

## افزایش کارایی پیل سوختی میکروبی رسوبی با بهینه‌سازی الکترودهای مبتنی بر پایه‌ی کربنی

حسین دریس عبدالله پور<sup>۱</sup>، مصطفی رحیم‌نژاد<sup>۱\*</sup>، مهرداد مشکور<sup>۱</sup>، سانگ اون اوه<sup>۲</sup>

۱ مهندسی شیمی - بیوتکنولوژی، دانشگاه صنعتی نوشیروانی، بابل، ایران

۲ مهندسی شیمی - بیوتکنولوژی، دانشگاه کانگونگ کره جنوبی

### اطلاعات مقاله

### چکیده



#### واژه‌های کلیدی:

پیل سوختی میکروبی رسوبی،  
مقاومت درونی، امپدانس،  
بهینه‌سازی الکترودها، دانسیته توان.

#### Keywords:

Sediment microbial fuel cell,  
stainless steel mesh,  
multi-electrode systems,  
graphite electrode,  
power density.

دریافت: ۱۴۰۴/۰۱/۱۳

پذیرش: ۱۴۰۴/۰۷/۲۱

نوع مقاله: علمی - پژوهشی

در این مطالعه، ابتدا مقدار بهینه رنگ گرافیت لایه‌نشانی شده و رنگ کربن سیاه با کربن فعال در حضور اتصال‌دهنده بر روی سطح مش استیل ضد زنگ، به ترتیب، ۸/۸۸ و ۲۰ میلی‌گرم بر سانتی‌متر مربع، طبق طیف‌سنجی امپدانس در محلول بافر فسفات تعیین شد. سپس این الکترودها، در کنار صفحات گرافیت و مش استیل لایه‌نشانی شده با رنگ گرافیت بدون استفاده از اتصال‌دهنده، با چگالی سطحی  $3/0 \pm 1$  میلی‌گرم بر سانتی‌متر مربع، به‌عنوان الکترودهای آند و کاتد در پیل سوختی میکروبی رسوبی مورد آزمایش قرار گرفتند. نتایج حاصل از منحنی‌های پلاریزاسیون و امپدانس نشان داد که استفاده از مش استیل لایه‌نشانی شده با پودر گرافیت در حضور اتصال‌دهنده به‌عنوان الکترودها آند و مش استیل لایه‌نشانی شده با کربن سیاه بدون اتصال‌دهنده، موجب افزایش توان خروجی به میزان ۲۹۱ میلی‌وات بر مترمربع و جریان خروجی به میزان ۱۱۰۲ میلی‌آمپر بر مترمربع شده و مقاومت داخلی پیل را تقلیل می‌دهد. این نتایج اهمیت طراحی مناسب الکترودها در افزایش کارایی پیل‌های سوختی میکروبی رسوبی را تأیید می‌کند.

### مقدمه

پایدار را تضمین کنند [۱]. امروزه تامین انرژی پاک و پایدار یکی از بزرگ‌ترین چالش‌های بشر است، به‌ویژه با بحران انرژی و نوسانات

در طول تاریخ، سوخت‌های فسیلی نقش قابل توجهی در صنعتی شدن و رشد اقتصادی کشورها داشته‌اند، اما نمی‌توانند اقتصاد جهانی

+E-mail: Rahimnejad@nit.ac.ir

\*عهده‌دار مکاتبات

ارجاع: حسین دریس عبدالله پور، مصطفی رحیم‌نژاد، مهرداد مشکور، سانگ اون اوه، افزایش کارایی پیل سوختی میکروبی رسوبی با بهینه‌سازی الکترودهای مبتنی بر پایه‌ی کربنی، نشریه شیمی و مهندسی شیمی ایران، (۴) ۴۴: ۱۵۷ تا ۱۶۶ (۱۴۰۴).

باید ویژگی‌های مهمی از جمله: تخلخل و رسانایی بالا، غیر خوردنده بودن، سطح ویژه گسترده، ضد رسوب‌گیری (تجمع میکروارگانیسم‌ها روی آن سبب ایجاد رسوبات سخت نشود)، ارزان قیمت، قابلیت ساخت و افزایش مقیاس آسان را داشته باشند، بین این ویژگی‌ها، رسانایی الکتریکی بسیار حائز اهمیت می‌باشد.

### بخش تجربی

#### مواد

##### انتخاب مکان رسوب‌گیری، نمونه‌گیری، انتقال و نگهداری

میزان بار آلی و حضور میکروارگانیسم‌های گوناگون در نواحی مختلف از رسوبات آب‌های شور و شیرین از عوامل مهم در کیفیت رسوبات و تولید مناسب توان و جریان است. با توجه به انباشت رسوبات و پراکندگی بالای مواد آلی و میکروارگانیسم‌ها در منطقه دلتای رودخانه، این مناطق بهترین نقطه برای جمع‌آوری رسوب می‌باشند. به این منظور رسوب مورد استفاده از ناحیه رودخانه بابل رود (بابلسر) به مختصات جغرافیایی ۳۶/۷۱۴۸۹۵۶، ۵۲/۶۵۴۶۰۲۴ در فاصله ۱۲۰ متری از ساحل دریاچه خزر جمع‌آوری گردید. همه نمونه‌ها از عمق‌های بین ۲۰-۰ سانتی‌متری و در قسمتی از مناطق که عمق آب ۰/۳ متر بوده با استفاده از لوله پلیکا به صورت مغزی‌گیری گرفته و به داخل ظروف پلاستیکی انتقال داده شد. پس از نمونه‌برداری از ناحیه مورد نظر، رسوبات با آب همان منطقه مخلوط و بلافاصله به آزمایشگاه منتقل شدند. قبل از وارد کردن رسوبات به داخل پیل، همه نمونه‌ها به مدت ۳۰ دقیقه به صورت دستی هم زده شدند تا مواد آلی و غیر آلی در سراسر نمونه یکنواخت پخش شود. پس از مخلوط‌سازی، مواد خارجی مانند سنگ، صدف و زباله‌ها از رسوبات پاک شدند. سپس رسوبات در ظروف پلاستیکی بزرگ قرار گرفتند و سطح آنها با آب جمع‌آوری‌کننده پوشانده شد تا از کیفیت و رطوبت مصالح حفظ گردد. در نهایت، ظرف نمونه در دمای اتاق نگهداری شد.

#### شرایط آزمایش

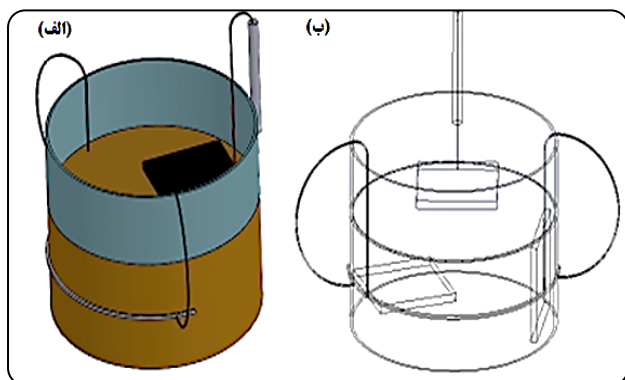
تمامی آزمایشات در آزمایشگاه و تحت دمای محیط انجام شدند. باتوجه به این که یکی از محدودیت‌های MFC اختلاف pH بین محفظه آند و کاتد می‌باشد ولی در SMFC به دلیل عدم وجود غشا این مشکل تا حدودی کمتر از MFC است. با این حال محدودیت‌های انتقال پروتون که در بایو فیلم وجود دارد می‌تواند تا حدودی سبب تغییر pH شود که نتیجه آن تجمع پروتون و تأثیر بر فیزیولوژی باکتری‌ها می‌باشد. pH آب دریای خزر بین ۷/۵ تا ۸/۵ قرار دارد و اضافه کردن آن به عنوان کاتولیت به سیستم می‌تواند تغییرات احتمالی pH را تا حدودی خنثی کند [۱۲] پس در نتیجه باتوجه به کاهش آب پیل‌ها در قسمت کاتد در اثر تبخیر شدن بهترین کار

قیمت نفت در سال‌های اخیر که کشورهای جهان را وادار به نگرشی گسترده‌تر در حوزه انرژی کرده است. [۲] پیل‌های سوختی میکروبی (MFC) دستگاه‌های زیستی الکتروشیمیایی هستند که می‌توانند از متابولیسم‌های میکروبی برای تجزیه مواد آلی و تولید برق بهره‌مند شوند [۳]. این فناوری‌ها به عنوان منابع انرژی تجدیدپذیر، قابلیت تامین قدرت برای سیستم‌های کنترل از راه دور، اندازه‌گیری دما و pH و تجهیزات کم مصرف را دارند [۴، ۵]. ترکیبات قابل استفاده در MFCها شامل مواد ساده مانند گلوکز و استات و همچنین ترکیبات پیچیده مانند نشاسته، فاضلاب و رسوبات آلی و غیر آلی در بستر دریا و رودخانه است [۶]. پیل سوختی میکروبی رسوبی (SMFC) از رسوبات آلی و غیر آلی به عنوان منبع سوخت برای تولید برق بهره می‌گیرد [۷]. رسوبات نقش مهمی در تعیین آلودگی و دفعات مواد مغذی در منابع آبی دارند و می‌توانند هم به عنوان منبع انرژی و هم منشأ آلودگی از جمله فسفات‌ها و فلزات سنگین مورد توجه قرار گیرند [۸]. این فناوری پتانسیل تامین برق وسایل و سیستم‌های کنترل از راه دور در نواحی دورافتاده، مانند حسگرهای دما، pH، چراغ‌های LED و تجهیزات مخابراتی را دارد [۹]. از مهم‌ترین مزیت‌های SMFC می‌توان به عدم تولید زباله سمی، مراقبت کوتاه مدت و تولید انرژی طولانی مدت اشاره کرد. یک SMFC شامل دو محفظه آند و کاتد بوده و جنس الکترودهای استفاده شده در این دو محفظه از موادی با رسانایی بالا از قبیل صفحه گرافیت، کاغذ کربنی، نمک کربنی، پارچه کربنی، برس کربنی و انواع مختلف مواد کربن پایه می‌باشد. الکتروده آند درون رسوب و در حالت بی‌هوایی قرار دارد زیرا وجود اکسیژن در محفظه آند از تولید الکتروسیسته جلوگیری می‌کند، کاتد نیز در قسمت هوایی قرار گرفته و در قسمت بالایی سطح رسوب به صورت شناور در مایع کاتولیک قرار می‌گیرد. این ساختار ویژه SMFCها می‌تواند به طور هم‌زمان هم برای حذف آلودگی رسوبات دریا، دریاچه و رودخانه‌ها استفاده شود و هم اقدام به تولید انرژی کند [۱۰، ۱۱]. در SMFC بر خلاف MFC غشا وجود ندارد و اختلاف غلظتی که بین رسوب و کاتولیت وجود دارد مانند یک نیرو محرکه باعث حرکت پروتون به سمت محفظه کاتد می‌شود. باکتری‌های الکتروژنیک موجود در رسوب در طی فرایند اکسیداسیون مواد آلی و غیر آلی، پروتون و الکترون را تولید می‌کنند که این الکترون‌ها به وسیله الکتروده آند و از طریق یک مدار خارجی که اغلب از جنس مس می‌باشد، به خارج از سیستم منتقل می‌شوند، در سطح کاتد، طی واکنشی، الکترون، پروتون و اکسیژن محلول، به آب کاهش داده شده و یک مدار کامل را تشکیل می‌دهند [۱۱].

یکی از چالش‌های اصلی در ساخت یک SMFC در ابتدا شناسایی مواد و کاربرد آن در ساختار الکترودها بوده که بتوان به وسیله آن دانسیته توان و جریان را به حداکثر رساند، معمولاً این الکترودها

(۱) Microbial Fuel Cell

(۲) Sediment Microbial Fuel Cell



شکل ۱ - الف: ساختار دوبعدی و ب: ساختار سه‌بعدی از SMFC و موقعیت عمودی و افقی الکترودها در رسوب نسبت به الکترودها کاتد

پرسیده بود. الکترودهای آند و کاتد پایه از جنس صفحه گرافیت با طول و عرض ۳ سانتی‌متر و ضخامت ۵ میلی‌متر بوده که قبل از استفاده به مدت ۳۰ دقیقه در ۰/۱ مولار جوشانده و سپس با آب مقطر ۳ مرتبه شستشو داده شدند. الکترودها در فاصله ۴ سانتی‌متری از سطح رسوب و ۵ سانتی‌متری از الکترودها کاتد در عمق رسوب قرار گرفت. عمق مایع کاتولیک روی سطح الکترودها کاتد ۳ سانتی‌متر در نظر گرفته شده بود. در شکل ۱ شماتیکی از نحوه قرارگیری الکترودها را نشان می‌دهد. پیل موردنظر بعد از گذشت ۴۸ ساعت از حالت مدار باز، برای افزایش ضخامت بایوفیلم تشکیل شده روی سطح آند، به مدت ۲ روز به مقاومت ۱ کیلو اهم متصل شده، پس از گذشت ۱۴ روز از قرارگیری پیل در حالت مدار باز، ولتاژ پایدار شده و تست‌های الکتروشیمی آن مانند تست توان و طیف‌سنجی امپدانس الکتروشیمیایی گرفته شد.

### بررسی استفاده از مش‌های استیل به‌عنوان الکترودها آند و کاتد در SMFC

مواد و ساختار الکترودها نقش مهمی در هزینه‌ها، شرایط انتقال الکترون، مقاومت داخلی و واکنش اکسایش - کاهش موجود در پیل دارند. از مواد کربنی در شکل‌های مختلف برای ساخت الکترودهای آند و کاتد استفاده می‌شود، ولی چنین الکترودهایی به دلیل هزینه بالا در افزایش مقیاس با محدودیت روبه‌رو هستند. مش‌های استیل ضدزنگ از قیمت پایین و دوام مکانیکی - شیمیایی بالایی برخوردار بوده و قابلیت استفاده به‌عنوان الکترودها آند و کاتد را در پیل دارند. گرچه الکترودهای مبتنی بر مش استیل رساناتر از الکترودهای مبتنی بر کربن بوده ولی توان تولید شده در مش‌های استیل به دلیل صاف بودن سطح فلز، پایین می‌باشد [۱۳]. سطح زبر مواد کربنی، چسبندگی باکتری به سطح را افزایش داده، در نتیجه با ایجاد بایوفیلم یکنواخت توان بالاتری تولید می‌شود. اصلاح سطح مش‌های استیل با استفاده از رنگ‌های مبتنی بر مواد کربنی می‌تواند سبب ایجاد سطح خشن بر روی مش شده و عملکرد و انرژی الکترودها را به طور قابل توجهی بهبود ببخشد. برای پایداری و حفظ مواد کربنی روی مش از اتصال‌دهنده‌های پلیمری چون پلی‌تترافلورواتیلن (PTFE)،

اضافه کردن آب ناحیه برداشت رسوب به‌صورت هرچند روز یک‌بار، به طور دستی و بدن ایجاد آشفستگی در لایه‌های رسوب به سیستم است تا شرایط همواره نزدیک به حالت طبیعی باشد و تغییرات pH را خنثی کند. تمامی سیستم‌ها در طول آزمایشات به‌صورت طبیعی و بدون افزودن هیچ کاتالیست، تلقیح میکروارگانیسم و مواد مغذی به کار خود ادامه دادند. برای تمامی سیستم‌ها که به‌صورت طولانی مدت فعالیت داشتند آزمون توان، ثبت ولتاژ در حالت OCV و هوادهی پیل به‌صورت هرروزه انجام می‌شد.

### ساخت و راه‌اندازی پیل سوختی میکروبی رسوبی کاتد و آند

یکی از چالش‌های اصلی در ساخت SMFC در ابتدا شناسایی مواد و کاربرد آن در الکترودها می‌باشد. با توجه به این که هر ماده متناسب با ماهیت واکنش‌های آندی و کاتدی، پلاریزاسیون فعال‌سازی مختلفی دارد بنابراین استفاده از مواد مناسب با هدایت‌پذیری بالا یکی از مهم‌ترین عوامل تأثیرگذار بر عملکرد پیل و افزایش تولید توان و جریان است. استفاده از الکترودهای کربن پایه در پیل به دلیل هزینه کمتر و بازده مناسب‌تر به نسبت الکترودهای پلاتین متداول‌تر می‌باشند. در این تحقیق صورت گرفته الکترودهای مختلفی در اندازه‌ها و تعداد گوناگون از قبیل: صفحه گرافیت و مش‌های استیل لایه نشانی شده با مواد مختلف کربنی در حضور و عدم حضور اتصال‌دهنده پلیمری در ساختار مواد، در پیل به کار رفته است.

### سیستم مدار خارجی

اساس کار SMFCها وجود رسوب و الکترودها آند در بخش بی‌هوای (آنولیت) و غوطه‌ور بودن الکترودها کاتد در بخش هوایی (کاتولیک) است که در اثر فعالیت میکروارگانیسم‌ها پروتون از میان رسوب عبور کرده و وارد بخش کاتد شده و در آنجا واکنش کاهش اکسیژن صورت می‌گیرد، الکترون تولیدی توسط میکروارگانیسم‌ها نیز از طریق آند و سپس توسط یک مدار خارجی (عمدتاً از جنس رسانا نظیر سیم مس) وارد بخش کاتد شده و ایجاد اختلاف پتانسیل یا ولتاژ می‌کند.

### بررسی حالت قرارگیری الکترودها آند در رسوب بر عملکرد SMFC

از نظر تئوری حداکثر ولتاژ تولیدی در SMFCها ۱/۱۴ ولت است که از این نظر جز دسته‌های تولیدکننده پایین انرژی قرار می‌گیرند، در SMFCها پارامترهای مختلفی مانند: pH، اکسیژن محلول، واکنش کاهش اکسیژن، دما و میزان مواد آلی در عملکرد پیل تأثیر می‌گذارند ولی اطلاعات محدودی برای ارزیابی نوع پیکربندی الکترودها در این نوع از پیل‌ها در دسترس می‌باشد. در مطالعات اخیر به‌ندرت مقایسه قابل توجهی نسبت به موقعیت الکترودها به یکدیگر در SMFC صورت گرفته است. در این تحقیق از یک SMFC با ساختار شیشه‌ای به حجم ۱ لیتر استفاده شد که ۶۰۰ گرم آن با رسوب و بقیه با آب محل جمع‌آوری رسوب

### ساخت رنگ گرافیت، کربن فعال و کربن سیاه

مرحله بعد تهیه رنگ گرافیت است که طبق شکل (۵-۳) در مرحله دوم و سوم با مخلوط کردن اتصال دهنده اکریلیک با پودر گرافیت در نسبت جرمی ۱۰:۳ و میزان بسیار کمی از آب مقطر و سپس یکنواخت‌سازی ترکیب با قلمو آماده می‌شود، علت استفاده از اتصال دهنده اکریلیک به جای صمغ عربی و دیگر اتصال دهنده‌ها، پایداری بالای آن است [۱۴]. رنگ آماده شده باید کاملاً یکنواخت و بدون کلوخه‌های پودر گرافیت بوده و غلظتی مناسب داشته باشد، با این رنگ و با استفاده از قلمو ابتدا یک سمت از مش پوشش داده شده، سپس در آن و در دمای ۵۰ درجه سلسیوس به مدت ۲ ساعت خشک شدند سپس سمتی دیگر از مش پوشش داده شده و مراحل قسمت قبل جهت خشک کردن مجدد تکرار گردید. برای ساخت مش استیل پوشش داده شده با کربن فعال و کربن سیاه با اتصال دهنده اکریلیک همانند ساخت رنگ گرافیت عمل شد با فرق این که نسبت پودر کربن فعال، پودر کربن سیاه و اتصال دهنده اکریلیک به ترتیب برابر ۱۰:۳:۶۰ بوده است. ساخت الکتروُد مش استیل لایه نشانی شده با رنگ گرافیت و کربن سیاه با کربن فعال همراه با اتصال دهنده اکریلیک در مقادیر مختلف از چگالی سطحی مواد پوشش داده شده.

برای بررسی تأثیر میزان چگالی سطحی رنگ گرافیت پوشش داده شده روی سطح مش استیل بر توان خروجی، بالاترین حد پوشش دهی (۵ مرتبه) به مقدار ۲۷/۷۷ میلی‌گرم بر سانتی‌متر مربع و کمترین حد پوشش دهی (۱ مرتبه) به مقدار ۶/۸۵ میلی‌گرم بر سانتی‌متر مربع در نظر گرفته شد. جهت بررسی بیشتر، دو مقدار دیگر از چگالی سطحی مواد به مقدار ۱۵ و ۸/۸۸ میلی‌گرم بر سانتی‌متر مربع در نظر گرفته شدند. برای ایجاد مقدار چگالی سطحی مورد نظر، ابتدا مقدار پوششی که باید صورت بگیرد را محاسبه کرده آنگاه مش‌ها بعد از پوشش وزن می‌شوند، اگر وزن مش نسبت به وزن محاسبه شده دارای خطای  $\pm 1/5$  گرم باشد قابل قبول است در غیر این صورت یا مجدد پوشش صورت می‌گیرد یا اینکه مقدار اضافی از روی مش سمباده زده شدند. برای رنگ کربن سیاه با کربن فعال نیز طبق روش رنگ گرافیت عمل کرده و مقادیر چگالی سطحی ۱۵، ۲۰، ۲۵ و ۳۰ میلی‌گرم بر سانتی‌متر مربع جهت پوشش دهی سطح مش استیل در نظر گرفته شدند. پایداری الکتروودها تا ۹۰ روز مورد بررسی قرار گرفت و بر اساس نتایج حاصله دارای کیفیت مناسب و بدون افت بوده است

### لایه نشانی الکتروُد مش استیل ضد رنگ با پودر گرافیت و بدون استفاده از چسباننده

بعد از اینکه مش‌ها موج داده شده و توسط اسیدسولفوریک ۱ مولار پیش آماده‌سازی شدند، مقدار ۰/۵ گرم پودر گرافیت را در ۱۰۰ میلی‌لیتر اتانول ۹۹/۶ درصد توسط همزن مغناطیسی

پلی وینیلیدین فلوراید (PVDF)، صمغ عربی، اکریلیک<sup>۱</sup>، کاراگینان و سلولز استفاده می‌شود [۱۴]. کوپلیمرهای اکریلیک به دلیل چسبندگی و پوشش عالی در رنگ‌ها استفاده می‌شوند، این چسب‌ها معمولاً در آب محلول بوده و بعد از خشک شدن در مقابل آب مقاوم می‌شوند، با این حال پوشش‌های کربنی بدون استفاده از چسب با توجه به ایجاد الکتروُد زیست‌سازگار و افزایش فعالیت بیوالکتروشیمیایی میکروبی در سطح آند، به طور گسترده مورد توجه قرار گرفته‌اند. پوشش‌های پلیمری معمولاً منجر به ایجاد مقاومت بالا در سطح الکتروُد شده و ضمن ایجاد جریان ناپایدار، خواص رسانایی مواد کربنی را کاهش می‌دهد [۱۵].

### راه‌اندازی ساختار SMFC و ساخت الکتروُد مش استیل ضد رنگ

به منظور بررسی تأثیر الکتروودهای مش استیل ضد رنگ بر عملکرد SMFC از ساختارهای پیل به حجم ۱ لیتر و از جنس لوله پلیکا استفاده شد، وزن رسوب استفاده شده در محفظه آند ۶۰۰ گرم می‌باشد، فاصله آند از سطح رسوب ۴ سانتی‌متر و از سطح الکتروُد کاتد ۵ سانتی‌متر در نظر گرفته شده و از کل حجم پیل ۶۰۰ میلی‌لیتر آن با رسوب و بقیه آن با آب محل جمع‌آوری رسوب پر شد. تمامی پیل‌ها در یک روز عملیاتی شده و بعد از راه‌اندازی به مدت ۱ روز به مقاومت ۱ کیلو اهم متصل بودند سپس بعد از گذشت ۱۴ روز ولتاژ پایدار شده و تست‌های پلاریزاسیون و امپدانس آن گرفته شد

ساخت الکتروودهای مش استیل طی دو مرحله صورت می‌گیرد، مرحله اول آماده‌سازی و موج دادن به مش استیل ۵۰ نوع ۳۰۴ با ضخامت ۰/۱۵ میلی‌متر بوده که از انعطاف‌پذیری بالایی برخوردار است. ورقه مش در ابعاد ۱۸×۲۳ سانتی‌متر بریده شده و قسمتی از مش به ابعاد ۷×۳ سانتی‌متر به صورت سینوسی موجی به ارتفاع ۰/۵ سانتی‌متر داده می‌شود، بقیه مش به صورت یک نوار باریک به عرض و طول ۱ و ۱۱ سانتی‌متر بریده شده و جهت اتصال به دستگاه‌های اندازه‌گیری از پیل خارج می‌شود، البته این بخش از مش قبل از به کارگیری در پیل جهت جلوگیری از اتصال کوتاه و اختلال در ولتاژ اندازه‌گیری شده، با وارنیش حرارتی و بخش پایینی محل اتصال با چسب پایه اپوکسی پوشش داده می‌شود، در نهایت مش استیل شکل داده شده به عنوان بستری برای لایه نشانی رنگ گرافیت دارای طول و عرض ۳ سانتی‌متر و مساحت کلی ۴۲ سانتی‌متر مربع آماده می‌شود. مرحله بعد برای حذف ناخالصی‌ها و ایجاد یک سطح خشن روی سطح مش استیل جهت بهبود تشکیل بیوفیلم میکروبی، ساختار مش به مدت ۲۴ ساعت در اسیدسولفوریک ۱ مولار قرار می‌گیرد در مراحل بعدی با آب مقطر شسته شده و در دمای محیط خشک شدند.

(۱) Carrageenan

طبق روابط می‌دانیم که جریان تولید شده به وسیله SMFC با استفاده از رابطه ۱ محاسبه می‌گردد:

$$I = ESMFC / R_{ext} \quad (۱)$$

ESMFC پتانسیل و  $R_{ext}$  مقاومت خارجی اعمال شده بر روی پیل می‌باشد از طرفی می‌دانیم که  $P = I \cdot R_{ext}$ ، در نتیجه می‌توان مقدار توان پیل را از رابطه ۲ محاسبه کرد:

$$P = ESMFC^2 / R_{ext} \quad (۲)$$

بر مبنای معادله ۳ نیز داریم:

$$P = I^2 \cdot R_{ext} \quad (۳)$$

### طیف‌سنجی امپدانس الکتروشیمیایی (EIS)

یکی از موضوعات کلیدی در مطالعات این نوع از پیل‌ها بررسی، درک و غلبه بر عوامل زیستی و یا غیرزنده‌ای است که باعث کاهش توان خروجی می‌شود و می‌توان آن را با مقاومت داخلی ( $R_{int}$ ) SMFC نشان داد.  $R_{int}$  از دو جز تشکیل شده است: مقاومت فعال‌سازی (انتقال بار) و مقاومت اهمی ( $R_s$ )، مقاومت محلول نیز نامیده می‌شود که نشان‌دهنده مقاومت در برابر محلول، مواد الکتروود و غشا است) که این مؤلفه را می‌توان توسط شیب منحنی پلاریزاسیون و یا طیف‌سنجی امپدانس به دست آورد. [۱۶]

جهت بررسی مقدار بهینه چگالی مواد لایه نشانی شده روی سطح مش استیل آزمون امپدانس توسط دستگاه پتانسیو استات (ivium, Netherland) مدل VERTEX در محلول بافر فسفات  $0.05$  مولار، در ولتاژ اولیه صفر و بازه فرکانسی  $100000$  تا  $0.1$  هرترز انجام شد. سیستم سه الکتروودی مورد استفاده در این آزمون شامل الکتروود مش استیل ضدزنگ به‌عنوان الکتروود کار، الکتروود گرافیت به‌عنوان الکتروود کمکی و الکتروود  $Ag/AgCl$  به‌عنوان الکتروود مرجع می‌باشد. در سایر آزمایشات، سیستم سه الکتروودی برای آزمون امپدانس به‌صورت (آند/کاتد) به‌عنوان الکتروود کار، (کاتد/آند) به‌عنوان الکتروود کمکی و الکتروود  $Ag/AgCl$  به‌عنوان الکتروود مرجع می‌باشد.

### نتیجه‌ها و بحث

**بررسی منحنی پلاریزاسیون و دانسیته توان الکترودهای مش استیل لایه نشانی شده با مواد مختلف کربن پایه در حضور اتصال‌دهنده اگریلیک**  
در شکل ۲ نمودارهای قطبش و قله توان پیل‌های سوختی مورد مطالعه نشان داده شده است که به ترتیب تغییرات ولتاژ و چگالی توان بر حسب چگالی جریان را نشان می‌دهد.

به مدت ۲۰ دقیقه در بشر مخلوط کرده سپس محلول حاصل شده را به مدت ۱۵ دقیقه در دمای ۲۵ درجه سلسیوس در حمام فراصوت مدل DSA100-SK2 قرار گرفت، مش‌ها استیل ۵ مرتبه و هر بار ۳۰ ثانیه در این محلول غرق شده، و بعد از هر بار خارج شدن در دمای اتاق به طور کامل خشک شدند، مقدار چگالی مواد لایه نشانی شده روی سطح مش استیل  $1 \pm 0.3$  میلی‌گرم بر سانتی‌متر مربع بوده است [۱۶]

### روش‌های اندازه‌گیری

#### اندازه‌گیری ولتاژ در حالت مدار باز (OCV)

برای یک پیل سوختی هدف اصلی رسیدن به حداکثر توان به‌ازای کمترین مقاومت درونی است. تحت شرایطی که مقاومت بی‌نهایت و مقدار جریان عبوری صفر باشد بیشترین ولتاژ ممکن حاصل می‌شود که به آن ولتاژ مدار باز می‌گویند. ولتاژ حاصل شده از پیل در حالت مدار باز و مدار بسته (تحت مقاومت خارجی  $R_{ext}$ ) با استفاده از دستگاه تست بار مقاومتی MFC ساخت شرکت دانش‌گستر همگام با صنعت طبرستان اندازه‌گیری شد.

#### رسم منحنی پلاریزاسیون

زمانی که مقاومت مدار را کاهش می‌دهیم مقدار جریان عبوری افزایش یافته و ولتاژ بین آند و کاتد کاهش می‌یابد، بنابراین با تغییر مقاومت خارجی، ولتاژ و جریان عکس یکدیگر عمل می‌کنند. به‌طور کلی در یک پیل به دنبال شرایطی هستیم که در آن با ولتاژ و جریان، حداکثر توان تولید گردد بنابراین از منحنی پلاریزاسیون<sup>۱</sup> استفاده می‌کنیم برای رسم این منحنی (نمودار توان بر حسب جریان و ولتاژ بر حسب جریان) از دو روش گالوانو استاتیک و ولتامتری روبشی خطی یا LSV استفاده شد. در روش گالوانو استاتیک با استفاده از دستگاه تست بار مقاومتی MFC مدل DGHS-ELR2510 منحنی‌ها در گام‌های متغیر زمانی ۲ ثانیه و جریانی ۲ میکرو آمپر رسم شدند، LSV روشی دیگر برای رسم منحنی پلاریزاسیون است که در آن، پتانسیل الکتروود کاری (آند با کاتد) در یک مقدار معین روبش (بر حسب ولت بر ثانیه) در یک جهت معین تغییر می‌کند و به‌صورت تغییرات جریان بر حسب پتانسیل رسم می‌شود. در روش LSV از دستگاه پتانسیو استات<sup>۲</sup> (ivium, Netherland) مدل VERTEX موجود در مرکز تحقیقات سوخت‌های زیستی و یک مجموعه دو الکتروودی شامل: الکتروود کاتد به‌عنوان الکتروود کار<sup>۳</sup> و الکتروود آند به‌عنوان الکتروود مرجع<sup>۴</sup> و کمکی<sup>۵</sup> استفاده شد این آزمون در محدوده ولتاژ مدار باز تا ولتاژ صفر با سرعت پویش  $0.2$  میلی‌ولت بر ثانیه صورت گرفت.

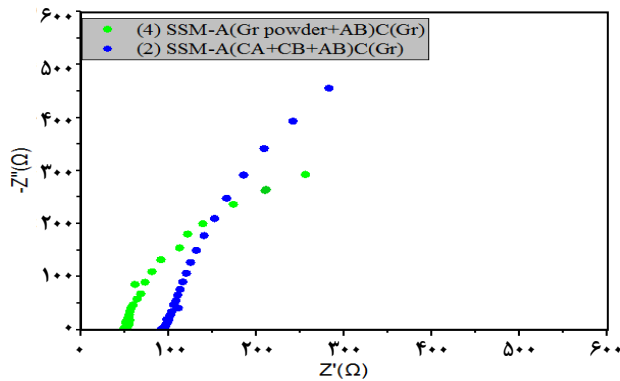
(۱) Polarization curve

(۳) Work electrode

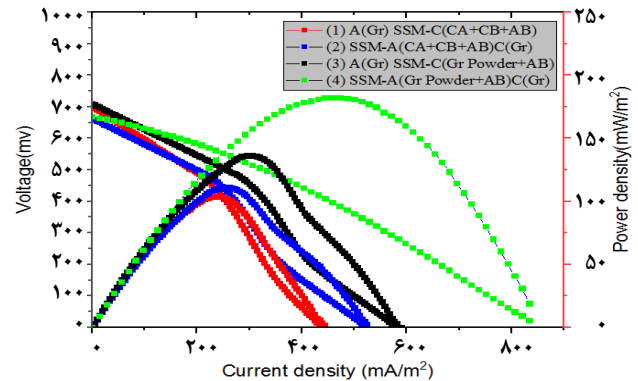
(۵) Counter electrode

(۲) Potentiostat

(۴) Reference electrode



شکل ۳ - منحنی امپدانس الکتروشیمیایی الکترودهنده‌های آند برای SMFC(۲،۴) (A: الکتروود آند، C: الکتروود کاتد، CA: کربن فعال، CB: کربن سیاه، Gr: صفحه گرافیت، AB: بایندر اکریلیک و SSM: مش استیل ضدزنگ



شکل ۲ - منحنی پلاریزاسیون و دانسیته توان برای الکترودهنده‌های با اتصال دهنده پلیمری. (A: الکتروود آند، C: الکتروود کاتد، CA: پودر کربن فعال، CB: پودر کربن سیاه، Gr: صفحه گرافیت

### بررسی تأثیر حضور یا عدم حضور اتصال‌دهنده اکریلیک در ساختار مواد لایه نشانی شده روی الکترودهنده‌های آند و کاتد مش استیل بر میزان دانسیته توان و مقاومت ایجاد شده در SMFC

شکل ۴- الف میزان دانسیته توان و جریان را برای الکترودهنده‌های مش استیلی که در ساختار مواد لایه نشانی از بایندر اکریلیک استفاده نشده را نشان می‌دهد. این نوع از الکترودهنده‌ها به‌عنوان آند و کاتد در کنار الکتروود گرافیت در SMFC مورد بررسی قرار گرفتند.

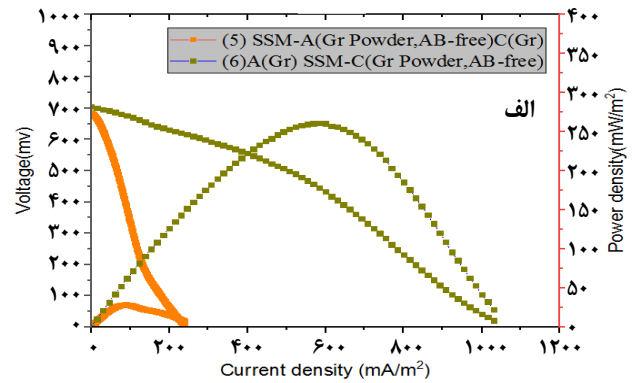
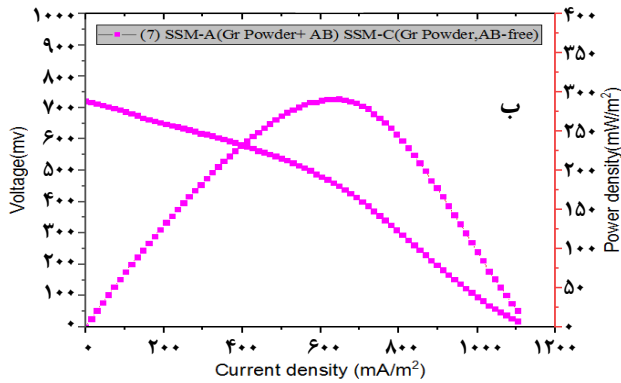
طبق منحنی قطبش در شکل ۴- الف بالاترین چگالی توان مربوط به SMFC(۶) با ۲۶۰ میلی‌وات بر مترمربع می‌باشد، با مقایسه منحنی پلاریزاسیون برای SMFC(۳) از شکل ۳ و SMFC(۶) از شکل ۴- الف با آند یکسان از جنس صفحه گرافیت و کاتد متفاوت از جنس مش استیل لایه نشانی شده با پودر گرافیت به ترتیب در حضور و عدم حضور اتصال‌دهنده اکریلیک، تأثیر مثبت عدم استفاده از اتصال‌دهنده پلیمری در ساختار مواد لایه نشانی شده روی مش استیل در میزان توان تولیدی مشاهده می‌شود، به‌گونه‌ای که در SMFC(۶) شاهد افزایش ۹۱٪ توان نسبت به SMFC(۳) هستیم، این موضوع بیانگر تأثیر منفی این نوع اتصال‌دهنده‌ها در رسانایی مواد کربنی و به دنبال آن افزایش مقاومت در پیل و کاهش سرعت واکنش کاهش اکسیژن (ORR) است.

در شکل ۵ افزایش مقاومت اهمی طبق منحنی امپدانس برای SMFC(۳) نسبت به SMFC(۶)، کاملاً مشهود می‌باشد. طبق این نمودار مقدار مقاومت اهمی در SMFC(۳) ۴۰ اهم نسبت به SMFC(۶) افزایش پیدا کرده است، این موضوع نشان‌دهنده تأثیر منفی اتصال‌دهنده‌های پلیمری در رسانایی مواد کربنی و به دنبال آن افزایش پارامترهای مقاومتی در الکتروود می‌باشد. طبق این نمودار مشخص است که تأثیر مثبت عدم حضور اتصال‌دهنده در ساختار الکتروود کاتد می‌تواند سبب افزایش سرعت واکنش کاهش اکسیژن در سطح الکتروود و کاهش مقدار مقاومت اهمی در پیل شود.

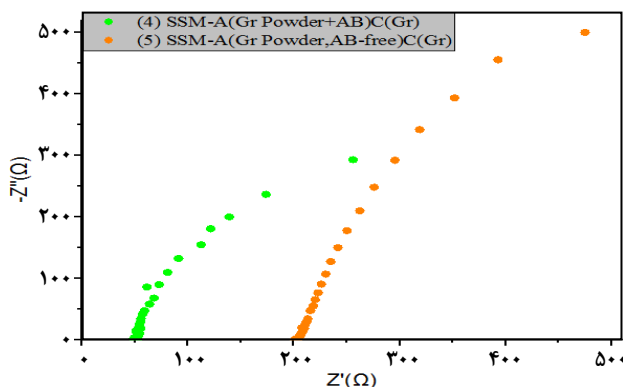
طبق منحنی قله توان بیشترین چگالی توان مربوط به SMFC(۴) با چگالی توان ۱۸۲ میلی‌وات بر مترمربع می‌باشد، با مقایسه SMFC(۳،۴) و SMFC(۱،۲) مشخص می‌شود که زمانی که جنس الکتروود آند از صفحه گرافیت به مش استیل لایه نشانی شده تغییر می‌یابد، شاهد افزایش مقدار چگالی توان به ترتیب به مقدار ۷٪ و ۳۴٪ در پیل‌های ۲ و ۴ هستیم، مقدار شیب در نواحی دوم و سوم از منحنی قطبش برای SMFC(۴) نسبت به SMFC(۳) کم بوده که این مورد در SMFC(۲) نسبت به SMFC(۱) نیز به ترتیب مشاهده می‌شود، این بدان معنی است که تلفات ولتاژ که ناشی از متابولیسم باکتریایی است و مقدار مقاومت اهمی در SMFC(۲،۴) نسبت به SMFC(۱،۳) کمتر بوده، هم چنین افزایش سطح مؤثر و تخلخل بالا در الکترودهنده‌های لایه نشانی شده مش استیل نسبت به صفحه گرافیت می‌تواند منجر به ایجاد بایو فیلم مناسب و غنی بر روی سطح الکتروود آند شود و به دنبال آن افزایش سرعت در انتقال الکترون، کاهش تلفات ولتاژ و افزایش چگالی توان را داشته باشد [۱۷]

### بررسی تأثیر استفاده از مواد کربنی مختلف در لایه نشانی مش استیل بر میزان مقاومت ایجاد شده در SMFC

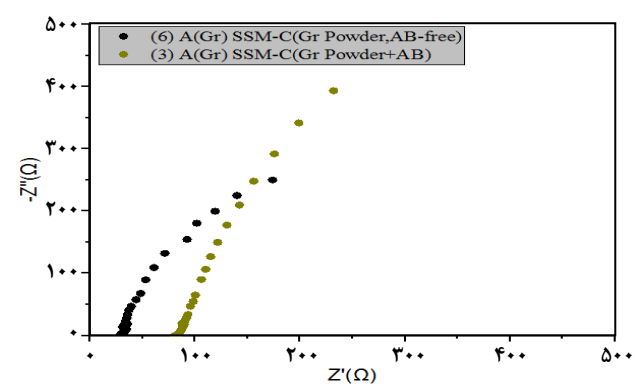
با مقایسه SMFC(۲،۴) مشاهده می‌شود که با تعویض نوع ماده کربنی پوشش داده شده روی مش استیل از پودر کربن سیاه و کربن فعال به پودر گرافیت، شاهد افزایش ۶۴٪ در مقدار چگالی توان هستیم، این جایگزینی سبب افزایش پتانسیل الکتروود آند و کاهش مقاومت در SMFC(۴) نسبت به SMFC(۲) شده است. این موضوع را می‌توان از نمودار امپدانس رسم شده الکترودهنده‌های آند در شکل ۳ برای SMFC(۲،۴) استدلال کرد. طبق شکل ۳ مقدار مقاومت اهمی و همچنین قطر کمان شبه نیم‌دایره برای SMFC(۴) بسیار کمتر از SMFC(۲) می‌باشد، این نتایج نشان می‌دهد که کم بودن پارامترهای مقاومتی در مش استیل با پوشش رنگ گرافیت و اتصال‌دهنده پلیمری باعث انتقال مناسب و سریع الکترون از بایو فیلم به سطح آند و از آند به مدار خارجی شده که به دنبال آن باعث افزایش در چگالی توان شده است.



شکل ۴ - الف) منحنی پلاریزاسیون و دانسیته توان برای الکترودهای مش استیل بدون استفاده از اتصال‌دهنده پلیمری در ساختار مواد لایه نشانی شده. ب) منحنی پلاریزاسیون در حالت ایجاد توان بهینه با به کارگیری مناسب‌ترین الکترودها در محفظه آند و کاتد. A: الکترودهای آند، C: الکترودهای کاتد، Gr: صفحه گرافیت، SSM: مش استیل ضدزنگ و AB: بایندر اکریلیک



شکل ۶ - منحنی امپدانس الکتروشیمیایی الکترودهای آند در SMFC(۴,۵). A: الکترودهای آند، C: الکترودهای کاتد، Gr: صفحه گرافیت، SSM: مش استیل ضدزنگ و AB: بایندر اکریلیک



شکل ۵ - منحنی امپدانس الکتروشیمیایی الکترودهای کاتد در SMFC(۳,۶). A: الکترودهای آند، C: الکترودهای کاتد، Gr: صفحه گرافیت، SSM: مش استیل ضدزنگ و AB: بایندر اکریلیک

دانسیته توان را کاهش می‌دهد. تأثیر از بین رفتن مواد پوشش داده شده روی سطح الکترودها و در نتیجه آن افزایش پارامترهای مقاومتی به طور مشهود از مقایسه نمودار امپدانس SMFC(۴,۵) در شکل ۶ مشخص است.

طبق شکل ۶ با از بین رفتن مواد کربنی روی سطح الکترودها، در SMFC(۵)، سبب افزایش چشمگیر قطر کمان نیم‌دایره و افزایش مقاومت داخلی نسبت به SMFC(۴) شده است، همچنین افزایش قطر کمان می‌تواند سبب افزایش مقاومت انتقال بار شده و ضمن کاهش سرعت فرایند الکتروشیمیایی، نمودار را به سمت فرکانس‌های پایین جابه‌جا می‌کند که نتیجه آن افزایش بخش حقیقی نمودار امپدانس یا ( $Z'$ ) می‌باشد. طبق نتایج حاصل شده از منحنی پلاریزاسیون و امپدانس مشخص شد که استفاده از مش استیل لایه نشانی شده با پودر گرافیت و اتصال‌دهنده پلیمری، به‌عنوان الکترودهای آند در SMFC(۴) و استفاده از مش استیل لایه نشانی شده با کربن سیاه و بدون اتصال‌دهنده به‌عنوان الکترودهای کاتد در SMFC(۶) مناسب‌ترین توان و کم‌ترین مقدار مقاومت را نسبت به دیگر حالت‌ها ایجاد کرد، در نتیجه طبق شکل ۴-ب استفاده از این دو الکترودها در یک پیل به‌عنوان آند و کاتد

در سال ۲۰۱۴ نیز کارا و همکاران در پژوهشی تأثیر مقدار درصد وزنی اتصال‌دهنده PTFE را در ساختار پودر کربن فعال لایه نشانی شده بر روی سطح مش استیل ضدزنگ بر توان تولیدی از یک SMFC مورد بررسی قرار دادند، طبق نتایج مشخص شد که هنگام استفاده از بایندر به مقدار ۶۰٪ وزنی مقدار دانسیته توان ۰/۱۷۵ میلی‌وات بر مترمربع در بیشینه ولتاژ ۱۷۰ میلی‌ولت حاصل می‌شود، درحالی‌که این مقدار برای ۲۰٪ وزنی از بایندر پلیمری ۰/۰۴۵ میلی‌وات بر مترمربع در بیشینه ولتاژ ۳۰۰ میلی‌ولت می‌باشد [۱۷]

با مقایسه منحنی پلاریزاسیون و توان در SMFC(۵) از شکل ۴-الف و SMFC(۴) از شکل ۶ متوجه می‌شویم که در پیل ۵ باتوجه به این که از مش استیل، بدون اتصال‌دهنده به‌عنوان آند استفاده شده ولی توان آن نسبت به پیل ۴ و حتی سایر پیل‌ها بسیار پایین‌تر می‌باشد، در واقع این کمترین مقدار چگالی توان و جریان حاصل شده در این بخش از کار است که علت آن را می‌توان از بین رفتن کربن سیاه بر روی سطح مش در اثر فشار رسوب باتوجه به عدم استفاده از اتصال‌دهنده در مواد لایه نشانی شده دانست، این امر می‌تواند منجر به کاهش تشکیل بایوفیلم بر روی سطح آند شده و مقدار

جدول ۱ - تلاش‌های انجام‌شده در جهت بهبود عملکرد پیل سوختی میکروبی رسوبی و کاربردی کردن آن

مرجع	توضیحات	کاتد	آند	بیشینه چگالی توان/جریان تولیدی	بیشینه ولتاژ	محل جمع‌آوری نمونه
[۱۸]	بررسی اثر دما بر توان تولیدی	نمد گرافیتی	نمد گرافیتی	$52 \text{ mA m}^{-2}$	$480 \text{ mV}$	نهر گونگی شهر چونچئون کشور کره
[۱۹]	بررسی اثر غلظت اکسیژن در قسمت کاتد بر توان تولیدی	نمد گرافیتی	نمد گرافیتی	$26 \text{ mA m}^{-2}$	$480 \text{ mV}$	نهر گونگی شهر چونچئون کشور کره
[۲۰]	بررسی اثر اندازه‌ی بار خارجی بر توان تولیدی	نمد گرافیتی	نمد گرافیتی	$2/4 \text{ mW m}^{-2}$	$480 \text{ mV}$	نهر گونگی شهر چونچئون کشور کره
[۲۰]	بررسی اثر فاصله‌ی بین الکترودها بر توان تولیدی	نمد گرافیتی	نمد گرافیتی	$1 \text{ mW m}^{-2}$	$480 \text{ mV}$	نهر گونگی شهر چونچئون کشور کره
[۲۰]	بررسی اثر اختلاط بر توان تولیدی	نمد گرافیتی	نمد گرافیتی	$9 \text{ mW m}^{-2}$	$750 \text{ mV}$	دریای مایودو دونگ شهر یئوسو کشور کره
[۱۹]	بررسی اثر افزایش ذرات گرافیت به رسوب بر توان تولیدی	گرافیت صفحه‌ای	گرافیت صفحه‌ای	$33/20 \text{ mW m}^{-2}$	$578 \text{ mV}$	رسوب دریاچه که پساب ساختگی به آن اضافه شد
[۲۱]	بررسی اثر افزایش رسانایی کاتولیت بر توان تولیدی	کربن پارچه‌ای یک سوپه	کربن پارچه‌ای یک سوپه	$73 \text{ mW m}^{-2}$	$\sim 720 \text{ mV}$	تالاب ال رودو
[۲۱]	بررسی توان تولیدی با سوپستراهای مختلف (کیتین ۸۰ و ۲۰ و سلولز)، بهترین نتیجه با کیتین ۸۰ به‌دست آمد	کربن کاغذی	کربن پارچه‌ای	$84 \text{ mW m}^{-2}$	$620 \text{ mV}$	-
[۲۳]	برق‌رسانی به حسگر بی‌سیم دما با چیش افقی الکترودها	برس کربن	برس کربن	$2/15 \text{ mW}$	$870 \text{ mV}$	دریاچه‌ی میشیگان آمریکا
[۲۴]	بررسی اثر عمق آند در توان تولیدی	نمد گرافیتی	گرافیت صفحه‌ای	$33/2 \text{ mW m}^{-2}$	$\sim 900 \text{ mV}$	دریاچه‌ی جانگ سنونگ شهر گوانجو کشور کره
مطالعه حاضر	ساخت الکترود جدید و بهینه‌سازی	گرافیت لایه‌نشانی	گرافیت لایه‌نشانی	$291 \text{ mW m}^{-2}$	$\sim 850 \text{ mV}$	رسوبات بابلرود

و الکترود کاتد از مش استیل با پوشش کربن سیاه ارتباط داشت. ویژگی‌های مناسب الکترودها شامل تخلخل بالا، عدم خوردگی و سطح ویژه وسیع، به علاوه قابلیت ساخت و مقیاس‌پذیری آسان، از جمله عواملی هستند که به بهینه‌سازی کارایی این پیل‌ها کمک می‌کنند. همچنین، استفاده از اتصال‌دهنده در باتری‌ها تأثیر مهمی بر ظرفیت و عملکرد آنها دارد. با توجه به نتایج به‌دست‌آمده، می‌توان نتیجه گرفت که انتخاب مواد و طراحی مناسب الکترودها نه تنها توان و جریان تولیدی را به حداکثر می‌رساند، بلکه می‌تواند به‌طور همزمان به حذف مواد آلی و غیرآلی موجود در رسوبات کمک کند. این یافته‌ها در پیشبرد تحقیقات بیشتر در زمینه پیل‌های سوختی میکروبی و توسعه سیستم‌های پایدار انرژی مورد استفاده قرار خواهند گرفت.

### قدردانی

نویسندگان این مقاله از دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل به جهت حمایت‌های مادی و معنوی برای انجام این پروژه تقدیر و تشکر می‌نمایند. این پروژه با حمایت مالی مرکز مطالعات و همکاری‌های علمی بین‌المللی وزارت علوم تحقیقات و فناوری انجام شده است.

سبب ایجاد چگالی توان و جریان مناسب به ترتیب به مقدار ۲۹۱ میلی‌وات بر مترمربع و ۱۱۰۲ میلی‌آمپر بر مترمربع شد. همچنین جدول ۱ با هدف مقایسه‌ی کار حاضر با پژوهش‌های پیشین در زمینه‌ی پیل‌های سوختی میکروبی رسوبی تهیه شده است تا نقاط قوت، رویکردها و شکاف‌های موجود در مطالعات مختلف به‌طور روشن گردآوری و تحلیل شود و به‌عنوان مرجع ساختاربندی شده‌ای برای پژوهش‌های آینده عمل کند.

### نتیجه‌گیری

در این پژوهش، ما به بررسی تأثیرات پوشش الکترودها بر عملکرد پیل سوختی میکروبی رسوبی پرداختیم و نشان دادیم که بهینه‌سازی الکترودها با استفاده از مواد کربن پایه می‌تواند کارایی این سیستم‌ها را به شکل قابل توجهی افزایش دهد. نتایج حاصل از انحناهای پلاریزاسیون و امیدانس به وضوح نشان‌دهنده‌ی افزایش توان تولیدی به مقدار ۲۹۱ میلی‌وات بر مترمربع و جریان به میزان ۱۱۰۲ میلی‌آمپر بر مترمربع با استفاده از الکترودهای مش استیل لایه‌نشانی شده بودند. این افزایش به‌طور ویژه به ترکیب الکترود آند از مش استیل با پوشش پودر گرافیت

## مراجع

- [1] Zabihollahpoor A., Rahimnejad M., [Sediment Microbial Fuel Cell \(SMFCs\)](#), *Biological Fuel Cells, Elsevier*, 439-461 (2023).
- [2] Ahmed R., Mir F., Banerjee S., [A Review on Energy Harvesting Approaches for Renewable Energies from Ambient Vibrations and Acoustic Waves Using Piezoelectricity](#), *Smart Materials and Structures*, **26(8)**: (2017).
- [3] Domínguez-Garay A., Berná A., Ortiz-Bernad I., Esteve-Núñez A., [Silica Colloid Formation Enhances Performance of Sediment Microbial Fuel Cells in a Low Conductivity Soil](#), *Environmental science & technology*, **47(4)**: 2117-2122 (2013).
- [4] Donovan C., Dewan A., Peng H., Heo D., Beyenal H., [Power Management System for a 2.5 W Remote Sensor Powered by a Sediment Microbial Fuel Cell](#), *Journal of Power Sources*, **196(3)**: 1171-1177 (2011).
- [5] Xu C., Zhang J., Wang A., Liu W., Xu Y., Zhang G., Wang S., [Impact of Sediment Microbial Fuel Cells on the Distribution of Different Forms of Phosphorus in Lake Sediment and Water](#), *Environmental Technology*, 1-12 (2025).
- [6] Zhang Y., Min B., Huang L., Angelidaki I., [Generation of Electricity and Analysis of Microbial Communities in Wheat Straw Biomass-Powered Microbial Fuel Cells](#), *Applied and environmental microbiology*, **75(11)**: 3389-3395 (2009).
- [7] Li X., Qi J., Zhang J., Zhang Q., Lin Q., Li X., Yu J., [In Situ Restoration of River Sediment by Sediment Microbial Fuel Cells Enhanced with Ecological Floating Islands](#), *Journal of Soils and Sediments*, 1-18 (2025).
- [8] Dutta A., Barbora L., Stom D., Goswami P., [Improving Power Performance of Sediment Microbial Fuel Cell Through Water Lettuce \(\*Pistia Stratiotes\*\) Assisted Boosting of Cathodic Activity](#), *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **215**: 115565 (2025).
- [9] Abbas S.Z., Rafatullah M., Ismail N., Syakir M.I., [Removal of Metals \(Chromium and Copper\) and Power Generation Through Sediment Microbial Fuel Cell](#), *Int J Env Tech Sci*, **2**: 56-60 (2016).
- [10] Cai Y., Yang N., Ren Y., Li X., Shi Y., Zhu R., Wang X., [Effect of Graphite Fibers on the Performance of Sediment Microbial Fuel Cell](#), *Environmental Progress & Sustainable Energy*, **35(3)**: 876-881 (2016).
- [11] Xu J.-Y., Xu H., Yang X.-L., Singh R.P., Li T., Wu Y., Song H.-L., [Simultaneous Bioelectricity Generation and Pollutants Removal of Sediment Microbial Fuel Cell Combined with Submerged Macrophyte](#), *international journal of hydrogen energy*, **46(20)**: 11378-11388 (2021).
- [12] Tavakolian M., Taleghani H.G., Khorshidian M., [New Design of Benthic Microbial Fuel Cell for Bioelectricity Generation: Comparative Study](#), *International Journal of Hydrogen Energy*, **45(43)**: 23533-23542 (2020).
- [13] Yellappa M., Modestra J.A., Reddy Y.R., Mohan S.V., [Functionalized Conductive Activated Carbon-Polyaniline Composite Anode for Augmented Energy Recovery in Microbial Fuel Cells](#), *Bioresource Technology*, **320**: 124340 (2021).

- [14] Masoudi M., Rahimnejad M., Mashkour M., [Fabrication of Anode Electrode by a Novel Acrylic Based Graphite Paint on Stainless Steel Mesh and Investigating Biofilm Effect on Electrochemical Behavior of Anode in a Single Chamber Microbial Fuel Cell](#), *Electrochimica Acta*, **344**: 136168 (2020).
- [15] Bi Y., Pei J., Chen Z., Zhang L., Li R., Hu D., [Preparation and Characterization of Luminescent Road-Marking Paint](#), *International Journal of Pavement Research and Technology*, **14**: 252-258 (2021).
- [16] Logan B.E., Hamelers B., Rozendal R., Schröder U., Keller J., Freguia S., Aelterman P., Verstraete W., Rabaey K., [Microbial Fuel Cells: Methodology and Technology](#), *Environmental science & technology*, **40(17)**: 5181-5192 (2006).
- [17] Karra U., Muto E., Umaz R., Kölln M., Santoro C., Wang L., Li B., [Performance Evaluation of Activated Carbon-Based Electrodes with Novel Power Management System for Long-Term Benthic Microbial Fuel Cells](#), *International Journal of Hydrogen Energy*, **39(36)**: 21847-21856 (2014).
- [18] Hong S., Chang I.S., Choi Y.S., Chung T.H., [Experimental Evaluation of Influential Factors for Electricity Harvesting from Sediment using Microbial Fuel Cell](#), *Bioresource Technology*, **100(12)**: 3029-3035 (2009).
- [19] Babu M.L., Mohan S.V., [Influence of Graphite Flake Addition to Sediment on Electrogenesis in a Sediment-Type Fuel Cell](#), *Bioresource technology*, **110**: 206-213 (2012).
- [20] An J., Lee S-J., Ng H.Y., Chang I.S., [Determination of Effects of Turbulence Flow in a Cathode Environment on Electricity Generation Using a Tidal Mud-Based Cylindrical-Type Sediment Microbial Fuel Cell](#), *Journal of Environmental Management*, **91(12)**: 2478-2482 (2010).
- [21] Fuentes-Albarrán C., Del Razo A., Juárez K., Alvarez-Gallegos A., [Influence of NaCl, Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> and O<sub>2</sub> on Power Generation from Microbial Fuel Cells with Non-Catalyzed Carbon Electrodes and Natural Inocula](#), *Solar Energy*, **86(4)**: 1099-1107 (2012).
- [22] Zhang F., Tian L., He Z., [Powering a Wireless Temperature Sensor Using Sediment Microbial Fuel Cells with Vertical Arrangement of Electrodes](#), *Journal of Power Sources*, **196(22)**: 9568-9573 (2011).
- [23] An J., Lee S-J., Ng H.Y., Chang I.S., [Comparison in Performance of Sediment Microbial Fuel Cells According to Depth of Embedded Anode](#), *Bioresource Technology*, **127**: 138-142 (2013).