



## کاربرد پیل‌های سوختی میکروبی در مدیریت پایدار پساب پتروشیمی

علی رضا گنجی<sup>۱</sup>، آزاده بابایی<sup>\*۲</sup>

<sup>۱</sup> کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی شیمی و نفت، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران

<sup>۲</sup> استادیار، گروه شیمی دانشکده علوم، دانشگاه آزاد اسلامی واحد کرج، البرز، ایران

### چکیده

### اطلاعات مقاله

نوع مقاله:

مقاله مروری

تاریخچه مقاله:

دریافت: ۱۴۰۴/۰۲/۲۰

ویرایش: ۱۴۰۴/۰۷/۰۹

پذیرش: ۱۴۰۴/۰۸/۱۰

کلیدواژه‌ها:

پیل سوختی میکروبی،

پتروشیمی،

انرژی تجدیدپذیر،

تصفیه فاضلاب،

تولید برق

صنعت پتروشیمی، در حالی که نقشی کلیدی در توسعه اقتصادی ایفا می‌کند، مقادیر عظیمی از فاضلاب‌های سمی تولید می‌نماید که تهدیدات زیست‌محیطی جدی به‌دنبال دارند. روش‌های متداول تصفیه، اغلب به دلیل مصرف بالای انرژی و کارایی محدود در حذف آلاینده‌های پیچیده، با ناکارآمدی مواجه هستند. پیل‌های سوختی میکروبی، که نوعی سیستم زیست‌الکتروشیمیایی به‌شمار می‌آیند، جایگزینی پایدار ارائه می‌دهند که امکان تصفیه هم‌زمان فاضلاب و تولید برق از طریق متابولیسم میکروبی را فراهم می‌سازد. این مقاله مروری، ساختار و اصول عملکرد پیل‌های سوختی میکروبی را بررسی نموده و مطالعات کلیدی پیرامون کاربرد آن‌ها در تصفیه فاضلاب پتروشیمی را مرور می‌کند. مطالعات موردی، موفقیت در حذف تقاضای شیمیایی اکسیژن، فنول و سایر آلاینده‌ها را نشان می‌دهند و چگالی توان تولیدی تا ۸۵۰ میلی‌وات بر مترمربع را گزارش داده‌اند. عوامل مؤثر بر عملکرد پیل سوختی میکروبی نظیر غلظت بستر، شوری، ترکیبات سمی، مواد الکترودی و طراحی راکتور، به‌صورت دقیق تحلیل شده‌اند. علی‌رغم نتایج امیدوارکننده، محدودیت‌هایی از جمله مقیاس‌پذیری پایین، نوسانات عملکرد و حساسیت نسبت به ترکیب فاضلاب همچنان به‌عنوان چالش باقی مانده‌اند. توسعه بیشتر این فناوری نیازمند تحقیقات مداوم در زمینه نوآوری‌های مواد، بهینه‌سازی سیستم و مهندسی جوامع میکروبی است تا پیل‌های سوختی میکروبی برای کاربرد صنعتی در بخش پتروشیمی آماده شوند.

\*Corresponding author E-mail: azadeh.babaei@kiauo.ac.ir

DOI: 10.22104/mbbe.2025.7609.1004

[https://mbbe.irost.ir/article\\_1606.html](https://mbbe.irost.ir/article_1606.html)



## ۱. مقدمه

صنعت پتروشیمی بخشی حیاتی از اقتصاد هر کشور به‌شمار می‌آید که به پشتیبانی از صنایع مختلف دیگر نظیر کشاورزی، نیرو، حمل‌ونقل و بسیاری از حوزه‌های دیگر کمک می‌کند [۱]. با این حال، این بخش در فرآیندهایی مانند استخراج نفت و تولید گاز طبیعی، مقدار زیادی آب مصرف می‌کند که منجر به تولید مقادیر انبوهی از فاضلاب‌های بسیار سمی می‌گردد [۲]. در صورت دفع این فاضلاب بدون تصفیه مناسب، رشد میکروارگانیسم‌ها دچار مشکل و زیرساخت‌ها دچار خوردگی می‌گردند و سطح اکسیژن محلول در محیط‌های آبی کاهش می‌یابد [۳].

به دلیل گسترش عظیم فناوری‌های تولید نفت و گاز، به‌ویژه آن‌هایی که از تزریق آب بهره می‌برند، مقادیر زیادی از آب فرآیندی مصرف شده و به‌تبع آن، حجم زیادی از فاضلاب تولید شده است. آب تولیدی<sup>۱</sup> (PW یا فاضلاب میادین نفتی)، بزرگ‌ترین جریان پسماند و پساب تولیدشده در صنایع نفت و گاز به‌شمار می‌رود و به‌عنوان منبع عمده آلودگی در میادین نفت و گاز محسوب می‌شود [۴]. در گذشته، تخلیه این نوع آب منجر به آلودگی خاک، منابع آبی سطحی و زیرزمینی شده است. با افزایش حجم این نوع فاضلاب در سراسر جهان، پیامدهای ناشی از دفع مستقیم آن بر محیط‌زیست، اخیراً به مسئله‌ای مهم و نگران‌کننده در حوزه زیست‌محیطی تبدیل شده است [۵].

رشد جمعیت جهانی و صنعتی‌شدن هم‌زمان آن، که به تولید گسترده فاضلاب می‌انجامد، موجب افزایش تقاضا برای سوخت‌های فسیلی شده است [۶]. در سطح جهانی، بیش از ۸۰ درصد انرژی از منابع غیرقابل تجدید تولید می‌شود که به‌طور قابل توجهی به انتشار گازهای گلخانه‌ای نظیر  $\text{CO}_2$ ،  $\text{NO}_x$  و  $\text{SO}_x$  منجر می‌گردد. این آلاینده‌های گازی موجب آسیب‌هایی مانند گرم‌شدن جهانی، تخریب لایه اوزون و سایر خطرات بهداشتی برای محیط زیست زیستی می‌شوند. به‌طور مشابه، پساب حاصل از منابع صنعتی و شهری به‌دلیل دشواری‌های مرتبط با حذف آلاینده‌ها از فاضلاب، یکی از نگرانی‌های عمده به‌شمار می‌آید [۷].

در پاسخ به این چالش‌های زیست‌محیطی و انرژی، پیل‌های سوختی میکروبی<sup>۲</sup> (MFC) به‌عنوان راه‌حلی امیدبخش مطرح شده‌اند. این فناوری قادر است تصفیه پساب صنعتی و بازیابی انرژی را به‌صورت هم‌زمان انجام دهد [۷]. پیل سوختی

میکروبی نوعی سیستم زیست‌الکتروشیمیایی<sup>۳</sup> (BES) است که پتانسیل حل مسئله تصفیه فعلی فاضلاب و بحران انرژی از طریق استفاده از میکروارگانیسم‌ها به‌عنوان بیوکاتالیست را دارد و بیش از ۸۰ درصد این‌گونه سیستم‌ها را شامل می‌شود [۸]. [۹].

پیل‌های سوختی میکروبی پتانسیل تبدیل انرژی شیمیایی ذخیره شده در مواد شیمیایی آلی و مواد زیست تخریب‌پذیر را از طریق استفاده از میکروارگانیسم‌ها به انرژی الکتریکی نشان می‌دهند؛ ضمن اینکه فاضلاب را نیز به‌طور مؤثر تصفیه می‌کنند [۹]. به‌طور کلی، فاضلاب حاوی مقدار قابل توجهی انرژی است، تقریباً ۳ تا ۱۰ برابر انرژی بیشتر از آن میزان انرژی که برای تصفیه آن مورد نیاز است و به ازای هر گرم از تقاضای اکسیژن شیمیایی<sup>۴</sup> (COD) حاوی ۱۴/۷ کیلوژول است [۱۰]. سلول سوختی میکروبی (MFC) یک روش نوین برای تصفیه فاضلاب است که با محیط زیست سازگار بوده و مزایایی مثل تولید انرژی، تصفیه فاضلاب، استفاده به‌عنوان حسگر زیستی و تولید کم کربن دارد [۱۰].

علیرغم اثربخشی تصفیه‌های پیشرفته فاضلاب مانند فرآیند اکسیداسیون پیشرفته، فناوری نانو، تصفیه ازن، بیوراکتور غشایی<sup>۵</sup> (MBR)، فیلتراسیون متغیر خودکار و غیره، استفاده گسترده از آن به دلیل نیاز به انرژی بالا و همچنین جنبه‌های دیگر، از جمله استفاده از مواد شیمیایی که پس از تصفیه مشکلاتی ایجاد می‌کند، محدود شده است [۲]. بنابراین، بازیابی انرژی و منابع از فاضلاب دیگر نباید یک انتخاب، بلکه باید یک فرصت کلیدی در نظر گرفته شود [۱۱].

با توجه به چالش‌های زیست‌محیطی و عملیاتی در تصفیه فاضلاب پتروشیمی، از جمله ناکارآمدی روش‌های سنتی، ترکیب پیچیده آلاینده‌ها و نیاز به راهکارهای پرمصرف انرژی، استفاده از پیل‌های سوختی میکروبی به‌عنوان گزینه‌ای نوین و چندمنظوره مطرح شده است. با این حال، عملکرد این سیستم‌ها تحت تأثیر عواملی مانند طراحی راکتور، ویژگی‌های الکترود، ترکیب فاضلاب و شرایط عملیاتی قرار دارد و محدودیت‌هایی همچون مقیاس‌پذیری پایین و هزینه‌های بالا مانع توسعه صنعتی آن‌ها است. بنابراین، در این مقاله تلاش شده است تا با مروری بر ساختار، مکانیزم عملکرد، مطالعات موردی، عوامل مؤثر و چشم‌انداز اقتصادی، تصویری جامع از ظرفیت‌ها و چالش‌های این فناوری ارائه گردد.

<sup>3</sup> Bio-electrochemical System<sup>4</sup> Chemical Oxygen Demand<sup>5</sup> Membrane Bioreactor<sup>1</sup> Produced water<sup>2</sup> Microbial Fuel Cell (MFC)

## ۲- مروری بر پیل‌های سوختی میکروبی

عملکرد پیل سوختی میکروبی، مبتنی بر فعالیت‌های برخی باکتری‌هاست که با اکسیدکردن بسترهای آلی، الکترون‌هایی آزاد می‌کنند. این الکترون‌ها سپس به یک الکتروود منتقل شده و جریان الکتریکی تولید می‌نمایند که به عنوان انرژی استفاده می‌شود [۱۲]. عملکرد اصلی MFC بر پایه انتقال الکترون‌هایی است که هنگام تجزیه ترکیبات آلی توسط میکروب‌ها تولید می‌شوند. این الکترون‌ها به یک الکتروود منتقل می‌شوند و در نتیجه، جریان برق ایجاد می‌گردد. این فرایند در دو محفظه صورت می‌پذیرد که توسط یک غشای تبادل پروتون از هم جدا شده‌اند و میکروارگانیسم‌ها در محفظه آند مستقر هستند. هنگامی که این میکروارگانیسم‌ها ترکیبات آلی را مصرف می‌کنند، الکترون‌هایی آزاد می‌نمایند که از طریق یک مدار خارجی به محفظه کاتد منتقل می‌گردند [۱۳]. در کاتد، الکترون‌ها با پروتون‌ها و اکسیژن ترکیب شده و آب تولید می‌نمایند [۶].

پیل سوختی میکروبی، ولتاژی در حدود ۰/۵ تا ۰/۸ ولت تولید می‌کند و مصرف انرژی آن بسیار اندک است (کمتر از ۰/۰۷ کیلو وات به ازای هر کیلوگرم COD) [۱۴]. فناوری MFC نیاز به تصفیه بی‌هوازی در محفظه آند دارد [۱۵، ۱۶]. پیل‌های سوختی میکروبی معمولاً شامل محفظه‌های آندی و کاتدی هستند که توسط یک غشا از هم جدا می‌شوند. ماده‌ای که برای ساخت این اجزا مورد استفاده قرار می‌گیرد می‌تواند عملکرد این سامانه زیست‌الکتروشیمیایی را به طور چشمگیری تحت تأثیر قرار دهد [۷].

### غشای تبادل یونی: در یک MFC برای جداکردن دو

محفظه در پیل‌های دو محفظه‌ای از یک غشای تبادل یونی<sup>۱</sup> (IEM) یا جدا کننده) استفاده می‌شود [۱۷، ۱۸]. غشای تبادل یونی مهاجرت پروتون‌هایی را که از متابولیسم میکروبی در محفظه آند تولید شده‌اند، به سمت محفظه کاتد تسهیل می‌نماید. یکی دیگر از کاربردهای اصلی این غشا جلوگیری از اتصال کوتاه بین دو الکتروود و همچنین ممانعت از اختلاط واکنش‌های شیمیایی در این دو الکتروود است. جداکننده، یکی از اجزای حیاتی MFC محسوب می‌شود چرا که مستقیماً عملکرد کلی راکتور را تحت تأثیر قرار می‌دهد و می‌تواند تا ۶۰ درصد کل هزینه سرمایه‌گذاری را به خود اختصاص دهد [۱۹].

آند: موادی که برای ساخت آندها مورد استفاده قرار می‌گیرند باید دارای ویژگی‌هایی باشند که به بهبود تماس باکتری‌های الکتروژن با سطح الکتروود، جهت جمع‌آوری جریان کمک کنند. مواد ایده‌آل برای آندها باید زیست‌سازگاری بالایی برای تشکیل بیوفیلم میکروبی و رسانایی بالا برای جذب و انتقال الکترون داشته باشند. سایر ویژگی‌های مطلوب شامل سطح ویژه بالا، پایداری بلندمدت و ساختار متخلخل است [۱۸، ۲۰].

کاتد: عملکرد MFCها ارتباط نزدیکی با خواص مواد الکتروود کاتدی دارد. الکتروود کاتدی باید دارای خوردگی پایین، رسانایی الکتریکی خوب، تخلخل بالا و سطح ویژه زیاد باشد [۱۸]. مواد کاتدی باید پتانسیل اکسایش-کاهش بالایی داشته باشند تا عملکرد MFCها را بهبود بخشند. در طول عملکرد MFCها، اکسیژن به عنوان یکی از مؤثرترین پذیرنده‌های الکترون در کاتد عمل کرده و توان قابل توجهی تولید می‌کند. سینتیک بهینه واکنش کاهش اکسیژن<sup>۲</sup> (ORR) موجب تولید مؤثر توان در MFC می‌شود؛ بنابراین، الکتروود کاتد می‌تواند با استفاده از کاتالیزور فعال اصلاح شود [۲۱].

سلول‌های سوختی میکروبی از باکتری‌ها برای انتقال الکترون‌ها از فرآیندهای متابولیکی به الکتروودها و تولید برق استفاده می‌کنند. کارایی و اثربخشی MFCها توسط مکانیزم‌هایی که باکتری‌ها برای اهدای الکترون استفاده می‌کنند و مسیرهای متابولیکی آنها تعیین می‌شود. باکتری‌ها از مکانیزم‌های انتقال الکترون مستقیم و واسطه‌ای استفاده می‌کنند که بر اکسیداسیون سوبسترا و فرآیندهای تنفسی متمرکز است:

انتقال مستقیم الکترون<sup>۳</sup>: باکتری‌ها الکترون‌ها را مستقیماً از طریق سیتوکروم‌های غشای خارجی به الکتروود منتقل می‌کنند. این فرایند در گونه‌هایی مانند *Geobacter* و *Shewanella* که دارای پروتئین‌ها و ساختارهای تخصصی برای این منظور هستند، رایج است [۲۲، ۲۳]. انتقال واسطه‌ای الکترون<sup>۴</sup>: باکتری‌ها، واسطه‌های ردوکس (مانند *Flavin*، *Phenazine* و *pyocyanin*) را ترشح یا استفاده می‌کنند که الکترون‌ها را از سلول به الکتروود منتقل می‌کنند. واسطه‌های مصنوعی نیز می‌توانند برای افزایش انتقال الکترون اضافه شوند،

<sup>2</sup> Oxygen Reduction Reaction

<sup>3</sup> Direct Electron Transfer

<sup>4</sup> Mediated Electron Transfer

<sup>1</sup> Ion Exchange Membrane

شرکت‌های پتروشیمی معمولاً زیست‌تخریب‌پذیری کمتری دارد و حاوی ترکیبات متنوعی با غلظت‌های بالای کربن و نمک است [۲۹].

روش‌های متداولی مانند جذب سطحی، انعقاد، بیوفیلتراسیون و لخته‌سازی، پیش‌تر برای حذف ترکیبات شیمیایی از فاضلاب پتروشیمی<sup>۲</sup> (PCW) مورد استفاده قرار گرفته‌اند. با این حال، این روش‌ها به شدت انرژی‌بر بوده و در دستیابی به استانداردهای سخت‌گیرانه زیست‌محیطی مؤثر نمی‌باشند [۳۰]. سوزاندن به عنوان یک روش فیزیکی، معمولاً برای از بین بردن مواد زائد، عمدتاً مواد جامد یا گازی، خشک تا نیمه خشک با محتوای انرژی بالا مورد استفاده قرار می‌گیرد که در آن بخشی از انرژی قابل بازیابی است [۳۱]. با این حال، زمانی که از این روش برای از بین بردن ترکیبات آلی در محیط‌های آبی استفاده می‌شود، راندمان بازیابی انرژی به دلیل ارزش حرارتی اندک پساب، بسیار پایین است. افزون بر این، فرآیند مذکور مقدار زیادی گازهای گلخانه‌ای و حرارت با کیفیت پایین تولید می‌کند که برای محیط‌زیست خطرناک محسوب می‌شوند [۳۲].

روش‌های فیزیکوشیمیایی متداول نیز در دسته روش‌های نامناسب قرار می‌گیرند، چراکه مقدار قابل توجهی پسماند جامد تولید می‌کنند [۳۳]. از سوی دیگر، فاضلاب‌های بسیار سمی که حاوی بازدارنده‌ها، سورفکتانت‌ها و غلظت‌های بالای فلزات سنگین هستند می‌توانند موجب کاهش عملکرد MFC گردند [۱۰]. شوری بالای آب تولیدی ممکن است بر فیزیولوژی جمعیت میکروبی بی‌هوازی تأثیر منفی بگذارد [۳۴].

#### ۴- کاربرد پیل‌های سوختی در تصفیه فاضلاب پتروشیمی

تصفیه فاضلاب پتروشیمی با تولید همزمان توان الکتریکی از طریق به کارگیری پیل سوختی میکروبی، می‌تواند جایگزینی بالقوه برای حل مشکلات انرژی و محیط‌زیست باشد [۳۵]. تصفیه زیستی فاضلاب می‌تواند از طریق فرآیندهای هوازی و بی‌هوازی انجام شود. با این حال، فرآیند بی‌هوازی نسبت به فرآیند هوازی ترجیح داده می‌شود، چراکه مصرف انرژی کمتری دارد، میزان تشکیل لجن کمتری دارد و قابلیت بازیابی انرژی را فراهم می‌آورد [۳۶].

مطالعه سمین<sup>۳</sup> و همکاران، قابلیت تصفیه فاضلاب

اما غلظت آنها باید بهینه شود تا از سمیت جلوگیری به عمل آید [۲۲، ۲۳].

مکانیزم‌های دوگانه/ترکیبی<sup>۱</sup>: بسیاری از MFCها، به ویژه آنهایی که دارای جوامع باکتریایی مختلط هستند، انتقال الکترون مستقیم و واسطه‌ای را به طور همزمان نشان می‌دهند [۲۲، ۲۳].

در سلول‌های سوختی میکروبی، مسیرهای متابولیکی مؤثر شامل اکسیداسیون سوبسترا و زنجیره‌های تنفسی باکتری هستند. در مرحله اول، باکتری‌ها سوبستراهای آلی یا معدنی را اکسید کرده و به عنوان بخشی از متابولیسم انرژی خود، الکترون‌هایی را آزاد می‌کنند. این الکترون‌ها سپس از طریق زنجیره تنفسی باکتری که معمولاً شامل ترکیباتی مانند کینون‌ها و سیتوکروم‌ها است، به سمت الکتروود یا یک واسطه هدایت می‌شوند [۲۴].

باکتری‌های مختلف از مسیرهای متابولیکی و پروتئین‌های انتقال الکترون متمایزی استفاده می‌کنند که به طور قابل توجهی بر عملکرد MFC تأثیر می‌گذارند. به عنوان مثال، *Enterococcus faecalis* از پروتئین‌های مرتبط با غشاء و کینون‌ها برای انتقال الکترون استفاده می‌کند. راندمان انتقال الکترون در MFCها همچنین تحت تأثیر عواملی مانند ترکیب جامعه میکروبی قرار دارد؛ به طوری که کشت‌های مخلوط اغلب به دلیل اثرات هم‌افزایی و در دسترس بودن مسیرهای انتقال الکترون متعدد، بهتر از کشت‌های خالص عمل می‌کنند. شرایط الکتروود و محیط، از جمله خواص سطح الکتروود، وجود واسطه‌ها و نوع سوبسترا، بر راندمان انتقال الکترون تأثیر می‌گذارند [۲۵].

به طور کلی، باکتری‌های موجود در MFCها، الکترون‌ها را یا از طریق تماس مستقیم (از طریق سیتوکروم‌ها و نانوسیم‌ها) یا با استفاده از واسطه‌های اکسایش-کاهش به الکتروودها اهدا می‌کنند؛ که هر دو مکانیسم اغلب همزمان وجود دارند. اثربخشی این فرآیندها به مسیرهای متابولیکی باکتری‌ها، ترکیب جامعه و شرایط محیطی بستگی دارد که همگی برای بهینه‌سازی عملکرد MFC بسیار مهم هستند.

#### ۳- چالش‌های تصفیه فاضلاب پتروشیمی

صنایع پتروشیمی، افزون بر نقش آن‌ها در توسعه ملی، مقدار زیادی فاضلاب تولید می‌کنند که منشأ بسیاری از مشکلات زیست‌محیطی است [۲۶-۲۸]. پساب حاصل از

<sup>2</sup> Petrochemical Wastewater

<sup>3</sup> Samin

<sup>1</sup> Dual/Combined Mechanisms

شوری بالا (شرکت لبنیات پگاه) و لجن بی‌هوازی شرکت پتروشیمی شهید تندگویان بود، انجام شد. نتایج آن‌ها نشان داد که به‌نظر می‌رسد آند عامل محدودکننده عملکرد MFC باشد؛ که این موضوع احتمالاً به دلیل نبود شرایط بی‌هوازی کافی در آند است و نه به‌خاطر حجم بیوفیلیم آندوفیلیک [۳۹].

حجازی<sup>۳</sup> و همکاران، یک پیل سوختی میکروبی لوله‌ای مقیاس‌پذیر با باکتری‌های مختلط به‌عنوان بیوکاتالیست اکسیداسیون برای تجزیه فنول و تولید همزمان انرژی از فاضلاب صنعت پتروشیمی را مورد بررسی قرار دادند. نتایج آن‌ها حداکثر درصد تجزیه فنول را معادل ۷۵ درصد در غلظت اولیه ۱۵۰ میلی گرم بر لیتر با استفاده از MFC نشان داد. کاهش غلظت فنول در فاضلاب منجر به کاهش چگالی توان تولیدی شد. حداکثر چگالی جریان و ولتاژ خروجی به‌ترتیب برابر با ۱۰۱ میلی‌آمپر بر مترمربع و ۴۷۱ میلی‌ولت گزارش شد. یافته‌های آن‌ها ارتباط نزدیک میان تولید توان و نرخ حذف فنول را در MFC نشان دادند [۴۰].

تامیلاراسان<sup>۴</sup> و همکاران، فاضلاب صنعت نفت پتروشیمی در ایالت تامیل نادوی هند را به‌عنوان بستر در یک MFC دو محفظه‌ای برای تولید توان و حذف مواد آلی مورد مطالعه قرار دادند. این پیل در حالت نوبتی توانست به‌طور موفق توان تولید کرده و مواد آلی را حذف کند. در بارگذاری آلی ۱/۵ گرم COD در لیتر، شاخص‌های کلیدی عملکرد یعنی بازده حذف COD، تقاضای اکسیژن محلول، جامدات معلق، فنول و سولفید به‌ترتیب برابر با ۸۸٪، ۸۰٪، ۷۱٪، ۷۵٪ و ۷۱٪ گزارش شدند. در همان بارگذاری، حداکثر چگالی توان، چگالی جریان و ولتاژ به‌ترتیب به ۲۷۰ میلی‌وات بر مترمربع، ۳۷۶ میلی‌آمپر بر مترمربع و ۸۳۸ میلی‌ولت رسیدند [۲].

اسلامی<sup>۵</sup> و همکاران از نانوپومیس<sup>۶</sup> (NP) حاصل از ضایعات معدنی به‌عنوان یک کاتالیست آندی محلی و کم‌هزینه در MFC‌ها برای تصفیه فاضلاب تصفیه‌خانه روغن خوراکی و تولید انرژی زیستی استفاده کردند. چگالی توان پیل سوختی با پوشش نانوپومیس به‌طور قابل توجهی از نمونه شاهد بیشتر بود؛ به‌طوری که  $3 \pm 61$  درصد (برابر افزایش یافت و عملکرد بهتری در بهبود کیفیت فاضلاب نشان داد. MFC دارای آند  $CC/NP^7$  هم عملکرد بالایی در تولید توان و هم راندمان بالای حذف COD از خود نشان داد [۹].

پتروشیمی حاصل از یک کارخانه اسید اکریلیک با COD اولیه ۴۵۰۰۰ میلی‌گرم بر لیتر را نشان می‌دهد که در آن، با استفاده از لجن بی‌هوازی سازگار یافته به‌عنوان بیوکاتالیست، حداکثر چگالی توان ۸۵۰ میلی‌وات بر مترمربع در چگالی جریان ۱۵۰۰ میلی‌آمپر بر مترمربع به‌دست آمد. نتایج آن‌ها قابلیت استفاده از MFC را برای تصفیه فاضلاب کارخانه اسید اکریلیک با بهره‌گیری از لجن بی‌هوازی سازگار یافته به‌عنوان بیوکاتالیست اثبات می‌کند. بازده حذف COD و راندمان کولمبیک<sup>۱</sup> (CE) به‌ترتیب ۴۵ درصد و حدود ۱۸ درصد، پس از ۱۶ روز بهره‌برداری گزارش شده است. با این حال، حداکثر تولید توان (۸۵۰ میلی‌وات بر مترمربع) پس از ۱۱ روز بهره‌برداری حاصل گردید، که این موضوع به حضور غلظت بالای واسطه‌های طبیعی تولیدشده توسط میکروب‌های الکتروژن و همچنین تشکیل بیوفیلیم کارآمد نسبت داده می‌شود. MFC‌ها در طول ۱۱ روز بهره‌برداری، COD را از ۴۵۰۰۰ میلی‌گرم بر لیتر به ۲۷۰۰۰ میلی‌گرم بر لیتر کاهش دادند [۳۵].

در مطالعه‌ای دیگر نیز امکان‌سنجی فناوری MFC برای تصفیه فاضلاب پتروشیمی کارخانه اسید اکریلیک با استفاده از میکروارگانیزم‌های بی‌هوازی بررسی گردید. نتایج این مطالعه نشان داد که با افزایش COD اولیه، تولید توان کاهش می‌یابد و پس از ۱۰ روز بهره‌برداری، بازده حذف COD و راندمان کولمبیک به‌ترتیب برابر با ۴۵ درصد و ۱۳/۱۲ درصد بود [۳۰]. تا کنون تنها تعداد کمی از مطالعات از فاضلاب‌های پتروشیمی دارای ترکیبات فنلی و سایر هیدروکربن‌های آلی و آروماتیک در MFC استفاده کرده‌اند، اما نتایج رضایت‌بخشی به‌دست نیامده است که دلیل آن تعامل پیچیده بین میکروب‌ها و بسترها می‌باشد [۳۷، ۳۸، ۳۹].

روستا زاده<sup>۲</sup> و همکاران، امکان‌سنجی فناوری MFC برای تصفیه فاضلاب واقعی با شوری بالا از میادین نفتی ایران را با استفاده از طراحی ساده و الکترودهای کربنی ارزان‌قیمت بررسی کردند. چهار پیکربندی مختلف از MFC مورد آزمون قرار گرفت: (۱) با غشا و کاتالیزور پلاتین در کاتد؛ (۲) با غشا و بدون کاتالیزور پلاتین؛ (۳) بدون غشا و با کاتالیزور پلاتین در کاتد؛ (۴) بدون غشا و بدون کاتالیزور پلاتین. آزمایش‌ها به‌صورت هم‌زمان با استفاده از MFC‌هایی انجام شد که یکی با فاضلاب سنتتیک و دیگری با فاضلاب میادین نفتی کار می‌کردند. در این آزمایش، تلقیح باکتریایی یکسان که شامل مخلوط ۱:۱ از لجن بی‌هوازی استخرهای تصفیه فاضلاب با

<sup>3</sup> Hejazi

<sup>4</sup> Tamilarasan

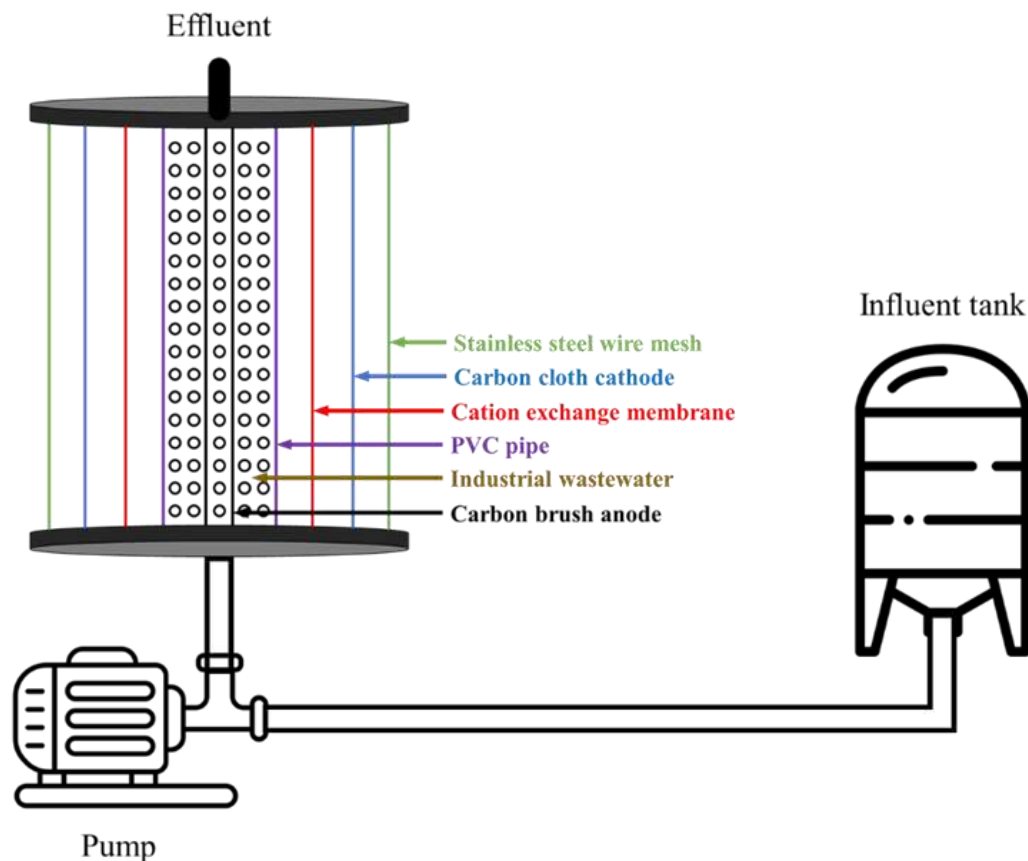
<sup>5</sup> Eslami

<sup>6</sup> Nano-Pumice

<sup>7</sup> Carbon Cloth/Nano-Pumice

<sup>1</sup> Coulombic Efficiency

<sup>2</sup> Roustazadeh



شکل (۱). طرح پیل سوختی میکروبی [۱۰]

Figure (1). view of the MFC design [۱۰]

۷٪ (فاضلاب پتروشیمی) و ۷۹٪ (فاضلاب نوشابه‌سازی) دست یافتند. با این حال، فاضلاب پتروشیمی در تولید برق موفق نبود، که این امر عمدتاً به دلیل محتوای بالای ترکیبات بازدارنده، خاصیت آب‌گریزی و شرایط نامطلوب برای رشد میکروبی بوده است. همان‌طور که در شکل ۱ نشان داده شده است، نمای MFCها نشان داده شده است که با استفاده از لوله‌های پلی‌وینیل کلراید<sup>۲</sup> (PVC) با ابعاد ۷۵ سانتی‌متر ارتفاع و ۱۰/۵ سانتی‌متر قطر و حجم کلی ۶/۵ لیتر ساخته شده‌اند [۱۰]. به منظور مقایسه بهتر میان نتایج مطالعات مختلف، جدول ۲ پارامترهای نوع الکترو، راندمان تصفیه و درصد برق تولیدی را نشان می‌دهد.

در کویت، المپوع<sup>۱</sup> و همکاران، فاضلاب صنایع لبنی، نوشابه‌سازی، پتروشیمی و مواد شوینده را با استفاده از MFCهای لوله‌ای ساخته‌شده از لوله‌های PVC بررسی کردند. جدول ۱ کیفیت اولیه چهار نوع فاضلاب صنعتی مختلف را نشان می‌دهد. MFCها به حداکثر چگالی توان ۸۶ میلی‌وات بر متر مکعب (فاضلاب لبنی)، ۴۱ میلی‌وات بر متر مکعب (فاضلاب شوینده‌ها)، ۲۰ میلی‌وات بر متر مکعب (فاضلاب نوشابه) و ۱ میلی‌وات بر متر مکعب (فاضلاب پتروشیمی) دست یافتند. علاوه بر این، MFCها به طور متوسط به راندمان حذف اکسیژن مورد نیاز شیمیایی (COD) ۷۹٪ (فاضلاب لبنی)، ۴۴٪ (فاضلاب شوینده‌ها)،

<sup>۲</sup> Polyvinyl Chloride

<sup>۱</sup> Almatouq

جدول (۱). میانگین پارامترهای کیفیت فاضلاب برای همه صنایع مشاهده شده [۱۰]

Table (1). Average wastewater quality parameters for all observed industries [10]

| Parameter                 | Detergents | Dairy      | Petrochemicals | Soft Drinks |
|---------------------------|------------|------------|----------------|-------------|
| pH                        | 8.0 ± 0.4  | 9.0 ± 1.3  | 8.7 ± 1.5      | 8.3 ± 1.6   |
| EC (μS cm <sup>-1</sup> ) | 1105 ± 230 | 2800 ± 430 | 3900 ± 1000    | 1760 ± 60   |
| TOC (mg L <sup>-1</sup> ) | 0.4        | 287.0 ± 22 | 2 155.0 ± 17   | 278.3 ± 23  |
| COD (mg L <sup>-1</sup> ) | 4435 ± 550 | 2790 ± 250 | 15114 ± 1900   | 2459 ± 380  |
| BOD (mg L <sup>-1</sup> ) | 2451 ± 295 | 1854 ± 172 | 3695 ± 170     | 1477 ± 230  |
| TP (mg L <sup>-1</sup> )  | 4.6 ± 0.8  | 8.5 ± 1    | 222.0 ± 25     | 3.0 ± 0.3   |
| TN (mg L <sup>-1</sup> )  | 10.3 ± 0.7 | 71.2 ± 9   | 168.0 ± 19     | 17.0 ± 2    |

جدول (۲). مقایسه پارامترهای کلیدی در مطالعات مختلف

Table (2). Comparison of Key Parameters in Different Studies

| Microorganism                                    | Electrode specifications                                                | Treatment Efficiency (%) | Power (mW.m <sup>-2</sup> ) | Reference |
|--------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------|--------------------------|-----------------------------|-----------|
| <i>Pseudomonas</i> spp. and <i>Bacillus</i> spp. | Polyacrylonitrile coated carbon felt (2 cm×2 cm)                        | 40                       | 850                         | [35]      |
| <i>Bacillus cereus</i>                           | Surface area = 84 cm <sup>2</sup>                                       | 70                       | 17066.67                    | [37]      |
| <i>Clostridium butyricum</i>                     | Surface area = 84 cm <sup>2</sup>                                       | 54.2                     | 8816.17                     | [37]      |
| Mixed anaerobic sludge (1:1)                     | Carbon cloth; (anode: 3×5 cm; cathode: MPL-coated (3 cm <sup>2</sup> )) | 96.25                    | 65                          | [39]      |

## ۵. عوامل مؤثر بر عملکرد پیل سوختی میکروبی

مقیاس‌پذیری پیل‌های سوختی میکروبی، اتلاف بالا و چگالی توان پایین در MFC‌های مقیاس بزرگ است. ویژگی‌های فاضلاب‌های صنعتی مختلف از نظر مواد آلی، معدنی و به‌ویژه ترکیبات شیمیایی صنعتی بسیار متفاوت هستند که این تفاوت‌ها می‌توانند بر قابلیت کاربرد فناوری MFC تأثیر بگذارند [۱۰].

طراحی کارآمد راکتورهای MFC تضمین‌کننده حداقل مصرف مواد اولیه و کاهش هزینه‌های مربوط به ساخت، نگهداری و بهره‌برداری است. این طراحی همچنین به افزایش منافع اقتصادی در قالب چگالی توان، خروجی منابع و کیفیت فاضلاب تصفیه‌شده کمک می‌کند [۴۴، ۱۸].

عملکرد پیل سوختی میکروبی عموماً بر اساس تولید توان و همچنین بازده حذف COD ارزیابی می‌شود. چندین عامل نظیر نوع بستر، غلظت بستر، pH، دما، جنس الکترود و نوع بیوکاتالیست بر عملکرد MFC تأثیرگذار هستند [۱۱]. MFC‌هایی که با COD اولیه بالاتری تغذیه می‌شوند، به‌دلیل حضور مقادیر بالاتر بازدارنده‌های رشد سلولی، رشد باکتری‌ها در آنها کمتر بوده و در نتیجه، توان تولیدی کاهش می‌یابد [۴۱، ۴۲]. جیانگ و همکاران اثر وجود مواد سمی در فاضلاب بر عملکرد MFC را بررسی کردند. این مطالعه نشان داد که حضور مواد سمی می‌تواند اکسیداسیون آندی را در MFC سرکوب نماید، که این امر به افت ولتاژ منجر می‌شود [۴۳]. یکی از چالش‌های اصلی در

## جدول (۳). مقایسه فرایندهای سلول سوختی میکروبی، لجن فعال و اسمز معکوس

Table (3). Comparison of microbial fuel cell, activated sludge and reverse osmosis processes

| Technology       | Energy Consumption                       | Cost (relative) | Energy Recovery | Reference |
|------------------|------------------------------------------|-----------------|-----------------|-----------|
| MFC              | Low (<40%)                               | lower           | Yes             | [45, 46]  |
| Activated Sludge | High                                     | Higher          | No              | [45, 46]  |
| Reverse Osmosis  | Very High (up to 10 kWh/m <sup>3</sup> ) | High            | No              | [45]      |

۴۹]. جدول ۳ فرایندهای سلول سوختی میکروبی، لجن فعال و اسمز معکوس را از لحاظ مصرف انرژی، هزینه و قابلیت بازیابی انرژی با یکدیگر مقایسه می‌کند.

## ۶. رویکرد اقتصادی پیل سوختی میکروبی

پیل‌های سوختی میکروبی به‌عنوان فناوری نوظهوری که از میکروارگانیسم‌ها برای تبدیل انرژی شیمیایی مواد آلی به انرژی الکتریکی استفاده می‌کنند، در صنعت پتروشیمی پتانسیل بالایی برای تصفیه پساب و تولید انرژی دارند. بازار جهانی MFC در سال ۲۰۲۳ حدود ۱۵۸۸۸ هزار دلار ارزش‌گذاری شده و پیش‌بینی می‌شود از سال ۲۰۲۴ تا ۲۰۳۰ با نرخ رشد سالانه مرکب<sup>۲</sup> (CAGR) ۱۲/۷٪ به ۳۶۳۶۷ هزار دلار برسد. این رشد عمدتاً به دلیل افزایش نگرانی‌ها در مورد گرمایش جهانی و تغییرات اقلیمی است که تقاضا برای منابع سوخت پایدار و جایگزین را افزایش داده است. در صنعت پتروشیمی، که پساب‌های غنی از مواد آلی تولید می‌کند، MFC می‌تواند با تصفیه پساب و تولید همزمان برق، هزینه‌های عملیاتی را کاهش دهد و به کاهش انتشار کربن کمک کند. در سال ۲۰۲۳، بخش تصفیه پساب با سهم ۵۷/۴۸ درصدی از بازار، بزرگ‌ترین کاربرد سلول‌های سوختی میکروبی را به خود اختصاص داده است. با این حال، چالش‌هایی مانند هزینه‌های اولیه بالا برای مواد الکترود و مقیاس‌پذیری محدود، تجاری‌سازی گسترده MFC را با

سلول‌های سوختی میکروبی به عنوان جایگزینی پایدار برای روش‌های مرسوم تصفیه فاضلاب مانند لجن فعال، در حال ظهور هستند و پتانسیل مصرف انرژی کمتر، کاهش هزینه‌ها و بازیابی همزمان انرژی را ارائه می‌دهند. با این حال، باید میان زمان ماند و حذف مواد مغذی بهینه‌سازی انجام گیرد. MFCها می‌توانند در مقایسه با روش‌های سنتی مانند اسمز معکوس و نمک‌زدایی حرارتی، مصرف کل انرژی را بیش از ۴۰٪ کاهش دهند. این به دلیل توانایی آنها در تولید بیوالکتریک در طول تصفیه است که نیازه‌های انرژی عملیاتی را جبران می‌کند. کاهش هزینه تا ۳۰٪ برای پذیرش MFC در مقیاس بزرگ پیش‌بینی می‌شود. پیشرفت در مواد الکترود نیز هزینه‌های سرمایه‌ای MFCها را به شدت کاهش داده است. از طرفی لجن فعال و سایر روش‌های مرسوم، به ویژه برای هوادهی، انرژی‌بر هستند و انرژی را بازیابی نمی‌کنند [۴۵، ۴۶]. MFCها می‌توانند در زمان ماند هیدرولیکی<sup>۱</sup> (HRT) مشابه یا کمی طولانی‌تر از روش‌های مرسوم عمل کنند و همچنین تصفیه مؤثر آنها در HRTهای ۴ تا ۱۲ ساعت برای فاضلاب خانگی مشاهده می‌شود. راندمان حذف مواد آلی در MFCها بسته به ویژگی‌های ورودی و طراحی سیستم، از ۶۰ تا ۹۰ درصد متغیر است. سیستم‌های لجن فعال معمولاً در HRTهای کوتاه‌تر (۶ تا ۸ ساعت) به حذف بالای مواد آلی (>۹۰ درصد) دست می‌یابند اما انرژی را بازیابی نمی‌کنند [۴۶-۴۷].

<sup>۲</sup> Compound Annual Growth Rate<sup>۱</sup> Hydraulic Retention Time

موانعی مواجه کرده است. در کوتاه مدت (تا ۵ سال آینده)، انتظار می‌رود MFC به صورت آزمایشی در تصفیه پساب‌های پتروشیمی و تولید انرژی در مقیاس کوچک و با تمرکز بر کاهش هزینه‌های مواد و بهبود بازده استفاده شود. در میان مدت (۵ تا ۱۰ سال آینده)، پیشرفت در طراحی ماژولار و مواد پیشرفته می‌تواند MFC را به‌ویژه در مناطقی که پایداری زیست‌محیطی در اولویت است، به بخشی از سیستم‌های تصفیه پساب پتروپالایشگاه‌ها تبدیل کند. در بلندمدت (بیش از ۱۰ سال)، با کاهش هزینه‌های سرمایه‌گذاری و افزایش کارایی، MFC ممکن است به فناوری استاندارد برای تولید انرژی تجدیدپذیر در پتروشیمی‌ها تبدیل شود. افزایش آگاهی زیست‌محیطی و مقررات سختگیرانه دولتی، به‌ویژه در مناطق توسعه‌یافته مانند آمریکای شمالی که ۲۸/۴ درصد از بازار جهانی را در سال ۲۰۲۳ به خود اختصاص داده، این روند را تقویت می‌کند. در کشورهای در حال توسعه، که زیرساخت‌های انرژی و مدیریت پسماند در حال تکامل است، MFC فرصت‌های قابل توجهی برای کاهش وابستگی به سوخت‌های فسیلی ارائه می‌دهد. با این حال، برای تحقق این پتانسیل، نیاز به سرمایه‌گذاری در تحقیق و توسعه برای بهبود عملکرد و کاهش هزینه‌ها ضروری است [۵۰].

## ۷. چالش‌ها و رویکردهای آینده

پیاده‌سازی عملی پیل‌های سوختی میکروبی در تصفیه فاضلاب با چالش‌های قابل توجهی روبرو است که عمدتاً مربوط به مقیاس‌پذیری، پایداری عملکرد، حساسیت به ترکیب فاضلاب و بهینه‌سازی مواد الکترود است. عملکرد در حالت بدون وقفه، چالش‌های هیدرودینامیکی را ایجاد می‌کند که می‌تواند بر عملکرد MFC و عملکرد جوامع میکروبی بیوفیلم تأثیر بگذارد. نرخ جریان، زمان ماند هیدرولیکی و تنش برشی عوامل مهمی هستند که باید قبل

از به‌کارگیری مؤثر MFC‌ها در تصفیه‌خانه‌های فاضلاب مورد توجه قرار گیرند. افزایش نرخ جریان عموماً منجر به افزایش توان خروجی می‌شود. با این حال، نرخ‌های جریان بسیار بالا منجر به کاهش چگالی توان می‌شوند. عملکرد بهینه MFC زمانی محقق می‌گردد که جوامع میکروبی زمان کافی برای توسعه، دستیابی به استفاده مطلوب از مواد مغذی و هیدرولیز سوبسترا داشته باشند. افزایش نرخ جریان همچنین بر حذف COD و راندمان کولمبیک تأثیر منفی می‌گذارد، در حالی که نرخ‌های برشی مناسب با تولید بیوفیلم‌های ضخیم‌تر و متراکم‌تر، انتقال الکترون را افزایش می‌دهند. با این وجود، نرخ‌های برشی بیش از حد بالا باعث جدا شدن بیوفیلم و کاهش تنوع میکروبی می‌شود و منجر به بیوفیلم‌های همگن تحت سلطه یک گونه واحد می‌گردد [۱۸]. عملکرد بهینه MFC زمانی محقق می‌شود که جوامع میکروبی زمان کافی برای توسعه، دستیابی به استفاده مطلوب از مواد مغذی و هیدرولیز بستر داشته باشند. افزایش مقیاس MFC‌ها به دلیل افزایش اندازه راکتور، تلفات ولتاژ و اتصال کوتاه یونی داخلی، خروجی انرژی را به میزان قابل توجهی کاهش می‌دهد. از نظر اقتصادی، افزایش مقیاس باید مواد ساخت راکتور مقرون به صرفه را بدون به خطر انداختن عملکرد بلندمدت در اولویت قرار دهد. به عنوان مثال، کربن فعال دانه‌ای و بیوچار به عنوان جایگزین‌های مقرون به صرفه برای بیواندها ظاهر می‌شوند و خروجی‌های انرژی بهبود یافته‌ای را در مقایسه با مواد معمولی نشان می‌دهند. علاوه بر این، کاتالیزورهای ارزان قیمت و مواد غشایی جایگزین مانند غشاهای سرامیکی یا جداکننده‌های پارچه‌ای هزینه‌های ساخت و عملیاتی را کاهش می‌دهند [۷]. پیشرفت‌های آینده در فناوری MFC باید به مکانیسم‌های بیوشیمیایی حاکم بر تصفیه کارآمد فاضلاب و تولید انرژی بپردازد. طراحی کنسرسیوم میکروبی بهبود یافته، احتمالاً از طریق جهش‌زایی یا فناوری DNA نوترکیب، می‌تواند نرخ

تمرکز کند. با تداوم پیشرفت‌ها، فناوری MFC می‌تواند به‌عنوان بخشی حیاتی از رویکردهای پایدار در بخش پتروشیمی مورد استفاده قرار گیرد.

### تعارض منافع

هیچ گونه تعارض منافع توسط نویسندگان بیان نشده است.

### تشکر و قدردانی

نویسندگان بر خود لازم می‌دانند از جناب آقای دکتر جلال شایگان به‌پاس راهنمایی‌ها، حمایت‌های علمی و نکات ارزشمند ایشان در طول انجام این پژوهش صمیمانه قدردانی نمایند.

### مراجع

1. Tian X, Song Y, Shen Z, Zhou Y, Wang K, Jin X, Han Z, Liu T. A comprehensive review on toxic petrochemical wastewater pretreatment and advanced treatment. *J Clean Prod.* 2020;251:118692. doi:10.1016/j.jclepro.2019.118692.
2. Tamilarasan K, Shabarish S, Rajesh Banu J, Godvin Sharmila V. Sustainable power production from petrochemical industrial effluent using dual chambered microbial fuel cell. *J Environ Manage.* 2024;359:119777. doi:10.1016/j.jenvman.2023.119777.
3. Manitcharoen N, Pimpunchat B, Sattayatham P. Water quality analysis for the depletion of dissolved oxygen due to exponentially increasing form of pollution sources. *J Appl Math.* 2020;2020:9085981. doi:10.1155/2020/9085981.
4. Fillo JP, Koraido SM, Evans JM. Sources, characteristics, and management of produced waters from natural gas production and storage operations. In: *Produced water: Technological/environmental issues and solutions.* Springer; 1992. p. 151–61. doi:10.1007/978-1-4615-2902-6\_12.

انتقال الکترون را بدون اتکا به واسطه‌های خارجی یا بیوفیلیم‌ها تا حد زیادی افزایش دهد. ادغام مدارهای مدیریت توان و ابرخازن‌ها، راه‌حلی برای مدیریت خروجی‌های نوسانی ارائه می‌دهد. علاوه بر این، گنجاندن MFCها در سیستم‌های تصفیه فاضلاب متعارف، عملکرد کلی را افزایش و هزینه‌ها را کاهش می‌دهد و آنها را به گزینه‌های رقابتی تبدیل می‌کند. تحقیقات بین رشته‌ای مداوم، به ویژه با مشارکت میکروبیولوژیست‌ها، برای آشکار کردن عملکردهای متابولیک میکروبی و ویژگی‌های بیوفیلیم که برای بهینه‌سازی طراحی، عملکرد و پایداری راکتور حیاتی هستند، ضروری است [۵۱].

### ۸. نتیجه‌گیری

پیل‌های سوختی میکروبی (MFCs) راه‌حلی امیدبخش برای دو چالش اساسی در صنعت پتروشیمی ارائه می‌دهند: تصفیه فاضلاب‌های پیچیده و سمی و تولید انرژی پایدار. از طریق فعالیت‌های متابولیکی میکروارگانیسم‌ها، MFCها قادرند آلاینده‌های آلی را به انرژی الکتریکی تبدیل کنند و بدین ترتیب، امکان تصفیه هم‌زمان فاضلاب و بازیابی منابع را فراهم می‌آورند. مطالعات تجربی، امکان استفاده از MFC برای تصفیه انواع فاضلاب پتروشیمی را اثبات کرده‌اند؛ به‌گونه‌ای که در شرایط دشوار نیز حذف قابل‌توجه آلاینده‌ها و تولید برق محقق شده است. نوآوری‌هایی نظیر استفاده از مواد الکترودی جدید و طراحی‌های نوین راکتور، بازدهی سیستم را بهبود بخشیده‌اند. با این حال، محدودیت‌هایی مانند مقیاس‌پذیری پایین، ناپایداری عملیاتی و تغییرپذیری در ترکیب فاضلاب‌های پتروشیمی، همچنان موانع مهمی برای اجرای گسترده این فناوری به‌شمار می‌روند. برای بهره‌برداری کامل از ظرفیت‌های MFC در کاربردهای صنعتی، تحقیقات آینده باید بر بهینه‌سازی طراحی سیستم، ارتقاء عملکرد میکروبی و کاهش هزینه‌ها

5. Tellez GT, Nirmalakhandan N, Gardea-Torresdey JL. Kinetic evaluation of a field-scale activated sludge system for removing petroleum hydrocarbons from oilfield-produced water. *Environ Prog.* 2005;24:96–104. doi:10.1002/ep.10042.
6. Sayigh A. Achieving building comfort by natural means. Springer; 2022. p. 6. doi:10.1007/978-3-031-04714-5.
7. Selvasembian R, Mal J, Rani R, Sinha R, Agrahari R, Joshua I, Santhiagu A, Pradhan N. Recent progress in microbial fuel cells for industrial effluent treatment and energy generation: Fundamentals to scale-up application and challenges. *Bioresour Technol.* 2022;346:126462. doi:10.1016/j.biortech.2021.126462.
8. Li WW, Yu HQ, He Z. Towards sustainable wastewater treatment by using microbial fuel cells-centered technologies. *Energy Environ Sci.* 2014;7:911–24. doi:10.1039/C3EE43106A.
9. Eslami F, Yaghmaeian K, Shokoohi R, Sajjadipoya R, Rahmani A, Askarpur H, Norouzian Baghani A, Jafari Mansoorian H, Jaber Ansari F. Nano-pumice derived from pumice mine waste as a low-cost electrode catalyst for microbial fuel cell treating edible vegetable oil refinery wastewater for bioenergy generation and reuse. *Heliyon.* 2024;12:e40495. doi:10.1016/j.heliyon.2024.e40495.
10. Almatouq A, Ahmed ME, Khajah M, Abdullah H, Al-Yaseen R, Al-Jumaa M, Al-Ajeel F, Shishter A. Performance of tubular microbial fuel cells using different industrial wastewater. *J Water Process Eng.* 2023;58:104166. doi:10.1016/j.jwpe.2023.104166.
11. Gadkari S, Shemfe M, Sadhukhan J. Microbial fuel cells: A fast converging dynamic model for assessing system performance based on bioanode kinetics. *Int J Hydrogen Energy.* 2019;44:15377–86. doi:10.1016/j.ijhydene.2019.04.065.
12. Vishwanathan AS. Microbial fuel cells: A comprehensive review for beginners. Springer Science and Business Media Deutschland GmbH; 2021. p. 7–8. doi:10.1007/s13205-021-02802-y.
13. Zheng T, Li J, Ji Y, Zhang W, Fang Y, Xin F, Dong W, Wei P, Ma J, Jiang M. Progress and prospects of bioelectrochemical systems: Electron transfer and its applications in microbial metabolism. *Front Bioeng Biotechnol.* 2020;8:10. doi:10.3389/fbioe.2020.00010.
14. He Z. Microbial fuel cells: Now let us talk about energy. *Environ Sci Technol.* 2013;47:332–3. doi:10.1021/es304937e.
15. Shah S, Venkatramanan V, Prasad R. Microbial fuel cell: Sustainable green technology for bioelectricity generation and wastewater treatment. In: Sustainable green technologies for environmental management. Springer Singapore; 2019. p. 199–218. doi:10.1007/978-981-13-2772-8\_10.
17. Ragab M, Elawwad A, Abdel-Halim H. Evaluating the performance of microbial desalination cells subjected to different operating temperatures. *Desalination.* 2019;462:56–66. doi:10.1016/j.desal.2019.04.008.
18. Ramirez-Nava J, Martínez-Castrejón M, García-Mesino RL, López-Díaz JA, Talavera-Mendoza O, Sarmiento-Villagrana A, Rojano F, Hernández-Flores G. The implications of membranes used as separators in microbial fuel cells. *Membranes (Basel).* 2021;11:738. doi:10.3390/membranes11100738.
19. Goswami R, Mishra VK. A review of design, operational conditions and applications of microbial fuel cells. *Biofuels.* 2018;9:203–20. doi:10.1080/17597269.2017.1302682.
20. Ge Z, He Z. Long-term performance of a 200 liter modularized microbial fuel cell system treating municipal wastewater: Treatment, energy, and cost. *Environ Sci (Camb).* 2016;2:274–81. doi:10.1039/C6EW00020G.
21. Yaqoob AA, Ibrahim MNM, Guerrero-Barajas C. Modern trend of anodes in microbial fuel cells (MFCs): An overview. *Environ Technol Innov.* 2021;22:101579. doi:10.1016/j.eti.2021.101579.

22. Yuan H, Hou Y, Abu-Reesh IM, Chen J, He Z. Oxygen reduction reaction catalysts used in microbial fuel cells for energy-efficient wastewater treatment: A review. *Mater Horiz.* 2016;3:382–401. doi:10.1039/C6MH00093B.
23. Schaetzle O, Barrière F, Baronian K. Bacteria and yeasts as catalysts in microbial fuel cells: Electron transfer from micro-organisms to electrodes for green electricity. *Energy Environ Sci.* 2008;1:607–20. doi:10.1039/B810642H.
24. Yang Y, Xu M, Guo J, Sun G. Bacterial extracellular electron transfer in bioelectrochemical systems. *Process Biochem.* 2012;47:1707–14. doi:10.1016/j.procbio.2012.07.032.
25. Schröder U. Anodic electron transfer mechanisms in microbial fuel cells and their energy efficiency. *Phys Chem Chem Phys.* 2007;9:2619–29. doi:10.1039/B703627M.
26. Thapa BS, Kim T, Pandit S, Song YE, Afsharian YP, Rahimnejad M, Kim JR, Oh S-E. Overview of electroactive microorganisms and electron transfer mechanisms in microbial electrochemistry. *Bioresour Technol.* 2022;347:126579. doi:10.1016/j.biortech.2021.126579.
27. Turunen J, Karppinen A, Ihme R. Effectiveness of biopolymer coagulants in agricultural wastewater treatment at two contrasting levels of pollution. *SN Appl Sci.* 2019;1:225. doi:10.1007/s42452-019-0225-x.
28. Majumder D, Maity JP, Tseng MJ, Nimje VR, Chen HR, Chen CC, Chang YF, Yang TC, Chen CY. Electricity generation and wastewater treatment of oil refinery in microbial fuel cells using *Pseudomonas putida*. *Int J Mol Sci.* 2014;15:16772–86. doi:10.3390/ijms150916772.
29. Spitz PH. Circumstances are perfect: A new industry grows rapidly. In: *Primed for success: The story of scientific design company—How chemical engineers created the petrochemical industry.* Springer; 2019. p. 57–72. doi:10.1007/978-3-030-12314-7\_5.
30. Sathya K, Nagarajan K, Carlin Geor Malar G, Rajalakshmi S, Raja Lakshmi P. A comprehensive review on comparison among effluent treatment methods and modern methods of treatment of industrial wastewater effluent from different sources. *Appl Water Sci.* 2022;12:1594. doi:10.1007/s13201-022-01594-7.
31. Sarmin S, Ideris AB, Ethiraj B, Amirul Islam M, Yee CS, Rahman Khan MM. Potentiality of petrochemical wastewater as substrate in microbial fuel cell. *IOP Conf Ser Mater Sci Eng.* 2020;736:032015. doi:10.1088/1757-899X/736/3/032015.
32. Santos RE dos, Santos IFS dos, Barros RM, Bernal AP, Tiago Filho GL, Silva FG B da. Generating electrical energy through urban solid waste in Brazil: An economic and energy comparative analysis. *J Environ Manage.* 2019;231:198–206. doi:10.1016/j.jenvman.2018.10.015.
33. Lahiere RJ, Goodboy KP. Ceramic membrane treatment of petrochemical wastewater. *Environ Prog.* 1993;12:86–96. doi:10.1002/ep.670120204.
34. Bahri M, Mahdavi A, Mirzaei A, Mansouri A, Haghighat F. Integrated oxidation process and biological treatment for highly concentrated petrochemical effluents: A review. *Chem Eng Process Process Intensif.* 2018;125:183–96. doi:10.1016/j.cep.2018.02.002.
35. Lefebvre O, Tan Z, Kharkwal S, Ng HY. Effect of increasing anodic NaCl concentration on microbial fuel cell performance. *Bioresour Technol.* 2012;112:336–40. doi:10.1016/j.biortech.2012.02.048.
36. Sarmin S, Ethiraj B, Islam MA, Ideris A, Yee CS, Khan MMR. Bio-electrochemical power generation in petrochemical wastewater fed microbial fuel cell. *Sci Total Environ.* 2019;133820. doi:10.1016/j.scitotenv.2019.133820.

37. Buitron G, Macarie H. Proceedings waste minimisation and end-of-pipe treatment in chemical and petrochemical industries. In: IAWQ Int Spec Conf Chem Ind Group, Mérida, Mexico; 1999.
38. Agarry SE. Bioelectricity generation and treatment of petroleum refinery effluent by *Bacillus cereus* and *Clostridium butyricum* using microbial fuel cell technology. *Niger J Technol*. 2017;36:543. doi:10.4314/njt.v36i2.30.
39. Yeruva DK, Jukuri S, Velvizhi G, Naresh Kumar A, Swamy YV, Venkata Mohan S. Integrating sequencing batch reactor with bio-electrochemical treatment for augmenting remediation efficiency of complex petrochemical wastewater. *Bioresour Technol*. 2015;188:33–42. doi:10.1016/j.biortech.2015.02.014.
40. Roustazadeh Sheikhyousefi P, Nasr Esfahany M, Colombo A, Franzetti A, Trasatti SP, Cristiani P. Investigation of different configurations of microbial fuel cells for the treatment of oilfield produced water. *Appl Energy*. 2017;192:457–65. doi:10.1016/j.apenergy.2016.10.057.
41. Hejazi SF, Ghoreyshi AA, Rahimnejad M. Simultaneous phenol degradation and bioenergy production in a tubular microbial fuel cell. In: *Hydrogen and fuel cell conf.*, Tehran, Iran; 2017.
42. Ali N, Anam M, Yousaf S, Malecha S, Bangash Z. Characterization of the electric current generation potential of *Pseudomonas aeruginosa* using glucose, fructose, and sucrose in double chamber microbial fuel cell. *Iran J Biotechnol*. 2017;15:216–23. doi:10.15171/ijb.1608.
43. Bhattacharyya D, Allison MJ, Webb JR, Zanatta GM, Singh KS, Grant SR. Treatment of an industrial wastewater containing acrylic acid and formaldehyde in an anaerobic membrane bioreactor. *J Hazard Toxic Radioact Waste*. 2013;17:74–9. doi:10.1061/(ASCE)HZ.2153-5515.0000148.
44. Jiang Y, Yang X, Liang P, Liu P, Huang X. Microbial fuel cell sensors for water quality early warning systems: Fundamentals, signal resolution, optimization and future challenges. *Renew Sustain Energy Rev*. 2018;81:292–305. doi:10.1016/j.rser.2017.06.099.
45. Jadhav DA, Mungray AK, Arkatkar A, Kumar SS. Recent advancement in scaling-up applications of microbial fuel cells: From reality to practicability. *Sustain Energy Technol Assess*. 2021;46:101226. doi:10.1016/j.seta.2021.101226.
46. Farahani H, Haghighi M, Behvand Usefi MM, Ghasemi M. Overview of sustainable water treatment using microbial fuel cells and microbial desalination cells. *Sustainability*. 2024;16:10458. doi:10.3390/su162310458.
47. Hiegemann H, Herzer D, Nettmann E, Lübken M, Schulte P, Schmelz K-G, Gredigk-Hoffmann S, Wichern M. An integrated 45 L pilot microbial fuel cell system at a full-scale wastewater treatment plant. *Bioresour Technol*. 2016;218:115–22. doi:10.1016/j.biortech.2016.06.052.
48. Sorgato AC, Jeremias TC, Lobo FL, Lapolli FR. Microbial fuel cell: Interplay of energy production, wastewater treatment, toxicity assessment with hydraulic retention time. *Environ Res*. 2023;231:116159. doi:10.1016/j.envres.2023.116159.
49. Srikanth S, Kumar M, Singh D, Singh MP, Das BP. Electro-biocatalytic treatment of petroleum refinery wastewater using microbial fuel cell (MFC) in continuous mode operation. *Bioresour Technol*. 2016;221:70–7. doi:10.1016/j.biortech.2016.09.034.
50. Kim K-Y, Yang W, Logan BE. Impact of electrode configurations on retention time and domestic wastewater treatment efficiency using microbial fuel cells. *Water Res*. 2015;80:41–6. doi:10.1016/j.watres.2015.05.021.
51. Grand View Research. Microbial fuel cells market size, share & trends analysis report by type (mediator, mediator-free), by application (power generation, wastewater treatment), by region, and segment forecasts, 2024–2030. San Francisco (CA): Grand View Research; 2024.

52. Tang J, Zhang C, Shi X, Sun J, Cunningham JA. Municipal wastewater treatment plants coupled with electrochemical, biological and bio-electrochemical technologies: Opportunities and challenge toward energy self-sufficiency. J Environ Manage. 2019;234:396–403. doi:10.1016/j.jenvman.2018.12.097.

MICROBIAL BIOTECHNOLOGY AND  
BIOPROCESS ENGINEERING02157416262  
02157416806 <https://mbbe.iroost.ir> <https://mbbe.iroost.ir>

# The Application of Microbial Fuel Cells in Sustainable Petrochemical Wastewater Management

Alireza Ganji <sup>1</sup>, Azadeh Babaei <sup>2\*</sup><sup>1</sup> M.Sc., Faculty of Chemical and Petroleum Engineering, Sharif University of Technology, Tehran, Iran<sup>2\*</sup> Assistant Professor, Department of Chemistry, Ka.C., Islamic Azad University, Karaj, Iran

## Article Info

**Document Type:**  
*Review Paper***Paper History:**  
Received: 2025-05-10  
Revised: 2025-10-01  
Accepted: 2025-11-01**Keywords:****Microbial Fuel Cell;  
Petrochemical Industry;  
Renewable Energy;  
Wastewater Treatment;  
Power Generation**

## ABSTRACT

The petrochemical industry, while playing a pivotal role in economic development, produces vast quantities of toxic wastewater that pose serious environmental threats. Conventional treatment technologies frequently prove inefficient because of their high energy demand and limited ability to remove complex pollutants. Microbial fuel cells (MFCs), a class of bio-electrochemical systems, offer a sustainable alternative, enabling simultaneous wastewater remediation and electricity generation through microbial metabolism. This review analyses the architecture and operating principles of MFCs and synthesizes key studies on their application to petrochemical wastewater treatment. Case studies report effective removal of chemical oxygen demand, phenol, and other contaminants, with power densities reaching up to 850 mW.m<sup>-2</sup>. The effects of substrate concentration, salinity, toxic compounds, electrode materials, and reactor design on MFC performance are examined in detail. Despite these promising findings, challenges such as limited scalability, performance fluctuations, and sensitivity to wastewater composition persist. Continued progress will require research focused on advanced materials, system optimization, and microbial community engineering to prepare MFC technology for industrial-scale adoption in the petrochemical sector.

<https://doi.org/10.22104/mbbe.2025.7609.1004>[https://mbbe.iroost.ir/article\\_1606.html](https://mbbe.iroost.ir/article_1606.html)

## How to cite this paper:



Ganji, A., Babaei, A. (2026). The application of microbial fuel cells in sustainable petrochemical wastewater management. *Microbial Biotechnology and Bioprocess Engineering*. 1(1), 1-15. DOI: 10.22104/mbbe.2025.7609.1004

\*Corresponding author E-mail: azadeh.babaei@kia.ac.ir