

# Düşük Güçlü Sistemler için Alternatif Enerji Kaynağı: Mikrobiyal Yakıt Hücreleri

## An Alternative Energy Source for Low Power Systems: Microbial Fuel Cells

İlker AYDIN<sup>1</sup>, Aslınur ÇALIŞIYOR<sup>2</sup>, Özgür ÜSTÜN<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Elektrik Mühendisliği Bölümü  
İstanbul Teknik Üniversitesi  
aydinilk@itu.edu.tr, oustun@itu.edu.tr

<sup>2</sup>Moleküler Biyoloji ve Genetik Bölümü  
İstanbul Teknik Üniversitesi  
calisiyor@itu.edu.tr

### Özet

Enerji hasadı yöntemleri kullanılarak dağıtık sensör ağlarının enerjilendirilmesi yeni bir fikir olmamakla birlikte günümüzde yoğun olarak çalışılan bir alandır. Özellikle ulaşılması zor veya sıklıkla gidilmek istenmeyen bölgelerde kullanılan sensörlerin enerji ihtiyacı açısından bakım gerektirmeksizin uzun süreler boyunca kullanılması oldukça önemlidir. Bataryalar kullanılarak sistemlerin enerjilendirilmesi genellikle tercih edilen bir yöntem olmakla birlikte işletme sürelerinin kısıtlı olması alternatif arayışlara neden olmuştur. Bu çalışmada, öncelikle mikrobiyal yakıt hücresi teknolojisi üzerinde kısaca durulmuş, örnek oluşturması bakımından tortu tipi toprak tabanlı bir mikrobiyal yakıt hücresi (MYH) gerçekleştirilmiştir. Prototip MYH değişken yük koşullarında test edilmiş ve performans karakteristikleri elde edilmiştir. Deney sonuçları incelenerek, ileri çalışmalar için MYH konfigürasyonları ve hasat tekniklerine ilişkin değerlendirmeler yapılmıştır.

### Abstract

Supplying distributed sensor networks by using energy harvesting methods is a wide research and development area today. Especially for remote and inaccessible areas, it is essential to implement sensors for long periods without need of maintenance. Battery energy is not sustainable for long term operations: this problem leads to search new energizing alternatives for sensor power. In this study, a short review of microbial fuel cell (MFC) technology is given and a research work on soil based sediment type MFC prototype is presented. The MFC prototype is tested under various load conditions in order to find out electrical characteristics. The maximum output power is also measured for different loadings. And some future aspects are given for improving MFC performance.

### 1. Mikrobiyal Yakıt Hücrelerinin Genel Özellikleri

Gelişen dünyanın enerjiye olan ihtiyacı ile birlikte çevreye minimum zarar verecek şekilde elektrik enerjisinin üretimi ön plana çıkmış ve buna bağlı olarak insanoğlu alternatif enerji kaynaklarına yönelmiştir. Rüzgâr ve güneş enerjisinden faydalanarak elektrik enerjisinin üretimi bu alternatif enerji arayışının en öne adayları olmuş, tüm dünyaya yayılan bir yenilenebilir enerji üretimi eğilimleri oluşturmuşlardır. Fakat diğer konvansiyonel elektrik enerjisi üretimi (nükleer, termik, hidroelektrik v.d.) teknikleri kadar olmasa da bu yöntemler de çevreye tamamen zararsız değillerdir. Kuşların göç yolu üzerine veya okyanuslara kurulan rüzgâr santralleri, göçmen kuşlara ve su canlılarına zarar vermekte doğal dengeyi termik santraller kadar olmasa da yine de dikkate değer ölçüde tahrip etmektedir [1-3]. Öte yandan güneş enerjisinden elektrik üretimi için kullanılan güneş panellerinin üretiminde kullanılan ağır metaller doğada yüzyıllarca sürebilecek bir tahribata yol açma potansiyeli barındırmaktadır [4].

Tüm bu nedenler gözönüne alındığında çevreye daha az zarar verecek enerji üretim tekniklerinin araştırılması son derece önem kazanmaktadır. Mikrobiyal yakıt hücreleri de bu arayışın bir sonucu olarak öne çıkan biyokimyasal enerjiyi elektrik enerjisine dönüştüren, biyokütle tabanlı bir enerji üretim teknolojisidir [5-8]. Diğer biyokütle tabanlı elektrik enerjisi üretim tekniklerinden farklı olarak doğrudan elektrik eldesi bu yapılar sayesinde mümkün olmaktadır [6]. Çok geniş güç ölçeklerinde kullanılabilirlikleri de göz önüne alındığında kullanımlarının yaygınlaşması gelişen teknoloji ile birlikte artması olasıdır.

Özellikle biyokütle olarak evsel atık suyun kullanılması durumunda bir mikrobiyal yakıt hücresi tesisi elektrik enerjisi üretmesinin yanısıra su artırımını da gerçekleştirecektir [9-12]. Açık tipe sahip arıtma

havuzlarından farklı olarak mikrobiyal yakıt hücreleri ile donatılmış arıtma havuzlarının açık tipte olması zorunlu değildir. Dolayısıyla bu açıdan da önemli bir avantajı sahiptirler.

Sensör ağlarına ve mikrodeneçilere gün geçtikçe daha düşük gerilim ve akım seviyelerinde çalışabilme yeteneği kazandırıldığından mikrobiyal yakıt hücrelerinin uzun ve bakım gerektirmeksizin çalışması istenen bu tür sistemlerde de enerji kaynağı olarak kullanılma potansiyeli bulunmaktadır [5, 8, 13].

## 2. Mikrobiyal Yakıt Hücrelerinden Elektrik Enerjisinin Eldesi

Bir MYH'dan elektrik enerjisinin eldesi, gerçekleşen reaksiyon ancak termodinamik açıdan elverişli ise olasıdır. Reaksiyonun toplam hücre elektromotor kuvveti, anot ve katot arasındaki potansiyel farkı tarafından ifade edilir. Bu potansiyel değerleri belirleyen en önemli faktör ise gerçekleşen kimyasal reaksiyonun özelliğidir [5].

Bir mikrobiyal yakıt hücresinde elektriksel potansiyel şu şekilde oluşur [8,14]:

- MYH'da çoğunlukla anot yüzeyinde tutunan ve biyofilm oluşturan bakteriler, kimyasal enerjiyi katalize ederek ATP'ye (adenozin trifosfat) dönüştürerek bunu depolarlar.
- İndirgenmiş bileşenler bakteriler tarafından yükseltgenir ve nikotinamid adenin dinükleotidin (NAD) yapısına hidrojen eklenerek indirgenmiş olan formu olan NADH ile enzim yüzeyine aktarılır.
- Oluşan elektronlar, enzim yüzeyleri boyunca akar ve bir proton gradyeni oluşturur.
- Protonlar ATPaz enzimi ile tekrar hücre içine alınarak her 3-4 protona karşılık 1 adenozin difosfat molekülünden 1 ATP oluştururlar.
- Elektronlar ise en son aşamada son elektron alıcısı olabilen nitrat, sülfat ya da oksijene ulaşarak reaksiyonu tamamlarlar.

Tüm bu işlemlerin ardından meydana gelen maksimum potansiyel fark elektron taşıyıcısı olan NADH nedeniyle 1,2V seviyesinde olmaktadır.

Kısacası anot bölgesinde gerçekleşen organik yıkım katot bölgesindeki oksijenin elektron alıcısı olması ile tamamlanarak gerilimin oluşmasına neden olur. Bazı çalışmalarda oksijene alternatif olarak katot bölgesinde farklı elektron alan çözeltiler kullanılmış ve hücre geriliminin değiştiği gözlemlenmiştir. Bir mikrobiyal yakıt hücresine ait elektromotor kuvvet şu şekilde ifade edilmektedir:

$$E_{emk} = E_{kat} - E_{an} \quad (1)$$

Burada  $E_{emk}$  mikrobiyal yakıt hücresinin elektromotor kuvveti,  $E_{kat}$  katot potansiyeli,  $E_{an}$  ise anot potansiyelidir [5].

### 2.1. Açık Devre Gerilimi ve Uç Gerilimi

Elektromotor kuvvet, termodinamik bir değer olup içsel kayıplar bu değer içerisinde bulunmamaktadır. Teorik olarak bu iki değer kayıplar ihmal edildiğinde birbirine eşit

olsa da pratikte bu mümkün değildir. Kayıplar genel olarak katot bölgesindeki oksidasyon tepkimesinde gerçekleşmektedir.

Bir MYH'nın uç gerilimi ise açık devre geriliminden belirli kayıplar çıkarılarak bulunmaktadır. Bu kayıplar arasında omik gerilim düşümü, aktivasyon gerilim düşümü, kütle transferi gerilim düşümü bulunmaktadır [5,15]:

- Omik gerilim düşümü, elektrolit direnci, elektrot direnci ve bağlantı dirençlerinden kaynaklanmakta ve görece lineer bir karakteristikte olmaktadır.
- Aktivasyon gerilim düşümü, elektrotlarda gerçekleşen oksidasyon redüksiyon reaksiyonlarının gerçekleşmesi için gerekli olan eşik enerjisi nedeniyle oluşmaktadır ve non-lineer karakteristiktir. Elektrot yüzey alanının, çalışma sıcaklığının artırılması ve elektrotlarda zenginleştirilmiş bir biyofilm yapısının kullanımı ile azaltılabilmektedir.
- Kütle transferi gerilim düşümü, konsantrasyon kaybı olarak da adlandırılmakla birlikte, elektroda ya da elektrottan kimyasal bileşiklerin transferi sırasında açığa çıkmaktadır. Akım çekiminin arttığı durumlarda daha belirgin hale gelen bu kayıp MYH'dan akım çekiminin önünde önemli bir engeldir.

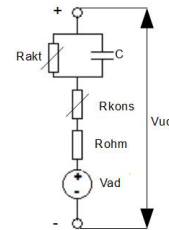
Tüm bu kayıplar gözönüne alındığında bir MYH'nın uç gerilimi bulunabilmektedir [5,15].

$$V_{uc} = V_{ad} - \eta_{ohm} - \eta_{akt} - \eta_{trans} \quad (2)$$

Burada  $V_{uc}$  mikrobiyal yakıt hücresinin uç gerilimini,  $V_{ad}$  ise açık devre gerilimini ifade etmekte,  $\eta_{ohm}$ ,  $\eta_{akt}$  ve  $\eta_{trans}$  ifadeleri ise sırasıyla omik gerilim düşümünü, aktivasyon gerilim düşümünü ve kütle transferi gerilim düşümünü ifade etmektedir.

### 2.2. Elektriksel Model

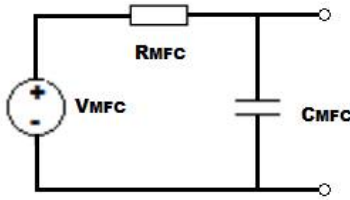
Bir mikrobiyal yakıt hücresinin elektriksel olarak modellenmesi, model ne kadar detaylı olursa o kadar gerçekçi bir sonuç çıkaracağından önemli bir aşamadır. Tıpkı detaylı batarya hücreleri modellerinde ve hidrojen yakıt pili modellerinde olduğu gibi MYH'da da akıma ve zamana bağlı olarak değişen konsantrasyon ve aktivasyon dirençleri, anot ve katot kapasiteleri, anot ve katot iletim dirençleri hesaba katılarak bir elektriksel model oluşturulabilir [16]. Fakat modelin bu denli detaylandırılması çözümü zorlaştırmakta ve pratiklikten uzaklaştırmaktadır.



Şekil 1: MYH elektriksel modeli.

Şekil 1’de görece detaylı bir elektriksel model yer almakta ve devre üzerinde gösterilen  $V_{ad}$ , açık devre hücre gerilimini,  $R_{ohm}$ , omik gerilim düşümünün gerçekleştiği iç direnci,  $R_{kons}$  ve  $R_{akt}$  değerleri sırasıyla konsantrasyon ve aktivasyon dirençlerini ifade etmektedir.  $C$  ise mikrobiyal yakıt hücrelerinin kapasitesini göstermektedir [16].

Basit elektriksel modeller de oldukça yararlı olabilmektedir. Çoğu zaman enerji hasadında kullanılacak topolojinin belirlemesi amacıyla oluşturulan basit modeller tasarımcıya yeterince bilgi verebilmekte, tasarımın temel hatlarıyla çizilmesine imkân tanımaktadır. Bir mikrobiyal yakıt hücrelerinin basit eşdeğer devresi bir gerilim kaynağı, bu kaynağa seri bir direnç ve paralel şekilde bağlı bir kondansatör ile oluşturulabilmektedir. Bu durumda tüm kayıplar lineer olarak kabul edilmekte ve söz konusu direnç tarafından temsil edilmekte, kapasite değeri de sabit olarak kabul edilip sisteme paralel olarak eklenmektedir [15,16].



Şekil 2: Basit elektriksel eşdeğer devre.

Şekil 2’de  $V_{MFC}$ , mikrobiyal yakıt hücrelerinin elektriksel potansiyelini ifade etmekte ve genel olarak 300 mV ile 800 mV değerleri arasında değişmektedir.  $R_{MFC}$ , kayba neden olan dirençlerin indirgenmiş hali olup 0,1 kΩ ile 8 kΩ aralığında bir değerle ölçümlenmektedir.  $C_{MFC}$  değeri ise mikrobiyal yakıt hücrelerinin kapasitesini ifade etmekte birlikte değeri 6,5µF ile 2,5 mF arasında değişmektedir [17].

Düşük güçlü bir mikrobiyal yakıt hücrelerinde  $R_{MFC}$  ve  $C_{MFC}$  değerleri yüksek olmakta, yüksek güçlü bir mikrobiyal yakıt hücrelerinde ise her iki değer de düşük bir değere sahip olmaktadır [5].

### 3. Mikrobiyal Yakıt Hücrelerinin Tipleri ve Deneysel Çalışma

#### 3.1. Mikrobiyal Yakıt Hücrelerinin Tipleri

Çok çeşitli şekillerde değerlendirilmekle birlikte mikrobiyal yakıt hücrelerinin en yoğun kullanılan tipleri üzerinde durmak genel yapıları ve çalışma prensiplerinin anlaşılması açısından faydalı olmaktadır. Genel olarak tek bölmeli ve çift bölmeli olarak sınıflandırılabilen mikrobiyal yakıt hücreleri genel yapılarındaki bazı farklılıklar ve kullanım sıklığı ile ilişkili olarak hava katotlu, H tipi ve tortu tipi olarak ayrıştırılabilirler. Üzerinde yoğun çalışma yapılmakla birlikte tübüler yapıda, yukarı akışlı, kaskat bağlantılı tipleri de bulunmaktadır [5, 8, 18].

Hava katotlu mikrobiyal yakıt hücrelerinde katot elektrodu doğrudan oksijen içeren ortam ile temas halindedir. Her ne kadar kaplamalar ile anot ile katot arasında bulunan sıvının

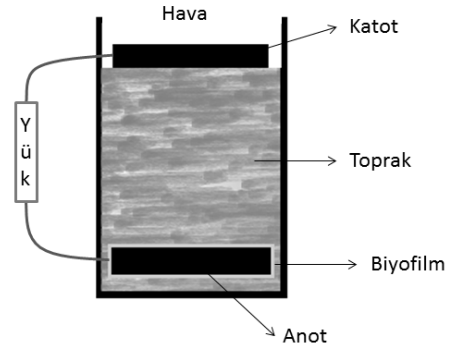
kaybı minimize edilebilse de laboratuvar çalışmalarında sıklıkla kullanılan bu tipteki mikrobiyal yakıt hücreleri dış ortamda uzun sürede kullanılmaya pek müsait değildir.

H tipi mikrobiyal yakıt hücreleri anot ve katot bölmelerinin ayrı olarak yapılandırıldığı (çift bölmeli) bir yapıya sahiptirler. Ara bağdaştırıcı olarak proton geçiş membranı (Nafion, Ultrex vb.), agar ya da tuz köprüsü kullanılan bu yapıda iç direncin yüksek oluşu güç eldesini kısıtlamaktadır. Genel olarak basit bazı parametrelerin testleri ve belirlenmeleri için kullanılan bu tipteki mikrobiyal yakıt hücreleri düşük maliyetli ve kolay uygulanabilirlikleri nedeniyle sıklıkla tercih edilmektedirler [5].

Tortu tipi mikrobiyal yakıt hücreleri ise deniz, okyanus tabanlarına ya da toprak gibi organik besin yönünden zengin bir ortama anot elektrodu gömülüp katot elektrodu ise oksijen zengin ortama (deniz suyu veya hava) yerleştirilerek oluşturulurlar [5, 20]. Yapılarındaki materyallerin görece çevreye zararsız oluşları (grafit keçe, grafit plaka vb.) ve maliyetlerinin düşük oluşu nedeniyle kullanım alanları ve imkânları geniştir. Aynı zamanda besin ve sülfid yönünden zengin olan okyanus tabanı ve bataklık arazilerinde bakteriler rahatlıkla çoğalabilecek aynı zamanda oksijen zenginliği bol olan su veya hava nedeniyle de bölgede çalışacak bir sensör altyapısı için gerekli enerjiyi sağlayabilecek potansiyele sahiptirler [5]. Özellikle basitçe mikrobiyal yakıt hücrelerinin çalışmasını anlatmak gerektiğinde bu yapı tercih edilmektedir.

#### 3.2. Deneysel Olarak Oluşturulan Sistemin Genel Yapısı

Çalışmada toprak tabanlı tortu tipi bir mikrobiyal yakıt pili kullanılmıştır. Anot ve katotları grafit fiber keçeden müteşekkil sistemin iletkenleri ise titanyumdur. Titanyuma oranla daha iyi iletken olmalarına rağmen bakır veya gümüş kullanımının nedeni bakırın ve gümüşün antibakteriyel karakteristikleridir. Grafit fiber keçe kullanımının nedeni ise bu materyalin iletken karakteristiğinin yanı sıra çevreye zarar vermemesi ve bakterilerin biyofilm oluşturması için gerekli büyük yüzey alanına sahip olmasıdır. Şekil 3’de sistemin temel şekli yer almaktadır. Kullanılan mikrobiyal yakıt hücreleri kabı yaklaşık 10 cm x 9,5 cm boyutlarında olup grafit fiber keçelerin kalınlıkları anot ve katot için sırasıyla 0,5 cm ve 1 cm şeklindedir. Anot çapı 8 cm, katotun çapı ise 8,5 cm’dir. Şekil 3’de sistemin temel şeması yer almaktadır.



Şekil 3: Toprak tabanlı mikrobiyal yakıt hücresi.

Toprak tabanlı mikrobiyal yakıt pili yapılırken öncelikle anodun altına bir miktar toprak konulması gerekmektedir. Anot sıkıca yerleştirildikten sonra yaklaşık 5 cm kalınlığında bir toprak tabakası içerisinde hava kabarcığı kalmayacak şekilde sıkıştırılarak anodun üzerine konulmalıdır. Aksi halde sistem geriliminin yükselmesi ve elektrik enerjisinin üretilmesi pek mümkün olmamaktadır. Zira elektron aktarımı için suya doymuş toprağın tüm sistemi kaplaması gerekmektedir. Toprak tabakası istenen düzeyde oluştuğunda ise üzerine katot konumlandırılır. Burada dikkat edilmesi gereken katot materyalinin üzerinde toprak ve su olmamasıdır. Katot tamamen suyun içerisine gömüldüğü takdirde havadaki oksijen molekülü ile temas edemeyen katot üzerinde proton-elektron reaksiyonu gerçekleşmeyecektir. Bu da sistemin enerji üretememesi anlamına gelmektedir.

### 3.3. Elektriksel Test

Mikrobiyal yakıt hücresinde maksimum güç transferi için tüm elektriksel sistemlerde olduğu gibi empedans uyumluluğu gerekmektedir. Enerjiyi hasat eden sistem ile mikrobiyal yakıt hücresinin empedanslarının eşit olması enerjinin maksimum düzeyde elde edilmesini sağlamaktadır [20].

Sistemin elektriksel karakteristiğinin ve maksimum gücünün bulunması için değişken değerlere sahip dirençler sisteme bağlanarak test gerçekleştirilir [5]. Çizelge 1’de mikrobiyal yakıt hücresine bağlanan değişik değerlerdeki dirençler ile buna bağlı olarak direnç uçlarında ölçülen gerilimin ilişkisi verilmiştir.

Çizelge 1: Direnç – Gerilim ilişkisi

Direnç Değeri	Gerilim
100 Ω	58,20 mV
500 Ω	223,25 mV
1 kΩ	265,22 mV
5 kΩ	328,92 mV
10 kΩ	339,93 mV

Bu değerler her bir direnç değişiminden sonra gerilim değeri kararlı hale geldiğinde ölçümlenmiştir.

$$P = \frac{V^2}{R} \quad (3)$$

Ohm yasasını ifade eden bu denklemde P gücü, V uç gerilimini, R ise mikrobiyal yakıt hücresine bağlanan direnci göstermektedir. Çizelge 1’de yer alan değerler gözönüne alındığında mikrobiyal yakıt hücresinin yük direncine bağlı olarak güç değerleri Çizelge 2’de görülmektedir.

Çizelge 2: Yük direnci – Güç ilişkisi

Yük direnci	Güç
100 Ω	33,87 μW
500 Ω	99,68 μW
1 kΩ	70,34 μW
5 kΩ	21,64 μW
10 kΩ	11,56 μW

Maksimum güç eldesi 500 Ω değerine sahip direnç ile sağlanmış ve yaklaşık olarak 100 μW olarak ölçümlenmiştir. Empedans uyumluluğundan hareketle ve Çizelge 2’den görüleceği üzere sistem empedansı yaklaşık 500 Ω civarındadır.

## 4. Sonuçlar ve Değerlendirme

Çalışmada görece düşük hacimli bir mikrobiyal yakıt hücresi hazırlanmış ve test edilmiştir. Maksimum elde edilen güç 100 μW seviyesinde olmuş ve sistemin empedansı ölçülen güçten hareketle 500 Ω civarında bir değer olarak tespit edilmiştir. Bu değer toprak tabanlı mikrobiyal yakıt hücrelerinde genel olarak karşılaşılan empedans değeri ile uyumludur.

Literatürde katot yerleşiminin değişken oluşunun sistem empedansına etki ettiği ve güç değerini değiştirdiği belirlen [21] veya farklı besin maddeleri kullanılarak gerçekleştirilen mikrobiyal yakıt hücrelerinden görece yüksek enerji elde edildiğini gösteren [22] çalışmalar bulunmakla birlikte elde edilen enerjini çok düşük olması (0,1 mW) nedeniyle küçük boyuttaki tek bir mikrobiyal yakıt hücresi ile bir sensör altyapısının doğrudan beslenmesi pek mümkün değildir. Dolayısıyla gücün koşullandırılması gerekmektedir. Bir güç elektroniği devresi ile gerilimin yükseltilmesi olası bir çözümdür fakat akım sağlanamadığı takdirde bu da akıllıca bir tasarım olmayacaktır. Bundan ziyade giriş geriliminin mikrobiyal yakıt hücreleri seri bağlanarak kabul edilebilir düzeylere çekilmesi gerekmektedir. Aynı zamanda sistemin akım verme yeteneğinin artırılması ve eşdeğer direncin düşürülmesi için mikrobiyal yakıt hücreleri paralel olarak da bağlanmalıdır. Her ne kadar 10-100 μW güç tüketimine sahip mikroşemleci tabanlı basit sensör yapıları bulunsada seri-paralel bağlantı konfigürasyonu ile düzenlenmiş mikrobiyal yakıt hücrelerinden 1 mW civarında bir elektrik enerjisi elde edildiğinde hem bu gücü yönetmek, hem de uzun süreli bir çalışma performansı sağlamak daha kolay olacaktır.

Seri bağlanan mikrobiyal yakıt hücrelerinde elektriksel karakteristiklerinin benzer olması nedeniyle batarya hücrelerinde gerçekleştiği gibi bir gerilim dengesizliği gerçekleşmektedir. Dolayısıyla enerji yönetimi için hücrelerin yüzen kapasitörler tekniği ile dengelenmesi de literatürde yer alan bir çözümdür [16]. Maksimum güç noktasının da izlenmesiyle birlikte uygulanacak bu yöntemin değişken karakteristikte güç eğrisine sahip olan mikrobiyal yakıt hücrelerinden en yüksek enerji eldesine imkân tanıyacağı açıktır [17, 20, 23-27].

Sonuç olarak gittikçe azalan enerji tüketimleri ile sensör ağlarının enerjilendirilmesi yakın gelecekte mikrobiyal yakıt hücrelerindeki gelişmeler ile bir araya geldiğinde sensör ve mikrobiyal yakıt hücresinin birlikte kullanıldığı uzaktan veri izleme sistemlerinin yaygınlaşması olası bir durumdur.

## 5. Kaynaklar

- [1] Boehlert G.W. ve Gill A.B., “Environmental and ecological effects of ocean renewable energy development: a current synthesis,” *Oceanography*, vol. 23, pp. 68-81, 2010.

- [2] Gill A.B., "Offshore renewable energy: ecological implications of generating electricity in the coastal zone," *Journal of Appl. Ecol.*, vol. 42, pp.605-615, 2005.
- [3] Inger, R., Attrill, M.J., Bearhop, S., Broderick, et al., "Marine renewable energy: potential benefits to biodiversity? An urgent call for research," *Journal of Appl. Ecol.*, vol. 46, pp. 1145-1153, 2009.
- [4] T. Tsoutsos, N. Frantzeskaki, ve V. Gekas, "Environmental impacts from the solar energy technologies," *Energy Policy*, vol. 33, pp. 289–296, 2013.
- [5] Logan, B. E. ve Hamelers, B., et al. "Microbial Fuel Cells: Methodology and Technology," *Environ. Sci. Technol.*, vol. 40, no. 17, pp. 5181-5192, 2006.
- [6] Chirag, K. S. ve Yagnik, B. N., "Bioelectricity production using microbial fuel cell," *Research Journal of Biotechnology*, vol. 8, no. 3, pp. 84–90, 2013.
- [7] Lovley, D. R., "Bug juice: harvesting electricity with microorganisms," *Nature Reviews Microbiology*, vol. 4, no. 7, pp. 497–508, 2006.
- [8] Logan, B. E. ve Regan, J. M., "Microbial Fuel Cells—Challenges and Applications," *Environ. Sci. Technol.*, vol. 40, no. 17, pp. 5172-5180, 2006.
- [9] Du, Z. ve Li, H., et al., "A state of the art review on microbial fuel cells: A promising technology for wastewater treatment and bioenergy," *Biotechnol. Adv.*, vol. 25, no. 5, pp. 464–482, 2007.
- [10] Barua, P.K. ve Deka, D., "Electricity Generation from Biowaste Based Microbial Fuel Cells," *International Journal of Energy, Information and Communications*, vol. 1, no. 1, pp. 77–92, 2010.
- [11] Liu, H. and Ramnarayanan, R. and Logan, B. E., "Production of Electricity during Wastewater Treatment Using a Single Chamber Microbial Fuel Cell," *Environ. Sci. Technol.*, vol. 37, no. 7, pp. 2281-2285, 2004.
- [12] Zhang, F. and Ge, Z., et al., "In situ investigation of tubular microbial fuel cells deployed in an aeration tank at a municipal wastewater treatment plant," *Bioresour. Technol.*, vol. 136, pp. 316–321, 2013.
- [13] Yang, F. and Wang, K. C. and Huang Y., "Energy-Neutral Communication Protocol for Very Low Power Microbial Fuel Cell Based Wireless Sensor Network," *IEEE Sens. J.*, vol. 15, no. 4, pp. 2306–2315, 2015.
- [14] Alberts, B. and Johnson A., et al., *Molecular Biology of the Cell 4th Edition*, Garland Science, New York, 2002.
- [15] Zhao, Li and Brouwer, J., et al., "Modeling of Polarization Losses of a Microbial Fuel Cell," *ASME 2014 12th International Conference on Fuel Cell Science, Engineering and Technology*, 2014, pp. 6388-6394.
- [16] Khaled, F. and Ondel, O. and Allard, B. and N. Degrenne, "Voltage balancing circuit for energy harvesting from a stack of serially-connected Microbial Fuel Cells," *2013 IEEE ECCE Asia Downunder - 5th IEEE Annu. Int. Energy Convers. Congr. Exhib. IEEE ECCE Asia 2013*, 2013, pp. 392–397.
- [17] Khaled, F. and Ondel, O. and Allard, B., "Optimal Energy Harvesting From Serially Connected Microbial Fuel Cells," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 62, no. 6, pp. 3508–3515, 2015.
- [18] Logan, B. E. and Wallack M. J., et al. "Assessment of Microbial Fuel Cell Configurations and Power Densities," *Environ. Sci. Technol. Lett.*, vol.2, pp. 206-214, 2015.
- [19] Bond, D. R. and Holmes, D. E., et al., "Electrode-reducing microorganisms that harvest energy from marine sediments," *Science*, vol. 295, no. 5554, pp. 483–5, 2002.
- [20] Alaraj, M. and Ren, Z. J. and Park, J. D. "Microbial fuel cell energy harvesting using synchronous flyback converter," *J. Power Sources*, vol. 247, pp. 636–642, 2014.
- [21] Zhang, F. and Tian, L. and He, Z., "Powering a wireless temperature sensor using sediment microbial fuel cells with vertical arrangement of electrodes," *J. Power Sources*, vol. 196, no. 22, pp. 9568–9573, 2011.
- [22] Ren, Z. and Ward, T. E. and Regan, J. M., "Electricity Production from Cellulose in a Microbial Fuel Cell Using a Defined Binary Culture," *Environ. Sci. Technol.*, vol. 41, no. 13, pp 4781–4786, 2007.
- [23] Carreon -Bautista, S. and Erbay, C. and Han, A. and Sanchez-Sinencio, E., "Power Management System With Integrated Maximum Power Extraction Algorithm for Microbial Fuel Cells," *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 30, no. 1, pp. 262–272, 2015.
- [24] Carreon -Bautista, S. and Erbay, C. and Han, A. and Sanchez-Sinencio, E., "An Inductorless DC–DC Converter for an Energy Aware Power Management Unit Aimed at Microbial Fuel Cell Arrays," *IEEE J. Emerg. Sel. Top. Power Electron.*, vol. 3, no. 4, pp. 1109–1121, 2015.
- [25] Teh, Y. K. and Mok, P.K. T., "Design of Transformer-Based Boost Converter for High Internal Resistance Energy Harvesting Sources With 21 mV Self-Startup Voltage and 74% Power Efficiency," *IEEE J. Solid-State Circuits*, vol. 49, no. 11, pp. 2694–2704, 2014.
- [26] Park, J. D. and Ren, Z. "Hysteresis-Controller-Based Energy Harvesting Scheme for Microbial Fuel Cells With Parallel Operation Capability," *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 27, no. 3, pp. 715–724, 2012.
- [27] Meehan, A. and Gao, H. and Lewandowski, Z., "Energy Harvesting With Microbial Fuel Cell and Power Management System," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 26, no. 1, pp. 176–181, 2011.