

## بررسی عملکرد پیل سوختی میکروبی رسوبی در حضور کاتدهای بررسی از جنس فلزهای گوناگون

رسول علی پناهی، مصطفی رحیم نژاد<sup>+</sup>\*

دانشکده مهندسی شیمی، دانشگاه صنعتی نوشیروانی، بابل، ایران

**چکیده:** پیل‌های سوختی میکروبی (MFC) به‌عنوان یکی از منابع تجدید پذیر تأمین انرژی محسوب می‌شوند. در این بین پیل‌های سوختی میکروبی رسوبی (SMFC) جایگاه ویژه‌ای دارند، به‌ویژه در منطقه‌هایی که رسوب‌های غنی از مواد مغذی برای رشد میکروارگانیسم‌های الکترون‌زا دارند. یکی از راه‌های تولید انرژی تجدید پذیر و غیر مخرب با استفاده از انرژی نهفته در رسوب، پیل سوختی میکروبی رسوبی می‌باشد. در این پژوهش برس‌های فلزی رسانا که دارای سطح مؤثر بالایی می‌باشند به‌عنوان کاتد در پیل‌های سوختی میکروبی رسوبی مورد ارزیابی قرار گرفت. عملکرد SMFC ها در تولید توان الکتریکی برای چهار برس با جنس‌های آهن، فولاد ضدزنگ، برنج و مس در نقش کاتد این سامانه‌ها ارزیابی شد و همچنین مقاومت و طول عمر این الکترودها مورد مطالعه قرار گرفت. نتیجه‌های به‌دست آمده از آزمون خوردگی نشان می‌دهد که کم‌ترین و بیش‌ترین میزان خوردگی به ترتیب مربوط به فولاد ضدزنگ و آهن بود. نتیجه‌های آزمون‌های پلاریزاسیون و توان‌گیری از سامانه‌ها نیز نشان داد که بالاترین میزان دانسیته توان تولیدی از SMFC ها با استفاده از کاتد برس مسی برابر  $382 \mu W/cm^2$  و کم‌ترین مقدار نیز برای کاتد برس برنجی برابر  $19/24 \mu W/cm^2$  بود.

**واژه‌های کلیدی:** پیل سوختی میکروبی رسوبی، دانسیته توان، الکتروود فلزی، خوردگی

**KEYWORDS:** Sediment microbial fuel cell, Power density, Metal brush, Corrosion

### مقدمه

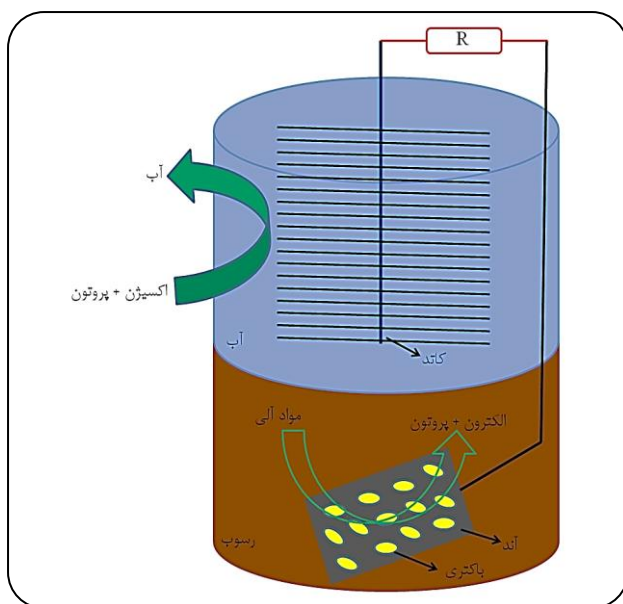
که می‌تواند از متابولیسم‌های میکروبی برای تخریب بازه گسترده‌ای از سوبستراهای آلی استفاده کند و با استفاده از انرژی از این فرایند، جریان الکتریکی تولید کند [۲]. این سامانه‌ها همچنین می‌توانند به‌عنوان یک منبع تجدید پذیر انرژی برای تأمین توان سامانه‌های کنترل از راه دور مانند: دما، pH و تجهیزهایی که توان الکتریکی کمی برای راه‌اندازی نیاز دارند مورد توجه واقع شوند [۳].

با توجه به پیشرفت‌های امروزه بشر نیاز به انرژی بسیار مورد توجه می‌باشد. به‌طور کلی انرژی به دودسته تجدید پذیر و تجدید ناپذیر تقسیم می‌شود. با افزایش آلودگی‌های ناشی از مصرف بی‌رویه سوخت‌های فسیلی از قبیل گازهای گلخانه‌ای نیاز به تولید و دست یافتن به منابع تجدید پذیر و سازگار با طبیعت بسیار دارای اهمیت است [۱]. پیل سوختی میکروبی (MFC) یک وسیله‌ی بیوالکتروشیمیایی است

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

\* عهده دار مکاتبات

(۱) Microbial Fuel Cell



شکل ۱- شمای پیل سوختی میکروبی رسوبی با کاتد برس فلزی

پایین و بازدهی مناسبی باشد، ایده آل است. در این مطالعه به بررسی اثر برس‌های فلزی به‌عنوان کاتد در SMFC ها برای جایگزینی برای برس کربنی پرداخته شد. با توجه به تأثیر سطح الکتروکاتد بر بازده ORR در این بخش می‌توان نتیجه گرفت که ساخت الکتروکاتد با سطح تماس بالا سبب بهبود کارایی این سامانه‌ها می‌شود. در این مطالعه به بررسی اثر برس‌های فلزی به‌عنوان کاتد در SMFC ها پرداخته شده است. رسانایی و میزان مقاومت این الکترودهای فلزی در برابر شرایط محیطی و خوردگی در طول آزمایش‌ها مورد ارزیابی قرار گرفته است. حضور این الکترودها در شرایط محیطی سامانه سبب شده است که کارایی آن‌ها در طول زمان با اکسید شدن در آب و تشکیل جرم بر روی سطح آن‌ها با مشکل مواجه شود.

## بخش تجربی

### مواد

#### ساخت پیل سوختی میکروبی رسوبی

رسوب‌های مورد استفاده در SMFC ها در عمق بین صفر تا ۱۵ سانتی متری از سطح رسوب‌های کف رودخانه بابلسر (دریای خزر، مازندران) در فاصله ۴۰۰ متری اتصال به دریا جمع‌آوری شد. به‌منظور ساخت SMFC ها از ظرف‌های پلاستیکی شفاف به حجم

پیل‌های سوختی میکروبی رسوبی<sup>۱</sup> (SMFC) نوع ویژه‌ای از SMFC ها می‌باشد که مواد آلی موجود در رسوب‌های آبی را برای تولید الکتریسیته مصرف می‌کند SMFC ها از دو بخش هوازی و بی‌هوازی تشکیل می‌شوند. عملکرد SMFC ها همانند MFC ها می‌باشد با این تفاوت که در ساختار آن‌ها الکتروکاتد در زیر رسوب بی‌هوازی دفن شده و الکتروکاتد در بخش بالای آن در داخل آب به‌صورت هوازی (به‌عنوان پذیرنده الکترون) قرار می‌گیرد و الکتریسیته تولید می‌نماید [۴]. همچنین MFC ها شامل یک غشای تبادل کاتیونی برای جداسازی آن‌د بی‌هوازی از کاتد هوازی می‌باشند که در SMFC ها ضروری نمی‌باشد [۵]. SMFC ها می‌توانند در منطقه‌های دورافتاده برای نمونه در دریاچه‌ها، رودخانه‌ها و اقیانوس‌ها برای تأمین توان حسگرها راه‌اندازی شوند [۶]. به دلیل طراحی و عملکرد یگانه، این سامانه‌ها می‌توانند به‌عنوان یک منبع توان برای تأمین انرژی تجهیزهای کف دریا در مدت‌زمان طولانی استفاده شوند [۷]، که این امر به‌واسطه دسترسی به مواد آلی غنی موجود در رسوب‌ها می‌باشد. رسوب‌ها نقش بسیار مهمی را در رودخانه، دریا و اقیانوس‌ها ایفا می‌کنند که نشانگر بار آلودگی در این منطقه‌ها و حضور مواد مغذی (آلی و غیر آلی) هستند که هم می‌توانند به‌عنوان یک منبع انرژی و یا آلودگی واقع شوند [۸] که سرشار از فسفات‌ها [۹]، فلزهای سنگین [۱۰] و... باشند.

در حقیقت با توجه به توان تولیدی پایین استخراجی از SMFC ها از نظر تجاری هنوز تمرکز چندانی بر روی آن‌ها به‌عنوان یک منبع مولد انرژی نشده و نیازمند بهبود می‌باشند [۱۱]. الکترودهای مورد استفاده در SMFC ها می‌تواند از مواد رسانا مانند گرافیت، کاغذ کربنی، نمک کربنی، پارچه کربنی، برس کربنی و ... ساخته شود. کارایی SMFC ها به عامل‌های گوناگونی مانند ناحیه بهره‌برداری رسوب، جنس و اندازه‌ی الکترودها، اندازه سامانه و... بستگی دارد. یکی از مهم‌ترین چالش‌ها در این پیل‌ها نرخ کم واکنش کاهش اکسیژن<sup>۲</sup> (ORR) بر روی سطح کاتد است. برای بهبود نرخ کم کاهش اکسیژن می‌توان از روش‌هایی مانند ساخت الکترودهای بزرگتر، جایگزین کردن کاتدهای چرخشی<sup>۳</sup> [۵] و یا کاتدهای زیستی<sup>۴</sup> [۱۲, ۱۳] و... استفاده نمود [۱۴].

یکی از الکترودهای مناسب و با بازدهی بالا برای استفاده در SMFC ها برس گران قیمت کربنی می‌باشد. با توجه به این موضوع پیدا کردن جایگزینی مناسب برای این الکتروکاتد که دارای هزینه

(۱) Sediment microbial fuel cell

(۲) Oxygen reduction rate

(۳) Rotating cathode

(۴) Biocathode

**آنالیز ولتامتری روبش خطی (LSV)**

عملکرد بخش کاتد با استفاده از آنالیز LSV با استفاده از دستگاه پتانسیوآستانات (SAMA500 ElectroAnalyzer System, Iran) انجام گرفته، این آزمون در خود SMFC اندازه‌گیری شده به این صورت که کاتد به‌عنوان الکتروود کار و آند نیز نقش هم الکتروود مرجع و هم کمکی را دارد. اندازه‌گیری میزان LSV در بازه پتانسیل از  $0.17V$  تا  $0.5V$  در نرخ  $0.17V/s$  بررسی گردیده است. نمودارهای به‌دست‌آمده از این آنالیز شامل دو بخش می‌باشد که یک بخش مربوط به واکنش اکسایش (منحنی‌های بالاتر از جریان صفر) و واکنش کاهش (منحنی‌های پایین‌تر از جریان صفر) است. در سامانه پیل سوختی میکروبی واکنش کاهش مدنظر می‌باشد زیرا واکنش کاهش اکسیژن (ORR) یک واکنش کاهش می‌باشد. پتانسیل آستانه بلند شدن<sup>۲</sup> نیز نشان می‌دهد که هرچه نمودار مربوطه سریع‌تر از جای خود بلند شود الکتروود فعالیت بالاتری داشته است. پتانسیل نیمه مسیر<sup>۳</sup> نشان می‌دهد که هرچه کمان نمودار به سمت پتانسیل مثبت باشد فعالیت کاتد بهتر بوده است.

**بررسی خوردگی**

برای سنجش میزان خوردگی فلزها از یک دستگاه پتانسیوآستانات/گالوانوآستانات مدل (IVIUM VERTEX TECHNOLOGY) ساخت کشور هلند متصل به یک سل الکتروشیمیایی استفاده شد. از الکتروود  $Ag/AgCl$  به‌عنوان الکتروود مرجع، از مش پلاتین به‌عنوان الکتروود کمکی و از صفحه‌های فلزی با جنس‌های آهن، فولاد ضدزنگ، برنج و مس و با اندازه‌های  $1 \times 1 \times 1 \text{ cm}^3$  به‌عنوان الکتروود کار بهره گرفته شد. آنالیزهای خوردگی در محلول سدیم کلراید  $2.5\%$  درصد وزنی انجام شدند. پیش از انجام هر آزمایش، سطح نمونه‌های فلزی با استفاده از سمباده‌های  $800$  و  $1000$  به‌طور کامل صیقل داده شد و سپس با استفاده از استون چربی زدایی شد. برای به دست آوردن پتانسیل مدارباز<sup>۴</sup>، در ابتدای هر آزمایش نمونه‌ی فلزی به مدت  $30$  دقیقه در محلول سدیم کلراید  $2.5\%$  درصد وزنی غوطه‌ور شد. سپس، منحنی‌های پلاریزاسیون پتانسیودینامیک با تغییر پتانسیل در محدوده‌ی  $250 \text{ mV} \pm$  نسبت به OCP و در سرعت روبش  $1 \text{ mV/s}$  رسم شدند.

**نتیجه‌ها و بحث****بررسی ولتاژ و محاسبه توان الکتریکی SMFC با برس‌های فلزی در نقش کاتد**

پیل سوختی میکروبی رسوبی یک منبع تولید انرژی تجدید پذیر با مصرف مواد آلی موجود در رسوب‌های آبی و تبدیل آن

سه لیتر و قطر  $12 \text{ cm}$  و ارتفاع  $30 \text{ cm}$  استفاده شد. شمای سامانه مورد استفاده در این پژوهش در شکل (۱) قابل دیدن است. در کل چهار SMFC راه‌اندازی شده که آند آن‌ها یکسان و برای کاتد از برس‌های فلزی با جنس‌های گوناگون استفاده شد. در هر سامانه  $1/2$  لیتر از حجم ظرف با رسوب پر شده و باقی‌مانده آن آب بود. برای هر چهار SMFC، در قطب آند از صفحه‌های گرافیتی (ENTEGRIS, INC. FCB-508305-00004, USA) با اندازه‌های  $5.5 \times 3 \times 0.3 \text{ cm}^3$  استفاده شده که در درون رسوب‌ها دفن می‌شوند. در ادامه به‌منظور ایجاد اختلاف پتانسیل و تولید جریان الکتریکی، خروجی هریک از این الکتروودها با استفاده از سیم به بیرون سامانه هدایت شده و سبب ایجاد اختلاف پتانسیل در بیرون از سامانه می‌شود. محل اتصال سیم و الکتروود نیز برای جلوگیری از خوردگی و ایجاد اختلال در عملکرد سامانه، با چسب دوقلوی شفاف کارخانه مهندسی غفاری پوشش داده شد. در قسمت کاتد از الکتروودهای برسی با ابعاد یکسان طول و قطر  $9 \text{ cm}$  از جنس آهن، فولاد ضدزنگ و برنج تهیه شده از شرکت برس‌های صنعتی ابزاران استفاده شد و برس مسی، به دلیل موجود نبودن با همان اندازه‌ها در آزمایشگاه ساخته شد. برای ساخت این برس، از مفتول مسی به قطر  $1 \text{ mm}$  برای پایه و از سیم رشته‌ای افشان به قطر  $3 \text{ mm}$  برای شاخه‌ها بهره گرفته شد. دلیل انتخاب این برس‌ها ارزان بودن، رسانایی خوب، سطح تماس بالا و دسترسی آسان می‌باشد.

**آزمایش‌ها****محاسبه توان تولیدی پیل**

برای اندازه‌گیری ولتاژ و توان به‌دست آمده از SMFC‌ها از دستگاه دیتالاگر مدل (DGHS-ELR2510) ساخت شرکت دانش گستر همگام با صنعت طبهرستان (بابل- ایران) استفاده شده که دارای دو خروجی آند و کاتد برای اتصال پیل سوختی می‌باشد. این دستگاه با اعمال مقاومت‌های گوناگون بر روی پیل سوختی و اندازه‌گیری ولتاژ در مقاومت‌های گوناگون عمل کرده، سپس با محاسبه‌ی جریان مصرف شده در بارهای مقاومتی این داده‌ها را به کامپیوتر منتقل می‌نماید و بر اساس معادله‌های (۱) و (۲) جریان و توان حاصله را محاسبه نمود.

$$I = \frac{V}{R} \quad (2)$$

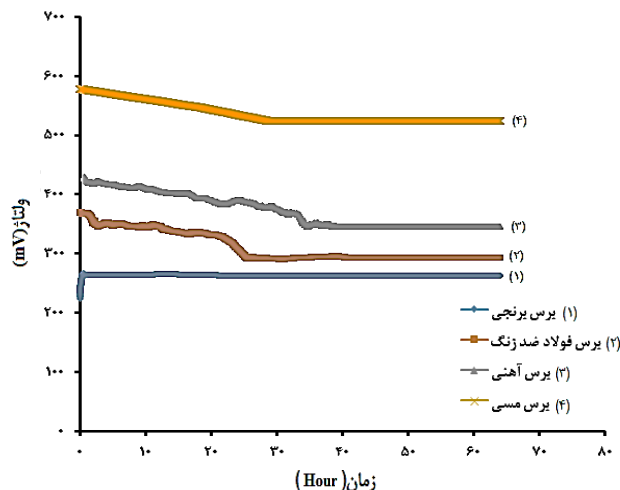
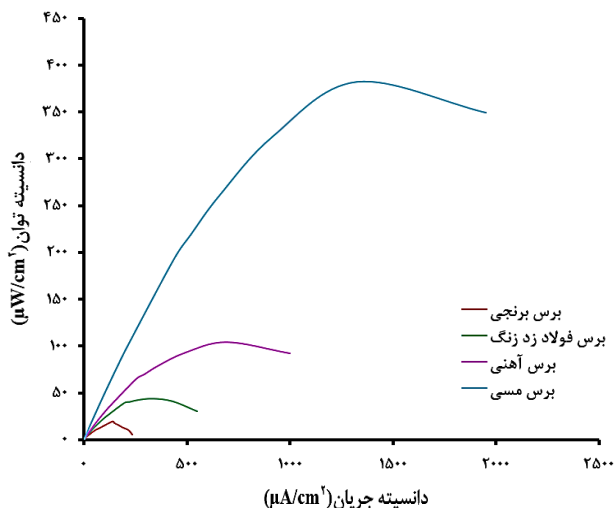
$$P = R \cdot I^2 \quad (3)$$

(۱) linear sweep voltammetry

(۳) Over potential

(۲) On set potential

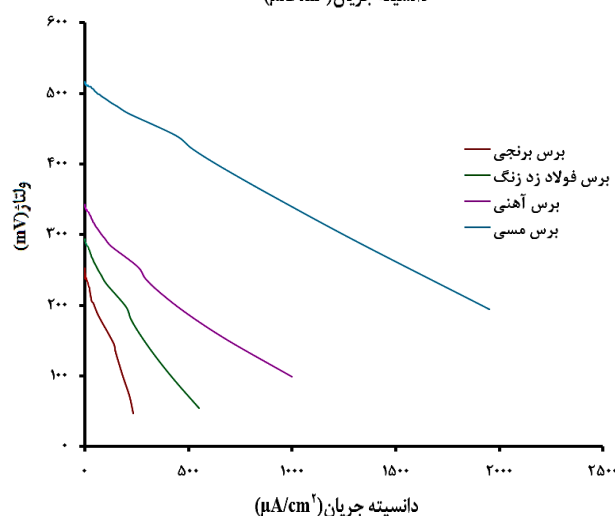
(۴) Open circuit potential (OCP)



شکل ۲- نمودارهای به دست آمده ولتاژ مدار باز در طول زمان برای SMFCها

به الکتریسیته است. بالاترین ولتاژ تولیدی در پیل‌های سوختی میکروبی ولتاژ مدار باز (OCV) است که با قطع مدار اندازه‌گیری می‌شود (مقاومت بی‌نهایت، جریان صفر). پس از راه‌اندازی پیل‌ها با الکترودهای برسی ولتاژ مدار باز آن‌ها با استفاده از دیتالاگر ثبت شد. مدت زمان لازم برای پایداری شدن ولتاژ برای همه‌ی سامانه‌ها در شکل (۲) نمایش داده شده است. با توجه به این شکل کم‌ترین و بیش‌ترین زمان پایداری ولتاژ مدار باز به ترتیب مربوط به پیل‌های با کاتد برس برنجی و آهنی می‌باشد.

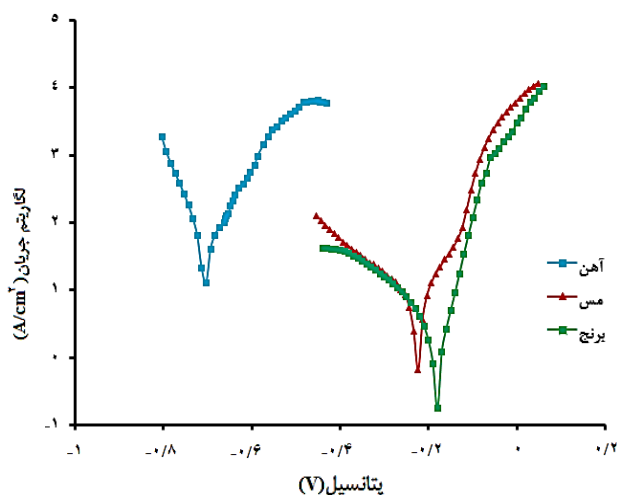
پس از ثابت شدن ولتاژ و رسیدن پیل‌ها به شرایط پایدار، دانسیته توان<sup>۲</sup> تولیدی از هر یک از سامانه‌ها اندازه‌گیری شد. با توجه به رسانایی و عملکرد متفاوت برس‌ها در نقش کاتد، ولتاژ و توان تولیدی به دست آمده از هر سامانه متفاوت بوده است و میزان کارایی برس‌ها را مشخص می‌کند. در شکل (۳) دو نمودار مربوط به تولید توان (الف) و پلاریزاسیون (ب) در زمان آنالیز توان قابل دیدن هستند. با توجه به نتیجه‌های به دست آمده از این شکل، بیش‌ترین توان تولیدی مربوط به کاتد برس مسی برابر  $(382 \mu W/cm^2)$  و کم‌ترین توان نیز با کاتد برس برنجی برابر  $(19/24 \mu W/cm^2)$  به دست آمد. توان‌های به دست آمده برای آهن و فولاد ضدزنگ به ترتیب برابر  $(103/97 \mu W/cm^2)$  و  $(43/57 \mu W/cm^2)$  محاسبه شد. رسانایی گوناگون این فلزها در انتقال الکتریسیته سبب شده که عملکرد آن‌ها در نقش کاتد متفاوت باشد. برس مسی به دلیل رسانایی بالاتر نسبت به برس‌های دیگر، به عنوان کاتد عملکرد بسیار خوبی از خود نشان داد و کارایی SMFC را در تولید توان بهبود بخشید.



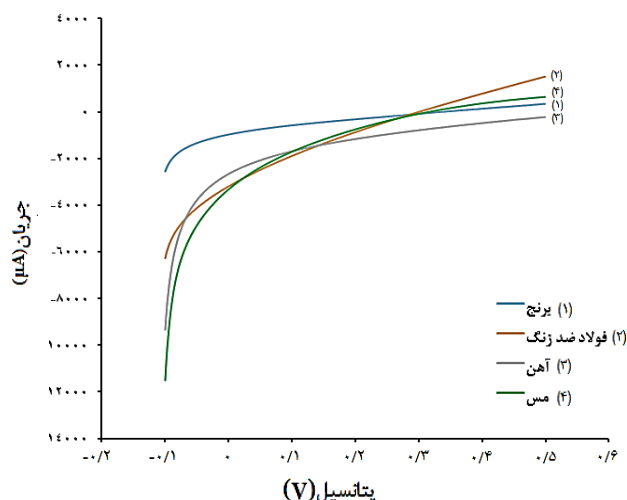
شکل ۳- الف) نمودار توان تولیدی برحسب جریان با استفاده از کاتدهای گوناگون با جنس‌های آهن، فولاد ضدزنگ، برنج و مس. ب) نمودار ولتاژ تولیدی برحسب جریان در هر یک از سامانه‌ها در زمان تولید توان.

در آغاز کار سامانه‌ها و پیش از کاهش راندمان در اثر خوردگی، فولاد ضدزنگ نیز به دلیل حضور آلیاژ گوناگون در ساختارشان رسانایی کم‌تری نسبت به آهن داشته که همین امر باعث شده توان کم‌تری را نسبت به برس آهنی تولید کند [۱۶، ۱۵]، برس برنجی نیز که آلیاژی از مس و روی می‌باشد با وجود دارا بودن مس توان خروجی مناسبی از خود نشان نداد. رسانایی نسبی برنج ۲۸ درصد رسانایی مس خالص است که این بسته به مقادیر مس و روی می‌تواند کم‌تر یا بیش‌تر شود. در این کار برس برنجی تجاری استفاده شد که مقدار ناخالصی آن به‌طور کامل مشخص نبود و نتیجه حاصله نشان داد که برنج گزینه مناسبی برای استفاده به عنوان الکترود نیست [۱۶].

(۱) Open circuit voltage



شکل ۵- نمودار پلاریزاسیون تافل برای فلزهای آهن، برنج و مس



شکل ۶- نمودارهای LSV به دست آمده برای الکترودها

جدول ۱- نتیجه‌های به دست آمده از نمودارهای پلاریزاسیون تافل شکل (۵)

خوردگی	آهن	برنج	مس
پتانسیل خوردگی (V)	-۰/۷۰۸۸	-۰/۲۰۰۵	-۰/۱۹۸۲
جریان خوردگی (A)	$5/352 \times 10^{-5}$	$6/201 \times 10^{-6}$	$5/744 \times 10^{-6}$
شدت جریان خوردگی ( $A/cm^2$ )	$2/058 \times 10^{-5}$	$2/692 \times 10^{-6}$	$2/497 \times 10^{-6}$
سرعت خوردگی ( $mm/y$ )	$0/01347$	$0/0008718$	$0/0008716$

## آنالیز LSV

آنالیز LSV با استفاده از دستگاه پتانسیواستات انجام گرفت، این آزمون در پیل سوختی میکروبی رسوبی انجام شد به این صورت که کاتد به عنوان الکتروکد کار و آند نیز نقش الکتروکد مرجع و کمکی را دارد. با توجه به نمودارهای به دست آمده از این آنالیز در شکل (۴) دیده می‌شود که با افزایش رسانایی الکتروکد کاتد شیب خطها تندتر شده که این تغییر به سبب بیشتر شدن فعالیت الکتروکاتالیزوری و افزایش واکنش کاهش اکسیژن روی الکتروکد کاتد می‌باشد و در نتیجه مقاومت درونی سامانه کاهش می‌یابد و توان تولیدی نیز بیشتر شد. با توجه به واکنش‌های اکسایش - کاهش به دست آمده از این الکتروکدها دیده می‌شود که بیشترین جریان کاهشی مربوط به الکتروکد مس ( $12 \mu A$ ) و کمترین جریان کاهشی مربوط به الکتروکد برنج ( $2/5 \mu A$ ) می‌باشد که نشانگر عملکرد بهتر الکتروکد مس در واکنش کاهش اکسیژن نسبت به سایر الکتروکدها است.

## بررسی میزان خوردگی با استفاده از آزمون پلاریزاسیون تافل

SMFCها قابلیت تولید توان به صورت طولانی مدت را دارند پس یکی از پارامترهای مهم برای الکترودهایی که در سامانه قرار می‌گیرند

مقاومت در برابر خوردگی و حفظ پایداری در تولید توان است. یکی از روش‌های شناخته شده در بررسی خوردگی آزمون پلاریزاسیون تافل است که در این پژوهش از آن استفاده شد. شکل ۴، منحنی‌های تافل الکترودهای کاتد متفاوت به کار رفته در این پژوهش را نمایش می‌دهد. نتیجه‌های استخراج شده از این منحنی‌ها نیز در جدول ۱ گردآوری شده است. همه آزمایش‌ها در محلول ساکن و دمای اتاق انجام شدند. برای اطمینان یافتن از تکرارپذیری نتیجه‌ها، هر آزمایش سه بار تکرار شد. با توجه به جدول ۱، مشخص است که سرعت خوردگی مس کم‌تر از دیگر فلزها برابر  $0/0008716 (mm/y)$  است و آهن بیشترین سرعت خوردگی را برابر  $0/01347 (mm/y)$  دارد. بیشترین شدت جریان خوردگی مربوط به آهن برابر  $5/352 \times 10^{-5} (A)$  و کمترین شدت جریان خوردگی برای مس برابر  $5/744 \times 10^{-6} (A)$  است.

در مطالعه‌های خوردگی انجام شده، فولاد ضدزنگ حتی در مدت زمان طولانی نیز خورده نشده و نموداری به دست نیامد. به طور کلی، اصطلاح فولاد ضدزنگ به فولادهایی با مقدار عناصر آلیاژی بالا گفته می‌شود که توانایی مقاومت به خوردگی در محیط‌های خورنده و دماهای بالا را داشته باشند. فولادهای ضدزنگ معمولی دارای

جدول ۲. داده‌های مربوط به چهار SMFC با برس های فلزی به‌عنوان کاتد

الکتروود	برس برنجی	برس فولاد زد زنگ	برس آهنی	برس مسی
بیشینه ولتاژ (mV)	۲۵۸/۶	۴۰۳/۷۵	۵۳۵	۷۴۴
بیشینه چگالی توان ( $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ )	۱۹/۲۴۲	۴۳/۵۷	۱۰۳/۹۷	۳۸۲
بیشینه چگالی جریان ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ )	۲۳۲/۸	۵۵۱/۰۸	۹۹۸/۱۳	۱۹۵۲/۹۷
توان تولیدی سامانه (بعد از گذشت ۴۵ روز)	۱/۳۴	۴۳/۲۳	۴۸/۰۷	۳۵۴/۷۲

به آهن داشت ولی این بازدهی با توجه به قابلیت بالا در برابر خوردگی در گذشت زمان پایدار می‌بود [۲۰].

### نتیجه‌گیری

هدف از این پژوهش بررسی برس های فلزی با جنس گوناگون در نقش کاتد برای پیل‌های سوختی میکروبی رسوبی<sup>۱</sup> می‌باشد. در نتیجه‌های به‌دست‌آمده از این پژوهش دیده می‌شود که برس ساخته‌شده از جنس مس با توجه به اینکه هم دارای رسانایی بالاتری بوده و همچنین مقاومت آن در مقابل خوردگی نسبت به برس آهن و برنج بالاتر می‌باشد، راندمان خوبی در تولید توان ( $382 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ ) داشته و با گذشت زمان نیز پایداری خود را در تولید الکتریسیته و خوردگی حفظ نموده است. از طرفی دیگر برس‌های آهنی، فولاد ضدزنگ و برنجی به ترتیب در تولید توان بهتر عمل کرده‌اند، با این حال با گذشت زمان به دلیل مشکلات خوردگی و رسانایی پایین عملکرد برس‌های آهنی و برنجی با مشکل روبرو شده و کارایی خود را تا حد زیادی از دست دادند. با استناد بر نتیجه‌های می‌توان گفت که برس مسی با توجه به قیمت پایین، مقاومت قابل قبول در برابر خوردگی، رسانایی بالا و همچنین بازدهی خوب در تولید دانسیته توان می‌تواند در قسمت کاتد پیل‌های سوختی جایگزینی مناسبی برای سایر مواد باشد.

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۳/۲۰ ؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۶/۵

حداقل ۱۱ درصد کروم هستند که عامل اصلی مقاومت به خوردگی آن‌هاست. با افزایش مقدار مشخصی کروم به آهن، سختی و مقاومت به خوردگی اسیدی آن به‌طور ملموسی افزایش می‌یابد به‌گونه‌ای که می‌تواند سال‌ها بدون زنگ‌زدگی در محیط خورنده باقی بماند. حضور کروم در ترکیب فولاد سبب کاهش هدایت الکتریکی ( $6/09 \times 10^{-7} \Omega\text{m}$ ) فولاد می‌شود [۱۹-۱۷].

### رفتار الکتروودها با گذشت زمان

با توجه به نتیجه‌های به‌دست آمده از آنالیز خوردگی دیده می‌شود که با خورده شدن الکتروودهای کاتد و تشکیل لایه‌های رسوب فلزی در سطح آن‌ها، عملکرد فلزها در نقش الکتروود دچار مشکل می‌شود. مطابق نتیجه‌های به‌دست آمده از آنالیز توان هر ۴ سامانه طی ۴۵ روز، به دلیل تخریب فلزها در اثر خوردگی و تجمع اکسید فلزها در سطح الکتروودها، با گذشت زمان سرعت انتقال الکترون و ORR در کاتد کاهش می‌یابد؛ تا جایی که توان تولیدی برس برنجی به تقریب به صفر نزدیک شد. جدول ۲، نتیجه‌های به‌دست آمده از آنالیز را نمایش می‌دهد. مطابق داده‌های این جدول، بیشینه مقدار توان با استفاده از برس مسی و کم‌ترین مقدار نیز با استفاده از برس برنجی به‌دست آمد که نشانگر رسانایی بالاتر مس در مقایسه با فلزهای دیگر می‌باشد. آهن به دلیل رسانایی بیش‌تر نسبت به فولاد ضدزنگ و برنج در آغاز کار بازدهی بهتری از خود نشان داد ولی با گذشت زمان و مقاومت کم آن در برابر خوردگی توان تولیدی از آن روند کاهشی داشت ولی فولاد ضدزنگ به دلیل حضور آلیاژهای گوناگون در ساختارش بازدهی کم‌تری نسبت

(۱) Sediment microbial fuel cell

## مراجع

- [1] Alipanahi R Rahimnejad M. Effect of Different Ecosystems on Generated Power in Sediment Microbial Fuel Cell. *International Journal of Energy Research*, (2018).
- [2] Domínguez-Garay A. Silica Colloid Formation Enhances Performance of Sediment Microbial Fuel Cells in a Low Conductivity Soil. *Environmental Science & Technology*, **47(4)**: 2117-2122 (2013).
- [3] Donovan C. 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).
- [4] Liu L. Performance of Freshwater Sediment Microbial Fuel Cells: Consistency. *International Journal of Hydrogen Energy*, **41(7)**: 4504-4508 (2016).
- [5] He Z, Shao H and Angenent LT. Increased Power Production from a Sediment Microbial Fuel Cell with a Rotating Cathode. *Biosensors and Bioelectronics*, **22(12)**: 3252-3255 (2017).
- [6] Donovan C. Batteryless, Wireless Sensor Powered by a Sediment Microbial Fuel Cell. *Environmental Science & Technology*, **42(22)**: 8591-8596 (2008).
- [7] Fu Y., Modified Carbon Anode by MWCNTs/PANI Used in Marine Sediment Microbial Fuel Cell and its Electrochemical Performance. *Fuel Cells*, **16(3)**: 377-383 (2016).
- [8] Xu X, Zhao Q, Wu M. Removal and Changes of Sediment Organic Matter and Electricity Generation by Sediment Microbial Fuel Cells and Amorphous Ferric Hydroxide. *Chemical and Biochemical Engineering Quarterly*, **28(4)**: 561-566 (2015).
- [9] Yang Q. Enhanced Phosphorus Flux from Overlying Water to Sediment in a Bioelectrochemical System. *Bioresource Technology*, **216**: 182-187 (2016).
- [10] Huang L. Efficient *In Situ* Utilization of Caustic for Sequential Recovery and Separation of Sn, Fe, and Cu in Microbial Fuel Cells. *Chem. Electro Chem.*, **5(13)**: 1658-1669 (2018).
- [11] Hsu L. Scale-up Considerations for Sediment Microbial Fuel Cells. *RSC Advances*, **3(36)**: 15947-1595. (2013).
- [12] Jafary T. Biocathode in Microbial Electrolysis Cell; Present Status and Future Prospects. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **47**: 23-33 (2015).
- [13] Izadi P., Rahimnejad M., Ghoreyshi A. Power Production and Wastewater Treatment Simultaneously by Dual-Chamber Microbial Fuel Cell Technique. *Biotechnology and Applied Biochemistry*, **62(4)**: 483-488 (2015).
- [14] Zhang H. Effects of the Presence of Sheet Iron in Freshwater Sediment on the Performance of a Sediment Microbial Fuel Cell. *International Journal of Hydrogen Energy*, **40(46)**: 16566-16571 (2015).
- [15] Yang Z. Investigation of Iron–Chromium–Niobium–Titanium Ferritic Stainless Steel for Solid Oxide Fuel Cell Interconnect Applications. *Journal of Power Sources*, **183(2)**: p. 660-667 (2008).

- [16] Yuksel E, Eyvaz M and Gurbulak E. Electrochemical Treatment of Colour Index Reactive Orange 84 and Textile Wastewater by using Stainless Steel and Iron Electrodes. *Environmental Progress & Sustainable Energy*, **32(1)**: 60-68 (2013).
- [17] Sedriks A J. Corrosion of Stainless Steel, 2. (1996).
- [18] Davies D. Stainless Steel as a Bipolar Plate Material for Solid Polymer Fuel Cells. *Journal of Power Sources*, **86(1)** :237-242 (2000).
- [19] De Anna P. The Effects of Water and Chloride Ions on the Electrochemical Behaviour of Iron and 304l Stainless Steel in Alcohols. *Corrosion Science*, **25(1)**: 43-53 (1985).
- [20] Lee H Y. Corrosion of Metals. (2004).