



Araştırma Makalesi - Research Article

# Mikrobiyal Yakıt Hücrelerinde PROMETHEE Yaklaşımı ile Uygun Anot Elektrodu Modifikasyonunun Belirlenmesi

## Determination of Appropriate Anode Electrode Modification in Microbial Fuel Cells by the PROMETHEE Approach

Elif Durna Pişkin<sup>1\*</sup>, Nevim Genç<sup>2</sup>

Geliş / Received: 20/03/2023

Revize / Revised: 21/08/2023

Kabul / Accepted: 06/09/2023

### ÖZ

İklim değişikliği ve artan küresel enerji talebi, önemli derecede bilimsel ve teknolojik gelişmeler gerektiren bir sürdürülebilirlik sorunudur. Son zamanlarda, mikrobiyal yakıt hücresinin (MYH) bu konudaki önemi, eşzamanlı olarak atık arıtma ve elektrik enerjisi üretimi yeteneği nedeniyle oldukça ilgi çekmektedir. Bu çalışmada MYH sistemlerinin performansını etkileyen en önemli unsurlardan olan geleneksel anot elektrodunun modifikasyon alternatifleri değerlendirilmiştir. Modifikasyon yöntemleri arasında öne çıkan yaklaşımlar geleneksel anot materyalinin nanometal, iletken polimer ve nanokarbon yapı malzemeler ile kaplanmasıdır. Belirlenen bu modifikasyon alternatifleri güç/akım yoğunluğundaki artış, kaplama materyalinin maliyeti, elektriksel iletkenliği, yüzey alanı ve biyo-uyumluluğu kriterleri açısından değerlendirilmiştir. Alternatiflerin kriter değerleri literatür araştırması ile belirlenmiştir. Alternatif modifikasyon yöntemleri düşük maliyet ve yüksek güç/akım yoğunluğu, elektriksel iletkenlik, yüzey alanı ve biyo-uyumluluk kriterlerine göre PROMETHEE yaklaşımı kullanılarak sıralanmıştır. PROMETHEE II’de alternatiflerin tercih sıralaması metal bazlı nanomateryal ile kaplama>karbon bazlı nanomateryal ile kaplama>iletken polimer ile kaplama şeklinde belirlenmiştir. Rainbow analizi ile metal bazlı nanomateryal kaplama alternatifinin seçiminde güç/akım yoğunluğundaki artış, kaplama materyalinin iletkenliği ve maliyeti kriterlerinin pozitif etki, biyo-uyumluluk ve kaplama materyalinin yüzey alanı kriterlerinin ise negatif yönde etki gösterdiği belirlenmiştir.

**Anahtar Kelimeler-** Anot, Mikrobiyal Yakıt Hücresi, Modifikasyon, PROMETHEE Yaklaşımı

### ABSTRACT

Climate change and increasing global energy demand is a sustainability issue that requires significant scientific and technological developments. Recently, the importance of microbial fuel cell (MFC) in this regard has attracted a lot of attention due to its ability to simultaneously treat waste and generate electricity. In this study, the modification alternatives of the conventional anode electrode, which is one of the most important factors affecting the performance of MFC systems, were evaluated. Among the modification methods, the prominent approaches are coating the conventional anode material with nanometal, conductive polymer and nano-carbon materials. These modification alternatives were evaluated in terms of increase in power/current density, cost of coating material, electrical conductivity, surface area and biocompatibility criteria. Alternative modification methods were ranked

<sup>1\*</sup>Sorumlu yazar iletişim: [elif.durna@kocaeli.edu.tr](mailto:elif.durna@kocaeli.edu.tr) (<https://orcid.org/0000-0003-4478-2967>)

Çevre Mühendisliği Bölümü, Kocaeli Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Kocaeli, Türkiye

<sup>2</sup>İletişim: [ngenc@kocaeli.edu.tr](mailto:ngenc@kocaeli.edu.tr) (<https://orcid.org/0000-0002-6185-1090>)

Çevre Mühendisliği Bölümü, Kocaeli Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Kocaeli, Türkiye

according to low cost and high power/current density, electrical conductivity, surface area and biocompatibility criteria using the PROMETHEE approach. Criterion values were determined by literature research. In PROMETHEE II, the order of preference of the alternatives was determined as coating with metal-based nanomaterial>coating with carbon-based nanomaterial>coating with conductive polymer. By Rainbow analysis, it was determined that the increase in power/current density, conductivity and cost of the coating material had a positive effect in the selection of metal-based nanomaterial coating alternative, while the criteria of biocompatibility and surface area of the coating material had a negative effect.

**Keywords- Anode, Microbial Fuel Cell, Modification, PROMETHEE Approach**

## I. GİRİŞ

Günümüzde su ve enerji kıtlığı toplumun karşı karşıya olduğu en büyük sürdürülebilirlik sorunudur. Güneş, rüzgar ve biyoenerji gibi kaynaklar minimum karbon ayak izine sahip olsalar da, yüksek kurulum maliyeti, düşük verimlilik ve karmaşık işletim sistemleri gibi sınırlamaları mevcuttur [1]. Son yıllarda atık suyun arıtımı için alternatif sürdürülebilir yollar arasında mikrobiyal yakıt hücresi (MYH) dikkat çekmektedir [2]. MYH atık içeriğindeki organik maddede bulunan kimyasal enerjiyi elektrik enerjisine dönüştürebilen biyokimyasal bir teknolojidir. MYH ana avantajı olan elektrik üretimi yanı sıra düşük işletme maliyeti, düşük çamur oluşumu, basit sistem tasarımı, çeşitli organik kirleticiler ve biyokütle ile atık suya uyarlanabilmesi gibi avantajlara sahiptir [2,3]. Özellikle atık su arıtımı için öne çıkan MYH, organik atıkların destabilizasyonu için umut verici bir yöntemdir [4]. Bu yöntemin en önemli özelliği, biyo-katalizör olarak görev gören bakterilerin anodik odadaki anaerobik oksidasyon sürecini katalize ederek organik substratların kimyasal enerjisini elektrığe dönüştürme kabiliyetidir. Bu durum bakteriler elektronları doğrudan bir elektron alıcısı yerine bir elektroda aktardığında elde edilir. MYH'lerin teknik fizibiliteyi yakın zamanda kanıtlanmıştır ve elektrik üretmek için evsel ve endüstriyel atıkları kullanarak bir "yeşil elektrik" kaynağı sağlanabileceği düşünülmektedir [3]. Bir MYH'de, organik madde oksidasyonu mikroorganizmalar tarafından gerçekleştirilirken, metabolizmalarından kaynaklanan elektronlar bir anot elektroduna aktarılır ve anottan katoda doğru harici bir elektrik devresinden geçer [5]. Oksijen en yaygın kullanılan elektron alıcısıdır. Elektron alıcısı indirgenmediğinde, yarı geçirgen bir membrandan su oluşturmak üzere geçen protonlarla birleşir.

MYH sistemlerine etki eden parametreler arasında elektrot materyali en etkili parametrelerden biridir. Anot ve katot bölmelerinde kullanılan elektrot materyallerinin belirli özellikler göstermesi beklenir. Katot elektrodunun yüzeyinde bir katalizör varlığında elektronlar, protonlar ve oksijen arasında kimyasal bir reaksiyon gerçekleşir. Bu nedenle katot elektrodu yüksek redoks potansiyeline sahip olmalı ve membrandan geçen protonları kolayca yakalayabilmelidir [6]. Anot bölmesinde kullanılan elektrot materyalinin ise biyo-uyumlu, mikrobiyal bağlanmayı desteklemesi ve elektron transferine yardımcı olması istenir. Ayrıca kimyasal olarak inert olmalı, düşük direnç, geniş yüzey alanı, iyi elektriksel iletkenliğe sahip olmalı, korozyona ve bozunmaya dayanıklı olmalıdır. Bunlara ek olarak gerçekleştirilecek modifikasyonların ulaşılabilir ve karşılanabilir maliyetli olması MYH sistemlerinin ticarileşmesine katkı sağlayacaktır [1].

Anot bölmesinde okside olan substratın niteliği, kullanılan aşı kaynağı, elektrot materyali gibi unsurlar MYH'nin performansını önemli ölçüde etkilemektedir. Elektrot materyalinin özelliklerinin geliştirilmesi ile performansın artırılması üzerine çok sayıda çalışmalar yapılmıştır [7-13]. Optimum anot elektrodunun sahip olması beklenen bazı özellikler aşağıda açıklanmıştır [7];

-Biyo-uyumluluk: MYH'lerin güç eldesinde belirleyici rol oynar. Elektroaktif mikroorganizmaların yapışması ve biyofilmin oluşumu MYH'lerin etkin işletilmesinde en önemli faktördür. Bu yüzden bağlı mikroorganizmalar üzerinde sitotoksik etkiye sahip olan ve elektroaktif biofilmin gelişimini sınırlayan anot malzemelerin kullanımından kaçınılmalıdır. Azotlu maddeler veya doğal polimerler ile modifikasyon stratejileri genel olarak tercih edilmektedir [9].

-Yüzey alanı ve porozite: Elektroaktif biofilmin oluşumu için anot malzemesinin yüzey alanı ve gözenekliliği kritik öneme sahiptir. Pürüzlü yapılar mikroroganizma bağlanmasını artırır. Porozitedeki artış ohmik kayıpları da azaltabilir. Çok yüksek porozite ise iletkenliği azaltacağından tercih edilmez [14].

-Kararlılık ve Dayanıklılık: Anot elektrodu anot bölmesinde meydana gelen oksidasyon reaksiyonları nedeni ile çok iyi bir fizikokimyasal stabiliteye sahip olmalıdır. Uzun süre su ortamında bulunması dolayısı ile istenmeyen dekompozisyon ve şişme gibi durumlar gözlenebilir, bunu önlemek için belirli bir hidrofobik bileşenlere sahip olması önerilmektedir [7].

-Elektriksel iletkenlik: İyi bir iletkenliğe sahip anot materyali mikroorganizmaların metabolik yollardan oluşan elektronları etkili bir şekilde dış devreye transfer eder [14].

Günümüzde karbonlu malzemeler MYH sistemleri için iyi biyo-uyumluluk ve iletkenlik göstermektedir. Buna ek olarak nispeten ucuz olduklarından yaygın olarak kullanılmaktadırlar [3]. Karbon anot elektrotların yüzeyi biyofilm oluşumu için uygundur ve elektron transferini artırır. Karbon malzemeler düz, fırça veya köpük gibi farklı şekillerde bulunabilir. Karbon keçe, çubuk, elyaf, kumaş, ağ, kağıt, aktif karbon kumaş, camsi karbon, fırçalar, ağsı camsi karbon ve grafit (blok, keçe, 3D grafit) gibi bazı yaygın karbon bazlı malzemeler literatürde incelenmiştir [3]. Karbon malzemeler, iyi mekanik özellikleri, biyouyumlulukları, kimyasal kararlılıkları ve düşük maliyetleri nedeniyle yaygın olarak anot malzemeleri olarak kullanılırlar. Ancak elektroaktif bakterilerin hızlı büyümesi sonucu geleneksel karbonlu malzemelerin gözenekleri kolayca tıkanabilir ve bu durum substrat difüzyonunu ve yararlı biyofilm oluşumunu engeller [1]. Son zamanlarda grafenin bir elektrot malzemesi olarak MYH'lerde kullanımı büyük ilgi görmüştür [14,15]. Grafit malzemeler oldukça iletken ve yüksek yüzey alanına sahiptir, ancak düşük gözeneklilikleri karbon keçe malzemelere kıyasla daha az güç sağlar [6].

Chaudhuri ve Lovley (2013), çeşitli grafit elektrotların MYH'lerde elektrik üretimi üzerindeki etkisini karşılaştırmışlardır. Grafit keçeden oluşan elektrotların grafit çubukla karşılaştırıldığında üç kat daha fazla elektrik ürettiği belirlenmiştir [16]. Logan ve diğ. (2007) geliştirdikleri bir titanyum tel etrafına sarılmış grafit fiber fırçadan oluşan elektrot ile anot yüzey alanını artırarak mikrobiyal tutunmayı arttırmışlardır. Grafit fırça ile gerçekleştirdikleri çalışmada maksimum güç yoğunluğu karbon kağıda göre yaklaşık dört kat daha yüksek olan 2400 mW/m<sup>2</sup> güç yoğunluğu elde etmişlerdir [17]. Karbon kumaş kullanılan benzer bir çalışma ile 483 mW/m<sup>2</sup>'ye kadar maksimum güç yoğunluğu elde edilmiştir [18].

MYH'nin işletme maliyetini azaltmak için elektrot malzemesi olarak metallere kullanılabilir. Nispeten ucuzdurlar ve korozyona dirençli oldukları bildirilmiştir. Paslanmaz çelik ağ ve paslanmaz çelik fiber keçe gibi metallere, üç boyutlu destek sağlarken aynı zamanda anodik akım toplayıcısı olarak işlev görürler [19]. Metaller çok daha yüksek iletkenliğe sahiptir, ancak yüzey özellikleri biyofilm oluşumuna izin vermez ve mikroorganizmalar için toksiktir [20].

Paslanmaz çelik malzemelerin karbonlu malzemeler (karbon nanotüp (CNT), grafen (GR) gibi) ile modifikasyonu büyük ölçüde geliştirilmiş güç çıkışı sağlayabilir. Ancak bu tip modifikasyonlar MYH'nin işletme maliyetini yükselteceğinden büyük ölçekli uygulamaları elverişsiz hale getirir [21]. Sun ve ark. (2010) altın ile modifiye edilmiş anotun kullanılması ile MYH'lerde anodun elektrokimyasal performansının geliştiğini ve hızlı biyofilmin büyümesinin gerçekleştiğini belirlemişlerdir [22].

MYH'nin yüksek güç üretim potansiyeline sahip olması için elektrot materyalinin yüksek elektriksel iletkenliğe, yüksek biyo-uyumluluğa ve geniş yüzey alanına sahip olması arzu edilmektedir. Ancak mevcut geleneksel materyallerin fizikokimyasal özellikleri bunu kısıtlamaktadır [23]. Bu yüzden çeşitli modifikasyon yöntemleri ile konvansiyonel malzemelerin özellikleri geliştirilmiştir [21]. MYH'lerinin performansının geliştirilmesinde en çok kabul gören yaklaşım, geleneksel anot elektrodunun modifikasyonudur. Anot elektrodunun modifikasyonu, anodik aktivasyon aşırı potansiyelini etkili bir şekilde azaltarak ve elektron iletim mekanizmasını geliştirebilir ve MYH'lerin güç üretim performansını artırabilir [24].

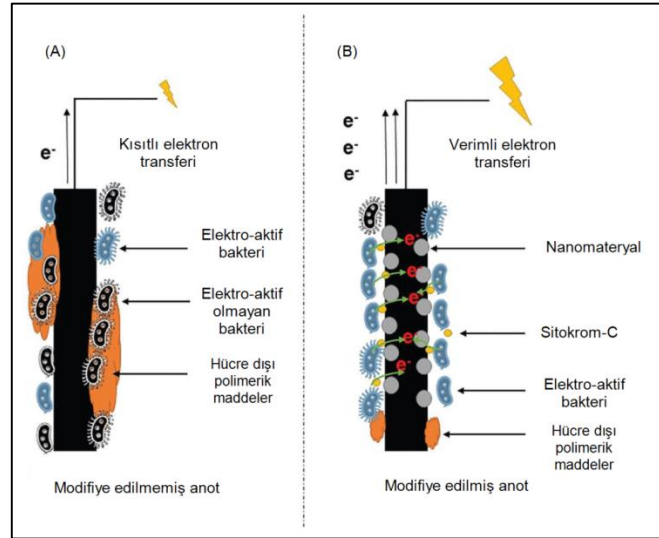
Modifikasyon metodlarında elektrodun karbon bazlı materyaller, metal bazlı materyaller ve iletken polimer maddeler ile kaplanması en çok üzerinde çalışılan konular olmuştur. Tek materyal veya birden fazla materyal ile kaplama yaygın olarak uygulanmaktadır. Geleneksel elektrotların kaplanması ile elektriksel iletkenlik, yüzey alanı ve mikroorganizmaların bağlanması geliştirilmekte, bunun sonucu olarak güç/akım yoğunluğunda artış elde edilmektedir. Ancak bu süreçte kaplama materyalinin maliyeti de önem arz etmektedir. Bu nedenle uygun kaplama materyali seçimi önemlidir.

## II. ANOT YÜZEY KAPLAMA

Medyatörlerin kullanıldığı MYH sistemlerinde elektron taşınımı medyatörler aracılığı ile gerçekleşmektedir. Medyatör içermeyen MYH'lerde ise elektronlar elektroaktif bakteriler aracılığı ile taşınır. Bu bakteriler oksitlenen organik madde tarafından salınan elektronları yakalayarak direkt elektron taşınım mekanizmaları ile anoda taşırlar. Mikroorganizmadan anot materyaline elektron transferinin azalması ile oluşan enerji kayıplarının minimum seviyeye düşürülmesi için hücre membranından anot yüzeyine elektron taşınımını artırmak gereklidir. Bu amaçla medyatörlerin ilave edilmesi, elektrot yüzey alanının artırılması, anot üzerinde elektrojenik biyofilmin zenginleştirilmesi gibi çeşitli stratejiler önerilmektedir [2]. Anotun modifikasyonunda nanomalzemelerin kullanılması bu stratejilerden birisidir. Nanomateryaller elektroaktif bakterilerin oluşumunu kolaylaştırır ve elektron transferini teşvik eder [25]. Şekil 1'de nanomateryaller ile modifiye olmuş ve olmamış anot materyalinde elektron transfer mekanizması gösterilmiştir.

MYH'nin performansında elektrot materyal seçimi önemli rol oynar. Düşük yüzey alanı ve yüksek iç direnç gibi özelliğe sahip iki boyutlu elektrot materyalleri ile performansın düşük kalması sonucu üç boyutlu materyaller geliştirilmeye başlanmıştır. Üç boyutlu anot materyalleri bakteri topluluklarının etkili bir koloni oluşturması ve anot materyaline etkili yapışmasını sağlamak için yüksek yüzey alanı sunarlar ve böylece anotta solunum yapan bakterilere substrat transferi artırılmış olur [26].

Geleneksel karbon malzemelerinin nispeten düşük güç yoğunluğu ve zayıf enerji dönüşüm verimliliği, bakteri ve elektrot arasında yavaş elektron transferine neden olarak MYH'lerin pratik uygulamalarını sınırlandırır [27]. Buna karşın kompozit malzemelerin geniş yüzey alanı ve mükemmel iletkenliği, bakteri ve anot malzemesi arasında kararlı ilişkiler için elverişli bir ortam sunar [14]. Yüzey kaplama işlemleri anotun elektrokimyasal özelliklerini geliştirmek amacı ile yüksek performanslı modifiye ajanların ilavesine dayanmaktadır [10]. Polimerler, kompozit malzemeler, karbon ve metal bazlı nanomalzemeler ile çeşitli modifikasyon yaklaşımları mevcuttur [21]. Karbon bazlı elektrotlar, metal veya metal oksitler, iletken polimerler, kompozit malzemeler ve nano yapısal malzemeler ile modifiye edilebilirler [14].



Şekil 1. Modifiye olmuş ve olmamış elektrotun elektron iletimi [25]

### A. Karbon Bazlı Nanomalzemeler ile Kaplama

Karbon malzemeler anot elektrotlarında en fazla kullanılan malzemelerdir. MYH sistemlerinin ticarileştirilmesinde en büyük engel düşük güç yoğunluğu olduğundan bu tip malzemelerin nano ölçekte kullanımı önerilmektedir [28]. Nanomalzemeler, olağanüstü büyük yüzey-hacim oranlarının yanı sıra organik madde ile güçlü yük etkileşimleri gibi benzersiz elektrokimyasal özellikler sunar [19]. Karbon nanotüp (CNT), karbon nano lifler (CNF'ler), grafen (GF) ve grafit karbon nitrür (g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>) gibi çeşitli malzemeler ve bunların kompozitleri, MYH'lerde elektrotlar olarak etkili bir şekilde kullanılır [21]. CNT düzensiz yapıda, yüksek mekanik güce ve çok iyi iletkenliğe sahip bir nanomalzemedir. CNT'in elektrot yapısına katılması ile elektron transferi artar ve elektrot üzerinde mikrobiyal büyüme gelişir [10]. Bazı araştırmacılar CNT'lerin mikroorganizmalara toksik etki

yapabileceğini ifade etmektedirler. Belirli iletken materyaller ile entegrasyon veya bazı fonksiyonel grupların bağlanması ile biyo-toksistenin kontrol edilebileceğini ifade etmişlerdir [7].

Karbon allotropları olan karbon nanotüplerin (CNT'ler), benzersiz elektriksel iletkenlikleri, kimyasal kararlılıkları, biyo-uyumlulukları, yüksek spesifik alanları ve katalitik özellikleri nedeniyle MYH elektrotları için umut verici alternatif malzemeler olduğu gösterilmiştir. CNT'lerin güçlü hücre yapışması, hücre bağlanması ve büyüme özelliklerine sahip olduğu bildirilmektedir [18]. Örneğin, çok duvarlı CNT'ler, elektrotların elektrik iletkenliğini ve yüzey alanını artırmak için basit daldırma yöntemleri kullanılarak karbon kumaşa veya kağıtlara tutturulduğunda güç yoğunluğunda %20-150'lik bir artış sağlanmaktadır [29]. Liang ve ark. [11] biyofilm oluşumunu artırarak MYH performansını artırmak için CNT tozu ile karbon kumaşı modifiye etmişlerdir. Modifiye elektrot ile çalıştırılan MYH'nin 180  $\Omega$  iç dirence sahip olduğu, bu değer ise CNT tozu eklenmeden çalıştırılan MYH'den (540  $\Omega$ ) önemli ölçüde daha düşük olduğu belirlenmiştir [11]. Bununla birlikte, atık su arıtımı için CNT'lerin uygulanmasını engelleyen bazı tıkanma sorunları hala mevcuttur. CNT üretiminin yüksek maliyeti ve karmaşıklığı büyük ölçekli ticari üretimlerini sınırlarken hücrel toksite içeren CNT'ler inhibisyona ve hücre ölümüne yol açarak MYH sisteminin kararsızlığına neden olur [30].

Son yıllarda grafen bazlı elektrotlar, yüksek spesifik yüzey alanı, aktif bakteri-elektrot-elektrolit etkileşimi ve yüksek elektron transfer verimliliği nedeniyle dikkat çekmektedirler [31]. Grafen oksit, indirgenmiş grafen ve grafen türevleri MYH'lerde anot modifikasyonu için kullanılmıştır. Zhang ve ark. (2011) çalışmalarında grafen ile modifiye edilmiş paslanmaz çelik ile modifiye edilmemiş anottan 18 kat ve politetrafloroetilen ile modifiye elde edilen anottan 17 kat daha fazla olan maksimum 2668 mW/m<sup>2</sup> güç yoğunluğu elde etmişlerdir [32]. Karbon kumaşın iletkenliği ve biyofilm oluşumu, karbon kumaş anodunun indirgenmiş grafen oksit ile değiştirilmesiyle önemli ölçüde artırılabilir. Mikroorganizmaların çoğu negatif yüklüdür, dolayısıyla Guo ve ark. pozitif yüklü grafenle modifiye edilmiş karbon kağıt elektrotların elektroda bağlanan mikroorganizmaların sayısını büyük ölçüde artırdığını göstermişlerdir. Bu tip anot elektrotlarına dayalı MYH'nin maksimum güç yoğunluğu, modifikasyon yapılmamış elektrotlar ile işletilen MYH'den iki kat daha yüksek (368 mW/m<sup>2</sup>) değere ulaşmıştır [33].

Cui ve ark. (2015) çalışmalarında grafit keçe üzerine PANI ve CNT modifikasyonu gerçekleştirmişlerdir. Grafit keçenin yüzey hidrofobikliğini gösteren 113–120°'lik bir statik su temas açısı vardır. PANI ile modifikasyon sonrası ölçümde su damlası tamamen ve hızla PANI/grafit keçeye adsorbe olmuştur. Bu davranış, PANI filminden kaynaklı yüzeyin hidrofobikliğini doğrulamıştır. Bu şekilde suyun PANI/grafit keçe'nin hem makro gözeneklerine hem de mezo gözeneklerine geçişi sağlanmış olmuştur [8].

### **B. İletken Polimerler ile Kaplama**

Anot materyaline mikrobiyal bağlanmayı geliştirmek için ekzoelektrojenler ile elektrostatik etkileşimin artırılması, uygun gözenek boyutunun yaratılması, spesifik direnç kullanımı öne çıkmaktadır. Bu şekilde elektrokimyasal reaksiyon hızı geliştirilebilir ve iç direnç azaltılabilir [21]. Kolay hazırlanabilmesi, çok iyi bir kaplama kimyasalı olması, yüksek elektroaktivitesi, mükemmel stabilitesinden ötürü polianilin (PANI) elektrokimyasal alanlarda geniş ölçüde uygulanmaktadır [7]. PANI pH>4'da elektrokimyasal olarak reaksiyona girer ve pH<4'da çözeltide elektriği iletir. Bu durum PANI'nin uygulamasını sınırlamaktadır [10].

PANI yanı sıra polipirol, politiyofen gibi iletken polimerler de yüksek iletkenlik özelliklerinden dolayı anot malzemeleri olarak kullanılabilir [14,21]. Mashkour ve ark., PANI'nin biyofilm büyümesi üzerindeki olumlu etkisine dikkat çekmişlerdir. Nitrojen katkılı CNT, PANI ve MnO<sub>2</sub> ile modifiye edilmiş karbon keçe anot, kaplanmamış anottan 2.76 kat daha yüksek hücre biyokütle içeriğine sahip olmuştur [12]. Karbon kumaş üzerine Au modifikasyonu MYH sisteminin güç yoğunluğunu düşürürken, PANI modifikasyonu ile güç yoğunluğu 552 mW/m<sup>2</sup>'ye ulaşmıştır. Bu durumun altın metalinin düşük biyo-uyumluluğundan kaynaklanabileceğini bildirilmiştir. Bunun yanı sıra Au/PANI ile modifiye edilmiş karbon kumaş (KK) anot, artan spesifik yüzey alanı ve elektrik iletkenliği nedeniyle daha yüksek elektrokimyasal aktivite göstermiştir. Au/PANI/KK anotta üretilen güç yoğunluğu, modifiye edilmemiş anot, PANI ile modifiye edilmiş ve Au ile modifiye edilmiş anottan sırasıyla 2.42, 1.45 ve 3.72 kat daha yüksek elde edilmiştir [34].

Kitosan, polianilin (PANI) ve polipirol gibi çeşitli polimerler CNT'ler üzerinde de katkı malzemesi olarak kullanılabilir. Nitrojen katkılı CNT polianilin (CS-NCNT-PANI) anot ile çalıştırılan MYH ile 4200 W/m<sup>3</sup>

maksimum güç yoğunluğuna ulaşılmıştır. Bu güç polianilin-nitrojen katkılı CNT (PANI/NCNT) ve nitrojen katkılı CNT kullanılarak elde edilenden sırasıyla 1.6 ve 3 kat daha fazla olmuştur [14].

### C. Metal Bazlı Nanomalzemeler ile Kaplama

Gümüş, altın, nikel, titanyum, altın, bakır ve bunların türevleri gibi metaller, mükemmel iletkenlikleri ve yüksek mekanik dayanımları nedeniyle genellikle anot elektrotlarını modifiye edici ajan olarak işlev görürler. Bu avantajların dışında, rutil gibi bazı metalik mineraller ve goetit ekzoelektrojenlerin büyümesini ve EET verimliliğini destekleyebilir [1].

Yapılan araştırmalar karbon malzeme bazlı anotun metal veya metal oksitlerle modifikasyonunun elektro-kimyasal davranışını değiştirebileceğini ve anotta zenginleştirilmiş mikrobiyal topluluğu etkileyebileceğini ortaya koymuştur. Metal ve metal kompleksli nanomateryel kompozitli anot modifikasyonu, iletkenliği artırıp, ohmik kayıpları azaltarak MYH'nin performansını artırır [10].

Elektrotların yarı iletken malzemelerle (ör.  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{ZnO}$ ,  $\text{SnO}_2$ ,  $\text{Cu}_2\text{O}$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{CeO}_2$  ve diğerleri) modifikasyonu, elektrot yüzeyinde gelişmiş oksidasyon süreçleri oluşturma yetenekleri nedeniyle ilgi çekmiştir [23]. Özellikle, manganez dioksit ( $\text{MnO}_2$ ) düşük maliyetli ve çevre dostudur. Bununla birlikte, zayıf elektriksel iletkenlik ( $10^{-5}$ – $10^{-6}$  S  $\text{cm}^{-1}$ ) ve uzun elektron/iyon taşıma mesafeleri nedeniyle, yüksek oranda  $\text{MnO}_2$  kütle yüklemesi, düşük elektroaktif alanlara, yüksek dirence, yavaş kütle difüzyonuna ve iyon taşınımına neden olabilir [35]. Xu ve ark. (2018) MYH sistemlerinde karbon kumaş elektrotları  $\text{MnO}_2$ , Pd ve  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  kullanarak modifiye etmişlerdir [36]. Pd,  $\text{MnO}_2$  ve  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  modifiye anotlar için sırasıyla 824, 782 ve 728  $\text{mW/m}^2$ 'lik bir maksimum güç yoğunluğu elde edilmiştir. Quan ve ark. (2015) çalışmalarında özel bir mikroorganizma ile biyolojik Pd üretmek için karbon kumaş anotunu modifiye etmişlerdir. Modifiye elektrot ile modifiye edilmemiş elektrottan %14 daha fazla güç yoğunluğu elde etmişlerdir [13]. Qiao ve ark. (2014), çalışmalarında karbon kumaş liflerinin yüzeyinde bir NiO nano katkısı kullanmışlardır. NiO/karbon kumaş anot, düz karbon kumaş anodunkinden ( $303 \pm 25 \text{ mW/m}^2$ ) 3 kat daha yüksek olan,  $1024 \pm 46 \text{ mW/m}^2$  maksimum güç yoğunluğu sağlamıştır [37].

Tablo 1'de geleneksel karbon materyalinin modifikasyonu ile güç yoğunluklarındaki artışları gösteren çalışmalar gösterilmektedir.

**Tablo 1.** Geleneksel karbon materyalleri üzerine gerçekleştirilen modifikasyon çalışmaları sonucu güç yoğunluklarındaki değişim

Modifiye edilmiş anot elektrodu	Aşılma kaynağı	Substrat	Güç yoğunluğu (modifiye olmayan elektrot)	Güç yoğunluğu (modifiye elektrot)	Ref.
Bio-Pd/Karbon kumaş	Anaerobik çamur	Sentetik asetat çözeltisi	534 $\text{mW/m}^2$	605 $\text{mW/m}^2$	[13]
Nano $\text{TiO}_2$ / Karbon kumaş	Anaerobik çamur	Sentetik asetat çözeltisi	423 $\text{mW/m}^3$	690 $\text{mW/m}^3$	[38]
$\text{MnO}_2$ /Karbon keçe	Önceden işletilen MYH reaktörü çıkış suyu	Sentetik asetat çözeltisi	2870 $\text{mW/m}^2$	3580 $\text{mW/m}^2$	[39]
Karbon nanotüp / Karbon kumaş	Evsel atık su	Sentetik asetat çözeltisi	44 $\text{mW/m}^2$	65 $\text{mW/m}^2$	[40]
Grafen / Karbon kumaş	Anaerobik çamur	Sentetik glikoz çözeltisi ve metil oranj boyası	182 $\text{mW/m}^2$	368 $\text{mW/m}^2$	[33]
Karbon nanotüp/ Karbon kumaş	<i>Geobactersulfurreducens</i>	Sentetik asetat çözeltisi	225 $\text{mW/m}^2$	275 $\text{mW/m}^2$	[11]
NiO/ Karbon kumaş	<i>Shewanella putrefaciens</i>	Sentetik bakteri çözeltisi (Lizojenik su)	302 $\text{mW/m}^2$	1024 $\text{mW/m}^2$	[37]
Poly(3,4-ethylenedioxythiophene)/KK	Anaerobik çamur	Sentetik asetat çözeltisi	0.35 $\text{W/m}^2$	0.79 $\text{W/m}^2$	[9]
PANI/grafit keçe	<i>Shewanella putrefaciens</i>	Sentetik asetat çözeltisi	49 $\text{mW/m}^2$	80 $\text{mW/m}^2$	[8]
Karbon nanotüp /PANI/grafit keçe	<i>Shewanella putrefaciens</i>	Sentetik asetat çözeltisi	42 $\text{mW/m}^2$	257 $\text{mW/m}^2$	[8]

Bu çalışmada anot modifikasyon/kaplama çalışmaları hakkında literatür bilgileri verilerek, bu bilgiler ve uzman görüşleri ışığında belirlenen kriterler ile en uygun anot kaplama materyali seçimi gerçekleştirilmiştir.

Alternatif kaplama yöntemleri, belirlenen kriterler (güç/akım yoğunluğundaki artış, kaplama materyalinin maliyeti, elektriksel iletkenliği, yüzey alanı ve biyo-uyumluluğu) ile PROMETHEE (The Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluation) yaklaşımı kullanılarak sıralanmıştır.

### III. MALZEME VE YÖNTEM

#### A.PROMETHEE Yaklaşımı ile Geleneksel Anot Elektrodu Kaplama Materyali Seçimi

Çok kriterli karar verme yöntemlerinin içinde en çok tercih edilen sıralama yöntemlerinden biri PROMETHEE yöntemidir [41]. Brans ve Vincke tarafından geliştirilen PROMETHEE methodu daha sonra, karar problemini iki boyutlu bir düzlemde grafiksel olarak temsil etmeyi sağlayan bir geometrik analiz (GAIA) ile geliştirilmiştir [42]. PROMETHEE, alternatiflerin tercih derecelerine göre bir sıralama gerçekleştirir. Genel olarak çok kriterli karar verme yöntemlerinde karar süreci farklı karar vericilerin kendi tercihlerine göre problemi farklı şekillerde yorumlamalarından etkilenir. PROMETHEE'de tercih derecesi, bir eylemin başka bir eyleme karşı nasıl tercih edildiğinin ifadesidir [43]. Bu çalışmada, PROMETHEE methodu için Visual PROMETHEE yazılımı Academic Edition sürümü kullanılmıştır.

Bu çalışmada MYH sistemlerinde geleneksel karbon bazlı anot elektrotların modifikasyonu için uygulanan yöntemlerin seçimi için PROMETHEE metodu kullanılmıştır. Literatür araştırması ve uzman karar vericiler ışığında geleneksel karbon bazlı elektrotların modifikasyonu için belirlenen alternatifler; (I) karbon bazlı nanomalzemeler ile kaplama, (II) iletken polimer maddeler ile kaplama ve (III) metal bazlı nanomalzemeler ile kaplama şeklindedir. Geleneksel anot materyali olarak karbon kağıt seçilmiştir. Karbon kağıdın pürüzsüz yüzeyi oldukça ince ve kırılğan bir yapıda olduğundan mikroorganizmaların bağlanması ve büyümesi için uygun değildir [10]. Elektriksel iletkenliği 2 S/m olarak [44], maliyeti 756.55 dolar/m olarak bildirilmiştir [45].

Alternatif kaplama materyalleri olarak karbon bazlı nanomalzemeyi temsilen tek tabakalı CNT, iletken polimer malzeme için PANI, metal bazlı malzeme için ise Ni seçilmiştir. Belirlenen kaplama malzemesi alternatiflerinin değerlendirilmesinde kullanılacak kriterler ise güç/akım yoğunluğundaki artış, kaplama malzemesinin maliyeti, elektriksel iletkenliği ve yüzey alanı ve biyo-uyumluluğu olarak belirlenmiştir.

Elektrot materyalinin özelliklerinin geliştirilmesi üzerine yapılan çalışmalarda MYH sistemlerinin güç ve akım yoğunluğunun artırılması hedeflenmiştir. Bu çalışmalarda modifiye edilmiş elektrot performansları modifiye edilmemiş elektrot performansları ile karşılaştırılarak sunulmuştur. Ancak literatürde modifiye edilen elektrotların maliyeti, elektriksel iletkenliği, yüzey alanı, biyo-uyumluluğu gibi kriterler üzerine değerlendirmeler ve veriler çok sınırlı sayıdadır. Bu nedenle PROMETHEE yaklaşımında alternatifler değerlendirilirken modifiye edilmiş elektrodun nitelikleri yerine, kaplama malzemesinin literatürden elde edilen nitelikleri kullanılmıştır. Ham elektrot, kaplama materyali ile kaplandığında sinerjistik etki ile daha yüksek iletkenliğe sahip olmaktadır. Örneğin grafenin ve polipirolun elektriksel iletkenlikleri sırasıyla 0.22 S/cm ve 0.017 S/m iken grafenin polipirol ile kaplanması sonucu elde edilen elektrodun elektriksel iletkenliği 3.32 S/cm'dir [46].

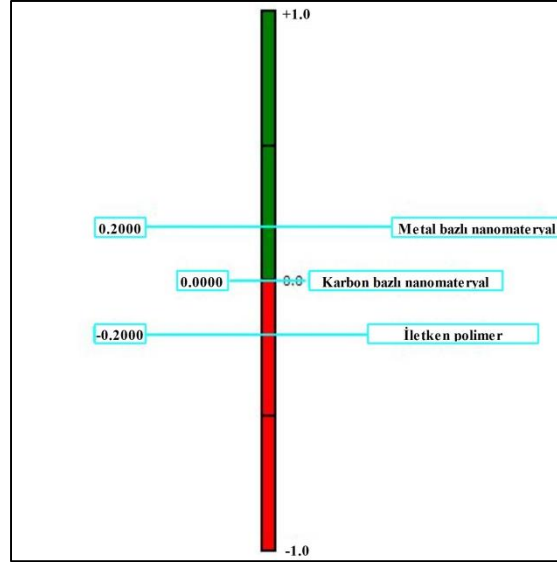
Literatürde modifiye edilmiş elektrot materyalinin biyo-uyumluluğu ile ilgili çok az veri bulunmaktadır. Bazı araştırmacılar CNT'ün olası toksik etkileri olabileceğini ifade etmektedirler [30]. Pozitif yüklü PANI ve negatif yüklü bakteri arasında yüksek bir etkileşim olmaktadır. Karbon kağıdın bağlı aktif biyokütlesi  $298 \pm 7.6 \mu\text{g}/\text{cm}^2$  iken PANI-karbon kağıdın  $1346.5 \pm 11.3 \mu\text{g}/\text{cm}^2$  olduğu belirlenmiştir [10]. Biyo-uyumluluk kriteri değerlendirilmesinde karar vericilerin dilsel değerlendirmeleri dikkate alınmıştır. Dilsel kriterlerin değerlendirilmesinde çok kötü, kötü, orta seviye, iyi ve çok iyi olmak üzere 5 noktalı ölçek kullanılmıştır. Tablo 2'de PROMETHEE için kullanılacak olan geleneksel karbon materyalinin ve modifikasyon alternatiflerinin kriterleri ve bu kriterlere ait özellikleri sunulmuştur. Değerlendirmede her bir kriter eşit önemde alınmıştır.

Tablo 2. PROMETHEE için belirlenen alternatifler, kriterler ve kriter özellikleri

Alternatifler	Kriterler				
	Güç/Akım yoğunluğundaki artış oranı (modifiye olmuş elektrot potansiyeli/modifiye olmamış elektrot potansiyeli)	Biyoyoumluluk	Kaplama materyalinin iletkenliği (S/m)	Kaplama materyalinin maliyeti (Euro/g)	Kaplama materyalinin yüzey alanı (m <sup>2</sup> /g)
Karbon bazlı nanomateriyal ile kaplama (CNT)	29.44 [47]	Orta	10 <sup>6</sup> S/m [48]	1976 [49]	351.5 [50]
Metal bazlı nanomateriyal ile kaplama (Ni)	381.23 [44]	Kötü	1.43x10 <sup>7</sup> S/m [44]	11.2 [51]	28.1 [51]
İletken polimer ile kaplama (PANI)	6.1 [52]	İyi	200 S/m [53]	27.2 [49]	95.423 [54]

#### IV. BULGULAR

PROMETHEE yaklaşımı sonucu karbon kağıt geleneksel anot elektroduna uygulanacak en uygun kaplama materyali olarak metal bazlı nanomalzeme seçilmiştir. PROMETHEE II’de alternatiflerin net sıralaması verilmiştir (Şekil 2). Buna göre tercih sıralaması metal bazlı nanomateriyal ile kaplama>karbon bazlı nanomalzeme ile kaplama>iletken polimer ile kaplama şeklinde olmuştur.

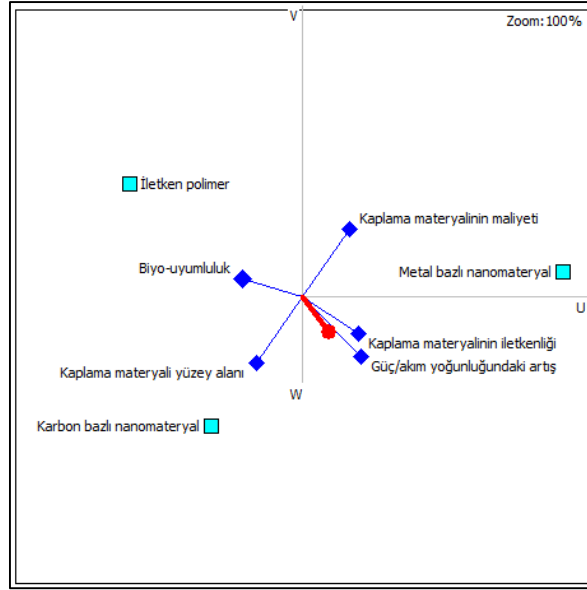


Şekil 2. Alternatiflerin PROMETHEE II sıralaması

GAIA (Graphical Analysis for Interactive Assistance) analizinde alternatifler nokta, kriterler ise vektör olarak gösterilmiştir. Karar çubuğu düzlem üzerinde kırmızı vektör olarak verilmektedir. GAIA ile sonuçların bir düzlem üzerinde sunulması sağlanır ve alternatif ile kriterlerin pozisyonları hakkında bilgi sunulur. Şekil 3’te görüldüğü üzere karar çubuğu metal bazlı nano malzeme ile kaplama alternatifine daha yakın görülmektedir.

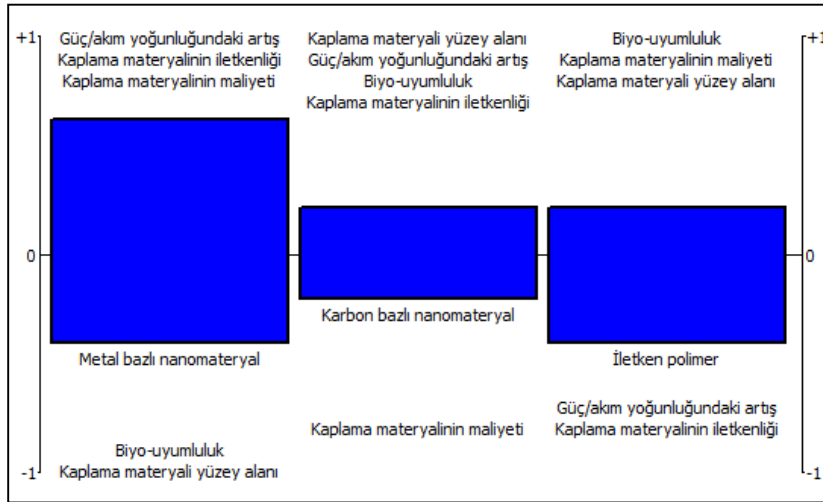
GAIA grafiğinde, eğer karar çubuğunun kısa olması kuvvetli bir karar gücü olmadığı, kriterlerin çeliştiği ve en uygun alternatifin seçiminin zorlaştığı anlamına gelmektedir [55]. Şekil 3’te karar vektörü kriter vektörlerine göre kısa olduğundan zayıf bir karar gücü olduğu söylenebilir. Kaplama materyalinin iletkenliği kriterinin vektör uzunluğu diğer vektörlerden daha kısa olduğu için, iletkenlik kriterinin ayrıştırma gücünün düşük seviyede olduğu söylenebilmektedir.





Şekil 3. Alternatiflerin sıralamasında GAIA düzlemi

PROMETHEE Rainbow analizi Şekil 4’te verilmiştir. Bu analiz, her bir alternatif için hangi kriterlerin en önemli olduğunu ve kriterlerin alternatifin seçimini ne yönde (pozitif veya negatif) etkilediğini belirlemeye yardımcı olur. Şekil 4’te görüldüğü üzere metal bazlı nano malzeme ile kaplama alternatifinin pozitif yöndeki bölümü diğer iki alternatife göre çok daha yüksektir. [+1/0] üst kısımda yer alan güç/akım yoğunluğundaki artış, kaplama materyalinin iletkenliği ve maliyeti kriterleri, bu alternatifin seçiminde pozitif yönde etki etmiştir. [-1/0] alt kısımda yer alan biyo-uyumluluk ve kaplama materyalinin yüzey alanı kriterlerinin ise bu alternatifin seçiminde negatif yönde etki ettiği görülmektedir. Karbon bazlı nanomalzeme ile kaplama alternatifinde kaplama malzemesinin maliyeti, alternatifler arasındaki seçimde negatif etki göstermiştir, iletken polimerik maddeler ile kaplama alternatifi için ise malzemenin iletkenliği ve güç/akım yoğunluğundaki artış negatif yönde etki etmiştir.



Şekil 4. PROMETHEE Rainbow analizi

## V. SONUÇLAR

MYH’lerde performansın geliştirilmesinde en kabul gören ve uygulanan yaklaşımlardan biri anot elektrodunun elektriksel iletkenlik, yüzey alanı ve biyo-uyumluluk gibi özelliklerinin geliştirilerek yüksek güç/akım yoğunluğunun elde edilmesidir. Anot elektrodunun uygulanabilir maliyetli çeşitli kaplama malzemeleri ile bu özelliklerinin geliştirilmesi hedeflenmektedir. Bu çalışmada geleneksel anot materyallerinden olan karbon kağıtın nanokarbon bazlı malzeme, iletken polimerik madde ve nanometal malzeme ile kaplanması sonucu anot elektrodundaki performans iyileşmeleri değerlendirilmiş ve PROMETHEE yaklaşımı ile en uygun kaplama alternatifi seçilmiştir. PROMETHEE analizinde elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmiştir.

- PROMETHEE II ile alternatiflerin net sıralaması metal bazlı nanomateryal ile kaplama>karbon bazlı nanomalzeme ile kaplama>iletken polimer ile kaplama şeklinde belirlenmiştir.
- GAIA analizinde karar çubuğuna en yakın alternatif metal bazlı nanomateryal ile kaplama olarak belirlenmiştir. İletkenlik kriterinin ayrıştırma gücünün düşük seviyede olduğu görülmüştür.
- Rainbow analizinde metal bazlı nanomalzeme ile kaplama alternatifi için güç/akım yoğunluğundaki artış, kaplama materyalinin iletkenliği ve maliyeti kriterleri, bu alternatifi seçimde pozitif yönde etki etmiştir.

#### KAYNAKLAR

- [1] Rani, G., Jaswal, V., Yagalakshmi, K.N. (2022). Anode modification: An approach to improve power generation in microbial fuel cells (MFCs). *Development in Wastewater Treatment Research and Processes*, 133-152
- [2] Dwivedi, K. A., Huang, S. J., & Wang, C. T. (2022). Integration of various technology-based approaches for enhancing the performance of microbial fuel cell technology: A review. *Chemosphere*, 287, 132248.
- [3] Hernández-Fernández, F. J., Pérez De Los Ríos, A., Salar-García, M. J., Ortiz-Martínez, V. M., Lozano-Blanco, L. J., Godínez, C., Tomás-Alonso, F., & Quesada-Medina, J. (2015). Recent progress and perspectives in microbial fuel cells for bioenergy generation and wastewater treatment. *Fuel Processing Technology*, 138, 284–297.
- [4] Du, H., Li, F., Huang, K., Li, W., & Feng, C. (2017). Potato waste treatment by microbial fuel cell. evaluation based on electricity generation, organic matter removal and microbial structure. *Environment Protection Engineering*, 43(1), 5–18.
- [5] Li, Y., Wu, Y., Puranik, S., Lei, Y., Vadas, T., & Li, B. (2014). Metals as electron acceptors in single-chamber microbial fuel cells. *Journal of Power Sources*, 269, 430–439.
- [6] Logan, B. E. (2008). *Microbial Fuel Cells*. John Wiley & Sons, Ltd.
- [7] Zhu, Q., Hu, J., Liu, B., Hu, S., Liang, S., Xiao, K., Yang, J., & Hou, H. (2021). Recent Advances on the Development of Functional Materials in Microbial Fuel Cells: From Fundamentals to Challenges and Outlooks. *Energy & Environmental Materials*, 5(2), 401–426.
- [8] Cui, H. F., Du, L., Guo, P. B., Zhu, B., & Luong, J. H. T. (2015). Controlled modification of carbon nanotubes and polyaniline on macroporous graphite felt for high-performance microbial fuel cell anode. *Journal of Power Sources*, 283, 46–53.
- [9] Kang, Y. L., Ibrahim, S., & Pichiah, S. (2015). Synergetic effect of conductive polymer poly(3,4-ethylenedioxythiophene) with different structural configuration of anode for microbial fuel cell application. *Bioresource Technology*, 189, 364–369.
- [10] Kong, S., Zhao, J., Li, F., Chen, T., & Wang, Z. (2022). Advances in Anode Materials for Microbial Fuel Cells. *Energy Technology*, 10(12), 2200824.
- [11] Liang, P., Wang, H., Xia, X., Huang, X., Mo, Y., Cao, X., & Fan, M. (2011). Carbon nanotube powders as electrode modifier to enhance the activity of anodic biofilm in microbial fuel cells. *Biosensors and Bioelectronics*, 26(6), 3000–3004.
- [12] Mashkour, M., Rahimnejad, M., Mashkour, M., & Soavi, F. (2020). Electro-polymerized polyaniline modified conductive bacterial cellulose anode for supercapacitive microbial fuel cells and studying the role of anodic biofilm in the capacitive behavior. *Journal of Power Sources*, 478, 228822.
- [13] Quan, X., Sun, B., & Xu, H. (2015). Anode decoration with biogenic Pd nanoparticles improved power generation in microbial fuel cells. *Electrochimica Acta*, 182, 815–820.
- [14] Yaqoob, A. A., Ibrahim, M. N. M., Rafatullah, M., Chua, Y. S., Ahmad, A., & Umar, K. (2020). Recent Advances in Anodes for Microbial Fuel Cells: An Overview. *Materials*, 13(9), 2078.
- [15] Ak, N., Orhan, A., Erensoy, A., & Çek, N. (2020). Sediment Mikrobiyal Yakıt Hücrelerinde Bakır ve Grafit Katot Elektrotların Kullanımı. *BŞEÜ Fen Bilimleri Dergisi*, 7(2), 942-951.
- [16] Chaudhuri, S. K., & Lovley, D. R. (2003). Electricity generation by direct oxidation of glucose in mediatorless microbial fuel cells. *Nature Biotechnology*, 21(10), 1229–1232.
- [17] 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(9), 3341–3346.
- [18] Mustakeem. (2015). Electrode materials for microbial fuel cells: Nanomaterial approach. *Materials for Renewable and Sustainable Energy*, 4(4), 1–11.
- [19] Erbay, C., Pu, X., Choi, W., Choi, M. J., Ryu, Y., Hou, H., Lin, F., De Figueiredo, P., Yu, C., & Han, A. (2015). Control of geometrical properties of carbon nanotube electrodes towards high-performance microbial fuel cells. *Journal of Power Sources*, 280, 347–354.
- [20] Dumitru, A., & Scott, K. (2016). Anode Materials for Microbial Fuel Cells. In *Microbial Electrochemical and Fuel Cells: Fundamentals and Applications*, 117–152.

- [21] Hindatu, Y., Annuar, M. S. M., & Gumel, A. M. (2017, June 1). Mini-review: Anode modification for improved performance of microbial fuel cell. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Elsevier Ltd.
- [22] Sun, M., Zhang, F., Tong, Z. H., Sheng, G. P., Chen, Y. Z., Zhao, Y., Chen, Y. P., Zhou, S. Y., Liu, G., Tian, Y. C., & Yu, H. Q. (2010). A gold-sputtered carbon paper as an anode for improved electricity generation from a microbial fuel cell inoculated with *Shewanella oneidensis* MR-1. *Biosensors and Bioelectronics*, 26(2), 338–343.
- [23] Bahamonde Soria, R., Chinchin, B. D., Arboleda, D., Zhao, Y., Bonilla, P., Van der Bruggen, B., & Luis, P. (2022). Effect of the bio-inspired modification of low-cost membranes with TiO<sub>2</sub>:ZnO as microbial fuel cell membranes. *Chemosphere*, 291, 132840.
- [24] Ma, J., Zhang, J., Zhang, Y., Guo, Q., Hu, T., Xiao, H., Lu, W., Jia, J. (2023). Progress on anodic modification materials and future development directions in microbial fuel cells. *Journal of Power Sources*, 556 232486.
- [25] Savla, N., Anand, R., Pandit, S., & Prasad, R. (2020). Utilization of Nanomaterials as Anode Modifiers for Improving Microbial Fuel Cells Performance. *Journal of Renewable Materials*, 8(12), 1581–1605.
- [26] Sonawane, J. M., Yadav, A., Ghosh, P. C., & Adeloju, S. B. (2017). Recent advances in the development and utilization of modern anode materials for high performance microbial fuel cells. *Biosensors and Bioelectronics*, 90, 558–576.
- [27] Ci, S., Cai, P., Wen, Z., & Li, J. (2015). Graphene-based electrode materials for microbial fuel cells. *Science China Materials*, 58(6).
- [28] Wilberforce, T., Abdelkareem, M. A., Elsaid, K., Olabi, A. G., & Sayed, E. T. (2022). Role of carbon-based nanomaterials in improving the performance of microbial fuel cells. *Energy*, 240, 122478.
- [29] X. Xie, L. Hu, M. Pasta, G.F. Wells, D. Kong, C.S. Criddle, Y. Cui, Three-dimensional carbon nanotube-textile anode for high-performance microbial fuel cells, *Nano Letters*. 11 (2011) 291–296.
- [30] Zhou, M., Chi, M., Luo, J., He, H., & Jin, T. (2011). An overview of electrode materials in microbial fuel cells. *Journal of Power Sources*, 196(10), 4427–4435.
- [31] Aghababae, M., Farhadian, M., Jeihanipour, A., & Biria, D. (2015). Effective factors on the performance of microbial fuel cells in wastewater treatment – a review. *Environmental Technology Reviews*, 4(1), 71–89.
- [32] Zhang, Y., Mo, G., Li, X., Zhang, W., Zhang, J., Ye, J., Huang, X., & Yu, C. (2011). A graphene modified anode to improve the performance of microbial fuel cells. *Journal of Power Sources*, 196(13), 5402–5407.
- [33] Guo, W., Cui, Y., Song, H., & Sun, J. (2014). Layer-by-layer construction of graphene-based microbial fuel cell for improved power generation and methyl orange removal. *Bioprocess and Biosystems Engineering*, 37(9), 1749–1758.
- [34] Kirubakaran, C.J., Kumar, G.G., Sha, C., Zhou, D., Yang, H., Nahm, K.S., Raj, B.S., Zhang, Y., Yong, Y.C. (2019). Facile fabrication of Au@polyaniline core-shell nanocomposite as efficient anodic catalyst for microbial fuel cells, *Electrochimica Acta*, 328, 135136.
- [35] Lyu, L., Seong, K. dong, Kim, J. M., Zhang, W., Jin, X., Kim, D. K., Jeon, Y., Kang, J., & Piao, Y. (2019). CNT/High Mass Loading MnO<sub>2</sub>/Graphene-Grafted Carbon Cloth Electrodes for High-Energy Asymmetric Supercapacitors. *Nano-Micro Letters*, 11(1), 1–12.
- [36] Xu, H., Quan, X., Xiao, Z., & Chen, L. (2018). Effect of anodes decoration with metal and metal oxides nanoparticles on pharmaceutically active compounds removal and power generation in microbial fuel cells. *Chemical Engineering Journal*, 335, 539–547.
- [37] Qiao, Y., Wu, X. S., & Li, C. M. (2014). Interfacial electron transfer of *Shewanella putrefaciens* enhanced by nanoflaky nickel oxide array in microbial fuel cells. *Journal of Power Sources*, 266, 226–231.
- [38] Yin, T., Lin, Z., Su, L., Yuan, C., & Fu, D. (2015). Preparation of vertically oriented TiO<sub>2</sub> nanosheets modified carbon paper electrode and its enhancement to the performance of MFCs. *ACS Applied Materials and Interfaces*, 7(1), 400–408.
- [39] Zhang, C., Liang, P., Jiang, Y., & Huang, X. (2015). Enhanced power generation of microbial fuel cell using manganese dioxide-coated anode in flow-through mode. *Journal of Power Sources*, 273, 580–583.
- [40] Tsai, H. Y., Wu, C. C., Lee, C. Y., & Shih, E. P. (2009). Microbial fuel cell performance of multiwall carbon nanotubes on carbon cloth as electrodes. *Journal of Power Sources*, 194(1), 199–205.
- [41] Dağdeviren, M. (2008). Decision making in equipment selection: an integrated approach with AHP and PROMETHEE. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 4(19), 397–406.
- [42] Brans, J. P., Vincke, P., & Mareschal, B. (1986). How to select and how to rank projects: The Promethee method. *European Journal of Operational Research*, 24(2), 228–238.
- [43] Morfoulaki, M., & Papatheanasiou, J. (2021). Use of PROMETHEE MCDA Method for Ranking Alternative Measures of Sustainable Urban Mobility Planning. *Mathematics*, 9(6),602.
- [44] Mateo, S., Cañizares, P., Rodrigo, M. A., & Fernandez-Morales, F. J. (2018). Driving force of the better performance of metal-doped carbonaceous anodes in microbial fuel cells. *Applied Energy*, 225, 52–59.
- [45] Fuel Cell Store, (y.y.). <https://www.fuelcellstore.com/> (erişim 15 Mart 2023).
- [46] Liu, J. H., Zhang, S. L., Yu, M., An, J. W., & Li, S. M. (2013). Synthesis and Capacitance Characteristics of the Graphene Grafted Polypyrrole Composites. *Journal of Inorganic Materials*, 28(4), 408.

- [47] Liu, X. W., Chen, J. J., Huang, Y. X., Sun, X. F., Sheng, G. P., Li, D. B., Xiong, L., Zhang, Y. Y., Zhao, F., & Yu, H. Q. (2014). Experimental and theoretical demonstrations for the mechanism behind enhanced microbial electron transfer by CNT network. *Scientific Reports*, 4.
- [48] Gude, G. G. (2018). *Emerging Technologies for Sustainable Desalination Handbook* -. Cambridge: ELSEVIER.
- [49] Merck | Life Science Products & Service Solutions. <https://www.sigmaaldrich.com/TR/en> (Erişim tarihi: 14 Mart 2023).
- [50] Y.C. Song, T.S. Choi, J.H. Woo, K. Yoo, J.W. Chung, C.Y. Lee, B.G. Kim, Effect of the oxygen reduction catalyst loading method on the performance of air breathable cathodes for microbial fuel cells, *Journal of Applied Electrochemistry*, 42 (2012) 391–398.
- [51] Nanografi Türkiye, (y.y.). <https://shop.nanografi.com.tr/> (erişim 14 Mart 2023).
- [52] Song, Y. C., Choi, T. S., Woo, J. H., Yoo, K., Chung, J. W., Lee, C. Y., & Kim, B. G. (2012). Effect of the oxygen reduction catalyst loading method on the performance of air breathable cathodes for microbial fuel cells. *Journal of Applied Electrochemistry*, 42(6), 391–398.
- [53] Nosek, D., Jachimowicz, P., & Cydzik-Kwiatkowska, A. (2020). Anode Modification as an Alternative Approach to Improve Electricity Generation in Microbial Fuel Cells. *Energies*, 13(24), 6596.
- [54] Muhammad, A., Shah, A. ul H. A., & Bilal, S. (2019). Comparative Study of the Adsorption of Acid Blue 40 on Polyaniline, Magnetic Oxide and Their Composites: Synthesis, *Characterization and Application. Materials*, 12(18), 2854.
- [55] Genç, T. (2013). PROMETHEE Yöntemi ve GAIA Düzlemi. *Afyon Kocatepe Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, 15(1), 133–154.