

## Mikrobiyal Yakıt Hücrelerinde Alüminyum ve Bakır Elektrotların Performansının İncelenmesi

Nurettin ÇEK\*<sup>1</sup>  Ahmet ERENŞOY<sup>2</sup> 

<sup>1</sup>Fırat Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, Elazığ  
<sup>2</sup>Fırat Üniversitesi, Tıp Fakültesi, Parazitoloji Bölümü, Elazığ

(İlk Gönderim / Received: 28. 01. 2020 Kabul / Accepted: 20. 07.2020, Online Yayın / Published Online: 27. 07. 2020)

### Anahtar Kelimeler:

Mikrobiyal yakıt hücresi,  
Bakteri,  
Alüminyum,  
Bakır

**Özet:** Mikrobiyal yakıt hücreleri, organik kirleticileri atık sulardan azaltırken elektrik enerjisi üretme yeteneklerinden dolayı iyimser yeşil teknolojilerdir. Mikrobiyal yakıt hücrelerinin elektrik üretim performansı, elektrot malzemelerine büyük ölçüde bağlıdır. Bu çalışmada, mikrobiyal yakıt hücresi sistemleri, alüminyum anot, bakır katot ve çeşitli miktarlarda organik malzemelerle zenginleştirilmiş toprak kullanılarak üretildi. 50 gram toprakta 5 gram, 10 gram ve 20 gram bitki kalıntısı içeren mikrobiyal yakıt hücreleri sırasıyla I-MYH, II-MYH ve III-MYH olarak adlandırılmıştır. 160 günlük operasyondan sonra mikrobiyal yakıt hücrelerinin elektrokimyasal ve mikrobiyolojik özellikleri analiz edildi. Bu çalışmada, I-MYH, II-MYH ve III-MYH'nin en yüksek güç yoğunlukları sırasıyla 11875 mW/m<sup>2</sup>, 21125 mW/m<sup>2</sup> ve 26250 mW/m<sup>2</sup> olarak hesaplandı. Bu sonuçlar, alüminyumun uygun anot elektrot malzemeleri ve bakırın uygun katot elektrot malzemeleri olduğunu göstermektedir. Bu çalışmanın bir diğer sonucu, *Bacillus*, *Coccus* ve *Coccobacillus* bakterilerinin mikrobiyal yakıt hücrelerinde biyokatalizör görevi görmesidir.

## Examination of Performance of Aluminium and Copper Electrodes in Microbial Fuel Cells

### Keywords:

Microbial fuel cell,  
Bacteria,  
Aluminium,  
Copper

**Abstract:** Microbial fuel cells are optimistic green technologies since they are skills to generate electrical energy while reducing organic contaminants from wastewater. The electrical generation performance of microbial fuel cells are momentous dependent on the electrode materials. In this study, microbial fuel cell systems were manufactured using aluminium anode, copper cathode and soil enriched with varying amounts of organic materials. Microbial fuel cells containing 5 grams, 10 grams and 20 grams plant residues in 50 grams of soil were named as I-MYH, II-MYH, and III-MYH, respectively. The electrochemical and microbiologic properties of the microbial fuel cells after 160-day operation were analysed. In this study, the highest power densities of I-MYH, II-MYH, and III-MYH were calculated as 11875 mW/m<sup>2</sup>, 21125 mW/m<sup>2</sup> and 26250 mW/m<sup>2</sup>, respectively. These results show that aluminium is the appropriate anode electrode materials and copper is the appropriate cathode electrode materials. Another result of this study is that *Bacillus*, *Coccus* and *Coccobacillus* bacteria serve as biocatalysts in microbial fuel cells.

## 1. GİRİŞ

Bir yenilenebilir enerji kaynağı türü olan biyokütle enerjisi; bitki, hayvan ve onların atıklarından ortaya çıkmaktadır (Çek, 2013;

Çek, 2016). Biyokütle enerjisinin ana unsuru olan biyokütleyi oluşturan organik malzemelerin sahip oldukları kimyasal enerji vardır. Mikrobiyal yakıt hücreleri,

\* İlgili yazar: nurettincek001@gmail.com

biyokütledeki organik maddelerin sahip oldukları kimyasal enerjiyi doğrudan elektrik enerjisine çeviren cihazlardır. Mikrobiyal yakıt hücreleri, diğer biyokütle esaslı elektrik enerjisi üretim sistemlerinden farklı olarak doğrudan elektrik üretimi sağlamaktadırlar (Çek, 2016; Çek, 2017; Erensoy and Çek, 2018; Çek ve Erensoy, 2019; Harshitha et al., 2019; Jenol et al., 2019; Chandra et al., 2019).

Mevcut kaynaklar vasıtasıyla enerji üretimi, iklim değişikliği üzerinde doğrudan bir etki göstermiştir (Chandra et al., 2019). Yakıt olarak son yıllarda hidrojen büyük ilgi gördü. Ancak daha ilginç olarak, mikrobiyal yakıt hücresi, elektrik üretimi için daha çevre dostu görünmektedir. Diğer yakıt hücresi sistemleri ile karşılaştırıldığında, hafif reaksiyon koşulları, enerji dönüşüm verimliliği ve çevre dostu olma özellikleri mikrobiyal yakıt hücrelerinin avantajları olarak sayılır (Harshitha et al., 2019). Mikrobiyal yakıt hücreleri; atık suları temizlemede, elektrik üretiminde, sensörlere ve mikrodenetçilere güç kaynağı olarak kullanılmaktadır (Kılıç ve ark., 2011; Aydın ve ark., 2016; Demir ve Gümüş, 2016; Taşkan, 2016; Erenler ve Ülke 2018).

Mikrobiyal yakıt hücreleri temel olarak anot elektrot, katot elektrot, elektrolit, yakıt kaynağı (organik malzeme), mikroorganizma ve proton değişim membranından oluşmaktadır (Demir ve Gümüş, 2016; State et al., 2019). Mikrobiyal yakıt hücrelerini oluşturan temel unsurlar, onların elektriksel performanslarını da etkileyen unsurlardır (Çek, 2017; Erensoy and Çek, 2018; Çek ve Erensoy, 2018; State et al., 2019). Daha önceki çalışmalarda, mikrobiyal yakıt hücrelerinin düşük enerji çıktıları ve sınırlı ömürleri olduğu belirtilmiştir. Özellikle elektrot malzemelerinin ve proton değişim membranlarının yüksek maliyetleri mikrobiyal yakıt hücrelerini ekonomik olarak sınırlandıran faktörlerdendir. Mikrobiyal yakıt hücrelerinin elektriksel güç çıkışını sınırlayan temel faktörler anot için elektron transfer hızı ve malzemenin elektrokimyasal özellikleridir (Deng et al., 2010; State et al., 2019). Ayrıca, proton değişim membranı mikrobiyal yakıt hücrelerinin ana

direnç kaynağıdır (State et al., 2019). Bu nedenle, daha düşük iç direnç oluşturarak daha yüksek elektriksel güç çıkışı sağlamak için membransız mikrobiyal yakıt hücreleri imal edilmiştir (Erensoy and Çek, 2018; Çek ve Erensoy, 2019; Pareek et al., 2019).

Mikrobiyal yakıt hücrelerinde elektrot malzemeleri hücre performansını etkileyen temel unsurlardan olduğu için elektrot malzemeleri ile ilgili çok sayıda araştırma yapılmıştır. Sadece grafit, grafit plaka, karbon kağıdı, keçe veya köpük, ağ yapılı vitrifiye karbon (RVC), karbon kumaş, karbon elyaf, aktif karbon, grafen, grafit granül, grafit çubuk, grafit fiber, grafit fiber fırça gibi malzemelerin mikrobiyal topluluk karışımı ortamındaki stabilitesi, yüksek iletkenliği ve yüksek spesifik yüzey alanı özellikleri var olduğundan dolayı bunlar mikrobiyal yakıt hücrelerinde en çok tercih edilen karbon esaslı elektrot malzemeleridir (Çek, 2016; Çek, 2017; Erensoy and Çek, 2018; State et al., 2019; Özcan, 2013).

Mikrobiyal yakıt hücreleri ile ilgili son yıllarda yapılan çalışmalarda; çinko, bakır, titanyum, kobalt, nikel, gümüş, altın, platin, paslanmaz çelik, alüminyum gibi metal elektrotlar da kullanılmıştır (Özcan, 2013; Baudler et al., 2015; Çek, 2016; Bose et al., 2018; Girma et al., 2018; Çek ve Erensoy, 2019). Yapılan araştırmalara göre, mikrobiyal yakıt hücrelerinde metalik elektrotların kullanılması mikrobiyal yakıt hücrelerinin güç çıkışını arttırmıştır (Özcan, 2013; Çek, 2017; Çek ve Erensoy, 2019). Bu nedenle mikrobiyal yakıt hücresi uygulamalarında metalik elektrotların araştırılması ve en uygun elektrotun bulunması mikrobiyal yakıt hücrelerinin gelişimi için büyük bir gelişme sağlayabilir.

Mikrobiyal yakıt hücrelerinde metal elektrotların kullanımı ile ilgili yapılan bir çalışmada, anti bakteriyel özellikleri nedeniyle mikrobiyal yakıt hücrelerinde kullanımı tercih edilmeyen malzemelerden biri olan bakır metalinin mikrobiyal yakıt hücrelerindeki bakterilerle uyumlu olduğu ve bakterilerin bakırın yüzeyinde biyofilm tabakası

oluşturduğu tespit edilmiştir (Baudler et al. 2015). Buna ilaveten, bakır düşük özgül direnç ( $1.7 \times 10^{-8} \Omega m$ ) ve yüksek iletkenlik ( $58 \times 10^6 S/m$ ) özelliğine sahip olduğu için mikrobiyal yakıt hücrelerinde elektrot olarak kullanılabilir ve mikrobiyal yakıt hücrelerinin güç çıkışını arttırabilir (Baudler et al. 2015).

Mikrobiyal yakıt hücrelerinde kullanılan ancak elektrokimyasal özellikleri ve mikrobiyal yakıt hücrelerinde performansları net olarak irdelenmemiş elektrotlardan birisi de alüminyumdur. Oysaki alüminyum, oksijen ve silisyumdan sonra doğada en çok bulunan elementtir (Ediz, 2011). Bu nedenle alüminyum, karbon esaslı ve diğer metal esaslı elektrotlara kıyasla daha kolay bulunabilecek bir malzeme olduğundan mikrobiyal yakıt hücreleri için daha sürdürülebilir elektrot malzemesi olabilir.

Bu çalışmada, değişik miktarlarda organik malzeme bakımından zenginleştirilmiş toprak, alüminyum folyo anot elektrot ve bakır katot elektrot kullanılarak imal edilen mikrobiyal yakıt hücrelerinin elektrokimyasal performansları, mikrobiyolojik özellikleri ve elektrotların yüzey özellikleri incelenmiştir.

## 2. MATERYAL ve METOT

### 2.1. Materyal

Alüminyum folyo elektrot; %99.9 saflıkta, 6  $\mu m$  kalınlığında, 12 cm uzunluğunda ve 4 cm genişliğindedir. Bakır silindir çubuk elektrot; 12 cm uzunluğunda, 0.75 mm çapındadır. Dijital multimetre (UNI-T:UT61C). Direnç; 10-220000 ohm ( $\Omega$ ). Mikroskop (SOIF, BK5000-TR/L). Dijital PH metre (616.0.001, ISOLAB). Hassas tartı (PKS 360-3, KERN). Plastik kap; 7.61 cm uzunluğunda, alt kısmı 4.1 cm çapında, üst kısmı 6.3 cm çapında, kesik koni şeklindedir.

### 2.2. Metot

Üç adet plastik kap alındı ve her birinin içerisine 50 gram (g) doğal toprak yerleştirildi. Ardından, toprak içerisinde değişik miktarlarda

organik malzeme oluşturarak üretilen elektrik enerjisindeki değişimleri tespit etmek için plastik kaplara 50 mililitre (mL) su ve sırasıyla 5 g, 10 g ve 20 g bitki artığı yerleştirildi. Sonra, üç plastik kutunun her birinin içerisine birbirleri ile fiziksel temas olmayacak şekilde alüminyum ve bakır elektrotlar yerleştirildi. Böylece, farklı miktarlarda organik malzeme içeren toplam 3 adet mikrobiyal yakıt hücresi imal edildi. 5 g, 10 g ve 20 g bitki artığı içeren mikrobiyal yakıt hücreleri sırasıyla I-MYH, II-MYH ve III-MYH olarak isimlendirildi.

I-MYH, II-MYH ve III-MYH'nin açık devre gerilimleri (OCV) günlük olarak dijital multimetre cihazı ile izlendi. Daha önceki çalışmalarda olduğu gibi, mikrobiyal yakıt hücrelerinin açık devre geriliminin sabit olduğu anda 10  $\Omega$  ile 220000  $\Omega$  arasında değişen dış dirençler kullanılarak I-MYH, II-MYH ve III-MYH'nin kutuplaşma (polarizasyon) eğrileri oluşturulmuştur (Çek, 2017; Erenşoy and Çek, 2018; Çek ve Erenşoy, 2019; Chandra et al., 2019; Harshitha et al., 2019; Pareek et al., 2019). Kutuplaşma eğrilerinde elde edilen gerilim ile akım değerleri Eşitlik (1)'e uygulanarak güç değerleri elde edilmiştir.

$$P=V \times I \quad (1)$$

Burada, P güç değerini (mW), V kutuplaşma eğrilerindeki gerilim değerini (mV) ve I kutuplaşma eğrilerindeki akım değerini ( $\mu A$ ) ifade etmektedir.

I-MYH, II-MYH ve III-MYH'nin güç yoğunluğu değerleri Eşitlik (2) kullanılarak hesaplanmıştır.

$$P_d = \frac{P}{S} \quad (2)$$

Burada,  $P_d$  güç yoğunluğu ( $mW/m^2$ ), P güç değeri (mW) ve S anot elektrotun geometrik yüzey alanı ( $m^2$ ) olarak ifade edilmektedir.

I-MYH, II-MYH ve III-MYH'de kullanılan anot ve katot elektrotların deneylerden önce ve deneylerden sonraki yüzey değişimleri karşılaştırıldı. Bu çalışmadaki mikrobiyal yakıt hücrelerinin elektrolitlerinin

deneylelerden önce ve deneylelerden sonra pH değışimleri incelendi. Ayrıca, mikrobiyal yakıt hücreleri imal edilmeden önce ve mikrobiyal yakıt hücreleri deneylelerinin sonunda, toprak, su ve organik malzemeden oluşan elektrolit (çözelti) mikroskop ile incelendi. Mikroskop görüntüleri ile bakteriler ve bitki lifleri tespit edilip bunların özellikleri belirtildi.

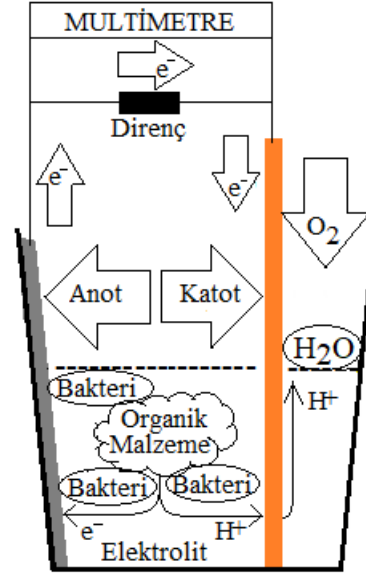
### 3. BULGULAR ve TARTIŞMA

#### 3.1. Elektrokimyasal Analizler

Bu çalışmadaki mikrobiyal yakıt hücrelerine multimetre bağlandığında alüminyumun (-) yüklü, bakırın (+) yüklü olduğu görülmüştür. Bu nedenle alüminyum anot elektrot, bakır katot elektrottur. Zaten metallerin standart elektrot potansiyelleri incelendiğinde, alüminyumun anot bakırın katot olduğu anlaşılmaktadır. Daha önceki çalışmalarda olduğu gibi, I-MYH, II-MYH ve III-MYH'deki toprak, su ve organik maddeden oluşan yapı iyonik iletkenliğe sahip olduğu için elektrolit veya çözelti olarak adlandırılmaktadır (Baudler et al., 2015; Çek, 2017; Erensoy and Çek, 2018; Çek ve Erensoy, 2019; State et al., 2019).

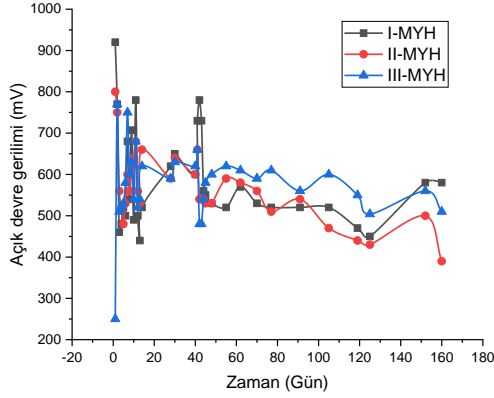
Daha önceki çalışmalarda olduğu gibi, bu çalışmadaki I-MYH, II-MYH ve III-MYH'deki organik malzemeler, bakterilerin metabolik aktiviteleri sonucu oksitlenip parçalanarak elektronları ( $e^-$ ) ve protonları (hidrojen iyonları ( $H^+$ )) serbest bırakılır. Serbest bırakılan elektronlar elektrolit içerisinde anot elektrotuna göç ederken protonlar da elektrolit içerisinde katot elektrotta göç ederler. Anot elektrotta ulaşan elektronlar dış devre aracılığıyla katot elektrotta giderler. Katot elektrotta ulaşan elektronlar, katot elektrotta ulaşan protonlar ve havadan alınan oksijen kimyasal tepkimeye girerek katot elektrot çevresinde su oluştururlar. Böylece mikrobiyal yakıt hücreleri elektrik enerjisi üretmektedir. Alüminyum anot elektrotta yükseltgenme (oksidasyon) tepkimesi gerçekleşirken, bakır katot elektrotta indirgenme (redüksiyon) tepkimesi gerçekleşmektedir. Bir başka deyişle, mikrobiyal yakıt hücreleri, anot elektrotta

gerçekleşen yükseltgenme ve katot elektrotta gerçekleşen indirgenme tepkimeleri sonucu yani redoks tepkimeleri sonucu elektrik enerjisi üreten sistemlerdir (Çek, 2016; Çek, 2017; Erensoy and Çek, 2018; Çek ve Erensoy, 2019; Deng et al., 2010; Pareek et al., 2019; State et al., 2019). Bu çalışmadaki I-MYH, II-MYH ve III-MYH'nin elektrik enerjisi üretim mekanizması Şekil 1'de gösterilmiştir.



Şekil 1. Mikrobiyal yakıt hücrelerinin elektrik üretim mekanizması

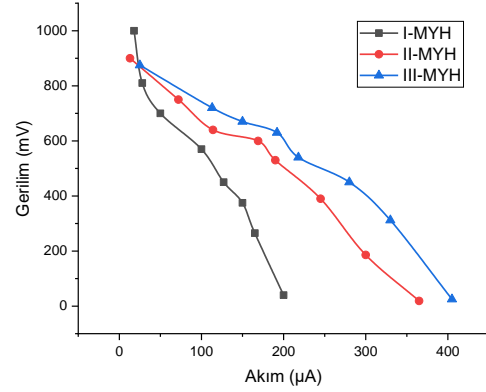
Açık devre gerilimi (OCV), mikrobiyal yakıt hücrelerindeki bir anot ile bir katot arasındaki redoks (yükseltgenme-indirgenme) tepkimeleri sonucu ortaya çıkan potansiyel farkı ölçer. Mikrobiyal yakıt hücrelerinin en yüksek hücre gerilimi (voltajı) veya açık devre voltajı (OCV), harici direncin sonsuz olduğu bir açık devrede elde edilmektedir. Bir başka deyişle, açık devre gerilimi mikrobiyal yakıt hücrelerinin yüksüz gerilimidir. I-MYH, II-MYH ve III-MYH'nin açık devre gerilimleri (OCV) günlük olarak multimetre ile ölçülmüştür. Ölçüm sonuçları Şekil 2'de verilmiştir.



**Şekil 2.** Mikrobiyal yakıt hücrelerinin günlük açık devre gerilimi (OCV) değerleri

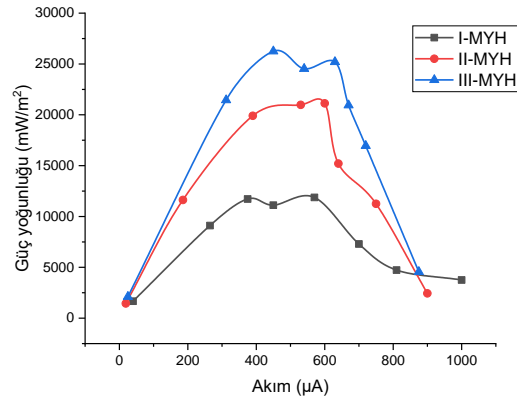
Şekil 2’de görüldüğü üzere bu çalışmadaki mikrobiyal yakıt hücrelerinin OCV değerleri 160 gün boyunca izlenmiştir. Bu süre zarfında, I-MYH, II-MYH ve III-MYH’nin en yüksek açık devre gerilimi değerleri sırasıyla, 920 mV, 800 mV ve 770 mV olarak ölçülmüştür. İlaveten, I-MYH ve II-MYH en yüksek açık devre gerilimlerini 1. günde sağlarken III-MYH en yüksek açık devre gerilimini 2. gün sağlamıştır. I-MYH, II-MYH ve III-MYH’nin en düşük açık devre gerilimi değerleri sırasıyla, 440 mV, 390 mV ve 250 mV olarak ölçülmüştür. I-MYH, II-MYH ve III-MYH en düşük açık devre gerilimi değerlerini sırasıyla, 13. günde, 160. günde ve 1. günde sağlamıştır.

Polarizasyon eğrisi elektrokimyasal reaksiyonlarda ana kavramdır. Polarizasyon eğrileri, akım veya akım yoğunluğunun bir fonksiyonu olarak mikrobiyal yakıt hücrelerinin gerilimlerinin grafikleridir. I-MYH, II-MYH ve III-MYH’nin polarizasyon eğrilerini elde etmek için mikrobiyal yakıt hücrelerine 10  $\Omega$  ile 220000  $\Omega$  arasında değiştirilen dış dirençler bağlandı (Deng et al., 2010; Baudler et al., 2015; Çek, 2017; Erensoy and Çek, 2018; Çek ve Erensoy, 2019). I-MYH, II-MYH ve III-MYH’nin polarizasyon eğrileri Şekil 3’te verilmiştir.



**Şekil 3.** Mikrobiyal yakıt hücrelerinin kutuplaşma eğrileri

Polarizasyon eğrisi ve güç yoğunluğu, mikrobiyal yakıt hücrelerinin performansını yansıtabilir. I-MYH, II-MYH ve III-MYH’nin güç yoğunluğu eğrileri, kutuplaşma verilerinden, Eşitlik (1) ve Eşitlik (2)’den faydalanılarak hesaplandı. Elde edilen güç yoğunluğu eğrileri, Şekil 4’te gösterilmiştir.



**Şekil 4.** Mikrobiyal yakıt hücrelerinin güç yoğunluğu eğrileri

Şekil 4’e göre bu çalışmadaki I-MYH, II-MYH ve III-MYH’nin en yüksek güç yoğunlukları sırasıyla, 11875 mW/m<sup>2</sup>, 21125 mW/m<sup>2</sup> ve 26250 mW/m<sup>2</sup> olarak hesaplanmıştır. Görüldüğü gibi bu çalışmadaki en yüksek güç yoğunluğu III-MYH’de elde edilmiştir. Bu nedenle bu çalışmadaki III-MYH’nin güç yoğunluğu daha önceki çalışmalardaki en yüksek güç yoğunluğu ile

kıyaslandı. Kıyaslanma sonuçları Çizelge 1’de verilmiştir.

**Çizelge 1.** III-MYH’nin daha önceki çalışmalarla kıyaslanması

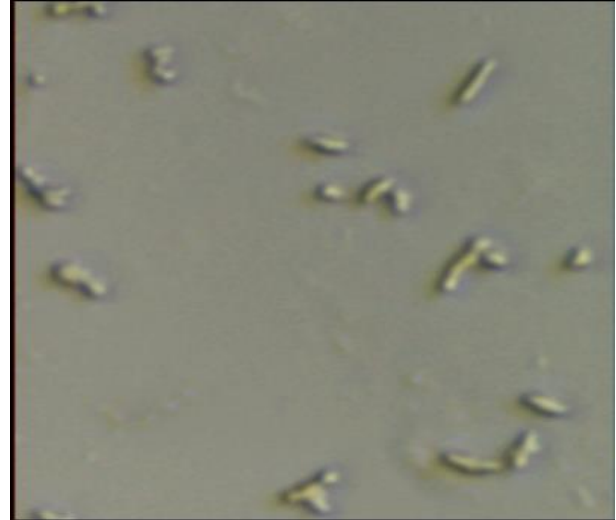
Anot elektrot (-)	Katod elektrot (+)	Biyoyakıt (Organik malzeme)	Güç ( $\frac{mW}{m^2}$ )
Titanyum	Titanyum	Kompost	4,025 (Çek ve Erensoy, 2019)
Grafen oksit	Grafen oksit	Atık su	6 (Pareek et al. 2019).
Grafit	Grafit	Sediment	10,2 (Taşkan, 2016).
Karbon keçe	MnO <sub>2</sub> kaplı karbon bez	Organik malzeme	41,7 (Deng et al., 2010).
Karbon elyafı	Karbon elyafı	Sentetik atıksu	234 (Özcan, 2013).
Çinko	Grafit	Kompostlu toprak	5335,5 (Çek, 2017).
Grafit	Grafit	Kavak talaşı	8555 (Erensoy and Çek, 2018).
Alüminyum	Bakır	Bitki artıkları	26250 (Bu çalışma)

Çizelge 1’den görüleceği üzere bu çalışmadaki güç yoğunluğu diğer mikrobiyal yakıt hücresi çalışmalarına göre daha yüksek değerdedir. Bu durum, mikrobiyal yakıt hücrelerinin güç yoğunluğunu arttırmak için uygun elektrot malzemesinin, uygun biyoyakıt malzemesinin, uygun mikroorganizmanın bir arada olması gerektiğinin kanıtıdır. Ayrıca, bu çalışma, alüminyumun uygun anot elektrot malzemesi, bakırın uygun katod elektrot malzemesi olduğunu göstermektedir. İlaveten, Çizelge 1 dikkatli incelendiğinde, alüminyum ve bakır elektrotların grafit, grafen oksit, titanyum, karbon keçe, karbon elyafı, MnO<sub>2</sub> kaplı karbon bez elektrotlara alternatif elektrot malzemeleri olduğunun da bir göstergesidir. Bu çalışmanın temel bulgusu, alüminyum ve bakır elektrotların mikrobiyal biyoelektrokimyasal

sistemler için yüksek performanslı birer elektrot malzemeleri olarak açıkça önerilebilir olmasıdır.

### 3.2. Mikrobiyolojik Analizler

Bu çalışmadaki mikrobiyal yakıt hücrelerinde kullanılan doğal toprak kapalı plastik kaptaki 24 saat suda bekletildikten sonra mikroskopta incelenmiştir. Mikroskop görüntülerine göre bu çalışmadaki toprakta *bacillus*, *coccus* ve *coccobacillus* türü bakterilerin mevcut olduğu görülmüştür. Doğal toprağın deneylerden önceki mikroskop görüntüsü Şekil 5’te mevcuttur.



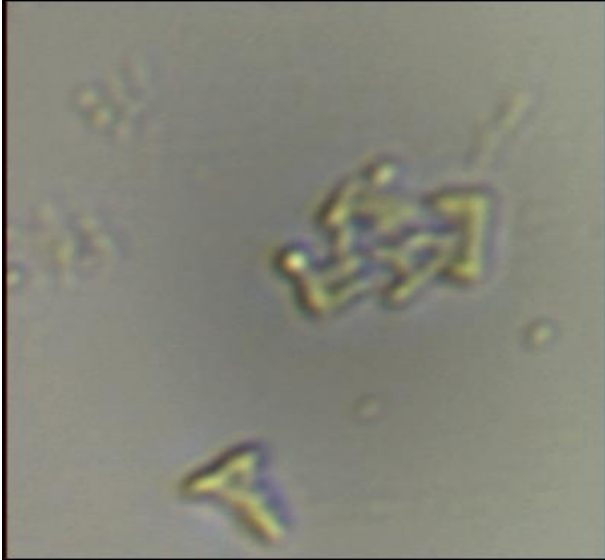
**Şekil 5.** Doğal topraktaki bakterilerinin mikroskop görüntüsü (20x büyütme)

Deneylerin sonunda I-MYH, II-MYH ve III-MYH’nin toprak, su ve organik malzemedeki oluşan elektrolitleri mikroskop ile incelendi. Her üç mikrobiyal yakıt hücresinde de bitki lifleri, *Bacillus*, *Coccus* ve *Coccobacillus* türü bakteriler görülmüştür. Bitki lifine ait mikroskop görüntüsü Şekil 6’da verilmiştir.



Şekil 6. Bitki lifinin mikroskop görüntüsü (20x büyütme)

I-MYH, II-MYH ve III-MYH'nin elektrolitlerinde görülen *Bacillus*, *Coccus* ve *Coccobacillus* türü bakterilere ait mikroskop görüntüleri Şekil 7'de verilmiştir.



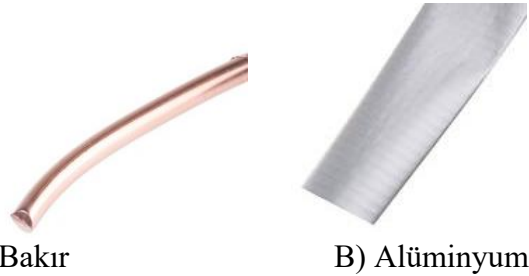
Şekil 7. Mikrobiyal yakıt hücrelerindeki bakterilerin deneylerden sonraki mikroskop görüntüsü (40x büyütme)

Şekil 5 ile Şekil 7 kıyaslandığında, bu çalışmada tespit edilen bakterilerin deneylerden önce ve deneylerden sonra morfolojik özelliklerinin değişmediği görülmüştür. Bu durum, *bacillus*, *coccus* ve *coccobacillus* bakterilerinin bu çalışmadaki mikrobiyal yakıt hücrelerinde biyokatalizör görevi gördüklerinin bir göstergesidir. Bakterilerin etkisini anlamak için deneylerden önce ve deneylerden sonra mikrobiyal yakıt hücrelerinin PH değerleri incelenmiş ve Çizelge 2'de verilmiştir.

Çizelge 2. Mikrobiyal yakıt hücrelerin PH değişimi

Zaman	I-MYH	II-MYH	III-MYH
1. gün	8	8	8
160. gün	7.68	7.68	7.68

Çizelge 2'deki verilere göre mikrobiyal yakıt hücrelerinin PH değerlerindeki değişimin bakterilerin metabolik aktiviteleri sonucu gerçekleştiğini düşünmekteyiz. Ayrıca, PH değerinin azalması bakterilerinin organik malzemeyi ayrıştırdığının ve organik malzemedeki asitli yapıları açığa çıkardığının bir göstergesidir. Organik malzemedeki asitlerin açığa çıkması aynı zamanda organik malzemedeki proton ve elektronların da açığa çıkmasıdır. Bu durum, *bacillus*, *coccus* ve *coccobacillus* bakterilerinin mikrobiyal yakıt hücrelerinde biyokatalizör görevi yaptığının bir başka göstergesidir. Bu çalışmadaki mikrobiyal yakıt hücrelerinde kullanılan elektrotların deneylerden önceki görüntüleri Şekil 8'de verilmiştir.



Şekil 8. Elektrotların deneylerden önceki görüntüsü

Şekil 8'de görüldüğü gibi, deneylerden önce elektrotların yüzeyleri parlak ve homojen bir görüntüye sahiptir.

I-MYH, II-MYH ve III-MYH'deki alüminum anot ve bakır katot elektrotların yüzeyi deneylerin sonra incelendiğinde yüzeylerdeki değişim gözle görülür düzeyde olmuştur. Alüminyum anot yüzeyinde kararmalar ve siyah bir tabaka meydana gelmiştir. Bakır katot yüzeyinde ise hafif

kararmalar ve yeşillenmeler meydana gelmiştir. Elektrotların yüzeylerindeki değişim Şekil 9'da gösterilmiştir.



Şekil 9. Elektrotlardaki yüzey değişimi

Deneylerin sonunda mikrobiyal yakıt hücrelerindeki elektrotların yüzey değişimi, elektrotlarda meydana gelen indirgenme ve yükseltgenme tepkimeleri nedeniyledir. Alüminyum anot elektrottaki yükseltgenme tepkimesi *bacillus*, *coccus* ve *coccobacillus* bakterilerinin metabolik aktiviteleri nedeniyle gerçekleşmiştir. Bu nedenle alüminyum yüzeyindeki siyah tabaka bakterilerin sebep olduğu biyofilm tabakasıdır. Anot yüzeyleri ile elektrolitteki organik madde arasındaki yakın fiziksel etkileşimi destekleyen biyofilmler mikrobiyal yakıt hücrelerinin güç çıkışı için önemlidir. Çünkü, yapılan araştırmaların büyük çoğunluğuna göre anot yüzeylerindeki biyofilmler mikrobiyal yakıt hücrelerinin güç yoğunluğunu arttırmıştır (Kumari et al., 2015; Jiawei and Shaoan, 2019). Ayrıca, yapılan çalışmalara göre, katot elektrot üzerinde de bakterilerden kaynaklanan biyofilm oluşumu mümkündür. Yapılan araştırmalara göre katot elektrot üzerinde aerobik biyofilm büyüdüğü zaman katot elektrot gelişmiş elektrokatalitik davranış göstermektedir. Kısacası, bu

çalışmadaki *bacillus*, *coccus* ve *coccobacillus* bakterilerinin biyokatalizör görevi yapmaları nedeniyle gerek anot elektrotta gerek katot elektrotta bakterilerden oluşan biyofilm tabakaları oluşmuştur. Bu biyofilm tabakarı, yükseltgenme ve indirgenme tepkimelerine katkıda bulunduğu için mikrobiyal yakıt hücrelerinin güç çıkışının artmasına katkı sağlamıştır (Kumari et al., 2015; Jiawei and Shaoan, 2019).

#### 4. SONUÇ

Daha önceki çalışmalar ile kıyaslandığında bu çalışma, mikrobiyal yakıt hücreleri için alüminyumun uygun bir anot elektrot malzemesi olduğunu ve bakırın uygun bir katot elektrot malzemesi olduğunu göstermiştir. Alüminyum anot elektrot özellikle daha önceki çalışmalarda kullanılan titanyum, grafen oksit, grafit, karbon keçe, karbon elyafı, çinko gibi malzemelere göre daha iyi bir anodik performans göstermiştir. Çünkü alüminyum daha yüksek standart elektrot potansiyeline sahiptir. Alüminyumun doğada en çok bulunan üçüncü element olması nedeniyle bu çalışmadaki anot elektrotun daha sürdürülebilir olmasını ve maliyetinin diğer çalışmalardakine göre daha düşük olmasını sağlamaktadır. Bu çalışmada, göze çarpan bir diğer sonuç da bakır katot elektrotun mikrobiyal yakıt hücrelerinde titanyum, grafen oksit, grafit, MnO<sub>2</sub> kaplı karbon bez, karbon elyafı gibi malzemelere kıyasla daha iyi katodik performans göstermesidir. Bakır, daha düşük özgül dirence, daha yüksek iletkenliğe sahip olduğu için mikrobiyal yakıt hücrelerinin performanslarının artmasına katkı sağlamıştır. Alüminyumun anodik, bakırın katodik performansı bu çalışmadaki mikrobiyal yakıt hücrelerinin daha yüksek elektrokimyasal performansa sahip olmasına imkan tanımıştır. Bu nedenle, Çizelge 1'de bahsedilen daha önceki çalışmalara göre bu çalışmada daha yüksek elektriksel güç elde edilmiştir.

Bununla birlikte, bu çalışmadaki önemli bir sonuç da, *bacillus*, *coccus* ve *coccobacillus* bakterilerinin alüminyum anot ve bakır katot ile



uyum sağlamalarıdır. Bu nedenle alüminyum anot yüzeyinde gözle görülür düzeyde biyofilm tabakası oluşmuştur. Bakır katot elektrotta ise oksitlenmeye bağlı olarak gözle görülür oksit film tabakası oluşmuştur. Bu tabakaların oluşumu ve gelişimi mikrobiyal yakıt hücrelerinin performansını olumlu yönde etkilemiştir. Bununla birlikte, III-MYH’de daha yüksek oranda organik malzeme olduğu için bakterilere daha uzun süreli ve daha çok besin sağlandığını, bu nedenle kataliz tepkimelerinin daha etkili ve daha uzun süreli gerçekleştiğini düşünmekteyiz.

Sonuç olarak bu çalışmada, biyokatalizör olarak görev yapan *bacillus*, *coccus* ve *coccobacillus* bakterileri, alüminyum anot ve bakır katot elektrot bir uyum içerisinde çalıştığı için daha yüksek elektriksel güç yoğunluğuna ve sürdürülebilir elektrot malzemesine sahip daha düşük maliyetli mikrobiyal yakıt hücreleri imal edilmiştir.

## TEŞEKKÜR

Bu çalışmamızın gerçekleşmesi için gerekli alet, cihaz, malzeme, donanım desteği sağladıkları için Koç Holding’e, Arçelik’e, TÜPRAŞ’a, Fethi Gedik’e teşekkür ederiz.

## KAYNAKLAR

- Aydın, İ., Çalışıyor, A., Üstün, Ö., (2016). Düşük Güçlü Sistemler için Alternatif Enerji Kaynağı: Mikrobiyal Yakıt Hücreleri. ELECO`2016 Elektrik-Elektronik-Bilgisayar Mühendisliği Sempozyumu ve Fuarı. 1-3 Aralık, Bursa, 1-75.
- Baudler, A., Schmidt, I., Langner, M., Greiner, A., Schröder, U., (2015). Does it have to be carbon? Metal anodes in microbial fuel cells and related bioelectrochemical systems. Energy Environmental Science, 8, 2048-2055.
- Bose, D., Bose, A., Kundani, D., Gupta, D., Jain, H., (2018). Comparative Analysis of Carbon Cloth and Aluminum Electrodes Using Agar Salt-Bridge Based Microbial Fuel Cell for Bioelectricity Generation from Effluent Derived

Wastewater. Nature Environment and Pollution Technology, 17(4), 1201-1205.

- Chandra, R., Amit, Ghosh, U. K., (2019). Effects of various abiotic factors on biomass growth and lipid yield of *Chlorella minutissima* for sustainable biodiesel production. Environmental Science and Pollution Research, 26, 3848-3861.
- Çek, N., (2013). Yeni Biyoenerji Tekniğiyle Elektrik Üretilmesi. Çukurova Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, 28(2), 35-49.
- Çek, N., (2016). Parçacıklar ve Enerji Kaynakları. Lambert Academic Publishing, Saarbrücken, 338.
- Çek, N., (2017). Examination of Zinc Electrode Performance in Microbial Fuel Cells. Gazi University Journal of Science, 30(4), 395-402.
- Çek, N., Erensoy A., (2019). Kompost Mikrobiyal Yakıt Hücreleri İçin Titanyum Elektrot Performansının İncelenmesi. Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi, 17, 909-915.
- Demir, Ö., Gümüş, E., (2016). Mikrobiyal Yakıt Hücreleri ile Çamur Arıtımı ve Elektrik Üretimi. Sinop Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi, 1(2), 81-89.
- Deng, L., Li, F., Zhou, S., Huang, D., Ni, J., (2010). A study of electron-shuttle mechanism in *Klebsiella pneumoniae* based-microbial fuel cells. Chinese Science Bulletin, 55, 99-104.
- Ediz, Ç., (2011). Alüminyumun Geri Dönüşüm Süreci ve Süreçte Kullanılan Malzemelerin Alüminyum Bileşenlerine Etkileri. Yüksek Lisans Tezi, Bilecik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Bilecik.
- Erenler, A. Ş., Ülke, E. N., (2018). Mikrobiyal Yakıt Hücre Teknolojisini Kullanarak Gıda Endüstrisi Atıklarından Elektrik Enerjisi Üretimi. Batman Üniversitesi Yaşam Bilimleri Dergisi, 8(2/2), 22-36.
- Erensoy, A., Çek, N., (2018). Alternative Biofuel Materials for Microbial Fuel Cells from Poplar Wood. Chemistry Select, 3(40), 11251-11257.
- Girma, M. I. N. M., Chala, C. T., a/L Ravichanthiran, S., (2018). Influence of Aluminum Mesh electrode on Performance of a

- Microbial Fuel Cell (MFC). International Journal of Engineering and Technology, 7(3), 176-180.
- Harshitha, G., Sahoo, A., Sethy, R., (2019). Bioelectricity generation from different biomass feed at anode chamber and to study process parameters in microbial fuel cells. Biocatalysis and Agricultural Biotechnology, 20, 101191 (4 pages).
- Jenol, M. A., Ibrahim, M. F., Bahrin, E. K., Kim, S. W., Abd-Aziz, S., (2019). Direct Bioelectricity Generation from Sago Hampas by *Clostridium beijerinckii* SR1 Using Microbial Fuel Cell. Molecules, 24(13), 2397 (11 pages).
- Jiawei, Y., Shaoan, C., (2019). Effects of Using Anode Biofilm and Cathode Biofilm Bacteria as Inoculum on the Start-up, Electricity Generation, and Microbial Community of Air-Cathode Single-Chamber Microbial Fuel Cells. Polish Journal of Environmental Studies, 28(2), 693-700.
- Kılıç, A., Uysal, Y., Çınar, Ö., (2011). Laboratuvar Ölçekli Bir Mikrobiyal Yakıt Hücresinde Sentetik Atıksudan Elektrik Üretimi. Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 17 (1),43-49.
- Kumari, S., Mangwani, N., Das, S., (2015). Low-voltage producing microbial fuel cell constructs using biofilm-forming marine bacteria. Current Science, 108(5), 925-932.
- Özcan, E., (2013). Mikrobiyal Yakıt Hücrelerinde Membran ve İşletme Şartlarındaki Değişimin Güç Üretimine Etkisi. Yüksek Lisans Tezi, Hacettepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Pareek, A., Sravan, J.S., Mohan, S.V., (2019). Exploring chemically reduced graphene oxide electrode for power generation in microbial fuel cell. Materials Science for Energy Technologies, 2(3), 600-606.
- State, A. J., Whitehead, K. A., Brownson, D. A. C., Banks, C. E., (2019). Microbial fuel cells: An overview of current technology. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 101, 60-81.
- Taşkan, E., (2016). Sediment Tipi Mikrobiyal Yakıt Hücresi Kullanılarak Arıtma Çamurlarından Elektrik Üretimi. Fırat Üniv. Müh. Bil. Dergisi, 28(1), 15-21.