzerine püskürtülmüş titanyum oksit, niobiyum oksit, rutenyum oksit, mangan oksit gibi soy metal oksitler (grup 8) metal tuzlarının ısıtılarak ayrışması ile yapılır. Ti-TiO₂ şerit elektrot etrafı karbon dolgu ile çevrelenmiş özel bir elektrottur (<http://www.akat.net/>). Kullanılan Ti-TiO₂ şerit elektrotlar PRO-TEK Müşavirlik Mühendislik firmasından temin edilmiştir (Şekil 3.10 D).

3.4.3 Kalay ile Kaplanmış Bakır Kumaş Elektrot

Bakır kumaş elektrotlar LessEMF firmasından temin edilmiştir (LessEMF.com). Bu elektrotlar kumaş şeklinde olup farklı boyutlarda kesilerek taşıyıcı bir plastik malzemeye bağlanılarak kullanılmıştır (Şekil 3.10 A).

3.4.4 Al-Ni Alaşımı Elektrot

Al-Ni alaşımlı malzeme yüzeyinde mikro gözenekler oluşturulacak şekilde laboratuvar ortamında elde edilmiştir. Bu malzeme ağırlık olarak %65 Al, %25 Ni içerecek şekilde üretilmiştir (Şekil 3.10 B).

3.5 Elektrotların MYH'lerde Kullanımı için Hazırlanması

Elektrot malzemeleri saf etil alkol içerisinde 5 dakika süre ile bekletilerek elektrot yüzeyindeki mevcut olabilecek kirlilikten arındırılmıştır. Bu işlemlerden sonra elektrotlar

kurulmuştur. Multimetrenin uçlarının bağlanması amacıyla bakır bir tel elektrot malzemesinin uygun bir noktasından lehim yapılmıştır. Lehim yapılan noktadan epoksi yapıştırıcı ile sıkılaştırılarak reaktör içerisine monte edilmiştir.

3.6 Çalışmada Kullanılan Proton Değiştirici Membranlar

Bu çalışmada 3 farklı membran türü kullanılmıştır. Bu membranlar ticari ismi Fumapem F-1050, Nafion 117 ve Ultrex CMI-7000 olarak bilinen proton değiştirici membranlardır.

Fumapem F-1050 membranlar Fuma-Tech firmasından temin edilmiştir. Membranın teknik özellikleri Tablo 3.7’de verilmiştir.

Tablo 3.7. Fumapem F-1050 Proton Değişim Membranının Teknik Özellikleri

Özellik	Değer
H formunda iletkenliği	>90 ms/cm
Alan direnci	<0,055 Ω cm ²
Kalınlık	0,05 mm
Isıl olarak parçalanma aralığı	270-300 °C

Nafion®N117 membran ION POWER firmasından temin edilmiştir. Membranın teknik özellikleri Tablo 3.8’de verilmiştir.

Tablo 3.8. Nafion 117 Proton Değişim Membranının Teknik Özellikleri

Özellik	Değer
Kalınlık	0,183 mm
Ağırlık	360 g/m ²

Çalışmada kullanılan diğer bir membran Ultrex firmasından temin edilen CMI-7000 proton değiştirici membrandır. Membranın teknik özellikleri Tablo 3.9’da verilmiştir.

Tablo 3.9. Ultrex CMI-7000 Proton Değişim Membranının Teknik Özellikleri

Özellik	Değer
Polimer yapısı	Jel polistiren
İşlevsel grup	Sülfonik asit
İyonik form	Sodyum
Standart kalınlık, mm	0.45±0.025
Toplam değiştirme kapasitesi (meq/g)	1.6±0.1
Isı kararlılığı (°C)	90
Kimyasal kararlılık aralığı (pH)	1-10
Ohmik rezistans (Ω cm ²) 0.5M NaCl	<30

Membranlar 40 °C sıcaklıkta ve %5'lik NaCl içeren çözelti içerisinde 24 saat bekletilerek şartlandırılmıştır.

3.7 Kinetik Modelleme

Mikrobiyal elektroliz hücrelerinde, anot solunum bakterileri (ARB) anodu nihai elektron alıcısı olarak kullanırlar. Çünkü anot katı olup solunum kinetiğini kontrol edecek bir konsantrasyona sahip değildir. ARB anot potansiyeline tepki gösterir. Bakteri kinetiği, anot potansiyelinin bir fonksiyonu olarak, akım yoğunluğuna, substrat konsantrasyonuna ve anot potansiyeline bağlı olarak Nernst-Monod eşitliğiyle açıklanabilir (Lee vd., 2010a; Markus vd., 2007)

$$j = j_{\max} \underbrace{\frac{S}{K_s + S}}_{\text{Biyolojik faktör}} \underbrace{\frac{1}{1 + \exp\left[-\eta \frac{F}{RT}\right]}}_{\text{Elektrokimyasal faktör}} \quad (5)$$

j = Akım yoğunluğu, substrat tüketim hızı (A/m²)

$j_{\max}$ = Maksimum akım yoğunluğu (A/m²)

S = Substrat konsantrasyonu (g KOİ/m³)

K_s = Maksimum spesifik büyüme hızının yarısına karşılık gelen substrat konsantrasyonu (g KOİ/m³)

η = $E_{\text{Anot}} - E_{\text{KA}}$ (V)

$E_{Anot} =$ Anot potansiyeli (V)

$E_{KA} =$ Maksimum akım yoğunluğunun yarısına karşılık gelen anot potansiyeli(V)

$R =$ İdeal gaz sabiti (8,3145 J/mol-K)

$T =$ Sıcaklık (K)

$F =$ Faraday sabiti (96485 J/V-mol)

j_{max} değeri, anot üzerindeki bakteri miktarı ve bakterinin maksimum substrat tüketim hızına bağlıdır (Denklem 5).

$$j_{max} = 0.14 f_e q_{max} X_f L_f \quad (6)$$

0,14= Dönüşüm sabiti (0,14 A= 1 g KOİ/ g UAKM.gün)

$q_{max} =$ Substrat maksimum tüketim hızı (g KOİ/ g UAKM.gün)

$X_f =$ Biofilmdeki bakteri yoğunluğu (g UAKM/ m³)

$L_f =$ Biyofilm kalınlığı (m)

$f_e^0 =$ Akıma dönüşen elektron fraksiyonu

Çalışmada reaktörlerden elde edilen verilerle Nerst-Monod eşitliği kullanılarak biyoelektrokimyasal kinetik model uygulanmış ve lineer olmayan regresyonla MATLAB kullanılarak kinetik katsayılar belirlenmiştir (Akoğlu, 2011).

3.8 Polarizasyon Eğrilerinin Oluşturulması ve Güç Hesabı

MYH’de elde edilebilecek maksimum güç miktarını tespit etmek amacıyla polarizasyon eğrileri oluşturulmuştur. Polarizasyon eğrileri oluşturulurken çok turlu potansiyometri kullanılmıştır. Potansiyometri yardımıyla 0-50000 Ω aralığında farklı dirençler için voltaj ölçümü yapılmıştır. Her bir ölçüm için MYH’de üretilen güç miktarı temel elektriksel parametreler başlığı altında ifade edilen güç formülüne göre hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlara göre excel dosyasında güç eğrileri oluşturularak MYH sisteminden üretilen maksimum güç miktarı hesaplanmıştır.

Logan (2006) kullanılan anot elektrot yüzey alanı katot alanına göre çok fazla yüksek olduğunda anot yüzey alanının güç üretimini etkilemeyeceğini ve MYH’de üretilen güç miktarının katot elektrot yüzey alanı dikkate alınarak hesaplanması gerektiğini belirtmiştir. Yapılan çalışmalarda anot elektrot yüzey alanının katot yüzey alanına göre çok yüksek olduğu periyotlarda MYH’de üretilen güç miktarı katot elektrot yüzey alanına göre hesaplanmıştır.

3.9 Membran ve Elektrotun Yüzey Özelliklerinin Belirlenmesi

Elektrotlar ve membranlar kullanıldıktan sonra her iki malzemenin yüzeyinde meydana gelen değişimleri gözlemlemek amacıyla kullanılan membran ve elektrot numuneleri % 2,5’lik paraformaldehid çözeltisinde içerisinde 3 saat bekletilmiştir. Burada elektrot ve membran yüzeyinde bulunan mikroorganizma ve diğer yapının ortamda sabitlenmesi amaçlanmıştır. Daha sonra 0,1 mol/L’lik pH’sı 6,8 ve 4 °C sıcaklığa sahip olan fosfat tamponu çözeltisi ile üç kez yıkanmıştır (Song vd., 2008). Bu işlemten sonra etil alkol konsantrasyonu %50, 70, 80, 90 ve 100 olacak şekilde hazırlanmış ve etil alkol/su karışım çözeltileri ile iki kez yıkanmıştır. Numuneler kurutulduktan sonra vakum altında altın ile kaplanarak JEOL JSM-7001F marka elektron mikroskobu cihazı ile SEM ve EDX analizleri gerçekleştirilmiştir.

3.10 Deneysel Çalışma Süreci

3.10.1 Sentetik Atıksular ile Yapılan Çalışmalar

Sentetik atıksu ile yapılan çalışmalarda sandviç modeli MYH kullanılmıştır. Anot ve katot elektrotu olarak Ti-O₂ elektrot ve proton değişim membranı olarak ULTREX CMI-7000 membranı kullanılmıştır. Sentetik atıksu ile yapılan çalışmaların tümünde anot ve katot elektrotları 10 Ω luk direnç ile sabitlenmiştir.

Tablo 3.10. Sentetik atıksuda kullanılan kimyasallar ve konsantrasyonları

Kimyasal	Konsantrasyon (g/L)	Kimyasal	Konsantrasyon (g/L)
NaH ₂ PO ₄ x 1H ₂ O	9,3	ZnCl ₂	0,00005
Na ₂ HPO ₄	3,195	CuCl ₂ x2H ₂ O	0,00004
NH ₄ Cl	0,6	MnCl ₂ x2H ₂ O	0,00004
KH ₂ PO ₄	0,125	(NH ₄) ₆ Mo ₇ O ₂₄ x4H ₂ O	0,00005
CaCl ₂ x2H ₂ O	0,11	AlCl ₃	0,00005
MgCl ₂ x6H ₂ O	0,1	CoCl ₂ x6H ₂ O	0,00005
NaHCO ₃	3,92	NiCl ₂ x6H ₂ O	0,00008
FeCl ₂ x4H ₂ O	0,002	EDTA	0,0005
H ₃ BO ₃	0,00005		

3.10.1.1 Kesikli Beslemeler

Sentetik atıksu ile yapılan kesikli beslemelerde

Tablo 3.10’da verilen oranlarda mineraller saf suya ilave edilerek hazırlanmıştır. Gerekli miktardaki substrat ilave edilerek MYH’lere beslemeler yapılmıştır. MYH’ye besleme yapılırken bir enjektör yardımıyla reaktör içerisinden 30 ml sıvı çekilip yerine 30 ml besleme sıvısı enjekte edilmiştir.

Çalışmasında ana besin maddesi asetat ve glikoz olacak şekilde laktat ve benzoik asit kullanılarak farklı konsantrasyonlarda karışımlar hazırlanarak besleme yapılmıştır (Tablo 3.11 ve Tablo 3.12).

Tablo 3.11. Asetat, laktat ve benzoik asit kullanılarak hazırlanan besleme suyu bileşimi

Toplam Konsantrasyon (mM)	Glikoz (mM)	Laktat (mM)	Benzoik Asit (mM)
5	3	1,5	0,5
10	6	3	1
25	15	7,5	2,5

Tablo 3.12 . Glikoz, laktat ve benzoik asit kullanılarak hazırlanan besleme suyu bileşimi

Toplam Konsantrasyon (mM)	Glikoz (mM)	Laktat (mM)	Benzoik Asit (mM)
5	1,5	3	0,5
10	3	6	1
25	7,5	15	2,5

3.10.1.2 Sürekli Beslemeler

Besleme suyunun ana besin maddesi asetat ve glikoz olacak şekilde laktat ve benzoik asit kullanılarak iki farklı konsantrasyonda besleme suyu hazırlanmış ve peristaltik pompa yardımıyla MYH'lere besleme yapılmıştır (Tablo 3.13 ve Tablo 3.14). MYH'ler 1,5; 1; 0,8; 0,5 gün olacak şekilde 4 farklı hidrolik bekletme süresinde işletilmiştir.

Tablo 3.13. Asetat veya glikoz+laktat+benzoik asit kullanılarak hazırlanan besleme suyu bileşimi (50 mM)

Toplam Konsantrasyon (mM)	Asetat veya Glikoz (mM)	Laktat (mM)	Benzoik asit (mM)
50	30	15	5

Tablo 3.14. Asetat veya glikoz+laktat+benzoik asit kullanılarak hazırlanan besleme suyu bileşimi (KOİ:2000 mg/L)

Toplam Konsantrasyon (mg/L)	Asetat (mg/L) veya Glikoz (mg/L)	Laktat (mg/L)	Benzoik asit (mg/L)
2000	1200	500	300

3.10.2 Mediyatör Çalışmaları

MYH’de elektrik üretimini arttırmak amacıyla metilen mavisi, nötral kırmızısı ve 2-hydroxy-1,4-naphthoquinone (HNQ) kimyasalları 50, 100, 200, 300 ve 400 μM konsantrasyonlarında besleme sıvısına ilave edilmiştir.

MYH’ler aşılama yapıldıktan sonra evsel atıksu ile HBS 2 gün olacak şekilde besleme yapılmıştır. MYH’de üretilen akım sabitleninceye kadar beklenmiştir. Akım değeri sabit bir değere geldiğinde MYH içerisindeki mediyatör konsantrasyonu 50 μM olacak şekilde reaktör içerisine ilave edilmiştir. Ardından MYH’ler 50 μL konsantrasyonda mediyatör içeren evsel atıksu ile beslenmiştir. Bu sayede anot sıvısının mediyatör konsantrasyonunun sabit kalması sağlanmıştır. Mediyatör konsantrasyonun reaktör içerisinde 100 μM olacak şekilde mediyatör anot sıvısına enjekte edilmiştir. Bu işlemden sonra MYH 100 μM mediyatör konsantrasyonu ihtiva eden atıksu ile beslemeye devam edilmiştir. Bu işlem 5 farklı mediyatör konsantrasyonu için benzer şekilde yapılmıştır. Üç farklı mediyatör ve her bir konsantrasyon için anot ve katot bölmelerine 50 mM’lük fosfat tamponu ihtiva edecek şekilde pH’sı 7 olarak ayarlanmıştır. Bu sayede anot ve katot bölmelerinin pH’ları eşit olacak şekilde MYH’ler işletilmiştir. Literatürde anot ve katot bölmelerinin pH’sının eşit olacak şekilde ayarlandığı çalışmalarda MYH’den maksimum güç yoğunluğu elde edilmiştir. MYH’ler mediyatör içermeyen atıksu ile beslenirken ve her bir mediyatör konsantrasyonu için akım değeri sabit iken polarizasyon eğrileri oluşturulmuştur. Bu şekilde her bir mediyatör konsantrasyonu için MYH’den üretilen güç miktarı tespit edilmiştir. Mediyatör ile yapılan çalışmalarda Ti-O_2 , grafit ve bakır kumaş elektrotları kullanılmıştır. MYH’lerin tümünde ULTREX CMI-7000 proton değiştirici membranı kullanılmıştır.

3.10.3 Gerçek Atıksular ile Yapılan Çalışmalar

Bu tez çalışmasında evsel atıksu, mezbaha atıksuyu ve yağ endüstrisi atıksuları olmak üzere 3 farklı atıksu MYH’de substrat olarak kullanılmış ve elektrik üretim potansiyelleri incelenmiştir. Temin edilen atıksular MYH’de kullanılmadan önce filtre kağıdından süzülerek içerisindeki büyük partiküllerin atıksudan uzaklaştırılması sağlanmıştır. Atıksular $+4\text{ }^{\circ}\text{C}$ de muhafaza edilerek içerdiği organik maddenin

mikroorganizmalar tarafından ayrıştırılmasının yavaşlatılmıştır. Gerçek atıksular ile yapılan MYH çalışmaların anot ve katot bölmelerine 50 mM'lık fosfat tamponu ilave edilerek her iki bölmenin pH'sı 7 olacak şekilde ayarlanmıştır. Reaktörlerin aşılması için kullanılacak olan çamurlar ilk olarak atıksu ile karıştırılıp 37 °C de inkübasyona bırakılarak gaz oluşumu tespit edildikten sonra aşılama yapılmıştır. Bu sayede mikroorganizmaların atıksuya adapte olma süresinin kısaltılması amaçlanmıştır. Bu çalışma serisinde MYH'lerin tümünde ULTREX CMI-7000 marka proton değiştirici membran kullanılmıştır. Çalışmada kullanılan atıksuların karakterizasyonları Tablo 3.15'de verilmiştir.

Tablo 3.15. Çalışmada kullanılan atıksuların karakterizasyonları

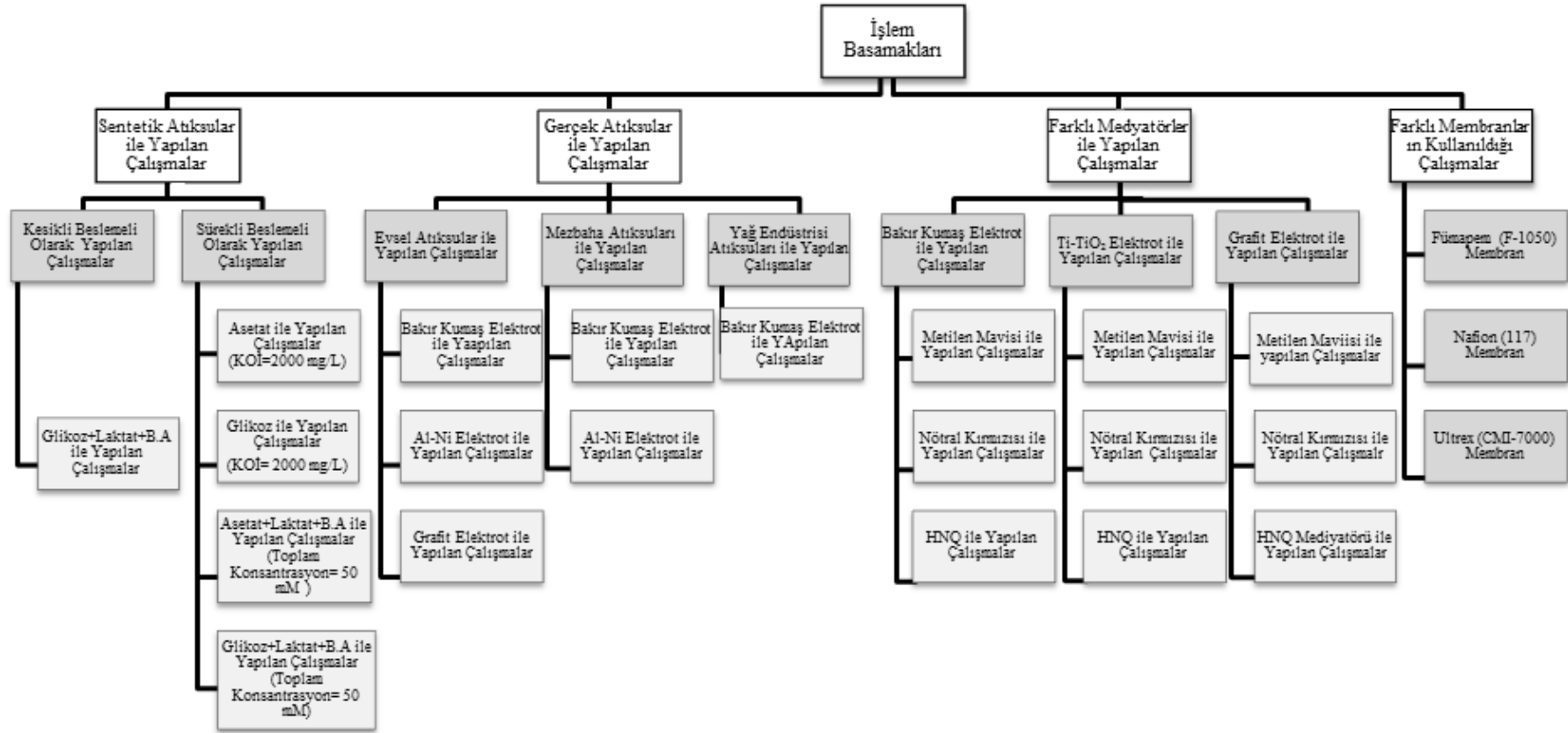
Parametre	Evsel Atıksu	Mezbaha Atıksuyu	Yağ Endüstrisi Atıksuyu
KOİ (mg/L)	380	4240	8000
Toplam Fosfor (mg/L)	20	29	24
Toplam Azot (mg/L)	69	65	21
pH	6,77	7,71	7,40

3.10.4 Farklı Membranlar ile Yapılan Çalışmalar

Çalışmada üç farklı proton değişim membranı kullanılarak performansları araştırılmıştır. Bu membranlar ticari ismi Fumapem (F-1050), Nafion (N117) ve Ultrex (CMI 7000) olarak bilinen proton değiştirici membranlardır. Her bir yakıt hücresinde farklı marka membran türü kullanılmıştır. Membranlar kullanılmadan önce her bir membran için üretici firma tarafından belirtilen membran şartlandırma prosedürü uygulanmıştır. MYH'lerin anot ve katot bölmelerinde aynı yüzey alanına sahip aynı tür elektrotlar kullanılarak bütün MYH'ler için aynı şartların sağlanması amaçlanmıştır. MYH'lerin anot bölmelerinde bakır kumaş elektrot, katot bölmelerinde ise platin kaplı titanyum elektrot kullanılmıştır. Çalışmada anot ve katot bölmeleri 50 mM fosfat tamponu ihtiva edecek şekilde pH'sı 7 olarak ayarlanmıştır. Çalışmada MYH'ler işletmeye alındıktan sonra ortalama 7 günlük aralıklar ile polarizasyon eğrileri oluşturulmuş ve her bir reaktörden üretilen maksimum güç miktarları ve MYH'lerin iç dirençleri tespit edilmiştir. 30 günlük bir işletmeden sonra membranlar yenileri ile değiştirilmiştir.

3.10.5 Farklı Elektrotlar ile Yapılan Çalışmalar

Çalışmada dört farklı elektrot kullanılarak elektrik üretim performansları araştırılmıştır. Bu elektrotlar grafit, bakır kumaş, Ti-TiO₂ elektrot ve Al-Ni alaşımı elektrotlardır. Farklı elektrotların performanslarını kıyaslamak amacı ile MYH'lerde aynı özelliğe sahip proton değişim membranları kullanılarak bütün MYH'ler için aynı şartların oluşması amaçlanmıştır. Bu sayede her bir MYH'de farklı elektrot malzemesi kullanılıp elektrotların performansının birbiri ile karşılaştırılması mümkün olmuştur. Çalışmada anot ve katot bölmeleri 50 mM fosfat tamponu ihtiva edecek şekilde pH'sı 7 olarak ayarlanmıştır. Çalışmada MYH'ler işletmeye alındıktan sonra belirli aralıklar ile polarizasyon eğrileri oluşturulmuş ve her bir reaktörden üretilen maksimum güç miktarları ve MYH'lerin iç dirençleri tespit edilmiştir. Her bir MYH'de üretilen maksimum güç ve iç dirençler tespit edilmiştir.



Şekil 3.11: Deneysel çalışma sürecinin şematik gösterimi

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

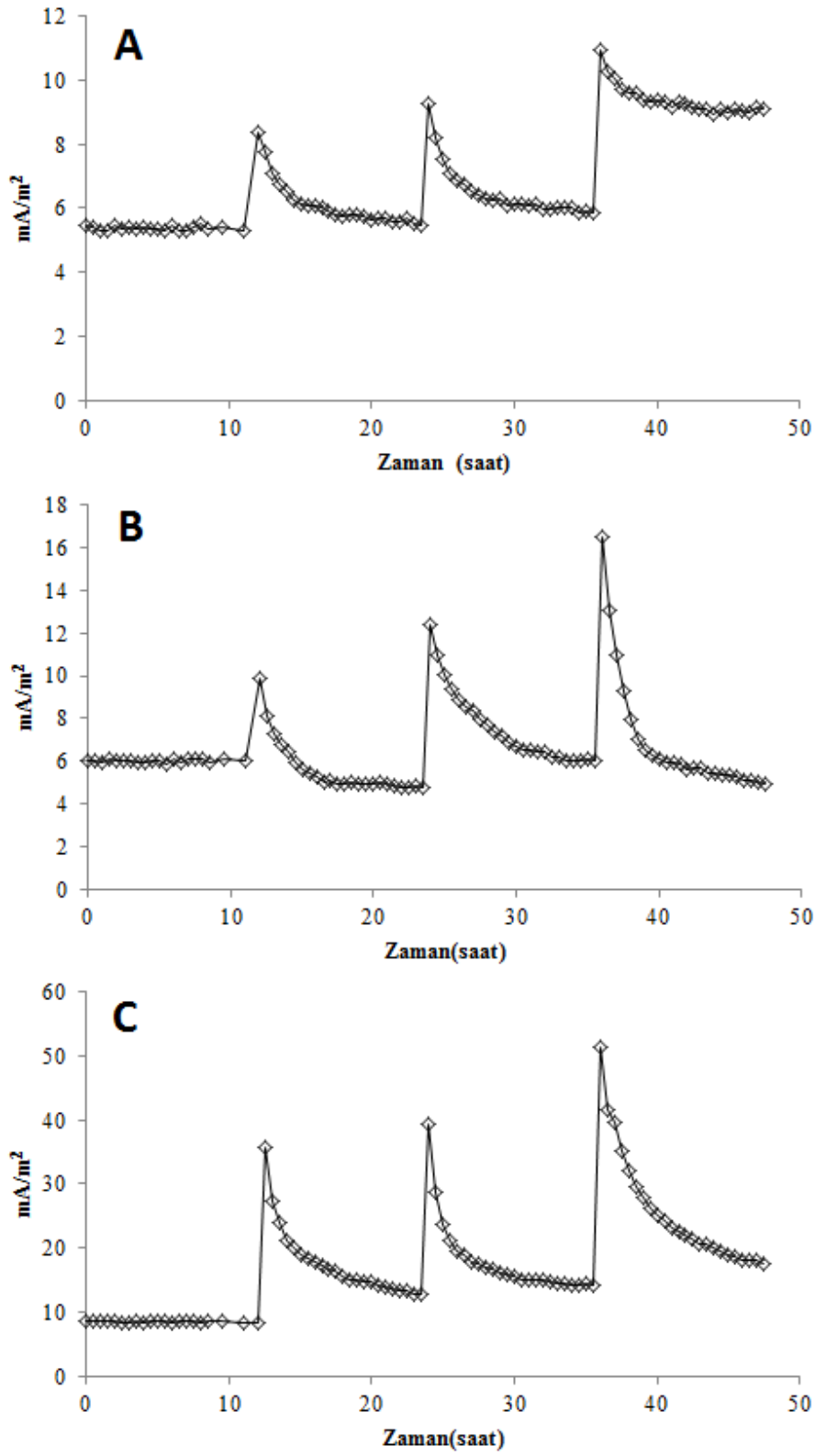
4.1 Sentetik Atıksular ile Kesikli Beslemeli Çalışmalar

Bu işletme sürecinde 5, 10 ve 25 mM konsantrasyonlarda sentetik atıksular (glikoz+laktat+benzoik asit karışımları) hazırlanarak MYH'ye kesikli beslemeler yapılmış ve elektrik üretim potansiyeli araştırılmıştır. İşletme sürecinde MYH reaktöründen 30 mL sıvı çekilmiş ardından reaktör içerisindeki atıksu konsantrasyonu 5, 10 ve 25 mM olacak şekilde sentetik olarak hazırlanmış sıvıdan 30 mL reaktöre enjekte edilmiştir. Yapılan beslemelerde üçlü karışım bileşimleri (glikoz+ laktat+benzoik) iki farklı oranda hazırlanmıştır. Çalışma iki seride gerçekleştirilmiştir. Birinci seride Tablo 3.11'de verilen karışım oranlarında hazırlanan sentetik atıksu kullanılmıştır. İkinci seride ise Tablo 3.12'de verilen karışım oranlarında hazırlanan sentetik atıksu kullanılmıştır.

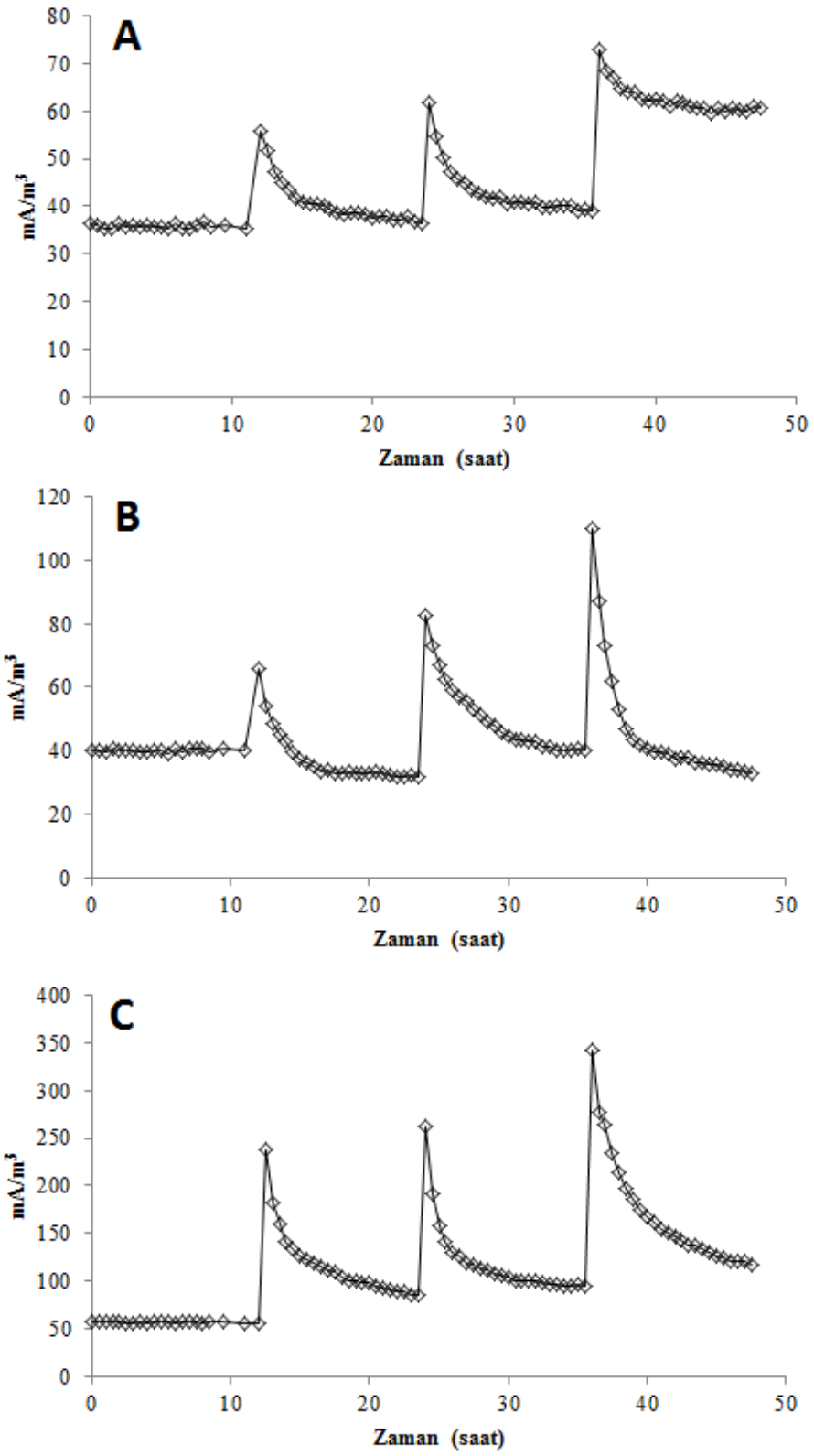
4.1.1 Birinci Seri Kesikli Besleme Sonuçları

MYH'ye yapılan kesikli beslemeler sonucunda kullanılan elektrot yüzey alanı dikkate alınarak üretilen akım yoğunluğu (mA/m^2) ve MYH'nin anot hacmi dikkate alındığında elde edilen akım yoğunluğu (mA/m^3) sonuçları verilmiştir. Kesikli beslemeler işletme süresinin 12, 24 ve 36. saatlerinde yapılmıştır. Sistemden sabit akım elde edildiği 12 saat süre sonunda anot sıvısında organik madde konsantrasyonu 5 mM olacak şekilde glikoz+laktat ve benzoik asit karışımı sıvı enjekte edilmiştir. Yapılan bu enjeksiyon sonucunda mikroorganizmaların organik maddeyi hızlı bir şekilde tüketmesi sonucu MYH sisteminde üretilen akım miktarı ani bir şekilde artarak elektrot yüzey alanı başına üretilen akım miktarı $8,4 \text{ mA/m}^2$ seviyesine kadar ulaşmıştır. Üretilen akım miktarı bu değere ulaştıktan sonra mikroorganizmaların organik maddeyi tüketmesi sonucu üretilen akım miktarı hızlı bir şekilde azalarak $5,6 \text{ mA/m}^2$ civarında sabitlenmiştir. 24 saat süre sonunda MYH sistemine ikinci enjeksiyon yapılmış ve MYH'den üretilen akım yoğunluğu miktarı $9,25 \text{ mA/m}^2$ seviyesine kadar ulaşmıştır. MYH sisteminden üretilen akım miktarı zamanla azalarak 6 mA/m^2 değerinde sabitlenmiş ve 36 saat süre sonunda aynı konsantrasyona sahip besleme sıvısı anot bölmesine enjekte edilmiş ve MYH'de üretilen akım miktarı 11 mA/m^2 değerine kadar ulaşmıştır (Şekil 4.1). Besin maddesi konsantrasyonu 10 mM'e

yükseltildiğinde sistemden elde edilen akım yoğunluğu değeri 12, 24 ve 36 saat süre sonunda 9,8; 12,4 ve 16,5 mA/m² değerine ulaşmıştır. Sisteme ilave edilen besin maddesi konsantrasyonu 25 mM değerine yükseltildiğinde MYH’de üretilen akım yoğunluğu miktarları 12, 24 ve 36 saat süre sonunda sırasıyla 35,8; 39,4 ve 51,4 mA/m² değerine ulaşmıştır. Üretilen akım miktarları reaktör hacmi dikkate alınacak şekilde hesaplandığında 5, 10 ve 25 mM’lük konsantrasyonlarda yapılan enjeksiyonlar için 36 saat süre sonunda üretilen akım miktarları sırasıyla 73, 110 ve 343 mA/m³ olarak elde edilmiştir (Şekil 4.2). MYH sistemine 24. ve 36. saat sonunda yapılan kesikli beslemeler sonucunda üretilen elektrik miktarı 12. saat sonunda yapılan beslemede üretilen elektrik miktarından daha fazla olduğu belirlenmiştir. Üretilen akım miktarlarının sisteme ilave edilen besin maddesi konsantrasyonu ile orantılı bir şekilde arttığı görülmüştür. MYH’ye ilave edilen besin maddesi konsantrasyonunun iki kat artışı ile üretilen akım miktarı 1,8 kat arttığı belirlenmiştir. Daha sonra besleme yapılan sıvının konsantrasyonu 5 katına çıkarılmış ve üretilen akım miktarı 5,5 kat artarak 51,4 mA/m² akım yoğunluğu elde edilmiştir.



Şekil 4.1: Glikoz, laktat ve benzoik asit karışımı (toplam konsantrasyon A:5 mM, B:10 mM ve C:25 mM) kullanılarak yapılan kesikli beslemeler ile elde edilen akım yoğunluğu değerleri (mA/m^2)



Şekil 4.2: Glikoz, laktat ve benzoik asit karışımı (toplam konsantrasyon A:5 mM, B:10 mM ve C:25 mM) kullanılarak yapılan kesikli beslemeler ile elde edilen akım yoğunluğu değerleri (mA/m^2)

4.1.2 İkinci Seri Kesikli Besleme Sonuçları

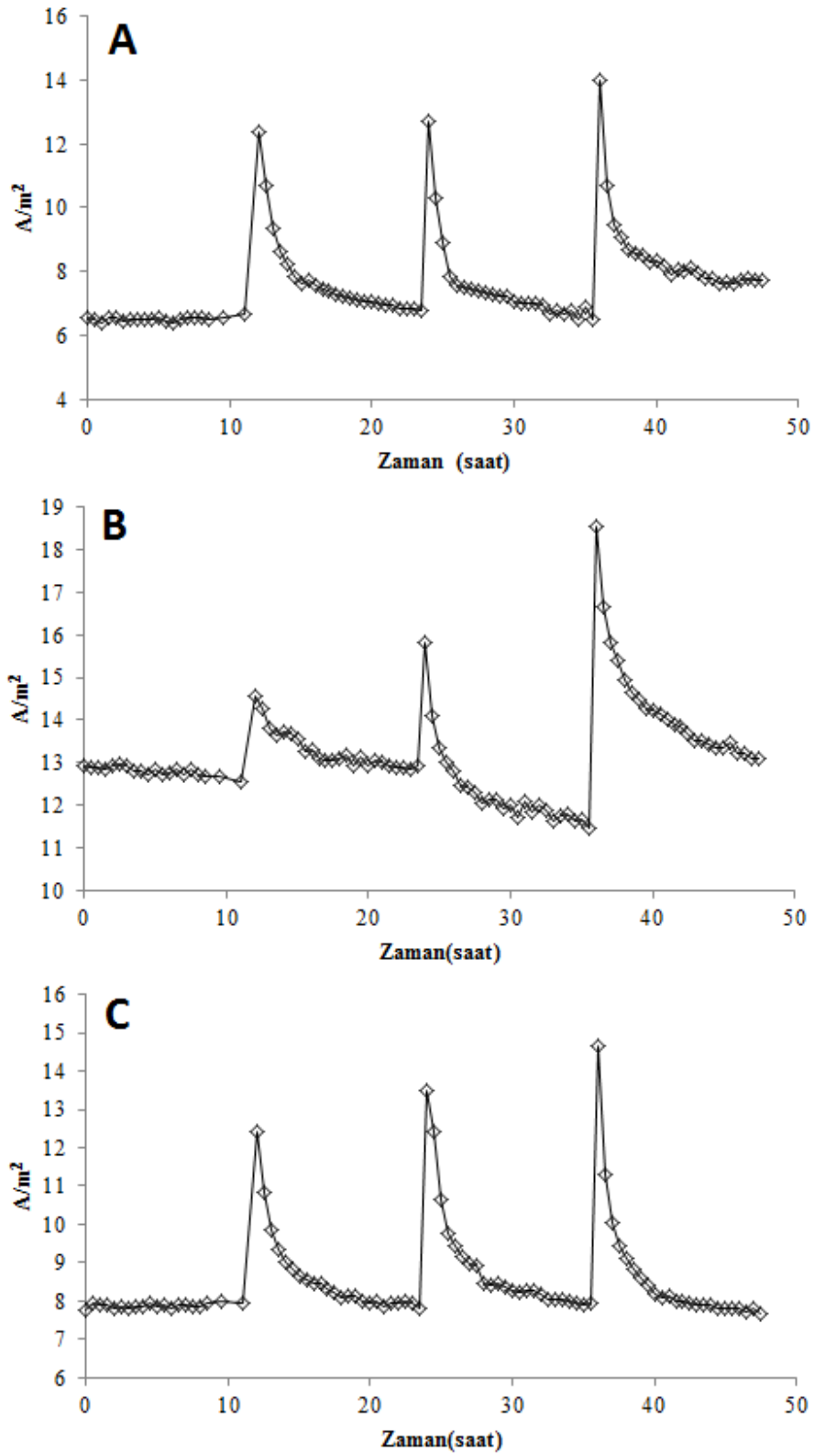
Bu çalışma sürecinde Tablo 3.12’de verilen 5, 10 ve 25 mM konsantrasyonlardaki besin maddesi ihtiva eden sentetik atıksular ile besleme yapılmış ve elektrot yüzey alanına bağlı olarak üretilen akım yoğunluğu (mA/m^2), anot hacmi dikkate alınarak üretilen akım yoğunluğu (mA/m^3) ve anot hacmi dikkate alınarak üretilen güç yoğunluğu (mW/m^3) değerleri tespit edilmiştir. MYH sistemine 12, 24 ve 36. saat sonunda enjeksiyon yapılmıştır.

Sisteme ilk olarak 5 mM konsantrasyonunda besleme sıvısı enjekte edilmiştir. Yapılan enjeksiyon sonucunda mikroorganizmaların organik maddeyi hızlı bir şekilde tüketmesi sonucu MYH sisteminde üretilen akım miktarı ani bir şekilde artarak anot elektrotu yüzey alanı başına üretilen akım miktarı $12,3 \text{ mA}/\text{m}^2$ seviyesine kadar ulaşmıştır. Üretilen akım miktarı bu değere ulaştıktan sonra mikroorganizmaların organik maddeyi tüketmesi sonucu üretilen akım miktarı hızlı bir şekilde azalmış ve üretilen akım miktarı $6,8 \text{ mA}/\text{m}^2$ civarında sabitlenmiştir. 24 saat süre sonunda MYH sistemine ikinci enjeksiyon yapılmış ve MYH’de üretilen akım yoğunluğu miktarı $12,7 \text{ mA}/\text{m}^2$ seviyesine kadar ulaşmıştır. Besleme sonucunda MYH sisteminde üretilen akım miktarı zamanla azalarak $6,5 \text{ mA}/\text{m}^2$ değerinde sabitlenmiş ve 36 saat süre sonun da besleme sıvısı anot bölmesine enjekte edilmiş ve MYH’de üretilen akım miktarı $14 \text{ mA}/\text{m}^2$ değerine kadar ulaşmıştır (Şekil 4.3). Besin maddesi konsantrasyonu 10 mM’e yükseltildiğinde sistemden elde edilen akım yoğunluğu değeri 12; 24 ve 36 saat süre sonunda $14,5$; $15,7$ ve $18,5 \text{ mA}/\text{m}^2$ değerine ulaşmıştır. Sisteme ilave edilen besin maddesi konsantrasyonu 25 mM değerine yükseltildiğinde MYH’ye yapılan besin maddesi enjeksiyonu ile sistemde üretilen akım yoğunluğu miktarı 12; 24 ve 36 saat süre sonunda $12,4$; $13,5$ ve $14,6 \text{ mA}/\text{m}^2$ değerine ulaşmıştır. Farklı besin maddesi konsantrasyonları için MYH’de üretilen akım yoğunluğu miktarları reaktör hacmi dikkate alınarak hesaplandığında 5, 10, ve 25 mM besin maddesi konsantrasyonları için üretilen akım yoğunluğu miktarları 36. saat sonunda sırası ile 93, 123 ve $97 \text{ mA}/\text{m}^3$ olarak elde edilmiştir (Şekil 4.4). MYH sistemine 24. ve 36. saat sonunda yapılan kesikli beslemeler sonucunda üretilen elektrik miktarı 12. saat sonunda yapılan beslemede üretilen elektrik miktarından daha fazla olarak gerçekleşmiştir.

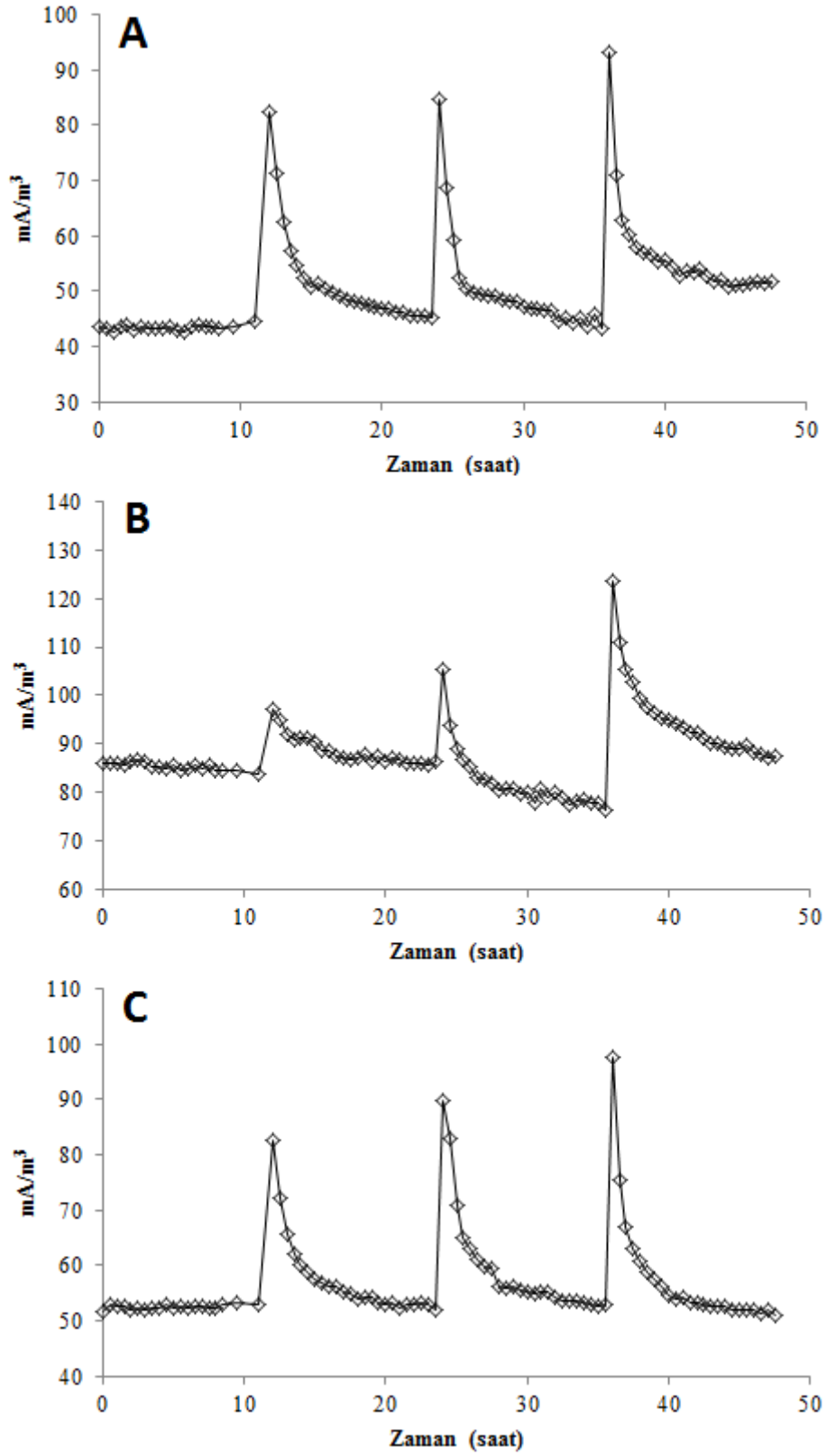
Bunun sebebinin mikroorganizmaların zamanla elektrot yüzeyine tutunmasının artması ve adapte olarak üretilen elektronların elektrota iletiminin artması olarak düşünülmektedir. Ayrıca besin maddesinin tüketimi ile elektrot yüzeyindeki

mikroorganizma miktarının artması ve buna bağı olarak tüketilen besin maddesi miktarının artmasıdır.

Birinci seride MYH sisteminde üretilen güç miktarı 5 ve 10 mM konsantrasyondaki besleme suyu için 2. seride yapılan beslemelerden daha düşük olarak gerçekleşmiştir. Besleme suyu konsantrasyonu 25 mM değerine yükseltildiğinde birinci periyotta MYH’de üretilen maksimum güç miktarı ikinci periyotta üretilen maksimum güç miktarından daha yüksek olarak elde edilmiştir. Birinci periyotta besleme suyunun içeriğinde glikoz miktarının oranının daha yüksek olması ve glikozun laktat ve benzoik asit ile kıyaslandığında mikroorganizmalar tarafından daha kolay parçalanma özelliğinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Yapılan kesikli çalışmalar sonucunda farklı içeriğe sahip sentetik atıksular ile MYH sistemine beslemeler yapılarak elektrik üretiminde etkin olan mikroorganizmaları geliştirmektedir. Ayrıca değişen glikoz miktarının MYH’deki elektrik üretim üzerindeki etkisini görmek amaçlanmıştır. Literatürde sentetik atıksular ile yapılmış birçok çalışma mevcuttur (Aboutalebi vd., 2012; Liu vd., 2010b; Wen vd., 2011). Yapılan çalışmalarda MYH’lerde elektrik üretimini arttırmak amacıyla çeşitli yöntemler kullanılarak üretilen güç miktarları arttırılmıştır. Yapılan çalışmalar kesikli ve sürekli beslemeli olarak gerçekleştirilmiştir (Huang vd. 2008b). Yapılmış diğer çalışmalarda farklı besin maddeleri ile besleme sıvıları hazırlanmış ve bu besin maddeleri ile MYH’deki elektrik üretim potansiyelleri incelenmiştir. Huang ve Logan (2008) tarafından yapılmış bir çalışmada anot bölmesinde grafit fiber fırça, katot bölmesinde ise platin kaplı karbon kumaş kullanılan hava katotlu bir MYH’de ksiloz ile hazırlanmış 20 mM konsantrasyonda besleme suyunu kesikli olarak besleme yapıp $13 \pm 1 \text{ W/m}^3$ ($673 \pm 43 \text{ mW/m}^2$) güç yoğunluğu elde edilmiştir. Diğer bir çalışmada Liu vd. (2005) karbon kâğıdın anot elektrotu, platin kaplı karbon kâğıdın katot elektrotu olarak kullanıldığı tek bölmeli bir MYH’de 800 mg/L asetat içeren sentetik bir su ile besleme yapılmış ve 506 mW/m^2 ($12,7 \text{ mW/L}$) güç üretilmiştir. Ürettikleri bu güç değeri 1000 mg/L bütirat ilavesi ile üretilen güç değerinden %66 daha fazladır (305 mW/m^2 veya $7,6 \text{ mW/L}$).



Şekil 4.3: Glikoz, laktat ve benzoik asit karışımı (toplam konsantrasyon A:5 mM, B:10 mM ve C:25 mM) kullanılarak yapılan kesikli beslemeler ile elde edilen akım yoğunluğu değerleri (mA/m^2)



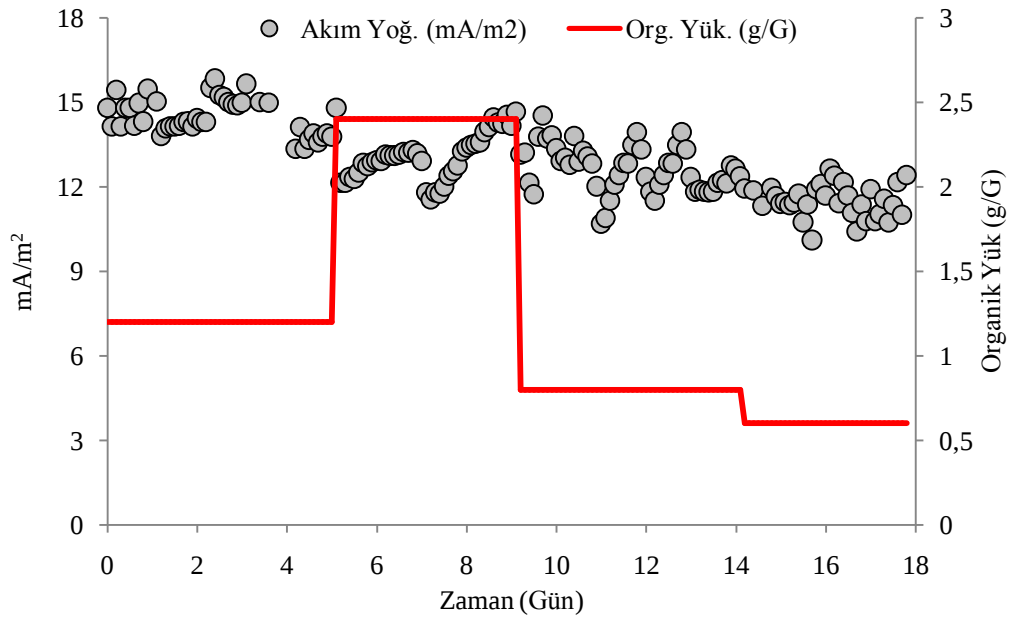
Şekil 4.4: Glikoz, laktat ve benzoik asit karışımı (toplam konsantrasyon A:5, B:10 ve C:25 mM) kullanılarak yapılan kesikli beslemeler ile elde edilen akım yoğunluğu değerleri (mA/m^2)

4.2 Sentetik Atıksular İle Yapılan Sürekli Çalışmalar

Sentetik olarak hazırlanmış atıksular kullanılarak MYH'deki elektrik üretimi çalışmalarında, asetat, glikoz, asetat+laktat+benzoik asit karışımı ve glikoz+laktat+benzoik asit karışımları kullanılmıştır. Reaktörler farklı hidrolik bekletme sürelerinde çalıştırılarak elektrik üretim potansiyelleri araştırılmıştır. Yapılan çalışmada yalnızca glikoz ve yalnızca asetatın kullanıldığı serilerde substrat konsantrasyonu KOİ 2000 mg/L olacak şekilde ayarlanmıştır. Sürekli beslemeli üçlü karışım çalışmalarında substrat konsantrasyonu 50 mM olacak şekilde ayarlanmıştır. MYH'ler farklı hidrolik bekletme sürelerinde çalıştırılmış ve farklı organik yükleme miktarlarında elektrik üretim potansiyelleri araştırılmıştır.

4.2.1 Asetat içeren sentetik atıksu

Asetat kullanılarak yapılan çalışmalarda besleme suyunun KOİ'si 2000 mg/L olacak şekilde ayarlanmıştır. Bu çalışma sürecinde hidrolik bekletme süresi kademeli olarak değiştirilmiş ve MYH'de üretilen voltaj değerleri Şekil 4.5'te verilmiştir.

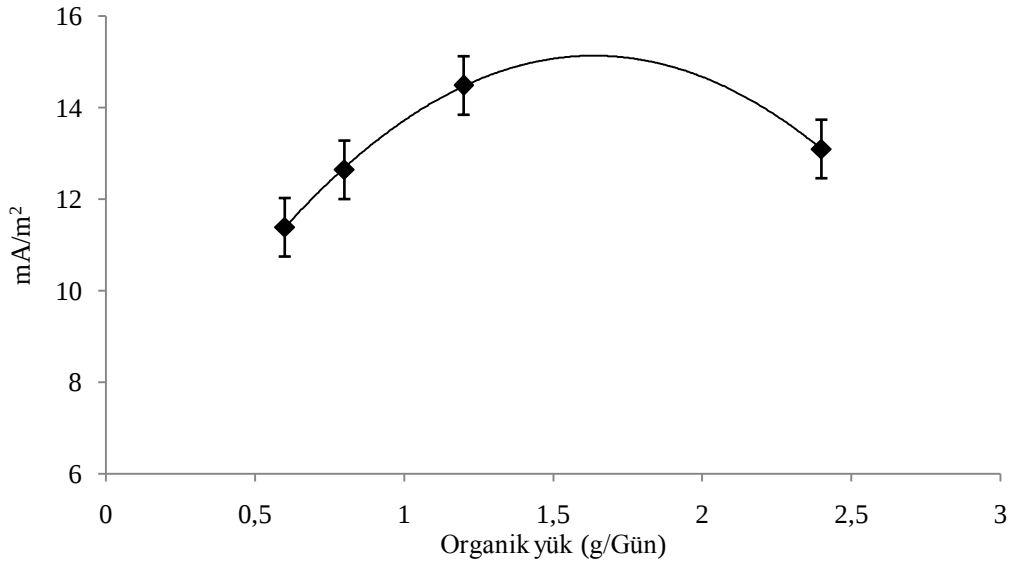


Şekil 4.5: Asetatın besin maddesi olarak kullanıldığı sürekli beslemeli MYH voltaj değerleri

Besin maddesi olarak yalnızca asetatın kullanıldığı bu seride, MYH farklı organik yük değerlerinde işletilmiştir. MYH sistemi besleme yapılan organik yük miktarı sırasıyla 1,2; 2,4; 0,8 ve 0,6 g/gün olacak şekilde işletilmiştir. Birinci işletme sürecinde organik yük miktarı 1,2 g/gün olacak şekilde ayarlanmış ve bu süreçte sistemden ortalama 14,5 mA/m²

akım yoğunluğu elde edilmiştir. Bu işletme sürecinden sonra organik yük miktarı 2,4 g/gün değerine yükseltilmiş ve buna bağlı olarak MYH’de üretilen akım miktarı 13 mA/m² olarak elde edilmiştir. Sisteme verilen organik madde miktarının 0,8 g/gün olduğu süreçte MYH’de üretilen akım miktarı 12,6 mA/m² değerine düşmüştür. Son olarak organik yük miktarı 0,6 g/gün değerine alınmış ve üretilen akım miktarı 11,5 mA/m² olmuştur (Şekil 4.6).

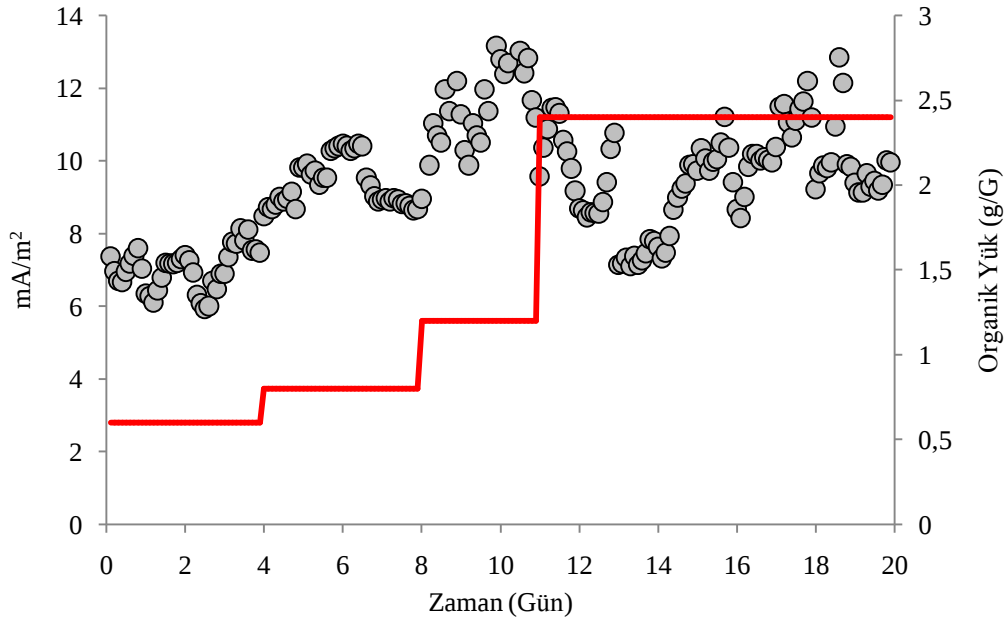
Bu seride MYH’de 1,2 g/gün organik yükleme değerinde maksimum akım elde edilmiştir. Organik yük miktarının 2,4 g/gün olduğu süreçte sisteme aşırı miktarda verilen organik madde miktarında üretilen akım miktarı 13 mA/m² değerine düşmüştür. Organik madde miktarının artışı mikroorganizmalar üzerinde substrat inhibisyonu etkisi oluşturduğu düşünülmektedir (Şekil 4.8).



Şekil 4.6: Asetat'ın substrat olarak kullanıldığı çalışmada farklı HBS'ler için üretilen voltaj değerleri

4.2.2 Glikoz İçeren Sentetik Atıksu

Glikoz kullanılan çalışmada besleme suyunun KOİ'si 2000 mg/L olacak şekilde ayarlanmıştır. Bu çalışma sürecinde HBS kademeli olarak değiştirilmiş ve MYH’de üretilen voltaj değeri Şekil 4.7’de verilmiştir.



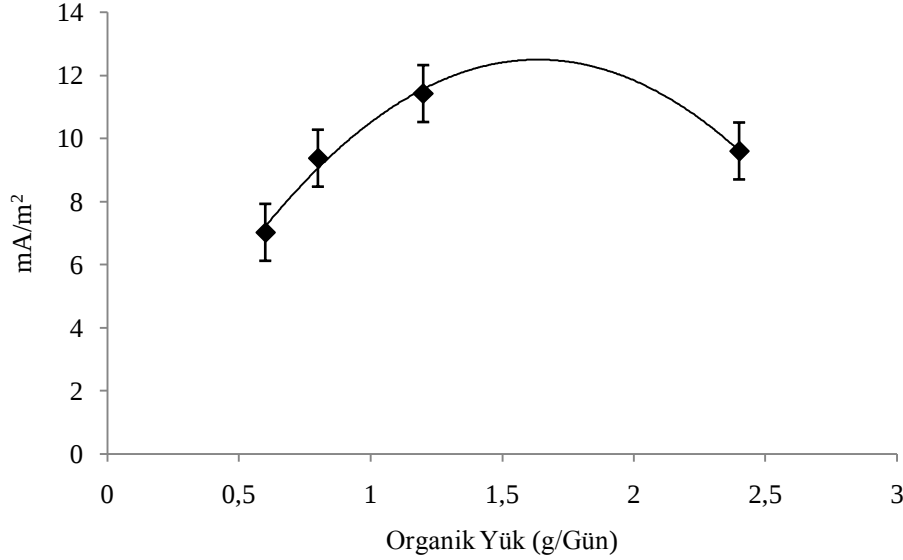
Şekil 4.7: Glikozun besin maddesi olarak kullanıldığı çalışmada üretilen voltajı değerleri

Bu seride sistem kararlı hale geldikten sonra MYH sırasıyla 0,6; 0,8; 1,2 ve 2,4 g/gün'lük organik yük değerinde işletilmiştir. Organik yük miktarının 0,6 g/gün olduğu süreçte MYH'de üretilen akım miktarının ortalama olarak 7,02 mA/m² olduğu belirlenmiştir. Sisteme verilen organik yük miktarı 0,8 g/gün değerine yükseltilmiş ve buna bağlı olarak üretilen akım miktarı 9,37 mA/m² değerine yükselmiştir. Organik yük miktarının 1,2 g/gün olduğu süreçte MYH'de üretilen akım miktarı 11,4 mA/m² olarak elde edilmiştir. Son işletme periyodunda sisteme verilen organik madde miktarı 2,4 g/gün olduğu süreçte sistemde üretilen akım miktarı 9,63 mA/m² değerine yükselmiştir. Sisteme verilen organik madde miktarının 2,4 değerine yükseltilmesi ile üretilen akım miktarının düşmesi mikroorganizmalar üzerinde substrat inhibisyonunun olduğunu göstermektedir (Şekil 4.8).

Şekil 4.10'da MYH işletiminde farklı organik yük miktarında kararlı halde üretilen akım miktarının ortalama değerleri verilmiştir. Sisteme verilen organik yükün artışı ile MYH'den üretilen akım miktarı artmıştır.

Elde edilen sonuçlardan asetat ile beslenen MYH'de üretilen maksimum akım miktarı 1,2 g/gün organik yükleme değeri için 14,5 mA/m² olarak elde edilmiştir. Glikoz ile beslenen MYH için üretilen maksimum akım miktarı 1,2 g/gün olan organik yük miktarı için 11,4 mA/m² olarak elde edilmiştir. Asetat ile elde edilen akım miktarı glikoz

ile elde edilen akım miktarından daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Literatürde benzer sonuçlar elde edilmiştir (Liu vd., 2005; Lee vd., 2008).

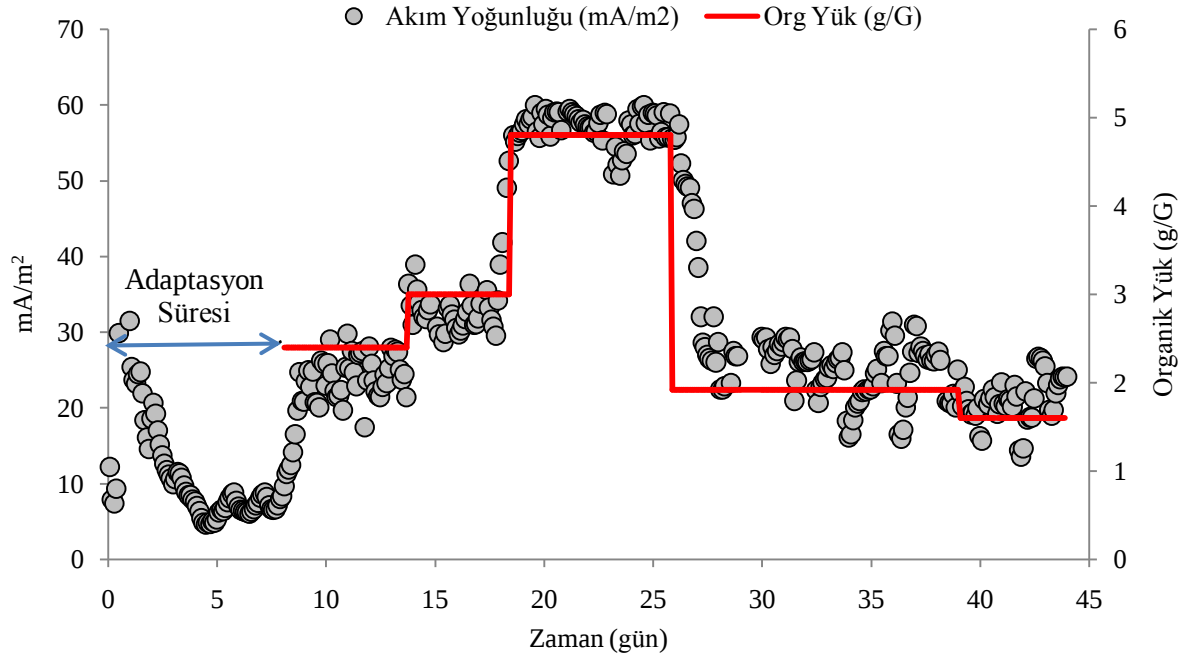


Şekil 4.8: Glikozun besin maddesi olarak kullanıldığı çalışmada farklı HBS değerlerine karşılık üretilen voltajı değerleri

4.2.3 Glikoz+ laktat+benzoik asit ile Yapılan Sürekli Beslemeli Çalışmalar

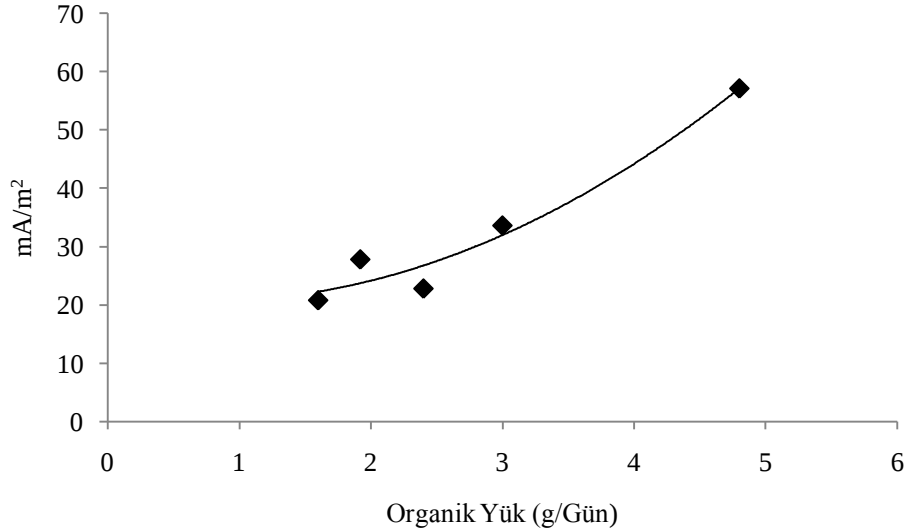
Bu seride besleme suyunun toplam substrat konsantrasyonu 50 mM olacak şekilde glikoz+laktat+benzoik asit karışımı sisteme besleme yapılmıştır. Sistemin hidrolik bekletme süresi zamana bağlı olarak değiştirilmiştir. Bu sayede MYH'ye farklı organik yükleme değerlerinde besleme yapılmıştır.

Sistem kararlı hale geldikten sonra MYH'ye verilen organik yük değerleri sırasıyla 2,4; 3; 4,8; 1,9; 1,6 g/gün olacak şekilde işletilmiştir. MYH sistemine aşılama yapıldıktan sonra sistemden sabit akım elde edilinceye kadar sistemin adaptasyonu için beklenilmiştir. Sistemin adaptasyonu sağlandıktan sonra 2,4 g/gün lük organik yükleme değeri için MYH'de elde edilen akım yoğunluğu ortalama 22,8 mA/m² olduğu tespit edilmiştir. Sisteme verilen organik yük değeri 3 g/gün değerine çıkarıldığında MYH'de üretilen akım yoğunluğu 33,6 g/gün değerine ulaşmıştır. Sisteme verilen organik yük 4,8 g/gün değerine çıkarıldığında sistemde üretilen akım yoğunluğu 57,1 mA/m² değerine yükselmiştir. Bu periyottan sonra sisteme verilen organik yük miktarı 1,92 g/gün değerine düşürülmüştür. Bu organik yük miktarında MYH'de üretilen akım miktarı ortalama 22,8 mA/m² olduğu belirlenmiştir. Son işletim periyodunda organik yük miktarı 1,6 g/gün değerine düşürülmüş ve üretilen akım miktarının 20,8 mA/m² olduğu tespit edilmiştir (Şekil 4.9).



Şekil 4.9: Glikoz+laktat+benzoik asit kullanılarak MYH’de üretilen voltaj değerleri

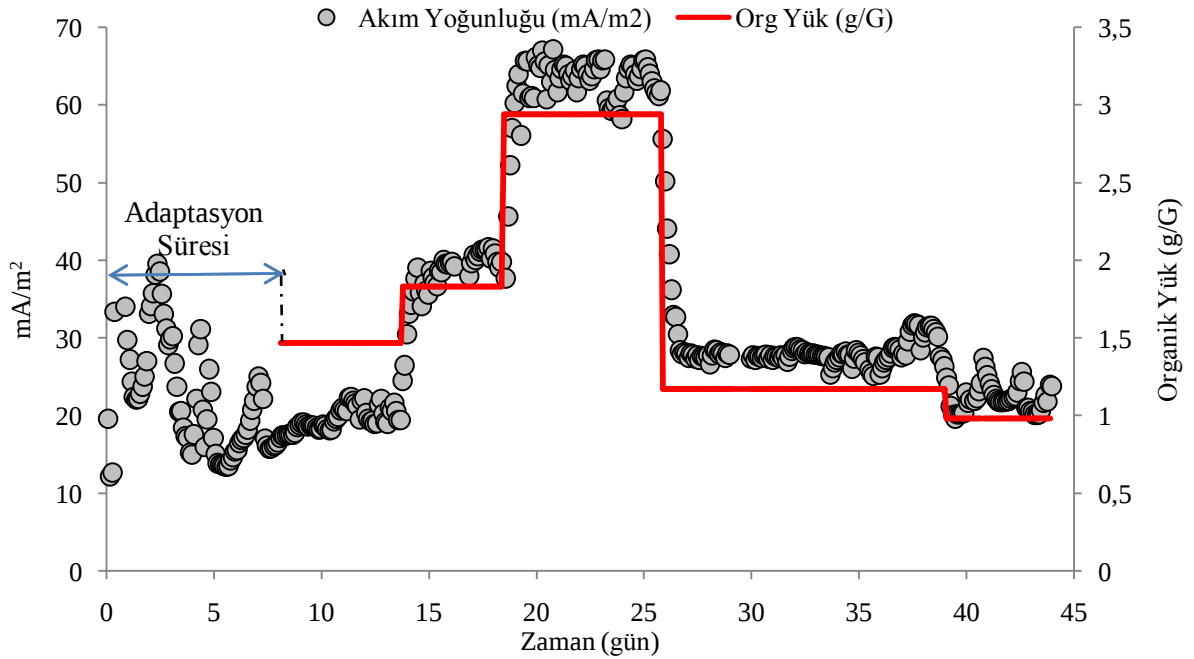
Şekil 4.10’da MYH işletiminde sisteme verilen farklı organik yükler için MYH’de üretilen akım yoğunluğu miktarları verilmiştir. Sisteme verilen organik yük miktarının artışı ile MYH’de üretilen akım miktarının arttığı görülmüştür.



Şekil 4.10: Glikoz+laktat+benzoik asit ile yapılan beslemede farklı HBS değerleri için üretilen voltajı değerleri

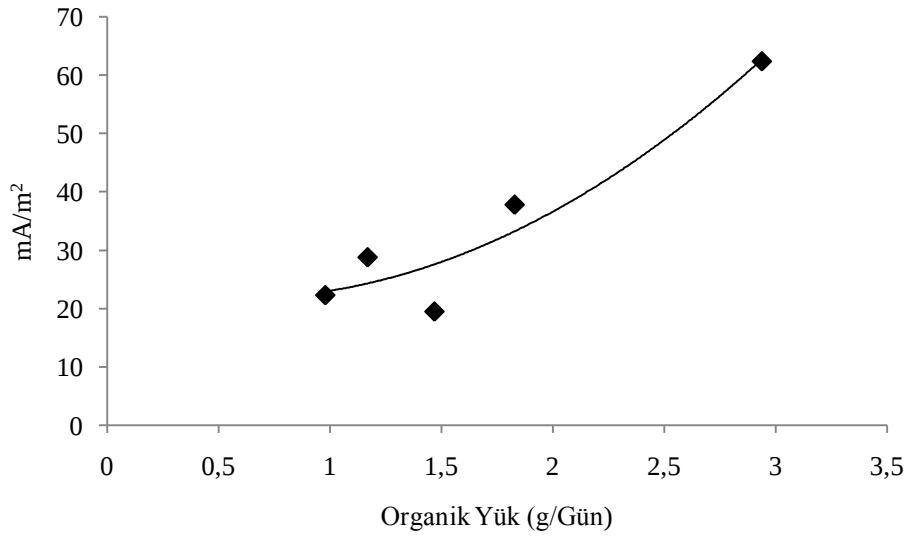
4.2.4 Asetat+laktat+benzoik asit ve ile Yapılan Sürekli Beslemeli Çalışmalar

Asetat+laktat+benzoik asit ile yapılan çalışmada MYH sistemine verilen organik yük ile sistemde üretilen akım miktarı kararlı hale geldikten sonra MYH sırasıyla organik yük miktarı 1,47; 1,83; 2,94; 1,17 ve 0,98 g/gün olacak şekilde işletilmiştir. Sisteme verilen organik yük miktarı 1,47 g/gün olduğu ilk periyotta MYH’de üretilen akım miktarı 19,4 mA/m² olarak elde edilmiştir. Organik yük miktarı 1,83 g/gün değerine yükseltildiğinde üretilen akım miktarının ortalama olarak 37,8 mA/m² değerinde olduğu tespit edilmiştir. Bu işlemden sonra organik yük miktarı 2,94 g/gün değerine artırılmış ve bu organik yük değerinde MYH’de üretilen akım miktarı 62,4 mA/m² olduğu belirlenmiştir. Bu periyottan sonra sisteme verilen organik yük miktarı 1,17 g/gün değerine düşürülmüş ve MYH’de üretilen akım miktarı 28,7 mA/m² olarak elde edilmiştir. Son periyotta ise sisteme 0,98 g/gün değerinde organik yük verilmiş ve MYH’den elde edilen elektrik üretimi 22,3 mA/m² olarak gerçekleşmiştir (Şekil 4.11).



Şekil 4.11: Asetat+laktat+benzoik asit ile yapılan beslemede MYH’de üretilen voltaj değerleri

Şekil 4.12’de MYH işletiminde farklı organik yük değerleri için MYH’de üretilen akım yoğunluğu değerleri verilmiştir. Sisteme verilen organik yük artışı ile MYH’de üretilen akım miktarı artmıştır.



Şekil 4.12: Asetat+laktat+benzoik asit ile yapılan beslemede HBS ile üretilen pil voltaj değerleri

Asetat kullanılarak hazırlanan besleme suyunda üretilen akım miktarı 2,94 g/gün'lük organik yükleme değeri için MYH'de üretilen akım miktarı 62,4 mA/m² olarak elde edilirken glikoz ile hazırlanan besleme suyunda 4,8 g/gün'lük organik yükleme değeri için üretilen akım miktarı 57,1 mA/m² olarak elde edilmiştir. Bu sonuçlar dikkate alındığında MYH'lerde asetat kullanılarak daha fazla elektrik üretim elde edilebileceği görülmektedir. Ayrıca literatürde yapılan çalışmalarda asetat ile beslenen MYH'lerde glikoz ile besleme yapılan MYH'lerden daha fazla elektrik ürettiği belirtilmiştir (Yuan vd., 2011; Zhang vd. 2006). Elde edilen sonuca benzer olarak literatürde Yuan vd. (2011) tek bölmeli bir MYH'de anot elektrotu olarak karbon kumaş kullanmış ve 1000 mg/L asetat ve 1000 mg/L glikoz ile kesikli beslemeler yapılmış ve asetat beslemesi ile 10841 glikoz beslemesi ile 763,5 mW m⁻² güç üretmişlerdir. İki bölmeli bir MYH'de asetat, glikoz ve ksilozdan elektrik üretiminin araştırıldığı bir başka çalışmada Thygesen vd. (2009) tarafından gerçekleştirilmiştir. Çalışmada mediyatör olarak hümitik asit kullanılmıştır. Mediyatör kullanılmaksızın asetat ile maksimum voltaj (570 mV, 1000 Ω) ve maksimum güç yoğunluğu (123mW/m²) elde edilmiştir. Glikoz için güç yoğunluğu ise 28 mW/m² ve voltaj 380 mV, ksiloz için güç yoğunluğu 32 mW/m² ve voltaj 414 mV olarak kaydedilmiştir. Mediyatör olarak hümitik asit kullanılması (2 g/L) güç yoğunluğunu glikoz için %84, ksiloz için %30 artırmıştır.

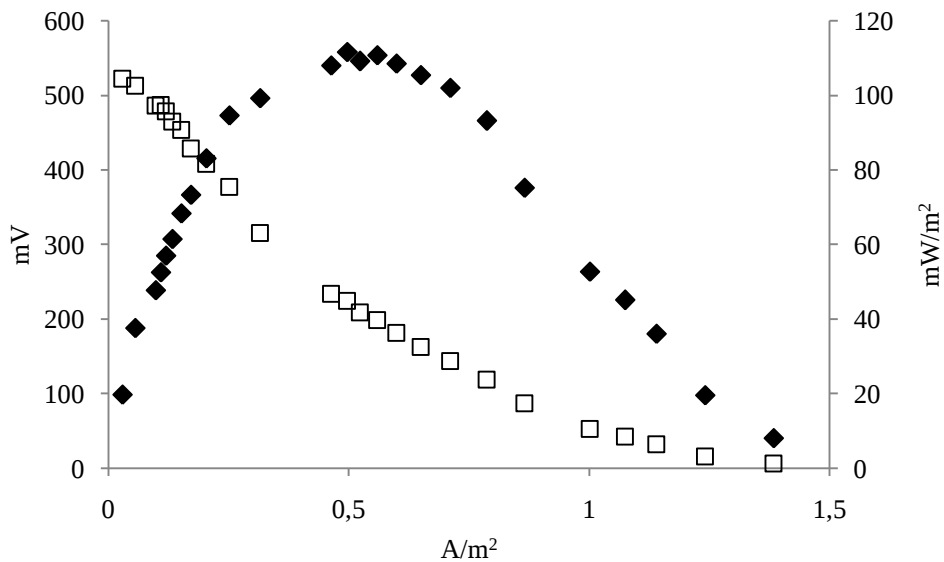
4.3 Farklı Medyatörlerin Etkisi

Medyatörler ile yapılan çalışmalarda farklı konsantrasyonlarda üç farklı medyatör MYH’de kullanılmıştır. Bu çalışmada metilen mavisi, nötral kırmızı ve 2-hydroxy-1,4-naphthoquinone (HNQ) kimyasalları medyatör olarak kullanılmıştır. Çalışmada kimyasalların medyatör etkisini belirlemek amacıyla MYH’ler ilk olarak medyatörsüz olarak işletilmiştir. Daha sonra 50, 10, 200, 300 ve 400 μM konsantrasyonda kimyasallar ilave edilerek MYH’deki performans artışı incelenmiştir. Ayrıca her konsantrasyon için MYH’lerin iç dirençleri tespit edilmiştir. Çalışmada anot elektrotu olarak grafit, bakır kumaş ve Ti-TiO₂ elektrotlar kullanılmıştır. Katot elektrotu olarak bütün MYH’lerde platin kaplamalı titanyum elektrot kullanılmıştır.

4.3.1 Bakır Kumaş Elektrodunda Medyatörlü Çalışmalar

4.3.1.1 Metilen Mavisi Medyatörü ile Yapılan Çalışmalar

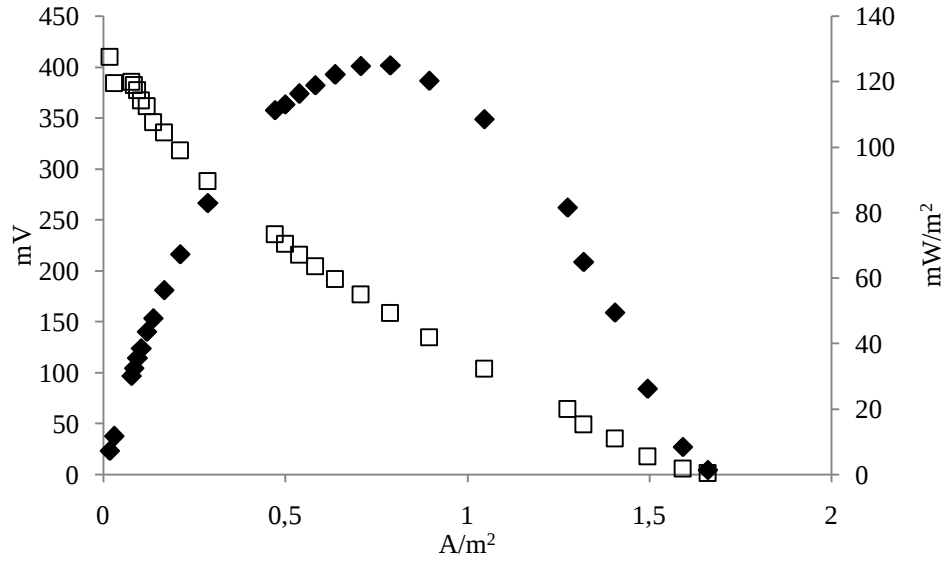
Bakır kumaş elektrotun kullanıldığı MYH’de medyatörsüz işletim sürecinde elde edilen güç eğrisi Şekil 4.13’de verilmiştir. Elde edilen güç eğrisi dikkate alındığında, MYH’de üretilen maksimum güç miktarı 111 mW/m^2 ’dir.



Şekil 4.13: MYH'nin medyatörsüz olarak işletimi ile elde edilen güç eğrisi (□=Voltaj, mV; ◆=Güç Yoğ. mW/m^2)

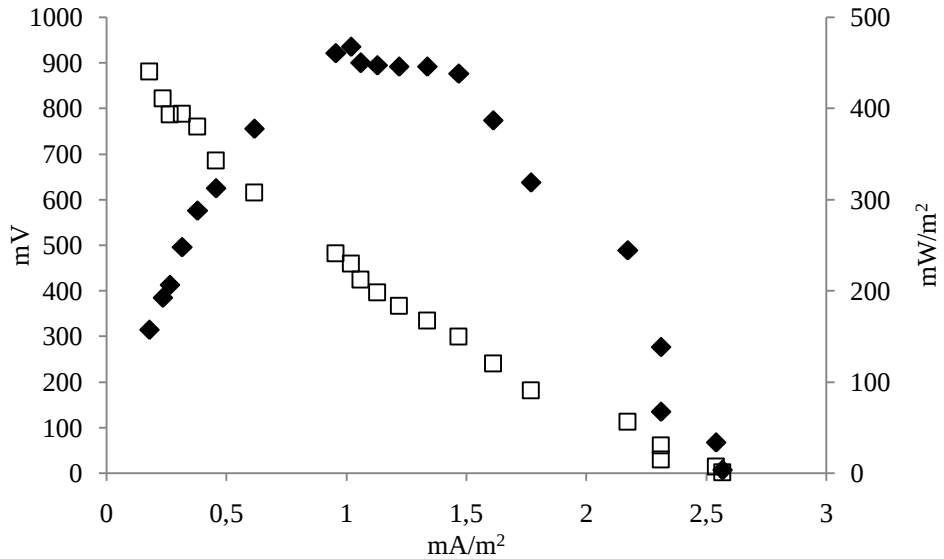
MYH 50 μM metilen mavisi ilavesi ile işletildiği süreçte MYH'den elde edilen maksimum güç miktarı 124 mW/m^2 'dir (Şekil 4.14). MYH sistemine ilave edilen 50 μM

metilen mavisi ilavesi ile MYH’de üretilen güç miktarı medyatörsüz işletim süreci ile kıyaslandığında 1,12 kat artmıştır.



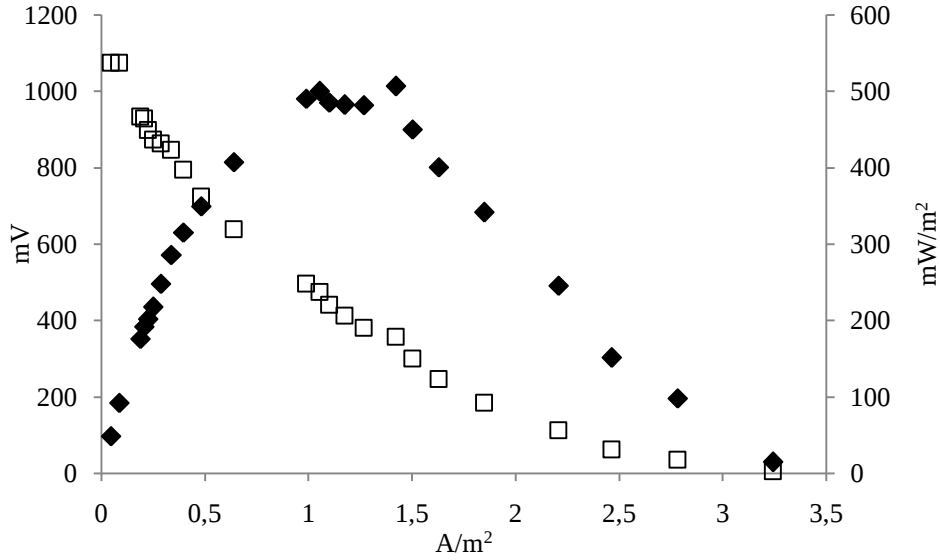
Şekil 4.14: MYH'nin 50 µM metilen mavisi ilavesi ile işletimi sonucu elde edilen güç eğrisi (□=Voltaj, mV; ◆=Güç Yoğ. mW/m²)

MYH 100 µM metilen mavisi ilavesi ile işletildiği süreçte MYH’de üretilen maksimum güç miktarı 460 mW/m²'dir (Şekil 4.15). MYH sistemine ilave edilen 100 µM metilen mavisi ilavesi ile MYH’de üretilen güç miktarı medyatörsüz işletim süreci ile kıyaslandığında 4,2 kat artış olmuştur.



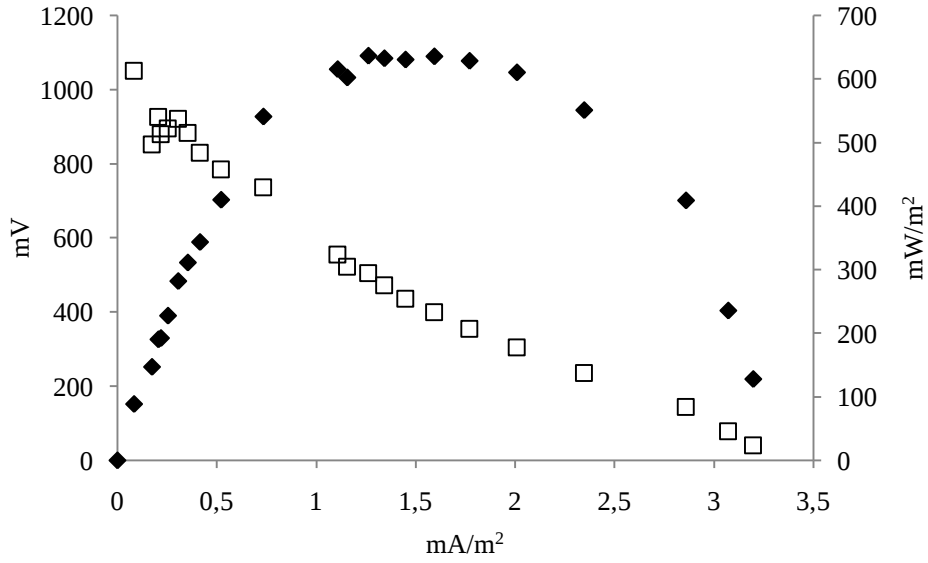
Şekil 4.15: MYH'nin 100 µM metilen mavisi ilavesi ile işletimi sonucu elde edilen güç eğrisi (□=Voltaj, mV; ◆=Güç Yoğ. mW/m²)

MYH 200 μM metilen mavisi ilavesi ile işletildiği süreçte MYH'den elde edilen maksimum güç miktarı 506 mW/m^2 'dir (Şekil 4.16). MYH sistemine ilave edilen 200 μM metilen mavisi ilavesi ile MYH'de üretilen güç miktarı medyatörsüz işletim süreci ile kıyaslandığında 4,5 kat artış olmuştur.



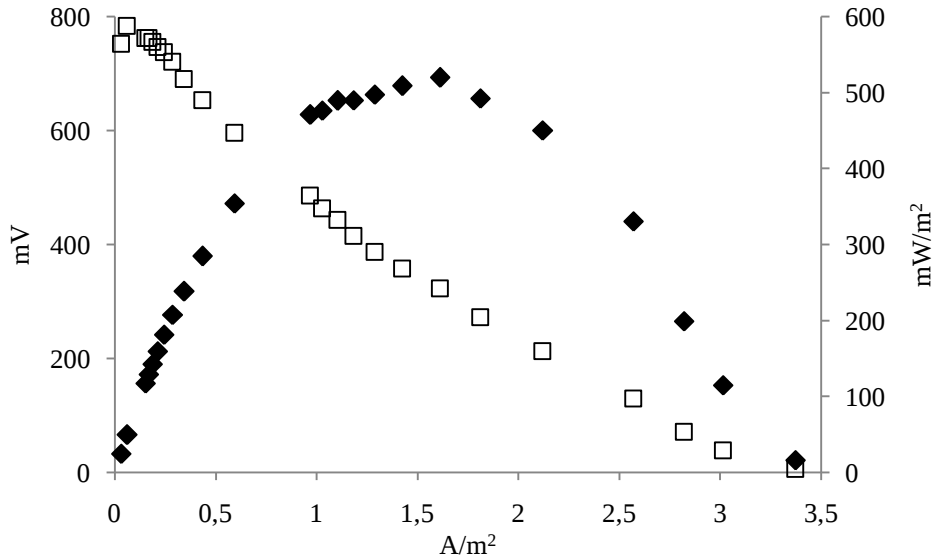
Şekil 4.16: MYH'in 200 μM metilen mavisi ilavesi ile işletilmesi sonucu elde edilen güç eğrisi (□=Voltaj, mV; ◆=Güç Yoğ. mW/m^2).

MYH 300 μM metilen mavisi ilavesi ile işletildiği süreçte MYH'den elde edilen maksimum güç miktarı 636 mW/m^2 'dir (Şekil 4.17). MYH sistemine ilave edilen 300 μM metilen mavisi ilavesi ile MYH'de üretilen güç miktarı medyatörsüz işletim süreci ile kıyaslandığında 5,7 kat artış olmuştur.



Şekil 4.17: MYH'nin 300 µM metilen mavisi ilavesi ile işletimi sonucu elde edilen güç eğrisi (□=Voltaj, mV; ◆=Güç Yoğ. mW/m²).

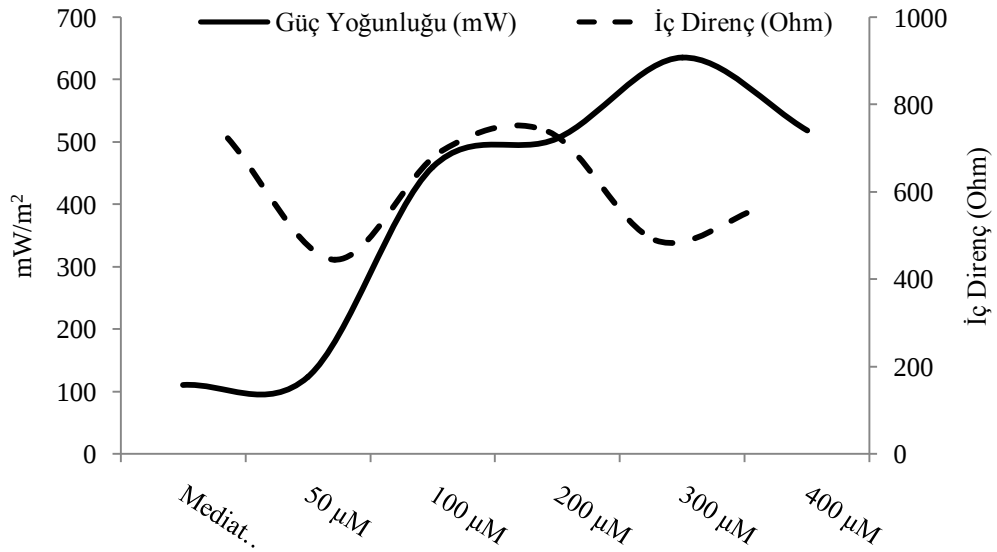
MYH 400 µM metilen mavisi ilavesi ile işletildiği süreçte MYH'de üretilen maksimum güç miktarı 519 mW/m²'dir (Şekil 4.18). MYH sistemine ilave edilen 400 µM metilen mavisi ilavesi ile MYH'de üretilen güç miktarı medyatörsüz işletim süreci ile kıyaslandığında 4,6 kat artış meydana gelmiştir.



Şekil 4.18: MYH'nin 400 µM metilen mavisi ilavesi ile işletilmesi sonucu elde edilen güç eğrisi (□=Voltaj, mV; ◆=Güç Yoğ. mW/m²).

Şekil 4.19'da çift bölmeli MYH'ye farklı konsantrasyonlarda medyatör ilave edilerek üretilen güç yoğunluğu değerleri ve her bir periyotta meydana gelen iç direnç değerleri verilmiştir. MYH medyatörsüz olarak işletildiği süreçte üretilen maksimum güç değeri 111

mW/m^2 'dir. MYH'de üretilen en yüksek güç miktarı $300 \mu\text{M}$ metilen mavisi ilavesi ile 636 mW/m^2 olduğu tespit edilmiştir. Bu sayede MYH'ye $300 \mu\text{M}$ metilen mavisi ilavesi ile medyatörsüz işleme göre 5,7 kat daha fazla güç üretimi olduğu görülmüştür. Literatürde de elde ettiğimiz sonuçlara benzer sonuçlar alınmıştır. Rahimnejad ve arkadaşları (2011) çift bölmeli bir MYH'de performans artışı için metilen mavisini elektron medyatörü olarak kullanmışlardır. MYH'de en yüksek performans artışı için optimum metilen mavisi konsantrasyonunu belirlemek amacıyla MYH'deki konsantrasyonu 50, 100, 200, 300 ve $400 \mu\text{M}$ olacak şekilde metilen mavisini MYH sistemine ilave etmişlerdir. MYH'de $12,3 \text{ mW}$ güç üretimi ile maksimum güç üretiminin $300 \mu\text{M}$ metilen mavisi konsantrasyonunda olduğunu tespit etmişlerdir. Bakır kumaş elektrotun kullanıldığı MYH'de metilen mavisi medyatörü kullanılarak elde edilen güç artışı çalışmaları sonucunda literatürdeki sonuca paralel olarak $300 \mu\text{M}$ metilen mavisi konsantrasyonunun güç artışı için optimum değer olduğu tespit edilmiştir.

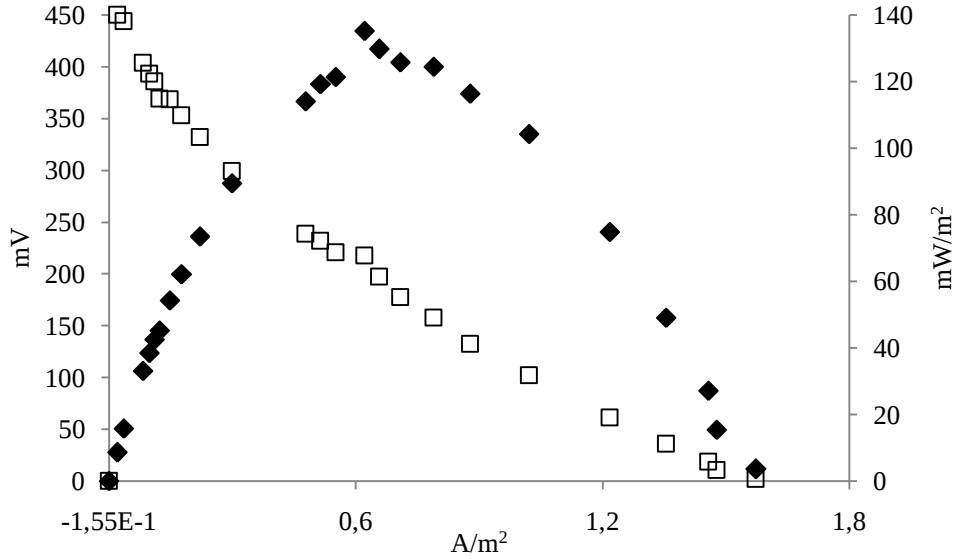


Şekil 4.19: Farklı metilen mavisi konsantrasyonları için elde edilen güç yoğunluğu ve iç direnç değerleri

MYH iç direnci medyatörsüz olarak işletim yapılırken 723Ω olmuştur. $50 \mu\text{M}$ metilen mavisi ilavesi ile iç direnç hızlı bir şekilde düşmüş ve 445Ω olmuştur. $100 \mu\text{M}$ metilen mavisi ilavesi ile iç direnç tekrar yükselmiş ve 694Ω değerine yükseldiği tespit edilmiştir. $200 \mu\text{M}$ medyatör ilavesi ile MYH iç direnci 738Ω değerine yükselmiştir. MYH'ye yapılan mediyatör ilavesi 300 ve $400 \mu\text{M}$ olduğu süreçte MYH iç direnci 490 ve 567Ω olduğu tespit edilmiştir.

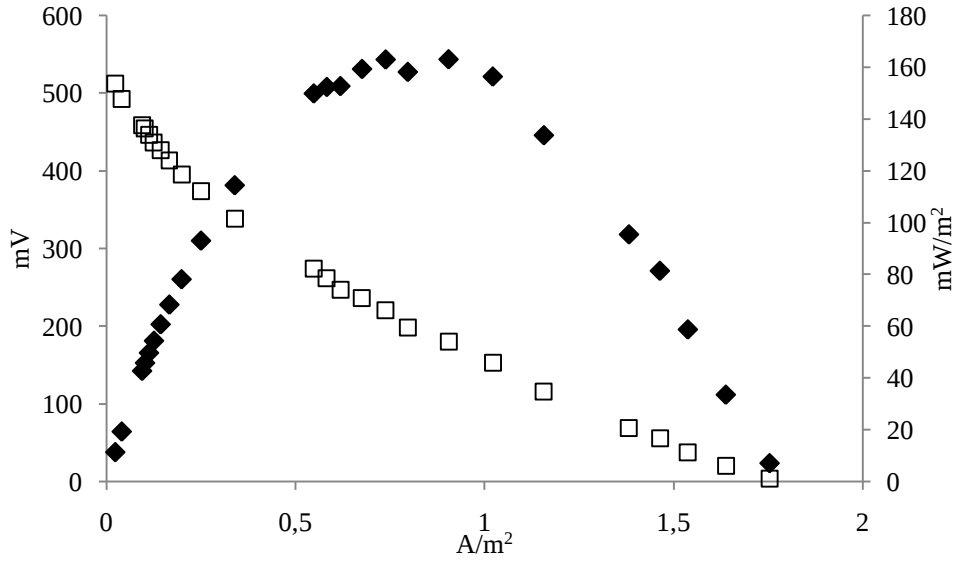
4.3.1.2 Nötral Kırmızı Medyatörü

Nötral kırmızı medyatörü ile yapılan çalışmada MYH'nin medyatörsüz olarak işletildiği süreçte elde edilen güç eğrisi dikkate alındığında, MYH'de üretilen maksimum güç miktarı 135 mW/m^2 'dir (Şekil 4.20).



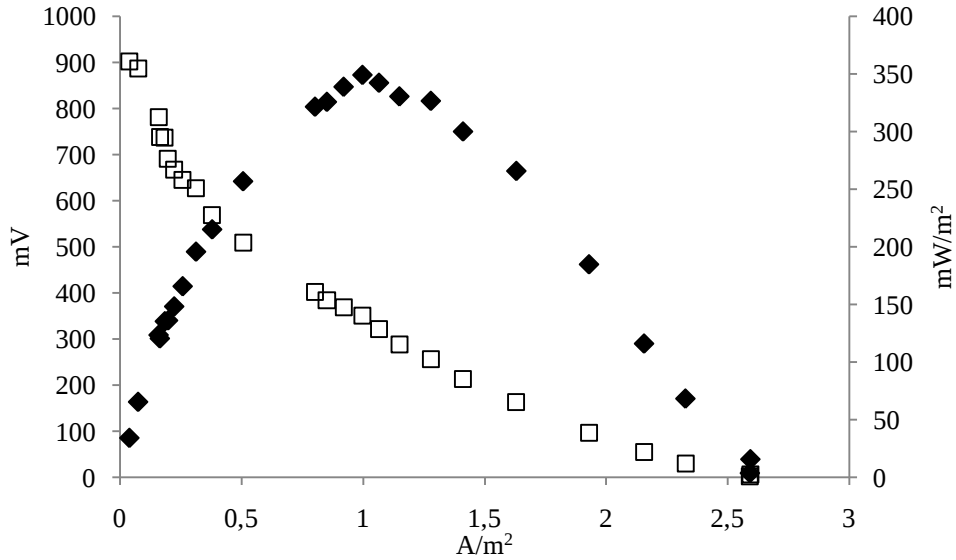
Şekil 4.20: MYH'nin medyatörsüz olarak işletimi sonucu elde edilen güç eğrisi (□=Voltaj, mV; ◆=Güç Yoğ. mW/m^2).

MYH $50 \mu\text{M}$ nötral kırmızı ilavesi ile işletildiği süreçte MYH'de üretilen maksimum güç miktarı 163 mW/m^2 'dir (Şekil 4.21). MYH sistemine ilave edilen $50 \mu\text{M}$ nötral kırmızı medyatörü ilavesi ile MYH'de üretilen güç miktarı medyatörsüz işletim süreci ile kıyaslandığında 1,2 kat artış meydana gelmiştir.



Şekil 4.21: MYH'nin 50 µM nötral kırmızısı ilavesi ile işletimi sonucu elde edilen güç eğrisi (□=Voltaj, mV; ◆=Güç Yoğ. mW/m²).

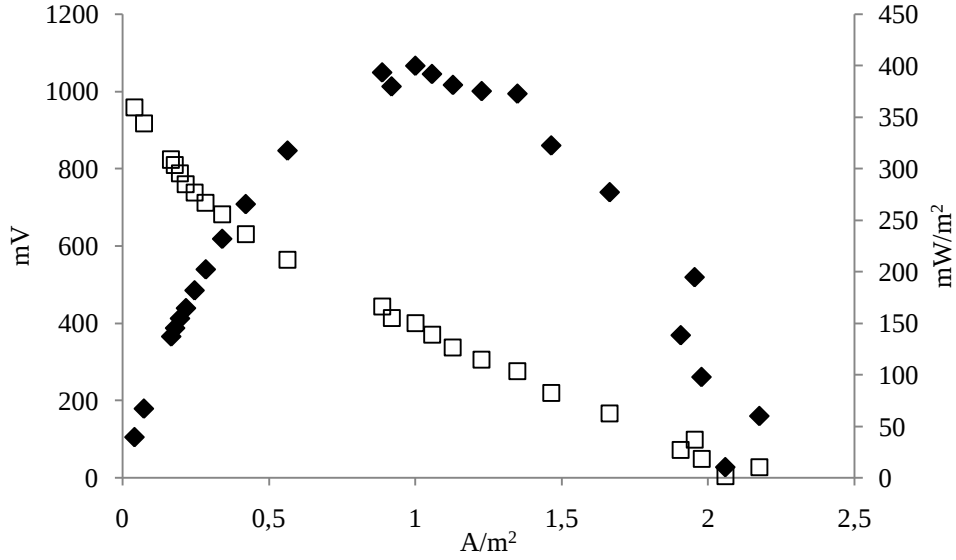
MYH 100 µM nötral kırmızı ilavesi ile işletildiği süreçte MYH'de üretilen maksimum güç miktarı 349 mW/m² olmuştur (Şekil 4.22). MYH sistemine ilave edilen 100 µM nötral kırmızı medyatörü ilavesi ile MYH'de üretilen güç miktarı medyatörsüz işletim süreci ile kıyaslandığında 2,6 kat artış meydana gelmiştir.



Şekil 4.22: MYH'nin 100 µM nötral kırmızısı ilavesi ile işletimi sonucu elde edilen güç eğrisi (□=Voltaj, mV; ◆=Güç Yoğ. mW/m²).

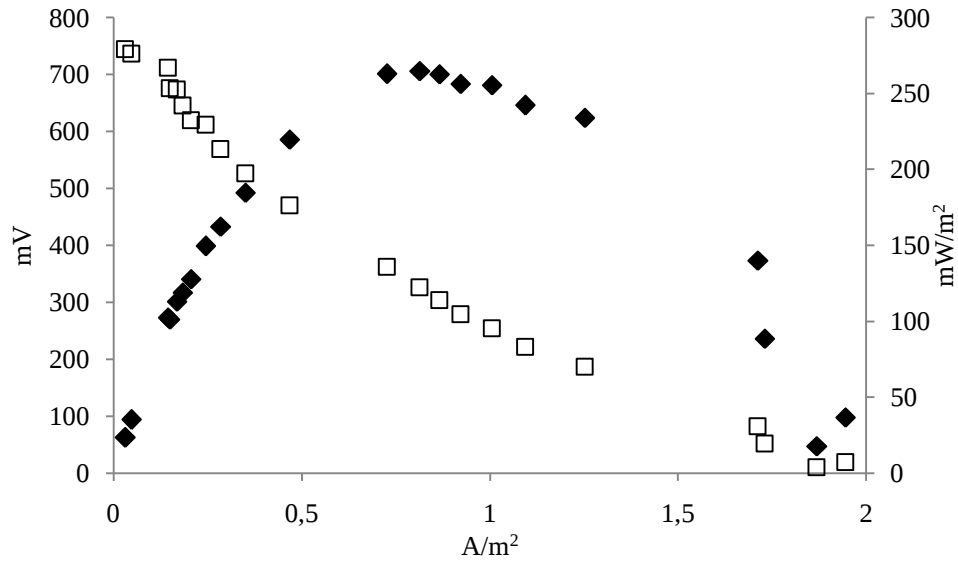
MYH 200 µM nötral kırmızı ilavesi ile işletildiği süreçte MYH'de üretilen maksimum güç miktarı 399 mW/m²'dir (Şekil 4.23). MYH sistemine ilave edilen 200 µM

nötral kırmızı medyatörü ilavesi ile MYH’de üretilen güç miktarı medyatörsüz işletim süreci ile kıyaslandığında 2,9 kat artış meydana gelmiştir.



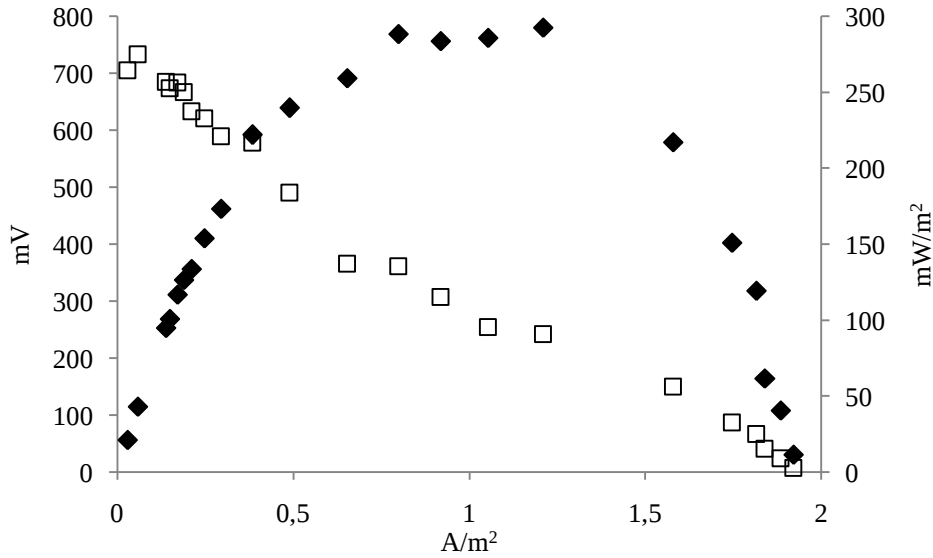
Şekil 4.23: MYH'nin 200 µM nötral kırmızısı ilavesi ile işletimi sonucu elde edilen güç eğrisi (□=Voltaj, mV; ◆=Güç Yoğ. mW/m²).

MYH 300 µM nötral kırmızı ilavesi ile işletildiği süreçte MYH’de üretilen maksimum güç miktarı 264 mW/m²’dir (Şekil 4.24). MYH sistemine ilave edilen 300 µM nötral kırmızı medyatörü ilavesi ile MYH’de üretilen güç miktarı medyatörsüz işletim süreci ile kıyaslandığında 1,95 kat artış meydana gelmiştir.



Şekil 4.24: MYH'nin 300 µM nötral kırmızısı ilavesi ile işletimi sonucu elde edilen güç eğrisi (□=Voltaj, mV; ◆=Güç Yoğ. mW/m²).

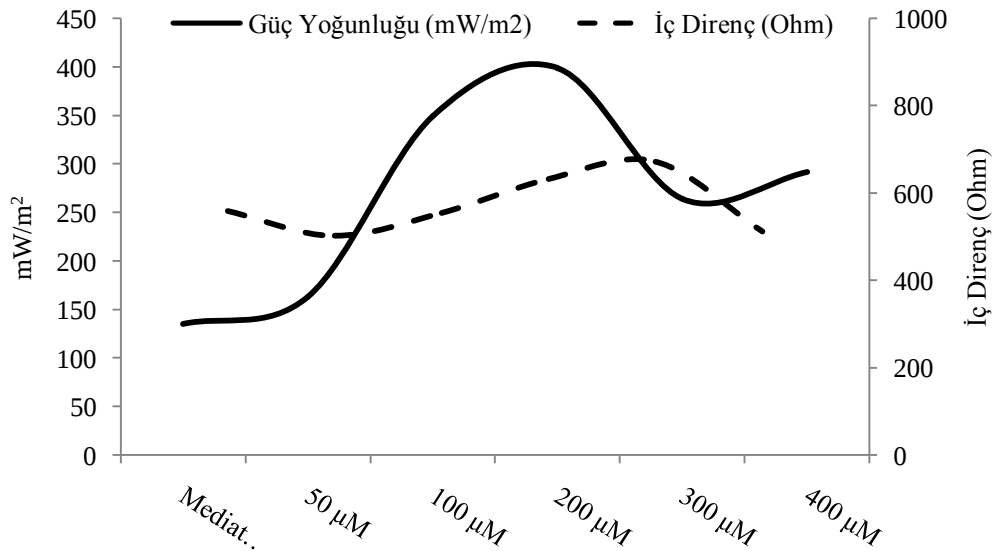
MYH 400 µM nötral kırmızı ilavesi ile işletildiği süreçte MYH'de üretilen maksimum güç miktarı 292 mW/m²'dir (Şekil 4.25). MYH sistemine ilave edilen 400 µM nötral kırmızı medyatörü ilavesi ile MYH'de üretilen güç miktarı medyatörsüz işletim süreci ile kıyaslandığında 2,2 kat artış meydana gelmiştir.



Şekil 4.25: MYH'nin 400 µM nötral kırmızısı ilavesi ile işletimi sonucu elde edilen güç eğrisi (□=Voltaj, mV; ◆=Güç Yoğ. mW/m²).

Şekil 4.26'da MYH sisteminin değişen nötral kırmızı (NK) konsantrasyonları ile MYH'nin iç direncinin değişimini göstermektedir. MYH medyatörsüz olarak işletilirken

elde edilen maksimum güç yoğunluğu 135 mW/m^2 'dir. Sistem $200 \mu\text{M}$ NK ilavesi ile işletilirken üretilen maksimum güç yoğunluğunun 399 mW/m^2 olduğu tespit edilmiştir. Sisteme $200 \mu\text{M}$ NK ilavesi ile üretilen maksimum güç yoğunluğu değeri 3 kat artmıştır. MYH sisteminde anot elektrotu olarak bakır kumaş elektrotun kullanıldığı çalışmada güç artışı için optimum konsantrasyonun $200 \mu\text{M}$ olduğu tespit edilmiştir. Park vd. (2000) yaptığı çalışmada normal grafit elektrot kullanarak 21 mM asetat tüketimi ile $1,41 \mu\text{A/cm}^2$ elektrik üretirken nötral kırmızı medyatörü ile modifiye edilmiş grafit elektrot ile 39 mM asetat tüketilerek $3,1 \mu\text{A/cm}^2$ elektrik üretmişlerdir. Nötral kırmızı medyatörü kullanılarak 2,2 kat elektrik üretimi artışı sağlanmıştır.

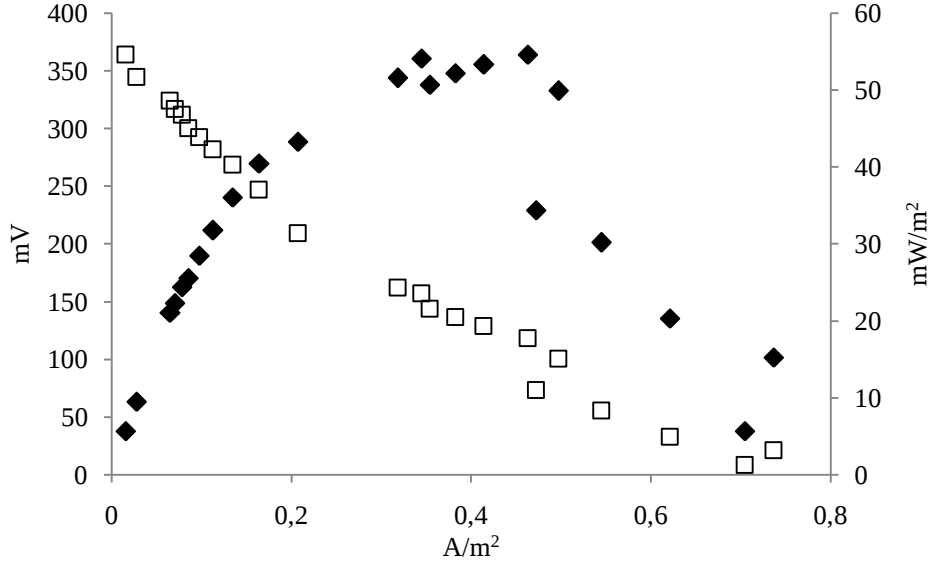


Şekil 4.26: Farklı nötral kırmızı konsantrasyonları için elde edilen güç yoğunluğu-iç direnç değerleri

Sistem medyatörsüz olarak işletilirken MYH'nin iç direncinin 559Ω olduğu tespit edilmiştir. MYH'ye $50 \mu\text{M}$ ve $100 \mu\text{M}$ NK ilavesi ile sistemin iç direnci sırasıyla 502Ω ve 555Ω 'a düşmüştür. Sisteme $200 \mu\text{M}$ NK ilavesi ile MYH'nin iç direnci artmaya başlamıştır. Sistemde MYH iç direncinin artışı ile üretilen güç miktarının azaldığı tespit edilmiştir. Logan (2006) MYH'de üretilen güç miktarının iç direncin artışı ile azaldığını belirtmiştir. Nimje vd. (2011) çift bölmeli bir MYH de saf *Enterobacter cloacae* kültürü kullanarak pH'ın MYH performansına etkisini araştırmıştır. Çalışmada farklı pH'larda MYH'de üretilen akım miktarını tespit etmişlerdir. Elde edilen sonuçlara göre MYH iç direncinin artışı ile üretilen akım miktarı azalmıştır. Yapılan bu tez çalışmasında literatürdeki çalışma ile paralel sonuçlar elde edilmiştir.

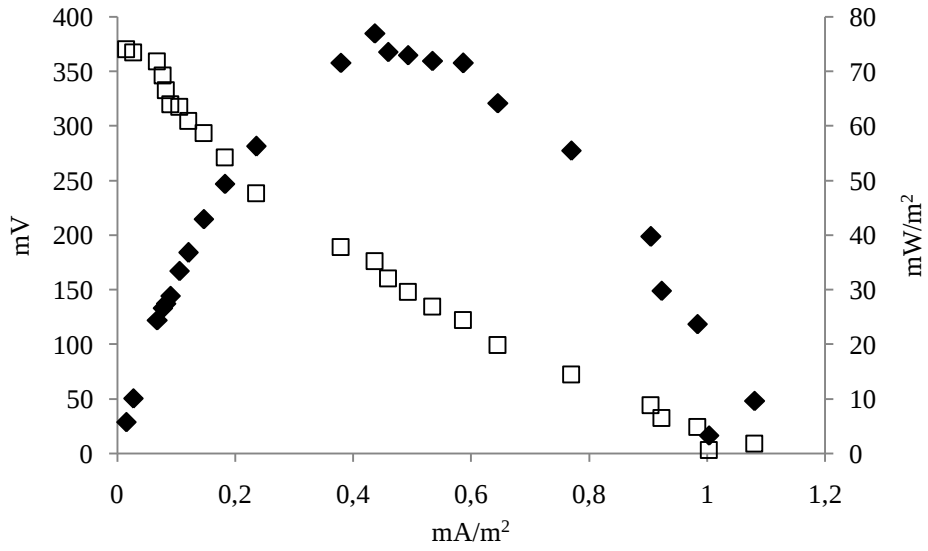
4.3.1.3 HNQ Medyatörü

MYH medyatörsüz olarak işletildiği süreçte MYH’de üretilen maksimum güç yoğunluğu miktarı $54,6 \text{ mW/m}^2$ ’dir (Şekil 4.27).



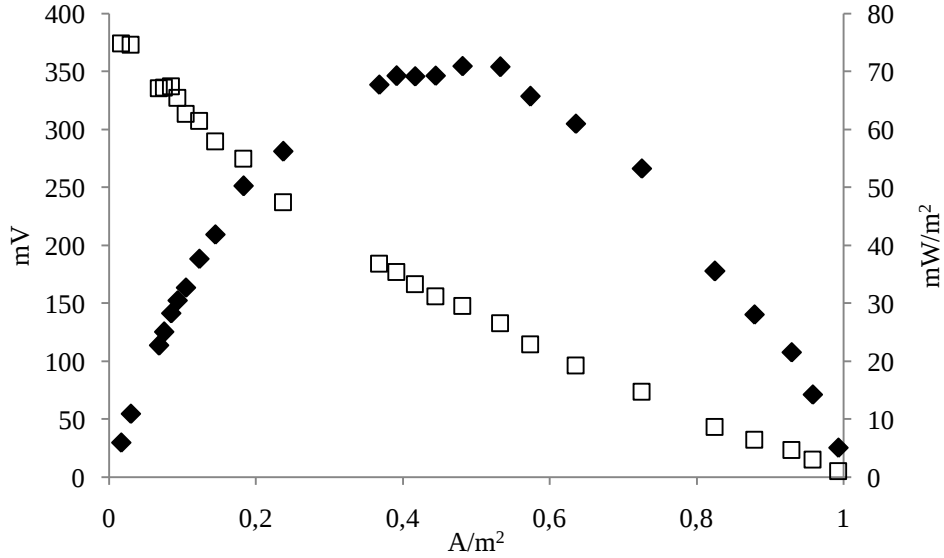
Şekil 4.27: MYH’nin medyatörsüz olarak işletim sonucu elde edilen güç eğrisi (□=Voltaj, mV; ◆=Güç Yoğ. mW/m^2).

MYH $50 \text{ } \mu\text{M}$ HNQ ilavesi ile işletildiği süreçte üretilen maksimum güç yoğunluğunun 76 mW/m^2 olduğu tespit edilmiştir (Şekil 4.28). MYH sistemine ilave edilen $50 \text{ } \mu\text{M}$ HNQ medyatörü ilavesi ile MYH’de üretilen güç miktarı medyatörsüz işletim süreci ile kıyaslandığında 1,4 kat artış meydana gelmiştir.



Şekil 4.28: MYH'nin 50 µM HNQ ilavesi ile işletimi sonucu elde edilen güç eğrisi (□=Voltaj, mV; ◆=Güç Yoğ. mW/m²).

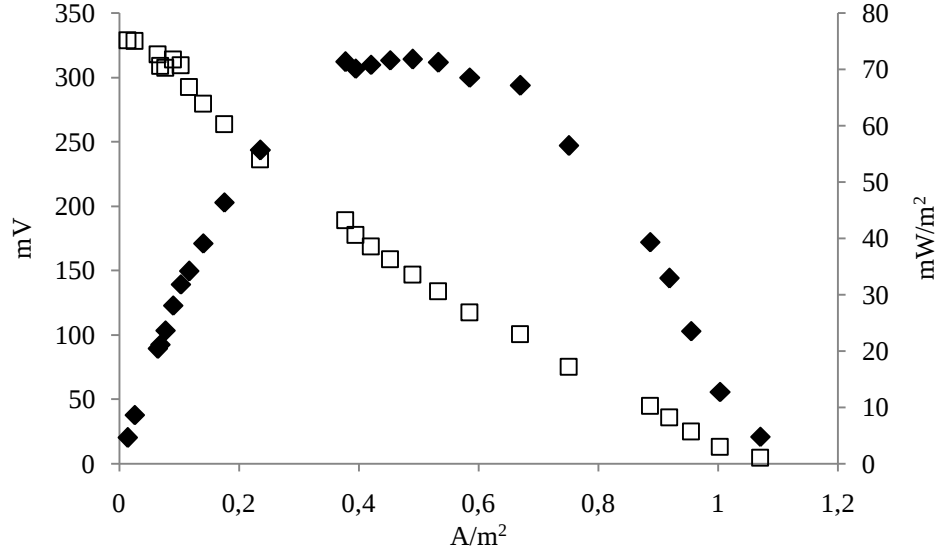
MYH 100 µM HNQ ilavesi ile işletildiği süreçte üretilen maksimum güç yoğunluğu değeri 70 mW/m² olduğu tespit edilmiştir (Şekil 4.29). MYH sistemine ilave edilen 100 µM HNQ medyatörü ilavesi ile MYH'de üretilen güç miktarı medyatörsüz işletim süreci ile kıyaslandığında 1,3 kat artış meydana gelmiştir.



Şekil 4.29: MYH'nin 100 µM HNQ ilavesi ile işletimi sonucu elde edilen güç eğrisi (□=Voltaj, mV; ◆=Güç Yoğ. mW/m²).

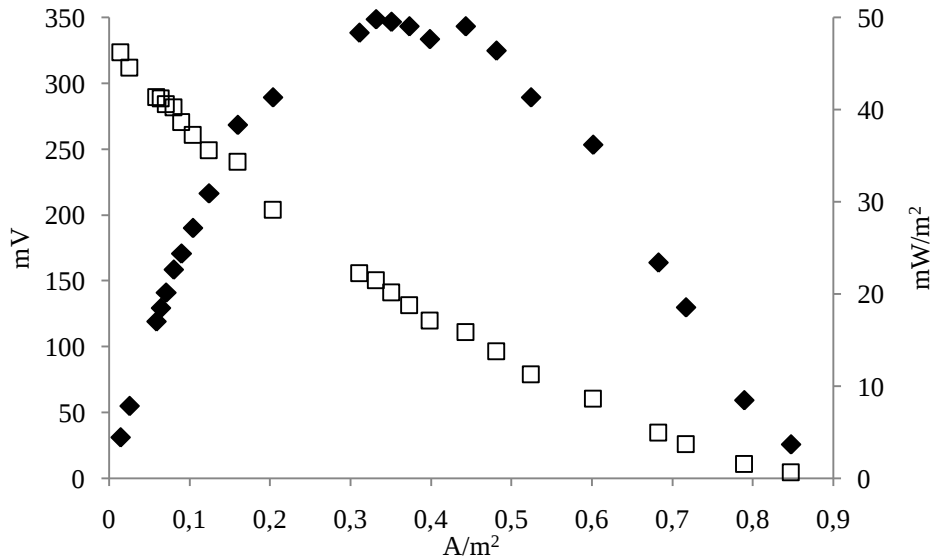
MYH 200 µM HNQ ilavesi ile işletildiği süreçte üretilen maksimum güç yoğunluğunun 72 mW/m² olduğu tespit edilmiştir (Şekil 4.30). MYH sistemine ilave edilen

200 μM HNQ medyatörü ilavesi ile MYH’de üretilen güç miktarı medyatörsüz işletim süreci ile kıyaslandığında 1,3 kat artış meydana gelmiştir.



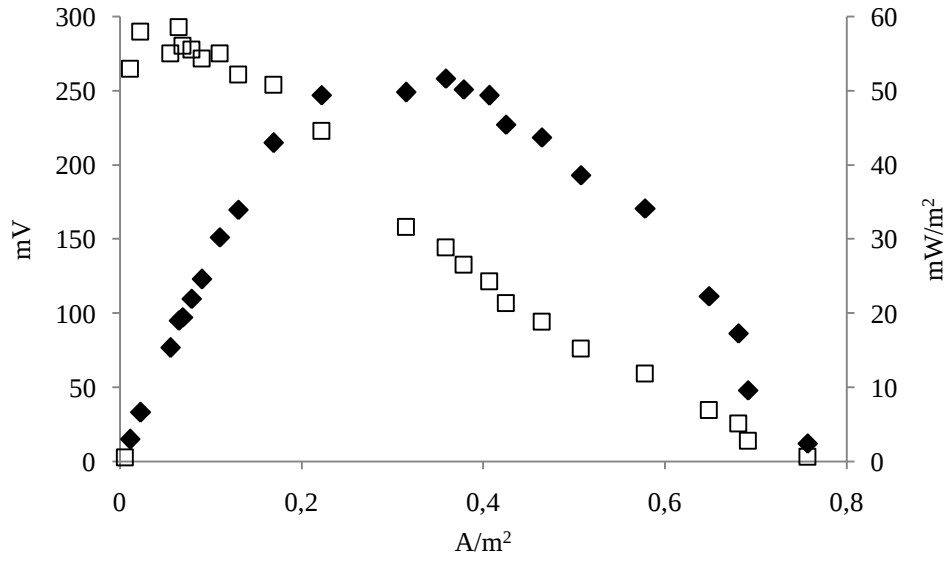
Şekil 4.30: MYH’nin 200 μM HNQ ilavesi ile işletimi sonucu elde edilen güç eğrisi (□=Voltaj, mV; ◆=Güç Yoğ. mW/m²).

MYH 300 μM HNQ ilavesi ile işletildiği süreçte üretilen maksimum güç yoğunluğunun 50 mW/m² olduğu tespit edilmiştir (Şekil 4.31).



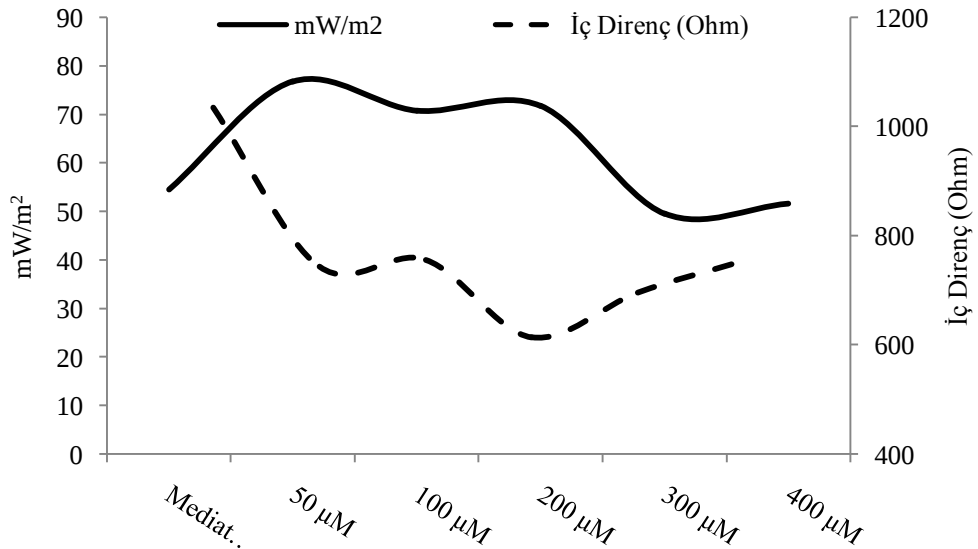
Şekil 4.31: MYH’nin 300 μM HNQ ilavesi ile işletimi sonucu elde edilen güç eğrisi (□=Voltaj, mV; ◆=Güç Yoğ. mW/m²).

MYH 400 μM HNQ ilavesi ile işletildiği süreçte üretilen maksimum güç yoğunluğunun 51,6 mW/m² olduğu tespit edilmiştir (Şekil 4.32).



Şekil 4.32: MYH'nin 400 μM HNQ ilavesi ile işletimi sonucu elde edilen güç eğrisi (□=Voltaj, mV; ◆=Güç Yoğ. mW/m^2).

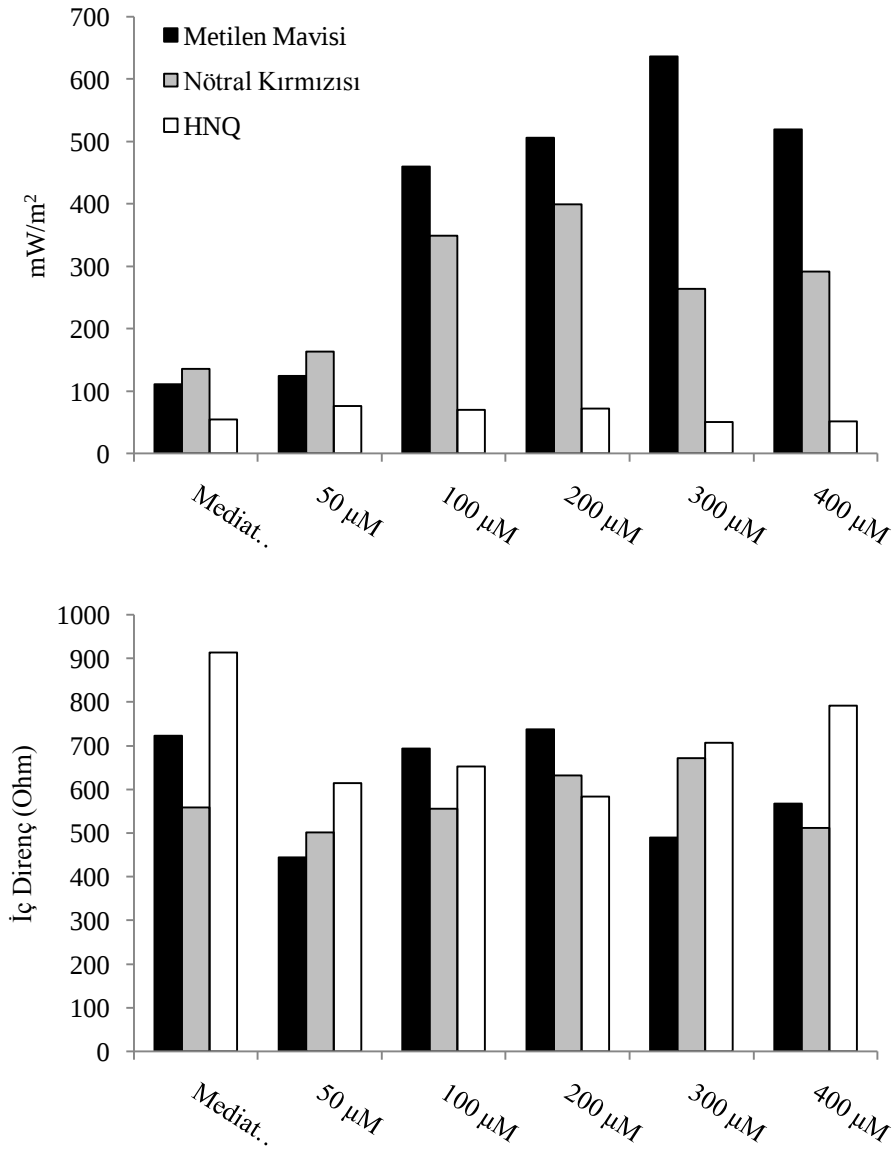
Şekil 4.33 MYH sisteminin farklı HNQ konsantrasyonları ile MYH'nin iç direncinin değişimini göstermektedir. MYH medyatörsüz olarak işletilirken elde edilen maksimum güç $54,6 mW/m^2$ olmuştur. Sisteme 50 μM HNQ ilavesi ile MYH'de üretilen maksimum güç yoğunluğu $76 mW/m^2$ değerine yükselmiştir. MYH sistemine 100 μM HNQ ilavesi ile üretilen güç miktarı $70 mW/m^2$ değerine düşmüştür. 50 μM HNQ ilavesi ile MYH'de üretilen maksimum güç yoğunluğu değeri 1,4 kat artmıştır. Güç artışı için MYH sistemine ilave edilebilecek optimum HNQ konsantrasyonunun 50 μM olduğu belirlenmiştir.



Şekil 4.33: Farklı HNQ konsantrasyonları için elde edilen güç yoğunluğu-iç direnç değerleri

Sistem medyatörsüz olarak işletilirken MYH'nin iç direnci 913 Ω olmuştur. Sisteme 50 μM medyatör ilavesi ile MYH iç direnci 615 Ω 'a düşmüştür. 200 μM HNQ ilavesi ile 584 Ω ile MYH'de en düşük iç direnç sağlanmıştır.

Bakır kumaş elektrot kullanılan MYH'de farklı medyatörler için üretilen güç yoğunluğu ve iç direnç değerleri toplu olarak Şekil 4.34'de verilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre bakır kumaş elektrot için en yüksek güç miktarı 300 μM metilen mavisi medyatörü ilavesinde elde edilmiştir. Farklı medyatörlerin kullanılması bakır kumaş elektrot kullanılan MYH'de elde edilen güç değerleri sıralaması MM>NK>HNQ şeklinde gerçekleşmiştir.

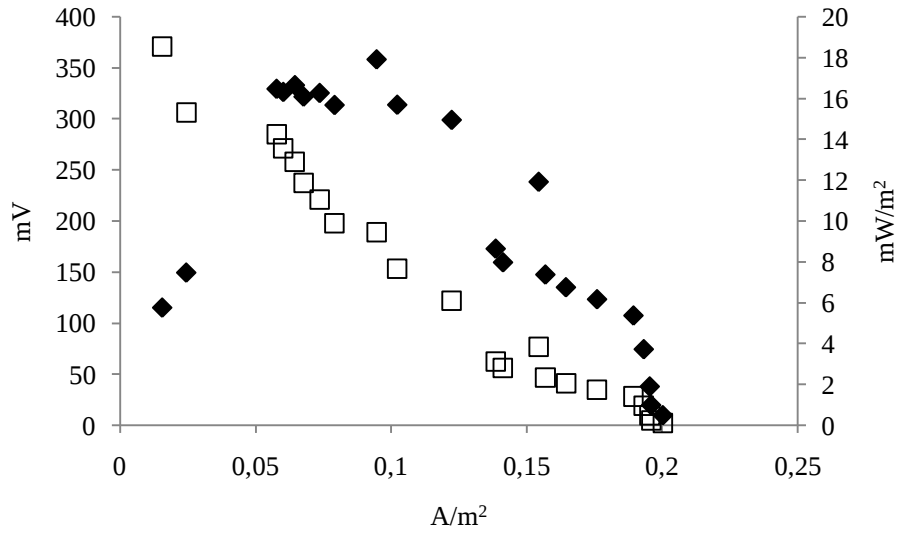


Şekil 4.34: Bakır kumaş elektrot kullanılan MYH’de üretilen güç ve iç direnç değerleri

4.3.2 Ti-TiO₂ Elektrodunda

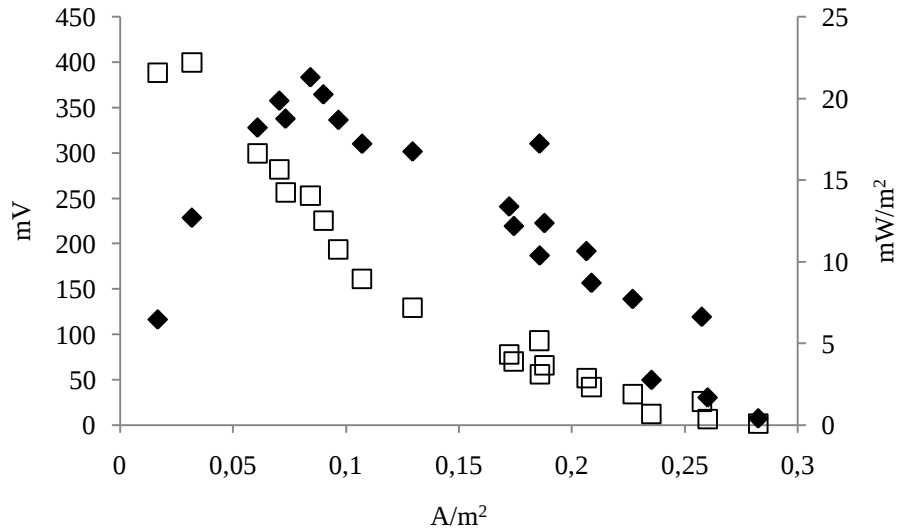
4.3.2.1 Metilen Mavisi Medyatörü

MYH medyatörsüz olarak işletildiği süreçte elde edilen maksimum güç yoğunluğunun 17,9 mW/m² olduğu tespit edilmiştir (Şekil 4.35).



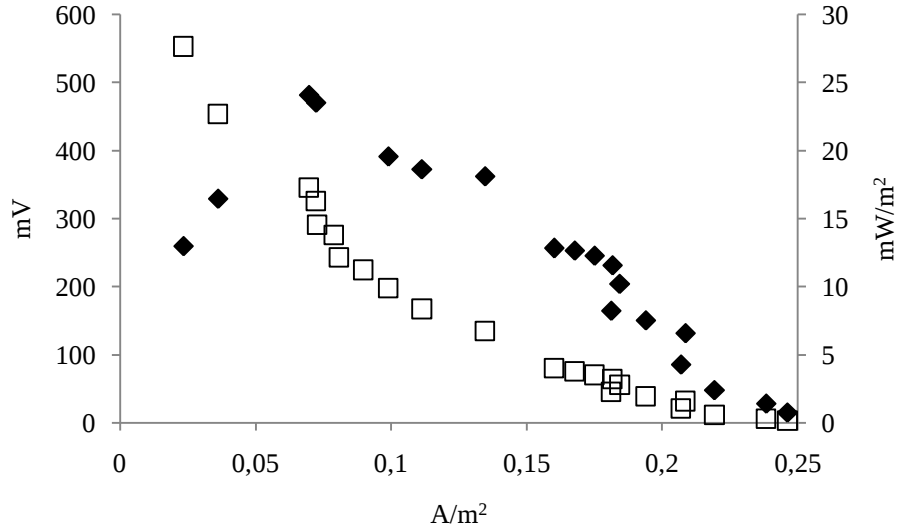
Şekil 4.35: MYH'nin medyatörsüz olarak işletilmesi sonucu elde edilen güç eğrisi (□=Voltaj, mV; ◆=Güç Yoğ. mW/m²).

MYH 50 μ M metilen mavisi ilave edilerek işletildiği süreçte elde edilen maksimum güç yoğunluğunun 21,2 mW/m² olduğu tespit edilmiştir (Şekil 4.36). MYH sistemine ilave edilen 50 μ M metilen mavisi medyatörü ilavesi ile MYH'de üretilen güç miktarı medyatörsüz işletim sürecinde üretilen güç miktarından 3,3 mW daha fazla güç üretilmiştir.



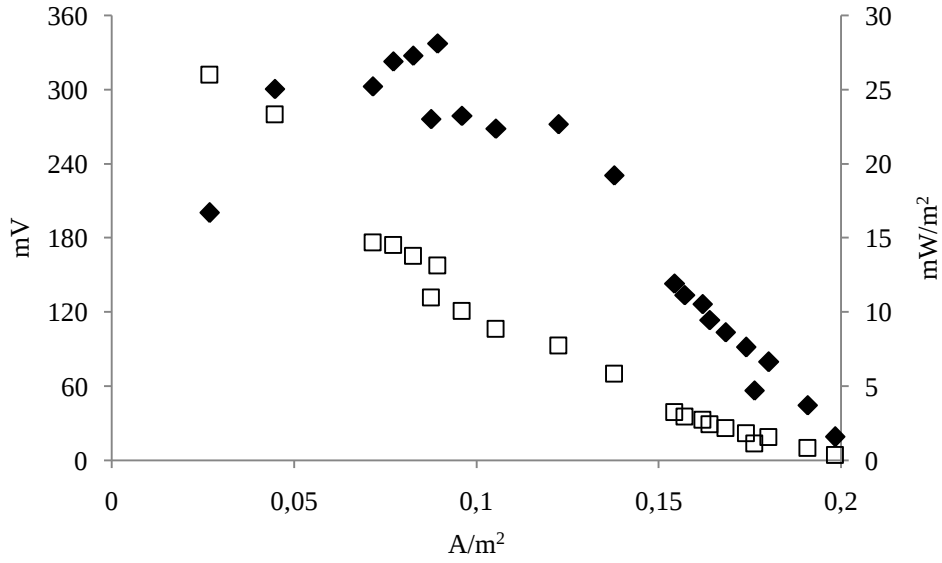
Şekil 4.36: MYH'nin 50 μ M metilen mavisi ilavesi ile işletilmesi sonucu elde edilen güç eğrisi (□=Voltaj, mV; ◆=Güç Yoğ. mW/m²).

MYH 100 μM metilen mavisi ilave edilerek işletildiği süreçte üretilen maksimum güç yoğunluğunun 23,5 mW/m^2 olduğu tespit edilmiştir (Şekil 4.37). MYH sistemine ilave edilen 100 μM metilen mavisi medyatörü ilavesi ile MYH’de üretilen güç miktarı medyatörsüz işletim süreci ile kıyaslandığında 5,6 mW daha fazla güç üretilmiştir.



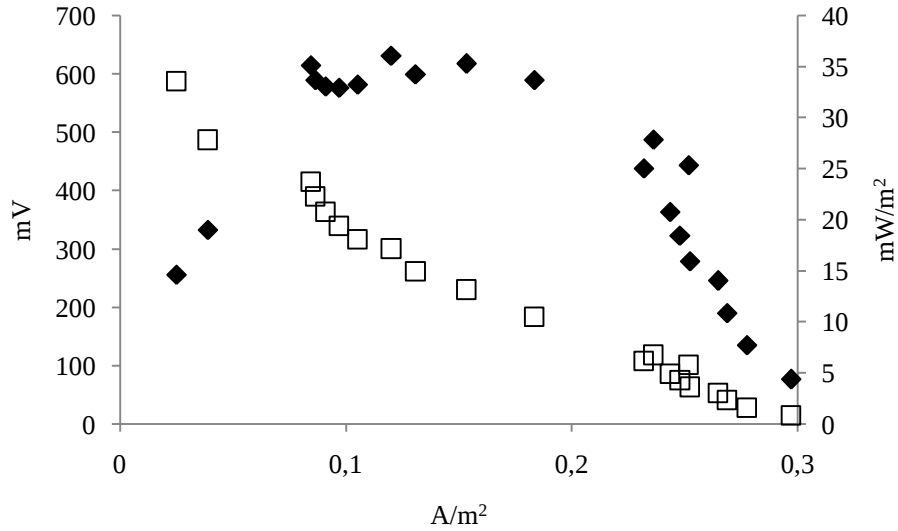
Şekil 4.37: MYH'nin 100 μM metilen mavisi ilavesi ile işletilmesi sonucu elde edilen güç eğrisi (□=Voltaj, mV; ◆=Güç Yoğ. mW/m^2).

MYH 200 μM HNQ ilave edilerek işletildiği süreçte üretilen maksimum güç yoğunluğunun 28 mW/m^2 olduğu tespit edilmiştir (Şekil 4.38). MYH sistemine ilave edilen 200 μM metilen mavisi medyatörü ilavesi ile MYH’de üretilen güç miktarı medyatörsüz işletim süreci ile kıyaslandığında 10,1 mW daha fazla güç üretilmiştir.



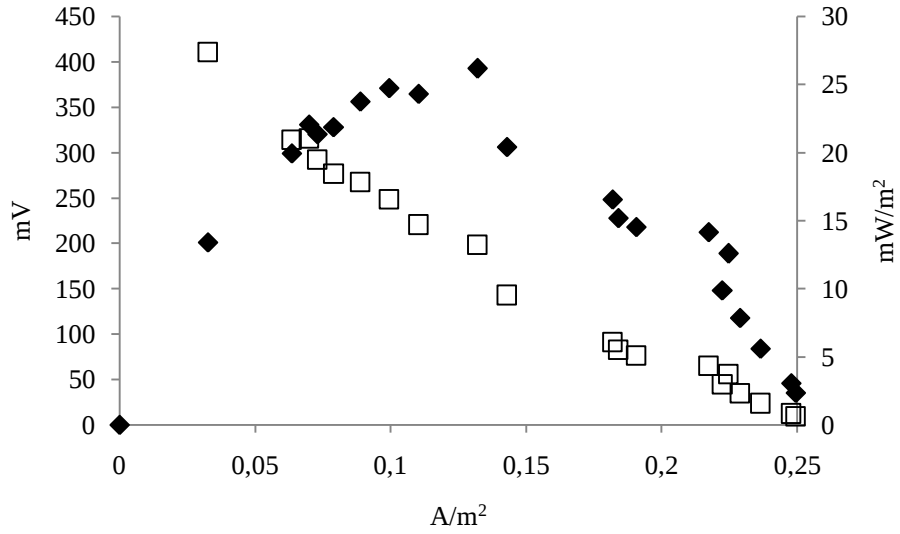
Şekil 4.38: MYH'nin 200 µM metilen mavisi ilavesi ile işletilmesi sonucu elde edilen güç eğrisi (□=Voltaj, mV; ◆=Güç Yoğ. mW/m²).

MYH 300 µM metilen mavisi ilave edilerek işletildiği süreçte üretilen maksimum güç yoğunluğunun 36 mW/m² olduğu tespit edilmiştir (Şekil 4.39). MYH sistemine ilave edilen 300 µM HNQ medyatörü ilavesi ile MYH'de üretilen güç miktarı medyatörsüz işletim süreci ile kıyaslandığında 2 kat artış meydana gelmiştir.



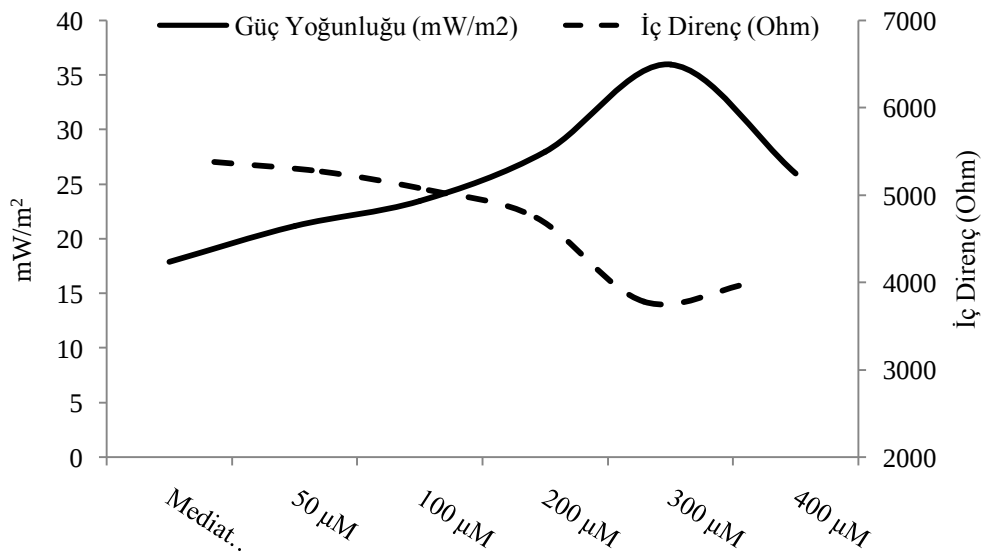
Şekil 4.39: MYH'nin 300 µM metilen mavisi ilavesi ile işletilmesi sonucu elde edilen güç eğrisi (□=Voltaj, mV; ◆=Güç Yoğ. mW/m²).

MYH 400 µM metilen mavisi ilave edilerek işletildiği süreçte üretilen maksimum güç yoğunluğunun 26 mW/m² olduğu tespit edilmiştir (Şekil 4.40).



Şekil 4.40: MYH'nin 400 μM metilen mavisi ilavesi ile işletilmesi sonucu elde edilen güç eğrisi (□=Voltaj, mV; ◆=Güç Yoğ. mW/m^2).

Şekil 4.41'de Ti-TiO₂ elektrot kullanılarak MYH de farklı metilen mavisi konsantrasyonlarında üretilen maksimum güç yoğunluğu değerleri ve her bir metilen mavisi konsantrasyonunda MYH iç direnci verilmiştir. MYH medyatörsüz olarak işletildiğinde üretilen güç yoğunluğu 17,9 mW/m^2 olduğu tespit edilmiştir. 300 μM metilen mavisi ilavesi ile MYH'de üretilen maksimum güç yoğunluğu 36 mW/m^2 olduğu belirlenmiştir. 300 μM metilen mavisi ilavesi ile 2 kat güç artışı olduğu tespit edilmiştir.

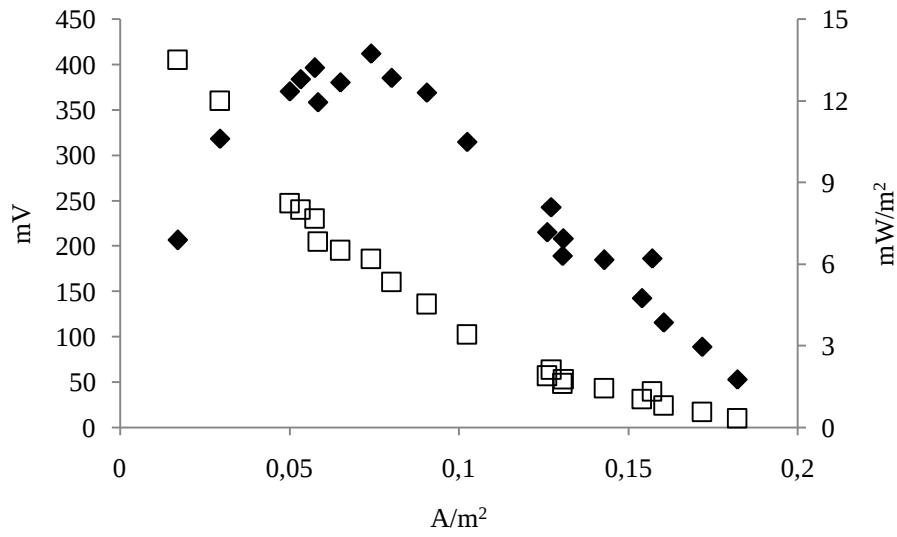


Şekil 4.41: Farklı Metilen mavisi konsantrasyonları için elde edilen güç yoğunluğu-iç direnç değerleri

MYH iç direncinin medyatörsüz işletim sürecinde 5382 Ω olduğu tespit edilmiştir. 300 μM medyatör ilavesi ile MYH iç direnci 3785 Ω değerine düşmüştür.

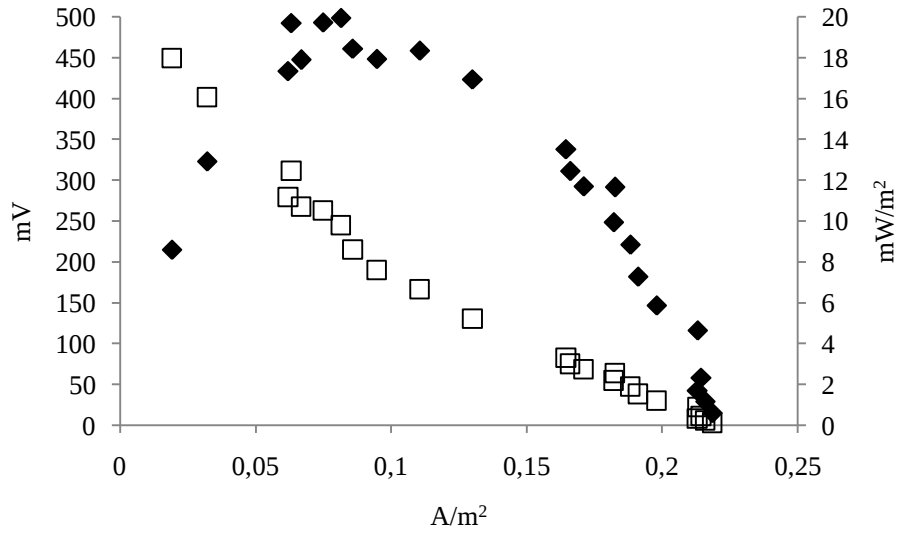
4.3.2.2 Nötral Kırmızısı Medyatörü

MYH medyatör ilavesiz olarak işletildiği süreçte üretilen maksimum güç yoğunluğunun 13,7 mW/m^2 olduğu tespit edilmiştir (Şekil 4.42).



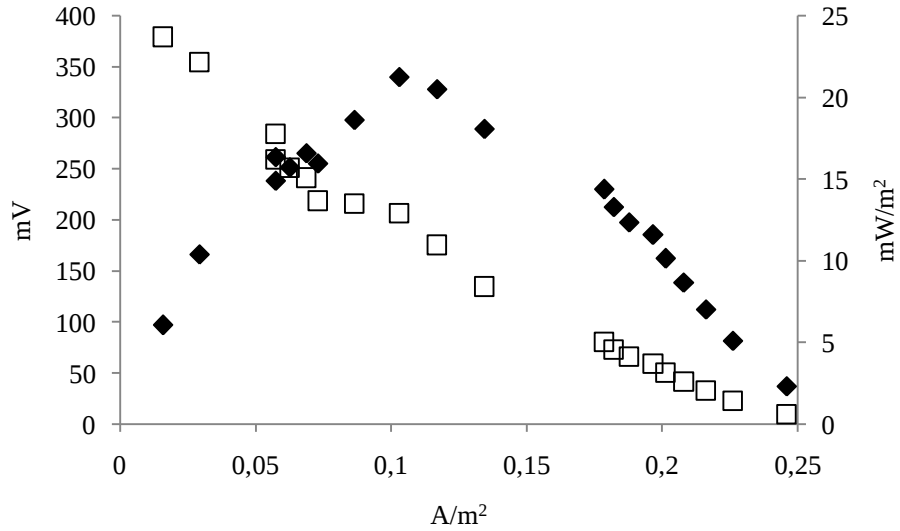
Şekil 4.42: MYH'nin medyatörsüz olarak işletilmesi sonucu elde edilen güç eğrisi (□=Voltaj, mV; ◆=Güç Yoğ. mW/m^2).

MYH 50 μM NK ilave edilerek işletildiği süreçte üretilen maksimum güç yoğunluğunun 19,9 mW/m^2 olduğu tespit edilmiştir (Şekil 4.43). MYH sistemine ilave edilen 50 μM nötral kırmızı medyatörü ilavesi ile MYH'de üretilen güç miktarı medyatörsüz işletim süreci ile kıyaslandığında 1,45 kat artış meydana gelmiştir.



Şekil 4.43: MYH'nin 50 µM NR ilavesi ile işletilmesi sonucu elde edilen güç eğrisi (□=Voltaj, mV; ◆=Güç Yoğ. mW/m²).

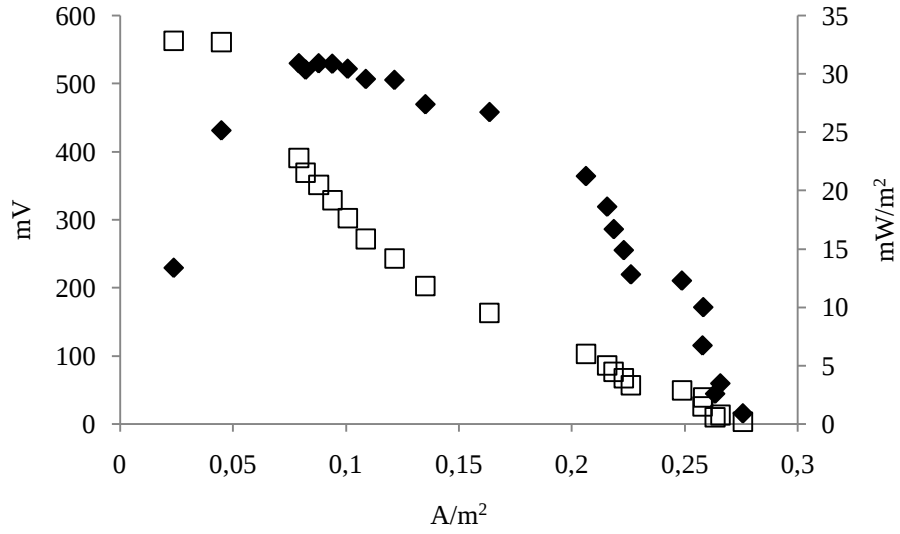
MYH 100 µM NK ilave edilerek işletildiği süreçte üretilen maksimum güç yoğunluğunun 21,2 mW/m² olduğu tespit edilmiştir (Şekil 4.44). MYH sistemine ilave edilen 100 µM nötral kırmızı medyatörü ilavesi ile MYH'de üretilen güç miktarı medyatörsüz işletim süreci ile kıyaslandığında 1,54 kat artış meydana gelmiştir.



Şekil 4.44: MYH'nin 100 µM NR ilavesi ile işletilmesi sonucu elde edilen güç eğrisi (□=Voltaj, mV; ◆=Güç Yoğ. mW/m²).

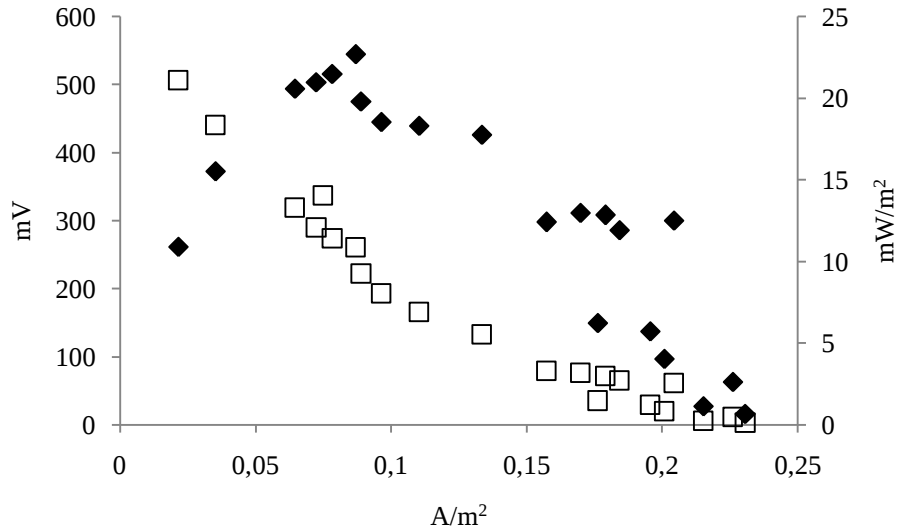
MYH 200 µM NK ilave edilerek işletildiği süreçte üretilen maksimum güç yoğunluğunun 30,9 mW/m² olduğu tespit edilmiştir (Şekil 4.45). MYH sistemine ilave

edilen 200 μM nötral kırmızı medyatörü ilavesi ile MYH’de üretilen güç miktarı medyatörsüz işletim süreci ile kıyaslandığında 2,24 kat artış meydana gelmiştir.



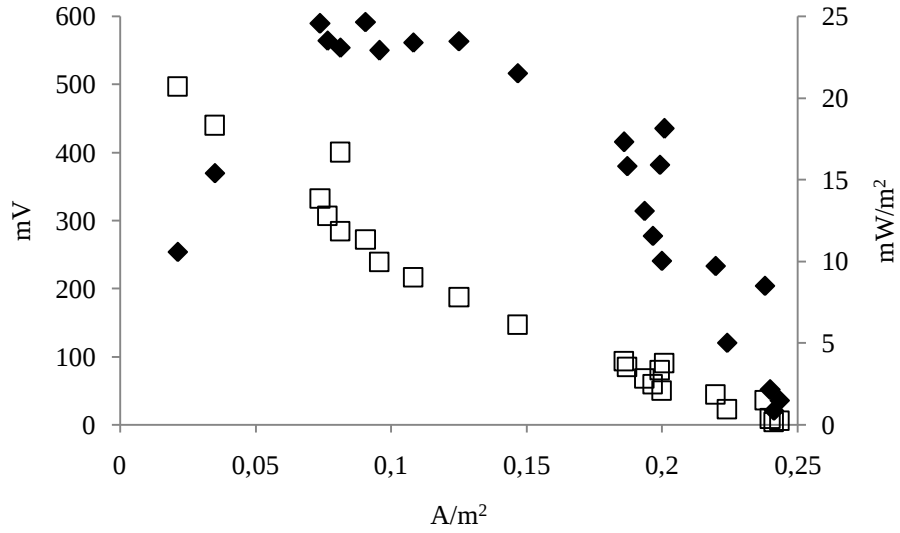
Şekil 4.45: MYH’nin 200 μM NK ilavesi ile işletilmesi sonucu elde edilen güç eğrisi (□=Voltaj, mV; ◆=Güç Yoğ. mW/m²).

MYH 300 μM NK ilave edilerek işletildiği süreçte üretilen maksimum güç yoğunluğunun 25,2 mW/m² olduğu tespit edilmiştir (Şekil 4.46). MYH sistemine ilave edilen 300 μM nötral kırmızı medyatörü ilavesi ile MYH’de üretilen güç miktarı medyatörsüz işletim süreci ile kıyaslandığında 1,83 kat artış meydana gelmiştir.



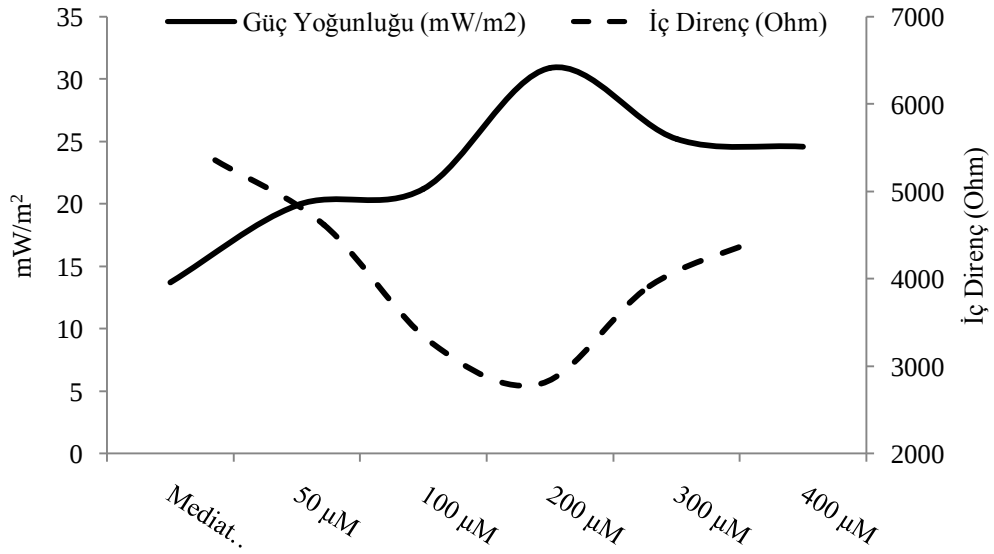
Şekil 4.46: MYH’nin 300 μM NK ilavesi ile işletilmesi sonucu elde edilen güç eğrisi (□=Voltaj, mV; ◆=Güç Yoğ. mW/m²).

MYH 400 μM NK ilave edilerek işletildiği süreçte üretilen maksimum güç yoğunluğunun 24,6 mW/m^2 olduğu tespit edilmiştir (Şekil 4.47). MYH sistemine ilave edilen 400 μM nötral kırmızı medyatörü ilavesi ile MYH’de üretilen güç miktarı medyatörsüz işletim süreci ile kıyaslandığında 1,8 kat artış meydana gelmiştir.



Şekil 4.47: MYH'nin 400 μM NK ilavesi ile işletilmesi sonucu elde edilen güç eğrisi (□=Voltaj, mV; ◆=Güç Yoğ. mW/m^2).

Şekil 4.48’de Ti-TiO₂ elektrot kullanılarak MYH de farklı NK medyatörü konsantrasyonlarında üretilen güç yoğunluğu değerleri ve her bir aşamada MYH’de oluşan iç direnç değerleri verilmiştir. MYH medyatörsüz olarak işletilirken üretilen maksimum güç yoğunluğu değeri 13,7 mW/m^2 dir. Sisteme 50 μM NK ilavesi ile MYH’den elde edilen maksimum güç yoğunluğu değeri 19,9 mW/m^2 değerine ulaşmıştır. Sisteme 200 μM NK ilavesi MYH’de üretilen maksimum güç yoğunluğu değeri 30,9 mW/m^2 olmuştur. Bu sayede 200 μM NK konsantrasyonu ile MYH’nin medyatörsüz işletimi ile kıyaslandığında 2,25 kat daha fazla güç yoğunluğu üretilmiştir. NK konsantrasyonunun 300 ve 400 μM ’e arttırılması ile MYH’de üretilen güç yoğunluğu azalarak sırasıyla 25,2 ve 24,6 mW/m^2 olduğu tespit edilmiştir.

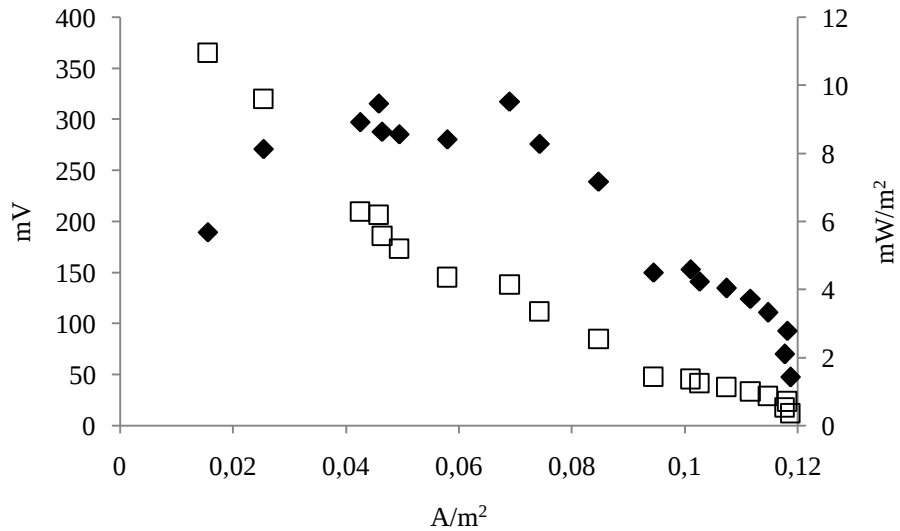


Şekil 4.48: Farklı NK konsantrasyonları için elde edilen güç yoğunluğu-iç direnç değerleri ($\square$ =Voltaj, mV; $\blacklozenge$ =Güç Yoğ. mW/m²).

MYH iç direnci ise medyatörsüz işletim sürecinde 5363 Ω iken 50 μ M NK ilavesi ile aniden azalarak 4622 Ω değerine düşmüştür. 100 μ M NK konsantrasyonu ile 3260 Ω olduğu tespit edilmiştir. MYH'ye 200 μ M NK ilavesi ile MYH iç direncinin 2802 Ω olduğu tespit edilmiştir.

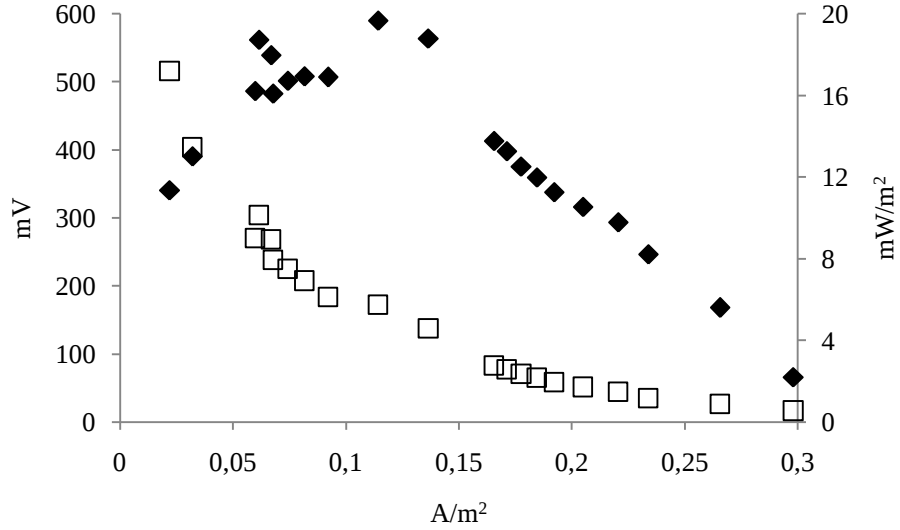
4.3.2.3 HNQ Medyatörü

MYH medyatörsüz olarak işletildiği süreçte üretilen maksimum güç yoğunluğunun 9,5 mW/m² olduğu tespit edilmiştir (Şekil 4.49).



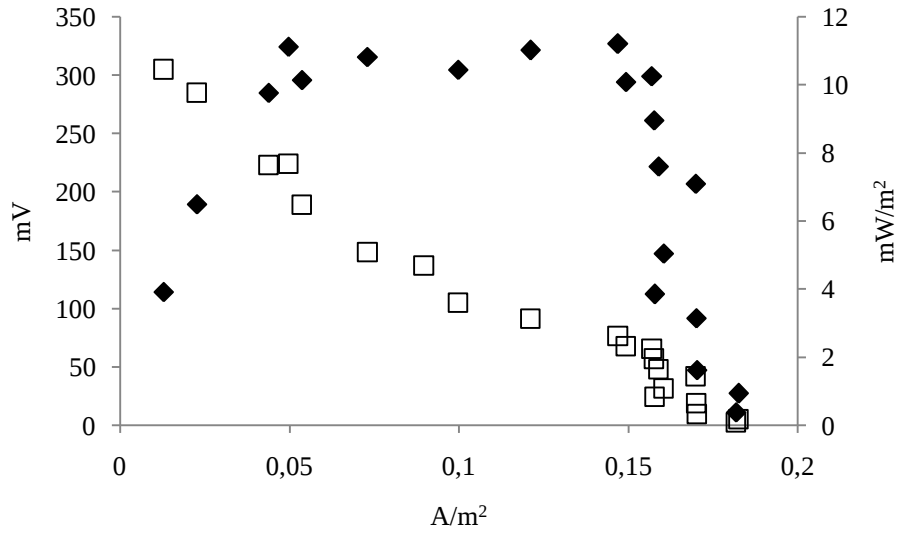
Şekil 4.49: MYH'nin medyatörsüz olarak işletilmesi sonucu elde edilen güç eğrisi

MYH 50 μM HNQ medyatörü ile işletildiği süreçte elde edilen maksimum güç yoğunluğunun $18,7 \text{ mW/m}^2$ olduğu tespit edilmiştir (Şekil 4.50). MYH sistemine ilave edilen 50 μM HNQ medyatörü ilavesi ile MYH’de üretilen güç miktarı medyatörsüz işletim süreci ile kıyaslandığında 1,9 kat artış meydana gelmiştir.



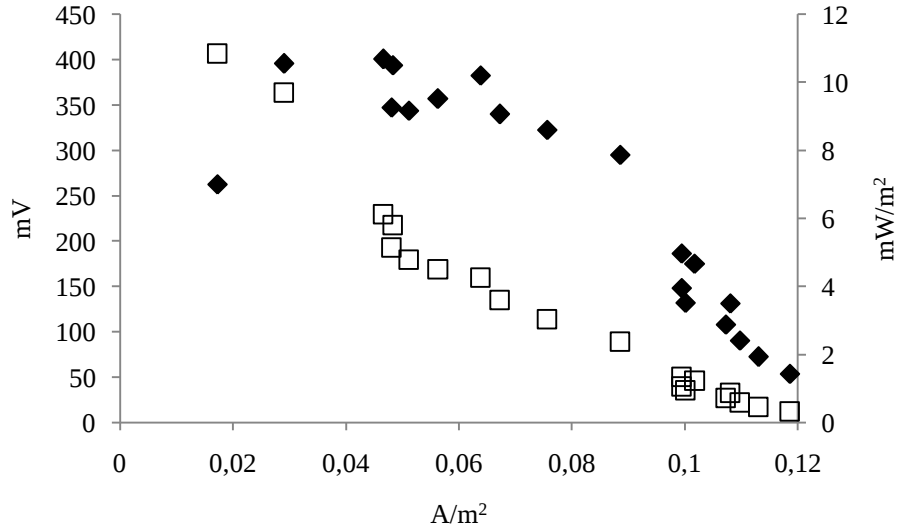
Şekil 4.50: MYH'nin 50 μM HNQ ilavesi ile işletilmesi sonucu elde edilen güç eğrisi (□=Voltaj, mV; ◆=Güç Yoğ. mW/m²).

MYH 100 μM HNQ medyatörü ile işletildiği süreçte elde edilen maksimum güç yoğunluğunun $12,3 \text{ mW/m}^2$ olduğu tespit edilmiştir (Şekil 4.51). MYH sistemine ilave edilen 100 μM HNQ medyatörü ilavesi ile MYH’de üretilen güç miktarı medyatörsüz işletim süreci ile kıyaslandığında 1,3 kat artış meydana gelmiştir.



Şekil 4.51: MYH'nin 100 µM HNQ ilavesi ile işletilmesi sonucu elde edilen güç eğrisi (□=Voltaj, mV; ◆=Güç Yoğ. mW/m²).

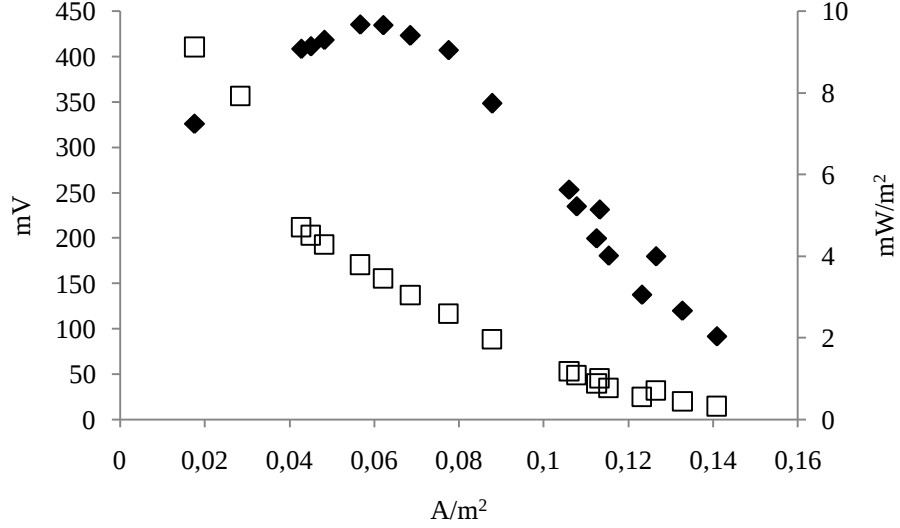
MYH 200 µM HNQ medyatörü ile işletildiği süreçte üretilen maksimum güç yoğunluğunun 10,6 mW/m² olduğu tespit edilmiştir (Şekil 4.52). MYH sistemine ilave edilen 200 µM HNQ medyatörü ilavesi ile MYH'de üretilen güç miktarı medyatörsüz işletim süreci ile kıyaslandığında 1,2 kat artış meydana gelmiştir.



Şekil 4.52: MYH'nin 200 µM HNQ ilavesi ile işletilmesi sonucu elde edilen güç eğrisi (□=Voltaj, mV; ◆=Güç Yoğ. mW/m²).

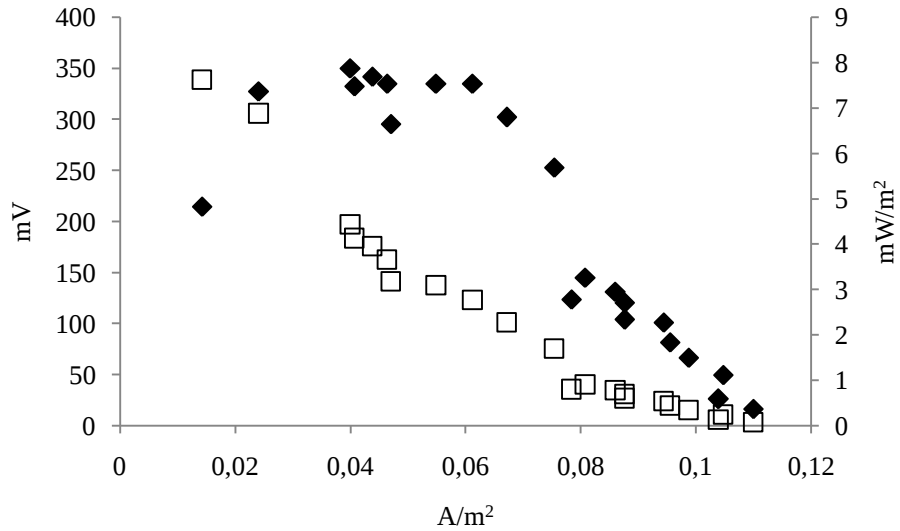
MYH 300 µM HNQ medyatörü ile işletildiği süreçte üretilen maksimum güç yoğunluğunun 9,7 mW/m² olduğu tespit edilmiştir (Şekil 4.53). MYH sistemine ilave

edilen 300 μM HNQ medyatörü ilavesi ile MYH'de üretilen güç miktarında mediyatörsüz işletim sürecine kıyasla ciddi bir değişiklik olmamıştır.



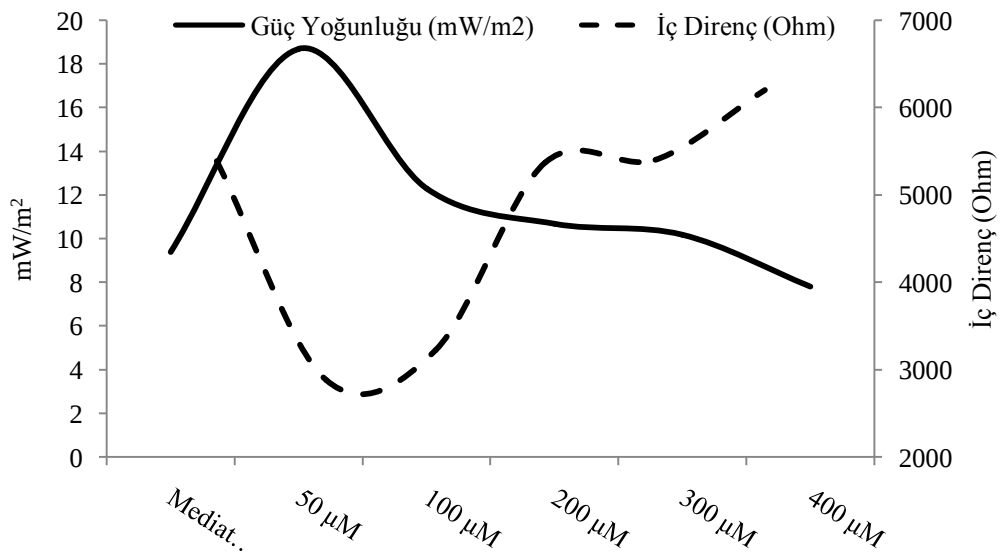
Şekil 4.53: MYH'nin 300 μM HNQ ilavesi ile işletilmesi sonucu elde edilen güç eğrisi (□=Voltaj, mV; ◆=Güç Yoğ. mW/m²).

MYH 400 μM HNQ medyatörü ile işletildiği süreçte üretilen maksimum güç yoğunluğunun 7,9 mW/m² olduğu tespit edilmiştir (Şekil 4.54).



Şekil 4.54: MYH'nin 400 μM HNQ ilavesi ile işletilmesi sonucu elde edilen güç eğrisi (□=Voltaj, mV; ◆=Güç Yoğ. mW/m²).

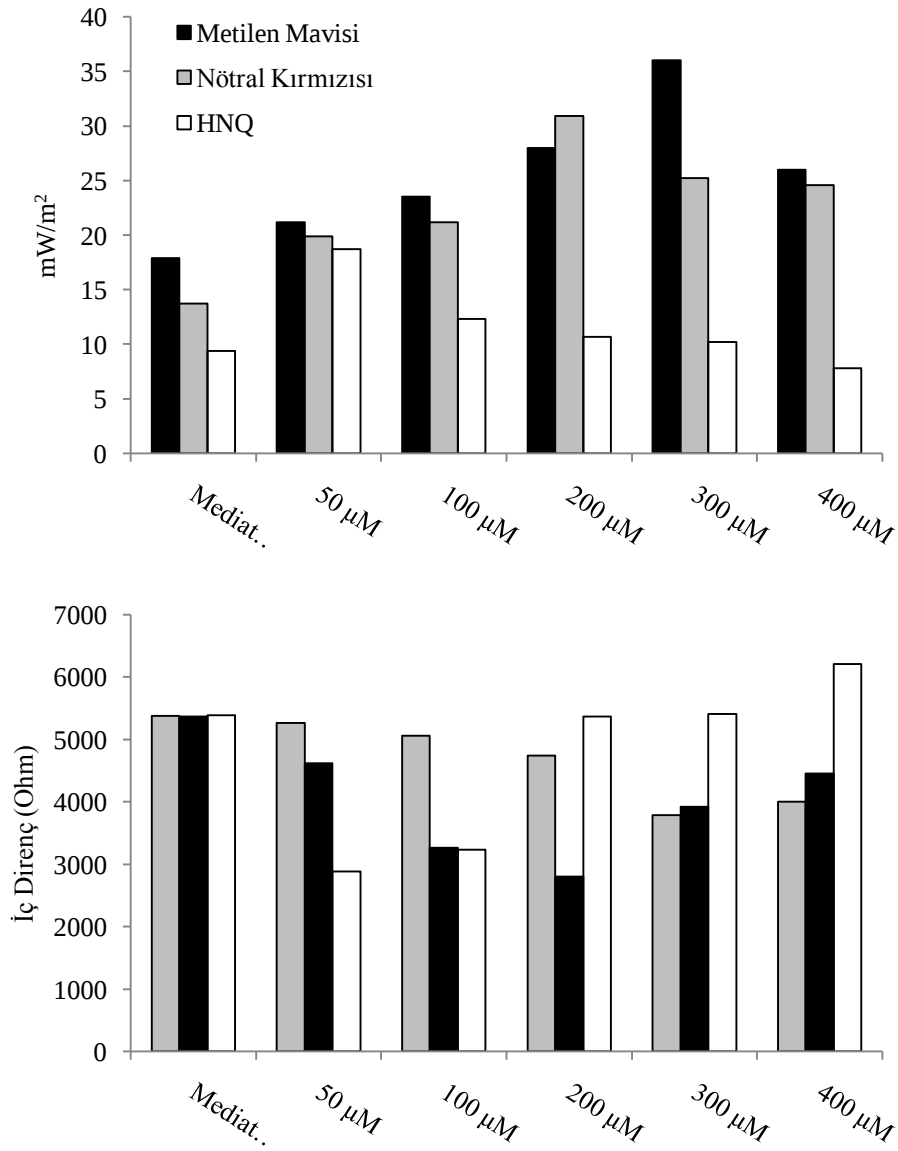
Şekil 4.55’de MYH’nin Ti-TiO₂ elektrot kullanılarak farklı medyatör konsantrasyonunda elde edilen güç yoğunluğu değerleri ve MYH iç direnç değerleri görülmektedir. Sistem medyatörsüz olarak işletilirken MYH’de üretilen maksimum güç yoğunluğu değeri 9,5 mW/m² olduğu belirlenmiştir. Sisteme 50 µM HNQ ilave edilmesi ile birlikte üretilen maksimum güç yoğunluğu miktarı 18,7 mW/m² değerine ulaşmıştır. 100, 200, 300 ve 400 µM HNQ ilavesi ile MYH’de üretilen maksimum güç yoğunluğu miktarı azalarak sırasıyla 18,7; 12,3; 10,7 ve 7,9 mW/m² olduğu tespit edilmiştir. Sisteme 50 µM HNQ ilavesi ile güç üretiminde yaklaşık 2 kat artış olduğu görülmüştür.



Şekil 4.55: Farklı HNQ konsantrasyonları için elde edilen güç yoğunluğu-İç direnç değerleri

MYH iç direnci ise medyatörsüz işletim sürecinde 2964 Ω iken 50 µM HNQ ilavesi ile 2885 Ω değerine düşmüştür. 100, 200, 300 ve 400 µM HNQ ilavelerinde ise iç direnç giderek artmış ve sırasıyla 3230, 5373, 5404 ve 6207 Ω olduğu belirlenmiştir.

Ti-TiO₂ elektrot kullanılan MYH’de farklı medyatörler için üretilen güç yoğunluğu ve iç direnç değerleri toplu olarak Şekil 4.56’da verilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre Ti-TiO₂ elektrot için en yüksek güç miktarı 200 µM nötral kırmızısı medyatörü ilavesinde elde edilmiştir. Farklı medyatörlerin kullanılması Ti-TiO₂ elektrot kullanılan MYH’de elde edilen güç artışı sıralaması NR>MM>HNQ şeklinde gerçekleşmiştir. Metilen mavisi medyatörü ile 2 kat, nötral kırmızı medyatörü ile 2,25 kat ve HNQ medyatörü ile 1,96 kat güç artışı meydana gelmiştir.

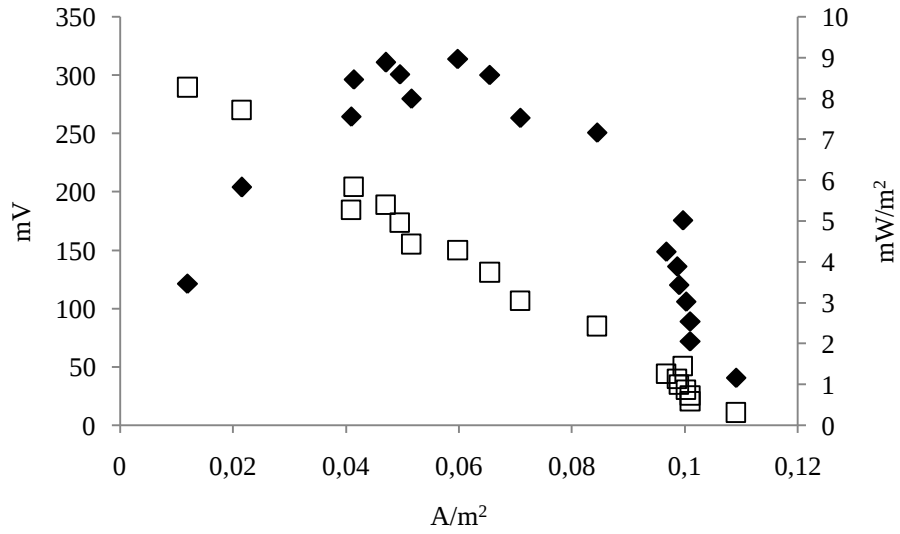


Şekil 4.56: Ti-TiO₂ elektrotun kullanıldığı MYH’de üretilen güç ve iç direnç değerleri

4.3.3 Grafit Elektrodunda Medyatörlü Çalışmalar

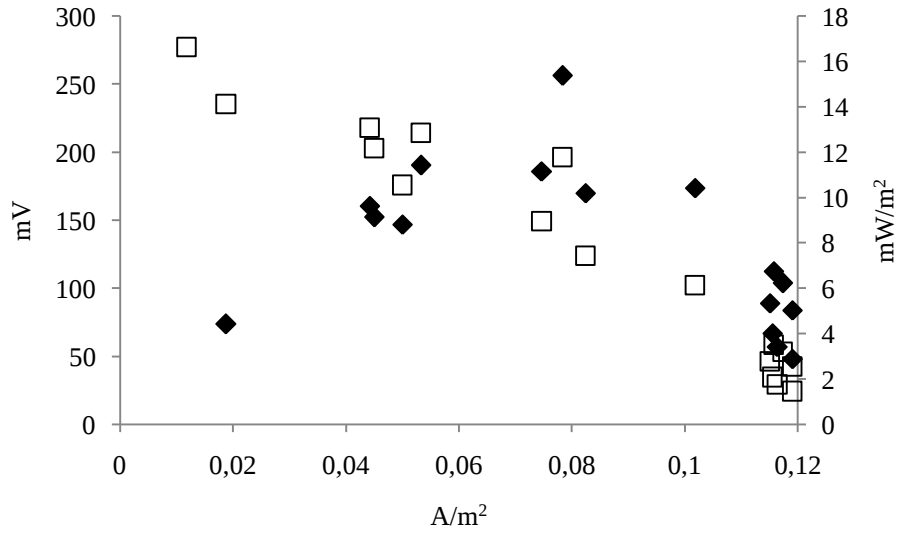
4.3.3.1 Metilen Mavisi Medyatörü

MYH medyatörsüz olarak işletildiği süreçte MYH’de üretilen maksimum güç yoğunluğunun 8,9 mW/m² olduğu tespit edilmiştir (Şekil 4.57).



Şekil 4.57: MYH'nin medyatör ilavesiz olarak işletilmesi sonucu elde edilen güç eğrisi (□=Voltaj, mV; ◆=Güç Yoğ. mW/m²).

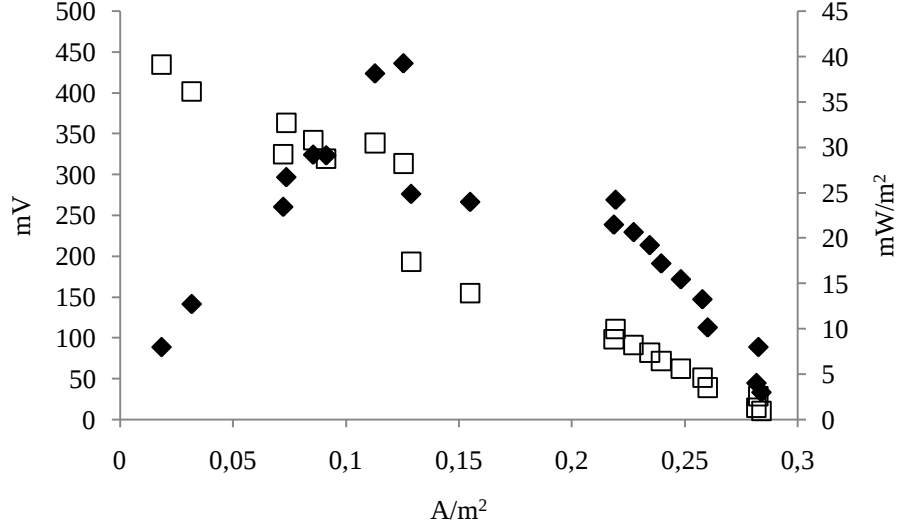
MYH 50 μ M metilen mavisi ilave edilerek işletildiği süreçte üretilen maksimum güç yoğunluğunun 15,3 mW/m² olduğu tespit edilmiştir (Şekil 4.58). MYH sistemine ilave edilen 50 μ M metilen mavisi medyatörü ilavesi ile MYH'de üretilen güç miktarı medyatörsüz işletim süreci ile kıyaslandığında 1,72 kat artış meydana gelmiştir.



Şekil 4.58: MYH'nin 50 μ M metilen mavisi ilavesi ile işletilmesi sonucu elde edilen güç eğrisi (□=Voltaj, mV; ◆=Güç Yoğ. mW/m²).

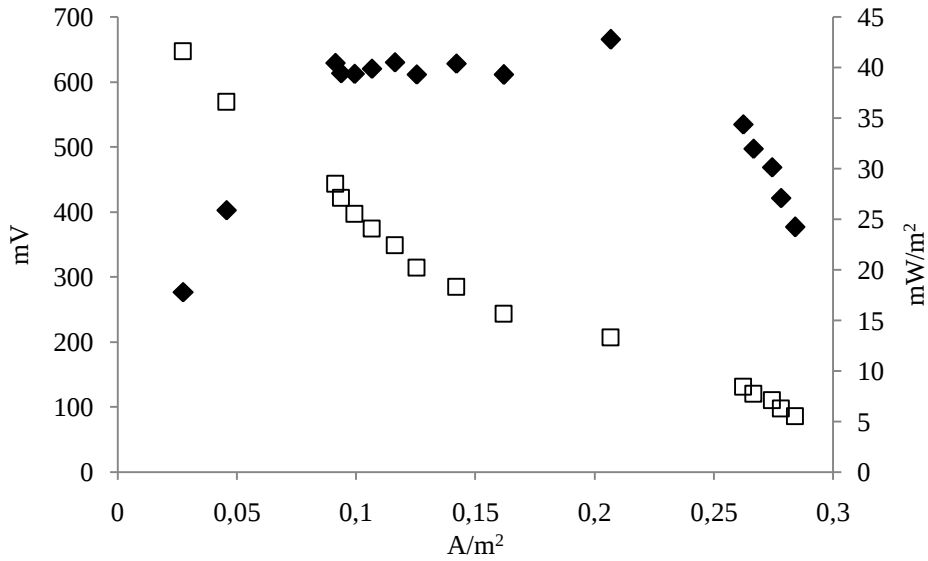
MYH 100 μ M metilen mavisi ilave edilerek işletildiği süreçte üretilen maksimum güç yoğunluğunun 39,3 mW/m² olduğu tespit edilmiştir (Şekil 4.59). MYH sistemine ilave

edilen 100 μM metilen mavisi medyatörü ilavesi ile MYH’de üretilen güç miktarı medyatörsüz işletim süreci ile kıyaslandığında 4,4 kat artış meydana gelmiştir.



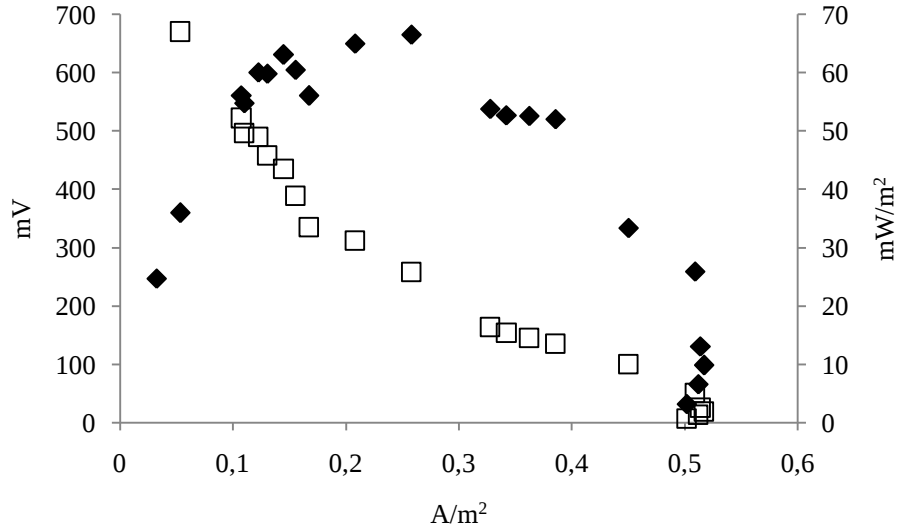
Şekil 4.59: MYH'nin 100 μM metilen mavisi ilavesi ile işletilmesi sonucu elde edilen güç eğrisi (□=Voltaj, mV; ◆=Güç Yoğ. mW/m²).

MYH 200 μM metilen mavisi ilave edilerek işletildiği süreçte üretilen maksimum güç yoğunluğunun 42,7 mW/m² olduğu tespit edilmiştir (Şekil 4.60). MYH sistemine ilave edilen 200 μM metilen mavisi medyatörü ilavesi ile MYH’de üretilen güç miktarı medyatörsüz işletim süreci ile kıyaslandığında 4,8 kat artış meydana gelmiştir.



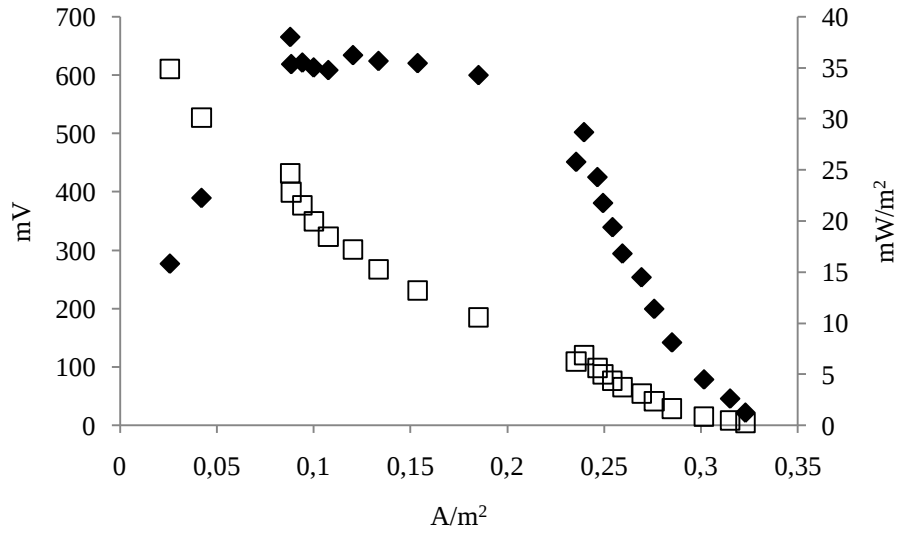
Şekil 4.60: MYH'nin 200 μM metilen mavisi ilavesi ile işletilmesi sonucu elde edilen güç eğrisi (□=Voltaj, mV; ◆=Güç Yoğ. mW/m²).

MYH 300 μM metilen mavisi ilave edilerek işletildiği süreçte elde edilen maksimum güç yoğunluğunun 66,5 mW/m^2 olduğu tespit edilmiştir (Şekil 4.61). MYH sistemine ilave edilen 200 μM metilen mavisi medyatörü ilavesi ile MYH’de üretilen güç miktarı medyatörsüz işletim süreci ile kıyaslandığında 7,5 kat artış meydana gelmiştir.



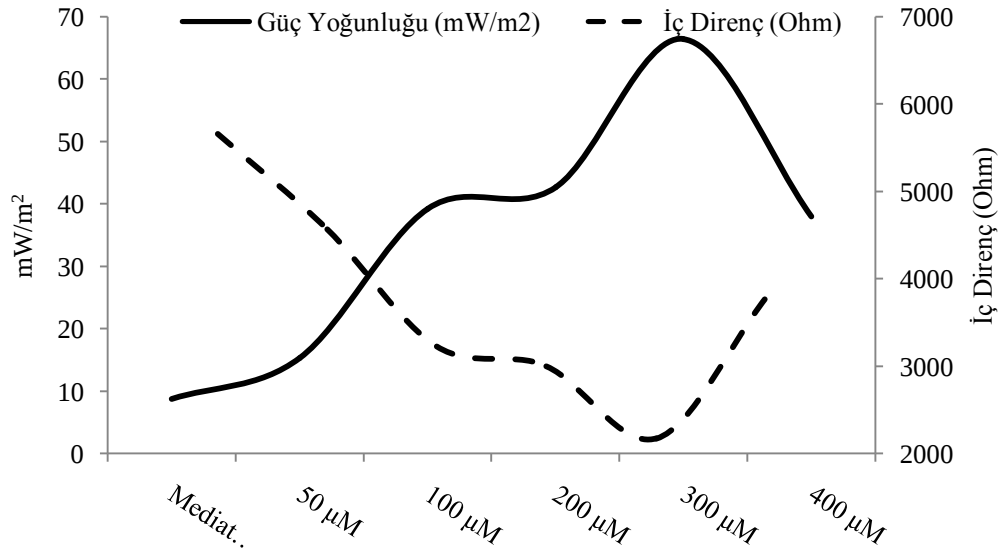
Şekil 4.61: MYH’nin 300 μM metilen mavisi ilavesi ile işletilmesi sonucu elde edilen güç eğrisi (□=Voltaj, mV; ◆=Güç Yoğ. mW/m^2).

MYH 400 μM metilen mavisi ilave edilerek işletildiği süreçte elde edilen maksimum güç yoğunluğunun 38 mW/m^2 olduğu tespit edilmiştir (Şekil 4.62). MYH sistemine ilave edilen 400 μM metilen mavisi medyatörü ilavesi ile MYH’de üretilen güç miktarı medyatörsüz işletim süreci ile kıyaslandığında 4,3 kat artış meydana gelmiştir.



Şekil 4.62: MYH'nin 400 μM metilen mavisi ilavesi ile işletilmesi sonucu elde edilen güç eğrisi (□=Voltaj, mV; ◆=Güç Yoğ. mW/m^2).

Şekil 4.63'de grafit elektrot kullanılarak MYH'de farklı konsantrasyonlarda metilen mavisi medyatörü ilavesi ile üretilen güç yoğunluğu değerleri ve her bir aşamada MYH'de oluşan iç direnç değerleri verilmiştir. Sistem medyatörsüz olarak işletilirken MYH'de üretilen maksimum güç yoğunluğu değeri $8,8 \text{ mW}/\text{m}^2$ olduğu belirlenmiştir. Sisteme 50, 100, 200 ve 300 μM metilen mavisi ilavesi ile MYH'den elde edilen güç miktarı giderek artmış ve sırası ile 15,3; 39,3; 47,5 ve $63 \text{ mW}/\text{m}^2$ olmuştur. 400 μM metilen mavisi ilavesi ile MYH'nin güç üretimi azalarak $38 \text{ mW}/\text{m}^2$ düzeyinde olduğu belirlenmiştir. Sisteme 300 μM metilen mavisi ilavesi ile üretilen güç miktarı 7,5 kat artmıştır.

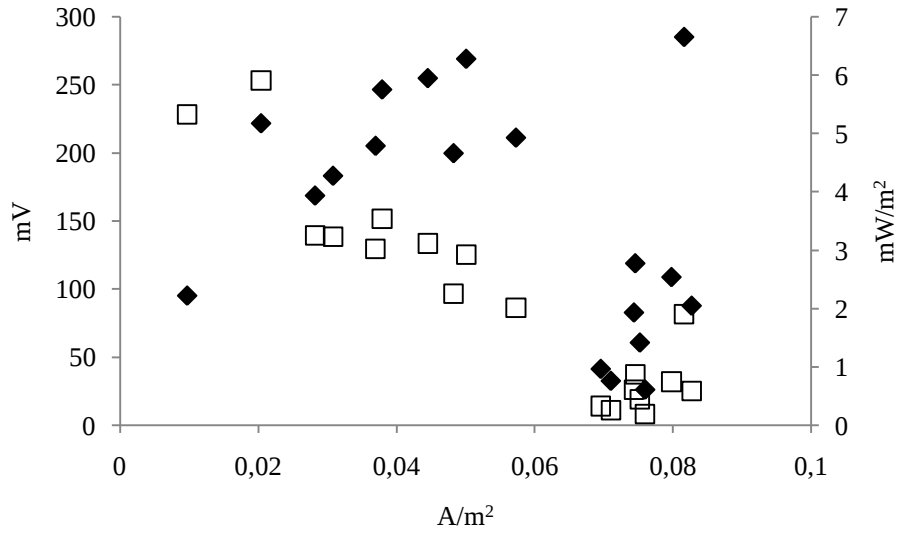


Şekil 4.63: Farklı metilen mavisi konsantrasyonları için MYH güç yoğunluğu-iç direnç değerleri

MYH iç direncinin ise medyatörsüz işletim sürecinde 5663 Ω olduğu tespit edilmiştir. Sisteme 50, 100, 200 ve 300 μM medyatör ilavesi ile MYH iç direnci azalmıştır ve sırası ile 4570, 3228, 3160 ve 2173 Ω olduğu tespit edilmiştir. 400 μM metilen mavisi ilavesinde ise iç direnç artarak 3783 Ω olmuştur. Metilen mavisi konsantrasyonunun artışı ile MYH’de üretilen güç miktarı 400 μM seviyesinden sonra düşmüştür. Benzer durum Kong vd. (2011) grafit çubuk elektrotun kullanıldığı çalışmada da elde edilmiştir. Söz konusu çalışmada, MYH’ye 0,5 mmol/L metilen mavisi ilavesi ile MYH’de üretilen voltaj 610 mV’den 706 mV değerine yükselmiştir. Metilen mavisi konsantrasyonunun 1,5 mmol/L değerine yükseltilmesi ile MYH’de üretilen voltaj değeri 440 mV seviyesine düşmüştür. Aynı çalışmada metilen mavisi konsantrasyonunun 1,5 mmol/L değerine çıkarılması ile MYH’de üretilen maksimum güç miktarı 470 mW/m² değerinden 280 mW/m² değerine düşmüştür (%30 daha düşük güç üretilmiştir).

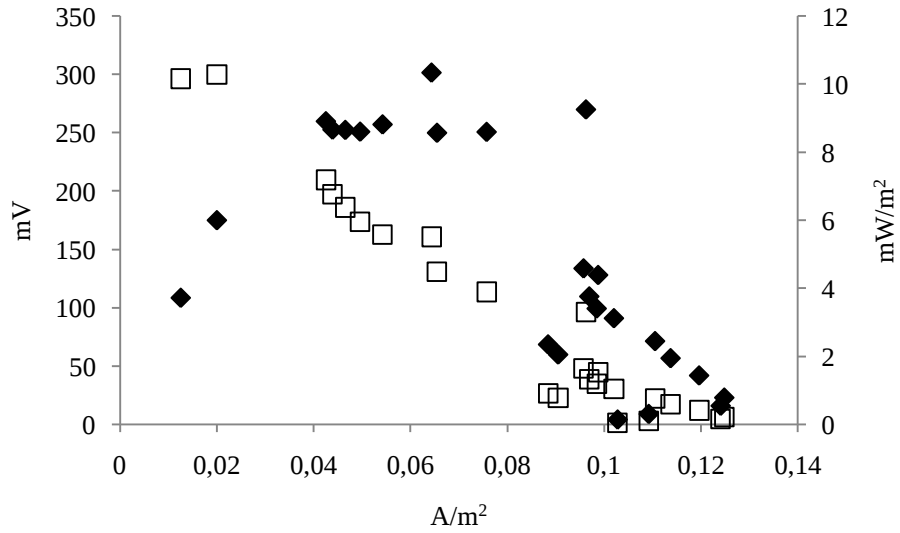
4.3.3.2 Nötral Kırmızısı Medyatörü

MYH medyatörsüz olarak işletildiği süreçte üretilen maksimum güç yoğunluğunun 6,65 mW/m² olduğu tespit edilmiştir (Şekil 4.64).



Şekil 4.64: MYH'nin medyatör ilavesiz olarak işletilmesi sonucu elde edilen güç eğrisi (□=Voltaj, mV; ◆=Güç Yoğ. mW/m²).

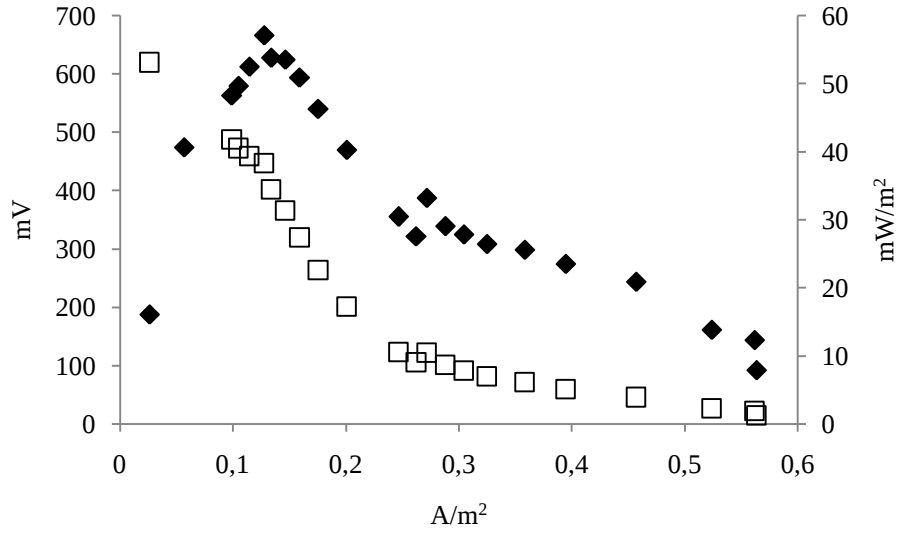
MYH 50 μ M NK ilave edilerek işletildiği süreçte üretilen maksimum güç yoğunluğunun 10,3 mW/m² olduğu tespit edilmiştir (Şekil 4.65). MYH sistemine ilave edilen 50 μ M nötral kırmızı medyatörü ilavesi ile MYH'de üretilen güç miktarı medyatörsüz işletim süreci ile kıyaslandığında 1,53 kat artış meydana gelmiştir.



Şekil 4.65: MYH'nin 50 μ M NK ilavesi ile işletilmesi sonucu elde edilen güç eğrisi (□=Voltaj, mV; ◆=Güç Yoğ. mW/m²).

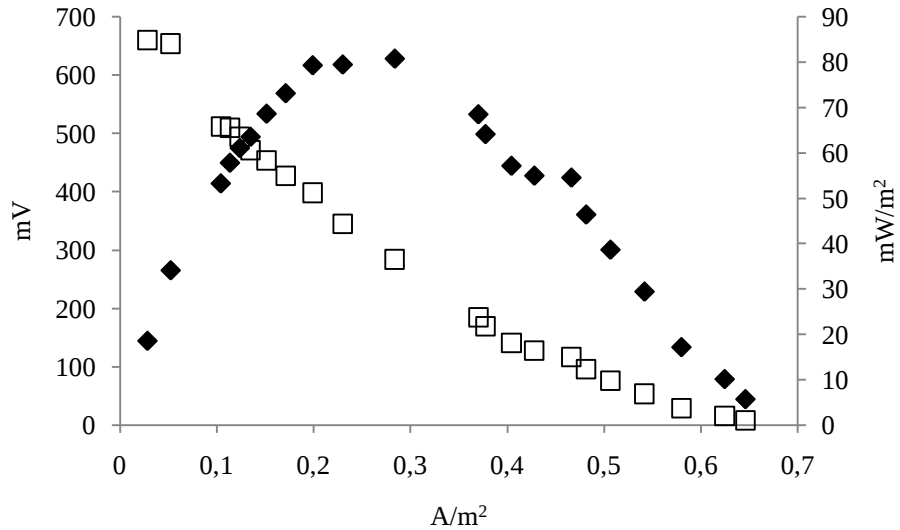
MYH 100 μ M NK ilave edilerek işletildiği süreçte elde edilen maksimum güç yoğunluğunun 57 mW/m² olduğu tespit edilmiştir (Şekil 4.66). MYH sistemine ilave

edilen 100 μM nötral kırmızı medyatörü ilavesi ile MYH’de üretilen güç miktarı medyatörsüz işletim süreci ile kıyaslandığında 8,6 kat artış meydana gelmiştir.



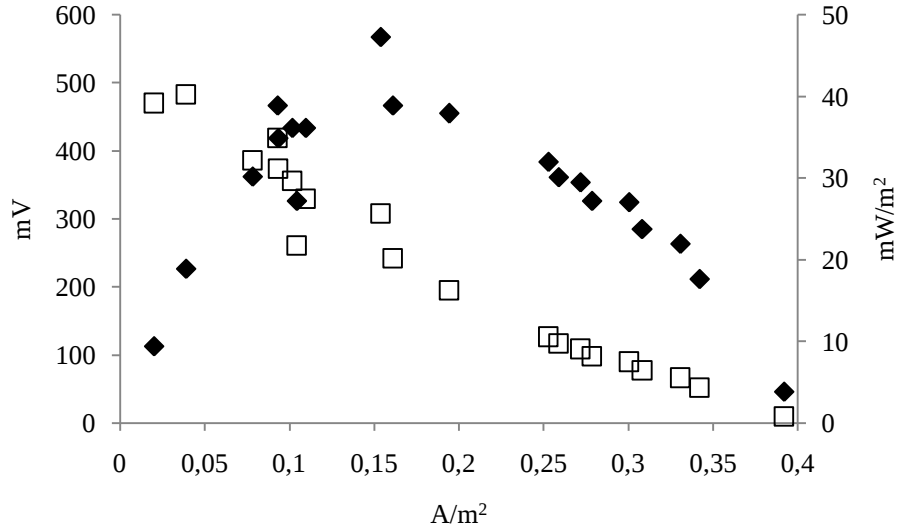
Şekil 4.66: MYH’nin 100 μM NK ilavesi ile işletilmesi sonucu elde edilen güç eğrisi (□=Voltaj, mV; ◆=Güç Yoğ. mW/m²).

MYH 200 μM NK ilave edilerek işletildiği süreçte üretilen maksimum güç yoğunluğunun 80,7 mW/m² olduğu tespit edilmiştir (Şekil 4.67). MYH sistemine ilave edilen 200 μM nötral kırmızı medyatörü ilavesi ile MYH’de üretilen güç miktarı medyatörsüz işletim süreci ile kıyaslandığında 12 kat artış meydana gelmiştir.



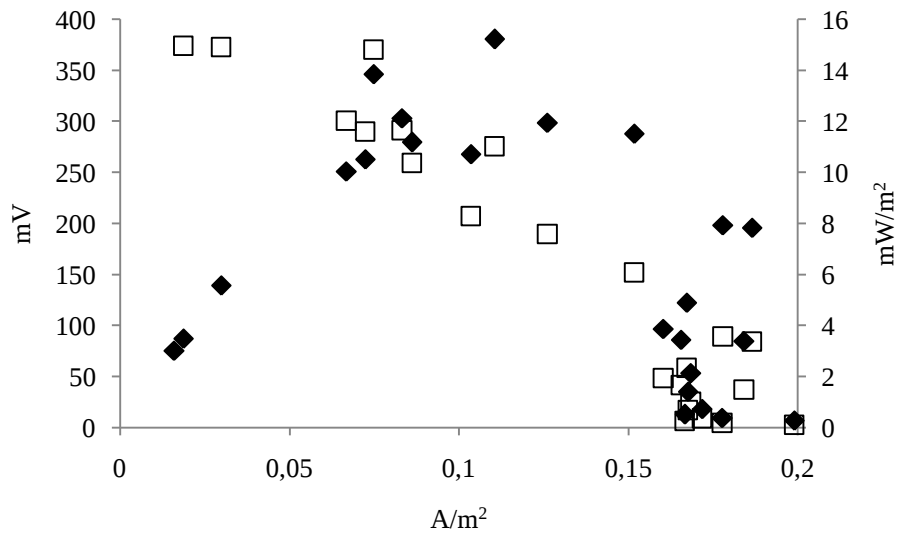
Şekil 4.67: MYH’nin 200 μM NK ilavesi ile işletilmesi sonucu elde edilen güç eğrisi (□=Voltaj, mV; ◆=Güç Yoğ. mW/m²).

MYH 300 μM NK ilave edilerek işletildiği süreçte üretilen maksimum güç yoğunluğunun 47 mW/m^2 olduğu tespit edilmiştir (Şekil 4.68). MYH sistemine ilave edilen 300 μM nötral kırmızı medyatörü ilavesi ile MYH’de üretilen güç miktarı medyatörsüz işletim süreci ile kıyaslandığında 7 kat artış meydana gelmiştir.



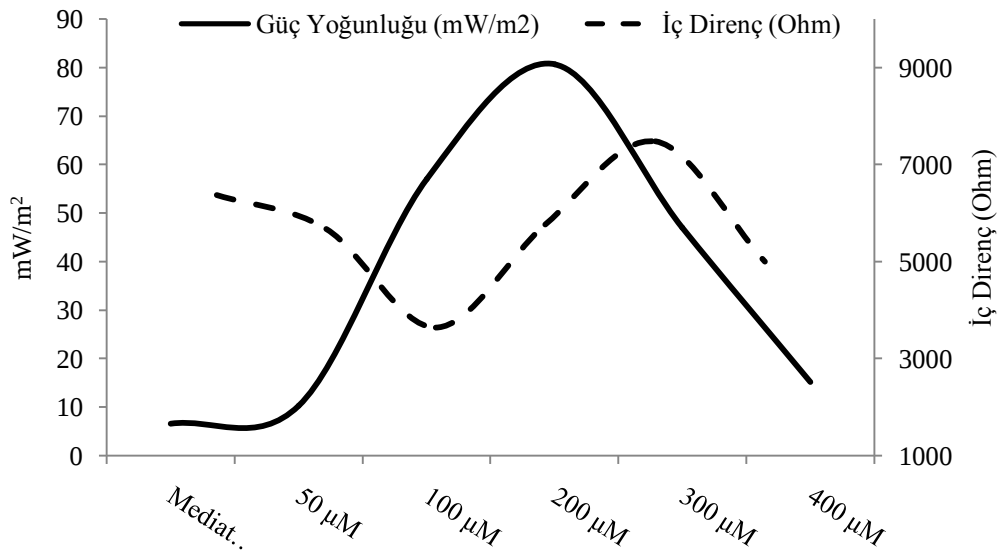
Şekil 4.68: MYH'nin 300 μM NK ilavesi ile işletilmesi sonucu elde edilen güç eğrisi (□=Voltaj, mV; ◆=Güç Yoğ. mW/m^2).

MYH 400 μM NK ilave edilerek işletildiği süreçte üretilen maksimum güç yoğunluğunun 15,2 mW/m^2 olduğu tespit edilmiştir (Şekil 4.69). MYH sistemine ilave edilen 400 μM nötral kırmızı medyatörü ilavesi ile MYH’de üretilen güç miktarı medyatörsüz işletim süreci ile kıyaslandığında 2,3 kat artış meydana gelmiştir.



Şekil 4.69: MYH'nin 400 μM NK ilavesi ile işletilmesi sonucu elde edilen güç eğrisi (□=Voltaj, mV; ◆=Güç Yoğ. mW/m^2).

Şekil 4.70’de grafit elektrot kullanılarak MYH’de farklı konsantrasyonlarda nötral kırmızı medyatörü ilavesi ile üretilen güç yoğunluğu değerleri ve her bir aşamada MYH’de oluşan iç direnç değerleri verilmiştir. Sistem medyatörsüz olarak işletilirken MYH’de üretilen maksimum güç yoğunluğu değeri $6,6 \text{ mW/m}^2$ olmuştur. Sisteme 50, 100 ve 200 μM NK medyatörü ilavesi ile MYH’de üretilen güç yoğunluğu miktarı artmış ve sırası ile 10,3; 57 ve $80,7 \text{ mW/m}^2$ olduğu tespit edilmiştir. Sisteme 200 μM NK ilavesi ile MYH’den elde edilen güç miktarında 12 kat artış olduğu görülmüştür. Najafpour ve arkadaşları (2010) anot elektrotu olarak grafit elektrot kullanıp çift bölmeli bir MYH’de nötral kırmızı medyatörünün etkisini incelemiştir. Elde ettikleri sonuçlara göre medyatör konsantrasyonun 50 μM ’den 200 μM seviyesine çıkarılmasıyla yaklaşık 2,5 kat güç artışı sağlamışlardır. Bir diğer çalışmada Kong vd. (2011) grafit çubuk elektrot kullandıkları çalışmada 1,7 mmol/L nötral kırmızı ilavesi ile MYH’de üretilen voltaj değeri 610 mV’dan 900 mV değerine yükselmiştir. Diğer bir çalışmada Sevda vd. (2012) farklı konsantrasyonda nötral kırmızı medyatörü ile çift bölmeli bir MYH’de güç üretimini araştırmış ve 0,01 mM nötral kırmızı medyatörü ile maksimum güç yoğunluğunu $12,02 \text{ mW/m}^2$ olarak elde etmiştir.

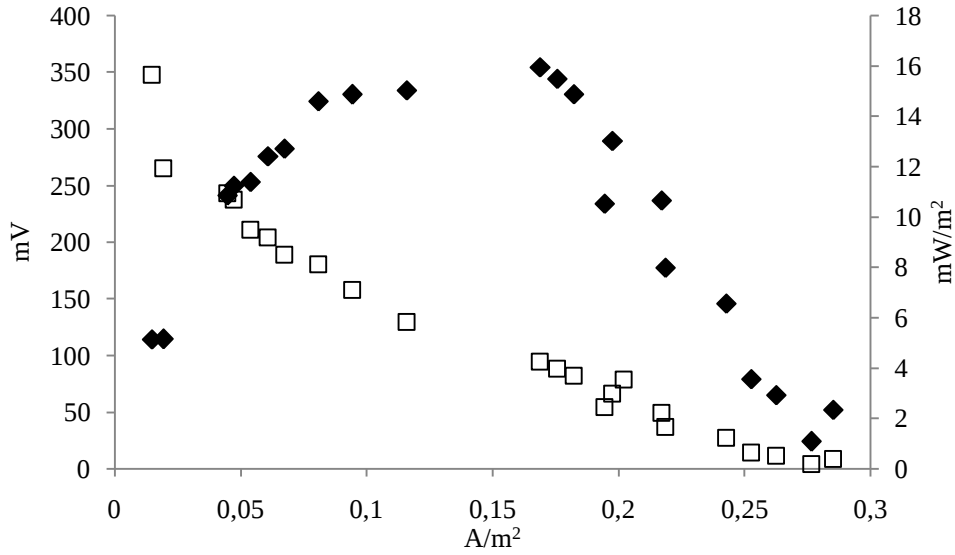


Şekil 4.70: Farklı NK konsantrasyonları için elde edilen güç yoğunluğu-İç direnç değerleri

MYH iç direncinin ise medyatörsüz işletim sürecinde 6371 Ω olduğu tespit edilmiştir. Sistem en düşük iç direnç değerine 100 μM NK ilave edildiği süreçte sahip olmuştur. 300 μM NK ilave edildiği süreçte MYH iç direnci 3650 Ω olmuştur.

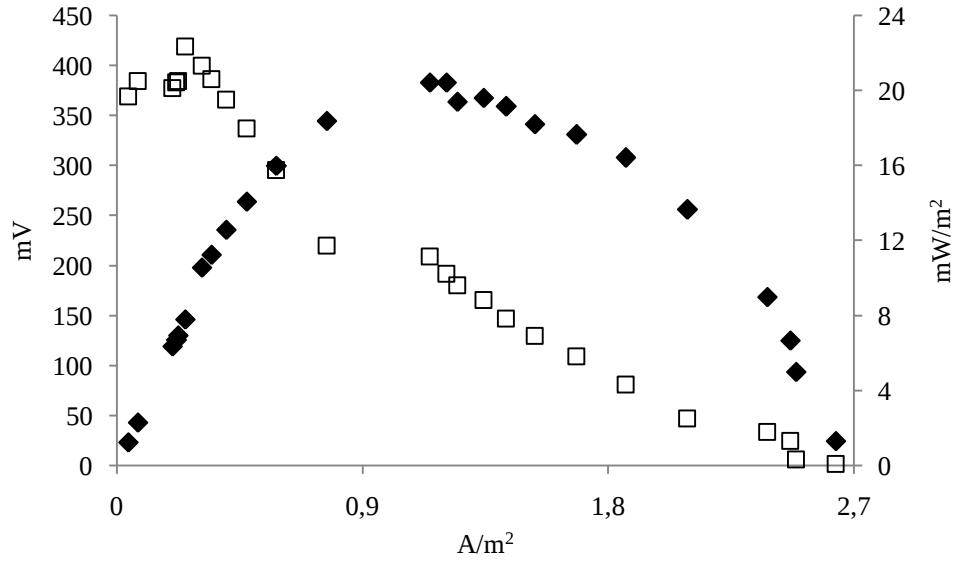
4.3.3.3 HNQ Medyatörü

MYH medyatörsüz olarak işletildiği süreçte üretilen maksimum güç yoğunluğunun 16 mW/m^2 olduğu tespit edilmiştir (Şekil 4.71).



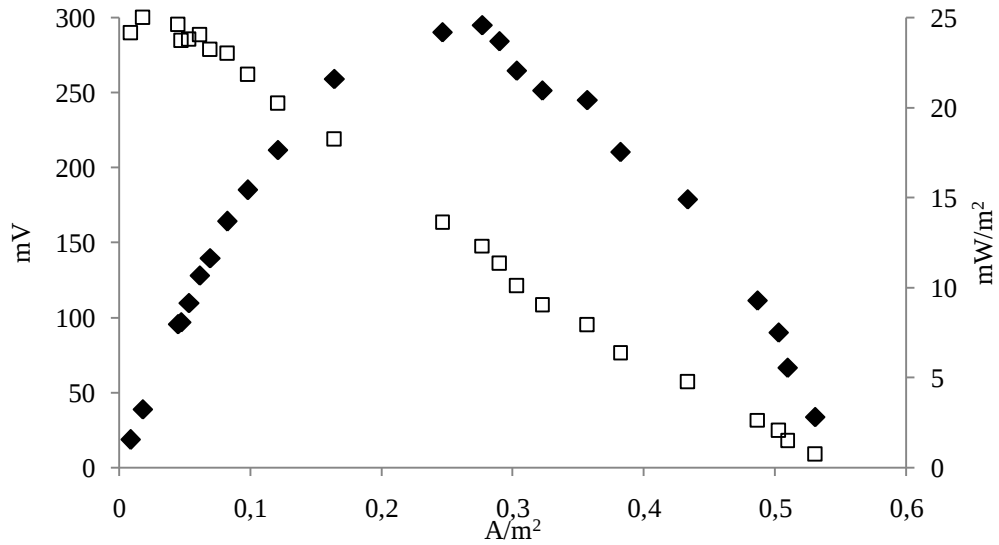
Şekil 4.71: MYH'nin medyatör ilavesiz olarak işletilmesi sonucu elde edilen güç eğrisi (□=Voltaj, mV; ◆=Güç Yoğ. mW/m²).

MYH $50 \mu\text{M}$ HNQ ilave edilerek işletildiği süreçte üretilen maksimum güç yoğunluğunun 20 mW/m^2 olduğu tespit edilmiştir (Şekil 4.72). MYH sistemine ilave edilen $50 \mu\text{M}$ HNQ medyatörü ilavesi ile MYH'de üretilen güç miktarı medyatörsüz işletim süreci ile kıyaslandığında 1,25 kat artış meydana gelmiştir.



Şekil 4.72: MYH'nin 50 µM HNQ ilavesi ile işletilmesi sonucu elde edilen güç eğrisi (□=Voltaj, mV; ◆=Güç Yoğ. mW/m²).

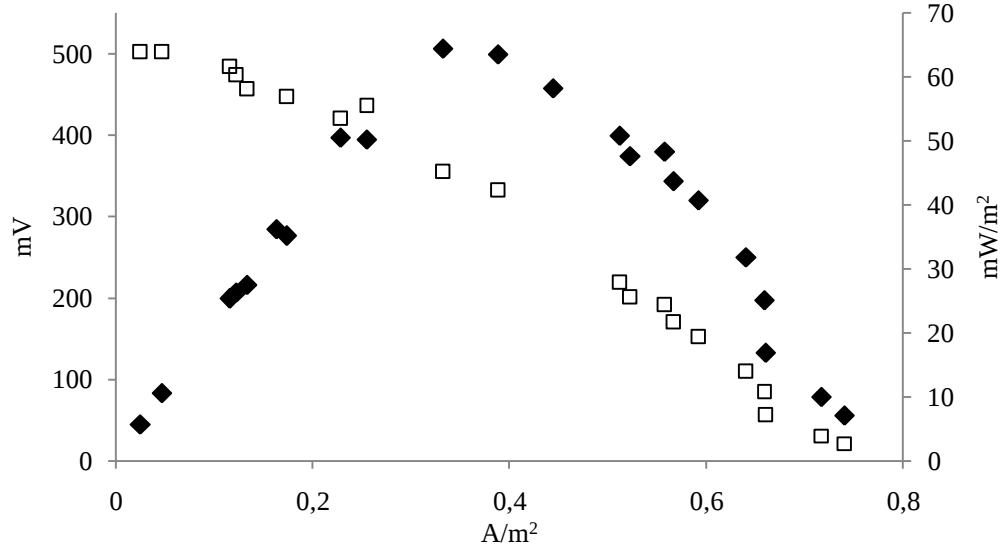
MYH 100 µM HNQ ilave edilerek işletildiği süreçte üretilen maksimum güç yoğunluğunun 24,5 mW/m² olduğu tespit edilmiştir (Şekil 4.73). MYH sistemine ilave edilen 100 µM HNQ medyatörü ilavesi ile MYH'de üretilen güç miktarı medyatörsüz işletim süreci ile kıyaslandığında 1,5 kat artış meydana gelmiştir.



Şekil 4.73: MYH'nin 100 µM HNQ ilavesi ile işletilmesi sonucu elde edilen güç eğrisi (□=Voltaj, mV; ◆=Güç Yoğ. mW/m²).

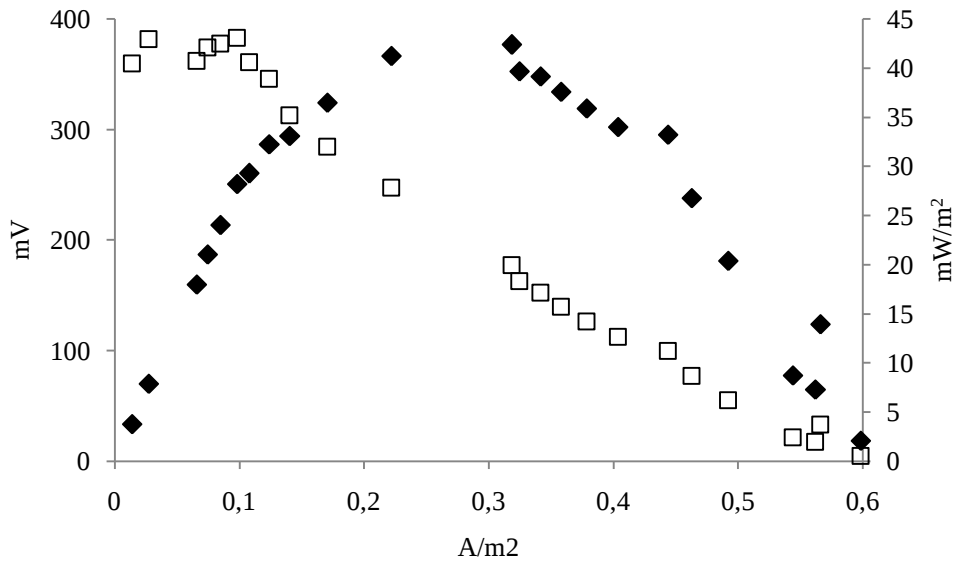
MYH 200 µM HNQ ilave edilerek işletildiği süreçte üretilen maksimum güç yoğunluğunun 64 mW/m² olduğu tespit edilmiştir (Şekil 4.74). MYH sistemine ilave

edilen 200 μM HNQ medyatörü ilavesi ile MYH'de üretilen güç miktarı medyatörsüz işletim süreci ile kıyaslandığında 4 kat artış meydana gelmiştir.



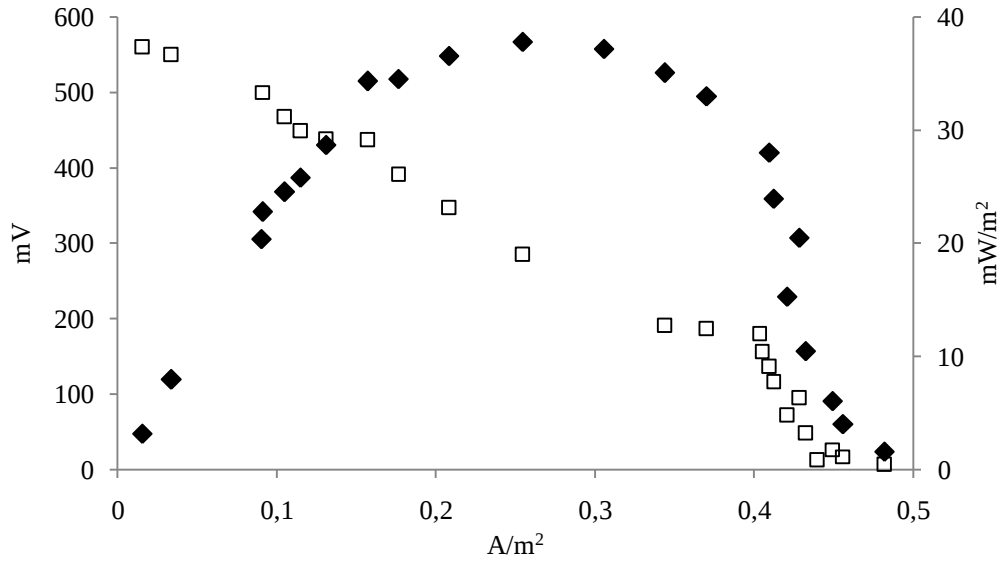
Şekil 4.74: MYH'nin 200 μM HNQ ilavesi ile işletilmesi sonucu elde edilen güç eğrisi (□=Voltaj, mV; ◆=Güç Yoğ. mW/m²).

MYH 300 μM HNQ ilave edilerek işletildiği süreçte üretilen maksimum güç yoğunluğunun 42 mW/m² olduğu tespit edilmiştir (Şekil 4.75). MYH sistemine ilave edilen 300 μM HNQ medyatörü ilavesi ile MYH'de üretilen güç miktarı medyatörsüz işletim süreci ile kıyaslandığında 2,6 kat artış meydana gelmiştir.



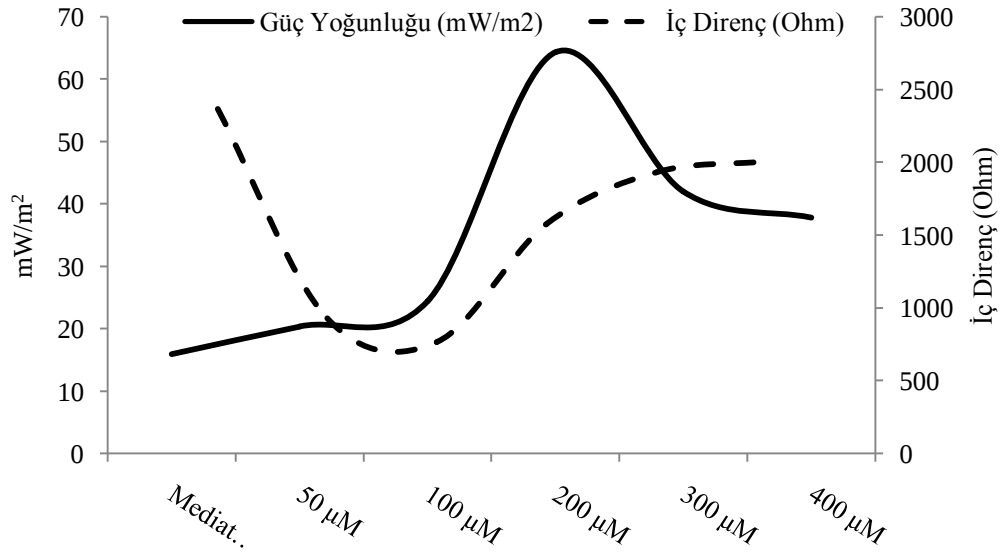
Şekil 4.75: MYH'nin 300 μM HNQ ilavesi ile işletilmesi sonucu elde edilen güç eğrisi (□=Voltaj, mV; ◆=Güç Yoğ. mW/m²).

MYH 400 μM HNQ ilave edilerek işletildiği süreçte üretilen maksimum güç yoğunluğunun 38 mW/m^2 olduğu tespit edilmiştir (Şekil 4.76). MYH sistemine ilave edilen 400 μM HNQ medyatörü ilavesi ile MYH’de üretilen güç miktarı medyatörsüz işletim süreci ile kıyaslandığında 2,8 kat artış meydana gelmiştir.



Şekil 4.76: MYH'nin 400 μM HNQ ilavesi ile işletilmesi sonucu elde edilen güç eğrisi (□=Voltaj, mV; ◆=Güç Yoğ. mW/m^2).

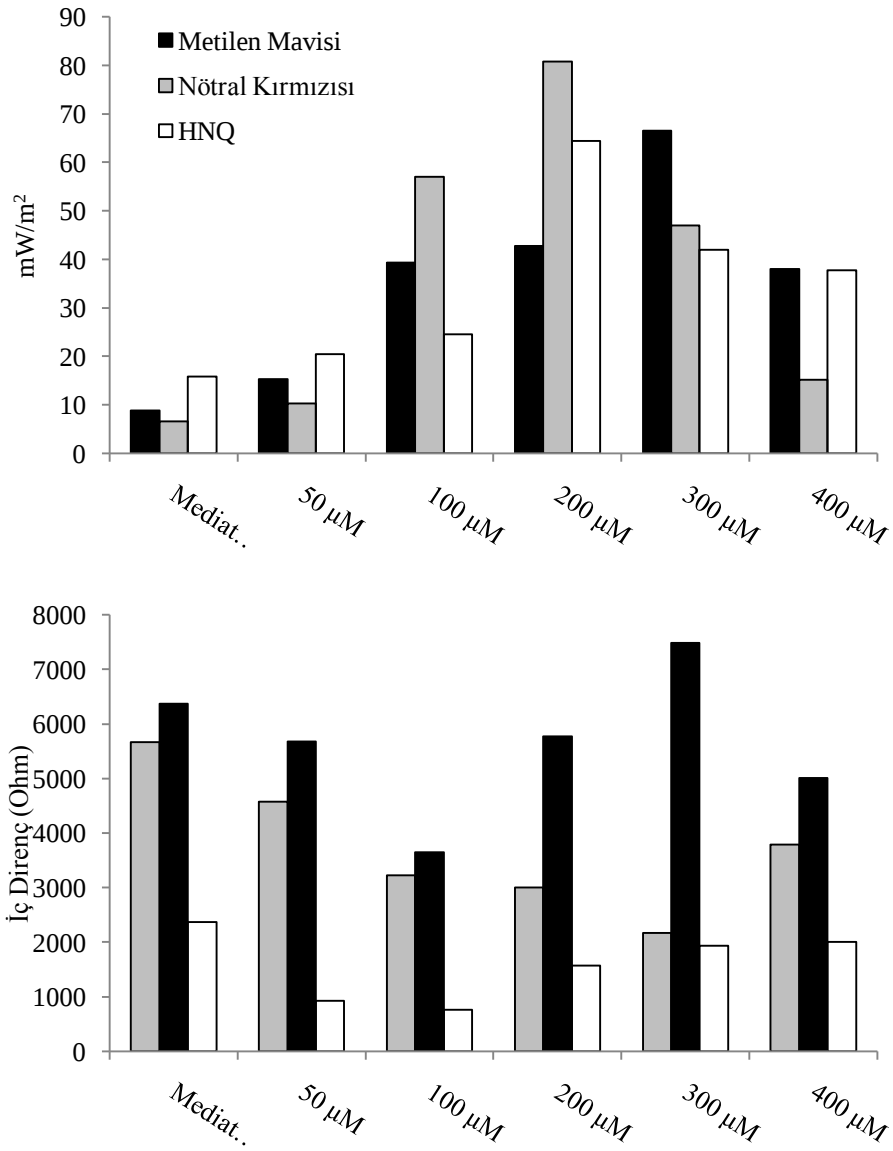
Şekil 4.77’de grafit elektrot kullanılarak MYH’de farklı konsantrasyonlarda HNQ medyatörü ilavesi ile üretilen güç yoğunluğu değerleri ve her bir aşamada MYH iç direnci değerleri verilmiştir. MYH medyatörsüz olarak işletilirken üretilen maksimum güç yoğunluğu değeri 15,94 mW/m^2 dir. Sisteme 50, 100 ve 200 μM HNQ medyatörü ilavesi ile MYH’de üretilen maksimum güç yoğunluğu miktarı giderek artmış ve sırasıyla 20, 49 ve 64 mW/m^2 olduğu tespit edilmiştir. 200 μM HNQ ilavesi ile sistemden elde edilen güç yoğunluğu miktarı 4 kat artmıştır. Sisteme 300 ve 400 μM HNQ ilavesi ile MYH’den elde edilen güç yoğunluğu miktarı sırası ile 42 ve 38 mW/m^2 olduğu belirlenmiştir. Rhoads vd. (2005) yaptıkları çalışmada 0,05 mM HNQ mediyatörü kullanılarak MYH’de on kat daha fazla güç ürettiklerini belirtmişlerdir.



Şekil 4.77: Farklı HNQ konsantrasyonları için elde edilen güç yoğunluğu-iç direnç değerleri

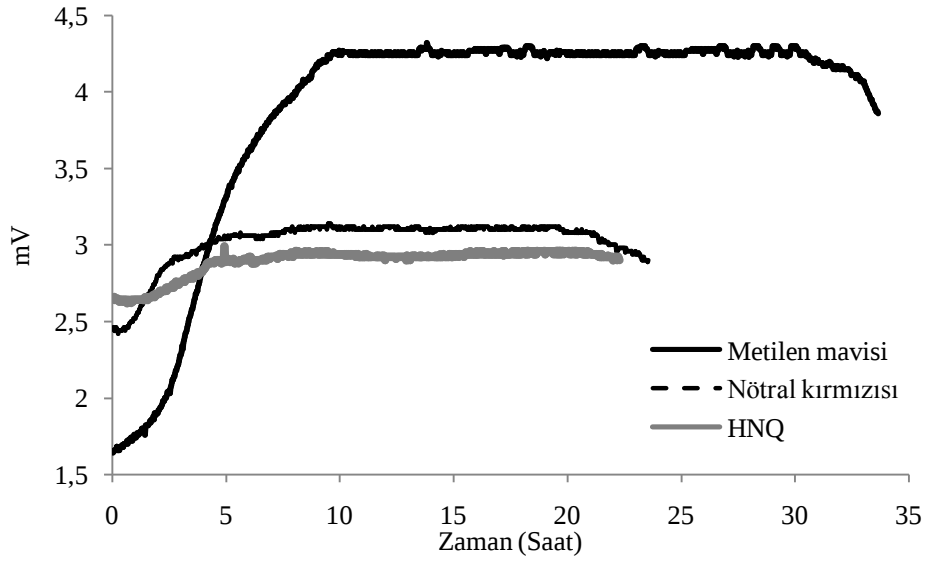
MYH iç direnci ise medyatörsüz işletim sürecinde 2370 Ω olduğu tespit edilmiştir. Sisteme 50 ve 100 μM HNQ ilave edildiğinde MYH iç direnci azalarak 928 ve 766 Ω olduğu belirlenmiştir. MYH iç direnci 300 ve 400 μM HNQ ilave edildiğinde artmaya başlamış ve sırası ile 1934 ve 2006 Ω olmuştur.

Grafit elektrot kullanılan MYH'de farklı medyatörler için üretilen güç yoğunluğu ve iç direnç değerleri toplu olarak Şekil 4.78'de verilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre grafit elektrot için en yüksek güç miktarı 200 μM HNQ medyatörü ilavesinde elde edilmiştir. Farklı medyatörlerin kullanılması bakır kumaş elektrot kullanılan MYH'de elde edilen güç değerleri sıralaması HNQ>MM>NK şeklinde gerçekleşmiştir. Bu sonuca paralel olarak Daniel vd. (2009) grafit elektrotun kullanıldığı bir MYH'de metilen mavisi ve nötral kırmızı mediyatörünü kullanmıştır. Metilen mavisi medyatörü ile 2,2 mV açık devre voltajı elde edilirken nötral kırmızı medyatörü ile 1,73 mV açık devre voltajı elde etmişlerdir.



Şekil 4.78: Grafit elektrotun kullanıldığı MYH’de üretilen güç ve iç direnç değerleri

Bakır kumaş elektrotun kullanıldığı MYH’de metilen mavisi, nötral kırmızısı ve HNQ medyatörünün ilave edilmesi ile voltaj üretim süreleri Şekil 4.79’da verilmiştir. Elde edilen değerlere göre MYH sistemine 400 µM metilen mavisi ilavesi ile voltaj üretimi 22 saat kararlı halde seyretmiştir. 300 µM nötral kırmızısı ve HNQ medyatörünün ilavesi ile sırası ile 17 ve 18 süre ile kararlı halde devam etmiştir.



Şekil 4.79: Farklı medyatörler ile MYH’de voltaj üretimi

Medyatör çalışmalarında metilen mavisi medyatörü ile yapılan çalışmalarda 300 μM medyatör ilavesi ile MYH sisteminde en yüksek güç üretimi meydana gelmiştir. Bakır kumaş, grafit ve Ti-TiO₂ elektrotları içerisinde en yüksek güç artışı 7,8 kat artış ile grafit elektrotun kullanıldığı MYH’de elde edilmiştir. Nötral kırmızı medyatörü ile yapılan denemelerde güç artışı için optimum medyatör konsantrasyonunun 200 μM olduğu belirlenmiştir. Ayrıca medyatörsüz işleme göre 3 kat artış ile en yüksek güç artışı bakır kumaş elektrotun kullanıldığı MYH’de elde edilmiştir. HNQ medyatörü ile yapılan çalışmalarda ise bakır kumaş elektrot ve Ti-TiO₂ elektrotlar için optimum HNQ konsantrasyonlarının 50 μM olduğu grafit elektrot için ise 200 μM medyatör ilavesinin güç artışı için optimum konsantrasyon olduğu belirlenmiştir. Medyatörlerin anot elektrodu yüzeyine adsorpsiyonu aktif olan elektrot yüzeyini kısıtlamakta MYH’de üretien güç miktarını azalttığı bilinmektedir. Popov ve arkadaşları (2012) yaptıkları çalışmada metilen mavisi medyatörünün karbon elektrot yüzeyine adsorplanma özelliğinin nötral kırmızısı medyatöründen daha etki olduğunu belirtmişlerdir. Yapılan tez çalışmasında buna paralel olarak grafit ve Ti-TiO₂ elektrotun kullanıldığı MYH’lerde nötral kırmızı medyatörü ile daha fazla güç artışı elde edilmiştir. Bu durum nötral kırmızı mediyatörünün elektrot yüzeyine adsorplanma özelliğinin daha az olması nedeni ile elektron iletiminin yavaşlamadığını kanıtlamaktadır. Medyatör çalışmasında her üç medyatör için en yüksek güç artışı grafit elektrotun kullanıldığı MYH’de gerçekleşmiştir. Bu durum medyatörlerin

grafit elektrot yüzeyine adsorplanma kapasitesinin bakır kumaş elektrot ve grafit elektrotla kıyasla daha düşük olduğunu kanıtlamaktadır.

4.4 Gerçek Atıksularla Yapılan Elektrik Üretim Çalışmaları

Yapılan çalışmada gerçek atıksular kullanılarak farklı elektrot malzemeleri ile MYH’de elektrik üretim kapasitesi araştırılmıştır. Çalışmada evsel atıksu, mezbaha atıksuyu ve yağ endüstrisi atıksuları kullanılmıştır. Farklı tesislerden alınan atıksular ilk olarak ön arıtmadan geçirilerek MYH sistemine verilmiştir. Farklı elektrotların kullanıldığı MYH’lere atıksu beslemesi aynı besleme kabından yapılarak her bir MYH reaktörüne aynı özellikte ve aynı miktarda organik yükün girmesi amaçlanmıştır. MYH reaktörlerindeki elektrik üretimi stabil hale geldikten sonra hidrolik bekletme süreleri değiştirilerek reaktörlerin farklı organik yükleme oranlarında elektrik üretim kapasiteleri ve organik madde giderim miktarları tespit edilmiştir. Farklı atıksular ile yapılan çalışmalar ile elde edilen sonuçlar aşağıda verilmiştir.

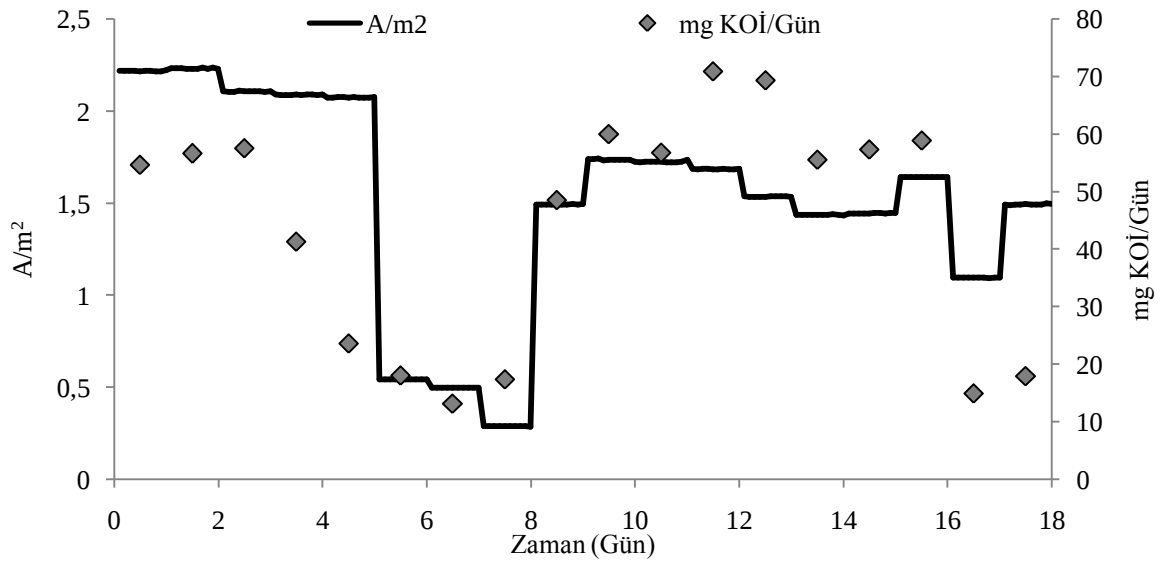
4.4.1 Evsel Atıksular

Evsel atıksular kullanılarak MYH’de elektrik üretim potansiyelini belirlemek amacıyla yapılan çalışmalarda arıtma tesisinin ön çökeltme havuzu savak çıkışından alınan atıksular kullanılmıştır. Evsel atıksular ile yapılan çalışmada bakır kumaş elektrot, Al-Ni alaşımı elektrot ve grafit elektrotlar anot elektrotu olarak kullanılmıştır. Her üç reaktörde platin kaplamalı titanyum elektrot katot elektrotu olarak kullanılmıştır.

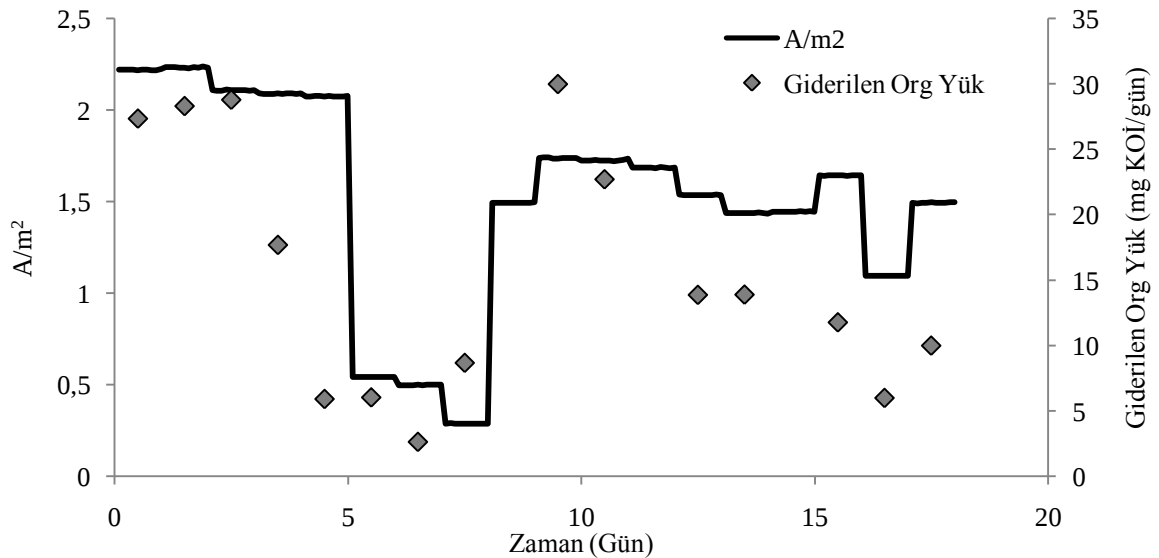
4.4.1.1 Bakır Kumaş Elektrodun Kullanılması

Evsel atıksular kullanılarak doğrudan elektrik üretim çalışmasında bakır kumaş elektrotun kullanıldığı MYH’de sisteme verilen organik madde miktarı zamana göre değişecek şekilde çalışılmıştır. Sisteme verilen organik yük ve MYH’de giderilen organik yük miktarına bağlı olarak üretilen güç miktarı araştırılmıştır. Sisteme verilen organik yük miktarına bağlı olarak üretilen güç miktarı Şekil 4.80’de verilmiştir. MYH’ye verilen organik yük miktarı ilk olarak ortalama 56 mg KOİ/gün civarında verilmiş ve MYH’de üretilen akım yoğunluğu miktarı ortalama 2,23 A/m² olarak elde edilmiştir. Organik yük

miktarının 13 mg KOİ/gün düzeyine düşürülmesi ile üretilen akım miktarı $0,54 \text{ A/m}^2$ değerine düşmüştür. Daha sonra organik yük miktarı 70 mg KOİ/gün değerine yükseltilmiş ve bu yük beslemesi ile MYH’de üretilen akım miktarı $1,72 \text{ A/m}^2$ olmuştur. Bu durum MYH’de giderilen organik yük miktarı ile ilişkilidir. Şekil 4.81’de sistemde üretilen güç miktarının giderilen organik yük miktarı ile orantılı olduğu MYH’de giderilen organik madde miktarının artışı ile üretilen güç miktarının arttığı görülmüştür.



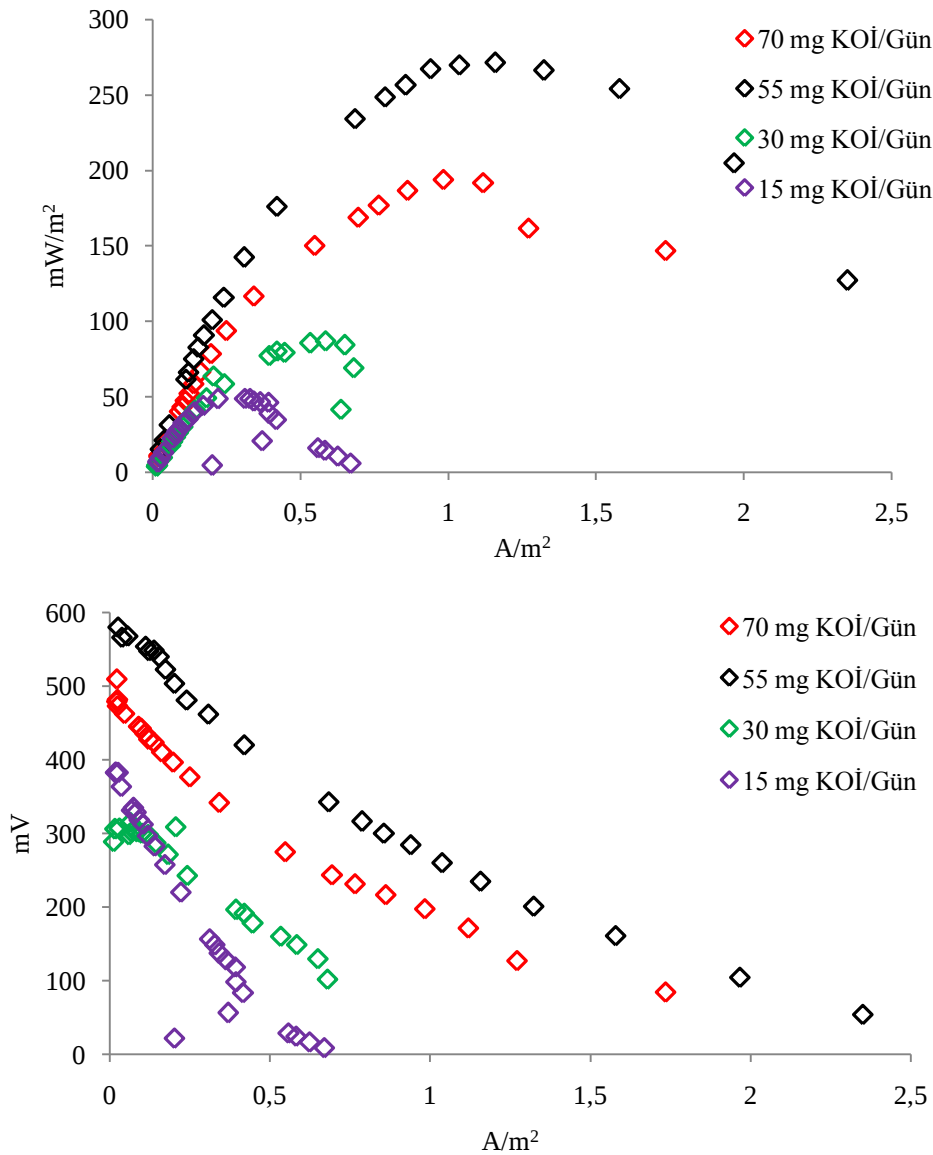
Şekil 4.80: Bakır kumaş elektrot ile evsel atıksu kullanılarak sisteme verilen organik yük ve üretilen güç yoğunluğu



Şekil 4.81: Bakır kumaş elektrot ile evsel atıksu kullanılarak sistemde giderilen organik madde miktarı ve üretilen güç yoğunluğu

Sisteme verilen organik madde miktarı 15, 30, 55, 70 mg KOİ/gün değerlerinde MYH’de üretilen maksimum güç yoğunluğu güç eğrileri oluşturularak tespit edilmiştir

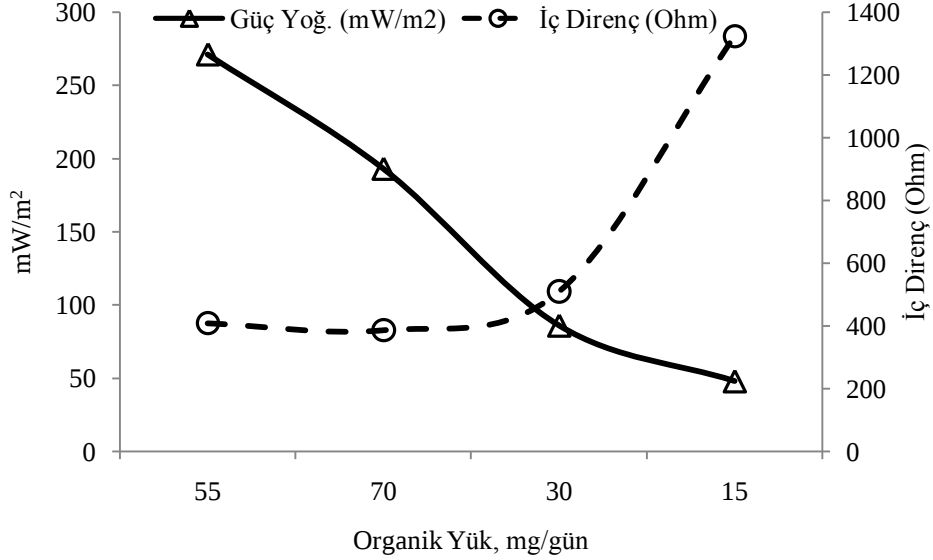
(Şekil 4.82). Elde edilen sonuçlarda sistemde üretilen maksimum güç yoğunluğu miktarı 15 mg KOİ/gün için 48 mW/m², 30 mg KOİ/gün için 86 mW/m², 55 mg KOİ/gün için 271 mW/m² ve organik madde miktarı 70 mg KOİ/gün değerine yükseltildiğinde MYH’de 193 mW/m² güç üretilmiştir. Elde edilen sonuçlardan 55 mg KOİ/gün’lük organik yükleme değerinin MYH’de üretilen güç miktarı açısından optimum organik yük değeri olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 4.82: Bakır kumaş elektrot ile farklı organik maddeler için üretilen maksimum güç yoğunluğu miktarları ($\square$ =Voltaj, mV ; $\blacklozenge$ =Güç Yoğ. mW/m^2).

Sisteme verilen farklı organik yükleme değerlerinin MYH iç direnci üzerindeki etkisini tespit etmek amacıyla her bir aşamada MYH iç direnç değerleri tespit edilmiştir (Şekil 4.83). 15 mg KOİ/gün lük organik yükleme değerinde MYH iç direnci 1323 Ω , 30

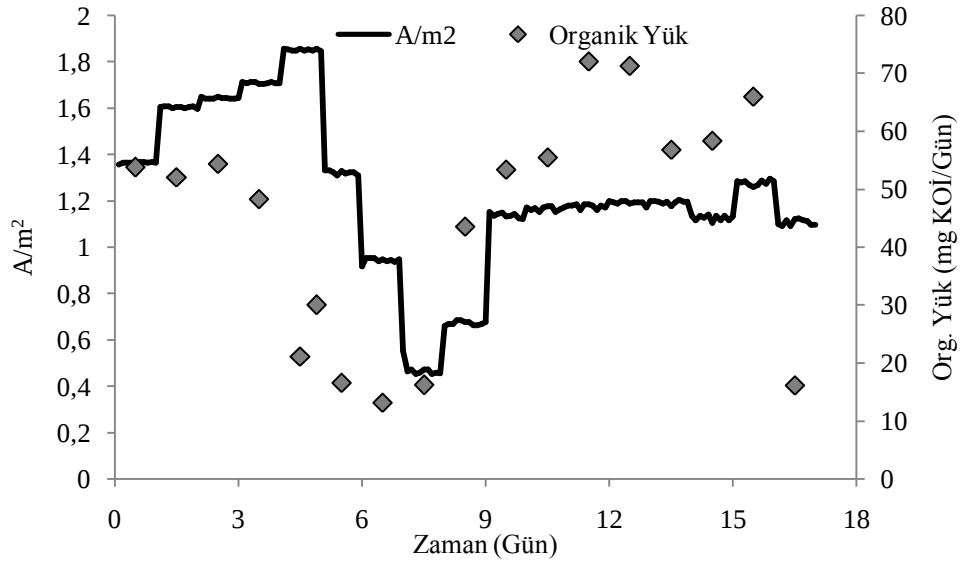
mg KOİ/gün için 509 Ω , 55 mg KOİ/gün için 408 Ω ve organik madde miktarı 70 mg KOİ/gün olarak sisteme verildiğinde MYH iç direnci 386 Ω değerine yükselmiştir. MYH reaktöründeki iç direnç değerinin düşüşü ile MYH’de üretilen güç miktarı artmıştır.



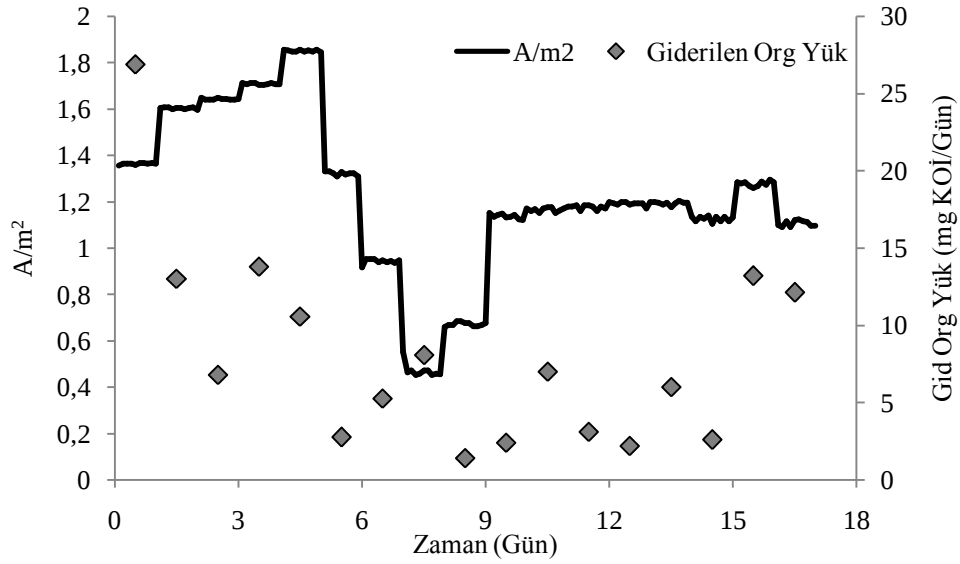
Şekil 4.83: Farklı organik madde değerlerinde MYH’den elde edilen maksimum güç yoğunluğu ve MYH iç direncinin değişimi

4.4.1.2 Al-Ni Elektrodunun Kullanılması

Bu çalışmada, Al-Ni alaşımı elektrotun kullanıldığı MYH’de sisteme verilen organik madde miktarı zamana bağlı olarak değiştirilmiştir. Bu sayede sisteme verilen organik madde miktarı ve giderilen organik madde miktarına bağlı olarak MYH’deki güç üretiminin değişimi izlenmiştir. Sisteme verilen organik madde miktarına bağlı olarak MYH’de üretilen akım yoğunluğu miktarı Şekil 4.84’de verilmiştir. Sisteme verilen organik madde miktarı ortalama 55 mg KOİ/gün civarındayken MYH’de üretilen akım yoğunluğu miktarı ortalama 1,4 A/m² olduğu tespit edilmiştir. Organik yük miktarının 13 mg KOİ/gün düzeyine düşürülmesi ile MYH’de üretilen akım miktarı 0,47 A/m² değerine düşmüştür. Daha sonra organik madde miktarının 72 mg KOİ/gün değerine çıkarılması ile üretilen akım miktarı 1,18 A/m² olmuştur. Sistemde verilen organik madde miktarının artışı ile MYH’de giderilen organik yük miktarı azalmıştır. Buna bağlı olarak üretilen akım miktarı azalmıştır. Bu durum MYH’de giderilen organik yük miktarına bağlıdır. Şekil 4.85’de görüldüğü üzere sistemde giderilen organik madde miktarının azalması ile birlikte MYH’de üretilen akım miktarı azalmıştır.

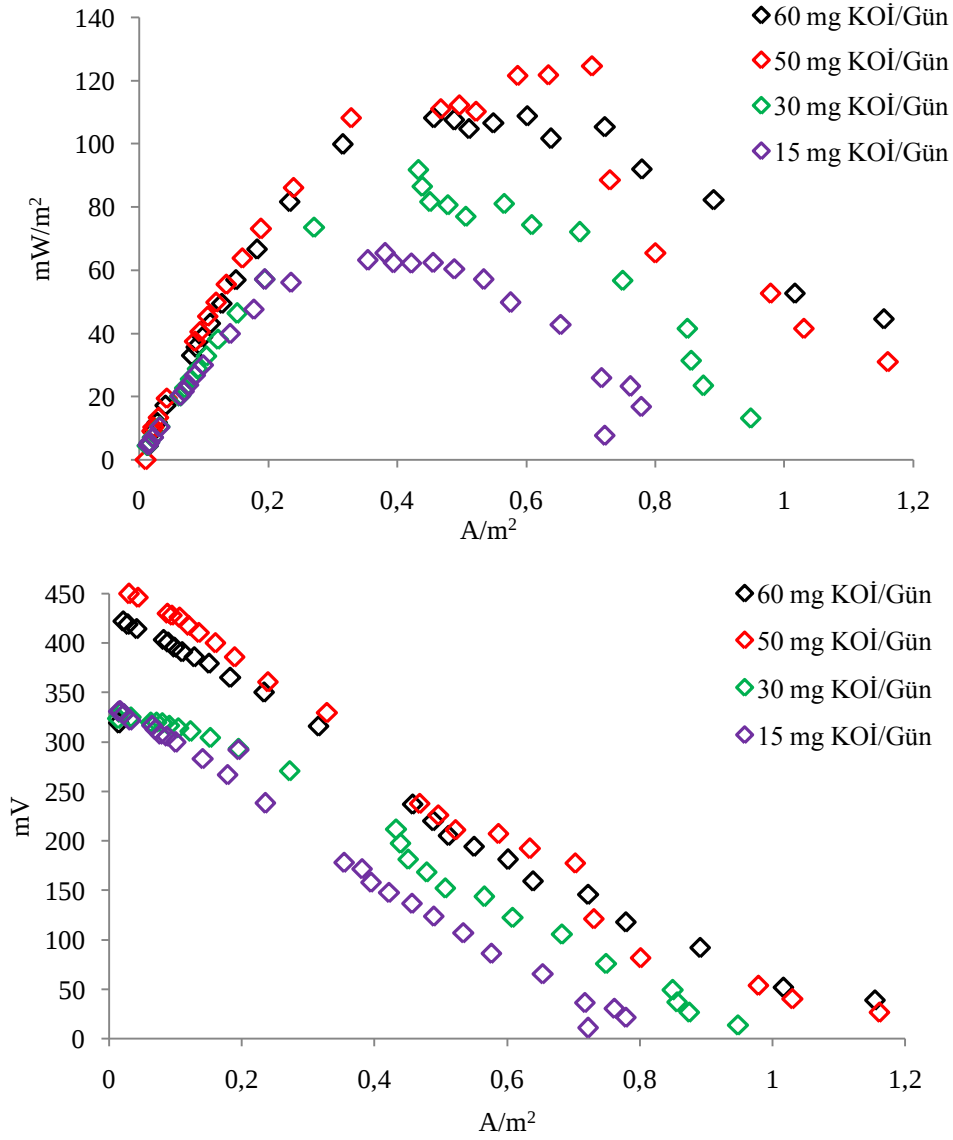


Şekil 4.84: Al-Ni alaşımlı elektrot ile evsel atıksu kullanılarak sisteme verilen organik madde miktarı ve üretilen güç yoğunluğu değerleri



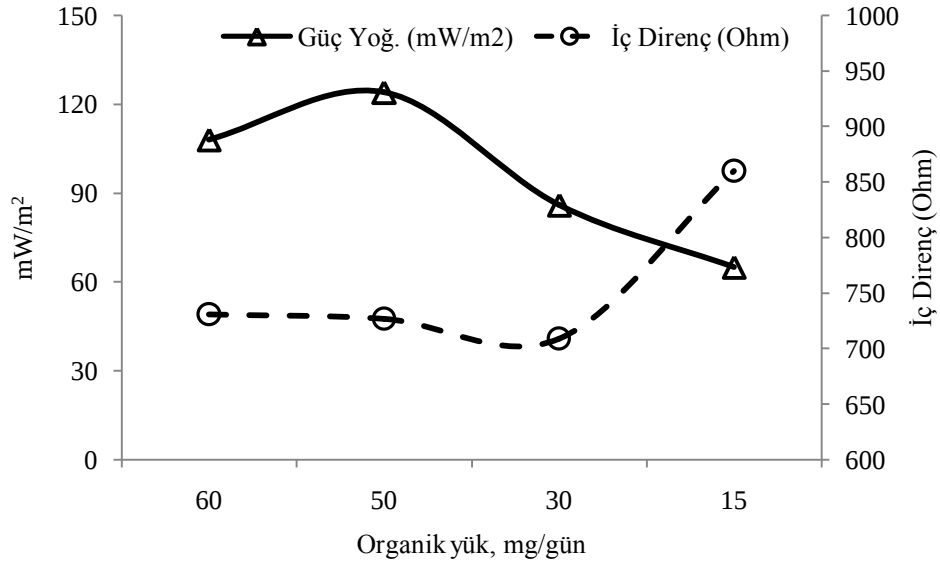
Şekil 4.85: Al-Ni alaşımlı elektrot ile evsel atıksu kullanılarak sistemde giderilen organik madde miktarı ve üretilen güç yoğunluğu değerleri

Çalışma kapsamında, sisteme verilen organik madde miktarı 15, 30, 50, 60 mg KOİ/gün değerlerinde MYH sisteminde polarizasyon eğrileri oluşturulmuş ve sisteminde üretilen maksimum güç yoğunluğu tespit edilmiştir (Şekil 4.86). Elde edilen sonuçlarda sistemde üretilen maksimum güç yoğunluğu 15 mg KOİ/gün için 65 mW/m², 30 mg KOİ/gün için 86 mW/m², 50 mg KOİ/gün için 124 mW/m² ve organik madde miktarı 60 mg KOİ/gün olarak sisteme verildiğinde MYH'de 108 mW/m² güç yoğunluğu elde edilmiştir. Elde edilen sonuçlardan 50 mg KOİ/gün'lük organik yük değerinin MYH'de üretilen güç miktarı üzerinde optimum değer olduğu tespit edilmiştir (Şekil 4.86).



Şekil 4.86: Al-Ni alaşımlı elektrot ile farklı organik maddeler için üretilen maksimum güç yoğunluğu değerleri ($\square$ =Voltaj, mV; $\blacklozenge$ =Güç Yoğ. mW/m^2).

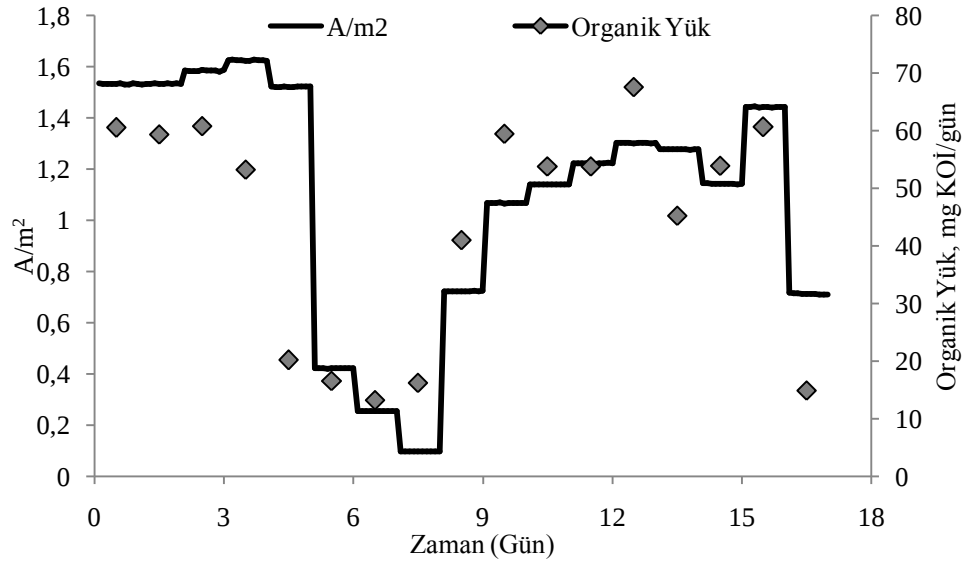
Sisteme yapılan farklı organik yükleme miktarlarında MYH’de üretilen güç yoğunluğunda MYH iç direnç değerleri tespit edilmiştir (Şekil 4.87). MYH’ye besleme yapılan organik yük miktarı 15 mg KOİ/gün değerinde MYH iç direnci 860 Ω , 30 mg KOİ/gün için 709 Ω , 50 mg KOİ/gün için 727 Ω ve organik madde miktarı 60 mg KOİ/gün olarak sisteme verildiğinde MYH iç direnci 731 Ω olduğu belirlenmiştir. MYH iç direncinin azalması ile üretilen güç miktarının arttığı görülmüştür.



Şekil 4.87: Farklı organik madde değerlerinde MYH'den elde edilen maksimum güç yoğunluğu ve MYH iç direncinin değişimi

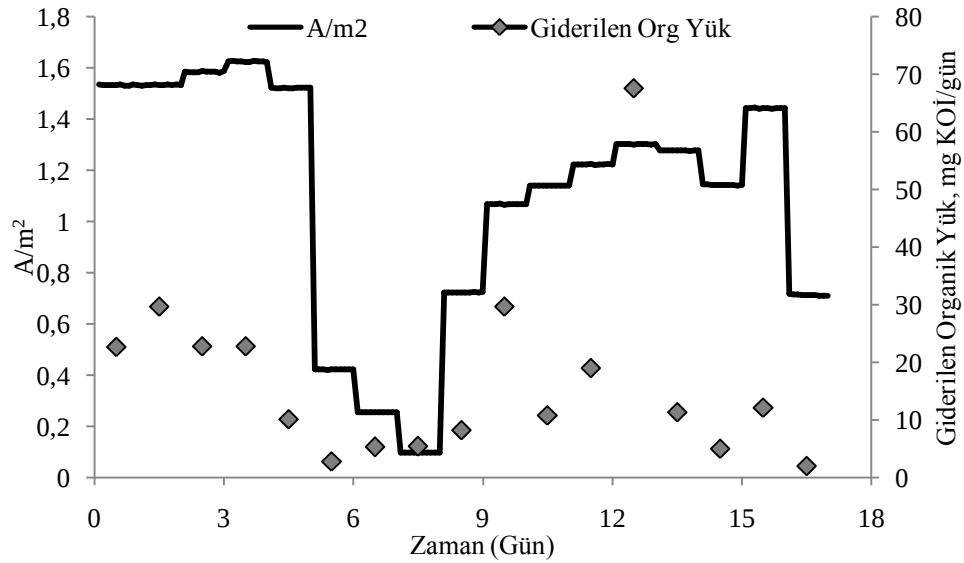
4.4.1.3 Grafit Elektrotun Kullanılması

Grafit elektrotun kullanıldığı MYH'ye verilen organik madde miktarı zamana bağlı olarak değiştirilmiştir. Çalışma kapsamında, sisteme verilen organik yük ve sistemde giderilen organik yük miktarına bağlı olarak MYH'deki güç üretimi araştırılmıştır. Sisteme verilen organik yük miktarına bağlı olarak üretilen akım yoğunluğu miktarı Şekil 4.88'da verilmiştir. Organik yük miktarı ilk olarak ortalama 60 mg KOİ/gün civarında tutulmuş ve MYH'de üretilen akım miktarının 1,5 A/m² seviyesinde olduğu görülmüştür. Sisteme verilen organik yük miktarının 13 mg KOİ/gün düzeyine düşürülmesi ile üretilen akım miktarı 0,25 A/m² değerine düşmüştür. Daha sonra organik yük miktarı 54 mg KOİ/gün seviyesine çıkarılmış ve üretilen güç miktarı 1,21 mW/m² olmuştur. Bu durum MYH'de giderilen organik yük miktarına bağlıdır. Şekil 4.89'de görüldüğü üzere sistemde üretilen güç miktarı giderilen organik yük ile orantılı bir şekilde değişim göstermiştir.



Şekil 4.88: Grafit elektrot ile evsel atıksu kullanılarak sisteme verilen organik madde miktarı ve üretilen güç yoğunluğu değerleri

Sisteme verilen organik madde miktarının artışıyla MYH’de üretilen akım yoğunluğu değeri artmıştır. Sisteme verilen organik madde miktarı 13,2 mg KOİ/gün değerinde iken MYH’de üretilen voltaj miktarı 1,3 mV civarında olduğu görülmüştür.

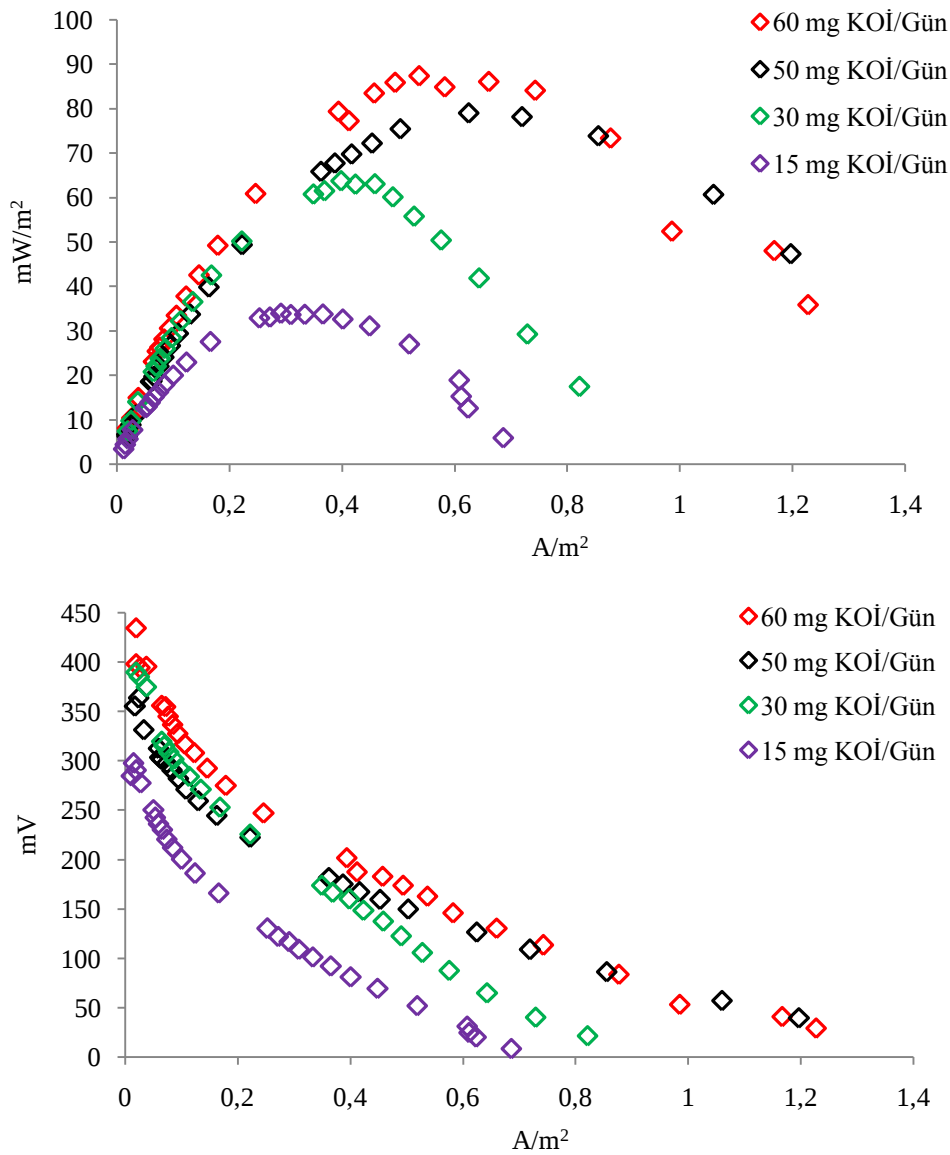


Şekil 4.89: Grafit elektrot ile evsel atıksu kullanılarak sistemde giderilen organik madde miktarı ve üretilen güç yoğunluğu değerleri

Organik yükün artışı ile MYH’de üretilen voltaj miktarı artmaya başlamış ve 20,1 mg KOİ/gün değerinde yaklaşık 7,6 mV değerine ulaşmıştır. Sisteme verilen organik madde miktarı 60,6 mg KOİ/gün değerinden sonra voltaj azalmaya başlamıştır.

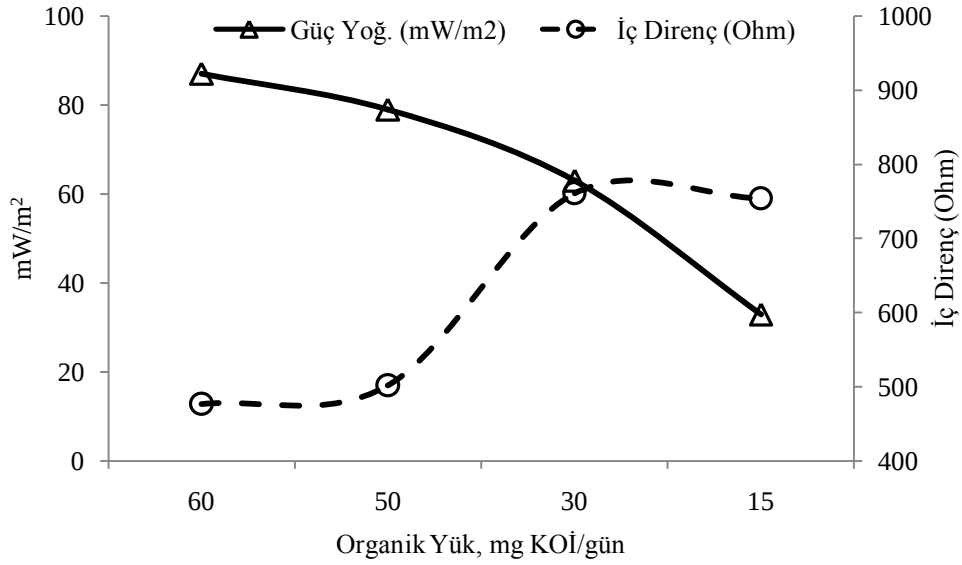
Sisteme verilen organik madde miktarı 15, 30, 50, 60 mg KOİ/gün değerlerinde MYH sisteminde polarizasyon eğrileri oluşturulmuş ve sisteminde üretilen maksimum güç yoğunluğu tespit edilmiştir (Şekil 4.90).

Elde edilen sonuçlarda sistemde üretilen maksimum güç yoğunluğu 15 mg KOİ/gün için 33 mW/m², 30 mg KOİ/gün için 63 mW/m², 50 mg KOİ/gün için 78 mW/m² ve organik madde miktarı 60 mg KOİ/gün olarak sisteme verildiğinde MYH'den 87 mW/m² güç yoğunluğu elde edilmiştir.



Şekil 4.90: Grafit elektrot ile farklı organik maddeler için üretilen maksimum güç yoğunluğu miktarları (□=Voltaj, mV; ♦=Güç Yoğ. mW/m²).

Farklı organik yük değerlerinde sistemde üretilen güç miktarına karşılık gelen MYH iç direnç değerleri tespit edilmiştir (Şekil 4.91). 15 mg KOİ/gün'lük organik yük değerinde MYH iç direnci 754 Ω , 30 mg KOİ/gün için 761 Ω , 50 mg KOİ/gün için 502 Ω ve organik madde miktarı 60 mg KOİ/gün olarak sisteme verildiğinde MYH iç direnci 477 Ω olduğu belirlenmiştir. MYH'de oluşan iç direnç değeri düştüğünde üretilen güç miktarının arttığı görülmüştür (Şekil 4.91).



Şekil 4.91: Sistemde üretilen güç miktarı ile MYH'nin iç direncinin değişimi

Evsel atıksular kullanılarak MYH'ler ile hem atıksu arıtımı hem de elektrik enerjisi üretmek mümkündür. Literatürde yapılmış birçok çalışmada evsel atıksulardan farklı seviyede elektrik üretilbildiği tespit edilmiştir. Literatürde mevcut olan bir çalışmada Rodrigo vd., (2007) grafit silindiri anot materyali, gözenekli grafit çubuğu katot materyali olarak kullandıkları tüp şeklindeki bir MYH'de 25 mW/m² güç yoğunluğu elde edilebileceğini belirtmişlerdir. Wang vd., (2009) evsel atıksuyu besin maddesi olarak kullandıkları medyatörsüz bir MYH'de düz grafit elektrot kullanarak 0,06 mA/cm² akım yoğunluğu elde ettiklerini belirtmişlerdir. MYH'lerde üretilen elektrik miktarını arttırmak için elektrot malzemesi üzerinde farklı modifikasyonların yapıldığı çalışmalar mevcuttur. Bazı çalışmalarda katot elektrotunu katalist malzemeler ile kaplayarak MYH performansının arttırıldığı tespit edilmiştir (Chen vd. 2008; Du vd. 2007). MYH'de üretilen güç miktarını arttırmak amacıyla Min vd. (2004) katot elektrotu olarak platin kaplamalı karbon kumaş, anot elektrotu olarakta karbon kağıt kullanmışlardır. Evsel atıksuyun besin maddesi olarak kullanıldığı çalışmada güç üretiminin arttığını belirterek 43 mW/m² güç yoğunluğu elde etmişlerdir. MYH'de üretilen elektrik miktarını arttırmak için

kullanılan diğerk bir yöntem ise kullanılan anot elektrotunun yapısını mikrobiyal tutunmayı arttıracak şekilde modifiye etmektir. Ahn vd. (2013) tarafından yapılan diğerk bir çalışmada MYH’de klasik olarak kullanılan grafit elektrot malzemesini modifiye edilerek fırça şeklinde grafit fiber malzeme kullanışlardır. Söz konusu çalışmada tek bölmeli hava katotlu bir MYH’de evsel atıksu kullanılarak kesikli beslemeler ile 120 mW/m^2 ($148 \pm 8 \text{ mA/m}^2$) güç yoğunluğu elde edilmişler ve KOİ giderme verimi %90’ın üzerinde gerçekleşmiştir. Ayrıca çalışmada 8 saatlik HBS ile sürekli beslemeli olarak çalışılmış ve elde edilen akım yoğunluğu $20 \pm 13 \text{ mA/m}^2$, KOİ giderimi %57 olarak elde edilmiştir. Hashemi ve Samimi (2012) farklı yapıda MYH tasarımı yaparak MYH’yi yukarı akışlı olarak işletip elektrot olarak karbon çubuk elektrot kullanarak $5,31 \text{ W/m}^3$ güç yoğunluğu elde etmişlerdir.

Farklı elektrotların kullanıldığı çalışma sürecinde elde edilen güç eğrileri dikkate alındığında elde edilen en yüksek güç yoğunluğu değeri 271 mW/m^2 ile bakır kumaş elektrot ile elde edilmiştir. Bu işletim sürecinde bakır kumaş elektrotun kullanıldığı MYH’de oluşan iç direnç değerinin 408Ω olduğu tespit edilmiştir. Kullanılan Al-Ni elektrot ile MYH sisteminde üretilen maksimum güç yoğunluğu değeri 124 mW/m^2 olarak elde edilmiştir. grafit elektrotun kullanıldığı MYH’de oluşan iç direnç değerinin 727Ω olduğu belirlenmiştir. Kullanılan klasik elektrot malzemesi olan grafit elektrot ile 87 mW/m^2 güç yoğunluğu elde edilmiştir. Bu süreçte MYH’de meydana gelen iç direnç değerinin 477Ω olduğu belirlenmiştir. Elde edilen güç değerleri dikkate alındığında bakır kumaş kullanılan MYH’de üretilen güç değeri grafit elektrot kullanılan MYH’de üretilen güç değerinden 3 kat, Al-Ni kullanılan elektrotun kullanıldığı MYH’de üretilen güç değerinden 2,2 kat daha yüksek olarak elde edilmiştir. bakır kumaş elektrot kullanılarak üretilen güç miktarının yüksek olması elektrot malzemesinin elektron iletkenliğinin diğerk malzemelere kıyasla daha yüksek olması ve elektrot malzemesinin yapısı (yüzey şekli) gereği kullanılan diğerk malzemelere kıyasla daha iyi bir biyofilm yapısının oluşmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Ayrıca kullanılan Al-Ni elektrot malzemesinin yüzeyinde mikro gözenekler açılarak bakteriyel tutunma arttırılmıştır. Al-Ni elektrotun elektriksel iletkenliği ve yüzey yapısı gereği klasik bir elektrot malzemesi olan grafit elektrottan daha yüksek güç yoğunluğu elde edilmiştir.

Elde edilen güç yoğunluğu değeri literatürde üretilen değerler ile kıyaslandığında yüksek değerler arasında olduğu görölmektedir. Literatürdeki çalışmalarda evsel atıksuyun düşük iletkenliğe sahip olduğu ($\sim 1 \text{ mS/cm}$) bu nedenle düşük miktarda elektrik üretimi

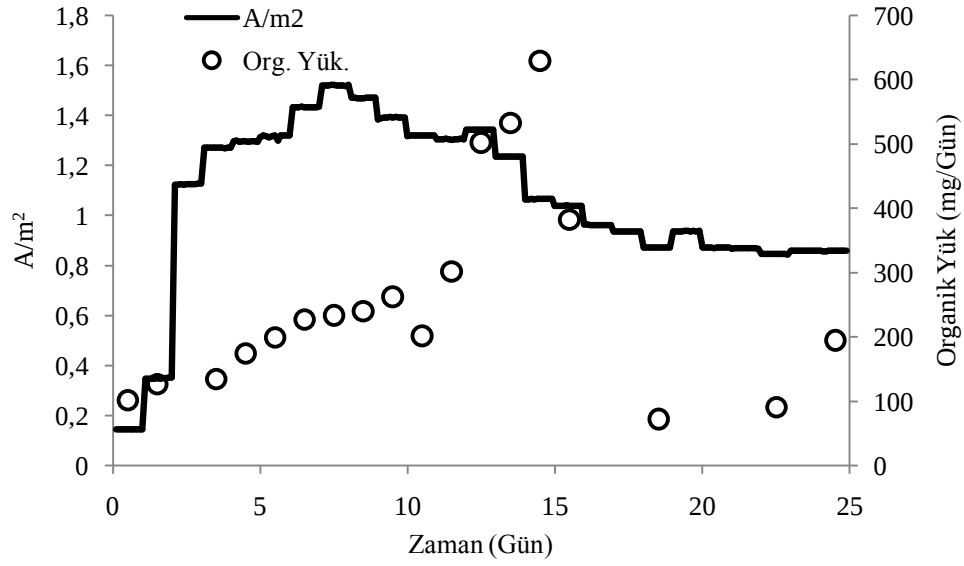
sağlandığı belirtilmiştir. Bu amaçla 50 mM'lık fosfat tamponu ilavesi atıksuyun iletkenliğini arttırmak amacıyla kullanılmıştır (Nam vd. 2010b). Ayrıca MYH'ye ilave edilen fosfat tamponu miktarının artışı ile ciddi miktarda güç artışı olduğu belirtilmiştir (Cheng vd. 2007b). Grafit elektrot ile üretilen güç miktarındaki artışın yaptığımız çalışmadaki fosfat tamponu ilavesi ve katot elektrotunda kullanılan platin kaplamanın (platin katalist) üretilen elektrik miktarında etkili olduğu düşünülmektedir. Elde edilen sonuçlara benzer şekilde Min vd. (2004) tarafından yapılan çalışmada katot bölgesinde platin kaplamalı karbon kumaş kullanılması ile güç miktarı artmıştır.

4.4.2 Yağ Endüstrisi Atıksuları

Yağ endüstrisi atıksuları kullanılarak MYH'de elektrik üretim çalışmasında iki MYH reaktörü paralel olarak işletilmiştir. Her iki MYH reaktörünün anot bölgesinde bakır kumaş elektrot kullanılmıştır. Yağ endüstrisi atıksularını kullanarak elektrik üretebilen etkin mikroorganizma türlerini tespit etmek ve uygun aşı çamurunu tespit etmek amacıyla MYH reaktörlerinden biri sediment ortamından alınmış aşı çamuru ile aşılmıştır. Diğer MYH ise anaerobik reaktör ve yağ atıklarının döküldüğü alandan alınan dip çamuru ile aşılmıştır. Sisteme verilen organik madde miktarı zamana bağlı olarak değiştirilmiş ve MYH'de üretilen güç miktarı araştırılmıştır.

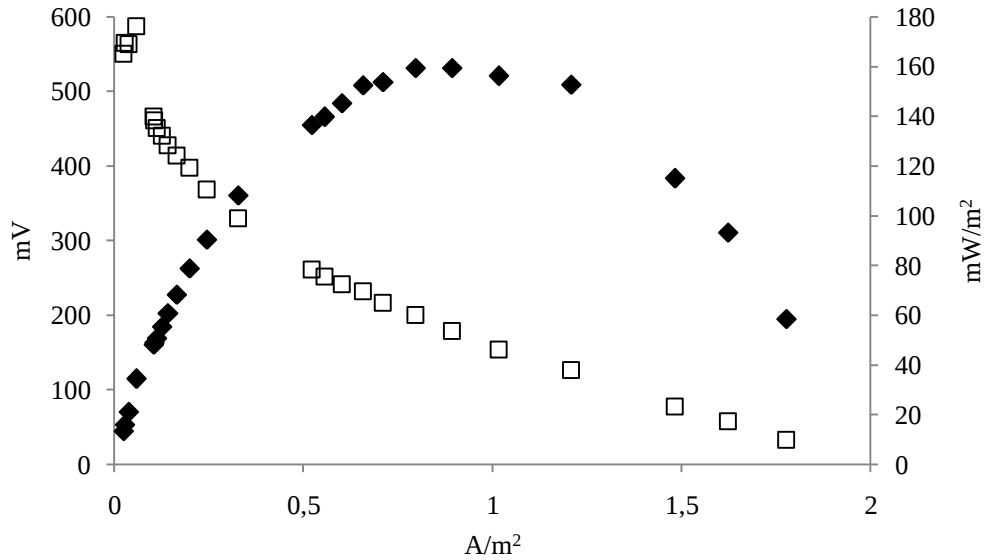
4.4.2.1 Anaerobik Çamur ve Sediment çamuru ile Aşılana MYH'den Elde Edilen Sonuçlar

Anaerobik çamur ile aşılana MYH reaktöründe sisteme verilen organik madde miktarı işletme süresinin 15. gününe kadar arttırılmıştır. MYH'de üretilen güç miktarı sisteme verilen organik madde miktarı 260 mg KOİ/gün değerine kadar artmaya devam etmiş ve bu değerden sonra üretilen güç miktarı azalmaya başlamıştır (Şekil 4.92). MYH'de üretilen akım yoğunluğu 1,5 A/m² değerine kadar ulaşmıştır. Bu değer, organik yükün artışıyla 20. günden sonra yaklaşık 0,9 A/m² değerinde sabitlenmiştir. Sistemde verilen farklı organik madde miktarlarına bağlı olarak üretilen



Şekil 4.92: Anaerobik çamur ile aşılana MYH’de organik yük değeri ne karşılık güç yoğunluğu değeri

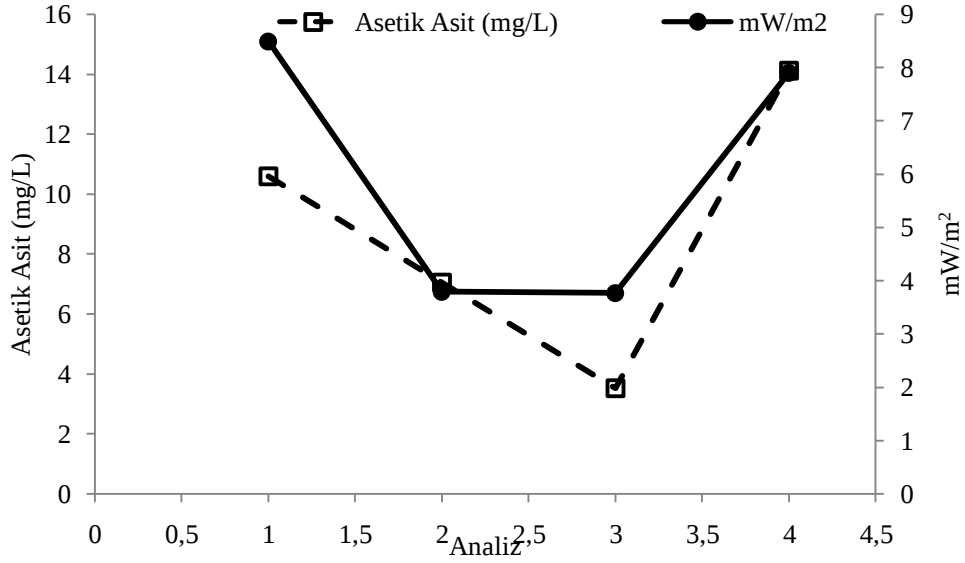
Sisteme verilen organik madde miktarının 227 mg KOİ/gün olduğu dönemde MYH’de güç eğrisi oluşturularak üretilen maksimum güç miktarı hesaplanmıştır (Şekil 4.93). Elde edilen polarizasyon eğrisi sonucuna göre MYH’de üretilen maksimum güç üretimi 159 mW/m^2 olduğu görülmüş. Elde edilen güç eğrisinden MYH iç direnci hesaplanmış ve 400Ω olarak tespit edilmiştir.



Şekil 4.93: Anaerobik çamur ile aşılana MYH’de elde edilen güç eğrisi

Çalışma kapsamında, sistemde üretilen asetik asit miktarı ile MYH’nin ürettiği güç miktarının değişimi incelenmiş ve sonuçlar Şekil 4.94’de verilmiştir. Elde edilen sonuçlara

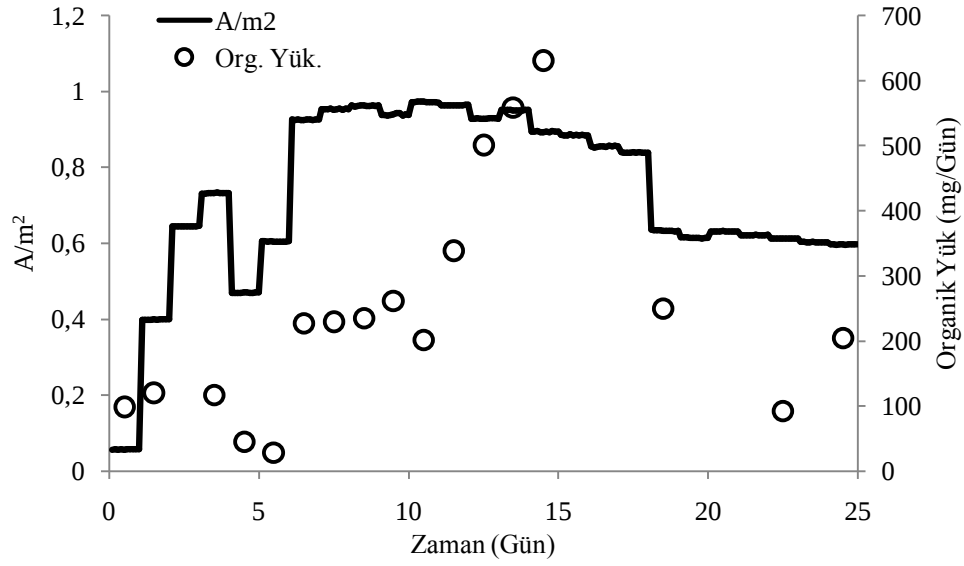
göre sistemde üretilen asetik asit miktarının artışı ile sistemde üretilen güç miktarı artmıştır.



Şekil 4.94: Anaerobik çamur ile aşılana MYH’de elde edilen ara ürün oluşumu

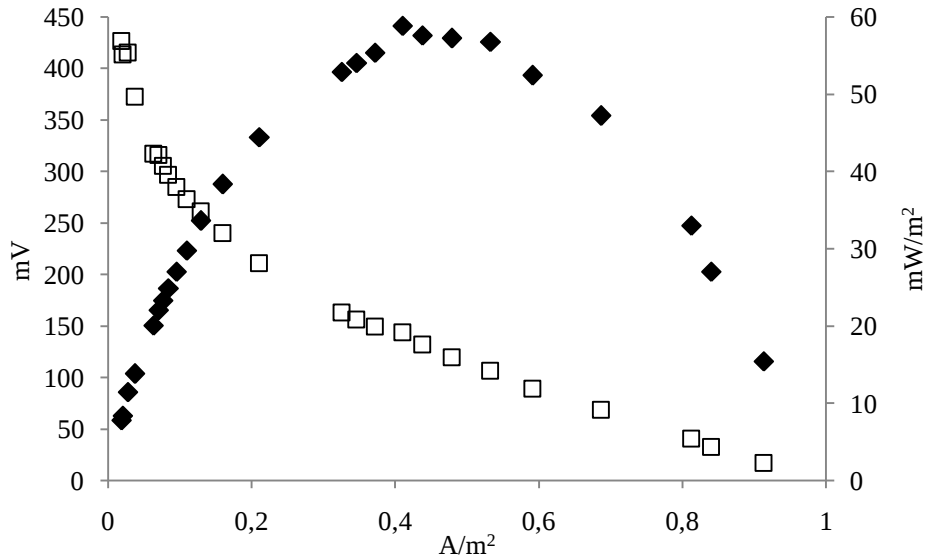
4.4.2.2 Sediment Ortamından Çamur ile Aşılana MYH’den Elde Edilen Sonuçlar

Sediment ortamından alınan aşı çamuru ile aşılana MYH’deki güç üretiminin organik madde miktarına bağlı olarak değişimi Şekil 4.95’de verilmiştir. Sisteme verilen organik madde miktarı zamana bağlı olarak arttırılmıştır. MYH’ye verilen organik madde miktarı 550 mg KOİ/gün değerine ulaştıktan sonra üretilen güç miktarı azalmaya başlamıştır.



Şekil 4.95: Sediment ile aşılana MYH’de organik yüke karşılık güç yoğunluğu değeri

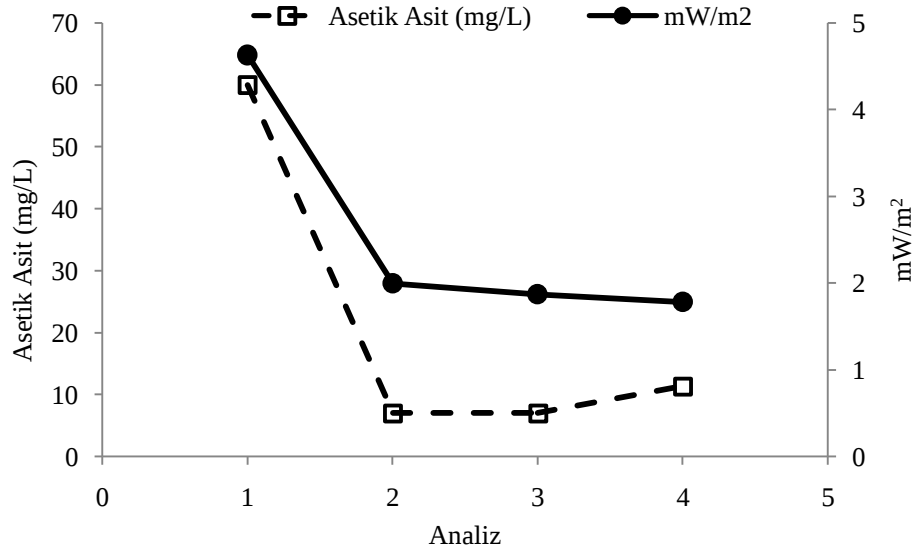
Sisteme verilen organik madde miktarı 227 mg KOİ/gün değerinde iken MYH’de üretilen maksimum güç yoğunluğunu hesaplamak amacıyla güç eğrisi oluşturulmuştur (Şekil 4.96). Elde edilen güç eğrisine göre MYH’de üretilen maksimum güç yoğunluğu değerinin 59 mW/m² olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca elde edilen güç eğrisi kullanılarak MYH iç direncinin 530 Ω olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 4.96: Sediment ile aşılana MYH’den elde edilen güç eğrisi

Güç üretimi sonuçlarının yanı sıra sistemde üretilen asetik asit miktarına bağlı olarak MYH’de üretilen güç miktarı hesaplanmış ve sonuçlar Şekil 4.97’de verilmiştir. Elde edilen sonuçlar dikkate alındığında sistemde üretilen asetik asit miktarı 60 mg/L değerinde iken MYH’de üretilen güç miktarı 4,62 mW/m² olmuştur. Asetik asit miktarının 7 mg/L

değerine düşmesi ile MYH’de üretilen güç miktarı 1,9 mW/m² değerine yükseldiği görülmüştür. Bu değerden sonra asetik asit miktarındaki az miktarda artış olmasına rağmen üretilen güç miktarı küçük miktarda azalmıştır.



Şekil 4.97: Sediment ile aşılana MYH’den elde edilen ara ürün oluşumu

Literatürde birçok farklı atıksu kullanılarak mikrobiyal yakıt hücresinde elektrik üretim çalışmaları mevcuttur. Evsel atıksular (Ghangrekar ve Shinde, 2007; Min ve Logan, 2004; Rabaey vd., 2005), besin endüstrisi atıksuları (Angenent vd., 2004), hastane atıkları (Rabaey vd., 2005), hayvansal atıklar (Kim vd., 2008a; Min vd., 2005a) ve bira endüstrisi atıksuları (Feng vd., 2008; Jong vd., 2006) MYH’de substrat olarak kullanılıp elektrik üretilmeye çalışılmıştır. Literatürde mevcut olan çalışmalarda yağ endüstrisi atıksuları kullanılarak yapılmış çalışma yalnızca Cheng vd. (2010) tarafından hurma yağı fabrikası atıksularının arıtımı amacıyla yapılmıştır. Söz konusu çalışmada MYH ve UASB reaktörleri beraber kullanılarak KOİ ve NH₃-N giderimi ve elektrik üretim potansiyeli araştırılmıştır. MYH’ler hidrolik bekletme süresi 2 gün olacak şekilde işletilmiştir. Anot elektrodu olarak grafit granüllerin kullanıldığı çalışmada üretilen maksimum güç yoğunluğu miktarı 44,6 mW/m² olarak elde edilmiştir.

Literatürde gerçek atıksular kullanılarak yapılmış çalışmalarda Oh vd. (2005) tarafından besin işleme atıksularını kullanarak 81 mW/m² güç yoğunluğu elde edilmiştir. Diğer bir çalışmada Min vd. (2005a) yüksek KOİ değerine (8920 mg/L) sahip domuz çiftliği atıksuları kullanıp 261 mW/m² güç yoğunluğu elde etmişlerdir. Greenman vd. (2009) tarafından yapılan çalışmada üç adet mikrobiyal yakıt hücresi kullanılarak biyolojik

arıtım, giderim verimi ve elektrik üretim verimi karşılaştırılması yapılmıştır. Aktif çamur ile aşılınmış MYH’de akım yoğunluğu $3,24 \text{ mA/m}^2$, aşı yapılmamış MYH’de ise $3,79 \text{ mA/m}^2$ akım yoğunluğu elde edilmiştir.

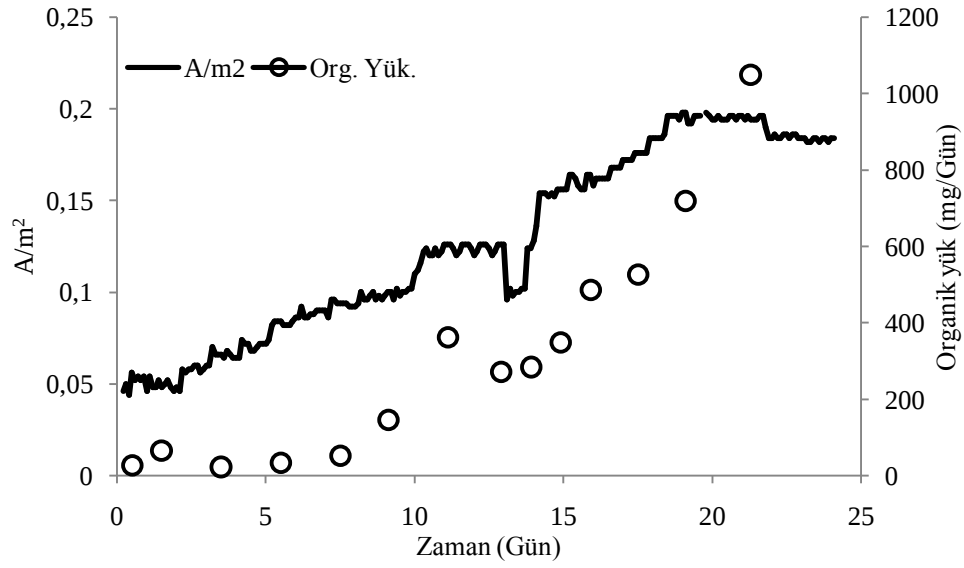
Bu çalışmada yağ endüstrisi atıksuları kullanılarak iki farklı MYH reaktöründen elde edilen maksimum güç yoğunluk değerleri anaerobik reaktör ile aşılınmış MYH için 160 mW/m^2 , sediment çamuru ile aşılınmış MYH için $58,8 \text{ mW/m}^2$ olarak elde edilmiştir. Anaerobik çamur ile aşılınan reaktör için elde edilen iç direnç değeri 400Ω olarak elde edilirken haçık sedimenti kullanılarak aşılınan atıksular ile aşılınan MYH’nin iç direncinin 530Ω olduğu tespit edilmiştir. Anaerobik aşı çamuru ile aşılınan MYH’de 2,6 kat daha yüksek güç üretimi elde edilmiştir. Anaerobik aşı çamurunun içerdiği mikroorganizma türlerinin yağ atıksularını ayrıştırma yeteneğinin daha kolay olması nedeni ile üretilen güç miktarının daha yüksek olduğu düşünülmektedir. Her iki MYH reaktörünün anot elektrot biyofilminden alınan örneklerde yapılan DGGE analizinde anaerobik çamur kullanılan MYH’de kullanılan elektrot biyofilminde daha fazla mikroorganizma türünün mevcut olduğu tespit edilmiştir. Literatürde aşı kaynağının elektrik üretimini etkilediği farklı çalışmalarda belirtilmiştir (Catal vd. 2008; Holmes vd. 2004; Kim vd. 2006) . MYH’de anot elektrot yüzeyinde bulunan mikrobiyal türlerin hücre dışı elektron transferi yapabilme yetenekleri MYH’deki elektrik üretimini doğrudan etkilemektedir. Bunun yanında anot elektrotunun yüzey karakteristiği ve yüzey yapısı da MYH performansını etkilediği görülmüştür. Yağ endüstrisi atıksuları ile elde edilen değerler dikkate alındığında literatürde hurma yağı kullanılarak elde edilen güç yoğunluğu değerinden 3,6 kat daha yüksek güç yoğunluğu değerine ulaşılmıştır.

4.4.3 Mezbaha Atıksuyu

Mezbaha atıksuyu ile MYH’de elektrik üretim çalışmasında iki MYH reaktörü paralel olarak işletilmiştir. Kullanılan MYH’lerde Al-Ni ve bakır kumaş elektrot kullanılmıştır. MYH’ler anaerobik çürütücünden alınan çamur ile aşılınmıştır.

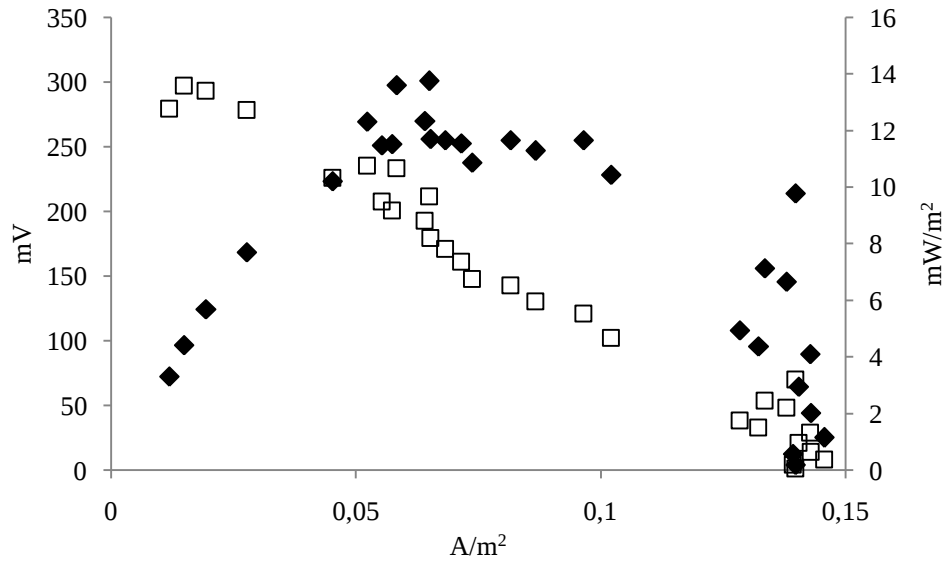
4.4.3.1 Al-Ni Elektrot ile Yapılan Çalışmalar

MYH’de mezbaha atıksularını kullanarak elektrik üretim çalışmasında Al-Ni elektrotun kullanıldığı MYH’de sisteme verilen organik madde miktarı zamana bağlı olarak değiştirilmiş ve üretilen güç yoğunluğu miktarı belirlenmiştir (Şekil 4.98). Sisteme verilen organik madde miktarı 1000 mg KOİ/gün değerine kadar MYH’de üretilen güç miktarı artmıştır. Organik yükün bu değerinden sonra MYH’de üretilen güç miktarı azalmaya başlamıştır.



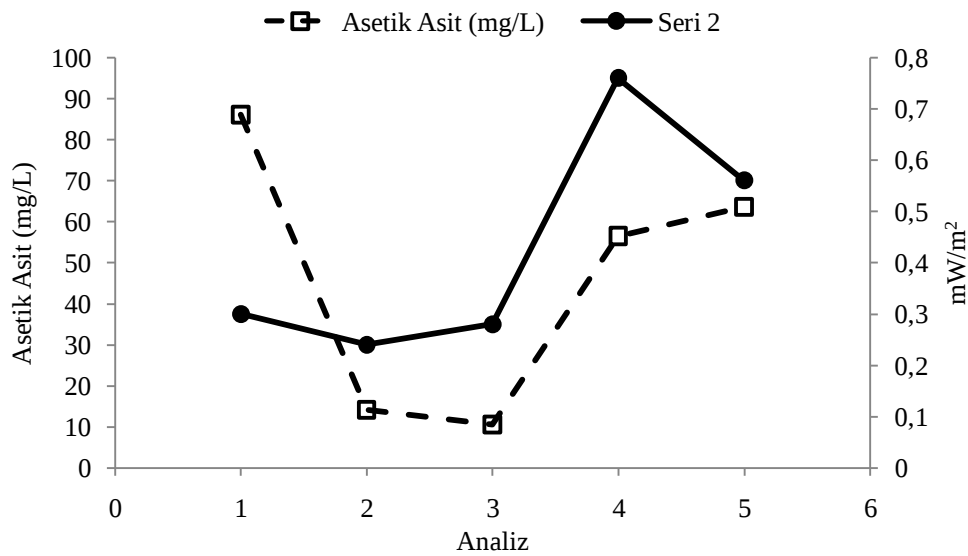
Şekil 4.98: Al-Ni elektrot kullanılan MYH’de güç yoğunluğu ve organik yük değerine karşılık güç yoğunluğu değerleri

MYH’de üretilen maksimum güç yoğunluğu miktarını tespit etmek amacıyla güç eğrisi oluşturulmuştur (Şekil 4.99). Güç eğrisi değerleri dikkate alındığında MYH’de üretilen maksimum güç yoğunluğu değerinin 13,7 mW/m² olduğu tespit edilmiştir. Bu süreçte MYH’de meydana gelen iç direncinin 3787 Ω olduğu belirlenmiştir.



Şekil 4.99: Al-Ni elektrot kullanılan MYH'den elde edilen güç eğrisi.

Sistemde üretilen asetik asit miktarına karşılık üretilen güç yoğunluğu değeri Şekil 4.100'de verilmiştir. MYH'de üretilen asetik asit miktarının artışı ile güç yoğunluğu değerinin arttığı görülmüştür.

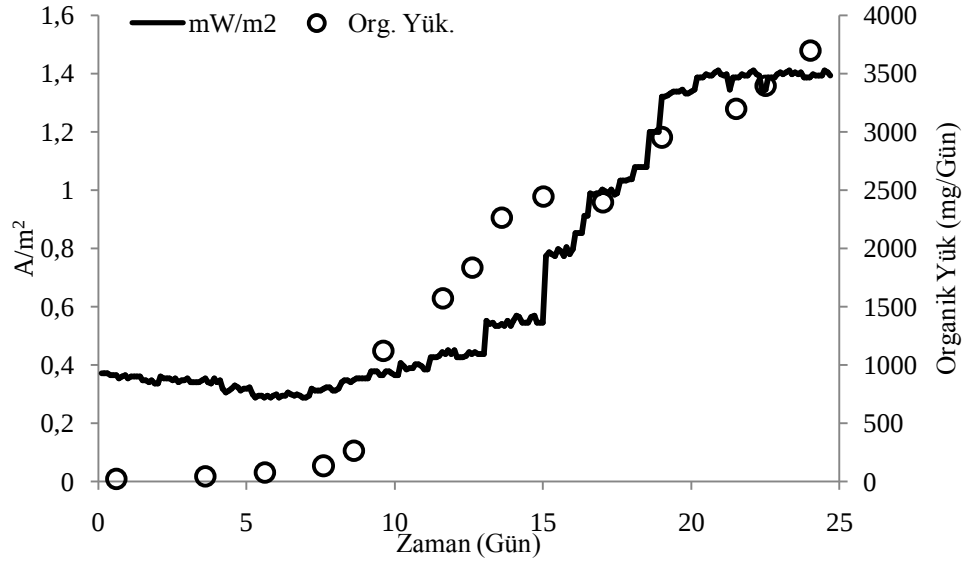


Şekil 4.100: Al-Ni elektrot kullanılan MYH'den elde edilen ara ürün oluşumu.

4.4.3.2 Bakır Kumaş Elektrot

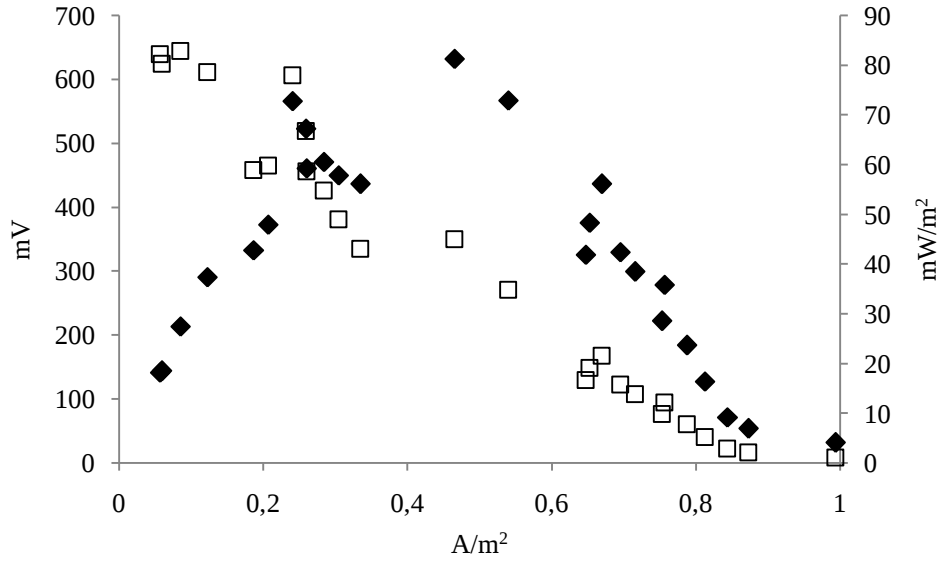
Mezbaha atıksuyu kullanılarak elektrik üretim çalışmasında bakır kumaşın anot elektrotu olarak kullanıldığı MYH'de organik madde miktarının değişimine bağlı olarak akım yoğunluğu değerleri Şekil 4.101'de verilmiştir. Sisteme verilen organik madde

miktarı 3200 mg.KOI/gün değerine kadar MYH’de üretilen güç yoğunluğu değeri artmıştır. Organik yükün 3200 mg KOI/gün değerinden daha yüksek değerde MYH’de üretilen güç miktarı değişmeyerek sabit kalmıştır.



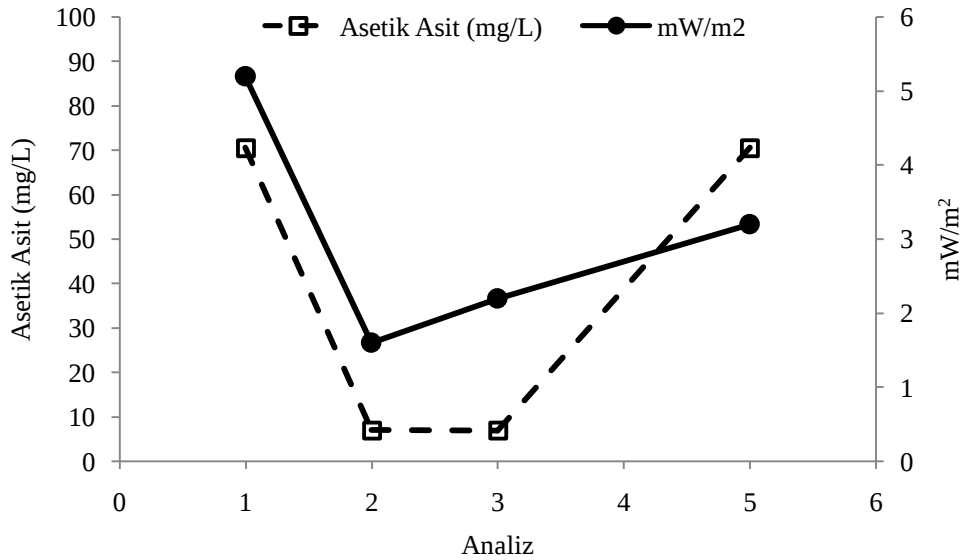
Şekil 4.101: Bakır kumaş elektrot kullanılan MYH’de organik yüke karşı güç yoğunluğu değerleri

MYH’de üretilen maksimum güç yoğunluğunu tespit etmek amacıyla polarizasyon eğrisi oluşturulmuştur (Şekil 4.102). Elde edilen polarizasyon eğrisi dikkate alındığında MYH’de üretilen maksimum güç yoğunluğu değerinin 81 mW/m^2 , MYH iç direncinin ise 3512Ω olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 4.102: Bakır kumaş elektrotun kullanıldığı MYH’de elde edilen güç eğrisi

Sistemde üretilen asetik asit miktarına karşılık üretilen güç yoğunluğu değeri Şekil 4.103’de verilmiştir. MYH’de üretilen asetik asit miktarının artışı ile üretilen güç yoğunluğu değerinin arttığı görülmüştür. MYH’deki asetik asit miktarının 7,05 mg/L değerinden 70,58 mg/L değerine yükselmesi ile MYH’deki güç yoğunluğu değeri 1,6 mW/m²’den 5,2 mW/m² değerine yükselmiştir.



Şekil 4.103: Bakır kumaş elektrot ile elde edilen ara ürün oluşumu

Literatürde MYH’de substrat kaynağı olarak mezbaha atıksuyunun kullanıldığı yalnızca bir çalışma mevcuttur. Bu çalışma Katuri vd. (2012) tarafından yapılmıştır. Çift bölmeli bir MYH’de KOİ’si 4850 mg/L olan mezbaha atıksularını kullanarak kesikli

şekilde işletilmiş ve elektrik üretim kapasitesini araştırmışlardır. Anot elektrotu olarak karbon kumaş, katot elektrotu olarak platin kaplama örgülü titanyum elektrot kullanmışlardır. Yaptıkları çalışmada katot bölmesinde 50 mM potasyum içeren hekzasiyanoferrat kullanmışlardır. MYH’de üretilen maksimum güç miktarının 578 mW/m² olduğu belirtilmiştir.

Bu çalışmada Al-Ni elektrotun kullanıldığı MYH’de üretilen güç miktarı 13,7 mW/m² olarak elde edilmiştir. Bu süreçte MYH’deki iç direnç miktarı 3787 Ω olduğu tespit edilmiştir. Bakır kumaş elektrotun kullanıldığı MYH’de ise üretilen güç miktarı 81,3 mW/m² olduğu ve iç direncin 3512 Ω olduğu tespit edilmiştir. bakır kumaş elektrot ile üretilen güç miktarı Al-Ni elektrot kullanılan MYH’de üretilen güç miktarından 6 kat daha fazla olduğu tespit edilmiştir. Mezbaha atıksularının arıtımı için bakır kumaş elektrotun Al-Ni elektrottan daha iyi biyofilm tutması nedeni ile daha fazla elektrik üretimi elde edildiği düşünülmektedir. Literatürde mezbaha atıksuyu ile yapılmış çalışma ile kıyaslandığında daha düşük güç yoğunluğu elde edildiği tespit edilmiştir. Bunun nedeninin literatürde yapılmış çalışmada katot bölgesinde kullanılan hekzasiyanoferrat kimyasalının kullanılmasından kaynaklanmaktadır. Söz konusu çalışmada katot bölgesinde güçlü bir elektron alıcının kullanılması anot bölgesinde üretilen elektronların hızlı bir şekilde katoda geçişini sağlamak ve üretilen güç miktarını arttırmaktadır.

Ayrıca elde edilen SEM görüntülerinden mezbaha atıksularının kullanıldığı MYH’lerde membran yüzeyinin anot tarafında önemli miktarda birikinti olduğu görülmektedir. Bu organik birikintinin proton değişim membranından proton geçişini kısıtladığı ve buna bağlı olarak üretilen güç miktarının düşük olduğu düşünülmektedir.

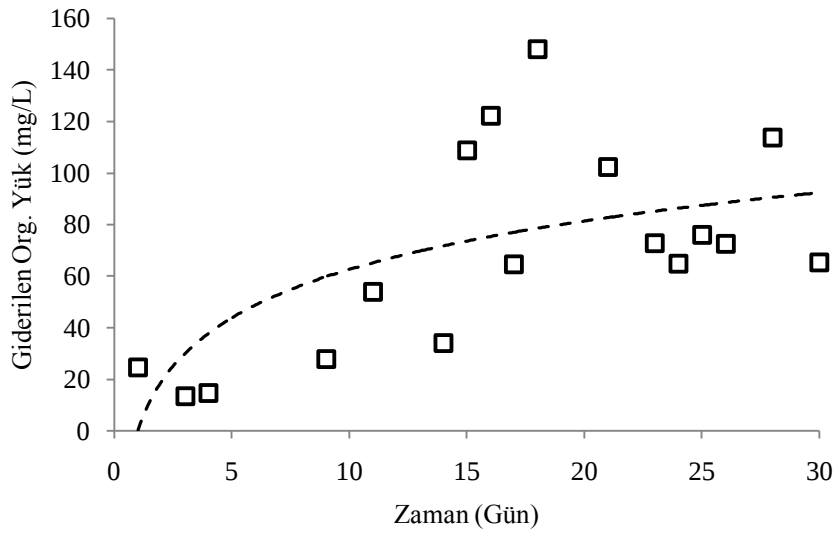
4.5 Farklı Membranların Etkisi

Farklı membranların performanslarının araştırıldığı çalışmada MYH reaktörlerinin anot bölgesinde eşit yüzey alanına sahip bakır kumaş elektrot kullanılmıştır. MYH reaktörlerinde substrat olarak yağ endüstrisi atıksuyu kullanılmıştır. İşletme süresince MYH’lerde giderilen organik madde miktarına karşılık üretilen voltaj değerleri tespit edilmiştir. Ayrıca işletme süresinin belirli zamanlarında polarizasyon eğrileri oluşturularak MYH’lerde üretilen maksimum güç yoğunluğu değerleri tespit edilmiştir. İşletme süresi

sonunda kullanılan membranlar yenisi ile değiştirilerek güç üretiminde meydana gelen değişim incelenmiştir.

4.5.1 Fumapem Membran

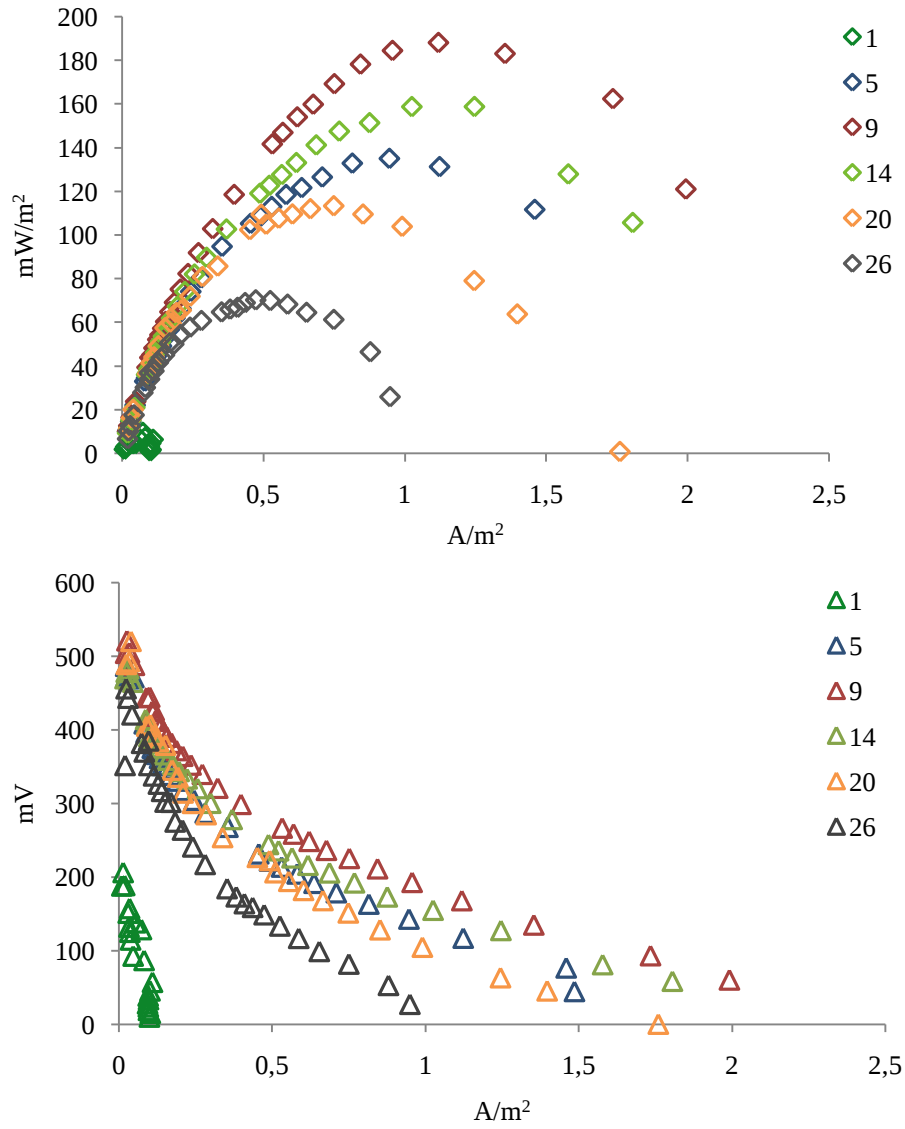
Fumapem F-1050 marka proton değişim membranının kullanıldığı MYH’de giderilen organik madde miktarının zamana bağlı değişimi Şekil 4.104’de verilmiştir. Zamana bağlı olarak sistemde giderilen organik madde miktarının arttığı görülmüştür.



Şekil 4.104: Fumapem membran kullanılarak MYH’de giderilen organik madde miktarına karşılık üretilen voltajı değerinin değişimi

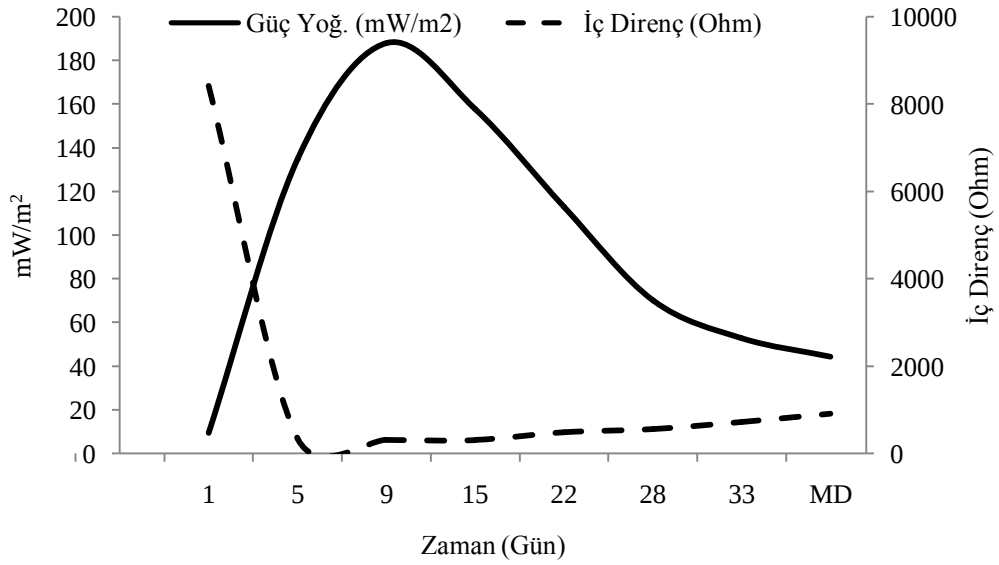
İşletme süresinin 1., 5., 9., 14., 20 ve 26’ncı günlerinde polarizasyon eğrileri oluşturulmuş ve elde edilen maksimum güç yoğunluğu değerleri tespit edilmiştir. Şekil 4.105’de polarizasyon eğrisi sonuçları verilmiştir.

İşletme süresi boyunca elde edilen maksimum güç yoğunluğu değerleri 1., 5., 9., 14., 20. ve 26’ncı günlerde sırası ile 9,47; 135; 188; 159; 113 ve 70,4 mW/m² olarak gerçekleşmiştir.



Şekil 4.105: Fumapem membranının kullanıldığı MYH’de işletme sürelerinin 1, 5, 9, 14, 20, 26, 30. günlerinde elde edilen polarizasyon eğrileri ($\square$ =Voltaj, mV; $\blacklozenge$ =Güç Yoğ. mW/m^2).

İşletme süresince MYH’de üretilen maksimum güç yoğunluğu değerleri ve iç direnç değerleri Şekil 4.106’da verilmiştir. MYH iç direnci düştüğü zaman MYH’de üretilen güç yoğunluğu miktarının arttığı görülmüştür. MYH’de 9. işletme gününde en yüksek güç yoğunluğu ve en düşük iç direnç değeri elde edilmiştir.

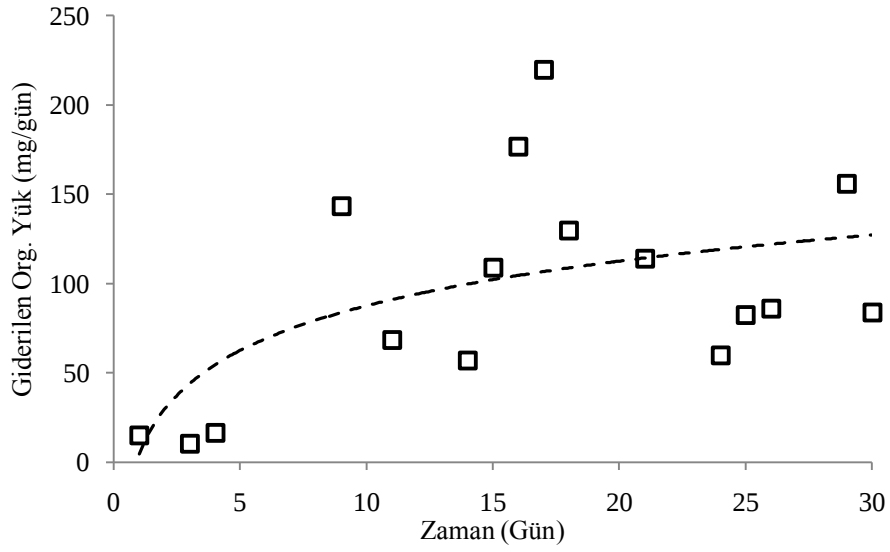


Şekil 4.106: İşletme sürelerinin 1. 5. 9. 15. 22. 28. 33. ve membranın yenisi ile değiştirildiği süreçte (MD) MYH’de üretilen maksimum güç yoğunluğu değerleri ve iç direnç değerleri

MYH iç direnci 1., 5., 9., 14., 20. ve 26’ncı günlerde iç direnç değerinin sırası ile 8428, 338, 312, 306, 484, 556 Ω değerinde olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca işletme süresinin sonunda membranın yenisi ile değiştirilmeden hemen önce ve sonraki iç direnç değerleri sırası ile 725 ve 919 Ω dur. MYH reaktörünün iç direnci işletim sürecinin ilk gününde 8428 Ω olmuştur. Mikroorganizmaların elektrot yüzeyine tutunma miktarının artması neticesinde elektronların elektrotta iletimi kolaylaşmış ve 9. işletme gününde iç direnç değerinin 312 Ω değerine düştüğü tespit edilmiştir. İşletme süresinin sonunda MYH iç direnci 556 Ω değerine yükselmiştir. Bu değer 9. günde tespit edilen iç direnç değerinden 1,8 kat daha fazladır. İç direnç değerinde meydana gelen bu artışın PEM yüzeyinde meydana gelen birikme nedeni ile H^+ geçirgenliğinin azalmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.

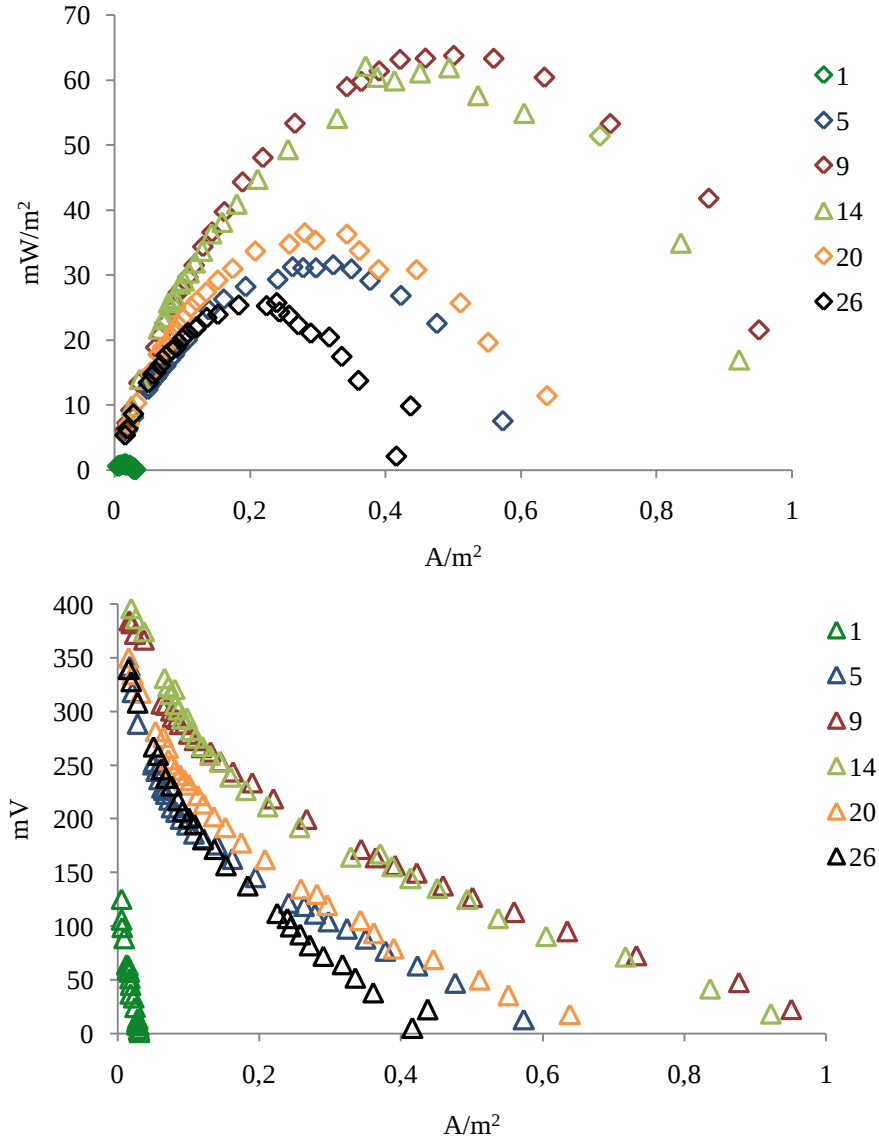
4.5.2 Nafion Membran

Nafion 117 marka proton değişim membranının kullanıldığı MYH’de giderilen organik madde miktarının zamana bağlı değişimi Şekil 4.107’de verilmiştir. Zamana bağlı olarak sistemde giderilen organik madde miktarının arttığı görülmüştür.

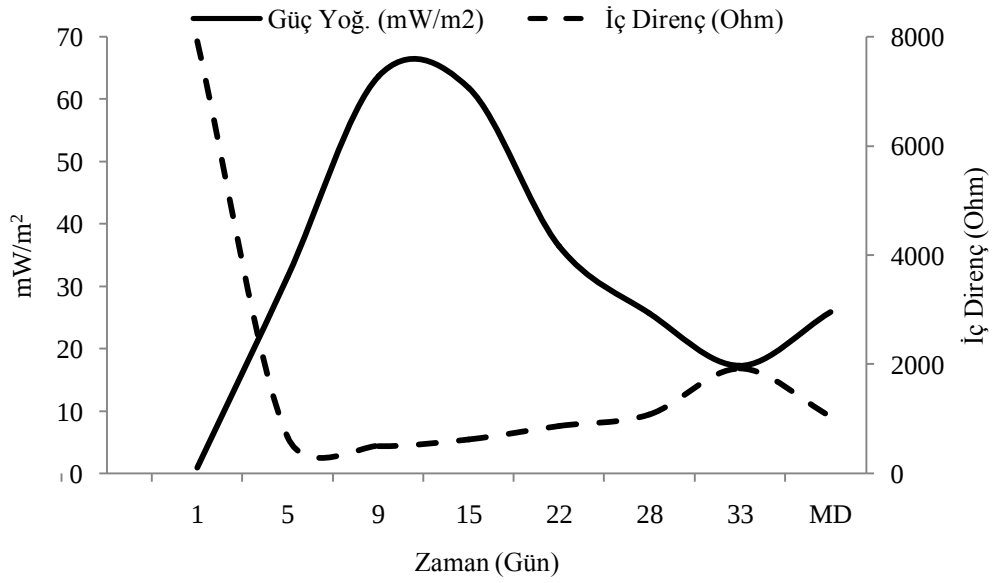


Şekil 4.107: Nafion 117 membran kullanılan MYH’de giderilen organik yük miktarı değişimi

MYH’de üretilen maksimum güç yoğunluğunu tespit etmek amacıyla işletme süresinin 1.; 5.; 9.; 14.; 20 ve 26’ıncı günlerinde polarizasyon eğrileri oluşturulmuştur (Şekil 4.108). İşletme süresine bağlı olarak üretilen maksimum güç yoğunluğu değerleri sırasıyla 0,94; 31,5; 63,7; 61,8; 36,5 ve 25,7 mW/m² olarak elde edilmiştir. Aynı işletme günleri için MYH iç direnç değerleri de hesaplanmıştır ve sırasıyla 7928, 669, 506, 630, 872 ve 1079 Ω olduğu tespit edilmiştir. MYH iç direnci arttıkça MYH’de üretilen güç miktarının azaldığı tespit edilmiştir (Şekil 4.109).



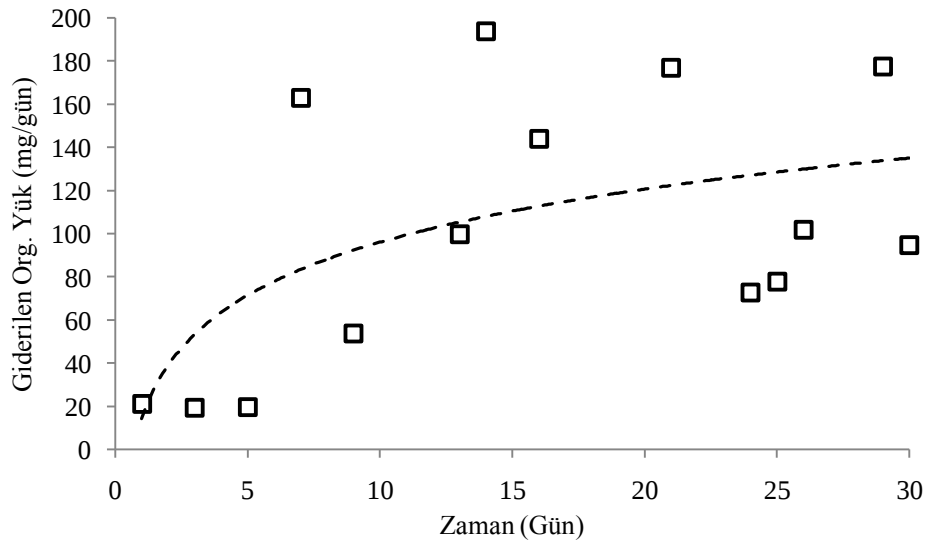
Şekil 4.108: Nafion 117 membranının kullanıldığı MYH’de işletme sürelerinin 1, 5, 9, 14, 20, 26, 30. için elde edilen polarizasyon eğrileri ($\square$ =Voltaj, mV; $\blacklozenge$ =Güç Yoğ. mW/m^2).



Şekil 4.109: MYH’de üretilen maksimum güç yoğunluğu değerleri ile iç direç değerleri

4.5.3 Ultrex Membran

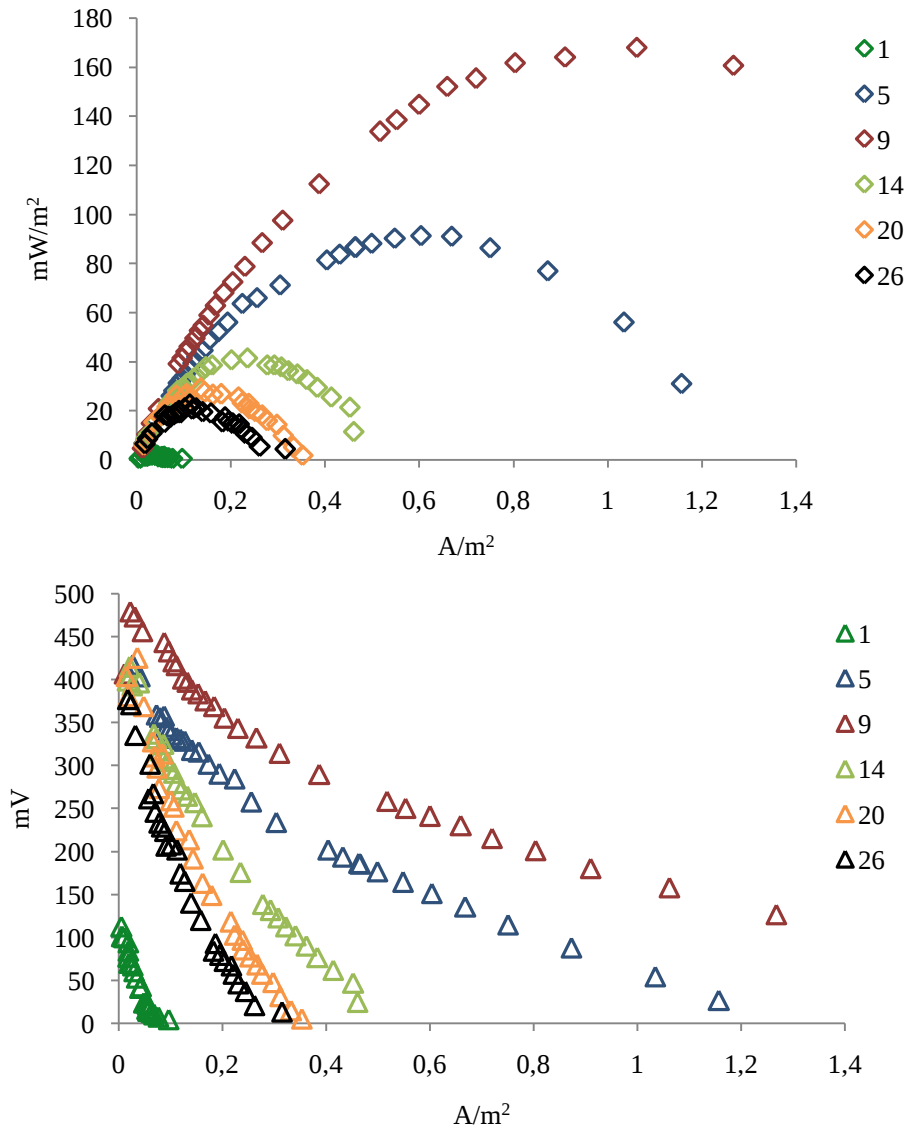
Ultrex CMI 7000 marka proton değişim membranının kullanıldığı MYH’de giderilen organik madde miktarının zamana bağlı değişimi Şekil 4.110’da verilmiştir. Zamana bağlı olarak sistemde giderilen organik madde miktarının arttığı görülmüştür.



Şekil 4.110: Ultrex membran kullanılan MYH’de giderilen organik yük miktarı

İşletme süresinin 1.; 5.; 9.; 14.; 20 ve 26’ncı günlerinde polarizasyon eğrileri oluşturularak MYH’de üretilen maksimum güç yoğunluğu değerleri tespit edilmiştir (Şekil

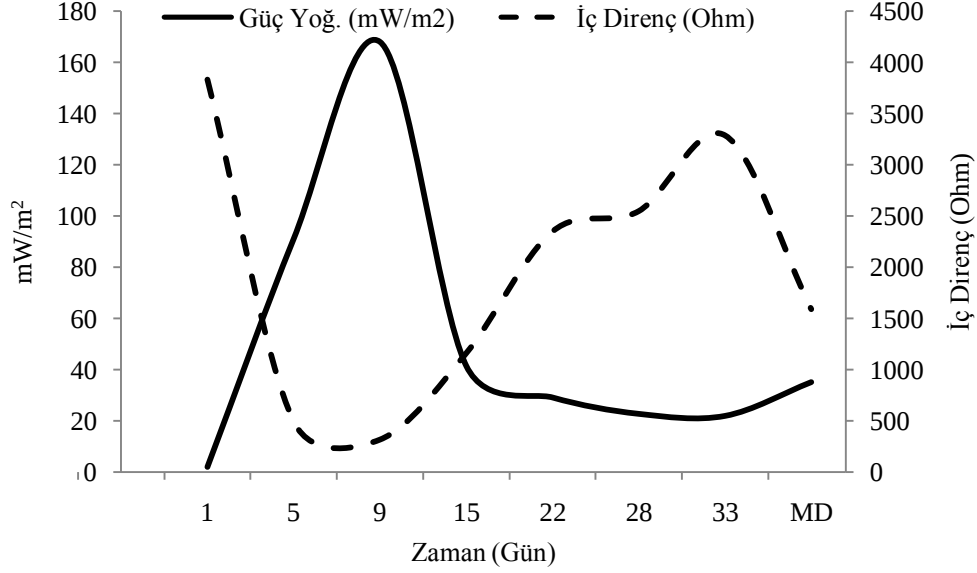
4.111). Elde edilen sonuçlara göre güç yoğunluğu değerleri sırası ile 1,8; 91; 168, 41,4; 29 ve 22,6 mW/m^2 olduğu tespit edilmiştir. Sisteme aşılama yapıldıktan sonra mikroorganizmaların elektrot yüzeyinde adaptasyonunun sağlanması ile MYH’de üretilen güç yoğunluğu değeri maksimum değerine yükselmiştir (168 mW/m^2). MYH’de maksimum güç yoğunluğu elde edildikten sonra membran yüzeyinde meydana gelen birikme sonucunda H^+ iyonlarının katot bölmesine transferinin yavaşladığı ve MYH’de üretilen güç miktarının azaldığı görülmüştür.



Şekil 4.111: Ultrex CMI-7000 membranının kullanıldığı MYH’de işletme sürelerinin 1, 5, 9, 14, 20, 26, 30. günlerinde elde edilen güç eğrileri ($\square$ =Voltaj, mV; $\blacklozenge$ =Güç Yoğ. mW/m^2).

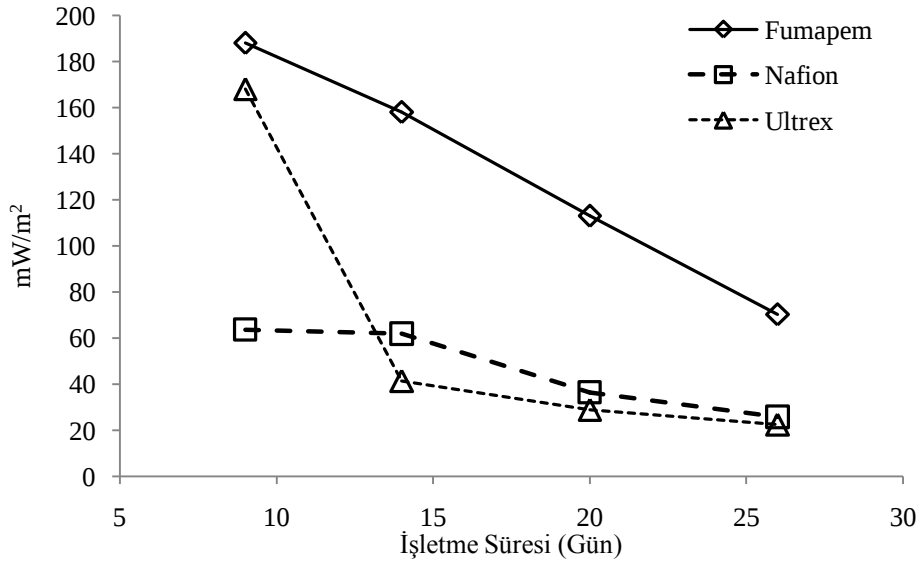
MYH iç direnci değerleri hesaplanmış ve maksimum güç yoğunluğu değerleri ile değişimi Şekil 4.112’de verilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre MYH iç direnci sırası ile

3835, 496, 318, 1162, 2351 ve 2550 Ω olduğu tespit edilmiştir. MYH iç direncinin düşmesi ile MYH’de üretilen güç yoğunluğu değerinin arttığı tespit edilmiştir.



Şekil 4.112: Farklı işletme sürelerinde MYH’de üretilen maksimum güç yoğunluğu ve iç direnç değerleri

Her üç membran için işletme süresinin 9. gününde MYH’de üretilen güç maksimum değere ulaşmıştır. MYH’lerde üretilen güç miktarının maksimum değere ulaşmasının sebebinin MYH’de mikroorganizma adaptasyonunun tam olarak sağlanmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Ayrıca bu işletme süresinden sonra MYH’de üretilen güç miktarındaki azalmanın proton değişim membranında meydana gelecek azalmadan kaynaklanacağı düşünülmektedir. Bu nedenle güç üretiminin maksimum değerde olduğu işletme süresinden itibaren işletme süresi sonuna kadar MYH’lerde üretilen güç miktarında meydana gelen kayıplar hesaplanmıştır (Şekil 4.113).



Şekil 4.113: Fumapem, nafion ve ultrex membranlar için işletme süresi boyunca meydana gelen güç azalması

Farklı membranların performanslarının denendiği çalışmada MYH reaktörlerinde üretilen güç miktarı 9. günde maksimum değerine ulaşmıştır. MYH’de üretilen güç miktarı 9. işletme gününden sonra sistemde giderilen organik madde miktarı artmasına rağmen MYH’de üretilen güç miktarı azalmıştır. Farklı membranlar ile üretilen maksimum güç miktarları fumapem membran ile 188 mW/m^2 olarak elde edilmiştir. Bu süreçte meydana gelen iç direnç miktarı 312Ω olduğu belirlenmiştir. İşletme süresinin sonunda üretilen güç miktarı 53 mW/m^2 değerine düşerek iç direnç miktarı 725Ω değerine yükselmiştir. Nafion membran kullanılan MYH’de üretilen maksimum güç miktarı $63,7 \text{ mW/m}^2$ olarak elde edilmiş ve iç direnç değerinin ise 506Ω olduğu tespit edilmiştir. İşletme süresinin sonunda üretilen güç miktarı $17,3 \text{ mW/m}^2$ değerine düşerken iç direnç miktarı 1925Ω değerine yükselmiştir. Ultrex membran kullanılan MYH’de üretilen maksimum güç miktarı ise 168 mW/m^2 iç direnç değerinin ise 318Ω olduğu belirlenmiştir. İşletme süresinin sonunda iç direnç değerinin $21,8 \text{ mW/m}^2$ değerine düştüğü iç direnç değerinin ise 3290Ω değerine yükseldiği tespit edilmiştir. Farklı MYH’lerde üretilen güç miktarları değerlendirildiğinde sırası ile Fumapem>Ultrex>Nafion şeklinde olduğu görülmüştür. Ultrex membran kullanılarak üretilen güç miktarı nafion membran kullanılarak üretilen güç miktarından 2,6 kat daha yüksek olduğu, Fumapem membran kullanılarak ise 3 kat daha yüksek güç üretimi elde edildiği görülmüştür.

Farklı membranlar için meydana gelen güç kaybı değerlendirildiğinde Fumapem, Nafion ve Ultrex membranın kullanıldığı MYH’lerde meydana gelen güç kayıpları sırası

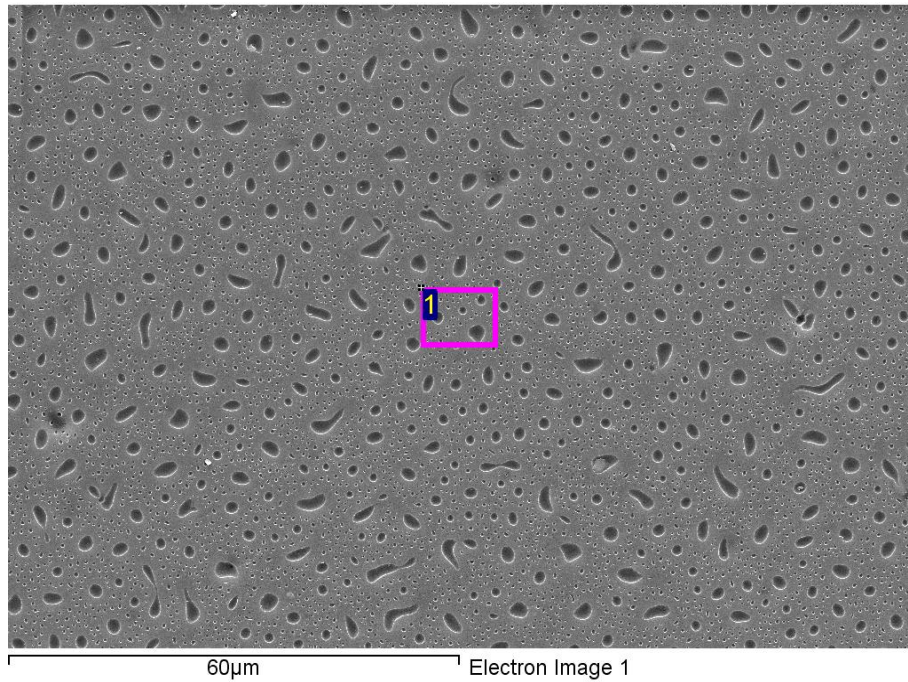
ile % 71,8, % 72,7 ve % 87 olarak gerçekleşmiştir. Bu sonuçlara göre proton değişim membranında meydana gelen biyotıkanıklılık sonucunda farklı membranların performanlarında meydana gelen kayıpların Fumapem<Nafion<Ultrex şeklinde olduğu görölmüşür. Elde edilen sonuçlardan Fumapem ve Nafion membranının kullanımında işletme süresince meydana gelen güç kayıplarının biri birine oldukça yakın olduğu belirlenmiştir, ayrıca Ultrex membranda meydana gelen performans kaybının Fumapem ve afion membrana nazaran daha yüksek olduğu görölmüşür. Literatürde Xu ve arkadaşlarının (2012) yaptığı çalışmada proton değişim membranının tıkanması sonucunda MYH’de üretilen güç miktarının azaldığını belirtmişlerdir. Söz konusu çalışmada, MYH’de üretilen güç miktarında meydana gelen azalmanın iki sebepten kaynaklandığı belirtilmiştir. Bunlardan biri fiziksel tıkanıklılık nedeni ile membran yüzeyinde inorganik (katyon) birikimine bağlı olarak proton transferinin engellenmesi, diğer neden ise meydana gelen pH gradientinden dolayı potansiyel kayıpların arttığı ve proton transferinin kısıtlandığını belirtmiştir. Yapılan çalışmada elde edilen SEM görüntüleri kullanılan membranların yüzeyinde meydana gelen birikme nedeniyle üretilen güç miktarının düştüğü gözlenmiştir.

4.6 SEM Görüntüleri ve EDX Sonuçları

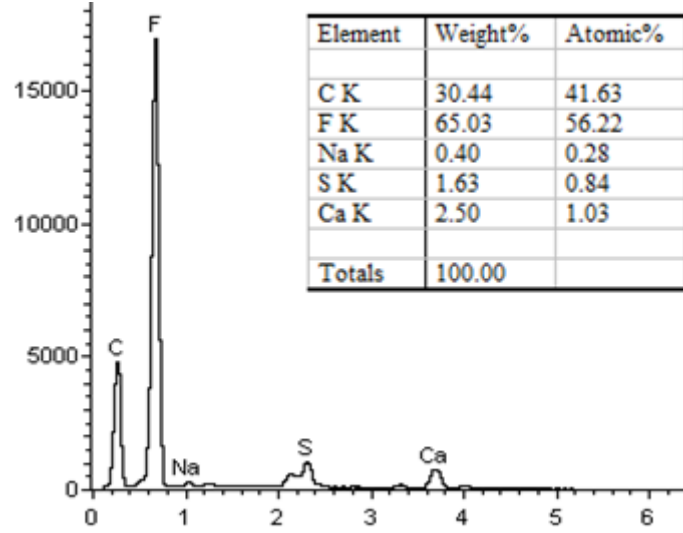
4.6.1 Membranların Temiz Haldeki SEM ve EDX Sonuçları

Yapılan çalışmada kullanılan membran ve elektrotların, kullanılmadan önce ve kullanıldıktan sonra yüzeylerinden SEM görüntüleri alınmıştır, ayrıca EDX analizleri yapılarak membran ve elektrot yüzeyinde meydana gelen değişikliklerin incelenmesi amaçlanmıştır. Yapılan EDX analizinde noktasal ve bölgesel analizler uygulanmış membran ve elektrot yüzeyindeki oluşum incelenmiştir.

Çalışmada kullanılan Fumapem (F-1050), Nafion 117 ve Ultex (CMI-7000) marka membranların temiz halde yüzeylerinden 1000 kat büyütme ile SEM görüntüleri alınmıştır (Şekil 4.114, Şekil 4.116 ve Şekil 4.120). Fumapem marka proton değişim membranı için elde edilen EDX sonuçlarına göre yapısında % 30,44 C (W/W) ve % 65,03 F (W/W) olduğu tespit edilmiştir. SEM görüntüsü ve EDX sonucu Şekil 4.114 ve Şekil 4.115’de verilmiştir.

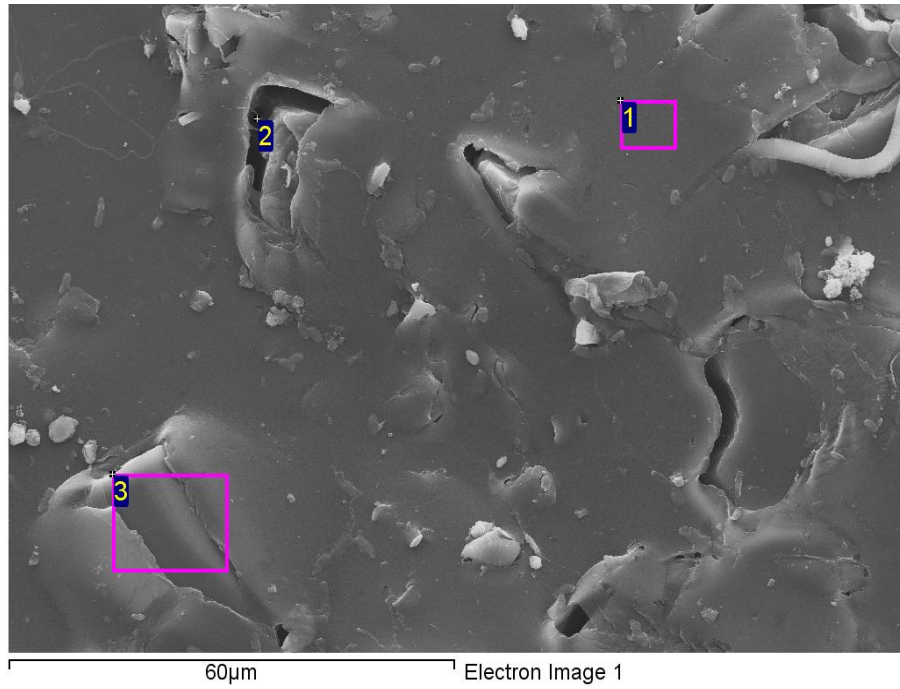


Şekil 4.114: Fumapem membranının temiz haldeki SEM görüntüsü (1: EDX alınan Bölge)



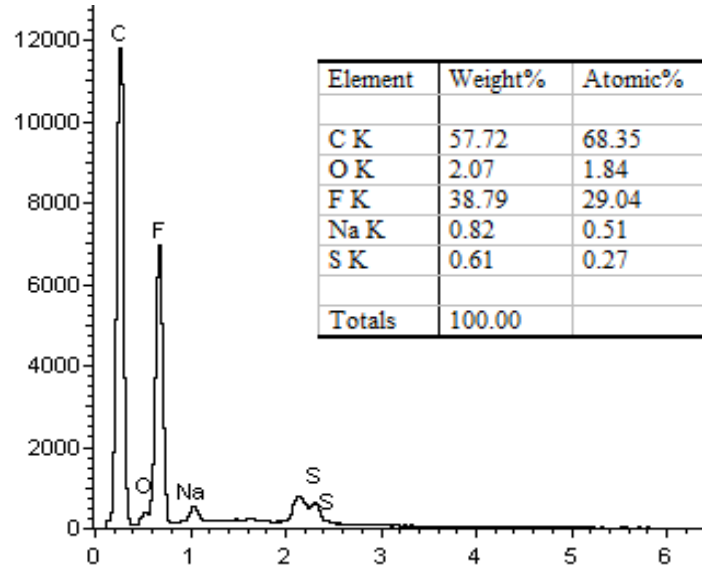
Şekil 4.115: 1. bölgeden alınan EDX analizi sonucu

Fumapem membran yüzeyindeki gözenek çapı boyutunun 0,24 μM ile 7,2 μM arasında değiştiği görülmüştür. Ayrıca fumapem membranda bulunan gözeneklerin homojen bir şekilde dağıldığı görülmüştür.

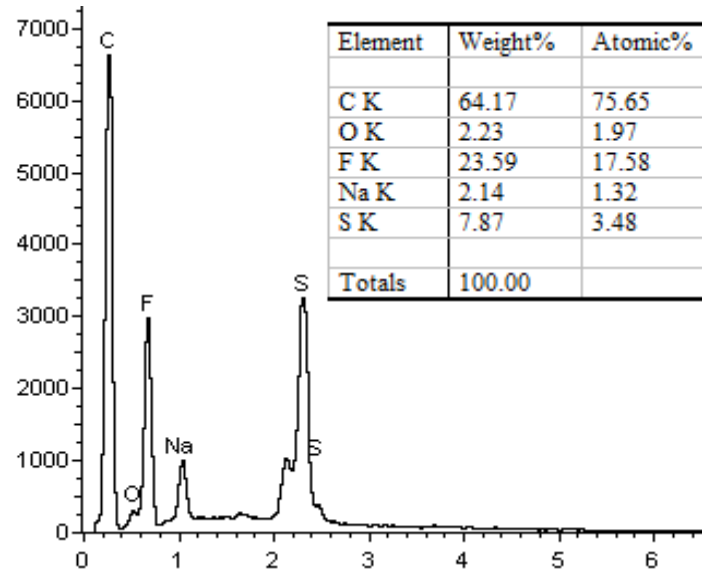


Şekil 4.116: Ultrex CMI-7000 membranının temiz haldeki SEM görüntüsü (1, 2 ve 3: EDX alınan Bölgeler)

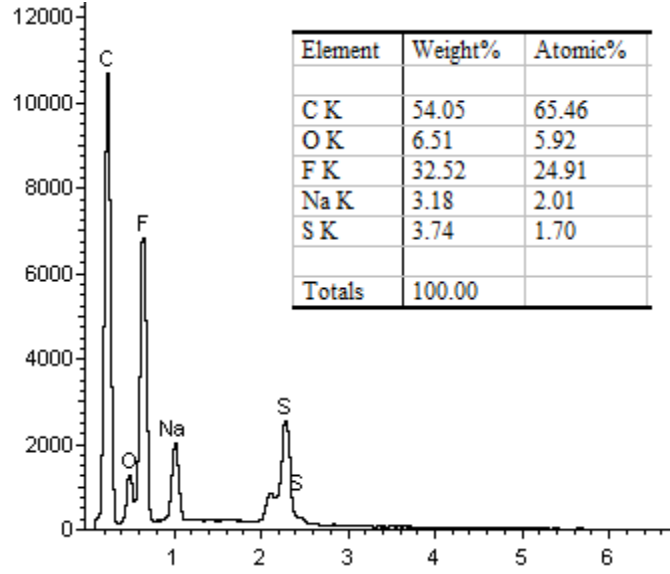
Ultrex membran yüzeyinde işaretlenen noktalardan alınan EDX sonuçları Şekil 4.117, Şekil 4.118 ve Şekil 4.119’da verilmiştir.



Şekil 4.117: 1. Bölgeden alınan EDX analizi sonucu



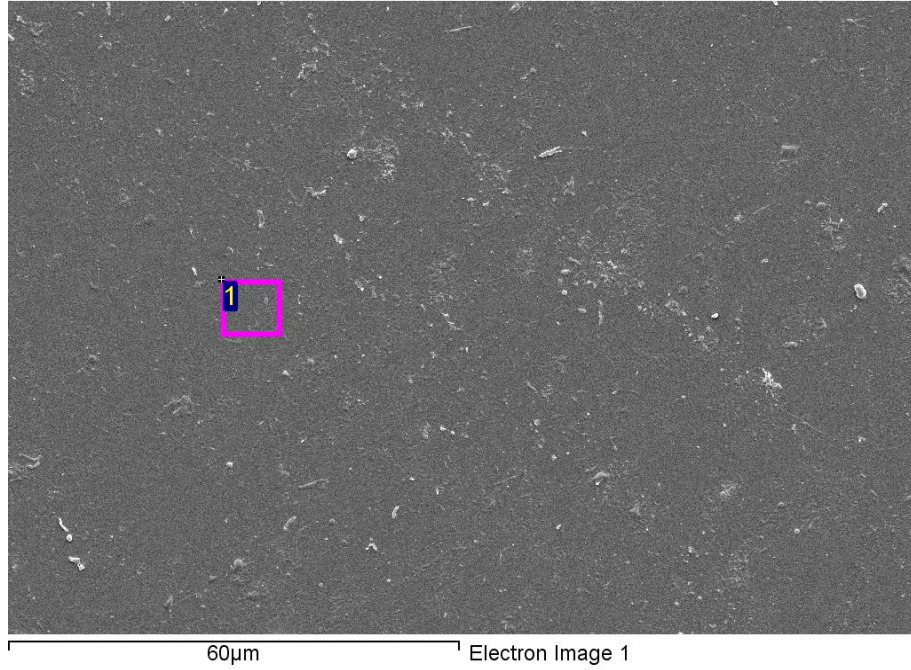
Şekil 4.118: 2. bölgeden alınan EDX analizi sonucu



Şekil 4.119: 3. bölgeden alınan EDX analizi sonucu

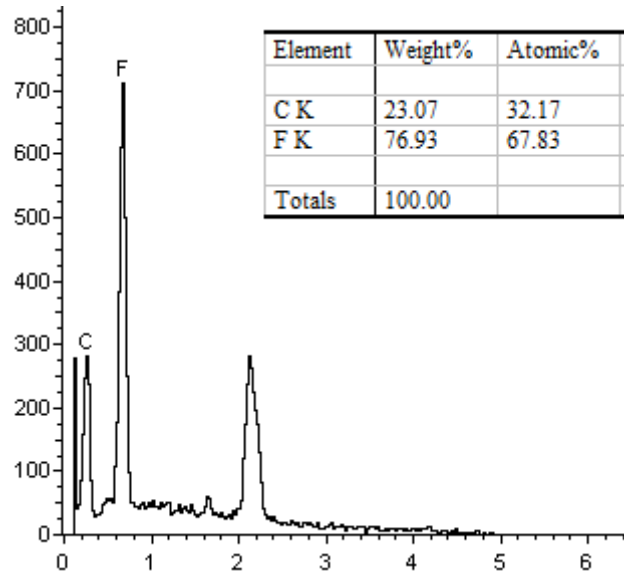
Ultrex CMI-7000 marka proton değişim membranı için üç farklı bölgeden EDX analizi uygulanmıştır. İşaretlenmiş bölgelerden 1 olarak numaralandırılan bölgeden alınan EDX sonuçlarına göre yapısında %57,72 C (W/W) ve %38,79 F (W/W), 2 olarak numaralandırılmış noktadan alınan EDX sonucuna göre % 64,17 C (W/W) ve %23,59 F (W/W) ve 3 olarak numaralandırılmış bölgeden alınan EDX sonucuna göre %54,05 C (W/W) ve % 32,52 F (W/W) olduğu tespit edilmiştir. Ultrex membranın gözeneklerinin geometrisinin aynı olmadığı görülmüş ve gözenek çaplarının yaklaşık olarak 20 μ M civarında olduğu tespit edilmiştir.

Nafion marka proton değişim membranı için 1 olarak numaralandırılmış bölgeden alınan EDX sonuçlarına göre yapısında % 23,07 C (W/W) ve % 76,93 F (W/W) içerdiği tespit edilmiştir. Nafion membranın 1000 kat büyütme ile membran gözenekleri tespit edilememiş ve yüzey yapısında meydana gelen bozulma nedeni ile daha yüksek büyütmelerde görüntü alınamamıştır (Şekil 4.120).



Şekil 4.120: Nafion 117 membranının temiz haldeki SEM görüntüsü (1:EDX alınan bölge)

Nafion 117 marka membran yüzeyinde işaretlenmiş bölgeden alınan EDX analizi sonucu Şekil 4.121’de verilmiştir.



Şekil 4.121: 1. bölgeden alınan EDX analizi sonucu

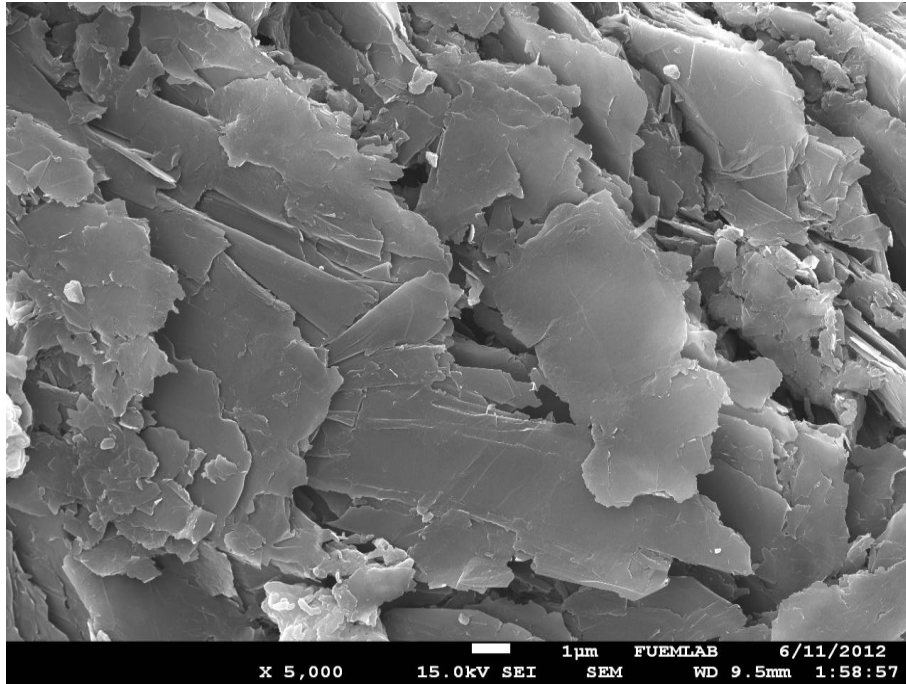
Membranların kullanılmadan önceki (temiz haldeki) SEM ve EDX analizleri sonucunda membran özelliklerinin biri birinden farklı olduğu görülmüştür. Membran gözeneklerinin dağılımının üniform bir yapıda olmadığı ve gözenek boyutlarının biri birinden farklı olduğu belirlenmiştir. Membranlarda perflorosülfonik bağlardan meydana

geldiği için yapısal olarak başlıca C ve F içeriğine sahip oldukları tespit edilmiştir (Doğan ve Çolak, 2009).

4.6.2 Kullanılan Elektrotların Temiz Haldeki SEM ve EDX Sonuçları

4.6.2.1 Grafit Elektrot

Mikrobiyal yakıt hücrelerinde elektrik üretimini etkileyen en önemli faktörlerden biri kullanılan elektrottaki mikrobiyal tutunma özelliğidir. Elektrot yüzeyinde tutunan mikroorganizma miktarının artışı ile üretilen güç miktarı artmaktadır (Wei vd., 2011). Kullanılan grafit elektrotun 5000 kat büyütmede SEM görüntüsünde mikroorganizma tutunmasına uygun bir yüzey yapısına sahip olduğu görülmüştür. Grafit elektrot yüzeyinden alınan SEM görüntüsü Şekil 4.122’de verilmiştir.

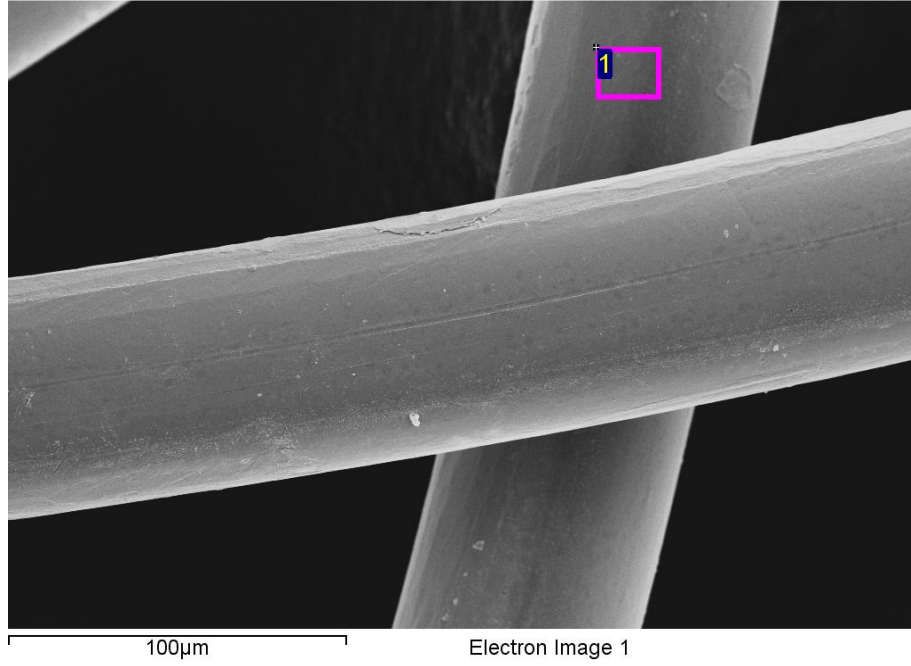


Şekil 4.122: Grafit elektrotun temiz haldeki SEM görüntüsü

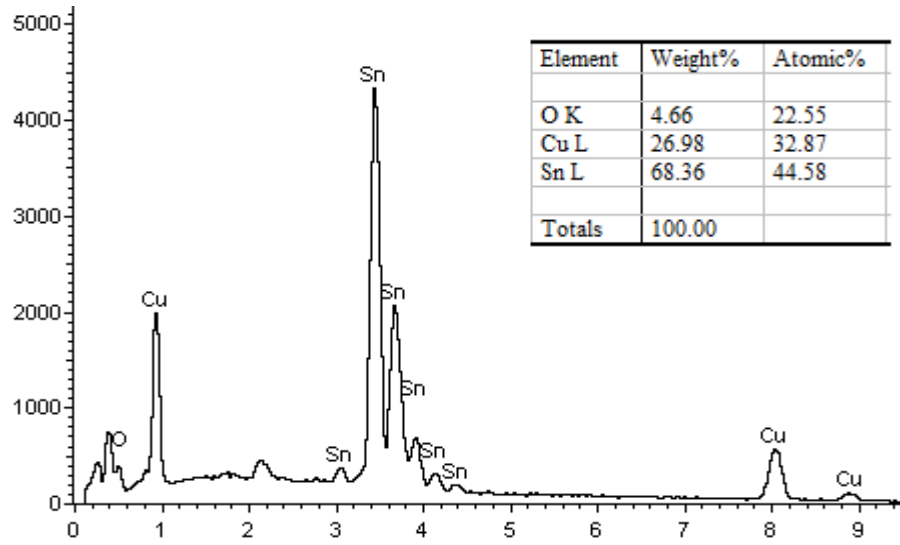
4.6.2.2 Bakır Kumaş Elektrot

Çalışmada kullanılan bakır kumaş elektrot bakırın aşınmasını önlemek amacıyla kalay ile kaplanmıştır. Bakır kumaş elektrot için elde edilen SEM ve EDX sonuçları Şekil 4.123 ve Şekil 4.124’de verilmiştir. 1 olarak numaralandırılmış bölgeden alınan EDX

sonuçlarına göre bakır kumaş elektrot yapısında % 26,98 Cu (W/W) ve % 68,36 Sn (W/W) içerdiği belirlenmiştir.



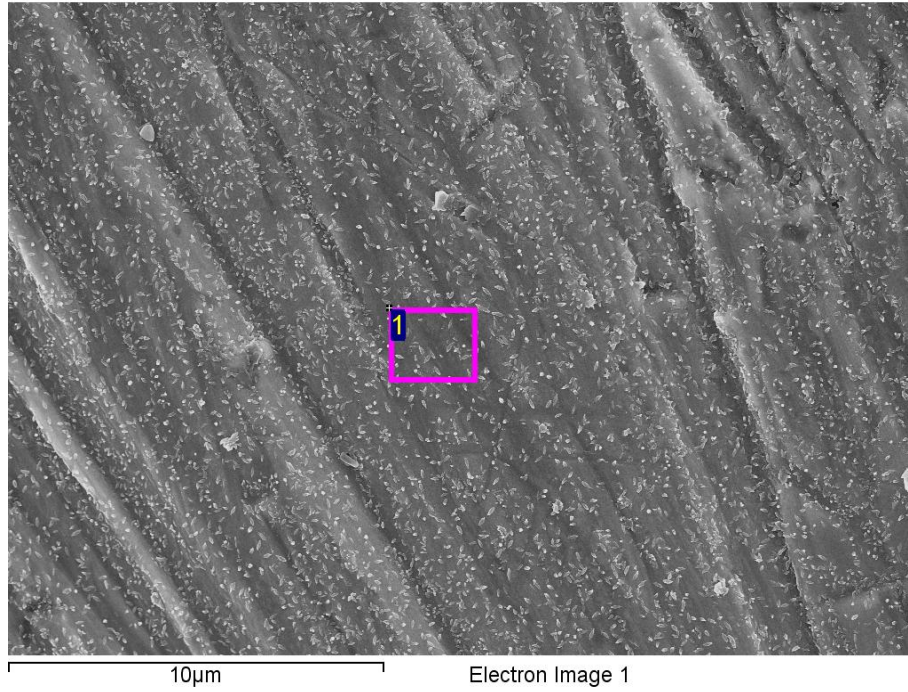
Şekil 4.123: Kullanılan membranın temiz haldeki SEM görüntüsü (1: EDX alınan bölge)



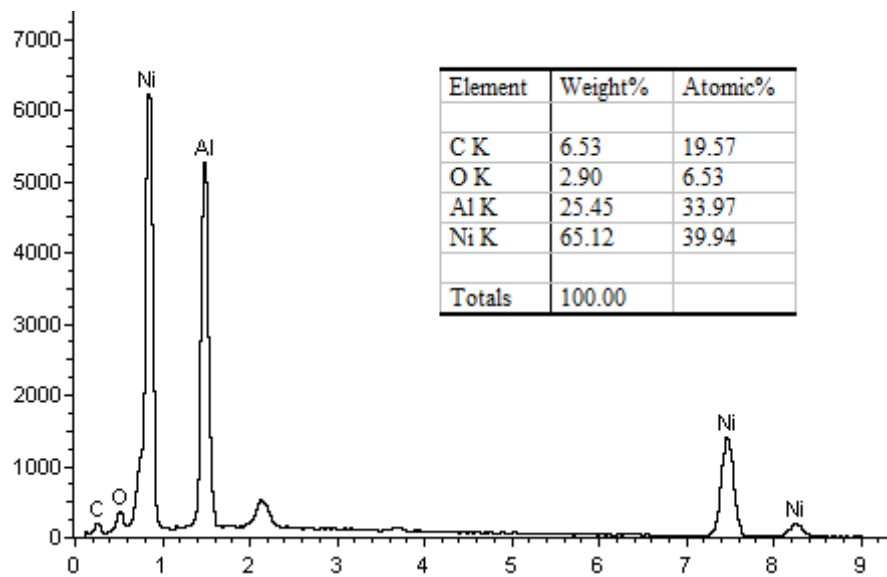
Şekil 4.124: 1. bölgeden alınan EDX analizi sonucu

4.6.2.3 Al-Ni Alaşımı Elektrot

Al-Ni alaşımı elektrot için elde edilen SEM ve EDX sonuçları Şekil 4.125 ve Şekil 4.126'da verilmiştir. 1 olarak numaralandırılmış bölgeden alınan EDX sonuçlarına göre Al-Ni alaşımı elektrot yapısında % 25,45 Al ve % 65,12 Ni içerdiği tespit edilmiştir.



Şekil 4.125: Al-Ni alaşımı elektrotun SEM görüntüsü (1: EDX alınan bölge)

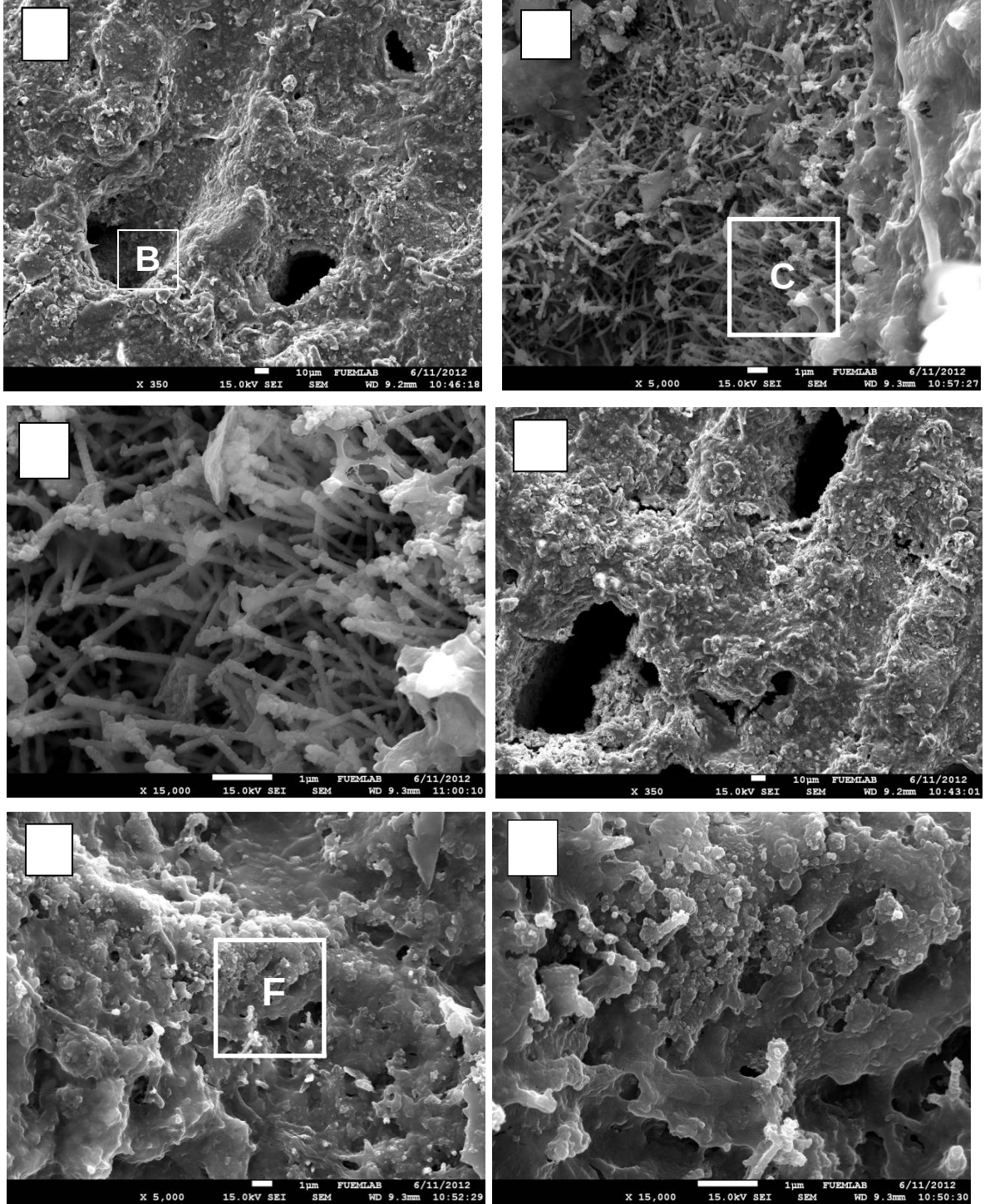


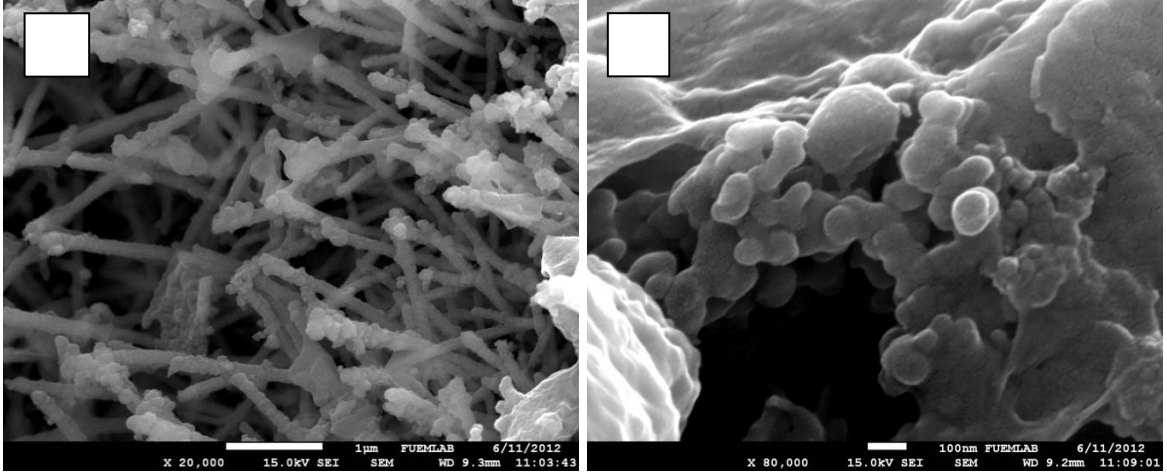
Şekil 4.126: 1. bölgeden alınan EDX analizi sonucu

4.6.3 Evsel atıksu ile Yapılan Çalışmalarda Kullanılan Elektrot ve Membranların SEM ve EDX Sonuçları

4.6.3.1 Al-Ni Elektrot Yüzeyi Görüntüleri

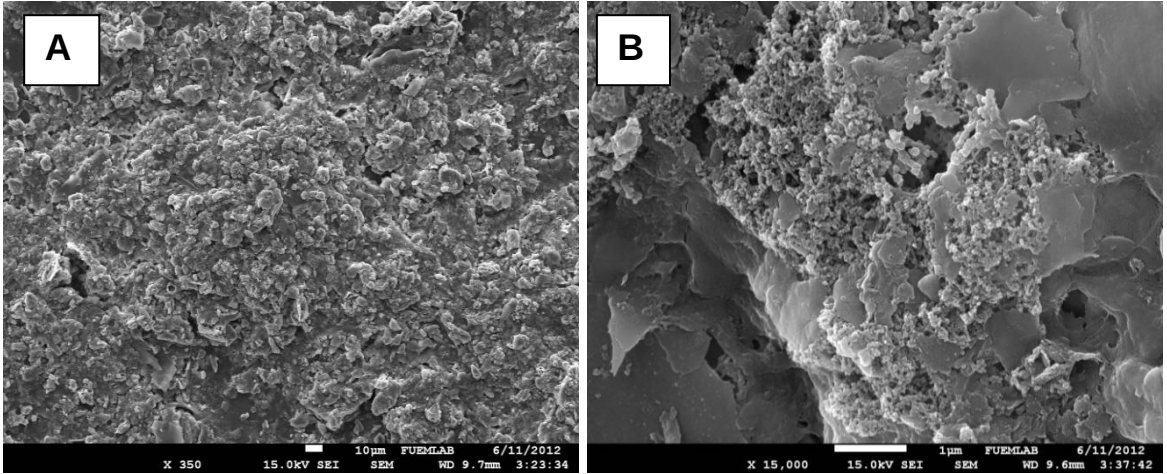
Evsel atıksuyun substrat olarak kullanıldığı MYH’de kullanılan Al-Ni alaşımı elektrot yüzeyinden elde edilen SEM görüntüleri Şekil 4.127’de verilmiştir.





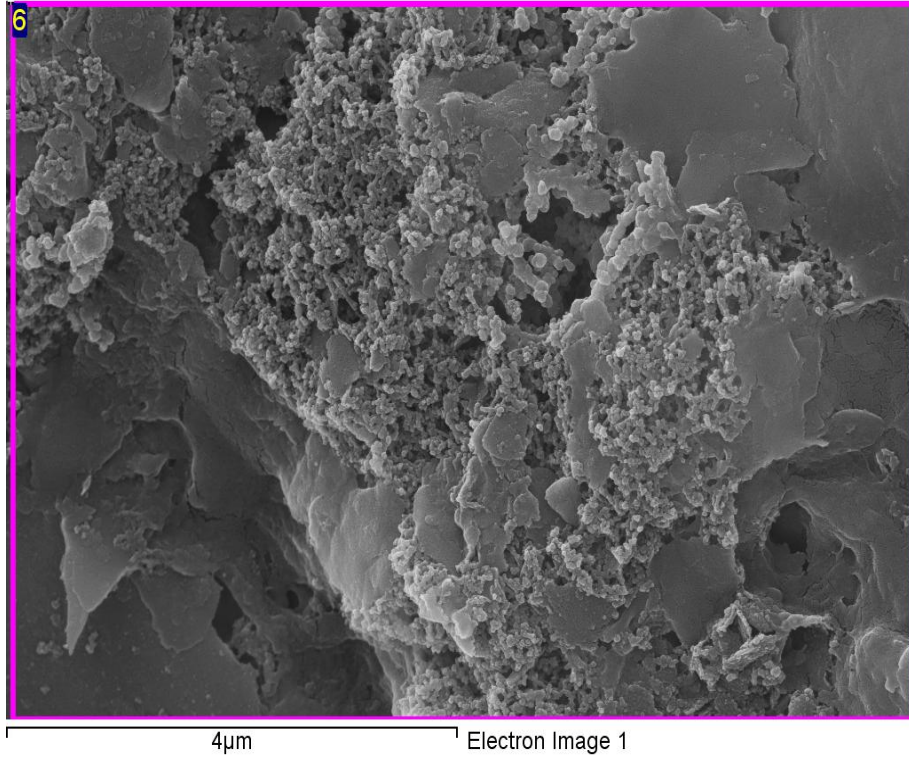
Şekil 4.127: Al-Ni alaşımı elektrotun işletmeden sonraki SEM görüntüleri

Al-Ni alaşımı elektrotun yüzeyinden farklı noktalardan SEM görüntüleri alınmış ve büyütme oranları giderek arttırılmıştır. Elektrot yüzeyinde bulunan gözeneklerin iç kısımlarında çoğunlukla çubuksu mikroorganizmaların mevcut olduğu görülmüştür Şekil 4.127 C, D ve G. Benzer mikroorganizma yapıları Logan vd. 2005 tarafından tespit edilmiştir. Ayrıca elektrot yüzeyinde farklı yapıdaki mikroorganizma türlerinin varlığı tespit edilmiştir (Zhang vd., 2006). Al-Ni alaşımı elektrotun kullanıldığı MYH’de membran yüzeyinde oluşan yapının SEM görüntüsü Şekil 4.128’de görülmektedir.

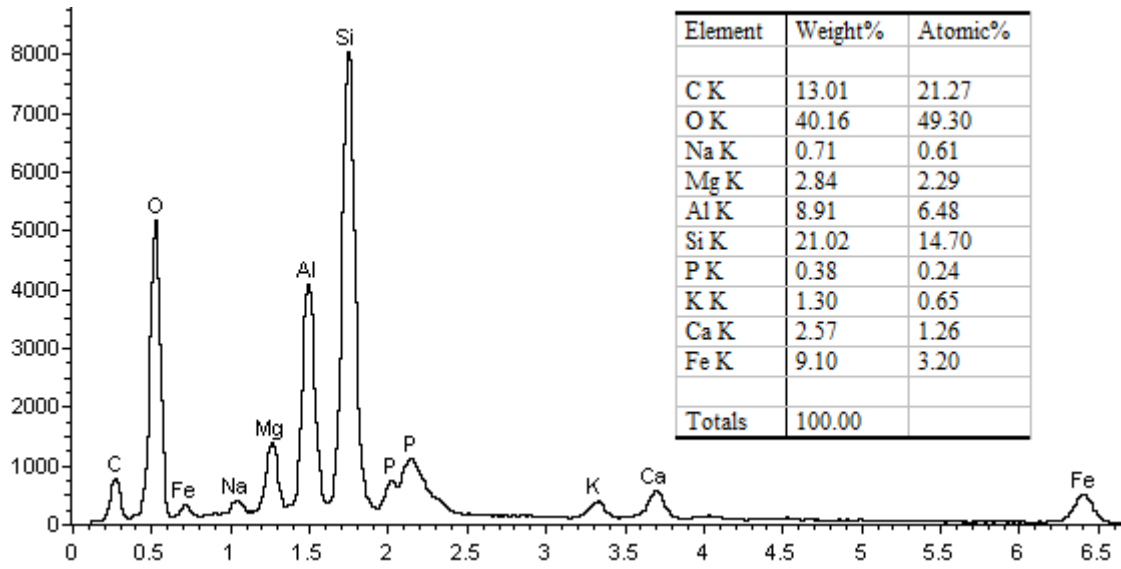


Şekil 4.128: Al-Ni alaşımı elektrotunun kullanıldığı reaktördeki membran yüzeyinin SEM görüntüsü

Elde edilen SEM görüntülerinden membran yüzeyinde organik meddeler ile mikroorganizmaların birleşip karışık bir yapı oluşturduğu görülmüştür. Benzer sonuçlar Lee vd., (2010b) ve Zhang vd., (2006) tarafından yapılmış çalışmada da görülmüştür. Şekil 4.129’da Al-Ni elektrot yüzeyinden alınan SEM görüntüsü ve Şekil 4.130’da ise bu görüntünün tamamından alınan EDX sonucu verilmiştir.



Şekil 4.129: Al-Ni alaşımı elektrot yüzeyinden alınan SEM görüntüsü

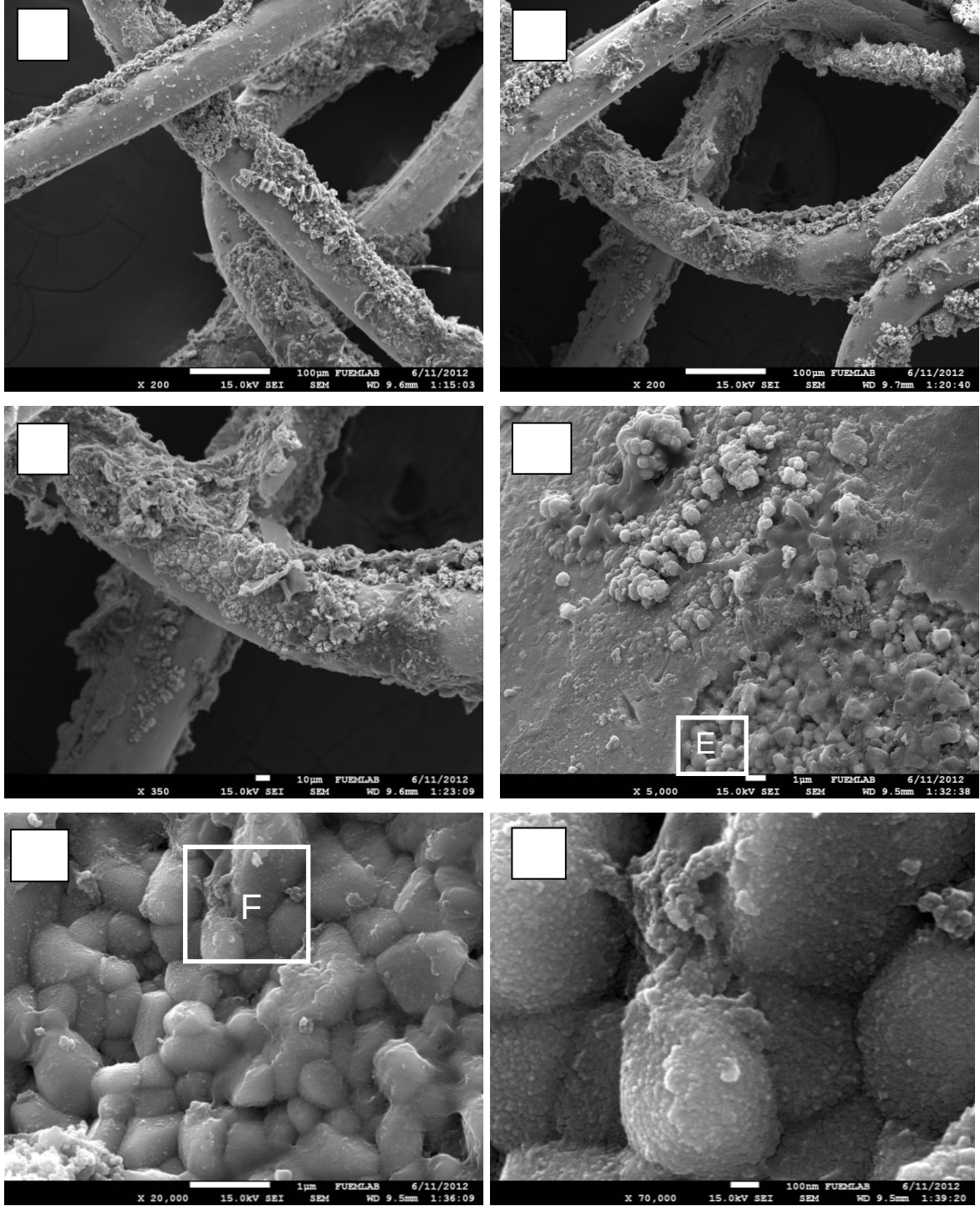


Şekil 4.130: Şekil 4.141'in tamamından alınan EDX analizi sonucu

EDX sonuçlarına göre elektrot yüzeyinde %13,01 C (W/W), % 40,16 O (W/W), % 9,10 Fe (W/W) ve 2,57 Ca (W/W) olduğu görülmüştür.

Elde edilen SEM görüntü sonuçlarına göre elektrot yüzeyinde biyofilm tabakalarının olduğu görülmüştür. Elektrot yüzeyinden daha yüksek büyütmelerde görüntüler alınmış ve

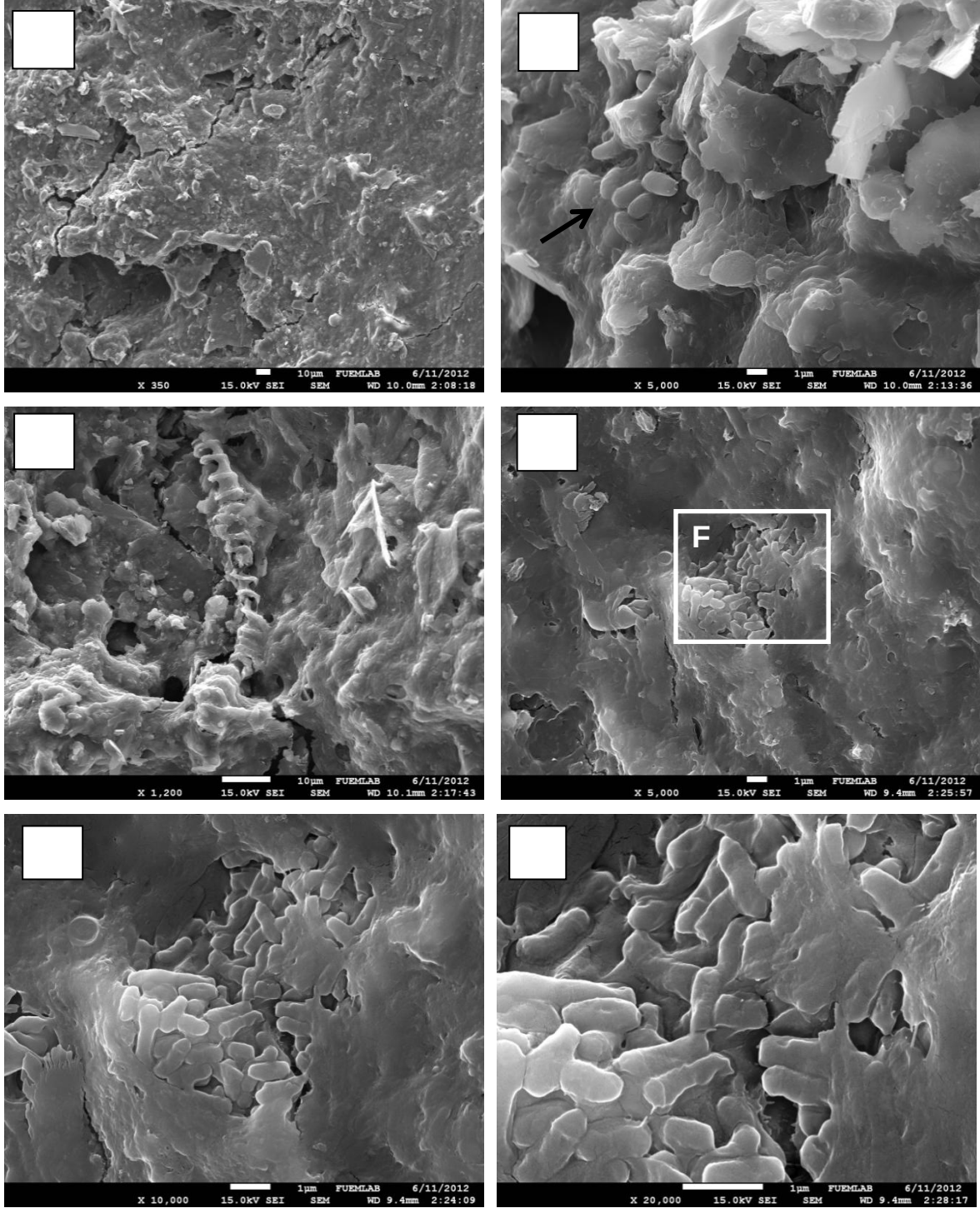
elektrot yüzeyinde yoğun bakteri kolonilerin mevcut olduğu tespit edilmiştir (Şekil 4.131 D, E, F).



Şekil 4.131: Bakır kumaş elektrotun kullanıldıktan sonraki elektrot yüzeyi SEM görüntüleri

Elektrot yüzeyinde mevcut olan bakterilerin ortalama boyutları 1 µM civarında olduğu belirlenmiştir. Literatürde yapılmış benzer çalışmalarda elektrot yüzeyinde basil

formundaki (yuvarlak şekilli) bakterilerin mevcut olduğu ve bu bakterilerin elektron transferinden sorumlu oldukları belirtilmiştir (Li vd., 2008).



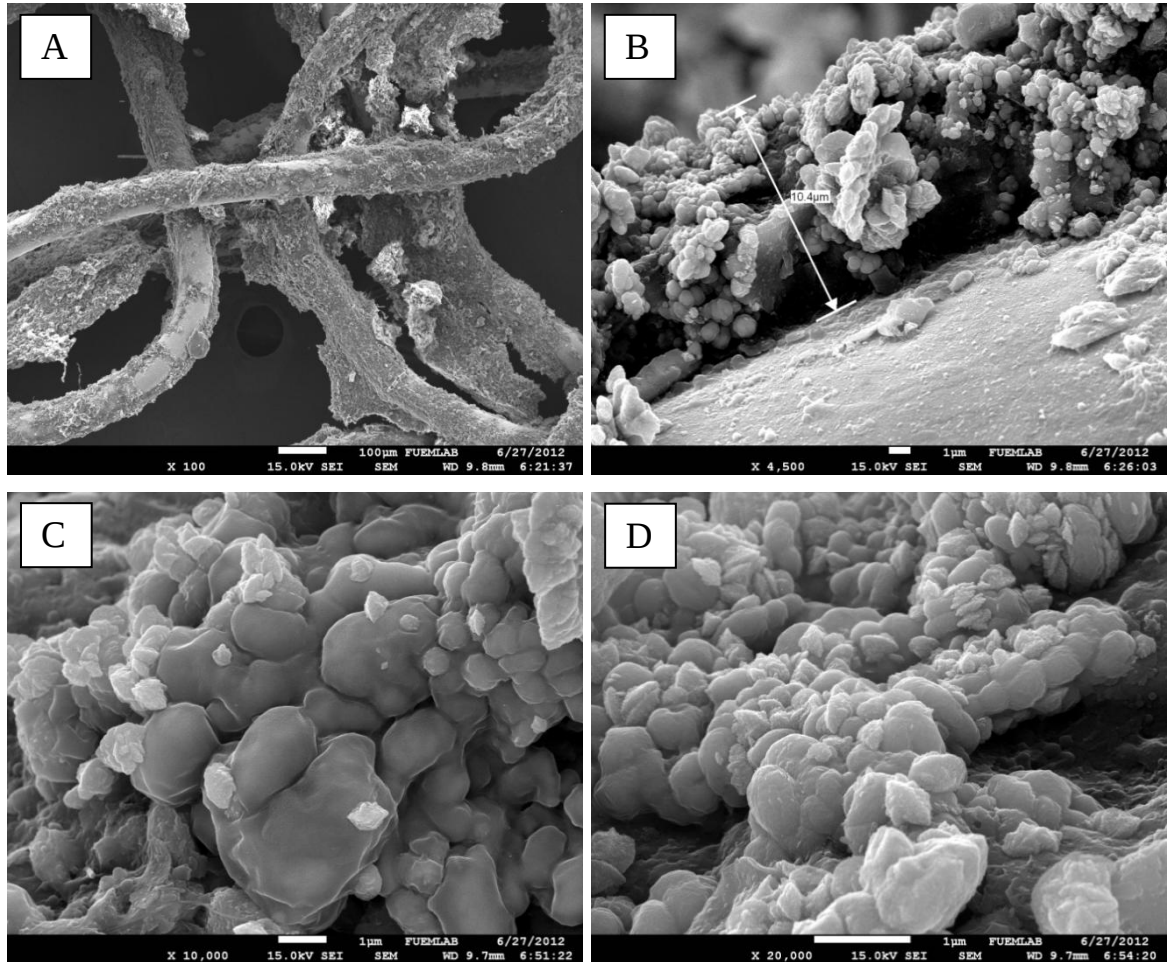
Şekil 4.132: Grafit elektrotunun kullanıldıktan sonra elektrot yüzeyi sem görüntüleri

Grafit elektrotun yüzeyinden alınan SEM görüntü sonuçlarına göre elektrot yüzeyinde yoğun bir şekilde organik birikimin olduğu ve mikroorganizmaların bu organik

yapı arasında sıkıştığı görülmüştür (Şekil 4.132 D ve E). Grafit elektrot yüzeyinde bulunan mikroorganizmaların yaklaşık 1 μM boyutlarında olduğu belirlenmiştir.

4.6.4 Yağ Atıksuyu ile Yapılan Çalışmalardaki SEM Görüntüleri ve EDX Sonuçları

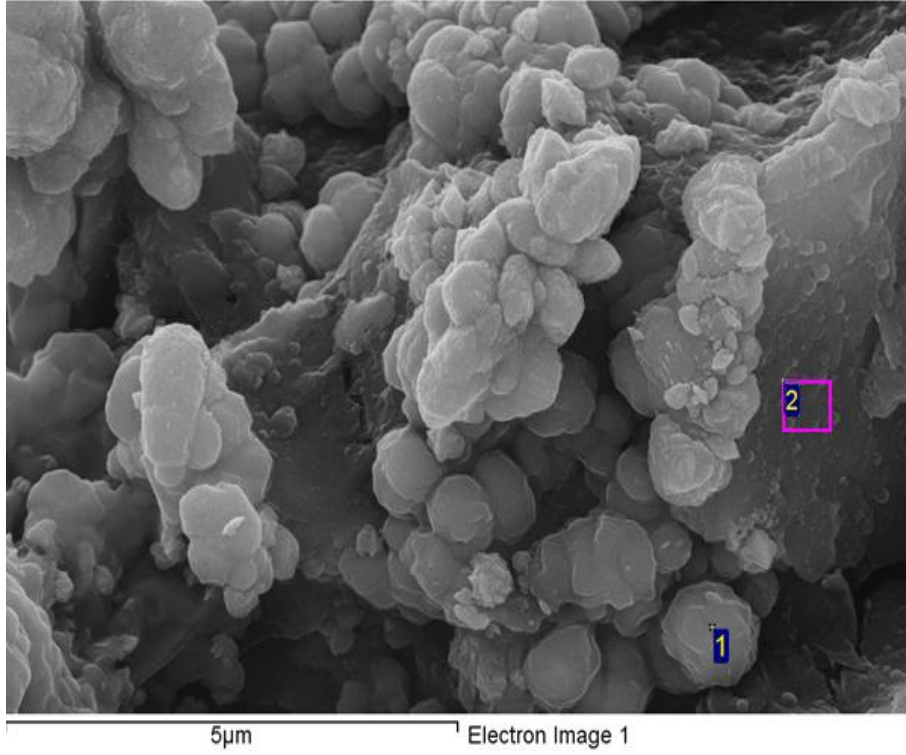
Elektrot yüzeyinde elde edilen SEM görüntü sonuçlarına göre elektrot yüzeyinde sıkı bir biyofilm tabakasının mevcut olduğu görülmüştür (Şekil 4.133 A). Ayrıca elektrot yüzeyinde bulunan mikroorganizmaların jel şeklindeki bir tabaka içerisinde olduğu görülmüştür (Şekil 4.133 C). Elde edilen SEM görüntülerinde elektrot yüzeyinde oluşan biyofilm kalınlığı ölçülmüş ve 10,4 μM boyutunda olduğu tespit edilmiştir (Şekil 4.133 B).



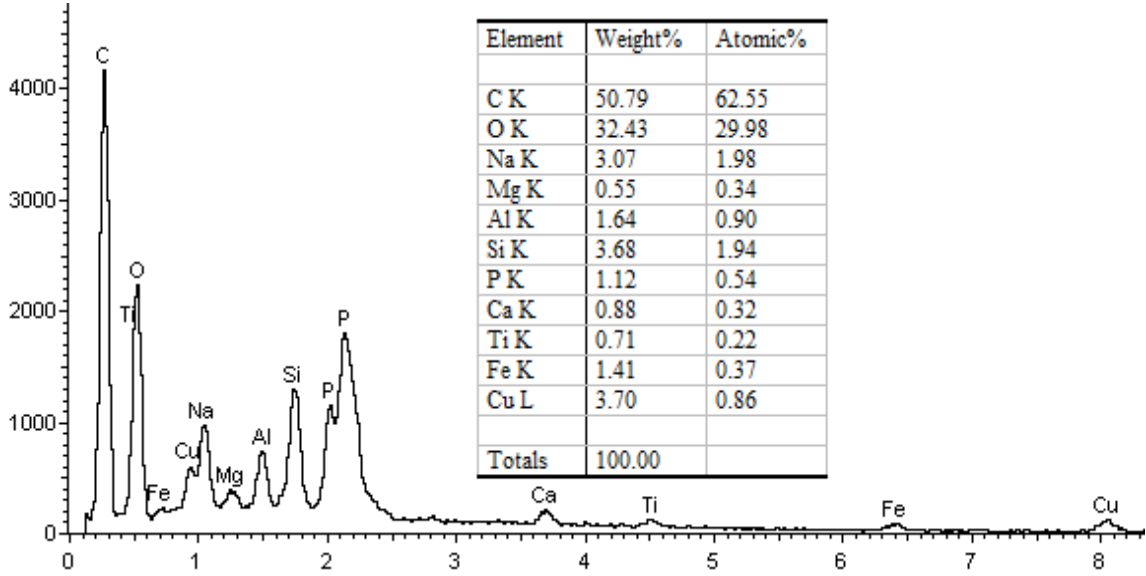
Şekil 4.133: Sediment ile aşıl原因an reaktördeki elektrot yüzeyi SEM görüntüleri

Bu sonuca paralel olarak Mardanpour (2012) ve arkadaşları sipiral bir yapı şeklinde hazırlanmış anot materyali üzerinde mikrobiyal tutunmanın etkili bir şekilde gerçekleştiği belirtmiştir. Marcus vd. (2007) yaptıkları çalışmada biyofilm kalınlığının 12 μM ye kadar artışı ile akım yoğunluğunun arttığı ve 12 μM değerinde 1,23 A m^{-2} akım değerine ulaşarak

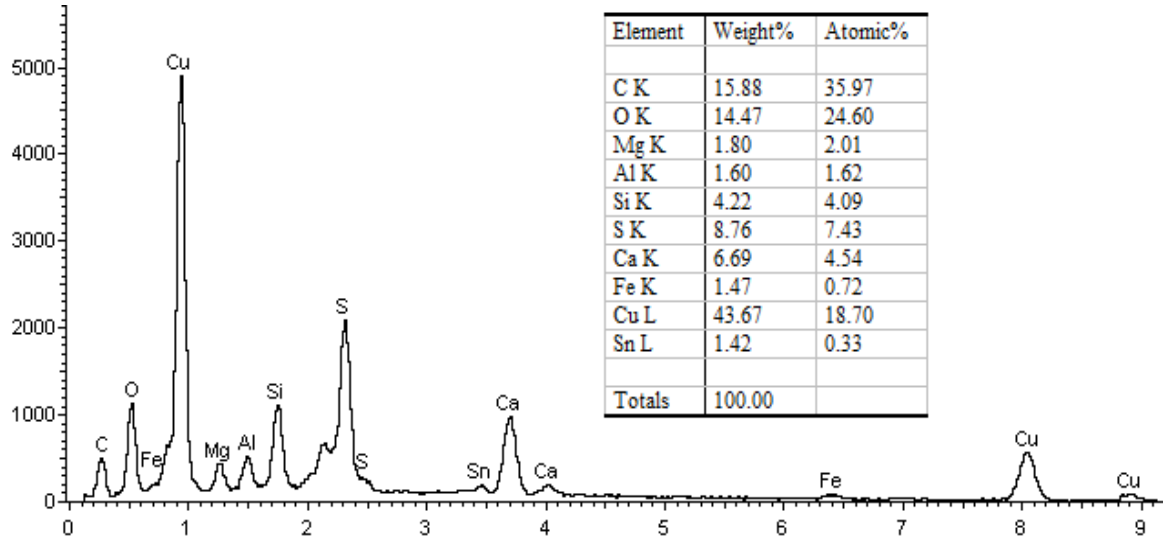
maksimum akım yoğunluğu elde ettiklerini belirtmişlerdir. Biyofilm kalınlığının 12 μM den daha yüksek değerlerinde ise MYH’de üretilen akım yoğunluğu değerinin düşeceğini belirtmiştir. Sediment ile aşılana MYH’de elektrot yüzeyinden alınan SEM görüntüsü Şekil 4.134’de, EDX sonuçları ise Şekil 4.135 ve Şekil 4.136’da verilmiştir.



Şekil 4.134: Sediment ile aşılana reaktördeki elektrot yüzeyinin SEM görüntüsü (1 ve 2: EDX alınan noktalar)

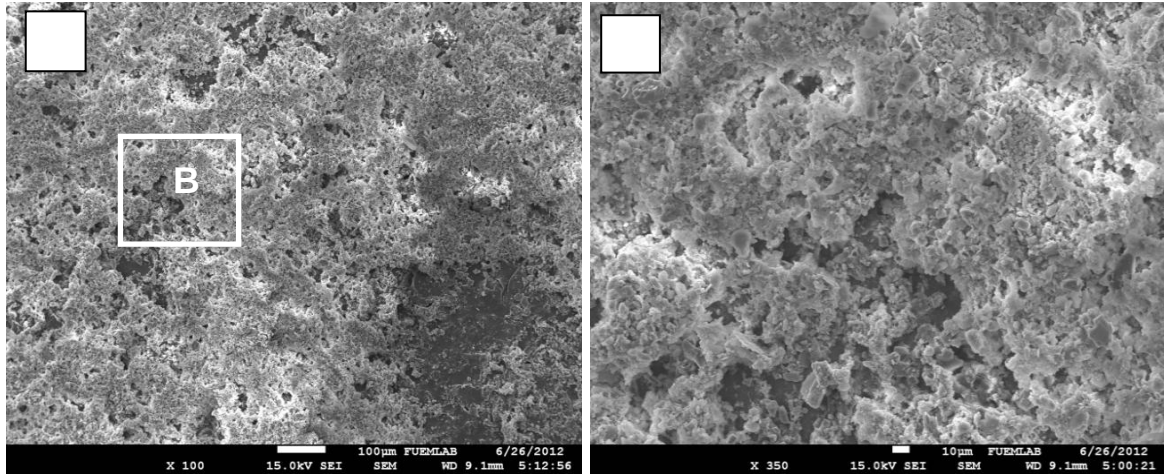


Şekil 4.135: 1. bölgeden alınan EDX analizi sonucu



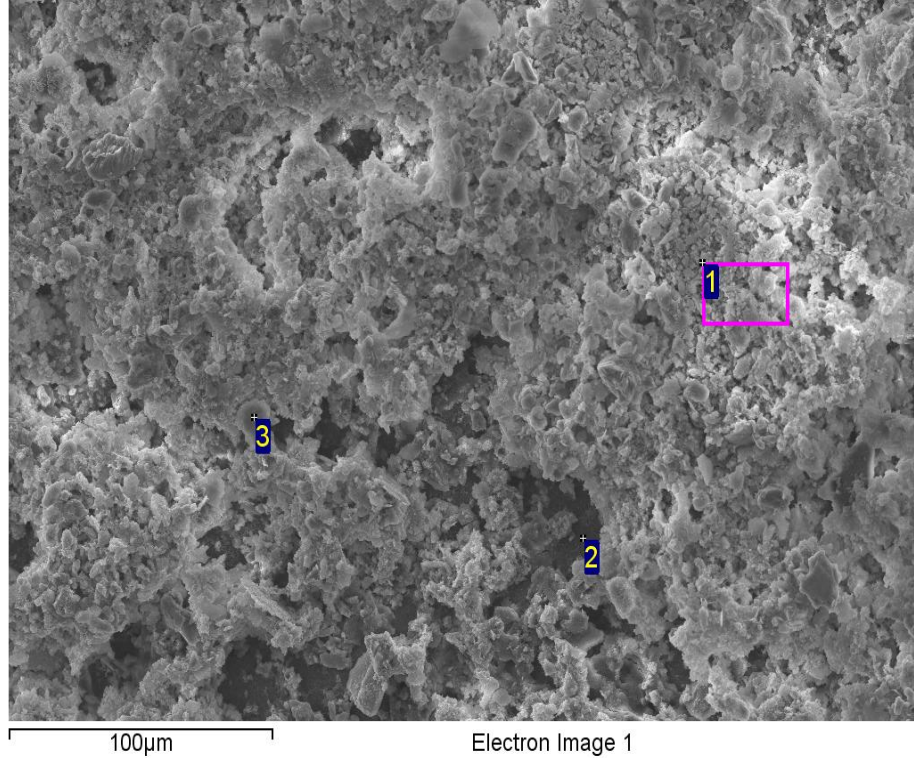
Şekil 4.136: 2. bölgeden alınan EDX analizi sonucu

EDX analizi sonuçlarına göre elektrot yüzeyindeki yapıda çoğunlukla Ca, Si ve S gibi bileşiklerin mevcut olduğu belirlenmiştir. Sediment ile aşılana MYH’de membra yüzeyindeki oluşumu incelemek amacıyla SEM görüntüsü alınmıştır (Şekil 4.137).

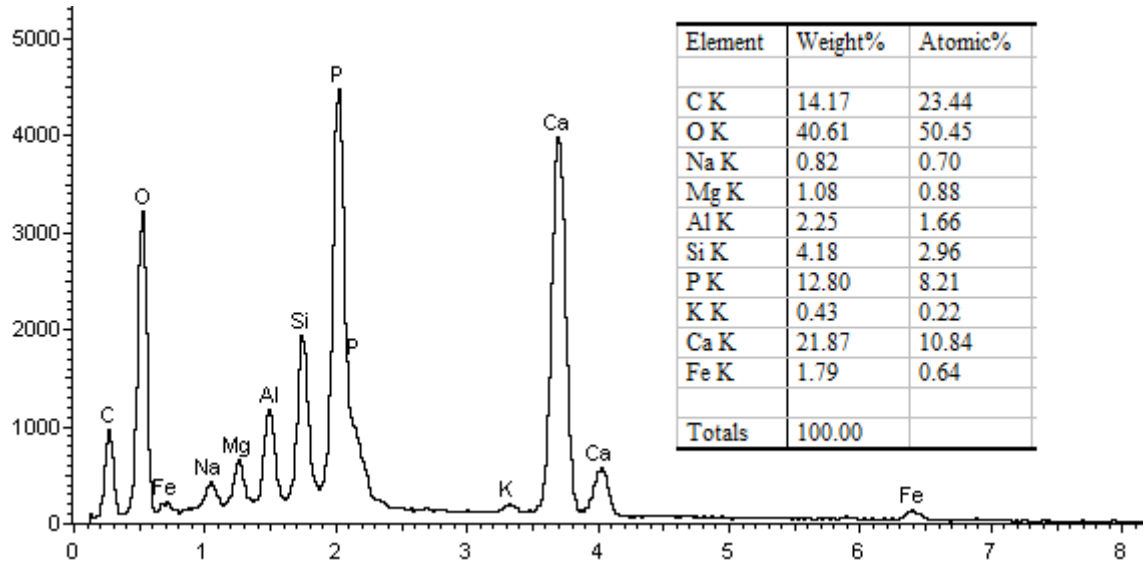


Şekil 4.137: Sediment ile aşılana MYH’deki membran yüzeyinin anot bölgesinin SEM görüntüsü

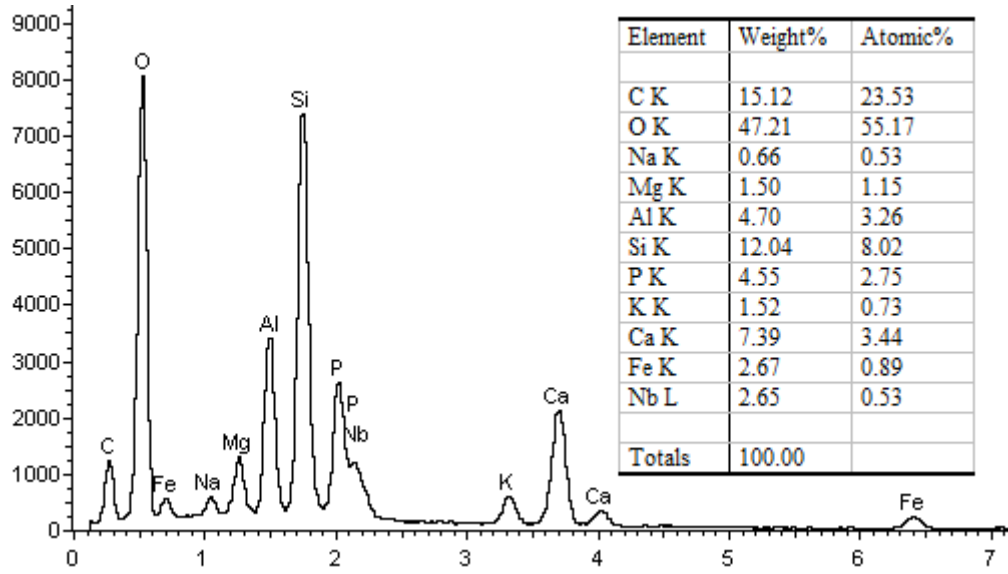
Sediment ile aşılana MYH’de kullanılan membranın anot yüzeyinde yoğun bir şekilde birikinti olduğu görülmüştür. Kek tabakasının içeriğini tespit etmek amacıyla membran yüzeyinde EDX analizi yapılmıştır. EDX analizi yapılan noktalar Şekil 4.138’de numaralandırılarak gösterilmiştir. Farklı bölgeler için elde edilen EDX sonuçları Şekil 4.139, Şekil 4.140 ve Şekil 4.141’de verilmiştir.



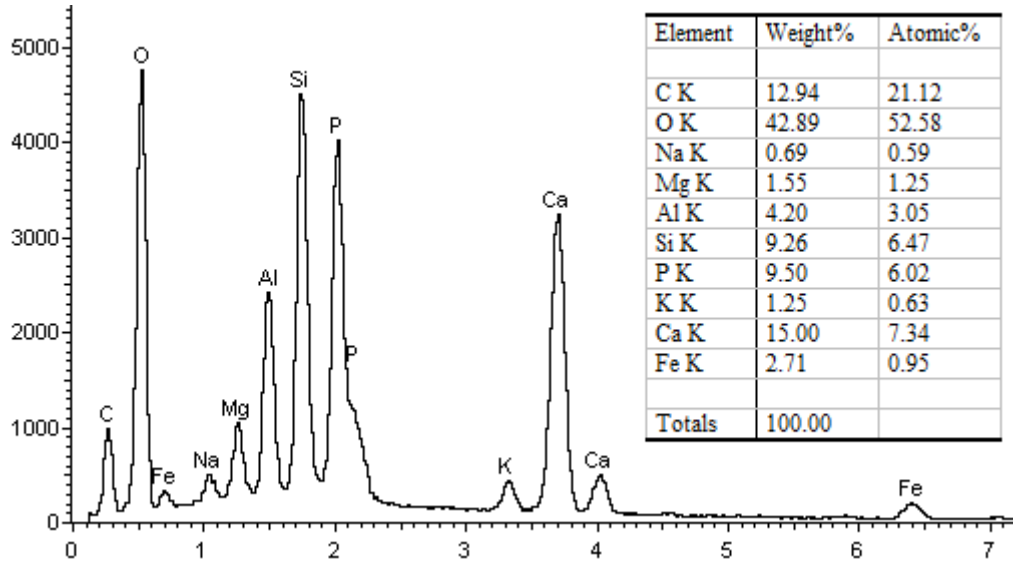
Şekil 4.138: Sediment ile aşılana reaktördeki membran yüzeyinin anot tarafının SEM görüntüsü (1,2 ve 3: EDX alınan noktalar)



Şekil 4.139: 1. bölgeden alınan EDX analizi sonucu

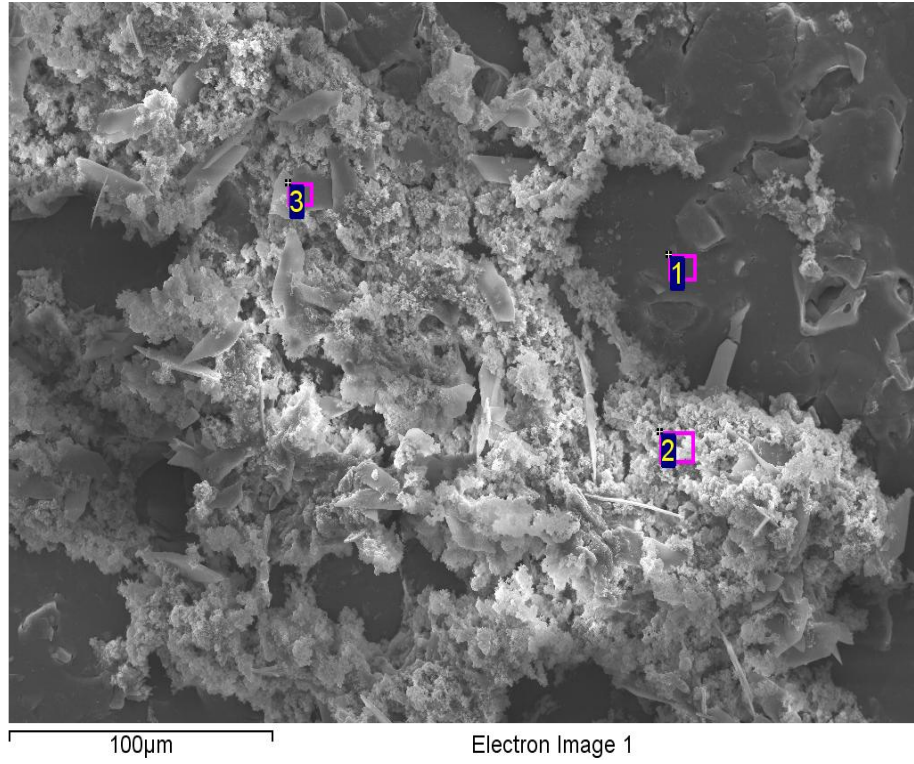


Şekil 4.140: 2. bölgeden alınan EDX analizi sonucu

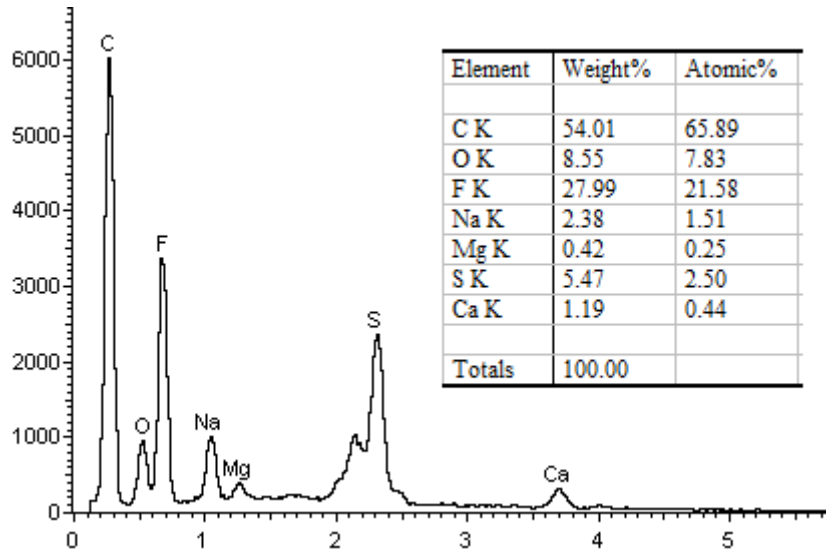


Şekil 4.141: 3. bölgeden alınan EDX analizi sonucu

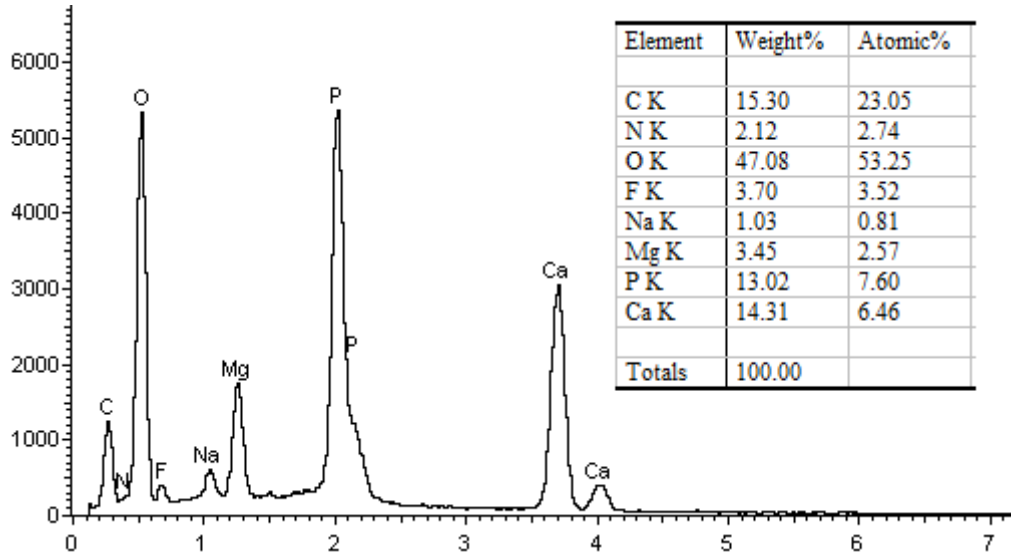
Yapılan EDX sonuçlarına göre membran yüzeyindeki birikintinin P, Ca, Si ve Mg içerikli olduğu belirlenmiştir. Sediment ile aşılana MYH’de kullanılan membranın katot tarafından alınan SEM görüntüsü Şekil 4.142’de bu görüntüden alınan EDX sonuçları ise Şekil 4.143, Şekil 4.144 ve Şekil 4.145’de verilmiştir.



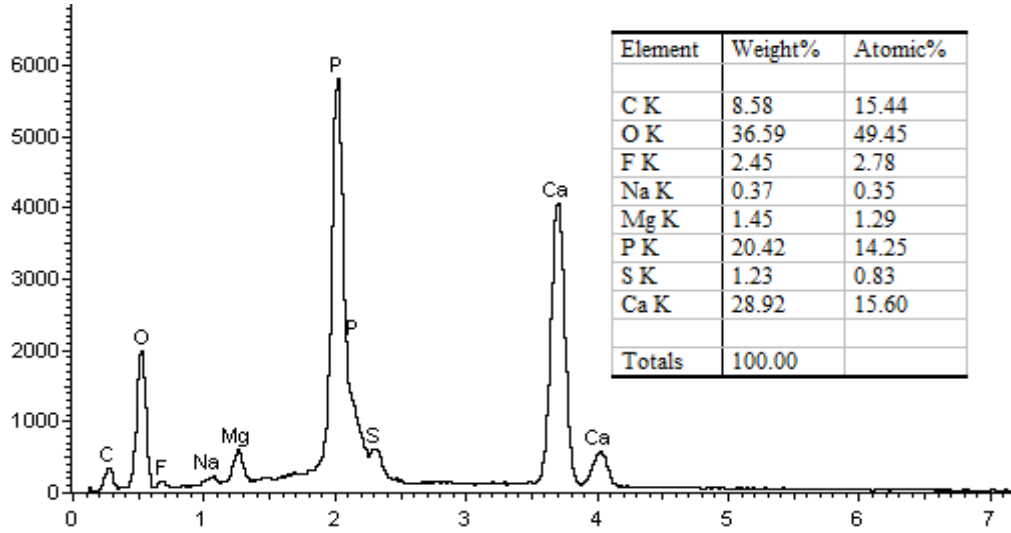
Şekil 4.142: Sediment ile aşıl原因an reaktördeki membran yüzeyinin katot tarafının SEM görüntüsü ve EDX sonuçları



Şekil 4.143: 1. bölgeden alınan EDX analizi sonucu

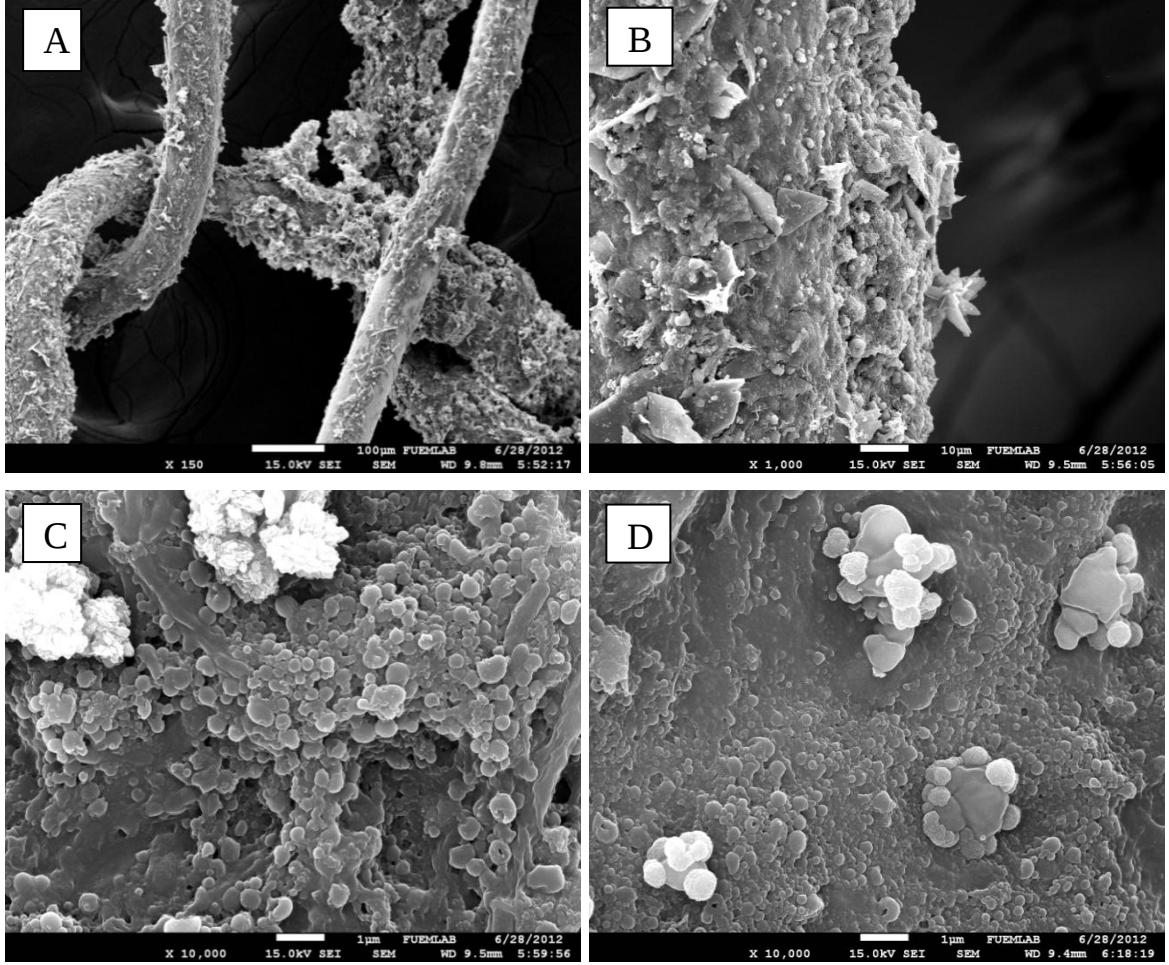


Şekil 4.144: 2. bölgeden alınan EDX analizi sonucu



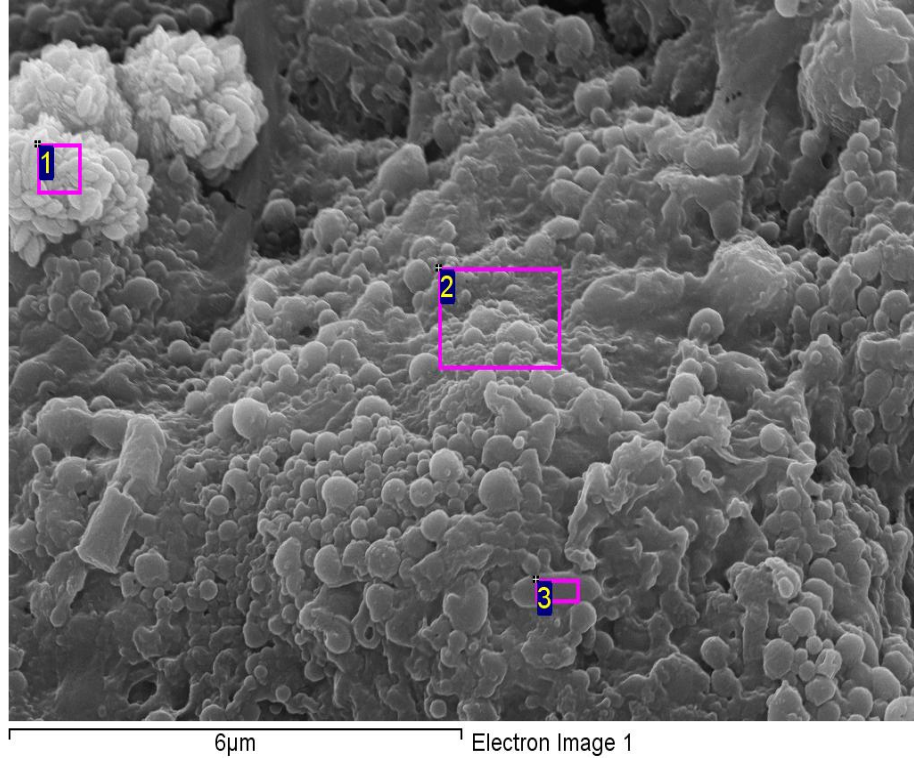
Şekil 4.145: 3.bölgeden alınan EDX analizi sonucu

Katot bölmesinden alınan SEM görüntüsü ve EDX sonuçlarına göre membran yüzeyinde farklı yapılarda birikmelerin olduğu görülmüştür. 1. Bölgeden alınan EDX sonucunda karbon içeriğinin (% 54,01), 2. ve 3. bölgeden alınan EDX sonuçlarında ise kalsiyum ve fosfor içeriğinin fazla olduğu görülmüştür. 2. bölge için Ca % 14,31 (W/W) ve P % 13,02 (W/W). 3. bölge için Ca % 28,92 (W/W) ve P %20,42 (W/W) olduğu belirlenmiştir.

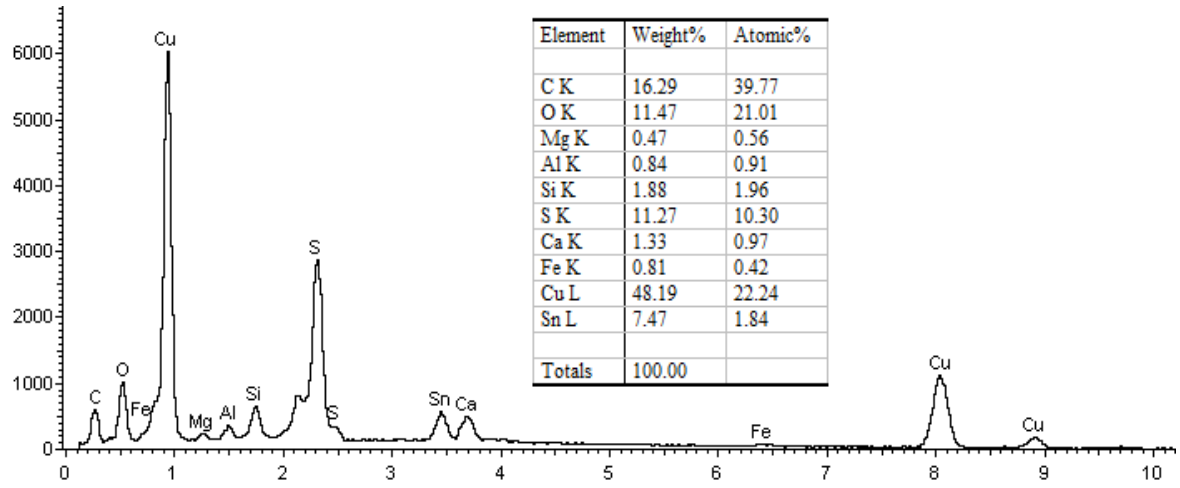


Şekil 4.146: Anaerobik çamur ile aşıl原因an reaktördeki elektrot yüzeyinin SEM görüntüsü

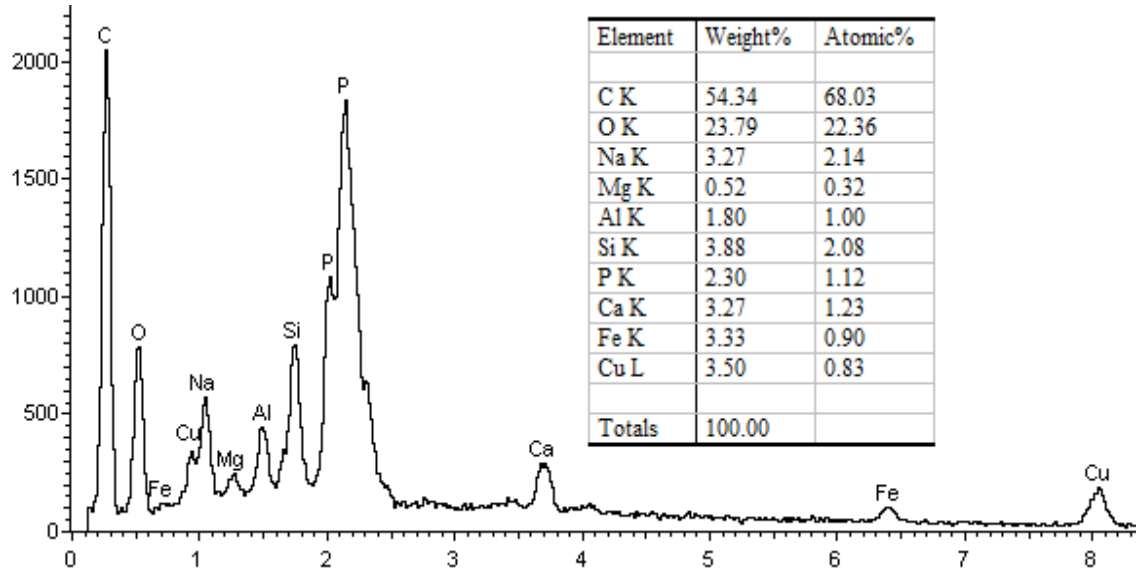
Anaerobik çamur ile aşıl原因an reaktörde elektrot yüzeyinde yoğun bir kek tabakasının mevcut olduğu görülmüştür (Şekil 4.146 A, B, C, D). Elektrot yüzeyinde kristal yapılı bileşikler, mikroorganizma ve organik maddenin karışık halde mevcut olduğu görülmektedir (Şekil 4.146 C ve D). Anaerobik çamur ile aşıl原因an MYH’de elektrot yüzeyinde alınan SEM görüntüsü Şekil 4.147’de, bu görüntülerden alınan EDX sonuçları ise Şekil 4.148, Şekil 4.149 ve Şekil 4.150’de verilmiştir.



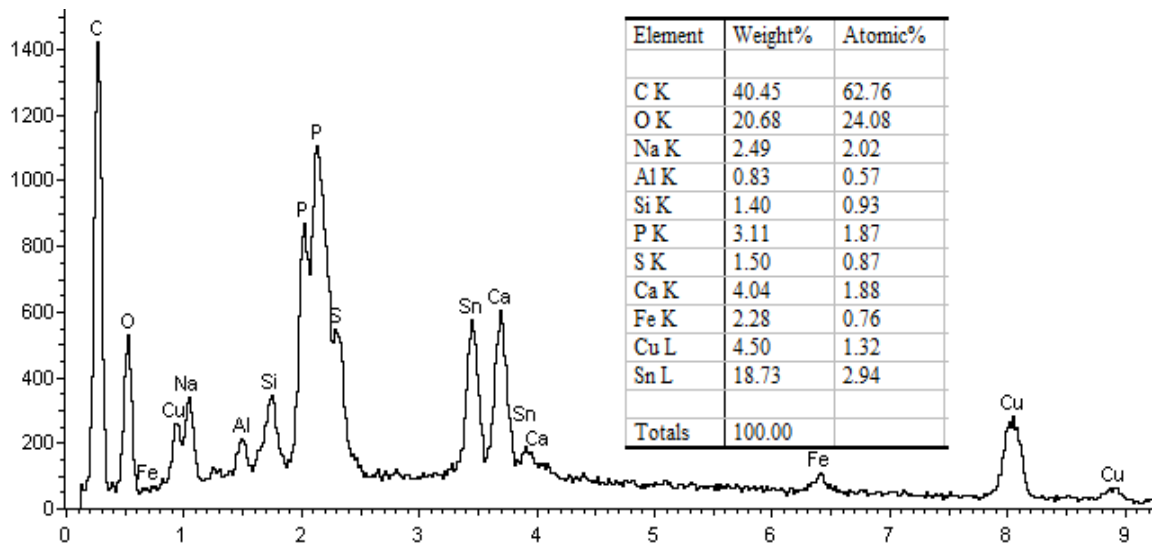
Şekil 4.147: Anaerobik çamur ile aşıl原因an reaktördeki elektrot yüzeyinden alınan SEM görüntüsü (1,2 ve 3: EDX alınan noktalar)



Şekil 4.148: 1. bölgeden alınan EDX analizi sonucu



Şekil 4.149: 2. bölgeden alınan EDX analizi sonucu

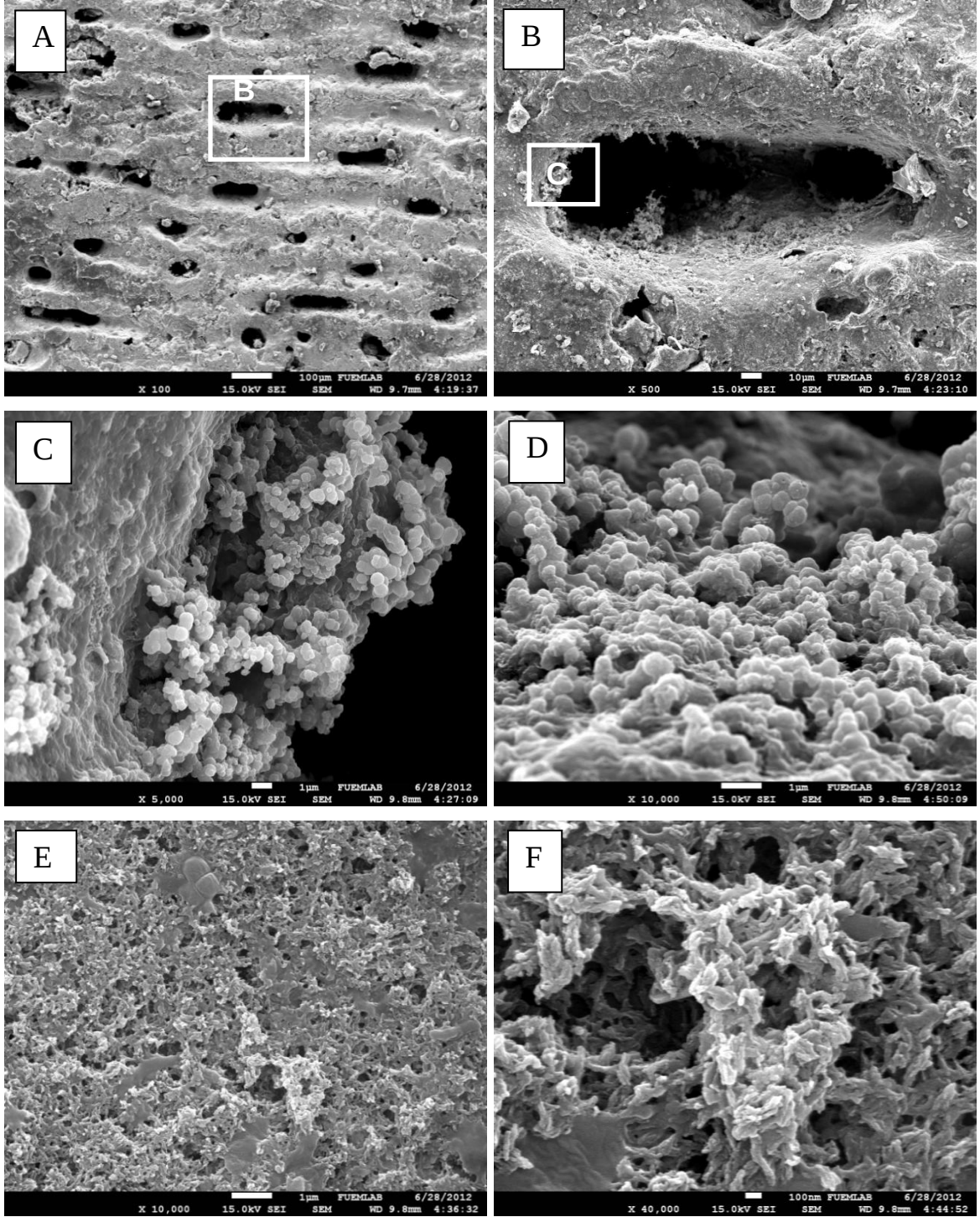


Şekil 4.150: 3. bölgeden alınan EDX analizi sonucu

Elektrot yüzeyinde farklı noktalardan alınan EDX sonuçlarına göre elektrot yüzeydeki yapı C, P, Ca, Na ve Si içermektedir. Elde edilen sonuçlardan elektrot yüzeyinde organik ve inorganik maddelerin mevcut olduğu görülmüştür.

4.6.5 Mezbahe Atıksuyu İle Yapılan Çalışma Sonuçları

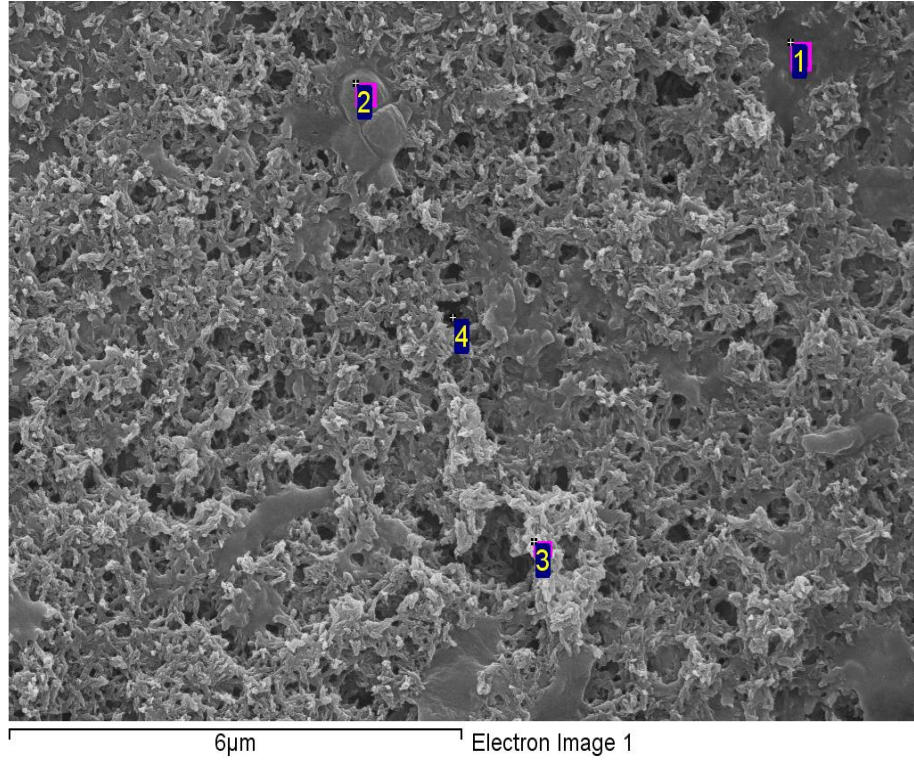
Mezbahe atıksuları ile işletilen reaktörde Al-Ni elektrotun kullanıldığı MYH’de elektrot yüzeyinden alınan SEM görüntüleri verilmiştir (Şekil 4.151).



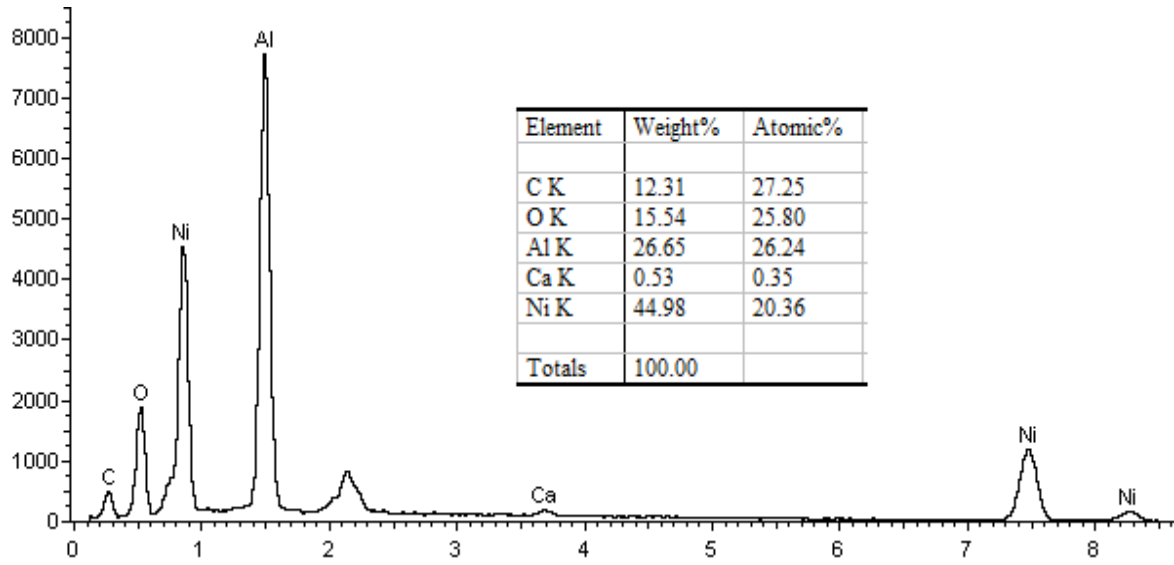
Şekil 4.151: Al-Ni alaşımı elektrot yüzeyi SEM görüntüleri

Al-Ni alaşımı elektrot yüzeyinden alınan SEM sonuçlarında elektrot yüzeyinde mevcut olan gözeneklerin iç ve yan yüzeylerinin mikroorganizma ve çökelmiş yapıların olduğu görülmektedir. Daha yüksek büyütmelerde alınan görüntülerde ise elektrot yüzeylerinde farklı yapıda bir kek tabakasının oluştuğu görülmüştür (Şekil 4.151 E ve F). Al-Ni alaşımı elektrot yüzeyinden EDX analizleri yapılmıştır. EDX analizi yapılan

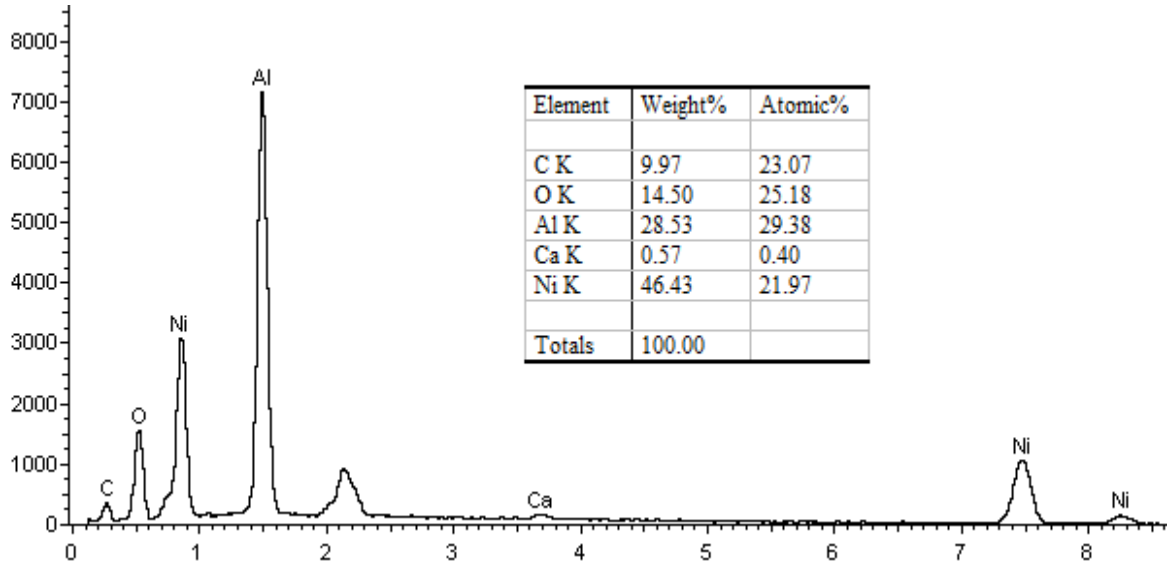
noktalar ve elde edilen sonuçlar Şekil 4.152, Şekil 4.153, Şekil 4.154, Şekil 4.155 ve Şekil 4.156’da verilmiştir.



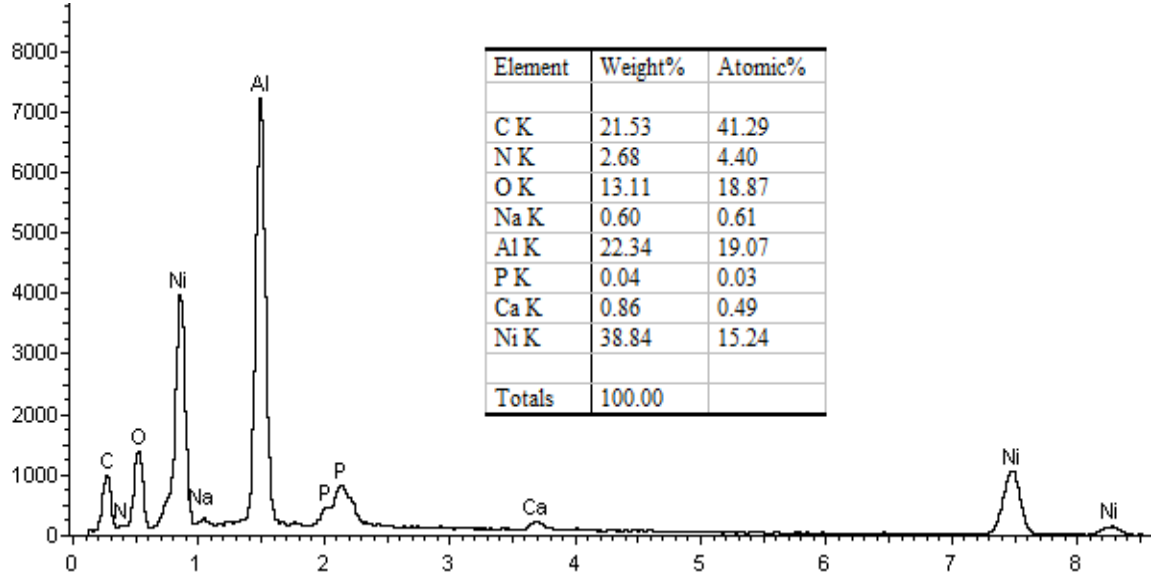
Şekil 4.152: Al-Ni alaşımlı elektrot yüzeyi SEM görüntüsü(1,2,3 ve 4: EDX alınan noktalar)



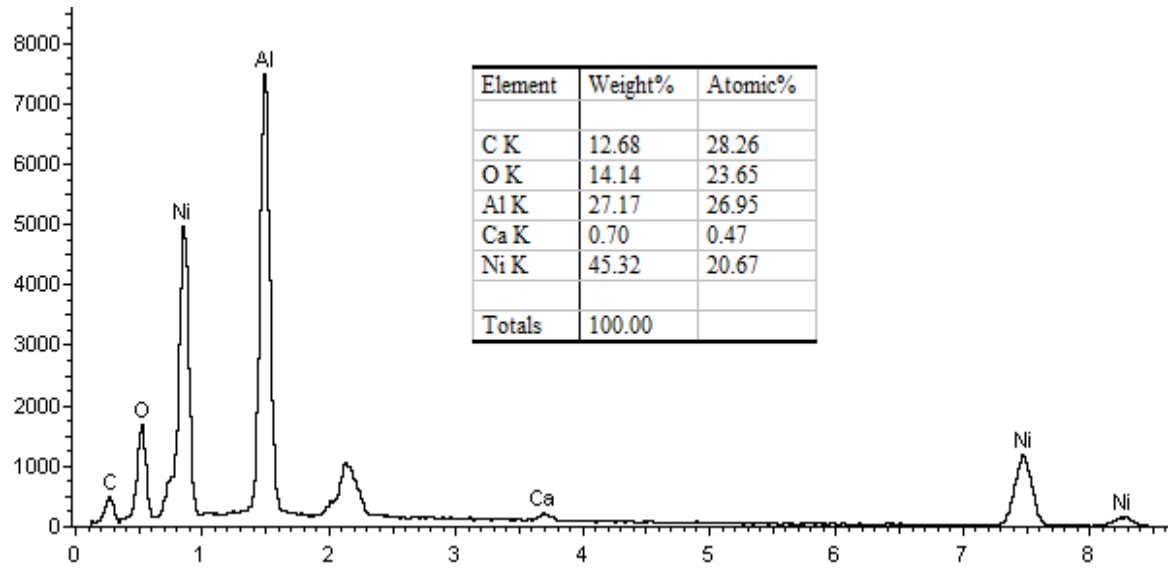
Şekil 4.153: 1. bölgeden alınan EDX analizi sonucu



Şekil 4.154: 2. bölgeden alınan EDX analizi sonucu

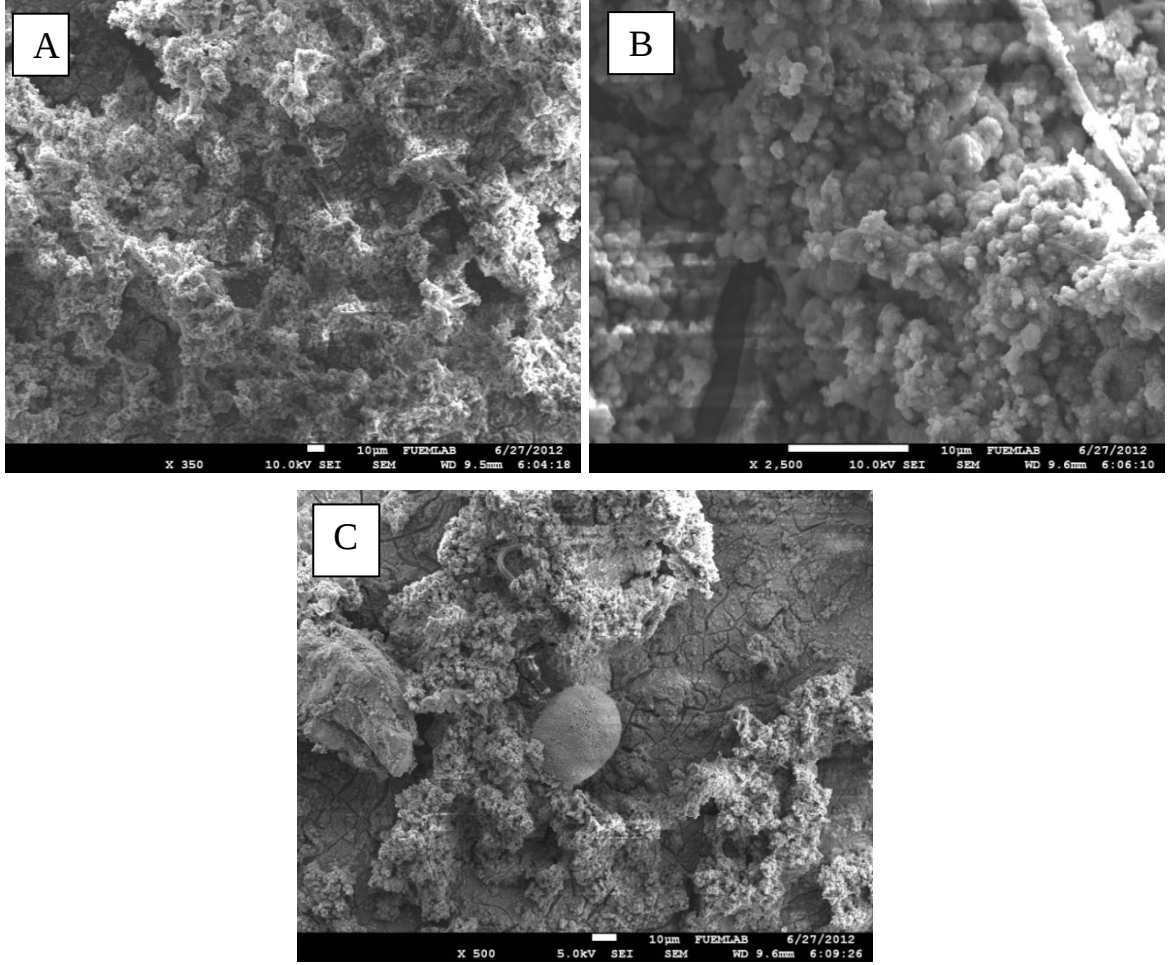


Şekil 4.155: 3. bölgeden alınan EDX analizi sonucu



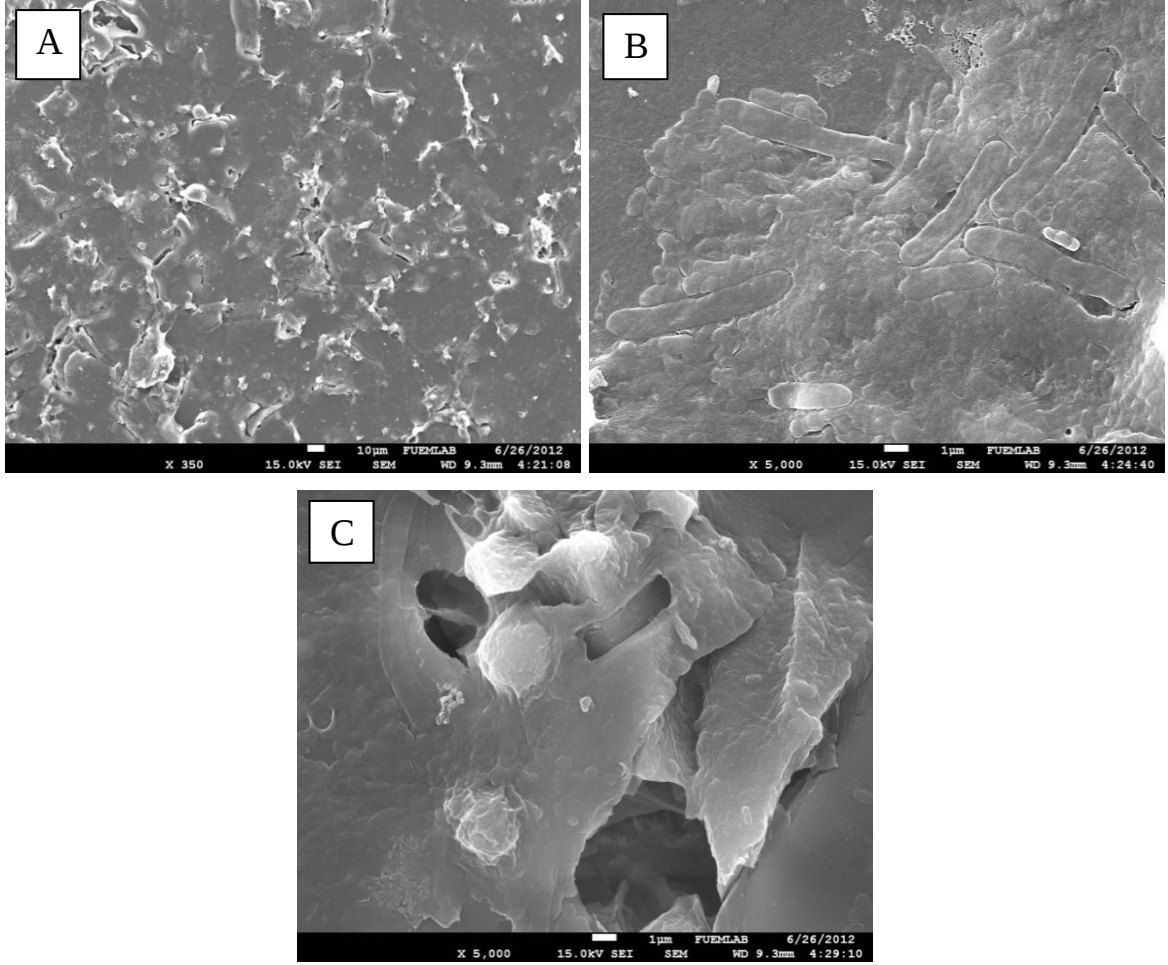
Şekil 4.156: 4. bölgeden alınan EDX analizi sonucu

Farklı bölgelerden alınan EDX sonuçları elektrot yüzeyindeki kek tabakasının içeriğinde C, Ca ve P miktarının evsel ve yağ atıksularında kullanılan elektrotlar ile kıyaslandığında daha az olduğu görülmüştür. Mezbaha çalışmasında kullanılan proton değişim membranının anot tarafından alınan SEM görüntüleri Şekil 4.157’de verilmiştir.



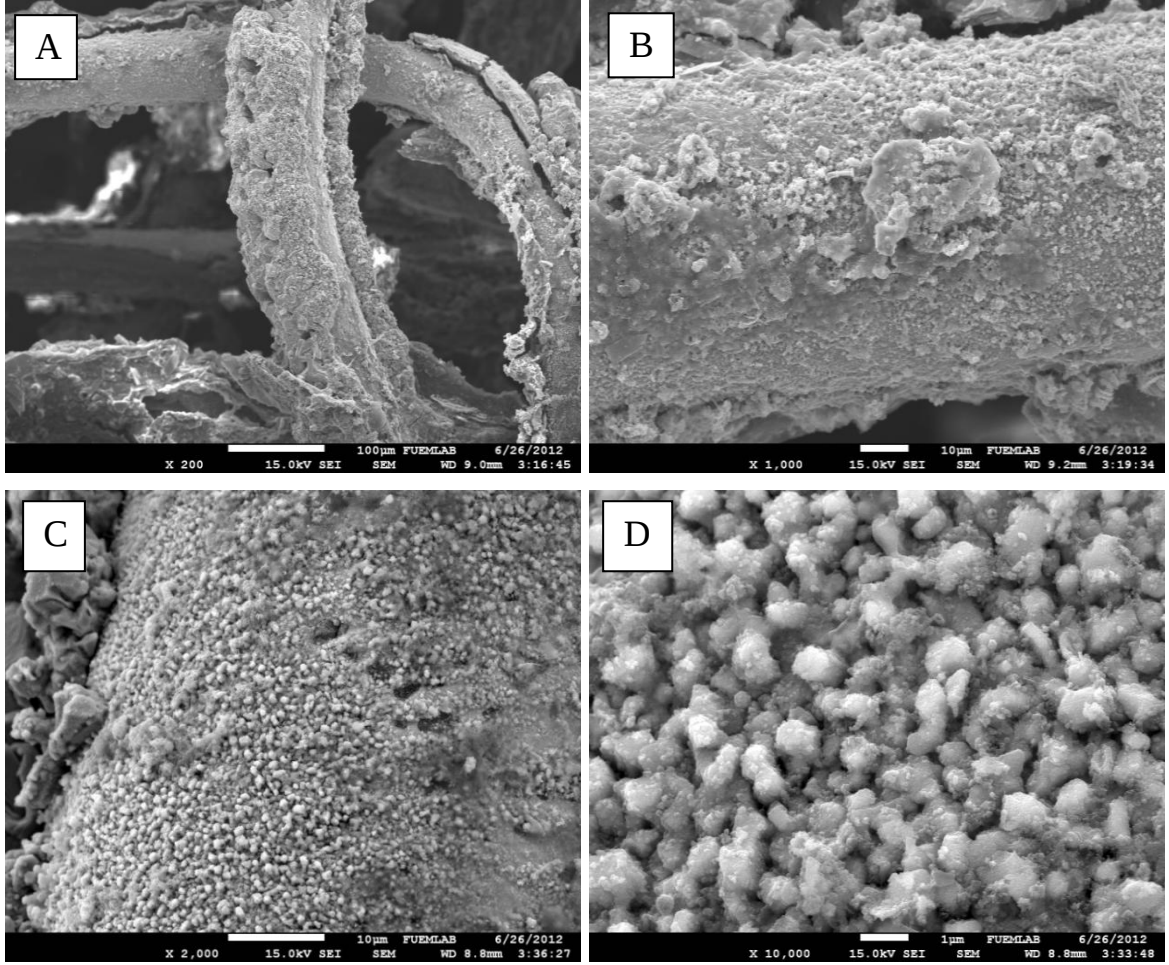
Şekil 4.157: Al-Ni alaşımı elektrotun kullanıldığı reaktördeki membran anot tarafı SEM görüntüleri

Membranın anot tarafından alınan SEM görüntülerinde mikroorganizma ihtiva eden katı bir keç tabakasının olduğu görülmüştür (Şekil 4.157 C). Yoğun halde keç oluşumunun mezbaha atıksuyu bileşiminden kaynaklandığı düşünülmektedir.



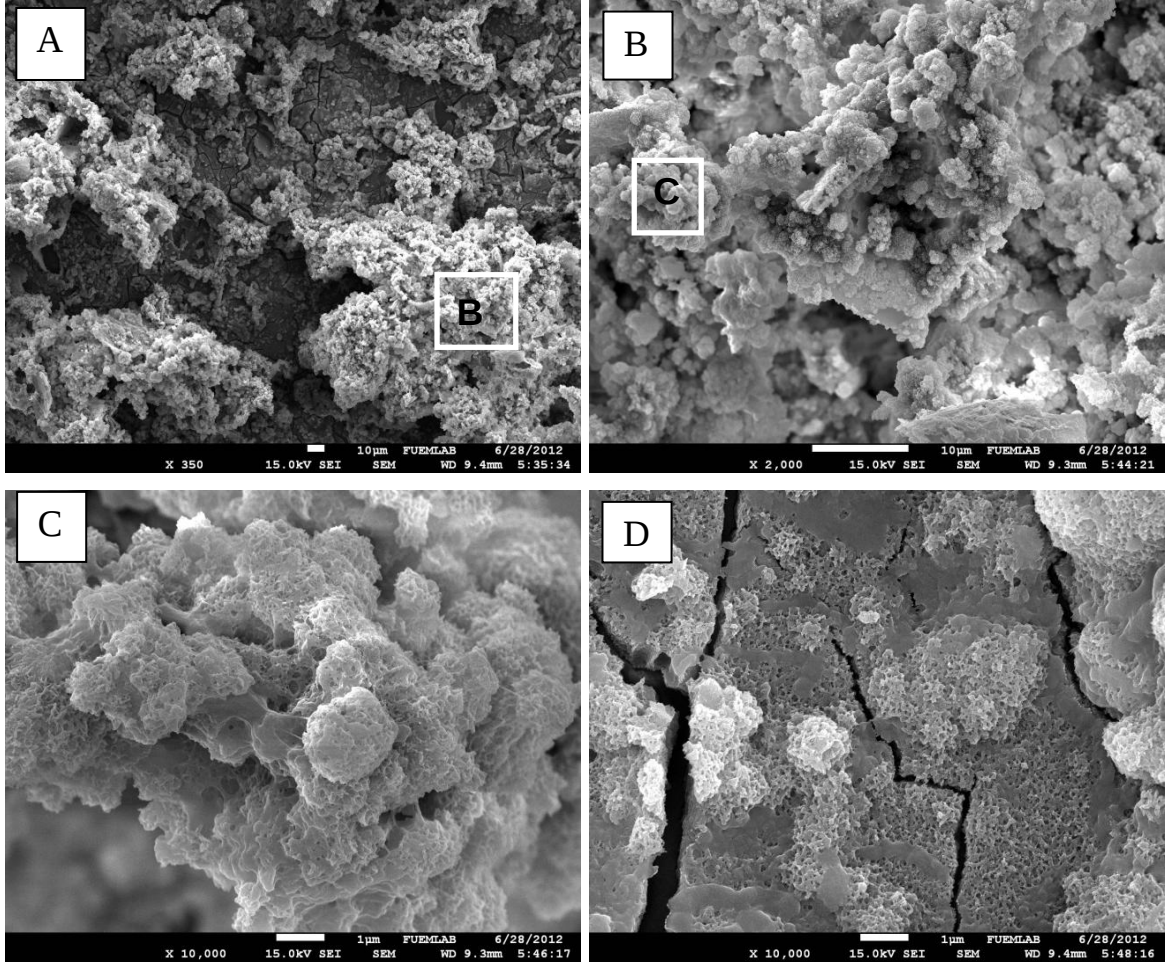
Şekil 4.158: Al-Ni alaşımı elektrotun kullanıldığı reaktördeki membranın katot tarafı SEM görüntüleri

Katot tarafından alınan SEM görüntüsü sonuçlarına göre membran yüzeyinde bulunan kek tabakası içerisinde mikroorganizma ve kristal yapıların bir arada bulunduğu görülmektedir (Şekil 4.158).



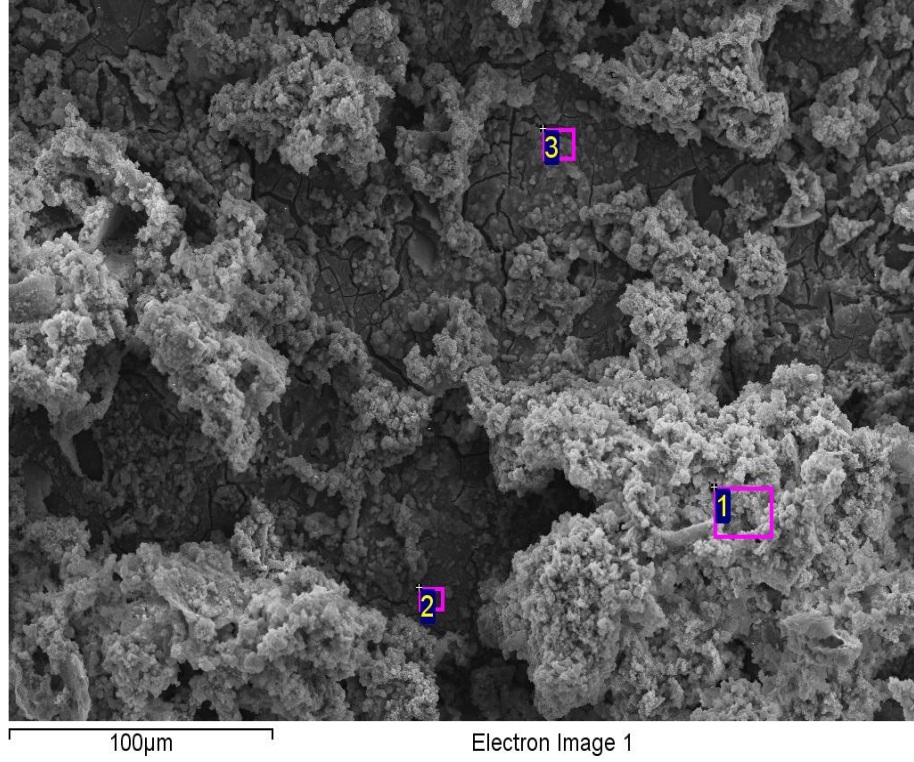
Şekil 4.159: Bakır kumaş elektrot yüzeyi SEM görüntüleri

Bakır kumaş elektrot yüzeyinde yoğun bir mikroorganizma ve organik yapı içeren kek tabakası mevcuttur. Biyofilm kalınlığının yaklaşık olarak 30 μM olduğu ve elektrottan kopmaya başladığı görülmüştür (Şekil 4.159 A).

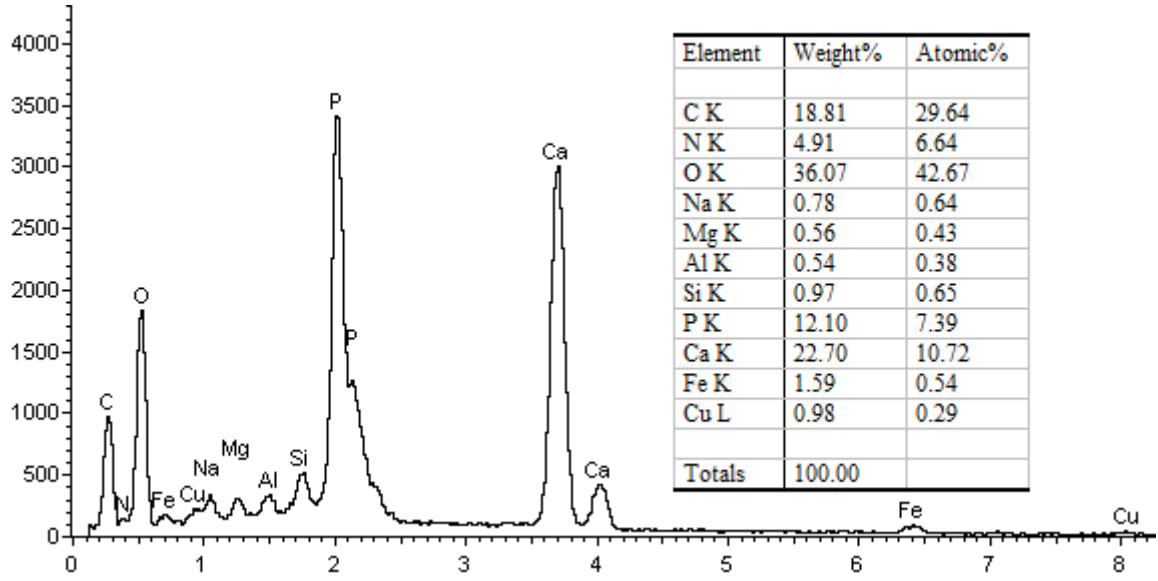


Şekil 4.160: Bakır kumaş elektrotun kullanıldığı reaktördeki membranın anot tarafı SEM görüntüleri

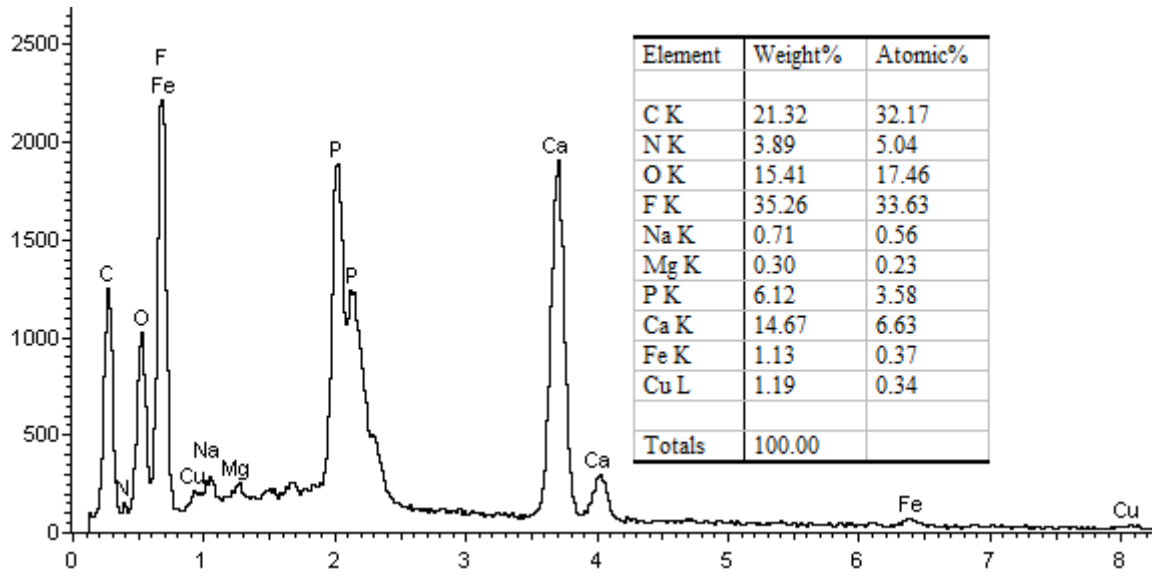
Reaktörde kullanılan PDM’da membranın anot tarafından alınan SEM görüntüsünde katı bir kek tabakasının mevcut olduğu tespit edilmiştir (Şekil 4.160). Kullanılan PDM’nin anot tarafından EDX analizi yapılmıştır. EDX analizi yapılan noktalar ve elde edilen sonuçlar Şekil 4.161, Şekil 4.162, Şekil 4.163 ve Şekil 4.164’de verilmiştir.



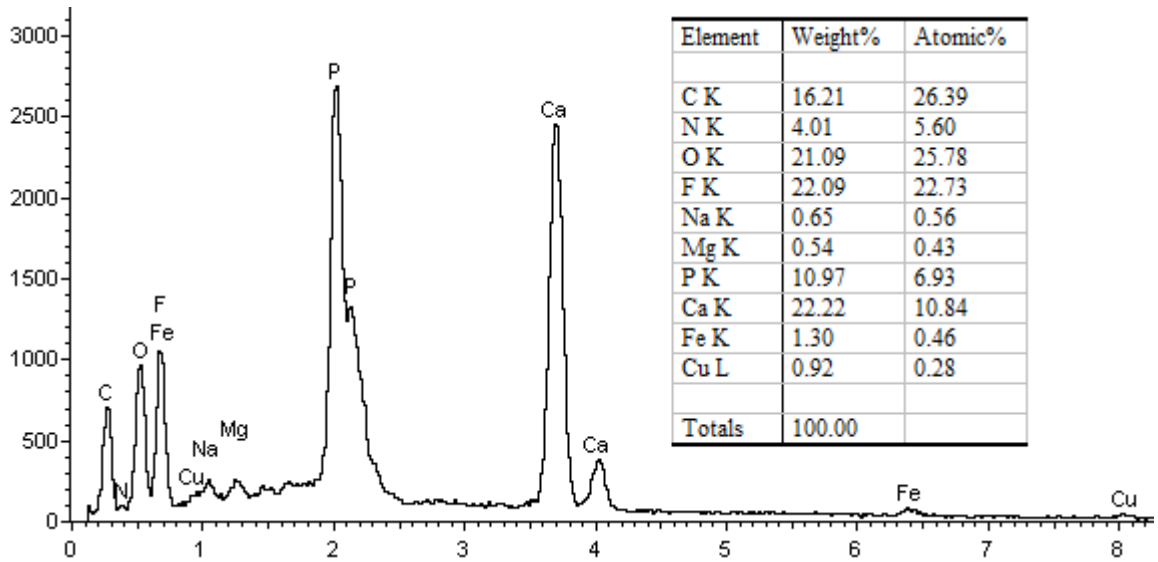
Şekil 4.161: Bakır kumaş elektrotun kullanıldığı reaktördeki membranın anot tarafı SEM görüntüsü (1,2, ve 3: EDX alınan bölgeler)



Şekil 4.162: 1. bölgeden alınan EDX analizi sonucu



Şekil 4.163: 2. bölgeden alınan EDX analizi sonucu



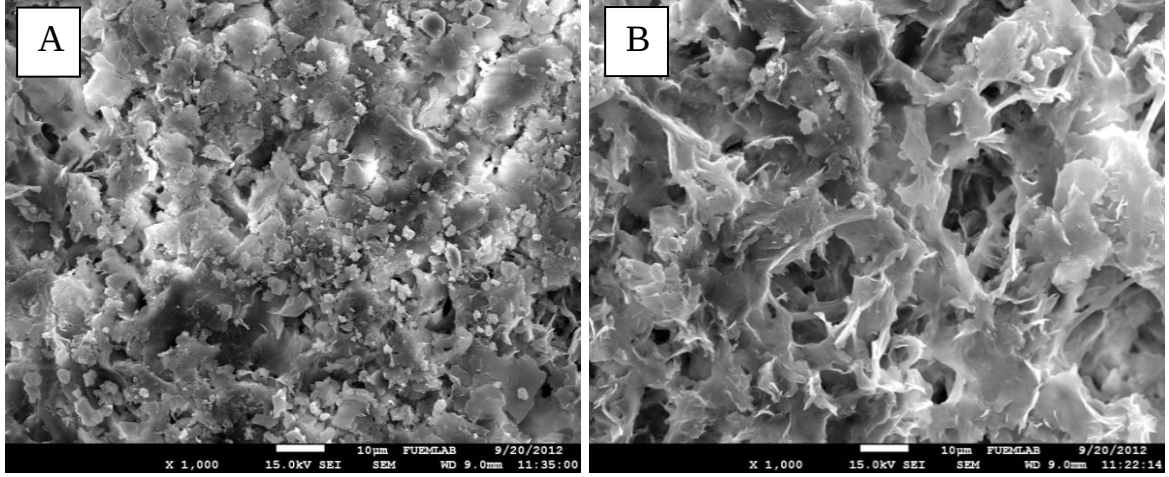
Şekil 4.164: 3. bölgeden alınan EDX analizi sonucu

Farklı noktalardan alınan EDX sonuçlarına göre membran yüzeyindeki yapıda Ca ve P içeriğinin mevcut olduğu görülmüştür.

4.6.6 Farklı Membranlar Denemeleri

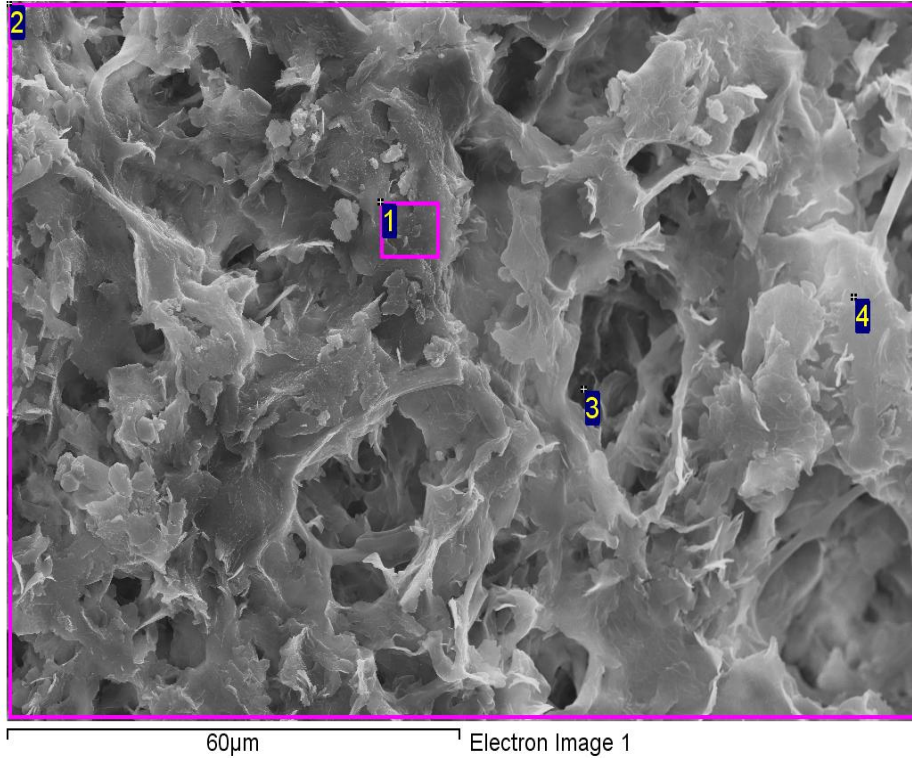
4.6.6.1 Fumapem F-1050 Membranı

Farklı membranların performanslarının araştırıldığı çalışmada fumapem membranın kullanıldıktan sonra yüzeyinden elde edilen SEM görüntüleri Şekil 4.165’de verilmiştir.

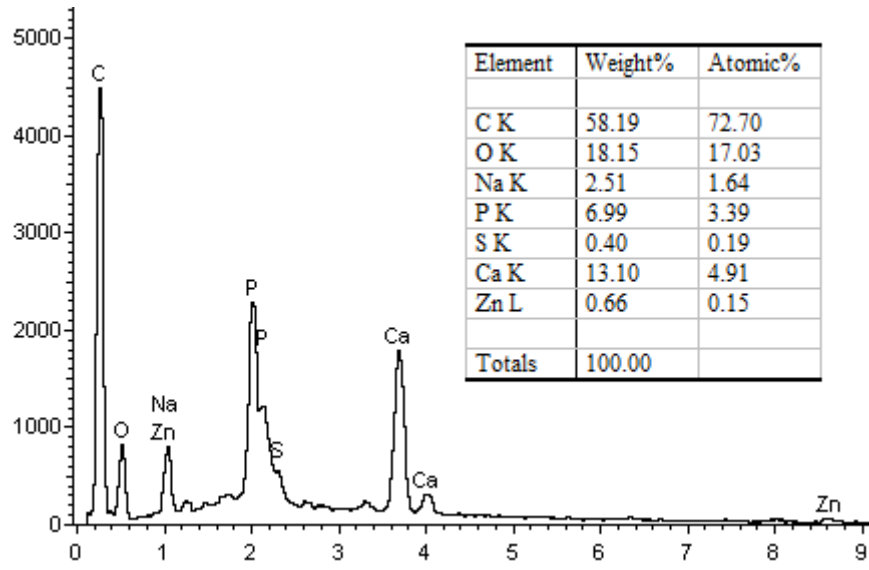


Şekil 4.165: Fumapem membranin SEM görüntüsü

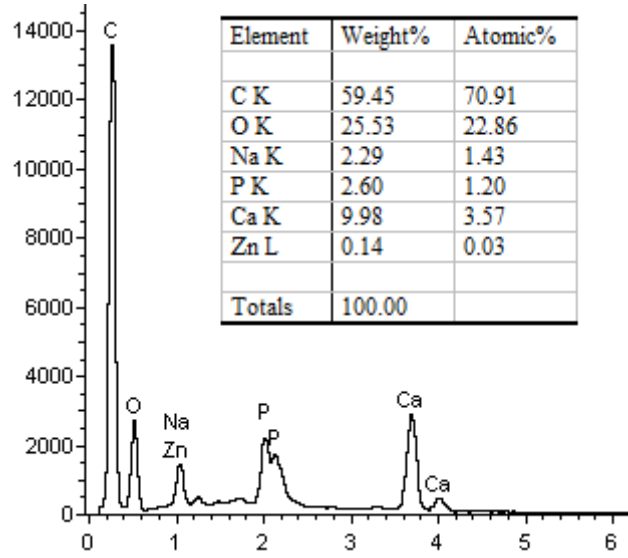
Kullanılan membranda EDZ analizi yapılmış ve EDX analizi yapılan bölgenin SEM görüntüsü ile elde edilen EDX analizi sonuçları Şekil 4.166, Şekil 4.167, Şekil 4.168, Şekil 4.169 ve Şekil 4.170’de verilmiştir.



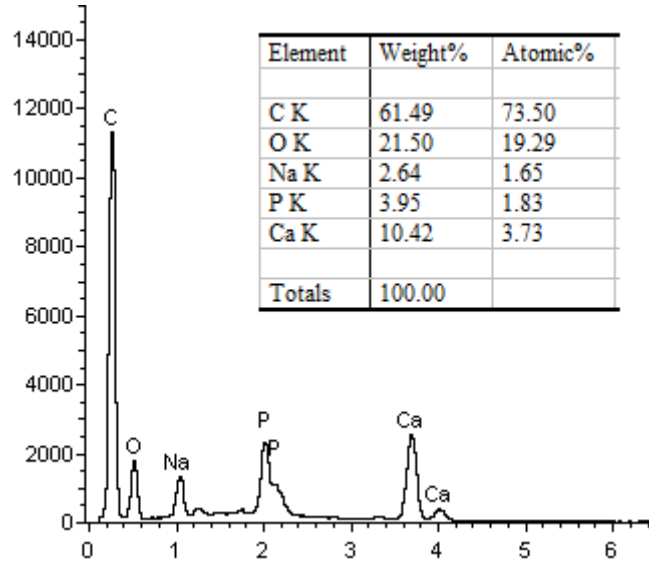
Şekil 4.166: Fumapem F-1050 membran sem görüntüsü (1,2,3, ve 4: EDX alınan bölgeler)



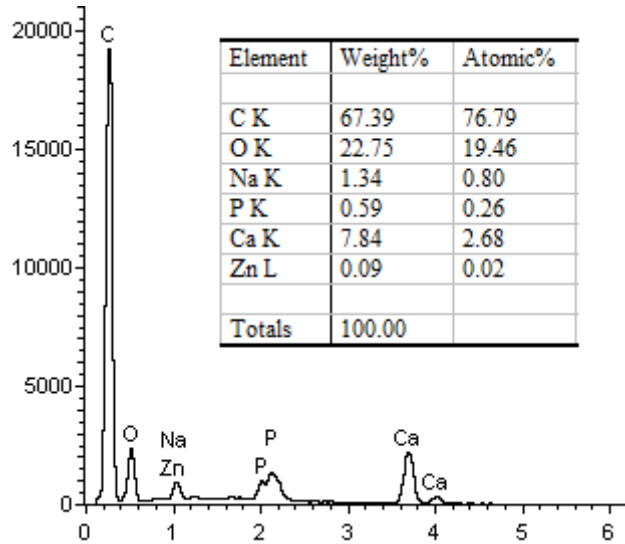
Şekil 4.167: 1. bölgeden alınan EDX analizi sonucu



Şekil 4.168: 2. bölgeden alınan EDX analizi sonucu



Şekil 4.169: 3. bölgeden alınan EDX analizi sonucu

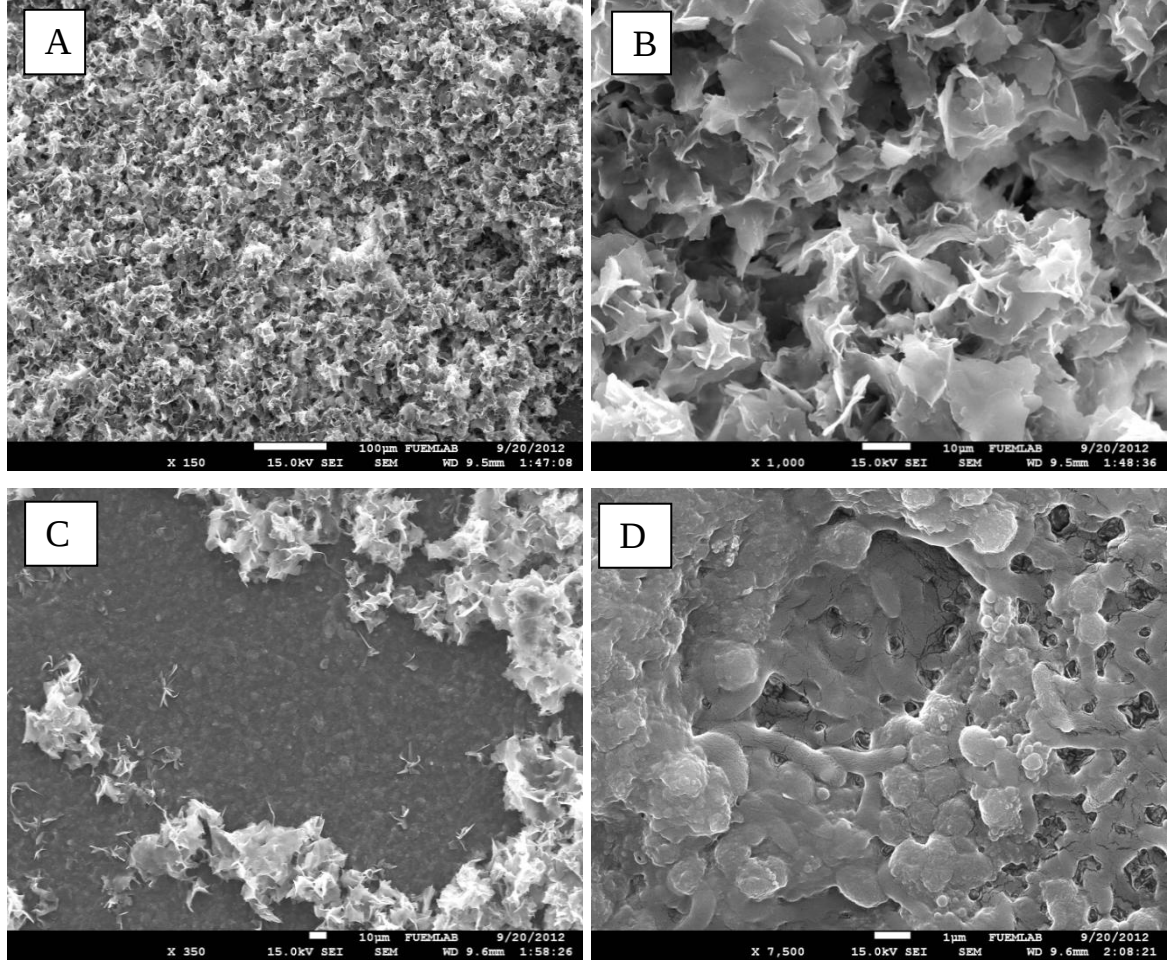


Şekil 4.170: 4. bölgeden alınan EDX analizi sonucu

MYH'nin belirli bir süre işletilmesi sonucunda PDM'ı yüzeyinde inorganik tuzların biriktiği bilinmektedir. Fumapem membran yüzeyinde EDX alınan noktaların sonuçlarına göre yüzeyde bulunan tabakanın C, P, Ca, Na içerdiği tespit edilmiştir. Bu sonuçlara benzer olarak Xu ve arkadaşları (2012) yaptıkları çalışmada proton değişim membranı yüzeyinde yaptıkları EDX analizi sonucunda P, Ca, S, K gibi bileşiklerin mevcut olduğunu belirtmişlerdir.

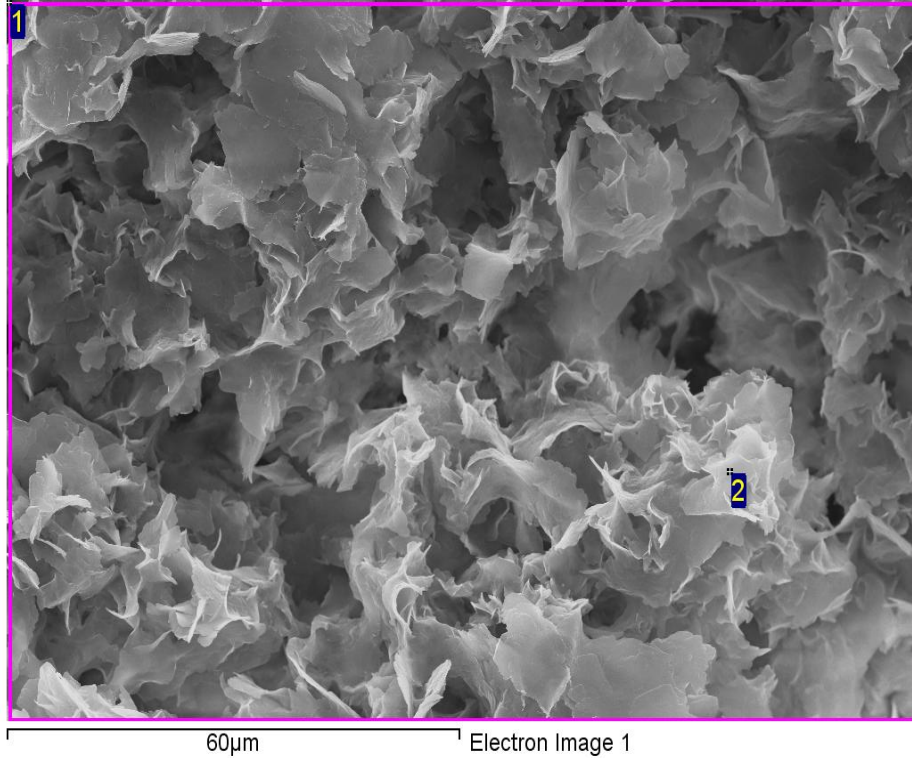
4.6.6.2 Nafion 117 Membranı

Nafion 117 membranının kullanıldıktan sonra yüzeyinden elde edilen SEM görüntüleri Şekil 4.171’de verilmiştir.

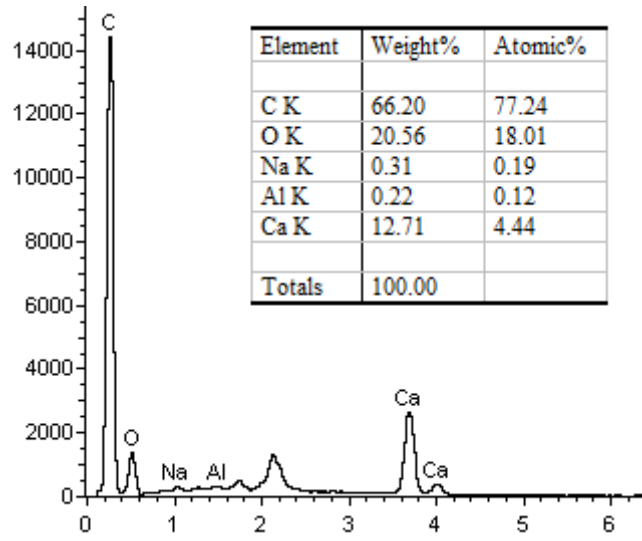


Şekil 4.171: Nafion 117 membranının SEM görüntüleri

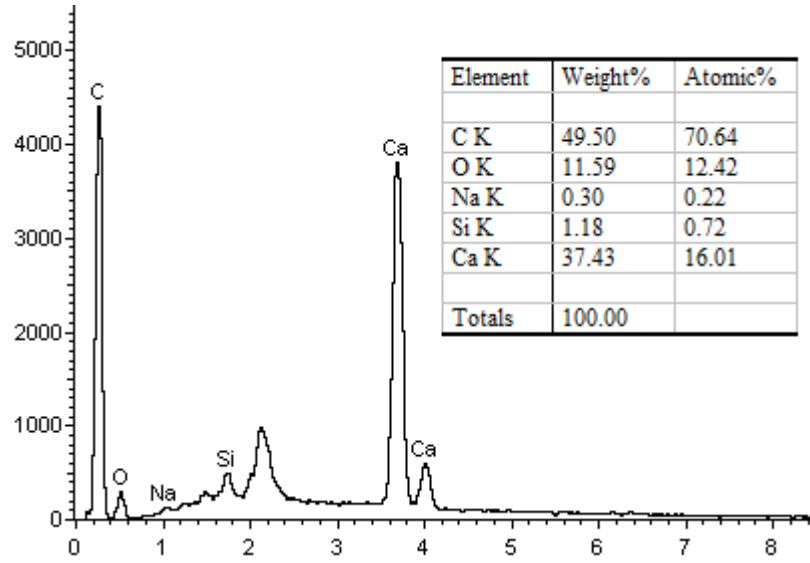
Nafion membran yüzeyinde işletim sonrasında organik yapı ve mikroorganizmaların mevcut olduğu tespit edilmiştir. Kullanılan nafion membran yüzeyinde yapılan EDX analizi sonuçları ve EDX analizi yapılan noktalar Şekil 4.172, Şekil 4.173 ve Şekil 4.174’de verilmiştir.



Şekil 4.172: Nafion 117 membranın SEM görüntüsü (1ve 2:EDX alınan bölgeler)



Şekil 4.173: 1. bölgeden alınan EDX analizi sonucu

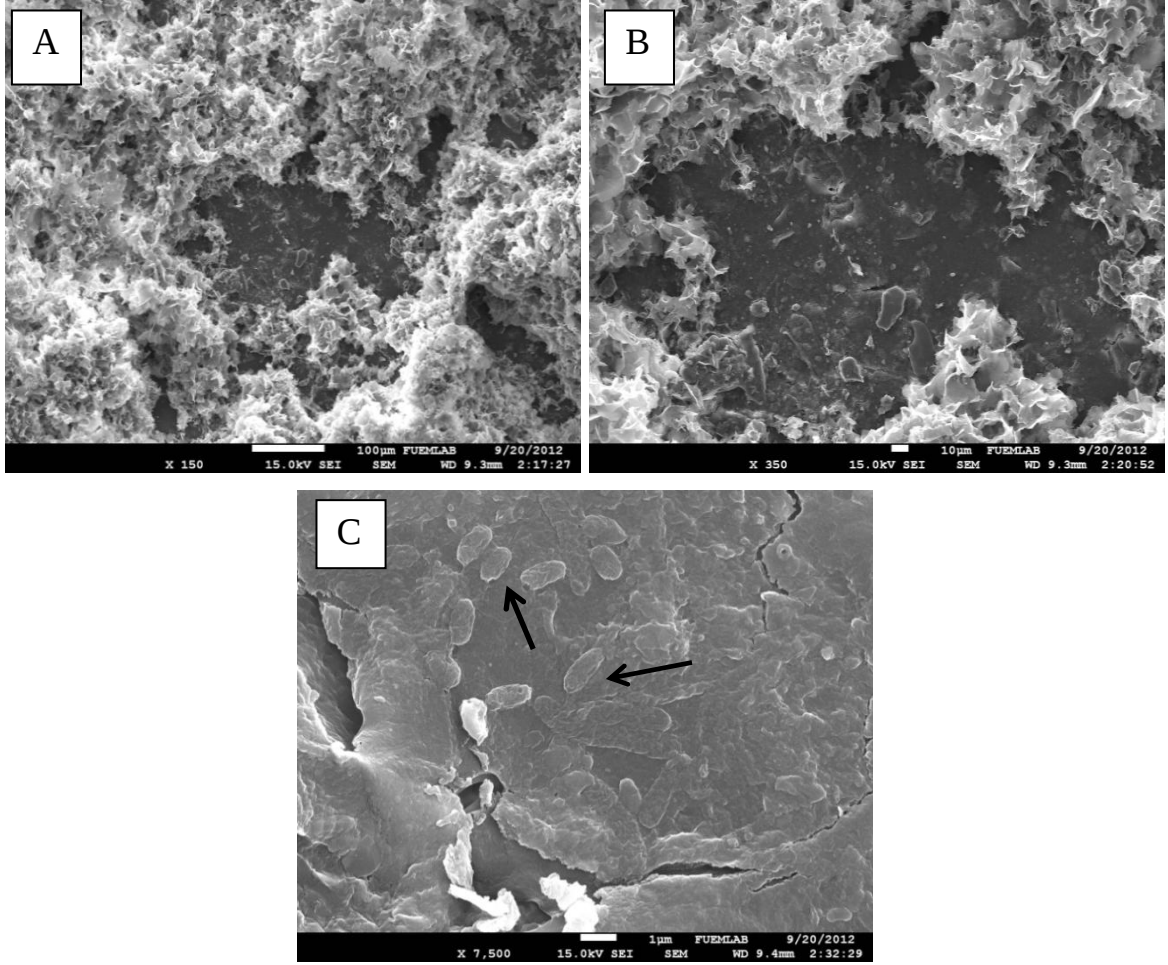


Şekil 4.174: 2. bölgeden alınan EDX analizi sonucu

Nafion membranının yüzeyinde iki farklı bölgede EDX analizi yapılmıştır. 1. Bölge sonuçlarına göre % 66,2 C (W/W), % 20,56 O (W/W), %12,71Ca (W/W) şeklindedir. 2. bölge sonuçlarına göre %49,50 C (W/W), % 11,59 O (W/W), % 37,43 Ca (W/W).

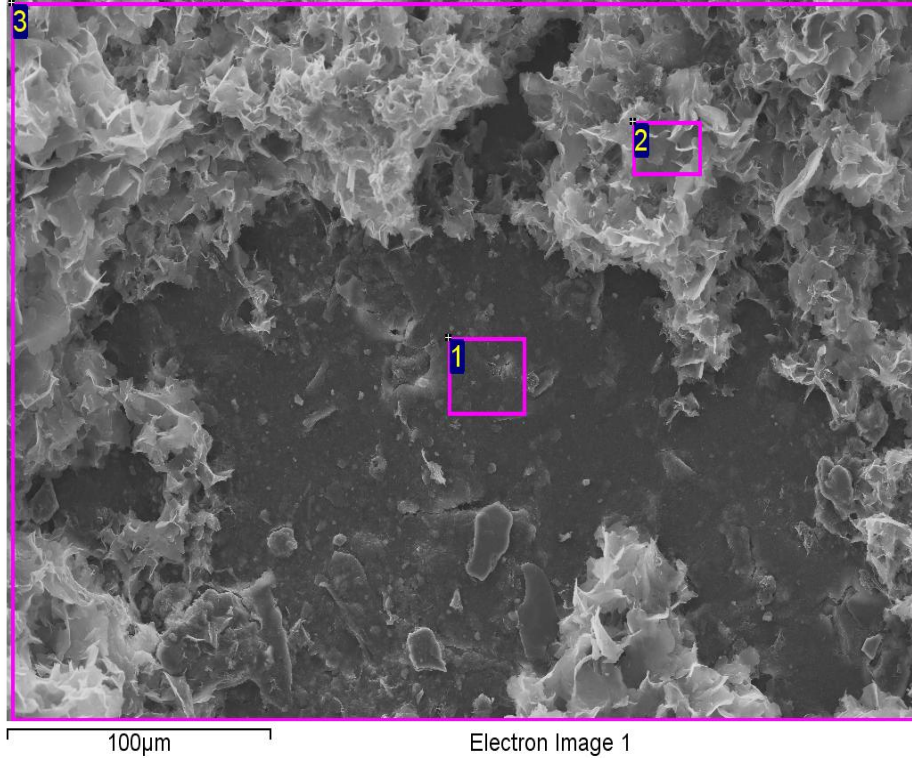
4.6.6.3 Ultrex CMI-7000 membranı

Ultrex CMI-7000 membranı kullanıldıktan sonra yüzeyinden elde edilen SEM görüntüleri Şekil 4.175’de verilmiştir.

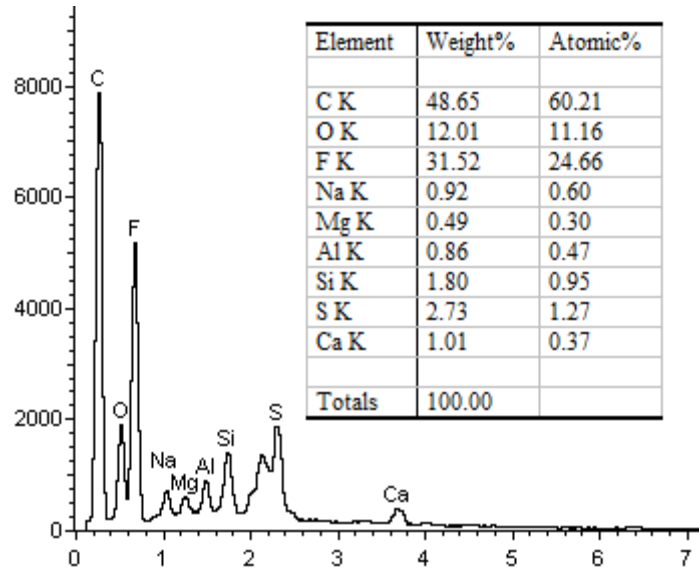


Şekil 4.175: Ultrex CMI-7000 membranin SEM görüntüleri

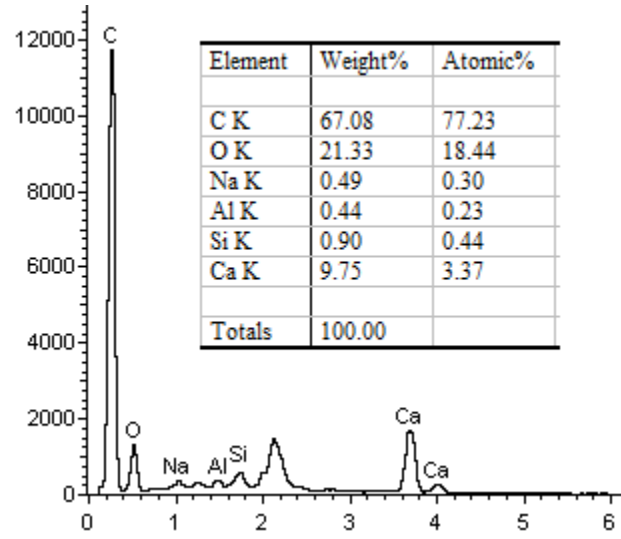
Yapılan çalışma sonucunda ultrex membran yüzeyinde organik madde birikintisinin mevcut olduğu ve membran yüzeyinde mikroorganizmaların varlığı da tespit edilmiştir. Membran yüzeyindeki birikintinin içeriğini tespit etmek amacıyla EDX analizi yapılmıştır. EDX analizinin uygulandığı noktaların görüntüsü ve elde edilen sonuçlar Şekil 4.176, Şekil 4.177, Şekil 4.178 ve Şekil 4.179’da verilmiştir.



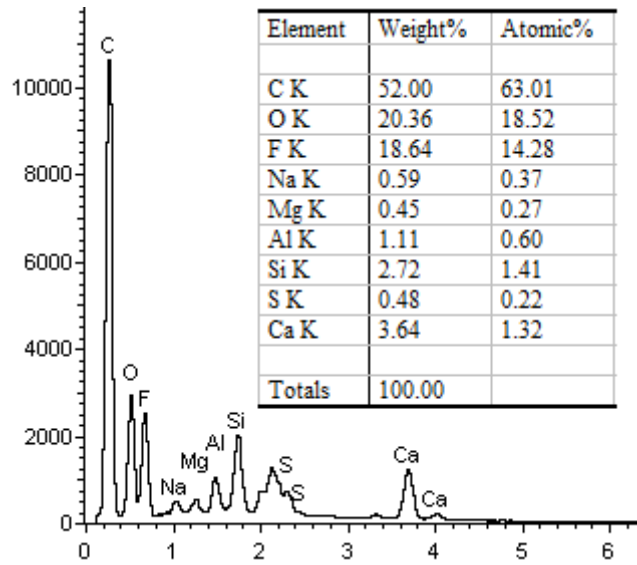
Şekil 4.176: Ultrex CMI-7000 membranının SEM görüntüsü (1,2 ve 3: EDX alınan bölgeler)



Şekil 4.177: 1. bölgeden alınan EDX analizi sonucu



Şekil 4.178: 2. bölgeden alınan EDX analizi sonucu

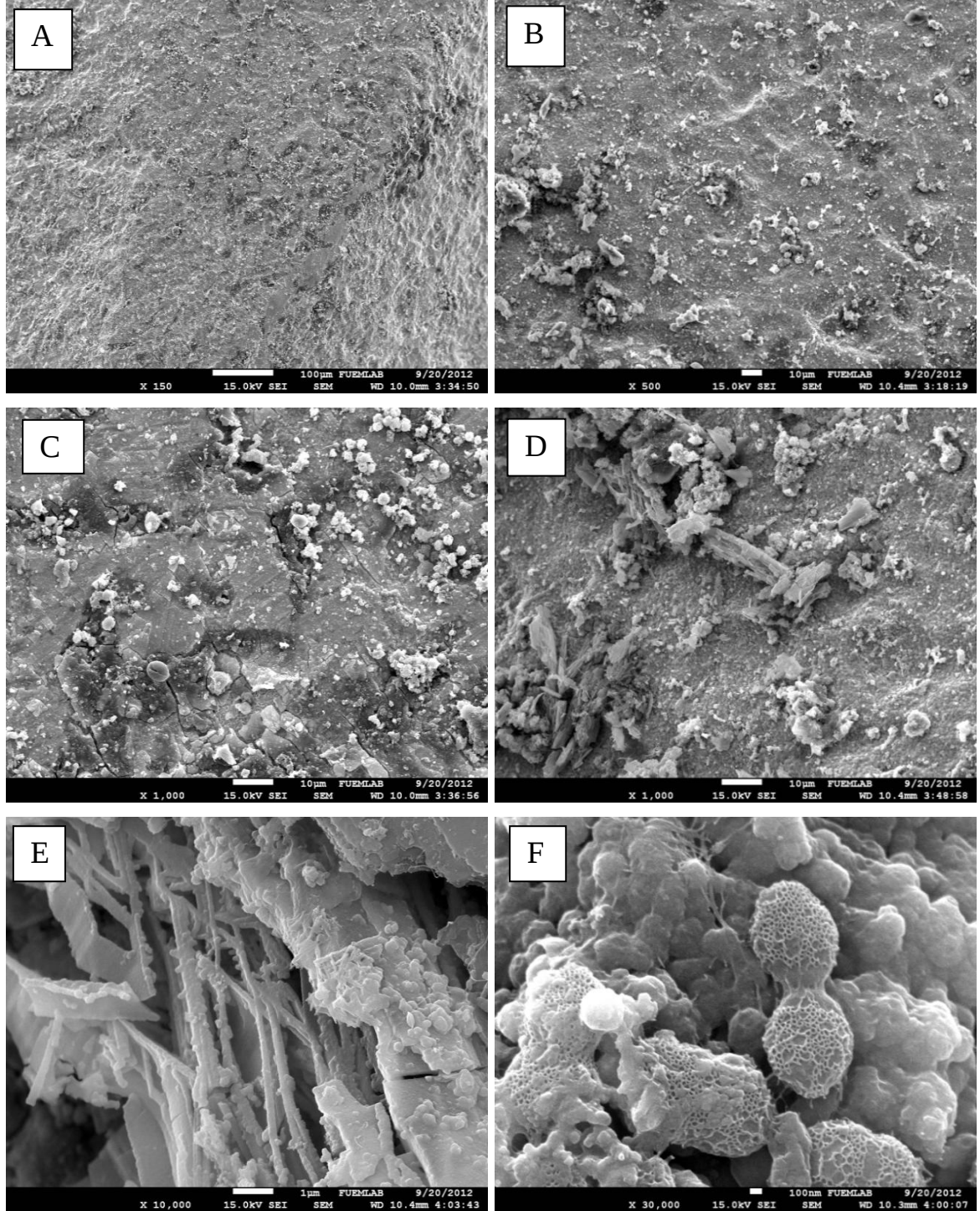


Şekil 4.179: 3. bölgeden alınan EDX analizi sonucu

Ultrex CMI-7000 membran yüzeyinden alınan EDX sonuçlarına göre membran yüzeyindeki kek tabakası C, Si, Na, Mg ve kalsiyum içermektedir. Çalışmada Ultrex CMI-7000 membran kullanılan MYH’de katot bölmesinde bulunan platin kaplamalı titanyum elektrot yüzeyindeki yapı incelenmiştir. Elde edilen SEM görüntüleri Şekil 4.180’de verilmiştir.

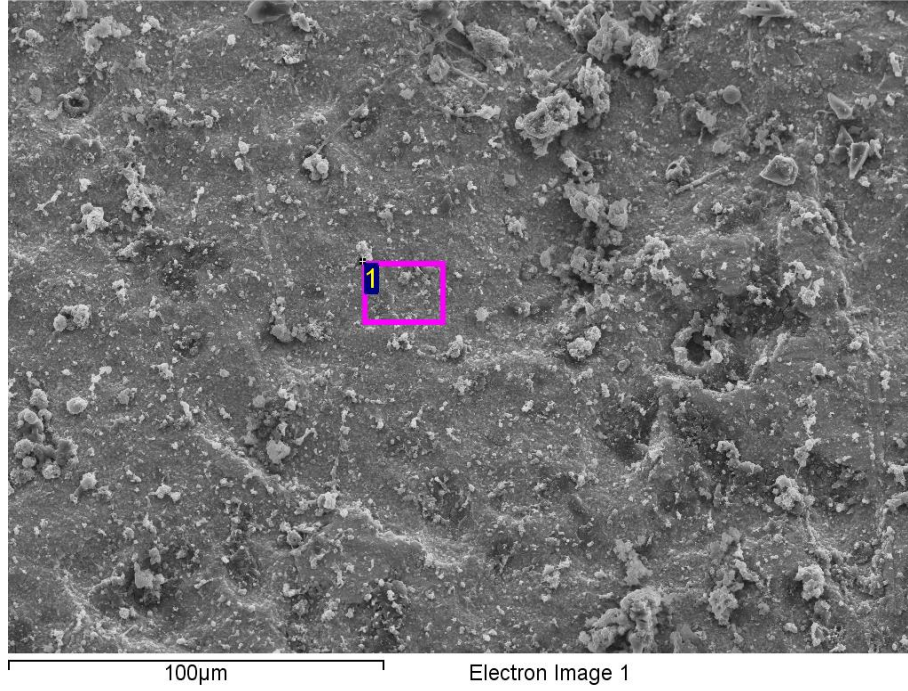
Her üç membran için EDX analizi yapılan bölgelerin tamamından alınan EDX sonuçlarına göre membran yüzeyindeki karbon (C) içeriği Fumapem, Nafion ve Ultrex

membran için sırasıyla %59,4; %66,2 ve %52 olduğu görülmüştür. Ayrıca membran yüzeylerindeki kalsiyum miktarının %9,98; %12,7 ve %3,34 olduğu tespit edilmiştir. Elde edilen sonuçlardan Nafion 117 marka membran yüzeyindeki C ve Ca miktarının Fumapem ve Ultrex membran yüzeyindeki miktardan daha az olduğu görülmüştür.

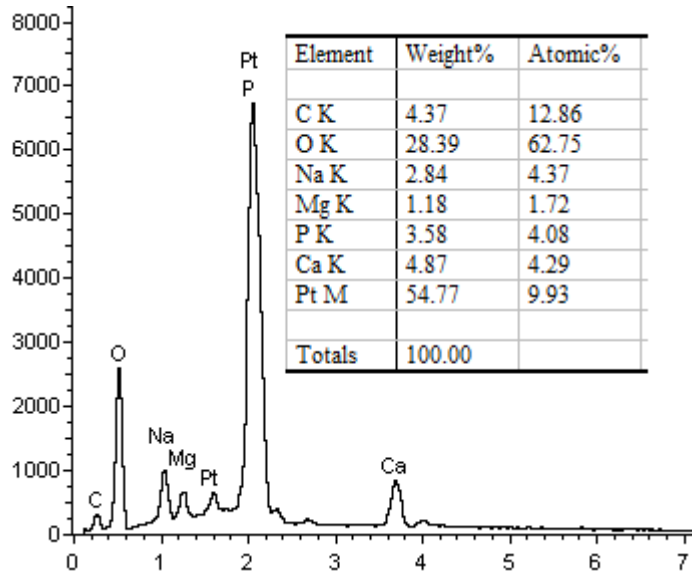


Şekil 4.180: Katot bölgesinde kullanılan platin kaplamalı titanyum elektrotun SEM görüntüleri

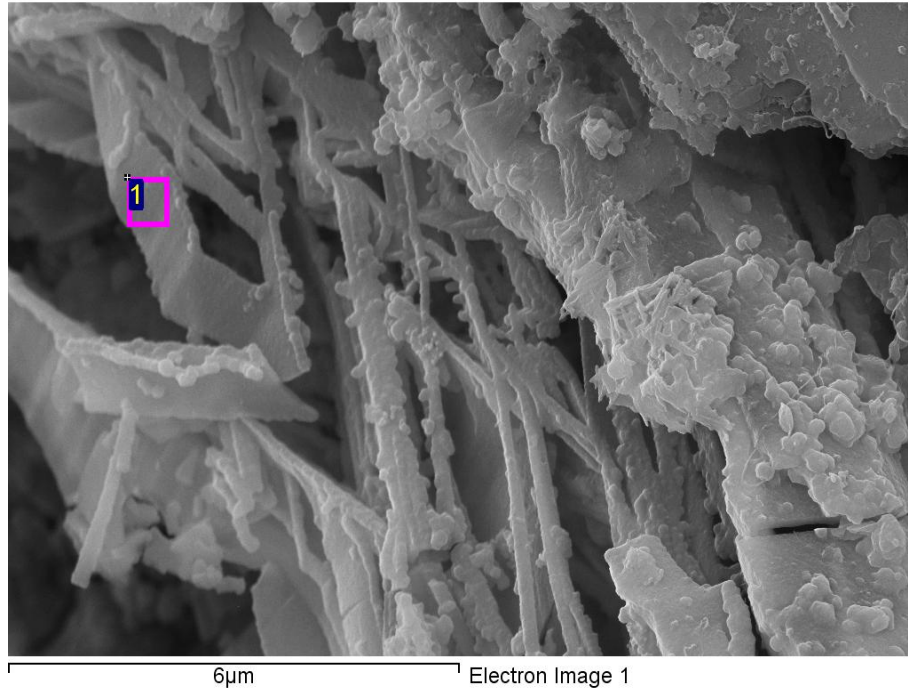
Elektrot yüzeyinde meydana gelen birikintinin içeriğini incelemek amacıyla elektrot yüzeyinde EDX analizi yapılmıştır. EDX analizlerinin yapıldığı noktaların gösterildiği SEM görüntüsü ve elde edilen EDX sonuçları Şekil 4.181, Şekil 4.182, Şekil 4.183 ve Şekil 4.184’de verilmiştir.



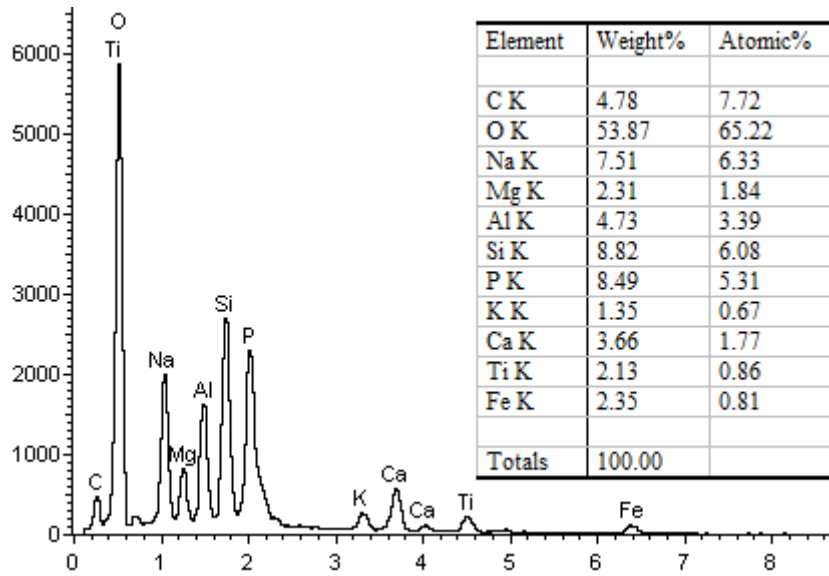
Şekil 4.181: Katot bölgesinde kullanılan platin kaplamalı titanyum elektrotun SEM görüntüsü (1: EDX alınan bölge)



Şekil 4.182: 1. bölgeden alınan EDX analizi sonucu



Şekil 4.183: Katot bölmesinde kullanılan platin kaplamalı titanyum elektrotun SEM görüntüsü (1 EDX alınan bölge)



Şekil 4.184: 1. bölgeden alınan EDX analizi sonucu

Ultrex membranda katot bölmesinde kullanılan Pt kaplamalı elektrot yüzeyinden alınan SEM görüntülerinden elde edilen sonuçlarda elektrot yüzeyinde kristal yapıların ve mikroorganizma gruplarının varlığı tespit edilmiştir. EDX sonuçları dikkate alındığında elektrot yüzeyinde Ca, Mg ve Na bileşiklerinin olduğu belirlenmiştir. Bu bileşiklerin katot bölgesine ilave edilen fosfat tamponunun bileşiminden kaynaklandığı düşünülmektedir.

Mao vd. (2010) yaptıkları çalışmada çift bölmeli bir MYH'nin katot elektrot yüzeyinde yaptıkları EDX analizinde Na, Ca, Mn, Mg gibi elementlerin varlığını tespit etmişleridir.

4.7 Mikrobiyal Türlerin Tanımlanması

Çalışma süresince farklı atıksular ve farklı elektrot çalışmaları için biyofilm numuneleri alınmıştır. Alınan biyofilm numunelerinin ilk olarak DNA ekstraksiyonu yapılmış ve Polimeraz Zincir Reaksiyonu (PCR) cihazı ile karışık kültür içerisindeki DNA'lar çoğaltılmıştır. Daha sonra Denature Gradyan Jel Elektroforezi (DGGE) cihazı kullanılarak karışık örneklerden her bir mikroorganizmaya özgü genlerin ayrılması ve bu genlerin kullanılarak karışık kültürler içerisinde mevcut olan mikroorganizma türlerinin tespiti yapılmıştır.

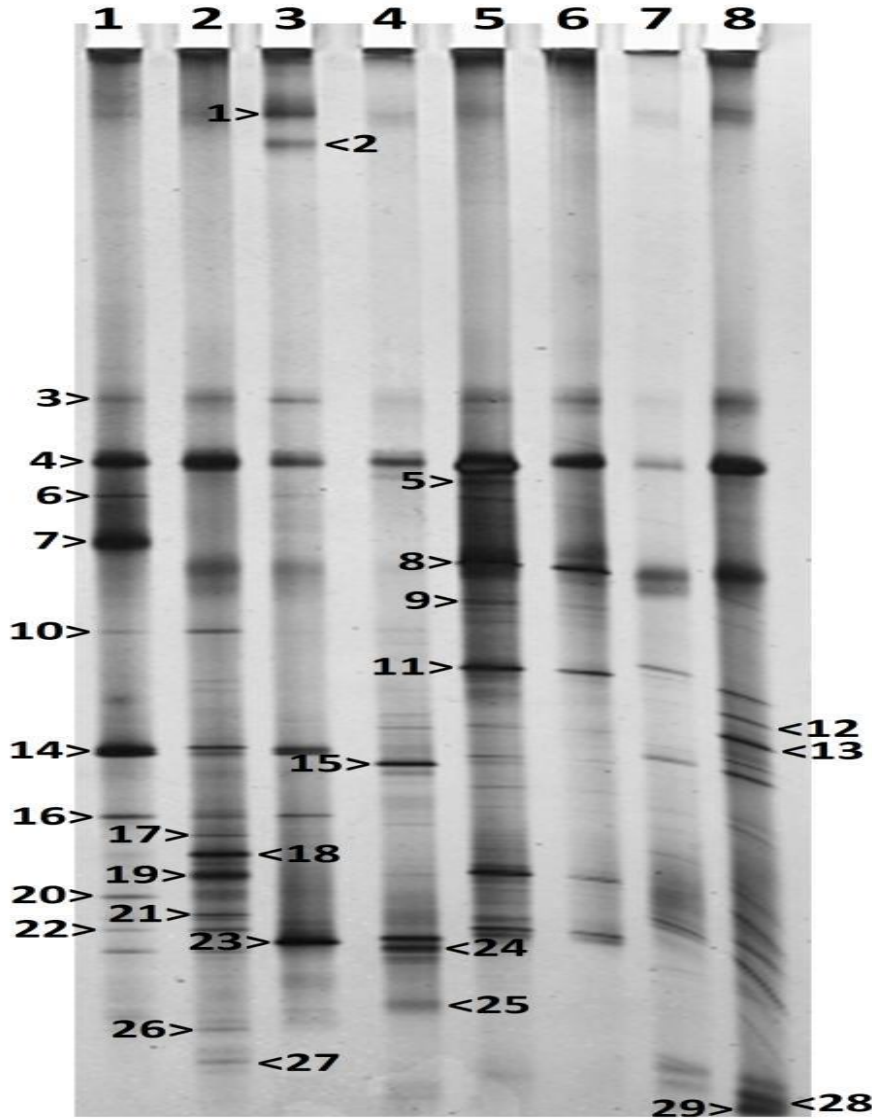
Çalışma süresince tür tespiti yapılan numuneler;

- ✓ Asetat ve glizkoz ile yapılan sürekli ve kesikli çalışmalarda MYH'lerden alınan numunelerde,
- ✓ Evsel atıksular ile yapılan çalışmada farklı MYH'lerden alınan numunelerde
- ✓ Mezbaa atıksuyu ile yapılan çalışmalardan MYH'lerden alınan numunelerde,
- ✓ Yağ endüstrisi atıksuyu ile yapılan çalışmalarda MYH'lerden alınan numunelerde,
- ✓ Farklı membran çalışmalarında MYH'lerden alınan numunelerde tür profili belirlenmiştir.

4.7.1 Asetat ve Glikoz Üçlü Karışım Sürekli ve Kesikli Beslemeler (KOİ 2000 mg/L)

Asetat ve glikoz ile kesikli ve sürekli beslenen MYH reaktörlerinden ve anot yüzeyinden alınan numunelere ait bilgiler Tablo 4.1'de verilmiştir. Tablo aynı zamanda DGGE jel görüntüsünde dikey yönde numaralandırılmış kuyulara yükleme yapılan numuneleri belirtmektedir. Analiz sonucunda ayrımı yapılmış olan yatay yöndeki bantların kesimi yapıldıktan sonra bantları temsil eden mikrobiyal tür, gen bankasındaki (<http://www.ncbi.nlm.nih.gov/genbank/>) benzerlik yüzdesi ve organizma sınıfları ve referansları Tablo 4.2'de bant numaraları ile birlikte verilmiştir. Şekil 4.186'da ise sentetik

atıksu ile beslenen MYH reaktörlerinde baskın türlerin filogenetik ağaç verilmiştir. Yapılan çalışmada DGGE’de elde edilen türlerin mikroorganizma sınıfları Şekil 4.187’de verilmiştir. Asetat ve glikoz beslemeli reaktörlerde türleri temsil eden mikroorganizma sınıflarının önemli bir yüzdesinin *Deltaproteobakter* grubundaki bakteri sınıfında yer aldığı tespit edilmiştir (Dunaj vd., 2012; Jong vd., 2011; Fedorovich vd., 2009; Kiely vd., 2011). Bunun yanında *Gamaproteobakter* (Wang vd., 2012; Chung vd., 2009; Zhang vd., 2009) ve *Firmicutes* (Wang vd., 2012; Zhao vd., 2012; Kan vd., 2011; Zhang vd., 2012) grubu bakterilerin de MYH reaktöründe rol alan etkin gruplardan olduğu belirlenmiştir. Asetat+laktat+benzoik asit ve glikoz+laktat+benzoik asit üçlü karışım beslemeli reaktörlerden alınan numunelerdeki baskın türleri temsil eden filogenetik ağacı Şekil 4.186’da verilmiştir.



Şekil 4.185: Asetat ve glikoz üçlü karışım beslemeli reaktörlerden alınan biyofilm numunelerine ait DGGE jel görüntüsü

Tablo 4.1. DGGE akrilamit jel görüntüsünde kuyuları temsil eden numuneler

Kuyu Numarası	Numune Adı
1	Asetat Üçlü (Sürekli Besleme) KOİ 2000 Ortam
2	Asetat Üçlü (Sürekli Besleme) KOİ 2000 Elektrot Yüzeyi
3	Glikoz Üçlü (Sürekli Besleme) KOİ 2000 Ortam
4	Glikoz Üçlü (Sürekli Besleme) KOİ 2000 Elektrot Yüzeyi
5	Asetat Üçlü (Kesikli) Ortam
6	Asetat Üçlü (Kesikli) Elektrot Yüzeyi
7	Glikoz Üçlü (Kesikli) Ortam
8	Glikoz Üçlü (Kesikli) Elektrot Yüzeyi

Tablo 4.2. Asetat+laktat+benzoik asit ve glikoz+laktat+benzoik asit üçlü karışım beslemeli reaktörlerden alınan numunelere ait DGGE bantlarından elde edilen mikrobiyal türler

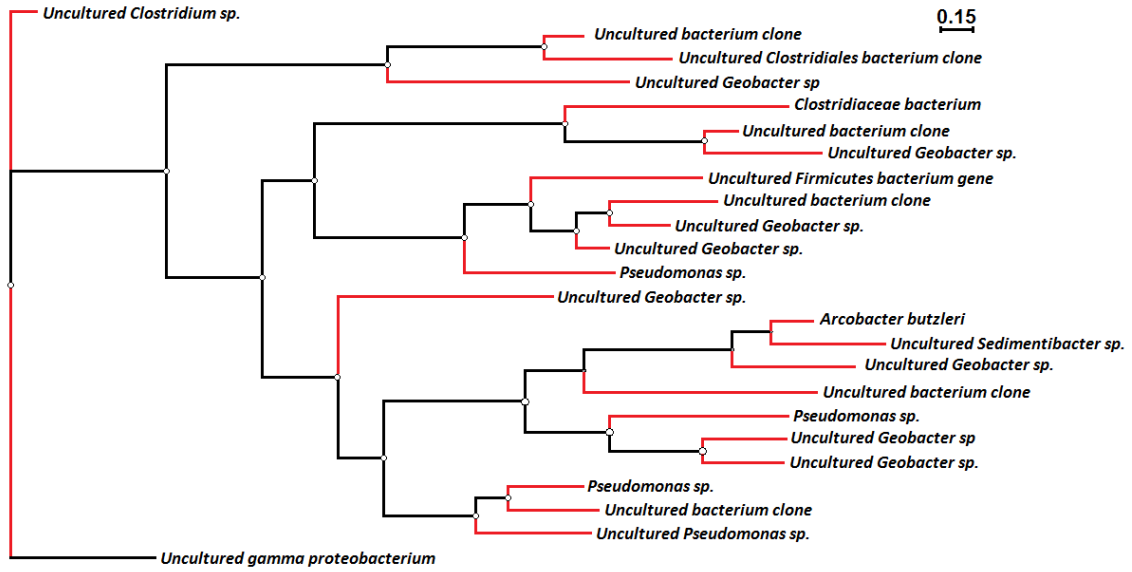
Bant No	Gen Bankası Erişim No	Tür	Benzerlik (%)	Organizma	Referans
1	AY491549	<i>Uncultured bacterium clone</i>	100	Bacteria; environmental samples.	Lee,J., Phung,N.T., Chang,I.S., Kim,B.H. and Sung,H.C. Use of acetate for enrichment of electrochemically active microorganisms and their 16S rDNA analyses FEMS Microbiol. Lett. 223 (2), 185-191 (2003)
2	AY491549	<i>Uncultured bacterium clone</i>	100	Bacteria; environmental samples.	Lee,J., Phung,N.T., Chang,I.S., Kim,B.H. and Sung,H.C. Use of acetate for enrichment of electrochemically active microorganisms and their 16S rDNA analyses FEMS Microbiol. Lett. 223 (2), 185-191 (2003)
3	AY491546	<i>Uncultured bacterium clone</i>	100	Bacteria; environmental samples.	Lee,J., Phung,N.T., Chang,I.S., Kim,B.H. and Sung,H.C. Use of acetate for enrichment of electrochemically active microorganisms and their 16S rDNA analyses FEMS Microbiol. Lett. 223 (2), 185-191 (2003)
4	JF817670	<i>Uncultured Geobacter sp.</i>	100	Bacteria; Proteobacteria; Deltaproteobacteria; Desulfuromonadales; Geobacteraceae; Geobacter; environmental samples.	Yates,M.D., Kiely,P.D., Call,D.F. and Logan,B.E., Convergent Development of Microbial Communities in Microbial Fuel Cells, unpublished
5	JF817659	<i>Uncultured Geobacter sp</i>	90	Bacteria; Proteobacteria; Deltaproteobacteria; Desulfuromonadales; Geobacteraceae; Geobacter; environmental samples.	Yates,M.D., Kiely,P.D., Call,D.F. and Logan,B.E., Convergent Development of Microbial Communities in Microbial Fuel Cells, unpublished
6	AP012047	<i>Arcobacter butzleri</i>	100	Bacteria; Proteobacteria; Epsilonproteobacteria; Campylobacteriales; Campylobacteraceae; Arcobacter.	Toh,H., Sharma,V.K., Oshima,K., Kondo,S., Hattori,M., Ward,F.B., Free,A. and Taylor,T.D., Complete Genome Sequences of Arcobacter butzleri ED-1 and Arcobacter sp. Strain L, Both Isolated from a Microbial Fuel Cell, J. Bacteriol. 193 (22), 6411-6412 (2011)

Bant No	Gen Bankası Erişim No	Tür	Benzerlik (%)	Organizma	Referans
7	AP012047	<i>Arcobacter butzleri</i>	100	Bacteria; Proteobacteria; Epsilonproteobacteria; Campylobacterales; Campylobacteraceae; Arcobacter.	Toh,H., Sharma,V.K., Oshima,K., Kondo,S., Hattori,M., Ward,F.B., Free,A. and Taylor,T.D., Complete Genome Sequences of Arcobacter butzleri ED-1 and Arcobacter sp. Strain L, Both Isolated from a Microbial Fuel Cell, J. Bacteriol. 193 (22), 6411-6412 (2011)
8	AY491543	<i>Uncultured bacterium clone</i>	100	Bacteria; environmental samples.	Lee,J., Phung,N.T., Chang,I.S., Kim,B.H. and Sung,H.C. Use of acetate for enrichment of electrochemically active microorganisms and their 16S rDNA analyses, FEMS Microbiol. Lett. 223 (2), 185-191 (2003)
9	JF817733	<i>Uncultured Geobacter sp.</i>	95	Bacteria; Proteobacteria; Deltaproteobacteria; Desulfuromonadales; Geobacteraceae; Geobacter; environmental samples.	Yates,M.D., Kiely,P.D., Call,D.F. and Logan,B.E., Convergent Development of Microbial Communities in Microbial Fuel Cells, unpublished
10	AB478910	<i>Uncultured Clostridium sp.</i>	97	Bacteria; Firmicutes; Clostridia; Clostridiales; Clostridiaceae; Clostridium; environmental samples.	Shimoyama,T., Yamazawa,A., Ueno,Y. and Watanabe,K. Phylogenetic analyses of bacterial communities developed in a cassette-electrode microbial fuel cell, Microbes Environ. 24 (2), 188-192 (2009)
11	AB298756	<i>Clostridiaceae bacterium</i>	99		
12	FJ393130	<i>Uncultured Geobacter sp.</i>	98	Bacteria; Proteobacteria; Deltaproteobacteria; Desulfuromonadales; Geobacteraceae; Geobacter; environmental samples.	Borole,A.P., Hamilton,C.Y., Vishnivetskaya,T.A., Leak,D., Andras,C., Morrell-Falvey,J., Keller,M. and Davison,B., Integrating engineering design improvements with exoelectrogen enrichment process to increase power output from microbial fuel cells, J Power Sources 191 (2), 520-527 (2009)

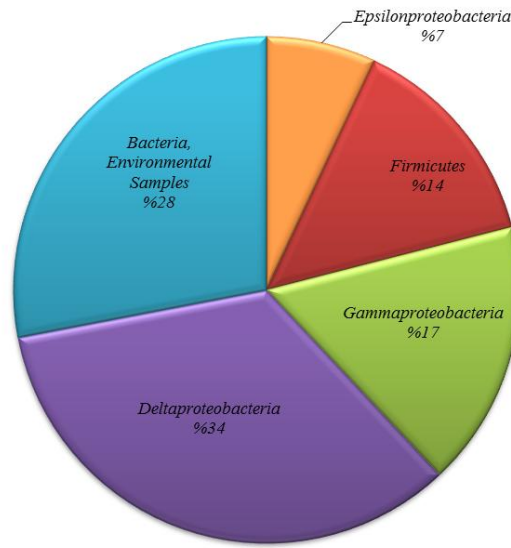
Bant No	Gen Bankası Erişim No	Tür	Benzerlik (%)	Organizma	Referans
13	FJ393110	<i>Uncultured Sedimentibacter sp.</i>	99	Bacteria; Proteobacteria; Deltaproteobacteria; Desulfuromonadales; Geobacteraceae; Geobacter; environmental samples.	Borole,A.P., Hamilton,C.Y., Vishnivetskaya,T.A., Leak,D., Andras,C., Morrell-Falvey,J., Keller,M. and Davison,B., Integrating engineering design improvements with exoelectrogen enrichment process to increase power output from microbial fuel cells, J Power Sources 191 (2), 520-527 (2009)
14	GQ463723	<i>Pseudomonas sp.</i>	100	Bacteria; Proteobacteria; Gammaproteobacteria; Pseudomonadales; Pseudomonadaceae; Pseudomonas.	Michaelidou,U., Ter Heijne,A., Euverink,G.J., Hamelers,H.V., Stams,A.J. and Geelhoed,J.S., Microbial Communities and Electrochemical Performance of Titanium-Based Anodic Electrodes in a Microbial Fuel Cell, Appl. Environ. Microbiol. 77 (3), 1069-1075 (2011)
15	FJ393123	<i>Uncultured Geobacter sp.</i>	95	Bacteria; Proteobacteria; Deltaproteobacteria; Desulfuromonadales; Geobacteraceae; Geobacter; environmental samples.	Borole,A.P., Hamilton,C.Y., Vishnivetskaya,T.A., Leak,D., Andras,C., Morrell-Falvey,J., Keller,M. and Davison,B., Integrating engineering design improvements with exoelectrogen enrichment process to increase power output from microbial fuel cells, J Power Sources 191 (2), 520-527 (2009)
16	AB286293	<i>Uncultured gamma proteobacterium</i>	100	Bacteria; Proteobacteria; Gammaproteobacteria; environmental samples.	Ishii,S., Shimoyama,T., Hotta,Y. and Watanabe,K., Characterization of a filamentous biofilm community established in a cellulose-fed microbial fuel cell, BMC Microbiol. 8, 6 (2008)
17	JF817455	<i>Uncultured Geobacter sp.</i>	99	Bacteria; Proteobacteria; Deltaproteobacteria; Desulfuromonadales; Geobacteraceae; Geobacter; environmental samples.	Yates,M.D., Kiely,P.D., Call,D.F. and Logan,B.E., Convergent Development of Microbial Communities in Microbial Fuel Cells, unpublished
18	AB478910	<i>Uncultured Clostridium sp.</i>	100	Bacteria; Firmicutes; Clostridia; Clostridiales; Clostridiaceae; Clostridium; environmental samples.	Shimoyama,T., Yamazawa,A., Ueno,Y. and Watanabe,K., Phylogenetic analyses of bacterial communities developed in a cassette-electrode microbial fuel cell, Microbes Environ. 24 (2), 188-192 (2009)

Bant No	Gen Bankası Erişim No	Tür	Benzerlik (%)	Organizma	Referans
19	HQ183783	<i>Uncultured Clostridiales bacterium clone</i>	100	Bacteria; Firmicutes; Clostridia; Clostridiales; environmental samples.	
20	HQ157176	<i>Uncultured bacterium clone</i>	100	Bacteria; environmental samples.	Ren,Z., Yan,H., Wang,W., Mench,M.M. and Regan,J.M., Characterization of Microbial Fuel Cells at Microbially and Electrochemically Meaningful Time scales, Environ. Sci. Technol. 45 (6), 2435-2441 (2011)
21	JF818012	<i>Uncultured Geobacter sp.</i>	100	Bacteria; Proteobacteria; Deltaproteobacteria; Desulfuromonadales; Geobacteraceae; Geobacter; environmental samples.	Yates,M.D., Kiely,P.D., Call,D.F. and Logan,B.E., Convergent Development of Microbial Communities in Microbial Fuel Cells, unpublished
22	JF736640	<i>Uncultured Pseudomonas sp.</i>	100	Bacteria; Proteobacteria; Gammaproteobacteria; Pseudomonadales; Pseudomonadaceae; Pseudomonas; environmental samples.	Sun,Y., Wei,J., Liang,P. and Huang,X., Electricity generation and microbial community changes in microbial fuel cells packed with different anodic materials, Bioresour. Technol. 102 (23), 10886-10891 (2011)
23	GQ463725	<i>Pseudomonas sp.</i>	96	Bacteria; Proteobacteria; Gammaproteobacteria; Pseudomonadales; Pseudomonadaceae; Pseudomonas.	Michaelidou,U., Ter Heijne,A., Euverink,G.J., Hamelers,H.V., Stams,A.J. and Geelhoed,J.S. TITLE Microbial Communities and Electrochemical Performance of Titanium-Based Anodic Electrodes in a Microbial Fuel Cell, Appl. Environ. Microbiol. 77 (3), 1069-1075 (2011)
24	HM103333	<i>Pseudomonas sp.</i>	100	Bacteria; Proteobacteria; Gammaproteobacteria; Pseudomonadales; Pseudomonadaceae; Pseudomonas.	Yan,S., Sellamuthu,B., Huang,H., Zhang,T.C., Tyagi,R.D. and Surampalli,R.Y. Identification of microorganisms in microbial fuel cells inoculated with solid agricultural wastes, Unpublished

Bant No	Gen Bankası Erişim No	Tür	Benzerlik (%)	Organizma	Referans
25	JF817997	<i>Uncultured Geobacter sp.</i>	100	Bacteria; Proteobacteria; Deltaproteobacteria; Desulfuromonadales; Geobacteraceae; Geobacter; environmental samples.	Yates, M.D., Kiely,P.D., Call,D.F. and Logan,B.E. Convergent Development of Microbial Communities in Microbial Fuel Cells
26	AB478911	<i>Uncultured Firmicutes bacterium gene</i>	100	Bacteria; Firmicutes; environmental samples.	Shimoyama,T., Yamazawa,A., Ueno,Y. and Watanabe,K. Phylogenetic analyses of bacterial communities developed in a cassette-electrode microbial fuel cell, Microbes Environ. 24 (2), 188-192 (2009)
27	JF817997	<i>Uncultured Geobacter sp.</i>	100	Bacteria; Proteobacteria; Deltaproteobacteria; Desulfuromonadales; Geobacteraceae; Geobacter; environmental samples.	Yates, M.D., Kiely,P.D., Call,D.F. and Logan,B.E. Convergent Development of Microbial Communities in Microbial Fuel Cells
28	AY491586	Uncultured bacterium clone	100	Bacteria; environmental samples.	Phung,N.T., Lee,J., Kang,K.H., Chang,I.S., Gadd,G.M. and Kim,B.H., Analysis of microbial diversity in oligotrophic microbial fuel cells using 16S rDNA sequences, FEMS Microbiol. Lett. 233 (1), 77-82 (2004)
29	AY491586	<i>Uncultured bacterium clone</i>	100	Bacteria; environmental samples.	Phung,N.T., Lee,J., Kang,K.H., Chang,I.S., Gadd,G.M. and Kim,B.H., Analysis of microbial diversity in oligotrophic microbial fuel cells using 16S rDNA sequences, FEMS Microbiol. Lett. 233 (1), 77-82 (2004)



Şekil 4.186: Asetat+laktat+benzoik asit ve glikoz+laktat+benzoik asit üçlü karışım beslemeli reaktörlerden alınan numunelerdeki baskın türlerin filogenetik ağacı



Şekil 4.187: Asetat+laktat+benzoik asit ve glikoz+laktat+benzoik asit ile hazırlanmış sentetik atıksuda MYH reaktöründeki baskın tür sınıfları

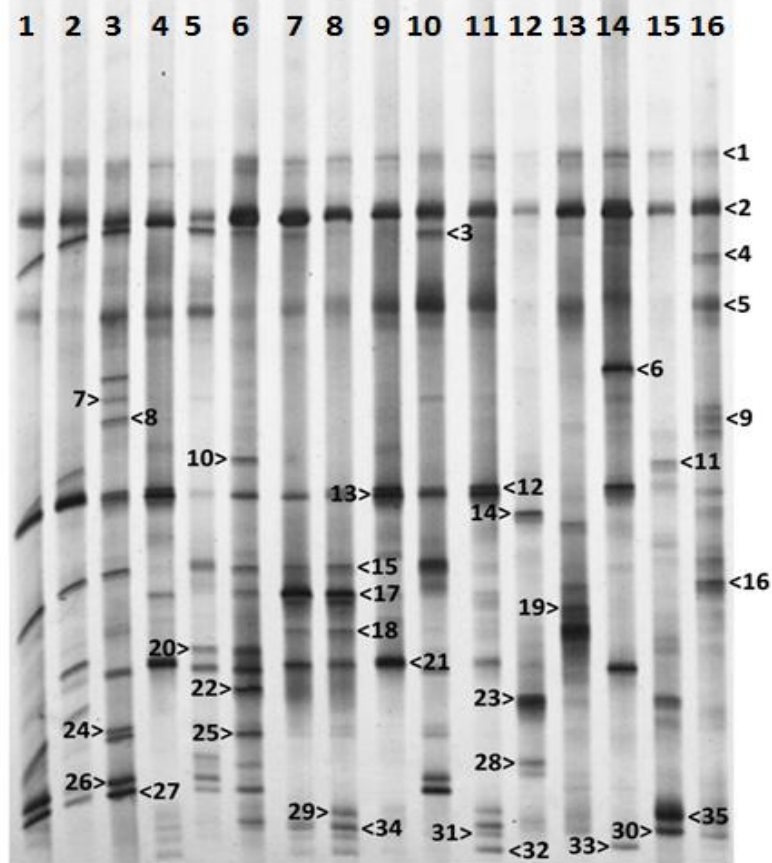
4.7.2 Asetat ve Glikoz Üçlü Karışım Sürekli Beslemeler (50 mM)

Tablo 4.3 ve Şekil 4.188'deki akrilamit jel görüntüsünün yatay yöndeki 16 adet kuyu numarasını içermektedir. Aynı şekilde DGGE jel görüntüsünde mikrobiyal türleri temsil eden dikey yönde numaralandırılmış bantlar da yer almaktadır. Bu bantların kesimi yapıldıktan sonra yapılan dizi analizi sonucu elde edilen sekans dizilimleri sonucunda,

temsil eden mikrobiyal tür, benzerlik yüzdesi ve organizma sınıfları Tablo 4.4’de bant numaraları ile birlikte verilmiştir. Şekil 4.189’da 50 mM üçlü karışım içeren sentetik atıksu ile beslenen MYH reaktörlerinde baskın türlerin filogenetik ağacı verilmiştir. Üçlü karışımla beslenen reaktörlerde türleri temsil eden mikroorganizma sınıflarının önemli bir yüzdesinin *Deltaproteobakter* ve *Gamaproteobakter* (%48) grubundaki bakteri sınıfında yer aldığı tespit edilmiştir. Bunun yanında az bir yüzdeyle *Firmicutes* ve *Betaproteobakter* grubu bakterilerin de MYH reaktöründe bulunan gruplardan olduğu belirlenmiştir (Şekil 4.190). PCR-DGGE çalışması sonucunda *Shewanella sp.* türü bakterinin asetat ve glikoz karışımı ile beslenen MYH’lerde elektrot yüzeyinde ve anot sıvısında baskın tür olduğu belirlenmiştir. *Shewanella marisflavi* türünün asetat karışımlı sentetik atıksu ile beslenen MYH’de anot elektrot yüzeyinde baskın olduğu belirlenirken glikoz karışımı ile beslenen MYH’de tespit edilmemiştir. Ayrıca *Uncultured bacterium clone*’nun her iki MYH’de anot biyofilminde baskın olduğu belirlenmiştir. *Uncultured Geobacter sp.* türü asetat karışımı ile beslenen MYH’de elektrot yüzeyinde ve anot sıvısında bütün işletme periyotlarında tespit edilmiştir. Ayrıca *Uncultured Geobacter sp.* türü bakteri glikoz ile beslenen MYH’de elektrot yüzeyi hariç anot sıvısında bütün işletim periyotlarında baskın tür olduğu belirlenmiştir. Aynı tür Borole vd. (2009) tarafından yapılan çalışmada da tespit edildiği rapor edilmiştir. Yapılan çalışmada DGGE’de elde edilen mikrobiyal türlerin mikroorganizma sınıfları Şekil 4.190’da verilmiştir *Gammaproteobacteria* grubuna ait mikroorganizmaların asetat karışımı ile beslenen MYH’de daha fazla olduğu tespit edilmiştir. Literatürde yapılmış çalışmalarda asetat ile beslenen MYH’lerde *Geobacter sp.* (Jung vd., 2007; Ha vd., 2008), *Pseudomonas sp.* (Pham vd., 2009; Parot vd., 2009), *Shewanella sp.* (Biffinger vd., 2009), türlerinin baskın olduğu belirtilmiştir.

Tablo 4.3. DGGE akrilamit jel görüntüsünde kuyuları temsil eden numuneler

Kuyu No	Substrat	Besleme Şekli	Numune	HBS, Gün
1	Asetat (A)+Laktat (L)+Benzoik Asit (BA)	Sürekli	Reaktör Ortamı	1,5
2	A+L+BA	Sürekli	Reaktör Ortamı	1,25
3	A+L+BA	Sürekli	Reaktör Ortamı	1
4	A+L+BA	Sürekli	Reaktör Ortamı	0,8
5	A+L+BA	Sürekli	Reaktör Ortamı	0,5
6	A+L+BA	Sürekli	Anot Yüzeyi	
7	Glikoz (G)+Laktat (L)+Benzoik Asit (BA)	Sürekli	Reaktör Ortamı	1,5
8	G+L+BA	Sürekli	Reaktör Ortamı	1,25
9	G+L+BA	Sürekli	Reaktör Ortamı	1
10	G+L+BA	Sürekli	Reaktör Ortamı	0,8
11	G+L+BA	Sürekli	Reaktör Ortamı	0,5
12	G+L+BA	Sürekli	Anot Yüzeyi	
13	Asetat	Sürekli	Anot Yüzeyi	
14	Glikoz	Sürekli	Anot Yüzeyi	
15	Asetat	Kesikli	Anot Yüzeyi	
16	Glikoz	Kesikli	Anot Yüzeyi	



Şekil 4.188: Üçlü karışım sentetik atıksu (50 mM) ile beslenen MYH reaktöründe farklı işletme şartlarındaki DGGE bantları

Tablo 4.4. Asetat+laktat+benzoik asit ve glikoz+laktat+benzoik asit üçlü karışım sürekli beslemeli reaktörlerden alınan numunelere ait DGGE bantlarından elde edilen mikrobiyal türler

Bant No	Gen Bankası Erişim No	Tür	Benzerlik	Organizma Sınıfı	Referanslar
1	FJ589035	<i>Shewanella Marisflavi</i>	100	Bacteria; Proteobacteria; Gammaproteobacteria; Alteromonadales; Shewanellaceae; Shewanella.	Huang, J., Sun, B., Zhang, X., 2010. Electricity generation at high ionic strength in microbial fuel cell by a newly isolated <i>Shewanella marisflavi</i> EP1. Applied Microbiology and Biotechnology. 85, 1141–1149.
2	FN870751	<i>Shewanella sp.</i>	100	Bacteria; Proteobacteria; Gammaproteobacteria; Alteromonadales; Shewanellaceae; Shewanella.	Sikora,A., Wojtowicz-Sienko,J., Piela,P. and Zielenkiewicz,U., Selection of bacteria capable of dissimilatory reduction of Fe(III) from a long-term continuous culture on molasses and their use in a microbial fuel cell, Unpublished
3	EU360304	<i>Uncultured bacterium clone</i>	100	Bacteria; environmental samples.	Park,C.-Y., Hong,S.-W. and Choi,Y.-S. Direct Submission, Submitted (17-DEC-2007) Center for Environmental Technology Research, Korea Institute of Science and Technology, 39-1, Hawolgok-Dong, Sungbuk-Gu, Seoul 136-791, Korea
4	FN870751	<i>Shewanella sp.</i>	99	Bacteria; Proteobacteria; Gammaproteobacteria; Alteromonadales; Shewanellaceae; Shewanella.	Sikora,A., Wojtowicz-Sienko,J., Piela,P. and Zielenkiewicz,U., Selection of bacteria capable of dissimilatory reduction of Fe(III) from a long-term continuous culture on molasses and their use in a microbial fuel cell, Unpublished
5	JN805678	<i>Uncultured bacterium clone</i>	100	Bacteria; environmental samples.	
6	FJ393112	<i>Uncultured Enterobacteriaceae bacterium clone</i>	99	Bacteria; Proteobacteria; Gammaproteobacteria; Enterobacteriales; Enterobacteriaceae; environmental samples.	Borole,A.P., Hamilton,C.Y., Vishnivetskaya,T.A., Leak,D., Andras,C., Morrell-Falvey,J., Keller,M. and Davison,B. TITLE Integrating engineering design improvements with exoelectrogen enrichment process to increase power output from microbial fuel cells, J Power Sources 191 (2), 520-527 (2009)

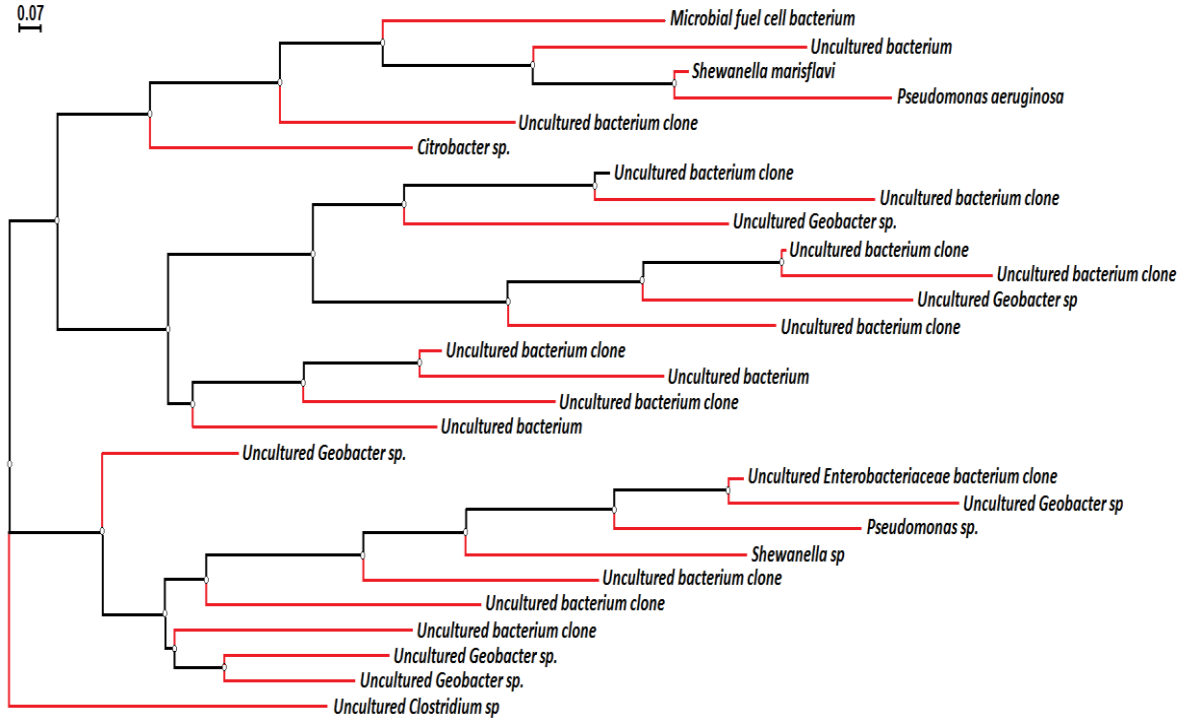
Bant No	Gen Bankası Erişim No	Tür	Benzerlik	Organizma Sınıfı	Referanslar
7	GU083524	<i>Uncultured bacterium clone</i>	98	Bacteria; environmental samples.	Kiely,P.D., Rader,G., Regan,J.M. and Logan,B.E., Long-term cathode performance and the microbial communities that develop in microbial fuel cells fed different fermentation endproducts Bioresour. Technol. 102 (1), 361-366 (2011)
8	JF736641	<i>Uncultured Geobacter sp.</i>	96	Bacteria; Proteobacteria; Deltaproteobacteria; Desulfuromonadales; Geobacteraceae; Geobacter; environmental samples.	Sun,Y., Wei,J., Liang,P. and Huang,X. Electricity generation and microbial community changes in microbial fuel cells packed with different anodic materials, Bioresour. Technol. 102 (23), 10886-10891 (2011)
9	JF736641	<i>Uncultured Geobacter sp.</i>	96	Bacteria; Proteobacteria; Deltaproteobacteria; Desulfuromonadales; Geobacteraceae; Geobacter; environmental samples.	Sun,Y., Wei,J., Liang,P. and Huang,X. Electricity generation and microbial community changes in microbial fuel cells packed with different anodic materials, Bioresour. Technol. 102 (23), 10886-10891 (2011)
10	JF736631	<i>Uncultured Geobacter sp.</i>	98	Bacteria; Proteobacteria; Deltaproteobacteria; Desulfuromonadales; Geobacteraceae; Geobacter; environmental samples.	Sun,Y., Wei,J., Liang,P. and Huang,X. Electricity generation and microbial community changes in microbial fuel cells packed with different anodic materials, Bioresour. Technol. 102 (23), 10886-10891 (2011)
11	EF515446	<i>Uncultured bacterium clone</i>	100	Bacteria; environmental samples.	Dryden,S.K., He,Z., Ley,R.E. and Angenent,L.T. Electricigen Enrichment in a MFC, Unpublished
12	HM103333	<i>Pseudomonas sp.</i>	100	Bacteria; Proteobacteria; Gammaproteobacteria; Pseudomonadales; Pseudomonadaceae; Pseudomonas.	Yan,S., Sellamuthu,B., Huang,H., Zhang,T.C., Tyagi,R.D. and Surampalli,R.Y. Identification of microorganisms in microbial fuel cells inoculated with solid agricultural wastes, Unpublished

Bant No	Gen Bankası Erişim No	Tür	Benzerlik	Organizma Sınıfı	Referanslar
13	FJ393123	<i>Uncultured Geobacter sp.</i>	98	Bacteria; Proteobacteria; Deltaproteobacteria; Desulfuromonadales; Geobacteraceae; Geobacter; environmental samples.	Borole,A.P., Hamilton,C.Y., Vishnivetskaya,T.A., Leak,D., Andras,C., Morrell-Falvey,J., Keller,M. and Davison,B. Integrating engineering design improvements with exoelectrogen enrichment process to increase power output from microbial fuel cells,J Power Sources 191 (2), 520-527 (2009)
14	FJ375483	<i>Uncultured bacterium clone</i>	99	Bacteria; environmental samples.	Lefebvre,O., Ha Nguyen,T.T., Al-Mamun,A., Chang,I.S. and Ng,H.Y., T-RFLP reveals high beta-Proteobacteria diversity in microbial fuel cells enriched with domestic wastewater, J. Appl. Microbiol. (2010) In press
15	HQ845373	<i>Citrobacter sp.</i>	100	Bacteria; Proteobacteria; Gammaproteobacteria; Enterobacteriales; Enterobacteriaceae; Citrobacter.	Xu,S. and Liu,H. New exoelectrogen Citrobacter sp. SX-1 isolated from a microbial fuel cell J. Appl. Microbiol. 111 (5), 1108-1115 (2011)
16	HQ157176	<i>Uncultured bacterium clone</i>	99	Bacteria; environmental samples.	Ren,Z., Yan,H., Wang,W., Mench,M.M. and Regan,J.M. Characterization of Microbial Fuel Cells at Microbially and Electrochemically Meaningful Time scales, Environ. Sci. Technol. 45 (6), 2435-2441 (2011)
17	AY563447	<i>Uncultured bacterium clone</i>	98	Lee,J. and Kim,B.H. Bacterial diversity of copiotrophic artificial wastewater enriched microbial fuel cell, Unpublished	Lee,J. and Kim,B.H., Bacterial diversity of copiotrophic artificial wastewater enriched microbial fuel cell, Unpublished
18	HM103333	<i>Pseudomonas sp.</i>	99	Bacteria; Proteobacteria; Gammaproteobacteria; Pseudomonadales; Pseudomonadaceae; Pseudomonas.	ORS Yan,S., Sellamuthu,B., Huang,H., Zhang,T.C., Tyagi,R.D. and Surampalli,R.Y. Identification of microorganisms in microbial fuel cells inoculated with solid agricultural wastes Unpublished

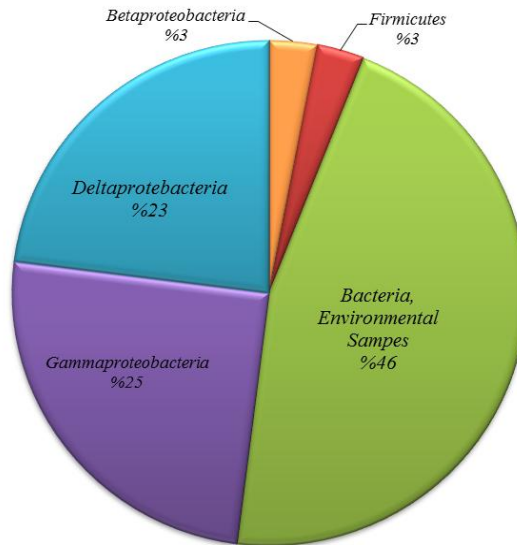
Bant No	Gen Bankası Erişim No	Tür	Benzerlik	Organizma Sınıfı	Referanslar
19	HM103351	<i>Pseudomonas aeruginosa</i>	98	Bacteria; Proteobacteria; Gammaproteobacteria; Pseudomonadales; Pseudomonadaceae; Pseudomonas.	ORS Yan,S., Sellamuthu,B., Huang,H., Zhang,T.C., Tyagi,R.D. and Surampalli,R. Y. Identification of microorganisms in microbial fuel cells inoculated with solid agricultural wastes Unpublished
20	DQ424921	<i>Uncultured bacterium clone</i>	99	Bacteria; environmental samples.	Jong,B.C., Kim,B.H., Chang,I.S., Liew,P.W., Choo,Y.F. and Kang,G.S. Enrichment, performance, and microbial diversity of a thermophilic mediatorless microbial fuel cell Environ. Sci. Technol. 40 (20), 6449-6454 (2006)
21	AB288641	<i>Uncultured Clostridium sp.</i>	100	Bacteria; Firmicutes; Clostridia; Clostridiales; Clostridiaceae; Clostridium; environmental samples.	Ishii,S., Hotta,Y. and Watanabe,K. Methanogenesis versus electrogenesis: morphological and phylogenetic comparisons of microbial communities, Biosci. Biotechnol. Biochem. 72 (2), 286-294 (2008)
22	JF818046	<i>Uncultured Geobacter sp.</i>	100	Bacteria; Proteobacteria; Deltaproteobacteria; Desulfuromonadales; Geobacteraceae; Geobacter; environmental samples.	Yates,M.D., Kiely,P.D., Call,D.F. and Logan,B.E., Convergent Development of Microbial Communities in Microbial Fuel Cells, Unpublished
23	GU591532	<i>Uncultured bacterium clone</i>	100	Bacteria; environmental samples.	de Carcer,D.A., Ha,P.T., Jang,J.K. and Chang,I.S. Microbial community differences between propionate-fed microbial fuel cell systems under open and closed circuit conditions, Appl. Microbiol. Biotechnol. 89 (3), 605-612 (2011)
24	JF818022	<i>Uncultured Geobacter sp.</i>	100	Bacteria; Proteobacteria; Deltaproteobacteria; Desulfuromonadales; Geobacteraceae; Geobacter; environmental samples	Yates,M.D., Kiely,P.D., Call,D.F. and Logan,B.E., Convergent Development of Microbial Communities in Microbial Fuel Cells, Unpublished

Bant No	Gen Bankası Erişim No	Tür	Benzerlik	Organizma Sınıfı	Referanslar
25	JF818022	<i>Uncultured Geobacter sp.</i>	100	Bacteria; Proteobacteria; Deltaproteobacteria; Desulfuromonadales; Geobacteraceae; Geobacter; environmental samples	Yates,M.D., Kiely,P.D., Call,D.F. and Logan,B.E., Convergent Development of Microbial Communities in Microbial Fuel Cells, Unpublished
26	AY483173	<i>Microbial fuel cell bacterium</i>	100	Bacteria; Proteobacteria; Betaproteobacteria; Burkholderiales; Alcaligenaceae; Alcaligenes.	Rabaey,K., Boon,N., Siciliano,S.D., Verhaege,M. and Verstraete,W. Biofuel cells select for microbial consortia that self-mediate electron transfer, Appl. Environ. Microbiol. 70 (9), 5373-5382 (2004)
27	FJ624177	<i>Uncultured bacterium clone</i>	99	Bacteria; environmental samples.	Patil,S.A., Surakasi,V.P., Koul,S., Ijmulwar,S., Vivek,A., Shouche,Y.S. and Kapadnis,B.P., Electricity generation using chocolate industry wastewater and its treatment in activated sludge based microbial fuel cell and analysis of developed microbial community in the anode chamber, Bioresour. Technol. 100 (21), 5132-5139 (2009)
28	AY563447	<i>Uncultured bacterium clone</i>	100	Bacteria; environmental samples.	Lee,J. and Kim,B.H., Bacterial diversity of copiotrophic artificial wastewater enriched microbial fuel cell, Unpublished
29	JF817764	<i>Uncultured Geobacter sp.</i>	100	Bacteria; Proteobacteria; Deltaproteobacteria; Desulfuromonadales; Geobacteraceae; Geobacter; environmental samples	Yates,M.D., Kiely,P.D., Call,D.F. and Logan,B.E., Convergent Development of Microbial Communities in Microbial Fuel Cells, Unpublished
30	JN805664	<i>Uncultured bacterium clone</i>	100	Bacteria; environmental samples.	Yan,Z., Song,N., Cai,H. and Jiang,H. TITLE Enhanced degradation of phenanthrene and pyrene in freshwater sediments by combined employment of sediment microbial fuel cell and amorphous ferric hydroxide Unpublished

Bant No	Gen Bankası Erişim No	Tür	Benzerlik	Organizma Sınıfı	Referanslar
31	JN805665	<i>Uncultured bacterium clone</i>	100	Bacteria; environmental samples.	Yan,Z., Song,N., Cai,H. and Jiang,H. TITLE Enhanced degradation of phenanthrene and pyrene in freshwater sediments by combined employment of sediment microbial fuel cell and amorphous ferric hydroxide Unpublished
32	EF515446	<i>Uncultured bacterium clone</i>	100	Bacteria; environmental samples.	Dryden,S.K., He,Z., Ley,R.E. and Angenent,L.T. Electricigen Enrichment in a MFC, Unpublished
33	EF515278	<i>Uncultured bacterium clone</i>	100	Bacteria; environmental samples.	Dryden,S.K., He,Z., Ley,R.E. and Angenent,L.T. Electricigen Enrichment in a MFC, Unpublished
34	AY491577	<i>Uncultured bacterium clone</i>	95	Bacteria; environmental samples.	Phung,N.T., Lee,J., Kang,K.H., Chang,I.S., Gadd,G.M. and Kim,B.H. Analysis of microbial diversity in oligotrophic microbial fuel cells using 16S rDNA sequences,FEMS Microbiol. Lett. 233 (1), 77-82 (2004)
35	FJ624177	<i>Uncultured bacterium clone</i>	99	Bacteria; environmental samples.	Patil,S.A., Surakasi,V.P., Koul,S., Ijmulwar,S., Vivek,A., Shouche,Y.S. and Kapadnis,B.P. Electricity generation using chocolate industry wastewater and its treatment in activated sludge based microbial fuel cell and analysis of developed microbial community in the anode chamber, Bioresour. Technol. 100 (21), 5132-5139 (2009)



Şekil 4.189: Üçlü karışım sentetik atıksu ile beslenen MYH reaktöründe baskın türlerin filogenetik ağacı



Şekil 4.190: Asetat+laktat+benzoik asit ve glikoz+laktat+benzoik asit ile hazırlanmış sentetik atıksu ile sürekli beslemeli halde MYH reaktöründeki baskın tür sınıfları

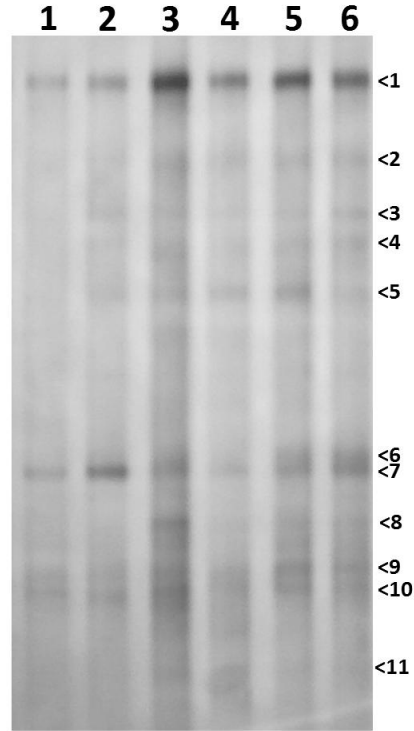
4.7.3 Eysel Atıksu ile Yapılan Çalışmalar

Eysel atıksular ile ilgili yapılan çalışmalarda MYH reaktörlerinde elektrot yüzeyinden ve anot sıvısından alınan numunelere ait bilgiler Tablo 4.3’de verilmiştir.

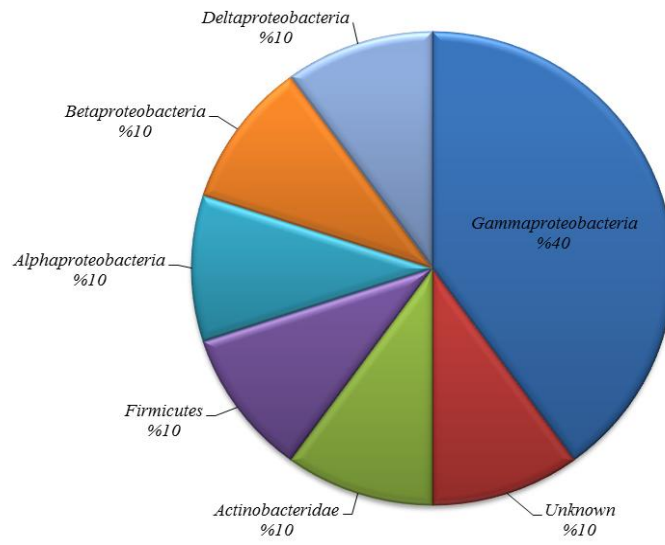
Tablo aynı zamanda DGGE jel görüntüsünün (Şekil 4.191) yatay yöndeki 6 adet kuyu numarasını da içermektedir. DGGE jel görüntüsünde farklı türleri temsil eden dikey yönde numaralandırılmış bantlar ise Tablo 4.8’de verilmiştir. Elde edilen DGGE sonuçlarına göre grafit elektrot yüzeyi ve anot sıvında baskın olan türlerin Al-Ni ve bakır kumaş elektrot yüzeyinden daha az olduğu görülmüştür. *Uncultured Comamonas sp.*, *Uncultured Firmicutes Bacterium* ve *Shewanella Putrefaciens* türü bakterilerin kullanılan her üç elektrotun kullanıldığı MYH reaktörlerinde elektrot yüzeyinde ve anot sıvısında baskın olduğu belirlenmiştir. *Uncultured Firmicutes Bacterium* türü Shimoyama vd., (2009) tarafından yapılan çalışmada nişasta, pepton ve balık ekstraktı arıtımı yapılan kaset tipi MYH’de tespit edilmiştir. *Uncultured Geobacter sp.*, *Pseudomonas Anguilliseptica* ve *Shewanella Putrefaciens* türü bakteriler Al-Ni ve bakır kumaş elektrot yüzeyinde baskın iken grafit elektrot yüzeyinde bu bakterilere rastlanmamıştır. Tespit edilen *Uncultured Geobacter sp.* türü ile aynı soya ait tür Yates vd., (2012) tarafından yapılan çalışmada tespit edilmiştir. *Uncultured Actinotalea sp.* türü bakteri ise yalnızca Al-Ni elektrot yüzeyinde baskın olduğu tespit edilmiştir. Evsel atıksu ile beslenen MYH reaktörlerinde türleri temsil eden mikroorganizma sınıflarının önemli bir yüzdesini *Gammaproteobacteria* (%40) gurubundaki bakterileri sınıfında yer aldığı tespit edilmiştir. Bunun yanında *Deltaproteobacteria*, *Betaproteobacteria*, *Alphaproteobacteria*, *Firmicutes* ve *Actinobacteridae* grubu bakterilerin de (%10) oranında MYH reaktörlerinde mevcut olduğu belirlenmiştir (Şekil 4.192). Evsel atıksu ile beslenen MYH’lerdeki türlere ait filogenetik ağaç Şekil 4.193’de verilmektedir.

Tablo 4.5. Evsel atıksu çalışmalarında DGGE jel görüntüsünde farklı türleri temsil eden dikey yönde numaralandırılmış bantlar

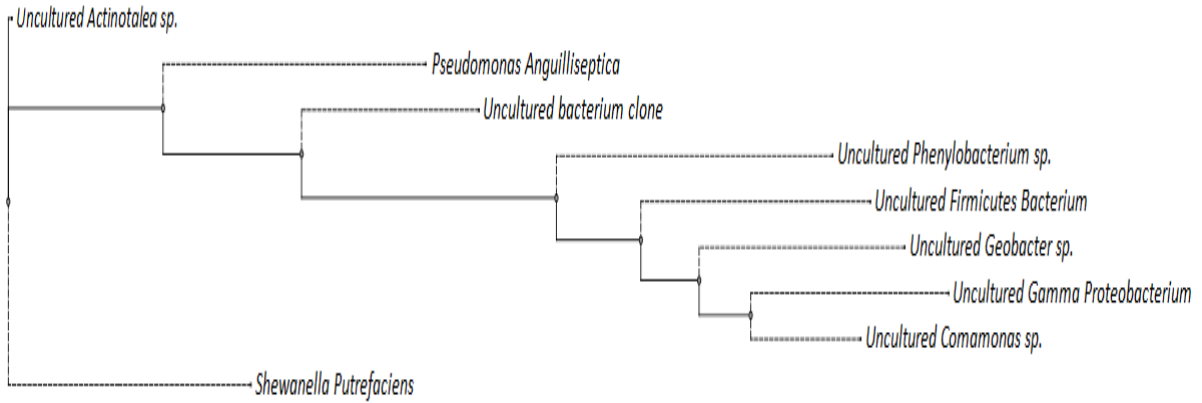
Kuyu No	Elektrot Tipi	Numune
1	Grafit Elektrot	Elektrot Yüzeyi
2	Grafit Elektrot	Reaktör Ortamı
3	Al-Ni Elektrot	Elektrot Yüzeyi
4	Al-Ni Elektrot	Reaktör Ortamı
5	Bakır Kumaş Elektrot	Elektrot Yüzeyi
6	Bakır Kumaş Elektrot	Reaktör Ortamı



Şekil 4.191: Evsel atıksu ile beslenen MYH reaktörlerinde DGGE bantları



Şekil 4.192: Evsel atıksu ile beslenen MYH reaktörlerindeki baskın tür sınıfları



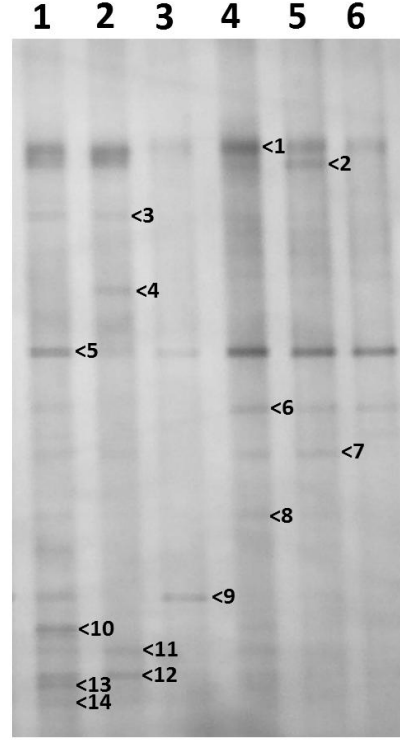
Şekil 4.193: Evsel atıksu ile beslenen MYH reaktörlerinde baskın türlerin filogenetik ağacı

4.7.4 Mezbaha Atıksuları ile Yapılan Çalışmalar

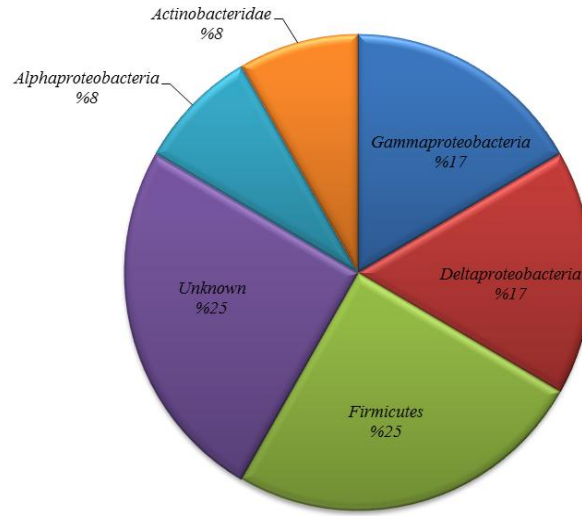
Mezbaha atıksuları ile ilgili yapılan çalışmalarda MYH reaktörlerinde elektrot yüzeyinden ve anot sıvısından alınan numunelere ait bilgiler Tablo 4.6’da verilmiştir. Tablo aynı zamanda DGGE jel görüntüsünün (Şekil 4.194) yatay yöndeki 6 adet kuyu numarasını da içermektedir. DGGE jel görüntüsünde farklı türleri temsil eden dikey yönde numaralandırılmış bantlar ise Tablo 4.8’de verilmiştir. Çalışma sonucunda *Shewanella Putrefaciens*, *Uncultured Geobacter sp.* ve *Uncultured Gamma Proteobacterium*, türlerinin Al-Ni ve bakır kumaş elektrotun yüzeyinde baskın olduğu tespit edilmiştir. *Uncultured Clostridium sp.*, *Actinopolyspora sp.* ve *Uncultured Pseudaminobacter sp.* türlerinin Al-Ni elektrot yüzeyindeki biyofilmden baskın olduğu *Uncultured Geobacter sp.* türünün ise bakır kumaş elektrot yüzeyinde baskın olduğu belirlenmiştir. Tespit edilen *Uncultured Clostridium sp.*, *Actinopolyspora sp.* türleri Yates vd. (2012) ve Kumar vd., (2012) tarafından yapılan çalışmada tespit edildiği rapor edilmiştir. Mezbaha atıksuları ile beslenen MYH reaktörlerinde türleri temsil eden mikroorganizma sınıfları *Firmicutes* (%25), *Gammaproteobacteria* (%17), *Deltaproteobacteria* (%17), *Actinobacteridae* (%8) ve *Alphaproteobacteria* (%8) şeklinde olduğu belirlenmiştir (Şekil 4.195). Mezbaha atıksuyu ile beslenen MYH’lerde tespit edilen türlere ait filogenetik ağaç Şekil 4.196’da verilmektedir.

Tablo 4.6. Mezbaha atıksuyu ile yapılan çalışmada elde edilen DGGE jel görüntüsünde farklı türleri temsil eden dikey yönde numaralandırılmış bantlar

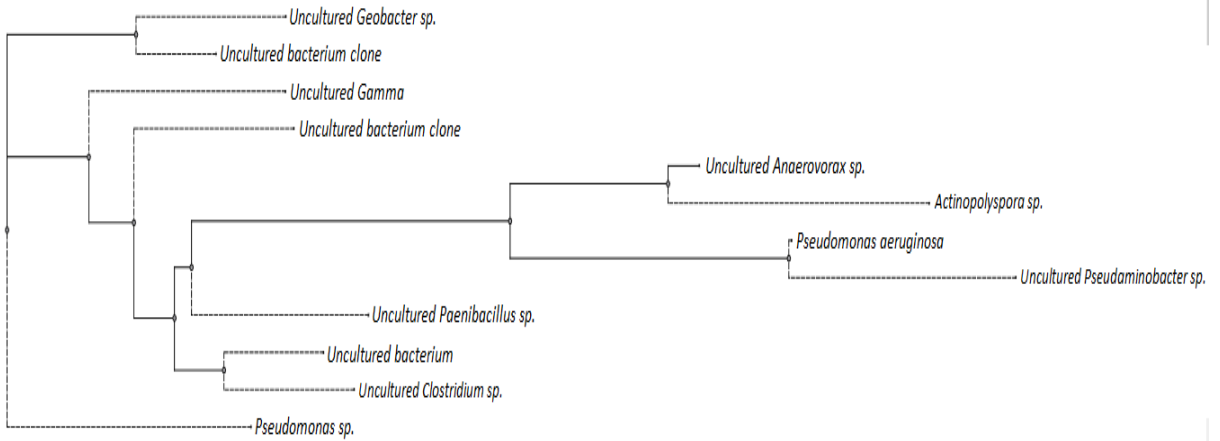
Kuyu No	Elektrot Tipi	Numune
1	Al-Ni	Elektrot Yüzeyi
2	Al-Ni	Reaktör Ortamı
3	Al-Ni	Membran Yüzeyi
4	Bakır Kumaş	Elektrot Yüzeyi
5	Bakır Kumaş	Reaktör Ortamı
6	Bakır Kumaş	Membran Yüzeyi



Şekil 4.194: Mezbaha atıksu ile beslenen MYH reaktörlerinde DGGE bantları



Şekil 4.195: Mezbaha atıksu ile beslenen MYH reaktörlerindeki baskın tür sınıfları



Şekil 4.196: Mezbaha atıksu ile beslenen MYH reaktörlerinde baskın türlerin filogenetik ağacı

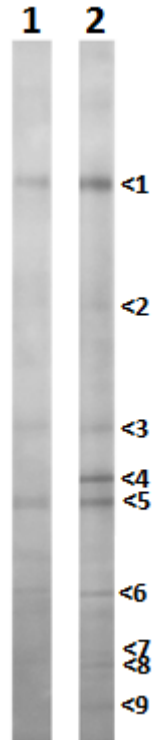
4.7.5 Yağ Endüstrisi Atıksuları ile Yapılan Çalışmalar

Yağ endüstrisi atıksuları ile ilgili yapılan çalışmalarda elektrot yüzeyinden ve anot sıvısından alınan numunelere ait bilgiler Tablo 4.7’de verilmiştir. Tablo aynı zamanda DGGE jel görüntüsünün (Şekil 4.197) yatay yöndeki 2 adet kuyu numarasını da içermektedir. DGGE jel görüntüsünde farklı türleri temsil eden dikey yönde numaralandırılmış bantlar ise Tablo 4.8’de verilmiştir. DGGE sonuçları anaerobik çamur ile aşılana MYH’deki elektrot yüzeyindeki mikrobiyal çeşitliliğin sediment çamuru ile aşılana MYH’de kullanılan elektrot yüzeyinden daha fazla olduğu görülmüştür. Anaerobik çamur ile aşılana MYH reaktöründe elektrot yüzeyindeki mikroorganizma türleri *Uncultured Anaerovorax sp.*, *Shewanella putrefaciens*, *Shewanella sp.* *Uncultured*

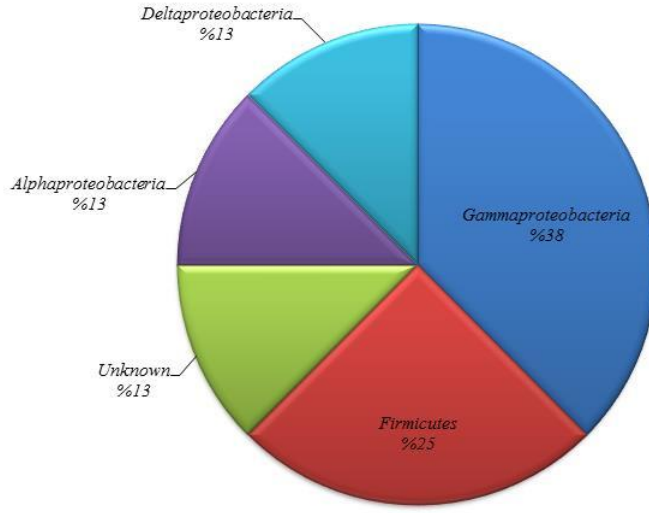
Geobacter sp., *Uncultured Clostridium sp.*, *Uncultured Pseudaminobacter sp.* ve *Uncultured Pseudomonas sp.* şeklinde iken sediment çamuru ile aşılana MYH’de elektrot yüzeyinde *Shewanella* türleri baskındır. Song vd., (2012) yaptıkları çalışmada tek bölmeli bir MYH’yi sediment çamuru ile aşılamışlardır, anot elektrot yüzeyindeki etkin mikroorganizma popülasyonunda *Shewanella* türünün varlığını tespit etmişlerdir. Yağ atıksuları ile beslenen MYH’lerde türleri temsil eden mikroorganizma sınıfları *Gammaproteobacteria* (38%), *Deltaproteobacteria* (13%), *Epsilonproteobacteria* (13%) ve *Alphaproteobacteria* (13%) şeklinde olduğu tespit edilmiştir (Şekil 4.198). Yağ endüstrisi atıksuları ile beslenen MYH’lerde tespit edilen türlere ait filogenetik ağaç Şekil 4.199’da verilmektedir.

Tablo 4.7. Yağ endüstrisi atıksuyu ile yapılan çalışmada elde edilen DGGE jel görüntüsünde farklı türleri temsil eden dikey yönde numaralandırılmış bantlar

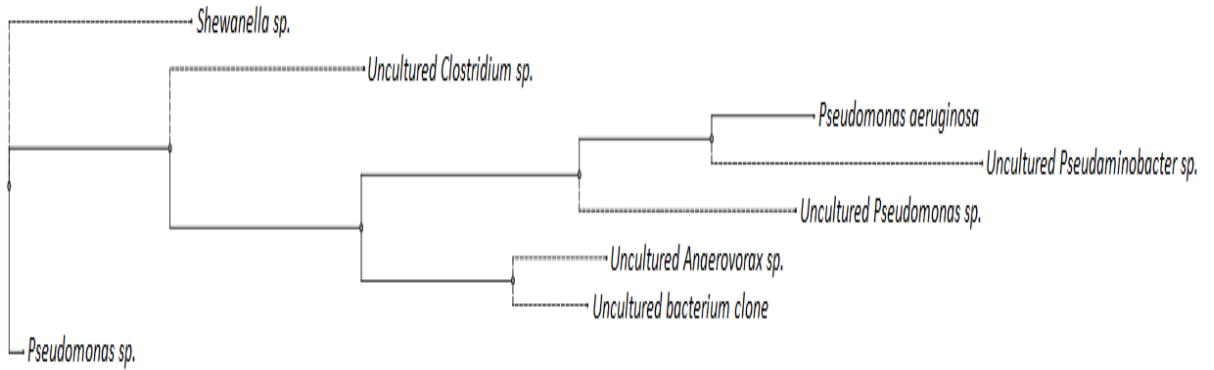
Kuyu No	Substrat	Numune
1	Sediment ile Aşılana Reaktör	Elektrot Yüzeyi
2	Anaerobik Çamur ile Aşılana Reaktör	Elektrot Yüzeyi



Şekil 4.197: Yağ endüstrisi atıksuları ile beslenen MYH reaktörlerinde DGGE bantları



Şekil 4.198: Yağ endüstrisi atıksu ile beslenen MYH reaktörlerindeki baskın tür sınıfları



Şekil 4.199: Yağ endüstrisi atıksu ile beslenen MYH reaktörlerinde baskın türlerin filogenetik ağacı

Gerçek atıksular ile yapılan çalışmalarda evsel atıksular ile besleme yapılan reaktörlerde elektrokimyasal olarak aktif olarak bilinen bakterilerden *Shiwanella* ve *geobacter* türlerinden her ikisi de evsel atıksular ile beslenen MYH’lerde tespit edilirken mezbaha atıksuları ile beslenen MYH’de yalnızca *Geobacter*, yağ endüstrisi ile beslenen MYH’de ise yalnızca *Shiwanella* türü bakterilerin mevcut olduğu görülmüştür. Evsel atıksular ile beslenen MYH’de elde edilen bu sonuca paralel olarak en yüksek güç üretimi elde edilmiştir.

Tablo 4.8. Gerçek atıksuların kullanıldığı reaktörlerden alınan numunelere ait DGGE bantlarından elde edilen mikrobiyal türler

EVSEL ATIKSULAR İLE YAPILAN ÇALIŞMA SONUÇLARI

Bant No	Gen Bankası Erişim No	Tür	Benzerlik	Organizma Sınıfı	Referanslar
1	HM103350	<i>Shewanella Putrefaciens</i>	88	Bacteria; Proteobacteria; Gammaproteobacteria; Alteromonadales; Shewanellaceae; Shewanella	Yan,S., Sellamuthu,B., Huang,H., Zhang,T.C., Tyagi,R.D. and Surampalli,R.Y. Identification of microorganisms in microbial fuel cells inoculated with solid agricultural wastes Unpublished
2	JF817819	<i>Uncultured Geobacter sp.</i>	78	Bacteria; Proteobacteria; Deltaproteobacteria; Desulfuromonadales; Geobacteraceae; Geobacter; environmental samples.	Yates,M.D., Kiely,P.D., Call,D.F., Rismani-Yazdi,H., Bibby,K., Peccia,J., Regan,J.M. and Logan,B.E. Convergent development of anodic bacterial communities in microbial fuel cells ISME J 6 (11), 2002-2013 (2012)
3	HM103328	<i>Pseudomonas Anguilliseptica</i>	92	Bacteria; Proteobacteria; Gammaproteobacteria; Pseudomonadales; Pseudomonadaceae; Pseudomonas.	Yan,S., Sellamuthu,B., Huang,H., Zhang,T.C., Tyagi,R.D. and Surampalli,R.Y. Identification of microorganisms in microbial fuel cells inoculated with solid agricultural wastes Unpublished
4		<i>Tespit edilemedi</i>			
5	HM103350	<i>Shewanella Putrefaciens</i>	89	Bacteria; Proteobacteria; Gammaproteobacteria; Alteromonadales; Shewanellaceae;	Yan,S., Sellamuthu,B., Huang,H., Zhang,T.C., Tyagi,R.D. and Surampalli,R.Y. Identification of microorganisms in

					Shewanella.	microbial fuel cells inoculated with solid agricultural wastes Unpublished
6	JN791028	<i>Uncultured Proteobacterium</i>	<i>Gamma</i>	91	Bacteria; Proteobacteria; Gammaproteobacteria; environmental samples.	Mann,E., Han,A., Roe,K., Barbeau,K. and Haygood,M. Trichodesmium colonies harbor a specific and unique lineage of Alphaproteobacteria Unpublished
7	GU202944	<i>Uncultured Comamonas sp.</i>			Bacteria; Proteobacteria; Betaproteobacteria; Burkholderiales; Comamonadaceae; Comamonas; environmental samples.	Zhang,L. Effect of pH on anode microbes in MFC Unpublished
8	JF731658	<i>Uncultured Phenylobacterium sp.</i>		89	Bacteria; Proteobacteria; Alphaproteobacteria; Caulobacterales; Caulobacteraceae; Phenylobacterium; environmental samples.	Timmers,R.A., Rothballer,M., Strik,D.P.B.T.B., Engel,M., Schulz,S.,Schloter,M., Hartmann,A., Hamelers,B. and Buisman,C. Microbial community structure elucidates performance of Glyceria maxima plant microbial fuel cell Unpublished
9	AB478902	<i>Uncultured Firmicutes Bacterium</i>		92	Bacteria; Firmicutes; environmental samples.	Shimoyama,T., Yamazawa,A., Ueno,Y. and Watanabe,K. Phylogenetic analyses of bacterial communities developed in a cassette-electrode microbial fuel cell Microbes Environ. 24 (2), 188-192 (2009)

10	GU562571	<i>Uncultured bacterium clone</i>	86	Bacteria; environmental samples.	Song,T.S., Cai,H.Y., Yan,Z.S., Zhao,Z.W. and Jiang,H.L. Various voltage productions by microbial fuel cells with sedimentary inocula taken from different sites in one freshwater lake Bioresour. Technol. 108, 68-75 (2012)
11	JF731723	<i>Uncultured Actinotalea sp.</i>	81	Bacteria; Actinobacteria; Actinobacteridae; Actinomycetales; Micrococcineae; Cellulomonadaceae; Actinotalea; environmental samples.	Timmers,R.A., Rothballer,M., Strik,D.P.B.T.B., Engel,M., Schulz,S., Schlöter,M., Hartmann,A., Hamelers,B. and Buisman,C. Microbial community structure elucidates performance of Glyceria maxima plant microbial fuel cell Unpublished

MEZBAHA ATIKSUYU İLE YAPILAN ÇALIŞMA

Bant No	Gen Bankası Erişim No	Tür	Benzerlik	Organizma Sınıfı	Referanslar
1	EF540467	<i>Pseudomonas sp.</i>	92	Bacteria; Proteobacteria; Gammaproteobacteria; Pseudomonadales; Pseudomonadaceae; Pseudomonas.	Vedler,E., Jutkina,J. and Kasper,L. Impact of phytoremediation on the community structure of semi-coke, the solid waste from oil-shale chemical industry Unpublished
2	JF817659	<i>Uncultured Geobacter sp.</i>	94	Bacteria; Proteobacteria; Deltaproteobacteria; Desulfuromonadales; Geobacteraceae; Geobacter; environmental samples.	Yates,M.D., Kiely,P.D., Call,D.F., Rismani-Yazdi,H., Bibby,K., Peccia,J., Regan,J.M. and Logan,B.E. Convergent development of anodic bacterial communities in microbial fuel cells ISME J 6 (11), 2002-2013 (2012)

3	JF731433	<i>Uncultured bacterium clone</i>	82	Bacteria; environmental samples.	Timmers,R.A., Rothballer,M., Strik,D.P.B.T.B., Engel,M., Schulz,S., Schlöter,M., Hartmann,A., Hamelers,B. and Buisman,C. Microbial community structure elucidates performance of <i>Glyceria maxima</i> plant microbial fuel cell Unpublished
4	JF818107	<i>Uncultured Anaerovorax sp.</i>	90	Bacteria; Firmicutes; Clostridia; Clostridiales; Clostridiales Family XIII. Incertae Sedis; Anaerovorax; environmental samples.	Yates,M.D., Kiely,P.D., Call,D.F., Rismani-Yazdi,H., Bibby,K., Peccia,J., Regan,J.M. and Logan,B.E. Convergent development of anodic bacterial communities in microbial fuel cells ISME J 6 (11), 2002-2013 (2012)
5	JN967064	<i>Uncultured bacterium clone</i>	94	Bacteria; environmental samples.	Liu,L. Anodic and cathodic biofilms in single-chamber microbial fuel cell (MFC) cultivated under different temperatures Unpublished
6		<i>Tespit edilemedi</i>			
7		<i>Tespit edilemedi</i>			
8	FJ948174	<i>Pseudomonas aeruginosa</i>	100	Bacteria; Proteobacteria; Gammaproteobacteria; Pseudomonadales; Pseudomonadaceae; Pseudomonas.	Xia,W.J., Luo,Z.B., Dong,H.P., Yu,L., Cui,Q.F. and Bi,Y.Q. Synthesis, Characterization, and Oil Recovery Application of Biosurfactant Produced by Indigenous <i>Pseudomonas aeruginosa</i> WJ-1 Using Waste Vegetable Oils Appl. Biochem. Biotechnol. (2011)

9	AY935675	<i>Uncultured Paenibacillus sp.</i>		97	Bacteria; Firmicutes; Bacilli; Bacillales; Paenibacillaceae; Paenibacillus; environmental samples.	Gonzalez,J.M., Portillo,M.C., Rincon,B., Raposo,F., Borja,R. and Saiz-Jimenez,C. Performance and microbial communities of a continuous stirred tank anaerobic reactor treating two-phases olive mill solid wastes at low organic loading rates Unpublished
10	EF619958	<i>Uncultured Proteobacterium</i>	<i>Gamma</i>	94	Bacteria; Proteobacteria; Gammaproteobacteria; environmental samples.	Morris,J.M., Jin,S., Crimi,B. and Pruden,A. Enhanced anaerobic biodegradation of diesel in a microbial fuel Cell Unpublished
11	JF309188	<i>Uncultured bacterium</i>		92	Bacteria; environmental samples.	Jong,B.C., Liew,P.W.Y., Juri,M.L., Kim,B.H., Mohd Dzomir,A.Z., Leo,K.W. and Awang,M.R. Performance and microbial diversity of palm oil mill effluent microbial fuel cell
12	JF818079	<i>Uncultured Clostridium sp.</i>		96	Bacteria; Firmicutes; Clostridia; Clostridiales; Clostridiaceae; Clostridium; environmental samples.	Yates,M.D., Kiely,P.D., Call,D.F., Rismani-Yazdi,H., Bibby,K., Peccia,J., Regan,J.M. and Logan,B.E. Convergent development of anodic bacterial communities in microbial fuel cells ISME J 6 (11), 2002-2013 (2012)
13	JX105432	<i>Actinopolyspora sp.</i>		85	Bacteria; Actinobacteria; Actinobacteridae; Actinomycetales;	Shiv,K. and Gireesh Babu,K. A study on bioelectricity generation from the sea sediments using

14	JF522356	<i>Uncultured Pseudaminobacter sp.</i>	89	Actinopolysporineae; Actinopolysporaceae; Actinopolyspora. Bacteria; Proteobacteria; Alphaproteobacteria; Rhizobiales; Phyllobacteriaceae; Pseudaminobacter; environmental samples.	microbial fuel cell Int J Curr Res Rev (2012) In press Kumru,M MFC clone library partial 16S rRNA sequence Unpublished
----	----------	--	----	---	---

YAĞ ATIKSULARI İLE YAPILAN ÇALIŞMALAR

Bant No	Gen Bankası Erişim No	Tür	Benzerlik	Organizma Sınıfı	Referanslar
1	EF540467	<i>Pseudomonas sp.</i>	92	Bacteria; Proteobacteria; Gammaproteobacteria; Pseudomonadales; Pseudomonadaceae; Pseudomonas.	Vedler,E., Jutkina,J. and Kasper,L. Impact of phytoremediation on the community structure of semi-coke, the solid waste from oil-shale chemical industry Unpublished
2	JF818107	<i>Uncultured Anaerovorax sp.</i>	90	Bacteria;Firmicutes; Clostridia;Clostridiales; Clostridiales Family XIII. Incertae Sedis;Anaerovorax; environmental samples.	Yates,M.D., Kiely,P.D., Call,D.F., Rismani-Yazdi,H., Bibby,K., Peccia,J., Regan,J.M. and Logan,B.E. Convergent development of anodic bacterial communities in microbial fuel cells ISME J 6 (11), 2002-2013 (2012)
3		<i>Tespit edilemedi</i>			
4	FJ948174	<i>Pseudomonas aeruginosa</i>	100	Bacteria; Proteobacteria; Gammaproteobacteria; Pseudomonadales; Pseudomonadaceae;	Xia,W.J., Luo,Z.B., Dong,H.P., Yu,L., Cui,Q.F. and Bi,Y.Q. Synthesis, Characterization, and Oil Recovery Application of

				Pseudomonas	Biosurfactant Produced by Indigenous Pseudomonas aeruginosa WJ-1 Using Waste Vegetable Oils Appl. Biochem. Biotechnol. (2011)
5	HM589853	<i>Shewanella sp.</i>	89	Bacteria; Proteobacteria; Gammaproteobacteria; Alteromonadales; Shewanellaceae; Shewanella.	Kan,J., Hsu,L., Cheung,A.C., Pirbazari,M. and Nealson,K.H. Current production by bacterial communities in microbial fuel cells enriched from wastewater sludge with different electron donors Environ. Sci. Technol. 45 (3), 1139-1146 (2011)
6	FN563276	<i>Uncultured bacterium clone</i>	92	Bacteria; environmental samples.	Krakat,N., Schmidt,S. and Scherer,P. Potential impact of process parameters upon the bacterial diversity in the mesophilic anaerobic digestion of beet silage Bioresour. Technol. 102 (10), 5692-5701 (2011)
7	JF818079	<i>Uncultured Clostridium sp.</i>	96	Bacteria; Firmicutes; Clostridia; Clostridiales; Clostridiaceae; Clostridium; environmental samples.	Yates,M.D., Kiely,P.D., Call,D.F., Rismani-Yazdi,H., Bibby,K., Peccia,J., Regan,J.M. and Logan,B.E. Convergent development of anodic bacterial communities in microbial fuel cells ISME J 6 (11), 2002-2013 (2012)

8	JF522356	<i>Uncultured Pseudaminobacter sp.</i>	89	Bacteria; Proteobacteria; Alphaproteobacteria; Rhizobiales; Phyllobacteriaceae; Pseudaminobacter; environmental samples.	Kumru,M. MFC clone library partial 16S rRNA sequence Unpublished
9	JF818002	<i>Uncultured Pseudomonas sp.</i>	90	Bacteria; Proteobacteria; Gammaproteobacteria; Pseudomonadales; Pseudomonadaceae; Pseudomonas; environmental samples.	Yates,M.D., Kiely,P.D., Call,D.F., Rismani-Yazdi,H., Bibby,K., Peccia,J., Regan,J.M. and Logan,B.E. Convergent development of anodic bacterial communities in microbial fuel cells ISME J 6 (11), 2002-2013 (2012)

4.8 Biyoelektrokimyasal Modelleme

Çalışmada kullanılan farklı atıksular için elde edilen verilerle Nerst-Monod eşitliği kullanılarak biyo-elektrokimyasal kinetik model uygulanmıştır.

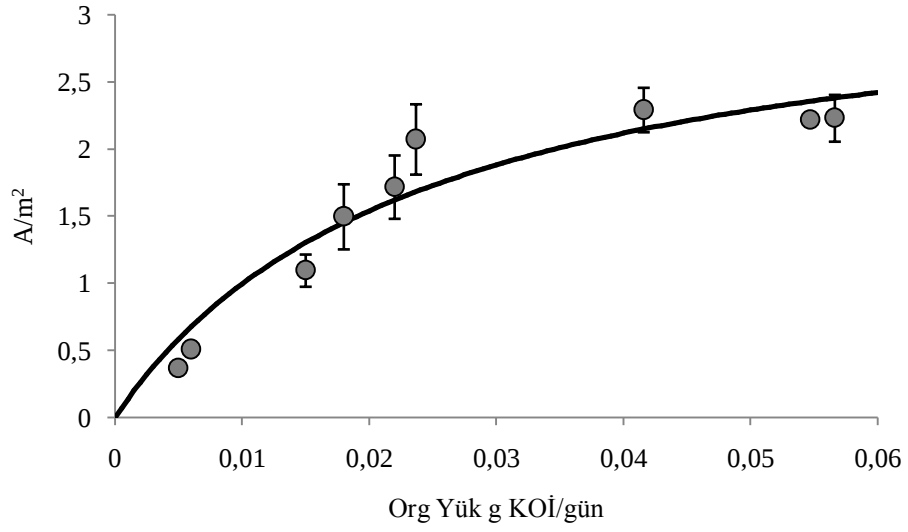
4.8.1 Kinetik Modelleme Sonuçları

Kinetik modelleme için evsel atıksular, mezbaha atıksuları ve yağ endüstrisi atıksuları ile yapılan çalışmalarda bakır kumaş elektrotun kullanıldığı MYH'ler için uygulanmıştır. Yapılan çalışmada MYH sistemine verilen organik yükün zamana bağlı olarak arttırıldığı ve artan organik madde miktarına karşılık üretilen akım verileri kullanılmıştır.

$$J = J_{\max} \frac{S}{K_s + S} \frac{1}{1 + \exp\left[-\eta \frac{F}{RT}\right]}$$

Faraday sabiti, $F = 96.485$; İdeal gaz sabiti, $R = 8,3145$; Sıcaklık, $T = 298$ % 95 güven aralığında doğrusal olmayan denlem 3.2 de verilen biyoelektrokimyasal kinetik denklem MATLAB programı ile çözülerek Tablo 4.9, Tablo 4.10 ve Tablo 4.11'de verilen kinetik katsayılar elde edilmiştir.

Evsel atıksuların kullanıldığı çalışmada MYH'de organik yük miktarına karşı akım yoğunluğu için elde edilen eğri ve elde edilen kinetik katsayılar Şekil 4.200 ve Tablo 4.9'da verilmiştir.

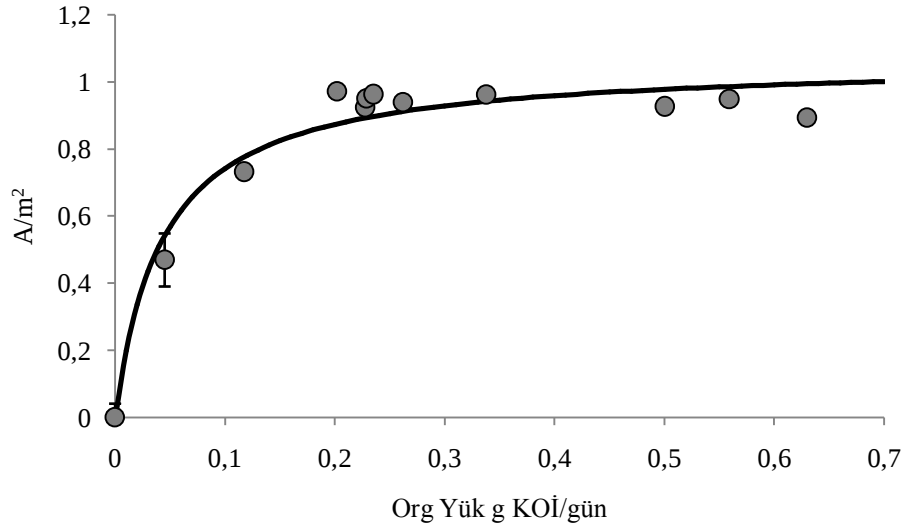


Şekil 4.200: Evsel atıksu çalışmasında bakır kumaş elektrotta MYH’de organik yük miktarına karşı akım yoğunluğu için elde edilen eğri

Tablo 4.9. Evsel atıksu çalışmasında kullanılan MYH için elde edilen kinetik katsayılar

Katsayı	Birim	Değer
K_S	g KOİ/gün	0.02413
J_{max}	A/m ²	3.396
n	V	0.275

Yağ endüstrisi atıksuyu ile besleme yapılan MYH’de elde edilen veriler kullanılarak organik yük miktarına karşı akım yoğunluğu için elde edilen eğri ile kinetik modelleme yapılarak Şekil 4.201 ve Tablo 4.6’da verilmiştir.

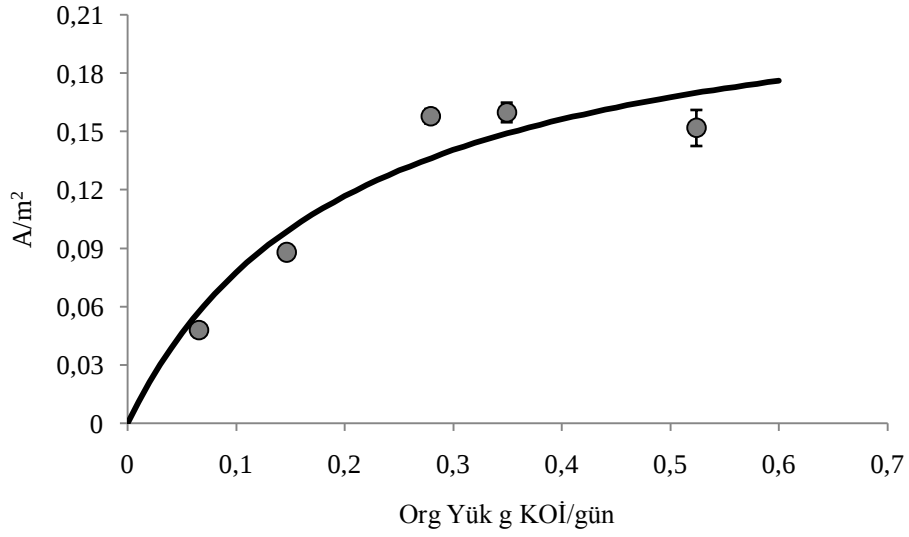


Şekil 4.201: Yağ endüstrisi atıksuları çalışmasında sediment aşısının kullanıldığı MYH'de organik yük miktarına karşı akım yoğunluğu için elde edilen eğri

Tablo 4.10. Yağ endüstrisi atıksularında kullanılan MYH için elde edilen kinetik katsayılar

Katsayı	Birim	Değer
K_S	g KOİ/gün	0.04332
J_{max}	A/m ²	1.063
n	V	0.275

Mezbaha atıksuyu ile beslemem yapılan MYH'de elde edilen veriler kullanılarak organik yük miktarına karşı akım yoğunluğu için elde edilen eğri ile kinetik modelleme yapılarak Şekil 4.202 ve Tablo 4.7'de verilmiştir.



Şekil 4.202: Mezhiba atıksularının kullanıldığı MYH’de Al-Ni elektrotun kullanıldığı MYH’de organik yük miktarına karşı akım yoğunluğu için elde edilen eğri

Tablo 4.11. Mezhiba endüstrisi atıksularında kullanılan MYH için elde edilen kinetik katsayılar

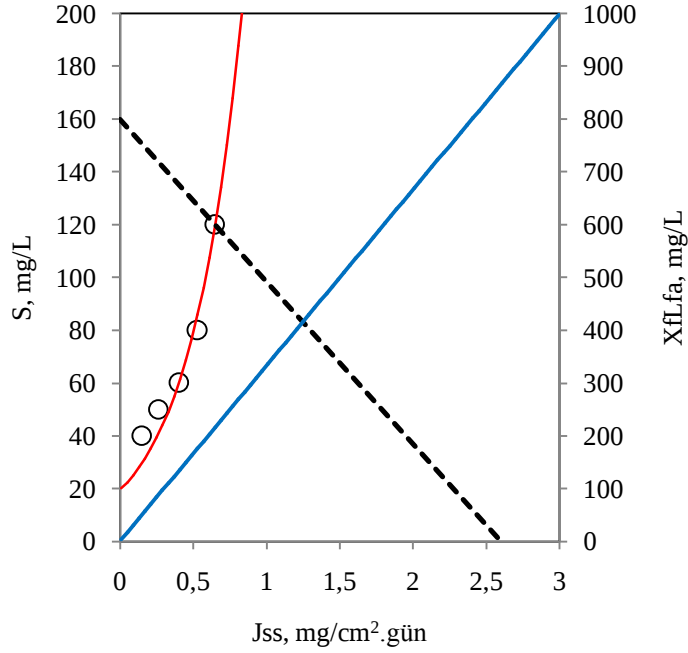
Katsayı	Birim	Değer
K_s	g KOİ/gün	0,2046
J_{max}	A/m ²	0,2362
n	V	0,2

4.9 Biyofilm Kinetiği

Yapılan tez çalışmasında MYH’ye gerçek atıksu ile yapılan beslemeler için biyofilm kinetiği araştırılmıştır. MYH reaktörüne verilen substrat konsantrasyonuna bağlı olarak kararlı halde bulunan biyofilm için kütle dengesi modeli uygulanmıştır (Rittmann ve McCarty, 2001). Evsel atıksuların kullanıldığı çalışmada elde edilen biyofilm modeli Şekil 4.203’de gösterilmiştir. Yapılan çalışmada değişen substrat konsantrasyonları için (S) elektrot yüzeyindeki biyofilmde meydana gelen substrat akısı (J_{ss}) modeli ve birim elektrot yüzeyindeki aktif biyokütle yoğunluğu ($X_f L_f a$) modeli oluşturulmuştur.

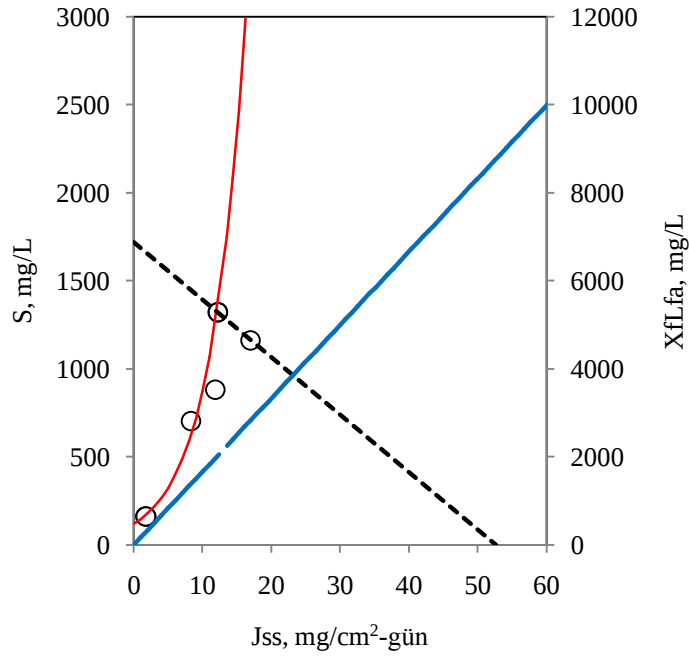
Evsel atıksuların kullanıldığı çalışmada değişen reaktör çıkışı substrat konsantrasyonları ile biyofilm içerisindeki substrat akısı değerleri arasındaki ilişki görülmektedir. Ayrıca değişen substrat akısı değerleri için elektrot yüzeyindeki aktif biyokütle modeli verilmiştir. Elde edilen değerlere göre reaktör çıkışındaki substrat

konsantrasyonu ile biyofilm içerisindeki substrat akısı değerleri arasındaki ilişki modellenmiştir. Modelleme sonucuna göre reaktör çıkışındaki minimum substrat konsantrasyonu 20 mg/L olarak elde edilmiştir. Sisteme verilen maksimum ve minimum substrat konsantrasyonuna bağlı olarak biyofilm içerisindeki substrat akısı değerleri $J_{ss(max)}=0,65$ ve $J_{ss(min)}=0,15$ olarak elde edilmiştir. Maksimum substrat akısı (J_{ss}) değeri için $X_{fL,a}= 216,4$ mg/L olduğu belirlenmiştir.



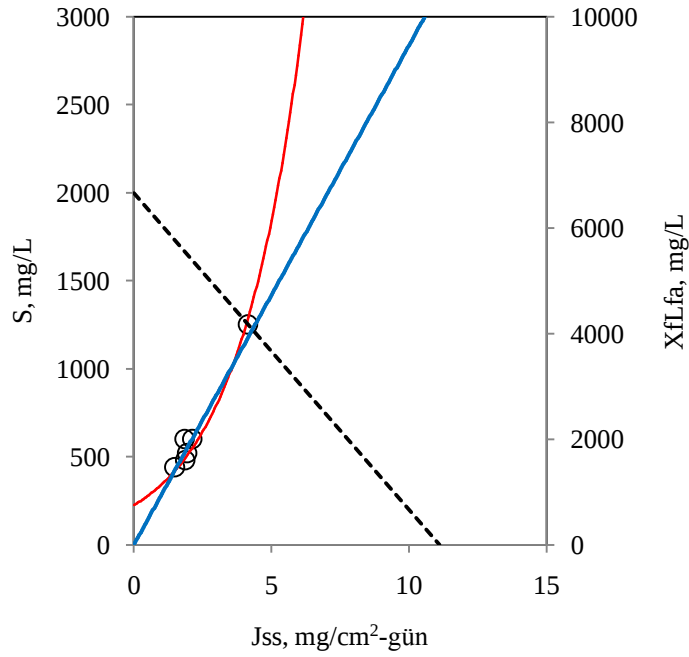
Şekil 4.203: Evsel atıksuyun substrat olarak kullanıldığı çalışmada MYH’de deneysel veriler kullanılarak elde edilen kararlı haldeki biyofilm modeli

Mezbaha atıksuları ile yapılan çalışmada biyofilm modeli Şekil 4.204’de gösterilmiştir. Şekilde değişen reaktör çıkışı substrat konsantrasyonları ile biyofilm içerisindeki substrat akısı değerleri arasındaki ilişki görülmektedir. Ayrıca değişen substrat akısı değerleri için elektrot yüzeyindeki aktif biyokütle modeli görülmektedir. Elde edilen değerlere göre reaktör çıkışındaki substrat konsantrasyonu ile biyofilm içerisindeki substrat akısı değerleri arasındaki ilişki modellenmiştir. Reaktör çıkışındaki minimum substrat konsantrasyonu 120,7 mg/L olarak elde edilmiştir. Sisteme verilen maksimum ve minimum substrat konsantrasyonuna bağlı olarak biyofilm içerisindeki substrat akısı değerleri $J_{ss(max)}=12,24$ ve $J_{ss(min)}=1,76$ olarak elde edilmiştir. Maksimum substrat akısı (J_{ss}) değeri için $X_{fL,a}= 2828$ mg/L olduğu belirlenmiştir.



Şekil 4.204: Mezabaha atıksuyun substrat olarak kullanıldığı çalışmada MYH'de Al-Ni alaşımı elektrotun kullanıldığı çalışmada deneysel verilen kullanılarak elde edilen kararlı haldeki biyofilm modeli

Yağ endüstrisi atıksuları ile yapılan çalışmada biyofilm modeli Şekil 4.205'de gösterilmiştir. Şekilde değişen reaktör çıkışı substrat konsantrasyonları ile biyofilm içerisindeki substrat akısı değerleri arasındaki ilişki görülmektedir. Ayrıca değişen substrat akısı değerleri için elektrot yüzeyindeki aktif biyokütle modeli görülmektedir. Elde edilen değerlere göre reaktör çıkışındaki substrat konsantrasyonu ile biyofilm içerisindeki substrat akısı değerleri arasındaki ilişki modellenmiştir. Reaktör çıkışındaki minimum substrat konsantrasyonu 224,4 mg/L olarak elde edilmiştir. Sisteme verilen maksimum ve minimum substrat konsantrasyonuna bağlı olarak biyofilm içerisindeki substrat akısı değerleri $J_{ss(max)}=4,15$ ve $J_{ss(min)}=1,87$ olarak elde edilmiştir. Maksimum substrat akısı (J_{ss}) değeri için $X_{fLfa}=3943$ mg/L olduğu belirlenmiştir.



Şekil 4.205: Yağ atıksuyun substrat olarak kullanıldığı çalışmada MYH’de anaerobik çamur aşısının kullanıldığı çalışmada deneysel verileri kullanılarak elde edilen kararlı haldeki biyofilm modeli

Elde edilen değerlerden S_{min} değerinin üzerindeki S değerlerinde biyofilm içerisindeki substrat akısının hızlı bir şekilde arttığı, artan S değerleri için substrat akısı artış hızı azalmaya başlamaktadır. Substrat akısının azalmaya başlaması artan substrat miktarı ile biyofilm kalınlığı artmaya başlamış ve buna bağlı olarak substrat akısı düşmeye başlamıştır. Artan biyofilm kalınlığı ile birlikte substrat akısı azalmaya başlayacak ve elektrot yüzeyindeki mikroorganizmalara substrat ulaşamayacağından deep biyofilm oluşmaya başlayacaktır. Şekillerde artan substrat konsantrasyonuna bağlı olarak birim elektrot yüzey alanındaki aktif biyokütle yoğunluğu modellenmiştir. Elde edilen modele göre teorik şartlarda artan substrat konsantrasyonuna bağlı olarak elektrot yüzeyindeki aktif biyokütle miktarının lineer bir şekilde (mavi kesikli çizgi) artacağı görülmektedir. Fakat biyofilm kalınlığının artışı ile substrat difüzyonu sınırlanacağından dolayı biyokütle konsantrasyonu belirli bir değerden sonra sabitlenmeye başlayıp substrat miktarının artışından etkilenmemektedir. Bu olay deep biyofilm oluşumu ile sonuçlanmaktadır. Yapılan çalışmada mezbaha ve yağ endüstrisi atıksularının kullanıldığı MYH’lerde elektrot yüzeyindeki aktif biyokütle miktarının fazla olduğu görülmüştür. Aktif biyokütle miktarının fazla oluşu kalın bir biyofilm tabakasının göstergesidir. Biyofilm kalınlığının artışı ile elektrik üretiminin daha düşük olacağı literatürde belirtilmiştir. Elde edilen

sonuçlar da yağ endüstrisi ve mezbaha atıksuları ile yapılan çalışmada evsel atıksular ile yapılan çalışmaya kıyasla daha düşük miktarda elektrik üretimi söz konusudur. Düşük elektrik üretiminin sebebi olarak daha kalın biyofilm oluşumu ve üretilen elektronların elektrot yüzeyine aktarılmasının daha güç olmasından kaynaklandığı düşünölebilir.

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

“Mikrobiyal Yakıt Hücrelerinde Farklı Kirleticilere Göre Elektrik Üretim Kapasitesi ve Mikrobiyal Tür Değişiminin İncelenmesi” başlıklı bu tez çalışmasında mikrobiyal yakıt hücreleri farklı organik madde içeriğine sahip sentetik atıksular, farklı tesislerden alınmış gerçek atıksular, farklı elektrot malzemeleri ve farklı mediyatörler kullanılarak işletilmiş ve elektrik üretim potansiyelleri araştırılmıştır. Daha sonra PCR-DGGE tekniği kullanılarak her bir aşamada elektrik üretimindeki etkin mikrobiyal türler belirlenmiş, son olarak da mikrobiyal kinetikler incelenerek çalışma tamamlanmıştır. Tez çalışması süresince elde edilen sonuçlar aşağıda sıralanmıştır.

MYH sistemine ilk olarak 5, 10 ve 25 mM konsantrasyonda glikoz+laktat+benzoik asit karışımı sentetik atıksular ile kesikli şekilde beslemeler yapılmış ve elde edilen güç yoğunlukları değerleri sırası ile 11, 16,5 ve 51 mA/m² olarak elde edilmiştir. İkinci seride sentetik atıksu karışım oranları değiştirilerek aynı çalışma tekrarlanmış ve elde edilen güç yoğunluğu değerleri 5, 10 ve 25 mM substrat konsantrasyonları için sırasıyla 14, 18,5 ve 14,6 mW/m² olarak elde edilmiştir.

MYH sistemine toplam konsantrasyonu 50 mM olacak şekilde glikoz+laktat+benzoik asit ve asetat+laktat+benzoik asit karışımlarının sürekli şekilde yapılan beslemelerde hidrolik bekletme süresinin düşürülmesiyle MYH’lerde üretilen voltaj değerinin arttığı görülmüştür. MYH’lerde üretilen maksimum akım yoğunluğu değeri 4,8 g/gün organik yükleme değerinde glikoz içeren karışım için 57,1 mA/m², asetat içeren karışım için 2,94 g/gün organik yük değerinde 62,4 mA/m² olarak elde edilmiştir.

MYH sistemide metilen mavisi kullanılarak güç üretimi artışı çalışmalarında bakır kumaş elektrotun kullanıldığı MYH’de 300 µM mediyatör ilavesi ile mediyatörsüz işleme göre 5,7 kat, Ti-TiO₂ elektrotun kullanıldığı MYH’de 300 µM mediyatör ilavesi ile 2 kat grafit elektrotun kullanıldığı MYH’de 300 µM mediyatör ilavesi ile 7,5 kat güç artışı gerçekleşmiştir. Metilen mavisi mediyatörü ile MYH’de güç artışı için her üç elektrot için de optimum konsantrasyonun 300 µM olduğu tespit edilmiştir.

Nötral kırmızısı mediyatörü ile yapılan çalışmalarda bakır kumaş elektrotun kullanıldığı MYH’de 200 µM mediyatör ilavesi ile mediyatörsüz işleme göre 2,9 kat, Ti-TiO₂ elektrotun kullanıldığı MYH’de 200 µM mediyatör ilavesi ile 2,2 kat ve grafit

elektrotun kullanıldığı MYH’de 200 μ M mediyatör ilavesi ile 12 kat güç artışı olmuştur. Nötral kırmızısı mediyatörü ile güç arttırımı için optimum konsantrasyonun her üç elektrot için de 200 μ M olduğu belirlenmiştir.

HNQ mediyatörünün kullanıldığı çalışmalarda bakır kumaş elektrotun kullanıldığı MYH’de 50 μ M mediyatör ilavesi ile 1,4 kat, Ti-TiO₂ elektrotun kullanıldığı MYH’de 50 μ M mediyatör ilavesi ile 2 kat ve grafit elektrotun kullanıldığı MYH’de 200 μ M mediyatör ilavesi ile 4 kat güç artışı olduğu tespit edilmiştir. Bakır kumaş ve Ti-TiO₂ elektrot için optimum mediyatör konsantrasyonunun 50 μ M grafit elektrot için optimum konsantrasyonun ise 200 μ M olduğu tespit edilmiştir.

Her bir mediyatörün farklı konsantrasyonlarda maksimum güç artışı sağladığı belirlenmiştir. Bunun sebebinin farklı mediyatörlerin elektrot yüzeyine adsorbe olma eğilimlerinin farklı olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Ayrıca yapılan çalışmalarda en yüksek güç artışı grafit elektrotun kullanıldığı MYH’de gerçekleşmiştir. Nötral kırmızı mediyatörü kullanılara 12 güç artışı elde edilmiştir. Bu durum nötral kırmızı mediyatörünün grafit elektrot yüzeyine adsorbe olma kapasitesinin bakır kumaş ve Ti-TiO₂ elektrota kıyasla daha az olduğunu kanıtlamaktadır. Bakır kumaş elektrot için en yüksek güç artışı metilen mavisi, Ti-TiO₂ elektrot için ise en yüksek güç artışı nötral kırmızı mediyatörü ilavesi ile elde edilmiştir.

Gerçek atıksular ile yapılan çalışmalarda MYH sistemine verilen organik madde miktarının artışı ile sistemde üretilen güç miktarının arttığı, belirli bir organik yükleme değerinden sonra üretilen güç miktarında azalma meydana geldiği görülmüştür. Bu durumun sisteme giren organik madde miktarının elektrot yüzeyinde bulunan mikroorganizmalar için şok yükleme etkisi yapmaya başladığının göstergesi olduğu düşünülmektedir.

Gerçek atıksular ile yapılan çalışmalarda MYH sisteminde üretilen güç miktarının sistemde giderilen organik madde miktarı ile ilişkili olduğu, sistemde giderilen organik madde miktarının artışı ile üretilen güç miktarının arttığı görülmüştür.

MYH’de elektrik üretim çalışmalarında MYH iç direnci ile üretilen güç miktarının doğrudan ilişkili olduğu ve iç dirençte meydana gelen azalma ile sistemde üretilen güç miktarının arttığı görülmüştür.

Evsel atıksular ile yapılan çalışmalarda bakır kumaş elektrotun kullanıldığı MYH için optimum organik yükleme değerinin 55 mg KOİ/gün olduğu ve bu devrede sistemde üretilen maksimum güç yoğunluğu değerinin 271 mW/m² olduğu tespit edilmiştir. Al-Ni

elektrotun kullanıldığı MYH’de optimum organik yükleme değerinin 50 mg KOİ/gün olduğu ve bu devrede sistemde üretilen maksimum güç yoğunluğu değerinin 124 mW/m² olduğu görülmüştür. Aynı çalışmada grafit elektrotun kullanıldığı MYH’de optimum organik yükleme değerinin 60 mg KOİ/gün olduğu ve bu organik yükleme değerinde sistemde üretilen maksimum güç yoğunluğu değerinin ise 87 mW/m² olduğu tespit edilmiştir.

Evsel atıksular ile yapılan çalışmada en düşük iç direnç değeri bakır kumaş elektrotun kullanıldığı MYH’de organik yükleme değerinin 55 mg KOİ/gün olduğu süreçte 408 Ω olarak elde edilmiştir. Al-Ni alaşımı elektrot ve grafit elektrot için ise elde edilen en düşük iç direnç değerleri sırası ile 709 ve 477 Ω olduğu belirlenmiştir.

Yağ atıksuyu ile yapılan çalışma anaerobik çamur ile aşılana MYH’de sisteme verilen organik madde miktarının 227 mg KOİ/gün olduğu süreçte MYH’de üretilen maksimum güç yoğunluğu miktarı 159 mW/m² olmuştur. Sediment ile aşılana MYH’de sisteme verilen organik madde miktarının 227 mg KOİ/gün olduğu süreçte MYH’de üretilen maksimum güç miktarı 59 mW/m² olmuştur.

Mezbaha atıksuları ile yapılan çalışmada Al-Ni elektrotun kullanıldığı MYH’de üretilen maksimum güç yoğunluğu değerinin 13,7 mW/m² olduğu tespit edilmiştir. Bu süreçte MYH iç direncinin 8642 Ω olduğu belirlenmiştir. Bakır kumaş elektrotun kullanıldığı MYH’de üretilen maksimum güç yoğunluğu değerinin 81 mW/m² olduğu görülmüştür. Mezbaha atıksularının kullanılan sistemde Al-Ni elektrotun kullanıldığı MYH’de elektrik üretim kapasitesinin düşük olduğu belirlenmiştir.

Yapılan çalışmada bakır kumaş elektrot ile üretilen güç miktarı grafit, Ti-O₂ ve Al-Ni alaşımı elektrot ile kıyaslandığında daha yüksek miktarda gerçekleşmiştir. Bu elektrot ile daha fazla güç üretilmesinin nedeni bakırın kumaş elektrotun yüzeyinde mikroorganizma tutunmasının ve elektrik iletkenliğinin Al-Ni elektrota göre daha iyi olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Kullanılan elektrotun bakır teller ile örgülü yapıda olması nedeni ile mikroorganizma tutunmasının ve biyofilm oluşumunun iyi bir şekilde gerçekleşmesidir. Bu durum SEM görüntüleri ile desteklenmiştir.

Farklı proton değişim membranlarının kullanıldığı çalışmada 30 günlük işletme sürecinde MYH’lerdeki maksimum güç üretimi 9. işletme gününde gerçekleşmiştir. Elde edilen maksimum güç yoğunluğu değerleri Fumapem F-1050 marka membran ile 188 mW/m², Nafion 117 marka membran ile 63,7 ve Ultrex CMI-7000 membranı ile 168 mW/m² olarak elde edilmiştir. Kullanılan üç farklı membran içerisinde Fumapem F-1050 marka membranın en yüksek performansa sahip olduğu tespit edilmiştir.

Farklı membranlar ile yapılan çalışmada işletme süresince meydana gelen güç kayıpları değerlendirildiğinde fumapem, nafion ve ultrex membranının kullanıldığı MYH’lerde meydana gelen güç kayıpları sırası ile % 71,8, % 72,7 ve % 87 olarak gerçekleşmiştir. Bu sonuçlara göre proton değişim membranında meydana gelen tıkanıklık sonucunda membranlarda meydana gelen performans kaybının sıralamasının fumapem<nafion<ultrex şeklinde olduğu görülmüştür.

Çalışmada kullanılan elektrotların yüzeylerinden alınan SEM görüntüsü sonuçlarına göre elektrot yüzeyinde yaklaşık olarak 1 µm boyunda çubuk şeklinde ve yuvarlak şekilli mikroorganizmaların mevcut olduğu tespit edilmiştir.

İşletmeden sonraki SEM görüntülerine bakıldığında membran yüzeylerinde yoğun bir kek tabakasının olduğu görülmüştür. Membran yüzeyinde organik meddeler ile mikroorganizmaların birleşip karışık bir yapı oluşturduğu tespit edilmiştir.

Bakır kumaş elektrot yüzeyindeki biyofilm tabakasının kalınlığının yaklaşık 10 µm görülmüştür. Ayrıca bakır kumaş elektrot yüzeyindeki biyofilm oluşumunun diğer elektrotlara kıyasla daha sıkı bir yapıda olduğu belirlenmiştir.

Elde edilen EDX sonuçlarına göre çalışmada kullanılan membran ve elektrot yüzeyinde oluşan yapılar C, P, Ca, Na, Si, K, Mg gibi elementler içerdiği belirlenmiştir.

Mezbaha atıksuları ile yapılan çalışmalarda elektrot yüzeyinden alınan EDX sonuçlarına göre elektrot yüzeyinde C, Ca ve P miktarının evsel ve yağ atıksularında kullanılan elektrotlar ile kıyaslandığında daha az olduğu görülmüştür.

Katot bölgesinde bulunan elektrot yüzeyinde kristal yapıların ve mikroorganizmaların varlığı tespit edilmiştir.

MYH sisteminde üretilen asetik asit miktarının artışı ile sistemde üretilen güç miktarının arttığı görülmüştür.

PCR-DGGE sonuçlarına göre üçlü karışimli sentetik atıksular ile beslenen reaktörlerde türleri temsil eden mikroorganizma sınıflarının önemli bir yüzdesinin Deltaproteobakter ve Gamaproteobakter (%48) grubundaki bakteri sınıfında yer aldığı tespit edilmiştir. Bunun yanında az bir yüzdeyle *Firmicutes* ve Betaproteobakter grubu bakterilerin de MFC reaktöründe bulunan gruplardan olduğu belirlenmiştir.

Farklı atıksuların kullanıldığı çalışmalarda evsel ve yağ endüstrisi atıksularının kullanıldığı reaktörlerde baskın olan mikroorganizma türlerinin büyük bir çoğunluğunun *Gammaproteobacteria* grubuna ait mikroorganizmalar olduğu, mezbaha atıksularının besleme yapıldığı reaktördeki baskın olan mikroorganizma türlerinin *Firmicutes* grubuna

ait mikroorganizmalar olduğu görülmüştür. Bunun yanında *Deltaproteobacteria*, *Proteobacteria*, *Alphaproteobacteria* ve *Actinobacteria* grubuna ait mikroorganizmaların da gerçek atıksular ile besleme yapılan MYH'lerde mevcut olduğu tespit edilmiştir.

Kinetik modelleme çalışmalarında substrat olarak evsel atıksu, mezbaha atıksuyu ve yağ endüstrisi atıksularının kullanıldığı ve anot elektrotu olarak bakır kumaş elektrotun kullanıldığı MYH'ler için elde edilen J_{max} ve K_s değerleri kıyaslama yapıldığında;

$$K_s_{Evsel} < K_s_{Yağ} < K_s_{Mezbaha} \text{ ve}$$

$$J_{max} \text{ Mezbaha} < J_{max} \text{ Yağ} < J_{max} \text{ Evsel}$$

olarak belirlenmiştir.

Farklı membranların elektrik üretim performanslarının denendiği çalışmada MYH'lerde üretilen güç miktarının maksimum değere ulaştıktan sonra zamanla azaldığı görülmüştür. Bunun sebebinin PDM'de meydana gelen tıkanma sonucu H^+ iyonunun transferinin kısıtlanmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Bu durum SEM görüntüleri ile desteklenmiştir. PDM'lerin yüksek maliyetinden dolayı MYH'lerin büyük ölçekli olarak kullanılmasını kısıtlayacak en önemli nedenlerden biri olarak düşünülebilir. Bu nedenle ileriki çalışmalarda PDM'nin tıkanmasını azaltacak çalışmalar üzerinde yoğunlaşılmalıdır. Ayrıca yapılacak çalışmalarda PDM'de meydana gelen performans azalmasını engellemek için proton değişim membranı kullanılmasına alternatif olarak gaz difüzyon tabakası yapılarak bu problem minimize edilebilir.

Yapılan çalışmalarda MYH'lerde üretilen elektrik miktarı medyatör ilavesi ile arttığı görülmüştür. Fakat medyatörlerin maliyetinin yüksek olması ve bazı medyatörlerin toksik etki oluşturması nedeni ile büyük çaplı tesislerde alıcı ortamlarda yüksek miktarda deşarjı söz konusu olacağı için kullanımının kısıtlı bir şekilde veya mümkün olamayacağı düşünülmektedir. Bu nedenle bu alanda yapılacak çalışmalarda toksik etki oluşturmayan ve maliyet açısından daha uygun medyatörlerin araştırılması gerekmektedir.

Çalışmada elde edilen SEM görüntüleri ve EDX sonuçlarında MYH'lerin işletmesinden sonra anot elektrot yüzeyinde organik ve inorganik yapıların mevcut olduğu ve mikroorganizmaların bu yapıların arasında kısıtlı alan bulabildiği görülmüştür. Bu durumun anot bölmesinde üretilen elektronların elektrot yüzeyine transferinin kısıtladığı ve MYH'de üretilen elektrik miktarını azalttığı düşünülmektedir. Bu olay MYH'lerde elektrik üretimini etkileyen önemli bir dezavantajdır.

MYH'lerde kullanılan elektrotların elektrik iletme özelliği kadar kullanılan elektrot malzemesinin yapısında MYH'lerde üretilen elektrik miktarı üzerinde etkili olduğu

görülmüştür. Tez çalışmasında örgülü yapıya sahip bakır kumaş elektrot kullanılmış ve elektrik üretim potansiyelinin yüksek olduğu görülmüştür. MYH'ler ile yapılan ileriki çalışmalarda farklı materyallerden yapılmış farklı şekillere ve yüzey yapısına sahip elektrot malzemeleri kullanılarak MYH'lerde üretilen elektrik miktarı arttırılabilir. Ayrıca farklı yüzey yapısına sahip PDM ile birleştirilmiş halde üretilebilecek membran-elektrot kombinasyonları ile üretilen güç miktarı arttırılabilir.

MYH'lerde üretilen elektrik miktarını etkileyen en önemli faktörlerden biri de anot elektrot yüzeyindeki mikroorganizma türüdür. MYH'ler ile ilgili ileriki çalışmalarda farklı mikroorganizma türlerinin elektrik üretim potansiyelleri incelenmelidir. Ayrıca elektrot yüzeyine tutunma kabiliyeti ve üretilen elektroni elektrot yüzeyine daha kolay aktarabilen mikroorganizma türlerinin araştırılması gerekmektedir.

MYH'lerde üretilen güç miktarı günümüzde düşük seviyededir ve günlük kullanım için yeterli seviyede de değildir. MYH ile yapılan çalışmaların sayısı gün geçtikçe artmaktadır. Yapılacak yeni çalışmalar ile daha düşük maliyetli PDM'lerin ve elektrot malzemelerinin üretimi ile MYH'lerin daha yüksek performanslarda çalışabileceği düşünülmektedir.

6. KAYNAKLAR

Aboutalebi, H., Sathasivan, A., Kuan, M.S., 2012. Application of air–cathode pipe reactor to simultaneously suppress sulphate reduction and accelerate COD oxidation in synthetic wastewater. *Bioresource Technology*. **113**, 276-279.

Ahn, Y and Logan, B.E., 2010. Effectiveness of domestic wastewater treatment using microbial fuel cells at ambient and mesophilic temperatures. *Bioresource Technology*. **101**- 469–475.

Ahn, Y., Logan, B.E., 2013. Domestic wastewater treatment using multi-electrode continuous flow MFCs with a separator electrode assembly design. *Applied Microbiology and Biotechnology*. **97**, 409–416.

Akoğlu, B., 2011. Mikrobiyal yakıt hücresi teknolojisi ile doğrudan elektrik üretimi, *Yüksek Lisans Tezi*, Y.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

Aldrovandi, A., Marsili, E., Paganin, P., Tabacchioni, S., Giordano, A., 2009. Sustainable power production in a membrane-less and mediator-less synthetic wastewater microbial fuel cell. *Bioresource Technology*. **100**, 3252–3260.

Angenent, L.T., Karim, K., Al-Dahhana, M.H., Wrennb, B.A., Domíguez-Espinosa, R., 2004. Production of bioenergy and biochemicals from industrial and agricultural wastewater. *Trends Biotechnol.* **22**, 477–485.

Antonopoulou, G., Stamatelatou, K., Bebelis, S and Lyberatos. G., 2010. Electricity generation from synthetic substrates and cheese whey using a two chamber microbial fuel cell. *Biochemical Engineering Journal*. **50**, 10-15.

Babanova, S., Hubenova, Y and Mitov, M., 2011. Influence of artificial mediators on yeast-based fuel cell performance. *Journal of Bioscience and Bioengineering*. **112**, 379–387.

Behera, M., Ghangrekar, M.M., 2009. Performance of microbial fuel cell in response to change in sludge loading rate at different anodic feed pH. *Bioresource Technology*. **100**, 5114–5121.

Bond, D. R ve Lovley, D. R., 2003. Electricity production by *Geobacter sulfurreducens* attached to electrodes. *Applied and Environmental Microbiology*. **69**, 1548-1555.

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

Bond, D.R., Holmes, D.E., Tender, L.M., Lovley, D.R., 2002. Electrode-reducing microorganisms that harvest energy from marine sediments. *Science*. **295**, 483-485.

- Borole, A.P., Hamilton, C.Y., Vishnivetskaya, T.A., Leak, D., Andras, C., Morrell-Falvey, J., Keller, M., Davison, B.,** 2009. Integrating engineering design improvements with exoelectrogen enrichment process to increase power output from microbial fuel cells. *Journal of Power Sources*. **191**, 520-527.
- Canstein, V., Ogawa, J., Shimizu, S., Lloyd, J.R.,** 2008. Secretion of flavins by *Shewanella* species and their role in extracellular electron transfer. *Applied and Environmental Microbiology*. **74**, 615-623.
- Cárcer, D.A., Ha, P.H., Jang, J.K., Chang, I.S.,** 2011. Microbial community differences between propionate-fed microbial fuel cell systems under open and closed circuit conditions. *Applied Microbial Biotechnology*. **89**, 605-612.
- Catal, T., Li, K., Bermek, H., Liu, H.,** 2008b. Electricity production from twelve monosaccharides using microbial fuel cells. *Journal of Power Sources*. **175**, 196–200.
- Catal, T., Xu, S., Li, K., Bermek, H., Liu, H.,** 2008. Electricity generation from polyalcohols in single-chamber microbial fuel cells. *Biosensors and Bioelectronics*. **24**, 855–860.
- Chae, K.J., Choi, M., Ajayi, F.F., Park, W., Chang, I.S and Kim, I.S.,** 2008. Mass Transport through a Proton Exchange Membrane (Nafion) in Microbial Fuel Cells. *Energy and Fuels*. **22**, 169-176.
- Chae, K.-J., Choi, M.-J., Lee, J.-W., Kim, K.-Y., Kim, I.S.,** 2009. Effect of different substrates on the performance, bacterial diversity, and bacterial viability in microbial fuel cells. *Bioresource Technology*. **100**, 3518–3525.
- Chaudhuri, S.K and Lovley D.R.,** 2003. Electricity generation by direct oxidation of glucose in mediatorless microbial fuel cells. *Nature Biotechnology*. **21**, 1229-1232.
- Chen, G-W., Choi, S-J., Lee, T-H., Lee, G-Y., Cha, J-H., Kim, C-W.,** 2008. Application of biocathode in microbial fuel cells: cell performance and microbial community. *Applied Microbiology and Biotechnology*. **79**, 379–388.
- Cheng, J., Zhu, X., Ni, J., Borthwick, A.,** 2010. Palm oil mill effluent treatment using a two-stage microbial fuel cells system integrated with immobilized biological aerated filters. *Bioresource Technology*. **101**, 2729–2734.
- Cheng, S., Dempsey, B.A., Logan, B.E.,** 2007a. Electricity generation from synthetic acid-mine drainage (AMD) water using fuel cell technologies. *Environmental Science and Technology*. **41**, 8149–8153.
- Cheng, S., Logan, B.E.,** 2007b. Ammonia treatment of carbon cloth anodes to enhance power generation of microbial fuel cell. *Electrochemical Communications*. **9**, 492–496.
- Cheng, S.A., Liu, H., Logan, B.E.,** 2006. Increased power generation in a continuous flow MFC with advective flow through the porous anode and reduced electrode spacing. *Environmental Science and Technology*. **40**, 2426–2432.

Chung, K., Okabe, S., 2009. Continuous power generation and microbial community structure of the anode biofilms in a three-stage microbial fuel cell system. *Applied Microbial and Biotechnology*. **83**, 965-977.

Clauwaert, P., Aelterman, P., Pham, T.H., Schamphelaire, L.D., Carballa, M., Rabaey, K., Verstraete, W., 2008. Minimizing losses in bio-electrochemical systems: the road to applications. *Applied Microbiology and Biotechnology*. **79**, 901-913.

Crittenden, S.R., Sund, C.J., Sumner, J.J., 2006. Mediating Electron Transfer from Bacteria to a Gold Electrode via a Self-Assembled Monolayer. *Langmuir*. **22**, 9473-9476.

Daniel, D.K., Mankidy, B.D., Ambarish, K., Manogari, R., 2009. Construction and operation of a microbial fuel cell for electricity generation from wastewater. *International Journal of Hydrogen Energy*. **34**, 7555–756.

Davis, F and Higson, S.P.J., 2007. Biofuel cells—Recent advances and applications. *Biosensors and Bioelectronics*. **22**, 1224–1235.

De Carcer, D.A., Ha, P.T., Jang, J.K., Chang, I.S. 2011. Microbial community differences between propionate-fed microbial fuel cell systems under open and closed circuit conditions. *Applied Microbial and Biotechnology*. **89**, 605-612.

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**, 1130–1135.

Doğan, M.F., Çolak, Ö.Ü., 2009. 5. *Uluslararası İleri Teknolojiler Sempozyumu (İATS'09)*, Karabük, Türkiye, 13-15 Mayıs 2009.

Du, Z., Li, H and Gu, T., 2007. A state of the art review on microbial fuel cells: A promising technology for wastewater treatment and bioenergy. *Biotechnology Advances*. **25**, 464-482.

Dumas, C., Basseguy, R., Bergel, A., 2008. Microbial electrocatalysis with *Geobacter sulfurreducens* biofilm on stainless steel cathodes. *Electrochemical Acta*. **53**, 2494–2500.

Dumas, C., Mollica, A., Feron, D., Basseguy, R., Etcheverry, L., Bergel, A., 2007. Marine microbial fuel cell: use of stainless steel electrodes as anode and cathode materials. *Electrochemical Acta*. **53**, 468–473.

Dunaj, S.J., Vallino, J.J., Hines, M.E., Gay, M., Kobyljanec, C., Rooney-Varga, J.N., 2012. Relationships between Soil Organic Matter, Nutrients, Bacterial Community Structure, And the Performance of Microbial Fuel Cells. *Environmental Science & Technology*. **46**, 1914-1922.

Duteanu, N., Erable, B., Kumar, S.M.S., Ghangrekar, M.M., Scott, K., 2010. Effect of chemically modified Vulcan XC-72R on the performance of air-breathing cathode in a single-chamber microbial fuel cell. *Bioresource Technology*. **101**, 5250–5255.

Electric Power Research Institute, 2002. Water and Sustainability. Research Plan, vol. 1. Electric Power Research Institute, Palo Alto, CA. Enhances Electron Transfer in Biofuel Cells. *Environmental Science and Technology*. **39**, 3401-3408.

Erable, B., Bergel, A., 2009. First air-tolerant effective stainless steel microbial anode obtained from a natural marine biofilm. *Bioresource Technology*. **100**, 3302–3307.

Fan, Y., Sharbrough, E and Liu, H., 2008. Quantification of the Internal Resistance Distribution of Microbial Fuel Cells. *Environmental Science and Technology*. **42**, 8101–8107.

Fedorovich, V., Knighton, M.C., Pagaling, E., Ward, F.B., Free, A., Goryanin, I., 2009. Novel Electrochemically Active Bacterium Phylogenetically Related to *Arcobacter butzleri*, Isolated from a Microbial Fuel Cell. *Applied and Environmental Microbiology*, **75**, 7326-7334.

Feng, Y., Wang, X., Logan, B.E., Lee, H., 2008. Brewery wastewater treatment using air-cathode microbial fuel cells. *Applied Microbial Biotechnology*. **78**, 873–880.

Franks, A.E., Nevin, K.P., Glaven, R.H., Lovley, D.R., 2010. Microtoming Coupled to Microarray Analysis to Evaluate the Spatial Metabolic Status of *Geobacter sulfurreducens* Biofilms. *ISME Journal*. DOI: 10.1038/ismej.2009.137

Franks, A.E., Nevin, K.P., Jia, H., Izallalen, M., Woodard, T.L., Lovley, D.R., 2009. Novel strategy for three-dimensional real-time imaging of microbial fuel cell communities: monitoring the inhibitory effects of proton accumulation within the anode biofilm. *Energy and Environmental Science*. **2**, 113–119.

Freguia, S., Rabaey, K., Yuan, Z., Keller, j., 2007. Non-catalyzed cathodic oxygen reduction at graphite granules in microbial fuel cells. *Electrochemical Acta*, **53**, 598–603.

Gálvez, A., Greenman, J., Ieropoulos, I., 2009. Landfill leachate treatment with microbial fuel cells; scale-up through plurality. *Bioresource Technology*. **100**, 5085–5091.

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

Gorby, Y.A and Beveridge, T.J., 2005. Composition, reactivity, and regulation of extracellular metal-reducing structures (nanowires) produced by dissimilatory metal reducing bacteria, Warrenton, VA. DOI 10.2172/893692.

- Gorby, Y.A., Yanina, S., McLean, J.S., Rosso, K.M., vd.,** 2006. Electrically conductive bacterial nanowires produced by *Shewanella oneidensis* strain MR-1 and other microorganisms. *Proceedings of The National Academy of Sciences of The United States of America*. **103**, 11358-11363.
- Greenman, J., Gálvez, A., Giusti, L., Ieropoulos, I.,** 2009. Electricity from landfill leachate using microbial fuel cells: comparison with a biological aerated filter. *Enzyme Microbial Technology*. **44**, 112–119.
- Ha, P.T., Tae, B., Chang, I.S.,** 2008. Performance and bacterial consortium of microbial fuel cell fed with formate. *Energy Fuels*. **22**, 164–168.
- Habermann, W., Pommer, E.H.,** 1991. Biological fuel cells with sulfide storage capacity. *Applied Microbial Biotechnology*. **35**, 128–133.
- Halliday D, Resnick R, Walker J.** In: Fundamentals of Physics. 7th ed.. New York: John Wiley & Sons Co., ISBN 978-0-471- 21643-8; 2004.
- Harnisch, F., Schröder, U., Scholz, F.,** 2008. The suitability of monopolar and bipolar ion exchange membranes as separators for biological fuel cells. *Environmental Science and Technology*. **42**, 1740–1746.
- Hashemi, J., Samimi, A.,** 2012. Steady state electric power generation in up-flow microbial fuel cell using the estimated time span method for bacteria growth domestic wastewater. *Biomass and Bioenergy*. **45**, 65-76.
- He, Z., Minteer, S.D., Angenent, L.T.,** 2005. Electricity generation from artificial wastewater using an upflow microbial fuel cell. *Environmental Science and Technology*. **39**, 5262–5267.
- Heilmann, J., Logan, B.E.,** 2006. Production of electricity from proteins using a microbial fuel cell. *Water Environment Research*. **78**, 531–537.
- Ho, P.I., Kumar, G.G., Kim, A.R., Kim, P and Nahm, K.S.,** 2011. Microbial electricity generation of diversified carbonaceous electrodes under variable mediators. *Bioelectrochemistry*. **80**, 99-104.
- Holmes, D:E., Bond, D.R., O’Neil, R.A., Reimers, C.E., Tender, L.R., Lovley, D.R.,** 2004. Microbial Communities Associated with Electrodes Harvesting Electricity from a Variety of Aquatic Sediments. *Microbial Ecology*. **48**, 178-190.
- Hu, Z.,** 2008. Electricity generation by a baffle-chamber membraneless microbial fuel cell. *Journal of Power Sources*. **179**, 27–33.
- Huang, J., Sun, B., Zhang, X.,** 2010. Electricity generation at high ionic strength in microbial fuel cell by a newly isolated *Shewanella marisflavi* EP1. *Applied Microbiology and Biotechnology*. **85**, 1141–1149.

- Huang, L., Angelidaki, I.,** 2008a. Effect of humic acids on electricity generation integrated with xylose degradation in microbial fuel cells. *Biotechnology and Bioengineering*. **100**, 413–422.
- Huang, L., Logan, B.E.,** 2008. Electricity generation and treatment of paper recycling wastewater using a microbial fuel cell. *Applied Microbial and Biotechnology*. **80**, 349–355.
- Huang, L., Logan, B.E.,** 2008b. Electricity production from xylose in fed-batch and continuous-flow microbial fuel cells. *Applied Microbiology and Biotechnology*. **80**, 665–664.
- Ieropoulos, I., Winfield, J., Greenman, J.,** 2010. Effects of flow-rate, inoculum and time on the internal resistance of microbial fuel cells. *Bioresource Technology*. **101**, 3520–3525.
- Ishii, S., Hotta, Y., Watanabe, K.,** 2008. Methanogenesis versus electrogenesis: morphological and phylogenetic comparisons of microbial communities. *Bioscience, Biotechnology, and Biochemistry*. **72**, 286–294.
- Ishii, S., Shimoyama, T., Hotta, Y., Watanabe, K.,** 2008. Characterization of a filamentous biofilm community established in a cellulose-fed microbial fuel cell. *BMC Microbiology*. DOI: 10.1186/1471-2180-8-6.
- Ishii, S., Watanabe, K., Yabuki, S., Logan, B.E., Sekiguchi, Y.,** 2008a. Comparison of Electrode Reduction Activities of *Geobacter sulfurreducens* and an Enriched Consortium in an Air-Cathode Microbial Fuel Cell. *Applied and Environmental Microbiology*. **74**, 7348–7355.
- Jadhav, G.S., Ghangrekar, M.M.,** 2009. Performance of microbial fuel cell subjected to variation in pH, temperature, external load and substrate concentration. *Bioresource Technology*. **100**, 717–723.
- Jin, B., van Leeuwen, H.J., Patel, B., YU, Q.,** 1998. Utilisation of starch processing wastewater for production of microbial biomass protein and fungal α -amylase by *Aspergillus oryzae*. *Bioresource Technology*. **66**, 201–206.
- Jong, B.C., Kim, B.H., Chang, I.S., Liew, P.W., Choo, Y.F., Kang, G.S.** 2006. Enrichment, performance, and microbial diversity of a thermophilic mediatorless microbial fuel cell. *Environmental Science and Technology*. **40**, 6449–6454.
- Kan, J., Hsu, L., Cheung, A.C., Pirbazari, M., Nealson, K.H.,** 2011. Current production by bacterial communities in microbial fuel cells enriched from wastewater sludge with different electron donors. *Environmental Science and Technology*. **45**, 1139–1146.
- Kargi, F., Eker, S.,** 2007. Electricity generation with simultaneous wastewater treatment by a microbial fuel cell (MFC) with Cu and Cu–Au electrodes. *Journal Chemical Technology Biotechnology*. **82**, 658–662.

- Katuri, K.P., Enrigh, A-M., O'Flaherty, V and Leech, D.,** 2012. Microbial analysis of anodic biofilm in a microbial fuel cell using slaughterhouse wastewater. *Bioelectrochemistry*. **87**, 164-171.
- Ki, D., Park, J., Lee, J., Yoo, K.,** 2008. Microbial diversity and population dynamics of activated sludge microbial communities participating in electricity generation in microbial fuel cells. *Water Science and Technology*. **58**, 2195-2201.
- Kiely, P.D., Rader, G., Regan, J.M., Logan, B.E.,** 2011. Long-term cathode performance and the microbial communities that develop in microbial fuel cells fed different fermentation endproducts. *Bioresource Technology*. **102**, 361-366.
- Kim, B.H., Kim, H.J., Hyun, M.S., Park, D.H.,** 1999. Direct electrode reaction of Fe(III)-reducing bacterium, *Shewanella putrefaciens*. *Journal of Microbiology and Biotechnology*. **9**, 127-131.
- Kim, B.H., Park, H.S., Kim, H.J., Kim, G.T., Chang, I.S., Lee, J., Phung, N.T.,** 2004. Enrichment of microbial community generating electricity using a fuel cell-type electrochemical cell. *Applied Microbial Biotechnology*. **63**, 672–681.
- Kim, G.T., Webster, G., Wimpenny, J.W., Kim, B.H., Kim, H.J., Weightman, A.J.,** 2006. Bacterial community structure, compartmentalization and activity in a microbial fuel cell. *Journal of Applied Microbiology*. **101**, 698-710.
- Kim, J.R., Zuo, Y., Regan, J.M., Logan, B.E.,** 2008a. Analysis of ammonia loss mechanisms in microbial fuel cells treating animal wastewater. *Biotechnology and Bioengineering*. **99**, 1120–1127.
- Kim, I.S., Chae, K-J., Choi, M-J., Verstraete, W.,** 2008b. Microbial Fuel Cells: Recent Advances, Bacterial Communities and Application Beyond Electricity Generation. *Environmental Engineering Research*. **13**, 51-65.
- Kim, J.R., Jung, S.H., Regan, J.M., Logan, B.E.,** 2007a. Electricity generation and microbial community analysis of alcohol powered microbial fuel cells. *Bioresource Technology*. **98**, 2568–2577.
- Kim, J.R., Cheng, S., Sang-Eun, Oh., Logan, B.E.,** 2007b. Power generation using different cation, anion, and ultrafiltration membranes in microbial fuel cells. *Environmental Science and Technology*. **41**, 1004–1009.
- Kim, N., Choi, Y., Jung, S., Kim, S.,** 2000. Effect of initial carbon sources on the performance of microbial fuel cells containing *Proteus vulgaris*. *Biotechnology and Bioengineering*. **70**, 109–114.
- Kjeldsen, P., Barlaz, M.A., Rooker, A.P., Baun, A., Ledin, A., Christensen, T.H.,** 2002. Present and long-term composition of MSW landfill leachate: a review. *Crit. Rev. Environmental Science and Technology*. **32**, 297–336.

- Kong, W., Guo, Q., Wang, X., Yue, X.,** 2011. Electricity Generation from Wastewater Using an Anaerobic Fluidized Bed Microbial Fuel Cell. *Industrial and Engineering Chemistry Research*. **50**, 12225-12232.
- Krakat, N., Schmidt, S., Scherer, P.,** 2011. Potential impact of process parameters upon the bacterial diversity in the mesophilic anaerobic digestion of beet silage. *Bioresource Technology*. **102**, 5692-5701.
- Lee, H.S., Torres, C.I., Rittmann, B.E.,** 2009. Effects of Substrate Diffusion and Anode Potential on Kinetic Parameters for Anode-Respiring Bacteria. *Environmental Science and Technology*. **43**, 7571–7577.
- Lee, H.S., Vermaas, W.F.J., Rittmann, B.E.** 2010a. Biological hydrogen production: prospects and challenges. *Trends Biotechnology*. **28**, 262-271.
- Lee, H-S., Parameswaran, P., Kato-Marcus, A., Torres, C.I., Rittmann, B.E.,** 2008. Evaluation of energy-conversion efficiencies in microbial fuel cells (MFCs) utilizing fermentable and non-fermentable substrates. *Water Research*. **42**, 1501-1510.
- Lee, J., Phung, N.T., Chang, I.S., Kim, B.H., Sung, H.C.,** 2003. Use of acetate for enrichment of electrochemically active microorganisms and their 16S rDNA analyses FEMS. *Microbiology Letters*. **223**, 185-191.
- Lee, S.W., Jeon, B.Y., Park, D.H.,** 2010b. Effect of bacterial cell size on electricity generation in a single-compartmented microbial fuel cell. *Biotechnology Letters*. **32**, 483–487.
- Lefebvre, O., Ha Nguyen, T.T., Al-Mamun, A., Chang, I.S., Ng.H.Y.,** 2010. T-RFLP reveals high beta-Proteobacteria diversity in microbial fuel cells enriched with domestic wastewater. *Journal of Applied Microbiology*. **109**, 839-850.
- Li, Z., Zhang, X., Lei, L.,** 2008. Electricity production during the treatment of real electroplating wastewater containing Cr 6+ using microbial fuel cell. *Process Biochemistry*. **43**, 1352–1358.
- Liu, H., Cheng, S., Logan, B.E.,** 2005. Production of Electricity from Acetate or Butyrate Using a Single-Chamber Microbial Fuel Cell. *Environmental Science and Technology*. **39**, 658-662.
- Liu, H., Ramnarayanan, R., Logan, B.E.,** 2004. Production of Electricity during Wastewater Treatment Using a Single Chamber Microbial Fuel Cell. *Environmental Science and Technology*. **38**, 2281-2285.
- Liu, M., Yuan, Y., Zhang, L., Zhuang, L., Zhou, S and Ni, J.,** 2010a. Bioelectricity generation by a Gram-positive *Corynebacterium* sp. strain MFC0₃ under alkaline condition in microbial fuel cells. *Bioresource Technology*. **101**, 1807–1811.

- Liu, X-W., Sun, X-F., Huang, Y-X., vd.,** 2010b. Nano-structured manganese oxide as a cathodic catalyst for enhanced oxygen reduction in a microbial fuel cell fed with a synthetic wastewater. *Water Research*. **44**, 5298-5305.
- Liu, Z., Liu, J., Zhang, S and Su, Z.,** 2009. Study of operational performance and electrical response on mediator-less microbial fuel cells fed with carbon- and protein-rich substrates. *Biochemical Engineering Journal*. **45**, 185–191.
- Logan, B, Cheng, S., Watson, V., Estadt, G.,** 2007. Graphite Fiber Brush Anodes for Increased Power Production in Air-Cathode Microbial Fuel Cells. *Environmental Science and Technology*. **41**, 3341-3346.
- Logan, B.E.,** (2008). Microbial Fuel Cells, *John Wiley& Sons*, New York.
- Logan, B.E., Cheng, S.A., Watson, V., Estadt, G.,** 2007. Graphite fiber brush anodes for increased power production in air-cathode microbial fuel cells. *Environmental Science and Technology*. **41**, 3341–3346.
- Logan, B.E., Murano, C., Scott, K., Gray, N.D., Head, I.M.,** 2005. Electricity generation from cysteine in a microbial fuel cell. *Water Research*. **39**, 942–952.
- Lovley, D.R.,** 2006. Microbial fuel cells: novel microbial physiologies and engineering approaches. *Current Opinion in Biotechnology*. **17**, 327–332.
- Lu, N., Zhou, S.-G., Zhuang, L., Zhnag, J.-T., Ni, J.-R.,** 2009. Electricity generation from starch processing wastewater using microbial fuel cell technology. *Biochemical Engineering Journal*. **43**, 246–251.
- Luo, H., Liu, G., Jin, S.,** 2009. Phenol degradation in microbial fuel cells. *Chemical Engineering Journal*. **147**, 259–264.
- Luo, Y., Zhang, R.D., Liu, G.L., Li, J., Li, M.C., Zhang, C.P.,** 2010. Electricity generation from indole and microbial community analysis in the microbial fuel cell. *Journal of Hazardous Materials*. **176**, 759–764.
- Manohar, A.K., Mansfeld, F.,** 2009. The internal resistance of a microbial fuel cell and its dependence on cell design and operating conditions. *Electrochemical Acta*. **54**, 1664–1670.
- Mao, Y., Zhang, L., Li, D., Shi, H., Liu, Y., Cai, L.,** 2010. Power generation from a biocathode microbial fuel cell biocatalyzed by ferro/manganese-oxidizing bacteria. *Electrochimica Acta*. **55**, 7804–7808.
- Marcus, A.K., Torres, C.I. and Rittmann, B.E.,** 2007. Conduction-based modeling of the biofilm anode of a microbial fuel cell. *Biotechnology and Bioengineering*. **98**, 1171-1182.

Mardanpour, M.M., Esfahany, M.N., Behzad, T., Sedaqatvand, R., 2012. Single chamber microbial fuel cell with spiral anode for dairy wastewater treatment. *Biosensors and Bioelectronics*, **38**, 264–269.

Mauritz, K.A., Moore, R.B., 2004. State of understanding of Nafion. *Chem Reviews*. **104**, 4535–4585.

Michaelidou, U., Ter Heijne, A., Euverink, G.J., Hamelers, H.V., Stams, A.J., Geelhoed, J.S. 2011. Microbial Communities and Electrochemical Performance of Titanium-Based Anodic Electrodes in a Microbial Fuel Cell. *Applied and Environmental Microbiology*. **77**, 1069-1075.

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 and Technology*. **38**, 5809–5814.

Min, B., Cheng, S and Logan, B.E., 2005b. Electricity generation using membrane and salt bridge microbial fuel cells. *Water Research*. **39**, 1675–1686.

Min, B., Kim, J.R., Oh, S.E., Regan, J.M., Logan, B.E., 2005a. Electricity generation from swine wastewater using microbial fuel cells. *Water Research*. **39**, 4961–4968.

Min, B., Logan, B., 2004. Continuous electricity generation from domestic wastewater and organic substrates in a flat plate microbial fuel cell. *Environmental Science and Technology*. **38**, 5809–5814.

Mohan, S.V., Mohanakrishna, G., Reddy, B.P., Saravanan, R., Sarma, P.N., 2008b. Bioelectricity generation from chemical wastewater treatment in mediatorless (anode) microbial fuel cell (MFC) using selectively enriched hydrogen producing mixed culture under acidophilic microenvironment. *Biochemical Engineering Journal*. **39**, 121–130.

Mohan, Y., Muthu Kumar, S.M., Das, D., 2008a. Electricity generation using microbial fuel cells. *International Journal of Hydrogen Energy*. **33**, 423–426.

Mohanakrishna, G., Venkata Mohan, S., Sarma, P.N., 2010. Bio-electrochemical treatment of distillery wastewater in microbial fuel cell facilitating decolorization and desalination along with power generation. *Journal of Hazardous Materials*, **177**, 487–494.

Muyzer, G., Dewaal, E.C., Uitterlinden, A.G., 1993. Profiling of Complex Microbial-Populations by Denaturing Gradient Gel-Electrophoresis Analysis of Polymerase Chain Reaction-Amplified Genes-Coding For 16S Ribosomal-RNA. *Applied and Environmental Microbiology*. **59**, 695-700.

Myers, C. R ve Myers, J. M., 1992. Localization of cytochromes to the outer membrane of anaerobically grown *Shewanella putrefaciens* MR-1. *Journal of Bacteriology*. **174**, 3429–3438.

Nam, J.Y., Kim, H.W., Lim, K.H and Shin, H.S., 2010a. Effects of organic loading rates on the continuous electricity generation from fermented wastewater using a single-chamber microbial fuel cell. *Bioresource Technology*. **101**, 33–37.

Nam, J.Y, Kim, H.W., Lim, K-H., Shin, H.S., Logan, B.E., 2010b. Variation of power generation at different buffer types and conductivities in single chamber microbial fuel cells. *Biosensors and Bioelectronics*. **25**,1155–1159.

Najafpour, G, Rahimnejad, M, Ghoreishi, A., 2011. The Enhancement of a Microbial Fuel Cell for Electrical Output Using Mediators and Oxidizing Agents. *Energy Sources Part A-Recovery Utilization and Environmental Effects*. **33**, 2239-2248.

Nevin, K.P., Kim, B.C., Glaven, R.H., Johnson, J.P., Woodard, T.L., Methe, B.A., DiDonato, R.J., Covalla, S.F., Franks, A.E., Liu, A., Lovley, D.R., 2009. Anode biofilm transcriptomics reveals outer surface components essential for high density current production in *Geobacter sulfurreducens* fuel cells. *Plos One*. DOI: 10.1371/journal.pone.0005628.

Nevin, K.P., Richter, H., Covala, S.F., Johnson, J.P., Woodard, T.L., Orloff, A.L., Jia, H., Zhang, M., Lovley, D.R., 2008. Power output and columbic efficiencies from biofilms of *Geobacter sulfurreducens* comparable to mixed community microbial fuel cells. *Environmental Microbiology*. **10**, 2505-2514.

Newman, D.K., Kolter, R., 2000. A role for excreted quinones in extracellular electron transfer. *Nature*. **405**, 94-97.

Niessen, J., Schröder, U., Scholz, F., 2004. Exploiting complex carbohydrates for microbial electricity generation – a bacterial fuel cell operating on starch. *Electrochemistry Communications*. **6**, 955–958.

Nimje, V.R., Chen, C-Y., Chen, C-C., Tsai, J-Y., Chen, H-R., Huang, Y-M., Jean, J-S., Chang, Y-F., Shih, R-C., 2011. Microbial fuel cell of *Enterobacter cloacae*: Effect of anodic pH microenvironment on current, power density, internal resistance and electrochemical losses. *International Journal of Hydrogen Energy*. **36**, 11093-11101.

Oh, S., Logan, B.E., 2005. Hydrogen and electricity production from a food processing wastewater using fermentation and microbial fuel cell technologies. *Water Research*. **39**, 4673–4682.

Oh, S.E., Logan, B.E., 2006. Proton exchange membrane and electrode surface areas as factors that affect power generation in microbial fuel cells. *Applied Microbial Biotechnology*. **70**, 162–169.

Olivero-VerbeL, J; Padilla-Bottet, C; De la Rosa, O., 2008, Relationships between physicochemical parameters and the toxicity of leachates from a municipal solid waste landfill, *Ecotox and Environmental Safety*. **70**, 294-299

Ozkaya, B., Akoglu, B., Karadag, D., Acı, G., Taskan,E., Hasar, H., 2012. Bioelectricity production using a new electrode in a microbial fuel cell. *Bioprocess and Biosystem Engineering*. **35**, 1219-1227.

Pant, D., Bogaert, G.V., Diels, L and Vanbroekhoven, K., 2010. A review of the substrates used in microbial fuel cells (MFCs) for sustainable energy production. *Bioresource Technology*. **101**, 1533–1543.

Pant, D., Singh, A., Satyawali, Y., Gupta, R.K., 2008. Effect of carbon and nitrogen source amendment on synthetic dyes decolourizing efficiency of white-rot fungus, *Phanerochaete chrysosporium*. *Journal of Environmental Biology*. **29**, 79–84.

Park, C.-Y., Hong, S-W., Choi, Y-S., 2007. Center for Environmental Technology Research, Korea Institute of Science and Technology, 39-1, *Hawolgok-Dong, Sungbuk-Gu, Seoul* 136-791, Korea

Park, D.H and Zeikus, J.G., 2003. Improved Fuel Cell and Electrode Designs for Producing Electricity from Microbial Degradation. *Biotechnology and Bioengineering*. **81**, 348-355.

Park, D.H., Kim, S.K., Shin, I.H., Jeong, Y.J., 2000. Electricity production in biofuel cell using modified graphite electrode with Neutral Red. *Biotechnology Letters*. **22**, 1301-1304.

Park, S-Y., Lee, J-V., Jang, S-H., Kim, L-H., Choi, D-K., Joe, Y-I., 1999. Impedance characteristics of a rotating disc electrode coated with a sulfonated polysulfone cation-exchange membrane. *Journal of Power Sources*. **83**, 217-222.

Patil, S.A., Surakasi, V.P., Koul, S., Ijmulwar, S., Vivek, A., Shouche, Y.S., Kapadnis, B.P., 2009. Electricity generation using chocolate industry wastewater and its treatment in activated sludge based microbial fuel cell and analysis of developed microbial community in the anode chamber. *Bioresource Technology*. **100**, 5132–5139.

Pham, H., Boon, N., Marzorati, M., Verstraete, W., 2009. Enhanced removal of 1,2-dichloroethane by anodophilic microbial consortia. *Water Research*. **43**, 2936–2946.

Phung, N.T., Lee, J., Kang, K.H., Chang, I.S., Gadd, G.M., Kim, B.H., 2004. Analysis of microbial diversity in oligotrophic microbial fuel cells using 16S rDNA sequences. *FEMS Microbiology Letters*. **233**, 77-82.

Popov, A.L., Kim, J.R., Dinsdale, R.M., Esteves, S.R., Guwy,A.J., Premier, G.C., 2012. The Effect of Physico-chemically Immobilized Methylene Blue and Neutral Red on the Anode of Microbial Fuel Cell. *Biotechnology and Bioprocess Engineering*. **17**, 361-370.

Potter, M.C., 1911. Electrical effects accompanying the decomposition of organic compounds. *Proc. Roy. SOC. London Ser. B* 84,260-276.

Quan, X.C., Quan, Y.P., Tao, K., 2012. Effect of anode aeration on the performance and microbial community of an air–cathode microbial fuel cell. *Chemical Engineering Journal*. **210**, 150-156.

Rabaey, K., Boon, N., Höfte, M., Verstraete, W., 2005a. Microbial Phenazine Production Enhances Electron Transfer in Biofuel Cells. *Environmental Science and Technology*. **39**, 3401-3408.

Rabaey, K., Clauwaert, P., Aelteman, P., Verstraete, W., 2005b. Tubular microbial fuel cells for efficient electricity generation. *Environmental Science and Technology*. **39**, 8077–8082.

Rabaey, K., Lissens, G., Verstraete, W., 2005c. Microbial fuel cells: performances and perspectives. Biofuels for fuel cells: biomass fermentation towards usage in fuel cells.

Rabaey, K., Lissens, G., Siciliano, S.D and Verstraete, W., 2003. A microbial fuel cell capable of converting glucose to electricity at high rate and efficiency. *Biotechnology Letters*. **25**, 1531–1535.

Rabaey, K., Boon, N., Siciliano, S.D., Verhaege, M., Verstraete, W., 2004. Biofuel cells select for microbial consortia that self-mediate electron transfer. *Applied and Environmental Microbiology*. **70**, 5373-5382.

Rahimnejad, M., Ghoreyshi, A.A., Najafpour, G and Jafary, T., 2011a. Power generation from organic substrate in batch and continuous flow microbial fuel cell operations. *Applied Energy*. **88**, 3999–4004.

Rahimnejad, M., Najafpour, G.D., Ghoreyshi. A.A., Shakeri, M and Zare, H., 2011b. Methylene blue as electron promoters in microbial fuel cell. *International Journal of Hydrogen Energy*. **36**, 13335-13341.

Reguera, G., McCarthy, K.D., Mehta, T., Nicoll, J.S., Tuominen, M.T. and Lovley, D.R., 2005. Extracellular electron transfer via microbial nanowires. *Nature*. **435**, 1098-1101.

Reguera, G., Nevin, K.P., Nicoll, J.S., Covalla, S.F., Woodard, T.L., Lovley, D., 2006. Biofilm and Nanowire Production Leads to Increased Current in *Geobacter sulfurreducens* Fuel Cells. *Applied Environmental Microbiology*. **72**, 7345-7348.

Ren, Z., Steinburg, L.M., Regan, J.M., 2008. Electricity production and microbial biofilm characterization in cellulose-fed microbial fuel cells. *Water Science and Technology*. **58**, 617–622.

- Ren, Z., Yan, H., Wang, W., Mench, M.M., Regan, J.M.,** 2011. Characterization of Microbial Fuel Cells at Microbially and Electrochemically Meaningful Time scales. *Environmental Science and Technology*. **45**, 2435-2441.
- Rezaei, F., Xing, D., Wagner, R., Regan, J.M., Richard, T.L., Logan, B.E.,** 2009. Simultaneous cellulose degradation and electricity production by *Enterobacter cloacae* in a microbial fuel cell. *Applied Environmental Microbiology*. **75**, 3673–3678.
- Rhoads, A., Beyenal, H., Lewandowski, Z.,** 2005. Microbial Fuel Cell using Anaerobic Respiration as an Anodic Reaction and Biomineralized Manganese as a Cathodic Reactant. *Environmental Science and Technology*. **39**, 4666-4671.
- Richter, H., McCarthy, K., Nevin, K.P., Johnson, J.P., Rotello, V.M and Rotello, D.R.,** 2008. Electricity Generation by *Geobacter sulfurreducens* Attached to Gold Electrodes. *Langmuir*. **24**, 4376-4379.
- Rismani-Yazdi, H., Christy, A.D., Dehority, B.A., Morrison, M., Yu, Z., Tuovinen, O.H.,** 2007. Electricity generation from cellulose by rumen microorganisms in microbial fuel cells. *Biotechnology and Bioengineering*. **97**, 1398–1407.
- Rodrigo, M.A., C nizes, P., Lobato, J., Paz, R., S ez, C., Linares, J.J.,** 2007. Production of electricity from the treatment of urban waste water using a microbial fuel cell. *Journal of Power Sources*. **169**, 198–204.
- Rozendal, R.A., Hamelers, H.V.M., Buisman, C.J.N.,** 2006. Effects of membrane cation transport on pH and microbial fuel cell performance, *Environmental Science and Technology*. **40**, 5206–5211.
- Rozendal, R.A., Hamelers, H.V.M., Rabaey, K., Keller, J., Busman, C.J.N.,** 2008. Towards practical implementation of bioelectrochemical wastewater treatment. *Trends Biotechnol.* **26**, 450–459.
- Sambrook, J., Fritsch, E.F., Maniatis, T.,** 1989. Gel electrophoresis of DNA. In: Sambrook J., Fritsch, E.F., Maniatis, T. (Eds) *Molecular Cloning: a laboratory Manual*. New York: Cold Spring Harbor Laboratory Press, *Cold Spring Harbor, NY, USA*, chapter 6.
- Scott, K., Murano, C.,** 2007. A study of a microbial fuel cell battery using manure sludge waste. *Journal Chemical Technology Biotechnology*. **82**, 809–817.
- Sevda, S., 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*. **47**, 878-886.
- Shimoyama, T., Yamazawa, A., Ueno, Y., Watanabe, K.** 2009. Phylogenetic analyses of bacterial communities developed in a cassette-electrode microbial fuel cell. *Microbes and Environments*. **24**, 188-192.

Song, T., Xu, Y., Ye, Y., Chen, Y., Shen, S., 2008. Electricity generation from terephthalic acid using a microbial fuel cell. *Journal Chemical Technology Biotechnology*. **84**, 356-360.

Song, T.S., Cai, H.Y., Yan, Z.S., Zhao, Z.W., Jiang, H.L., 2012. Various voltage productions by microbial fuel cells with sedimentary inocula taken from different sites in one freshwater lake. *Bioresource Technology*. **108**, 68-75.

Srikanth, S., Pavani, T., Sarma, P.N and Mohan, S.V., 2011. Synergistic interaction of biocatalyst with bio-anode as a function of electrode materials. *International Journal of Hydrogen Energy*. **36**. 2271-2280.

Sun, J., Hu, Y.-Y., Bi, Z., Cao, Y.-Q., 2009. Simultaneous decolorization of azo dye and bioelectricity generation using a microfiltration membrane air-cathode single-chamber microbial fuel cell. *Bioresource Technology*. **100**, 3185–3192.

Sun, Y., Wei, J., Liang, P., Huang, X., 2011. Electricity generation and microbial community changes in microbial fuel cells packed with different anodic materials. *Bioresource Technology*. **102**, 10886-10891.

Tartakovsky, B., Guiot, S.R., 2006. A comparison of air and hydrogen peroxide oxygenated microbial fuel cell reactors. *Biotechnology Progress*. **22**, 241–246.

ter Heijne, A., Hamelers, H.V.M., Saakes, M., Buisman, C.J.N., 2008. Performance of non-porous graphite and titanium-based anodes in microbial fuel cells. *Electrochemical Acta*, **53**, 5697–5703.

Thygesen, A., Poulsen, F.W., Min, B., Angelidaki, I and Thomsen, A.B., 2009. The effect of different substrates and humic acid on power generation in microbial fuel cell operation. *Bioresource Technology*. **100**, 1186–1191.

Toh, H., Sharma, V.K., Oshima, K., Kondo, S., Hattori, M., Ward, F.B., Free, A., Taylor, T.D., 2011. Complete Genome Sequences of *Arcobacter butzleri* ED-1 and *Arcobacter* sp. Strain L, Both Isolated from a Microbial Fuel Cell. *Journal of Bacteriology*. **193**, 6411-6412.

Torres, C.I., Kato Marcus, A., Rittmann, B.E., 2008a. Proton transport inside the biofilm limits electrical current generation by anode-respiring bacteria. *Biotechnology and Bioengineering*. **100**, 872–881.

Torres, C.I., Lee, H.S., Rittmann, B.E., 2008b. Carbonate species as OH⁻ carriers for decreasing the pH gradient between cathode and anode in biological fuel cells. *Environmental Science and Technology*. **42**, 8773–8777.

URL-1, <http://www.fuelcellstore.com/en/pc/viewPrd.asp?idproduct=561&idcategory=>, 23 Nisan 2013.

ULR-2, <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/genbank/>, 23 Nisan 2013.

ULR-3, <http://www.akat.net/>, 18.01.2011

ULR-4, <http://www.lessemf.com/fabric.html>, 12 Mart 2012.

ULR-5, http://www.wiki.biomine.skelleftea.se/biomine/molecular/index_11.htm, 23 Nisan 2013.

ULR-6, TÜ Moleküler Biyoloji ve Genetik Bölümü, <http://www.bio.itu.edu.tr>, 25 Ocak 2005

Velasquez-Orta, S.B., Head, I.M., Curtis, T.P., Scott, K., Lloyd, J.R and Canstein, H.v., 2010. The effect of flavin electron shuttles in microbial fuel cells current production. *Applied Microbial Biotechnology*. **85**, 1373–1381.

Venkata Mohan, S., Mohanakrishna, G., Reddy, B.P., Saravanan, R., Sarma, P.N., 2008. Bioelectricity generation from chemical wastewater treatment in mediatorless (anode) microbial fuel cell (MFC) using selectively enriched hydrogen producing mixed culture under acidophilic microenvironment. *Biochemical Engineering Journal*. **39**, 121–130

Vijayaraghavan, K., Ahmad, D., Lesa, R., 2006. Electrolytic treatment of beer brewery wastewater. *Industrial Engineering Chemical Research*. **45**, 6854–6859.

Wang, S., Huang, L., Gan, L., Quan, X., Li, N., Chen, G., Lu, L., Xing, D., Yang, F., 2012. Combined effects of enrichment procedure and non-fermentable or fermentable co-substrate on performance and bacterial community for pentachlorophenol degradation in microbial fuel cells. *Bioresource Technology*. **120**, 120-126.

Wang, X., Feng, Y., Ren, N., Wang, H., Lee, H., Li, N., Zhao, Q., 2009. Accelerated start-up of two-chambered microbial fuel cells: effect of positive poised potential. *Electrochemical Acta*. **54**, 1109–1114.

Wang, X., Feng, Y.J., Lee, H., 2008. Electricity production from beer brewery wastewater using single chamber microbial fuel cell. *Water Science and Technology*. **57**, 1117-1121.

Watson, V., 2008. *Shewanella oneidensis* MR-1 Compared to a Mixed Culture for Electricity Production in Four Different Batch Microbial Fuel Cell Configurations. *Thesis*, The Pennsylvania State University. Pennsylvania.

Wei, J., Liang, P., Huang, X., 2011. Recent progress in electrodes for microbial fuel cells. *Bioresource Technology*. **102**, 9335–9344.

Wen, Q., Kong, F., Zheng, H., Cao, D., Ren, Y., Yin, J., 2011. Electricity generation from synthetic penicillin wastewater in an air-cathode single chamber microbial fuel cell. *Chemical Engineering Journal*. **168**, 572-576.

Wen, Q., Wu, Y., Cao, D., Zhao, L., Sun, Q., 2009. Electricity generation and modeling of microbial fuel cell from continuous beer brewery wastewater. *Bioresource Technology*. **100**, 4171–4175.

Wen, Q., Wu, Y., Zhao, L and Sun, Q., 2010. Production of electricity from the treatment of continuous brewery wastewater using a microbial fuel cell. *Fuel*. **89**, 1381–1385.

Westermeier, R., 1997. Electrophoresis in Practice: a guide to Methods and Applications of DNA and Protein Separation, *VCH, Weinheim*.

Xi, W.J., Luo, Z.B., Dong, H.P., Cui, Q.F., Bi, Y.Q., 2012. Synthesis, characterization, and oil recovery application of biosurfactant produced by indigenous pseudomonas aeruginosa WJ-1 using waste vegetable oils. *Applied Biochemistry and Biotechnology*. **166**, 1148-1166.

Xu, J., Sheng, G-P., Luo, H-W., Li, W-W., W, L-F., Yu, H-Q., 2012. Fouling of proton exchange membrane (PEM) deteriorates the performance of microbial fuel cell. *Water Research*. **46**, 1817-1824.

Xu, S., Liu, H., 2011. New exoelectrogen Citrobacter sp. SX-1 isolated from a microbial fuel cell, *Journal of Applied Microbiology*. **111**, 1108-1115.

Yates, M.D., Kiely, P.D., Call, D.F., Rismani-Yazdi, H., Bibby, K., Peccia, J., Regan, J.M., Logan, B.E., 2012. Convergent development of anodic bacterial communities in microbial fuel cells. *Isme Journal*. **6**, 2002-2013.

Yi, H., Nevin, K.P., Kim, B.C., Franks, A.E., Klimes, A., Tender, L.M., Lovley, D.R., 2009. Selection of a variant of Geobacter sulfurreducens with enhanced capacity for current production in microbial fuel cells. *Biosensors and Bioelectronics*. **24**, 3498–3503.

Yuan, Y., Zhou, S., Xu, N., Zhuang, L., 2011. Electrochemical characterization of anodic biofilms enriched with glucose and acetate in single-chamber microbial fuel cells. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*. **82**, 641–646.

Yuan, Y., Zhou, S.G., Zhuang, L., 2010. Polypyrrole/carbon black composite as a novel oxygen reduction catalyst for microbial fuel cells. *Journal of Power Sources*. **195**, 3490–3493.

Zhang, E., Xu, W., Diao, G., Shuang, C., 2006. Electricity generation from acetate and glucose by sedimentary bacterium attached to electrode in microbial-anode fuel cells. *Journal of Power Sources*. **161**, 820-825.

Zhang, F., Cheng, S.A., Pant, D., Van Bogaert, G and Logan, B.E., 2009. Power generation using an activated carbon and metal mesh cathode in a microbial fuel cell. *Electrochemical Communications*. **11**, 2177–2179.

Zhang, G., Zhao, Q., Jiao, Y., Wang, K., Lee, D.-J., Ren, N., 2012. Efficient electricity generation from sewage sludge using biocathode microbial fuel cell. *Water Research*. **46**, 43-52.

Zhang, J.N., Zhao, Q.L., You, S.J., Jiang, J.Q., Ren, N.Q., 2008. Continuous electricity production from leachate in a novel upflow air-cathode membrane-free microbial fuel cell. *Water Science and Technology*. **57**, 1017–1021.

Zhang, Y., Sun, J., Hu, Y., Li, S., Xu, Q., 2012. Bio-cathode materials evaluation in microbial fuel cells: A comparison of graphite felt, carbon paper and stainless steel mesh materials. *International Journal of Hydrogen Energy*. **37**, 16935-16942.

Zhang, Y.F., Min, B.K., Huang, L.P., Angelidaki, I., 2009. Generation of Electricity and Analysis of Microbial Communities in Wheat Straw Biomass-Powered Microbial Fuel Cells. *Applied and Environmental Microbiology*. **75**, 3389-3395.

Zhang, Z.-J., Wang, S.-Y., Mao, X.-W., Han, X.Y., Zeng, W., Peng, Y.Z., 2008. Highly effective biological nitrogen removal from high ammonia landfill leachate. *China Environmental Science*. **28**, 225-228.

Zhao, F., Rahunen, N., Varcoe, J.R., Chandra, A., Avignone-Rossa, C., Thumser, A.E., Slade, R.C.T., 2008. Activated carbon cloth as anode for sulfate removal in a microbial fuel cell. *Environmental Science and Technology*. **42**, 4971–4976.

Zhao, G., Ma, F., Wei, L., Chua, H., Chang, C.-C., Z, X.-J., 2012. Electricity generation from cattle dung using microbial fuel cell technology during anaerobic acidogenesis and the development of microbial populations. *Waste Management*. **32**, 1651–1658.

Zuo, Y., Xing, D., Regan, J.M., Logan, B.E., 2008. Isolation of the Exoelectrogenic Bacterium *Ochrobactrum anthropi* YZ-1 by Using a U-Tube Microbial Fuel Cell. *Applied and Environmental Microbiology*. **74**, 3130-3137.

ÖZGEÇMİŞ

Ergin TAŞKAN 1983 yılında ELAZIĞ'da doğdu. İlk orta ve lise eğitimini ELAZIĞ'da tamamlayan TAŞKAN, 2006 yılında Fırat Üniversitesi Çevre Mühendisliği Bölümünde lisans, 2009 yılında Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Çevre Mühendisliği Anabilim dalında yüksek lisans derecesi aldı. 2009 yılından beri Fırat Üniversitesi Çevre Mühendisliği bölümünde araştırma görevlisi olarak çalışmaktadır. Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Çevre Mühendisliği Anabilim Dalında 2013 yılında doktora eğitimini tamamladı.