

PAPER DETAILS

TITLE: Sediment Mikrobiyal Yakıt Hücrelerinde Bakir ve Grafit Katot Elektrotların Kullanımı

AUTHORS: Namik AK,Ayhan ORHAN,Ahmet ERENŞOY,Nurettin ÇEK

PAGES: 942-951

ORIGINAL PDF URL: <https://dergipark.org.tr/tr/download/article-file/1058299>

Araştırma Makalesi - Research Article

Sediment Mikrobiyal Yakıt Hücrelerinde Bakır ve Grafit Katot Elektrotların Kullanımı

Namık Ak¹, Ayhan Orhan², Ahmet Erensoy³, Nurettin Çek^{4*}

Geliş / Received: 18/04/2020

Kabul / Accepted: 01/07/2020

ÖZ

Mikrobiyal yakıt hücresi, elektrik enerjisinin mikroorganizmalar tarafından katalize edilen organik maddeler yoluyla ürettiği biyo-elektrokimyasal cihazlardır. Organik madde içeriği yüksek olan malzemelerden biri sedimenttir. Mikrobiyal yakıt hücrelerinde, organik malzeme kaynağı olarak sediment kullanılarak sediment esaslı mikrobiyal yakıt hücreleri imal edildi. Sediment esaslı mikrobiyal yakıt hücrelerinin sorunlarından biri olan düşük güç yoğunluğunu artırmak için yeni elektrotlar araştırılmaktadır. Bu çalışmada, aynı ortamdan alınan aynı özelliklere sahip sediment malzeme, eşit miktarlarda, aynı özelliklere sahip iki ayrı plastik kutuya yerleştirildi. Kutuların birine grafit anot ve grafit katot elektrotlar yerleştirildi ve G-G MYH olarak adlandırıldı. Diğer kutuya grafit anot ve bakır katot elektrotlar yerleştirildi ve G-Cu MYH olarak adlandırıldı. Burada amaç, grafit ile bakır katot elektrotların farklarını tespit etmek ve sediment esaslı mikrobiyal yakıt hücrelerinin güç yoğunluğunu arttırmaktır. Deneylerin sonucuna göre, G-Cu MYH ve G-G MYH'nin sağladıkları en yüksek güç yoğunlukları sırasıyla, 455.5 mW/m² ve 143 mW/m² olarak ölçüldü. Sediment esaslı mikrobiyal yakıt hücreleri için grafit katot malzemesi yerine bakır katot malzemesinin kullanımının daha doğru bir strateji olduğu anlaşılmıştır.

Anahtar Kelimeler- *Sediment, Mikrobiyal Yakıt Hücresi, Grafit, Bakır, Bakteri*

¹İletişim: namik.ak@istanbul.edu.tr (<https://orcid.org/0000-0001-9119-1567>)

Elektrik ve Enerji Bölümü, İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa, Teknik Bilimler MYO, İstanbul, Türkiye

²İletişim: ayorhan@firat.edu.tr (<https://orcid.org/0000-0002-7648-2566>)

Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, Fırat Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Elazığ, Türkiye

³İletişim: erensoy@firat.edu.tr (<https://orcid.org/0000-0001-6300-1105>)

Parazitoloji Bölümü, Fırat Üniversitesi, Tıp Fakültesi, Elazığ, Türkiye

^{4*}Sorumlu yazar iletişim: nurettincek001@gmail.com (<https://orcid.org/0000-0001-6120-9228>)

Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü mezunu, Fırat Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elazığ, Türkiye

Use of Copper and Graphite Cathode Electrodes in the Sediment Microbial Fuel Cells

ABSTRACT

The microbial fuel cell is bio-electrochemical devices electrical energy generates through organic materials catalyzed by microorganisms. One of the materials with high organic material content is sediment. In the microbial fuel cells, sediment-based microbial fuel cells were manufactured using sediment as an organic material source. New electrodes are being explored to increase the low power density, one of the problems of sediment-based microbial fuel cells. In this study, the sediment material with the same properties taken from the same medium was placed in two separate plastic boxes with the same properties in equal amounts. In one of the boxes, graphite anode and graphite cathode electrodes were placed and called G-G MYH. Graphite anode and copper cathode electrodes were placed in the other box and were called G-Cu MYH. The aim here is to detect the differences of graphite and copper cathode electrodes and increase the power density of sediment-based microbial fuel cells. According to the results of the experiments, the highest power densities provided by G-Cu MYH and G-G MYH were measured as 455.5 mW/m² and 143 mW/m², respectively. It was understood that the use of copper cathode material instead of graphite cathode material for sediment based microbial fuel cells is a more correct strategy.

Keywords- *Sediment, Microbial Fuel Cell, Graphite, Copper, Bacteria*

I.GİRİŞ

Halen, sürdürülebilir enerji üretim teknolojilerinin geliştirilmesine odaklanan sayısız araştırma çalışmaları devam etmektedir. Yenilenebilir, kendi kendine sürdürülebilir ve sıfır karbon ayak izi bırakan alternatif enerji kaynaklarının geliştirilmesi esastır. Mikrobiyal yakıt hücresi, enerji üreten ve atık/atık suyun arıtılması sırasında kirlenici maddeleri aynı anda temizleyen yeni bir yeşil teknolojidir [1-3].

Mikrobiyal yakıt hücresinin anot bölmesinde bulunan mikroorganizma, atık malzemenin organik içeriğini kullanarak protonları, elektronları ve çok düşük oranlarda karbondioksiti serbest bırakır. Üretilen protonlar (H^+) ve elektronlar (e^-) anottan katoda gönderilir. Havadan alınan oksijen, anottan gelen protonlar ve elektronlar katotta birleşerek su açığa çıkarılır. Bu süreçlerin neticesinde mikrobiyal yakıt hücreleri elektriksel güç üretmektedirler [1-6].

Mikrobiyal yakıt hücreleri temel olarak, anot bölmesi, katot bölmesi, proton değişim membranı ve elektrotlardan oluşmaktadır. Mikrobiyal yakıt hücrelerinin gelişmiş güç üretimi için yeni elektrotların geliştirilmesi için çalışmalar süratle devam etmektedir [1, 3, 5]. Yapılan çalışmaların çoğunda, mikroorganizmaların yüzeye kolay tutunmasına imkan tanıdığı için, biyouyumlu ve elektrokimyasal olarak inert oldukları için karbon fiber, karbon bez, karbon keçe, grafit gibi karbon yapılı elektrot malzemeleri kullanılmıştır. Ancak, son yıllarda yapılan araştırmalarda, görülmüş ki karbon yapılı elektrot malzemelerinin yerine metal yapılı elektrot malzemelerinin kullanımı mikrobiyal yakıt hücrelerinin elektriksel güç üretimini arttırmaktadır [1-6].

Son yıllarda büyük ilgi çeken mikrobiyal yakıt hücresi tiplerinden birisi de sediment esaslı mikrobiyal yakıt hücreleridir. Diğer mikrobiyal yakıt hücrelerinin aksine sediment esaslı mikrobiyal yakıt hücrelerinde proton değişim membranı kullanılmaması, maliyetin ve iç direncin azaltılması bakımından önemli bir fayda sağlamaktadır [7, 8]. Lakin sediment esaslı mikrobiyal yakıt hücrelerinin düşük elektriksel güç üretimi onların kullanımını kısıtlayan ana unsurlardan biridir. Önceki çalışmalar incelendiğinde, sediment esaslı mikrobiyal yakıt hücrelerinin elektriksel güç çıkışlarını arttırmak için düşük iç dirence sahip, elektrokimyasal olarak etkin elektrot malzemeleri kullanılması gerektiği anlaşılmaktadır [7-9]. Metal yapılı malzemeler, karbon yapılı malzemelere göre daha düşük iç dirence, daha yüksek iletkenliğe ve daha yüksek elektrokimyasal potansiyele sahiptir [10]. Bu nedenle, sediment esaslı mikrobiyal yakıt hücrelerinde metal yapılı elektrotların kullanılması onların elektriksel güç çıkışlarının artmasına ve geliştirilmelerine katkı sağlayabilir.

Bu çalışmada, sürekli sulak olan bir tarladan temin edilen sediment malzemesi organik malzeme kaynağı olarak kullanılmış ve bu organik malzeme içerisinde grafit anot elektrot ile grafit katot elektrot kullanılarak G-G MYH imal edildi. Sonra, sediment malzeme içerisine grafit anot elektrot ile bakır katot elektrot yerleştirilerek G-Cu MYH imal edildi. Her iki tip sediment esaslı mikrobiyal yakıt hücrelerinin elektrokimyasal, fizikokimyasal ve mikrobiyolojik özellikleri belirlenmiş ve kıyaslanmıştır. Bu çalışmanın amacı, bakır katot elektrotu kullanarak sediment esaslı mikrobiyal yakıt hücrelerinin elektriksel güç çıkışını arttırmaktır.

II.MATERYAL VE METOT

Aynı özelliklere sahip plastik kutunun (105x65x75 mm) en alt kısmındaki yatay zemine grafit silindir çubuk (80x130 mm) anot elektrot görevi görmesi için yerleştirilmiştir. Ardından, bu plastik kutu içerisine; açık hava koşullarında kurutulmuş, Elazığ İli Maden İlçesi Durmuştepe Köyündeki sürekli sulak olan bir tarladan 10 cm derinden temin edilen sediment malzeme kutunun yarısını kaplayacak şekilde (200 gram) konulmuştur. Sonra, bu tarlada mevcut olan doğal su, plastik kutunun diğer yarısını kaplayacak şekilde (200 mililitre) konulmuştur. Daha sonra, su katmanı içerisine, katot elektrot görevi görmesi için bir grafit silindir çubuk (80x130 mm) yerleştirilmiştir. Böylece grafit elektrotlu sediment mikrobiyal yakıt hücresi (G-G MYH) imal edilmiştir. Ağırlık ölçümleri için hassas tartı (KERN, PKS 360-3), su miktarı ölçümü için dereceli silindir kullanılmıştır.

Grafit elektrotlu mikrobiyal yakıt hücresinde yapılan işlemler bir kez daha tekrar edilmiş ancak katot elektrot olarak grafit değil de 99.9 saflıktaki bakır levha (50x40 mm) suyun içerisine yerleştirilerek, grafit anot ve bakır katot içeren sediment mikrobiyal yakıt hücresi (G-Cu MYH) imal edilmiştir.

Bu çalışmadaki mikrobiyal yakıt hücrelerinin anot ve katot elektrotları arasındaki dış devre bağlantısı, önceki çalışmalarda olduğu gibi paslanmaz çelik tel ile yapılmıştır [11, 12]. Önceki çalışmalarda olduğu gibi anot

ve katot elektrotlara monte edilen çelik telin su ve diğer faktörlerden etkilenip hücre performansını etkilememesi için çelik tel epoksi malzeme ile kaplandı [12]. Mikrobiyal yakıt hücrelerinin, elektrokimyasal özelliklerinden biri olan açık devre gerilimi dijital multimetre (UNI-T:UT61C) kullanılarak ölçüldü. Açık devre geriliminin sabit olduğu anda 0-1.000.000 ohm (Ω) dış direnç kullanılarak elde edilen değerler denklem 1'deki ohm kanununa uygulanarak kutuplaşma eğrileri ve güç değerleri elde edildi.

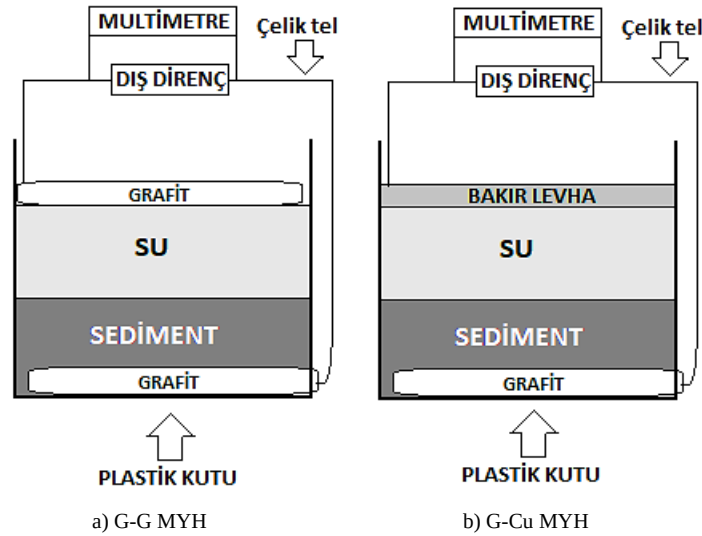
$$P = I \times V \quad (1)$$

Burada, P güç, I akım ve V gerilim olarak ifade edilmektedir. Güç yoğunluğu değerleri denklem (2) kullanılarak elde edildi.

$$P_d = P/S \quad (2)$$

Burada, P_d güç yoğunluğu, P güç ve S anot elektrotun geometrik yüzey alanını ifade etmektedir.

İmal edilen mikrobiyal yakıt hücrelerinin şematik diyagramı Şekil 1'de verilmiştir.



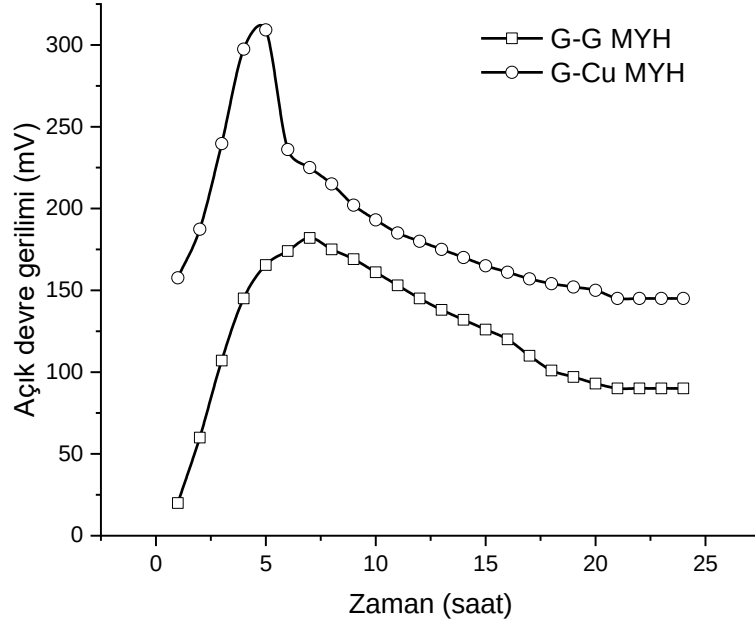
Şekil 1. Bu çalışmadaki mikrobiyal yakıt hücrelerinin şematik diyagramı

Deneylerin başında ve sonunda, fizikokimyasal özellikler (iletkenlik, özdirenç, toplam çözünmüş katı, tuzluluk, pH ve redoks potansiyeli), multiparametre cihazı (METTLER TOLEDO, Seven Excellence) kullanılarak tespit edilirken mikrobiyolojik yapılar optik mikroskop (SOIF, BK5000-TR/L) ile gözlemlendi.

III.BULGULAR VE TARTIŞMA

A. Elektrokimyasal Performans

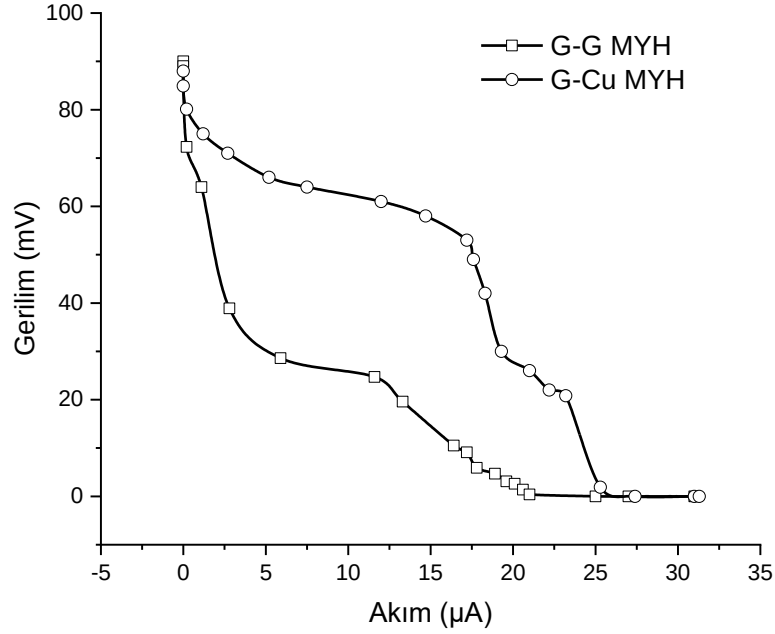
Mikrobiyal yakıt hücrelerinin elektrokimyasal performanslarını belirlemek için ilk önce zamana göre değişen açık devre gerilimleri (OCV) tespit edilmelidir. Çünkü bir mikrobiyal yakıt hücresindeki en yüksek hücre voltajı, açık devre voltajı (OCV) olarak adlandırılır ve OCV dış direncin sonsuz olduğu açık bir devrede elde edilmektedir [1-9]. Sediment esaslı mikrobiyal yakıt hücreleri ile ilgili yapılan bu çalışmada, dijital multimetre kullanılarak ölçülen açık devre gerilimleri (OCV) Şekil 2'de verilmiştir.



Şekil 2. Mikrobiyal yakıt hücrelerinin zaman göre açık devre gerilimleri

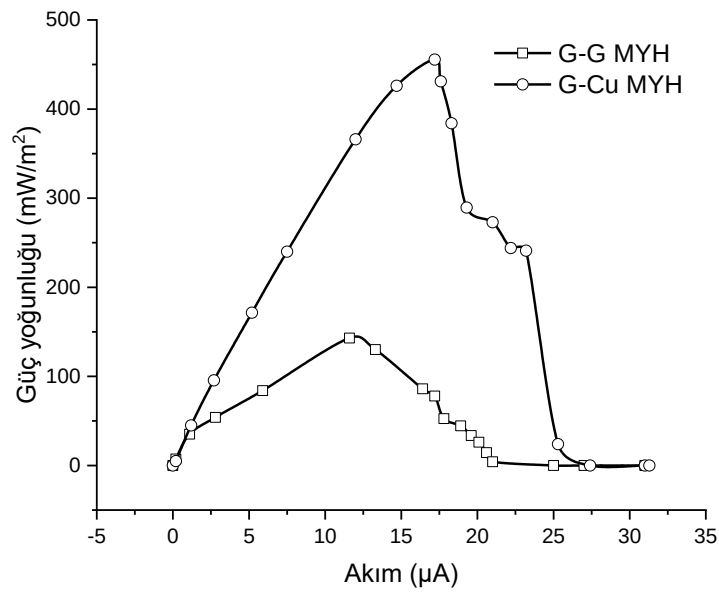
Şekil 2’de görüleceği üzere, grafit anot ve grafit katot elektrottan sediment mikrobiyal yakıt hücresi (G-G MYH) en yüksek 182 mV açık devre gerilimi üretmiştir. Grafit anot ve bakır katot elektrottan oluşan sediment mikrobiyal yakıt hücresi (G-Cu MYH) en yüksek 309,2 mV açık devre gerilimi üretmiştir. Burada dikkat çeken bir husus, G-Cu MYH’nin G-G MYH’ye kıyasla 1.69 kat daha yüksek OCV değeri üretmesidir. Grafit anot ve grafit katot elektrotların kullanıldığı sediment tipi mikrobiyal yakıt hücreleri ile ilgili yapılan çalışmalarda, en yüksek $158 \pm 0,7$ mV değerinde OCV üretmiştir [7]. Şekil 2’deki verilere bakıldığında, bu çalışmadaki G-G MYH’nin ürettiği OCV değeri daha önceki çalışmalardan çok az yüksek olup daha önceki çalışmalar ile uyumludur. Buna ilaveten, sediment tipi mikrobiyal yakıt hücrelerinde titanyum-titanyum dioksit elektrotlar kullanılarak 193 mV OCV değeri elde edilmiştir [8]. G-Cu MYH, titanyum-titanyum dioksit elektrotlar kullanılan sediment mikrobiyal yakıt hücresine kıyasla 1.60 kat daha yüksek OCV değeri üretmiştir. Bu da sediment esaslı mikrobiyal yakıt hücresinde bakır katotun, OCV sağlaması bakımından iyi bir katot elektrot malzemesi olduğunu açıkça gözler önüne sermektedir.

Kutuplaşma (polarizasyon) eğrileri bir mikrobiyal yakıt hücresinin elektrokimyasal performansını gösteren önemli parametrelerden biridir [1-9]. G-G MYH ve G-Cu MYH’nin kutuplaşma eğrileri sabit OCV değeri ürettikleri zaman diliminde 0-1.000.000 Ω dış direnç kullanılarak tespit edildi. Bir dijital multimetre kullanılarak bu dış dirençler üzerinde gerilim (mV) ve akım (μA) değerleri ölçüldü ve sonuçlar Şekil 3’teki grafiklere yansıtıldı [1-9].



Şekil 3. G-G MYH ve G-Cu MYH'nin kutuplaşma eğrileri

Şekil 3'teki kutuplaşma eğrilerindeki gerilim ve akım değerleri denklem (1) ve denklem (2)'ye uygulanarak G-G MYH ve G-Cu MYH'nin elektriksel güç yoğunluğu hesaplandı [1-9]. G-G MYH ve G-Cu MYH'nin elektriksel güç yoğunluğu eğrileri Şekil 4'te mevcuttur.



Şekil 4. G-G MYH ve G-Cu MYH'nin güç yoğunluğu eğrileri

Şekil 4'te görüleceği üzere, G-G MYH en yüksek 143 mW/m² güç yoğunluğu sağlarken G-Cu MYH 455.5 mW/m² güç yoğunluğu sağlamıştır. Yani, G-Cu MYH G-G MYH'ye kıyasla 3.18 kat daha yüksek güç yoğunluğu sağlamaktadır. Sediment mikrobiyal yakıt hücreleri ile ilgili daha önceki çalışmalarda, grafit elektrotlar kullanılarak 10.2 mW/m², titanyum-titanyum dioksit elektrotlar kullanılarak 187 mW/m² değerinde güç yoğunluğu sağlanmıştır [7, 8]. Bu çalışmadaki G-Cu MYH, en gelişmiş sediment esaslı mikrobiyal yakıt hücrelerinden biri olan titanyum-titanyum dioksit elektrotlara sahip sediment mikrobiyal yakıt hücresinden 2.43 kat daha yüksek elektriksel güç yoğunluğu sağlamıştır [8]. Daha önceki çalışmalarla kıyaslandığında, sediment mikrobiyal yakıt hücrelerinin elektriksel güç çıkışlarını arttırmak için grafit, titanyum, titanyum oksit gibi malzemeler kullanmak yerine bakır katot malzemesinin kullanılmasının daha doğru bir strateji olduğu apaçık ortaya çıkmıştır.

B. Fizikokimyasal ve Mikrobiyolojik Özellikler

Bu çalışmada kullanılan sediment malzemesi Elazığ İli Maden ilçesin Durmuştepe Köyünde bulunan ve sürekli sulak olan bir tarladan temin edilmiştir. Sediment esaslı mikrobiyal yakıt hücrelerini etkileyen parametreleri tespit edebilmek için bu sediment malzemesinin fizikokimyasal özelliklerini tespit etmek şarttır. Bu çalışmadaki sediment esaslı mikrobiyal yakıt hücrelerine hiçbir kimyasal ön işlem uygulanmamış ve tamamen sedimentin kendi doğal ortamı kullanılmıştır. Sediment malzemesi ve onun temin edildiği ortamdaki su ile karışarak oluşan çamur sedimentin elektrik iletkenliği, özdirenç, toplam çözünmüş katı, tuzluluk, PH, redoks potansiyeli gibi fizikokimyasal özellikleri 20-25°C sıcaklıkta multiparametre cihazı kullanılarak ölçüldü. 20-25°C sıcaklıkta açık ortam koşullarında kurutulmuş sediment malzemesinin yoğunluğu plastik kap ve hassas terazi kullanılarak ölçüldü. Ölçüm sonuçları Tablo 1'de verilmiştir.

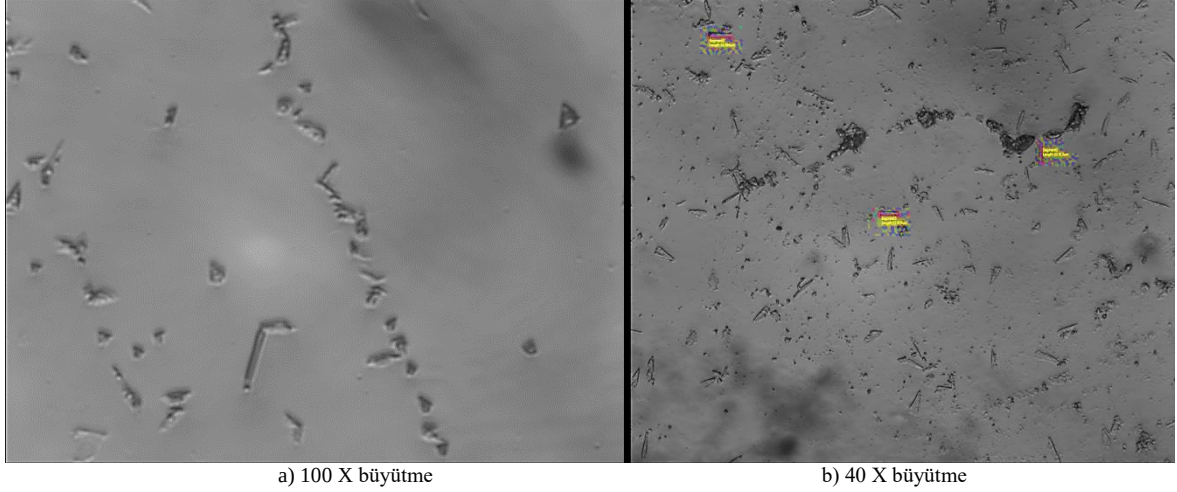
Tablo 1. Sediment malzemesinin fizikokimyasal özellikleri

Elektrik iletkenliği (µS/cm)	407±5
Özdirenç (Ωxcm)	2439.8±5
Toplam çözünmüş katı (mg/L)	163.6±3
Tuzluluk (ppt)	0.13±1
PH	7.40±0.02
Redoks potansiyeli (mV)	-5.8±0.01
Kuru kütle yoğunluğu (g/cm ³)	1.136±0.01

Önceki çalışmalarda sediment malzemenin, elektriksel iletkenliği 55-3780 µS/cm, PH değeri 6.91-9.4, toplam çözünmüş katı 120-1400 mg/L, tatlı sudaki tuzluluğu 0-0.5 ppt ve kuru kütle yoğunluğu en fazla 1.6 g/cm³ olarak ifade edilmiştir [13-16]. Tablo 1'deki verilerin önceki çalışmalarla uyumlu olduğu ve kullanılan sediment malzemesinin sediment esaslı mikrobiyal yakıt hücreleri için uygun bir organik malzeme olduğu anlaşılmaktadır. Redoks potansiyeli (ORP), bir ortam veya sistemdeki oksitleyici ve indirgeyici koşulların hızlı ve ucuz bir ölçümüdür. ORP, kimyasal bir türün elektron alma ve azaltılma eğiliminin ölçüsüdür. Depolanmış ve çalışmaya hazır sıvıdaki "potansiyel" elektrik enerjisidir. Bu potansiyel, su veya topraktaki oksitleyici veya indirgeyici koşulları belirlemek ve sudaki farklı çözünmüş metallerin durumlarını tahmin etmek için kullanılır. ORP, sedimentlerdeki mikrobiyal süreçlerin türleri veya kirlenmiş akiferlerdeki kirleticileri içeren tepkimeler ve aerobik veya anaerobik ortamların kimyası hakkında fikir vermektedir. Redoks potansiyelinin negatif olması ortamın anaerobik olduğunu gösterirken pozitif olması ortamın aerobik olduğunu göstermektedir [17, 18]. Bu çalışmadaki sedimentin redoks potansiyeli -5.8 mV değerinde olup negatiftir. Yani, sedimentte anaerobik ortam olduğu anlaşılmıştır. Mikrobiyal yakıt hücrelerinde özellikle, anot elektrot için anaerobik ortam gereklidir. Bu çalışmada kullanılan sediment malzemesi, mikrobiyal yakıt hücrelerinin anot elektrotu için gerekli olan anaerobik ortamı sağlamaktadır.

Bu çalışmadaki mikrobiyal yakıt hücrelerinde kullanılan sediment malzemesi anaerobik ortam sağladığı için çeşitli anaerobik mikroorganizmaları da yapısında barındırmaktadır. Sediment malzemenin barındırdığı

mikroorganizmaları tespit etmek için optik mikroskop kullanıldı. Mikroskop kullanılarak elde edilen mikroorganizma görüntüleri Şekil 5'te verilmiştir.



Şekil 5. Sedimentteki mikroorganizmaların mikroskop görüntüsü

Şekil 5'teki mikroskop görüntülerinden görüleceği üzere sediment malzemedeki sporlu, çubuk şekilli bir mikroorganizma cinsi olan *Clostridium* bakterileri yoğunluktadır. Önceki çalışmalarda ifade edildiği gibi bu çalışmadaki *Clostridium* bakterileri 1.6-20 μm uzunluğunda ve 0.5-2 μm genişliğindedir [19]. *Firmicutes* şubesinde yer alan *Clostridium* bakterilerinin, su kaynakları (nehir, göl, deniz vb.) ve toprakta yaşam alanı vardır. Sediment malzemenin ORP ölçümlerinde de görüldüğü gibi anaerobik bir ortamdır. Sediment, anaerobik sulak toprak ortamı olduğu için *Clostridium* bakterileri sediment ortamında yaşamaktadırlar. Ayrıca, sediment malzemenin PH değeri (7.40 ± 0.02) *Clostridium* bakterilerinin yaşayabileceği değerler arasındadır [20, 21]. Ayrıca, önceki çalışmalarda belirtildiği gibi, *Firmicutes* şubesinde yer alan bakteriler mikrobiyal yakıt hücrelerinde biyokatalizör veya elektrikjen (elektrojen) olarak kullanılmaktadır [21]. Bu nedenle, bu çalışmadaki G-G MYH ve G-Cu MYH'lerde *Clostridium* bakterileri biyokatalizör olarak görev yapmaktadır. Biyokatalizör olarak görev yapan bakteriler, mikrobiyal yakıt hücrelerindeki organik malzemeyi ayrıştırarak organik malzemenin sahip olduğu elektrokimyasal enerjiyi elektronlar ve protonlar şeklinde açığa çıkarmaktadır. Bakteriler, anot yüzeyinde biyofilm tabakası oluşturarak elektronları anot elektrotta aktarmaktadırlar. Anot elektrotta ulaşan elektronlar, iletken dış devreyi kullanarak katot elektrotta göç ederler. Protonlar ise sedimentteki sıvı yapı olan elektrolit içerisinde katot elektrotta göç etmektedirler. Katot elektrotta; elektronlar, protonlar ve havadan alınan oksijen kimyasal tepkimeye girerek su oluştururlar. Bu işlemlerin sonucu olarak mikrobiyal yakıt hücreleri elektrik enerjisi üretmektedirler [23-25]. Bu işlemlerden anlaşılacağı üzere, elektriksel ve kimyasal etkileşimi elektronlar gerçekleştirmektedir [5, 26].

IV. SONUÇLAR

Bu çalışmada, sürekli sulak olan bir tarladan elde edilen sediment malzemesindeki elektrokimyasal enerjiyi; grafit anot-grafit katot elektrotlar kullanarak açığa çıkaran G-G MYH ve grafit anot-bakır katot elektrotlar kullanarak açığa çıkaran G-Cu MYH olmak üzere toplam 2 tip mikrobiyal yakıt hücresi imal edilmiştir. Sediment esaslı G-G MYH sayesinde en yüksek 143 mW/m^2 güç yoğunluğu elde edilirken sediment esaslı G-Cu MYH sayesinde 455.5 mW/m^2 güç yoğunluğu elde edilmiştir. Bu sonuçlara göre, sediment esaslı mikrobiyal yakıt hücrelerinde katot elektrot olarak bakır kullanımı elektriksel güç yoğunluğunu 3.18 kat arttırmıştır. İlave olarak, sediment esaslı mikrobiyal yakıt hücrelerinde katot elektrot olarak bakır kullanılması, OCV değerini 1.69 kat arttırmıştır. Bir biyoelektrik üretici olan sediment esaslı mikrobiyal yakıt hücrelerinin OCV ve güç yoğunluğunun artması daha sürdürülebilir, istikrarlı enerji üretimi ve tedariki için mikrobiyal yakıt hücrelerinden elektrik üretimi için yeni bir strateji sağladı ve bu da mikrobiyal yakıt hücrelerinin pratik uygulaması için büyük önem taşımaktadır. Sediment esaslı mikrobiyal yakıt hücrelerinde bakır katot elektrot kullanımı ile elektriksel güç yoğunluğunun

artması, uzaktan çevresel izleme aparatının çalışmasını desteklemek için sürdürülebilir bir güç olarak veya çevresel kirleticileri azaltmak için bir elektron kaynağı olarak kullanılabilir. Bu çalışmadaki sediment malzeme yapısında, *Firmicutes* şubesine ait olan *Clostridium* cinsi bakterileri barındırmaktadır. Bu bakteriler, sedimentteki organik malzemenin sakladığı elektrokimyasal enerjiyi kataliz tepkimeleri ile elektron ve proton şeklinde açığa çıkarmakta ve anot elektrot yüzeyinde oluşturduğu biyofilm tabakası ile anot elektrota aktarmaktadır. Bu nedenle, *Clostridium* cinsi bakteriler sediment esaslı mikrobiyal yakıt hücreleri için biyokatalizör görevi yapabilmektedirler. Sediment esaslı mikrobiyal yakıt hücrelerinin gelişmelerini sağlamak için elektrokimyasal olarak daha etkin mikroorganizmalar, elektrokimyasal olarak daha yüksek performansa sahip elektrotlar, zengin enerji içeriğine sahip organik malzeme vb. konularda araştırmalar yapılmalıdır.

TEŞEKKÜR

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

KAYNAKLAR

- [1] Mohamed, S. N., Hiranman, P. A., Muthukumar, K., Jayabalan, T. (2020). Bioelectricity production from kitchen wastewater using microbial fuel cell with photosynthetic algal cathode. *Bioresource Technology*, 295, 122226, 1-7.
- [2] Çek, N. (2016). *Parçacıklar ve Enerji Kaynakları. 1. Baskı*, Lambert Academic Publishing, Saarbrücken, 338.
- [3] Çek, N. (2017). Examination of Zinc Electrode Performance in Microbial Fuel Cells. *Gazi University Journal of Science*, 30(4), 395-402.
- [4] Erensoy, A., Çek, N. (2018). Alternative Biofuel Materials for Microbial Fuel Cells from Poplar Wood. *ChemistrySelect*, 3, 1251-11257.
- [5] Çek, N., Erensoy, A. (2019). Kompost Mikrobiyal Yakıt Hücreleri İçin Titanyum Elektrot Performansının İncelenmesi. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 17, 909-915.
- [6] Pushkar, P., Mungray, A. K. (2020). Exploring the use of 3 dimensional low-cost sugar-urea carbon foam electrode in the benthic microbial fuel cell. *Renewable Energy*, 147(1), 2032-2042.
- [7] Taşkan, E. (2016). Sediment Tipi Mikrobiyal Yakıt Hücresi Kullanılarak Arıtma Çamurlarından Elektrik Üretimi. *Fırat Üniv. Müh. Bil. Dergisi*, 28 (1), 15-21.
- [8] Taşkan, B., Taşkan, E., Hasar, H. (2020). Electricity generation potential of sewage sludge in sediment microbial fuel cell using Ti-TiO₂ electrode. *Environmental Progress & Sustainable Energy*, 1-8.
- [9] Wang, C., Jiang, H. (2019). Real-time monitoring of sediment bulking through a multi-anode sediment microbial fuel cell as reliable biosensor. *Science of The Total Environment*, 697, 134009, 1-8.
- [10] Fickett, F. R. (1982). *Electrical Properties of Materials and Their Measurement at Low Temperatures*. U.S. Government Printing Office, Washington, 76.
- [11] Sharma, I., Ghangrekar, M. M. (2018). Evaluating the suitability of tungsten, titanium and stainless steel wires as current collectors in microbial fuel cells. *Water Science & Technology*, 77 (4), 999-1006.
- [12] Sudirjo, E. (2020). Plant Microbial Fuel Cell in Paddy Field: a power source for rural area. Doctoral Thesis, Wageningen University, Graduate School for Socio-Economic and Natural Sciences of the Environmental, Wageningen.
- [13] Maslennikova, A. V. (2020). Development and application of an electrical conductivity transfer function, using diatoms from lakes in the Urals, Russia. *Journal of Paleolimnology*, 63, 129-146.

- [14] Yusuf, Y. O., Iguisi E., O., Falade, A. M. (2012). Fluxes in Suspended Sediment Concentration and Total Dissolved Solids Upstream of the Galma Dam, Zaria, Nigeria. In book: Ecological Water Quality-Water Treatment and Reuse, IntechOpen, 439-454.
- [15] Rogowski, D. (2000). Saltwater Intrusion in Salmon Bay and Lake Union Sediments. Washington State Department of Ecology Report, Publication No. 00-03-032, p. 23.
- [16] Wakeham, S. G., Canuel, E. A. (2016). The nature of organic carbon in density-fractionated sediments in the Sacramento-San Joaquin River Delta (California). *Biogeosciences*, 13, 567-582.
- [17] Rajib, M., Parveen, M., Oguchi, C. T. (2019). A rapid technique for measuring oxidation-reduction potential for solid materials. *Journal of Science, Technology&Environment Informatics*, 7 (01), 510-516.
- [18] Vongvichiankul, C., Deebao, J., Khongnakorn, W. (2017). Relationship between pH, Oxidation Reduction Potential (ORP) and Biogas Production in Mesophilic Screw Anaerobic Digester. *Energy Procedia*, 138, 877-882.
- [19] Rusnak, J. M., Smith, L. A. (2014). Botulinum Neurotoxins from *Clostridium botulinum*. In book: Manual of Security Sensitive Microbes and Toxins, CRC Press, New York, 451-466.
- [20] Soyergin, S. (2003). *Organik Tarımda Toprak Verimliliğinin Korunması, Gübreler ve Organik Toprak İyileştiricileri*. Atatürk Bahçe Kültürleri Merkez Araştırma Enstitüsü, Yalova, [http://www.selcuk.edu.tr/dosyalar/files/068/Org_%20Tar_%20Top_%20Veriml_%20Kor_ve%20Gübreler_%20Doç_%20Dr_Serap%20S\(2\).pdf](http://www.selcuk.edu.tr/dosyalar/files/068/Org_%20Tar_%20Top_%20Veriml_%20Kor_ve%20Gübreler_%20Doç_%20Dr_Serap%20S(2).pdf)
- [21] Alataş, Z., Güner, A. (2018). Clostridium difficile: Yeni Bir Gıda Patojeni mi? *Atatürk Üniversitesi Veteriner Bilimleri Dergisi*, 13 (3), 389-396.
- [22] Erensoy, A., Çek, N. (2020). Mikrobiyal Yakıt Hücrelerinde Kullanılan Saf Kültür Mikroorganizmaları ve Genel Özellikleri. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 18, 109-117.
- [23] 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.
- [24] Chen, S., Patil, S. A., Brown, R. K., Schröder, U. (2019). Strategies for optimizing the power output of microbial fuel cells: Transitioning from fundamental studies to practical implementation. *Applied Energy*, 233-234, 15-28.
- [25] Jiang, M., Xu, T., Chen, S. (2020). A mechanical rechargeable small-size microbial fuel cell with long-term and stable power output. *Applied Energy*, 260, 114336, 1-7.
- [26] Çek, N. (2016). Parçacıklar ve Parçacıkların Enerji Kaynakları Üzerinde Etkileri. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 4 (7), 1-8.