



ماهنامه علمی تخصصی پایا شهر

ISSN ۲۹۸۰-۷۷۸۶

زمان چاپ: ۱۴۰۲/۰۷/۲۰

شماره مجوز مجله: ۸۰۴۰۰

بررسی و تحلیل تاثیرات ساختارهای سلولی مانند بر فعالیت های باتری های سلولی با سوخت میکروبی

امیر شاطری*^۱

فارغ التحصیل مقطع کارشناسی پیوسته مهندسی برق موسسه آموزش عالی آپادانا شیراز
Amir.sh197799@gmail.com

چکیده

در این تحقیق و مقاله ساخت عملکرد کارآمد سلول های سوختی میکروبی (MFCs) نیازمند ملاحظات عملی خاصی است. در پیل سوختی میکروبی تک محفظه، هیچ مرزی بین آند و کاتد وجود ندارد، بنابراین انتشار اکسیژن محلول بر تنفس آندی اثر معکوس دارد و این منجر به مهار انتقال مستقیم الکترون از بیوفیلیم به بیوفیلیم دیگر می شود. سطح آندی در اینجا، یک سلول سوختی میکروبی محفظه دسته ای تغذیه شده با فواصل مختلف ۳ و ۶ سانتی متر (فاصله کاتد تا آند) ساخته می شود، در حالی که حجم کار ثابت است. عملکرد هر MFC به صورت جداگانه تحت تأثیر ویتامین ها و مواد معدنی با استات به عنوان بار تغذیه ارزیابی می شود. حداکثر پتانسیل مدار باز در حین آزمایش پیل های سوختی میکروبی ۳ و ۶ سانتی متری به ترتیب حدود ۹۴۶ و ۷۹۱ میلی ولت است. با کاهش فاصله بین آند و کاتد از ۶ به ۳ سانتی متر، چگالی توان از ۱۰۸,۳ میلی وات متر مربع به ۲۴,۵ میلی وات متر مربع کاهش می یابد. بنابراین، فاصله کوتاه در MFC بدون غشاء، کاتد را ضعیف کرده و تنفس آندی را مهار می کند که بر عملکرد کلی راندمان MFC تأثیر می گذارد. این سیستم حداکثر پتانسیل ۵۶۴ و ۷۹۱ میلی ولت در غیاب و حضور ویتامین ها را نشان می دهد. در نهایت، عملکرد کلی سلول سوختی میکروبی تک محفظه استات را می توان با افزودن ویتامین ها و مواد معدنی و افزایش فاصله بین کاتد و آند بهبود بخشید.

کلمات کلیدی: پیل سوختی میکروبی (MFC)، تک محفظه، فاصله آند تا کاتد، لجن فعال

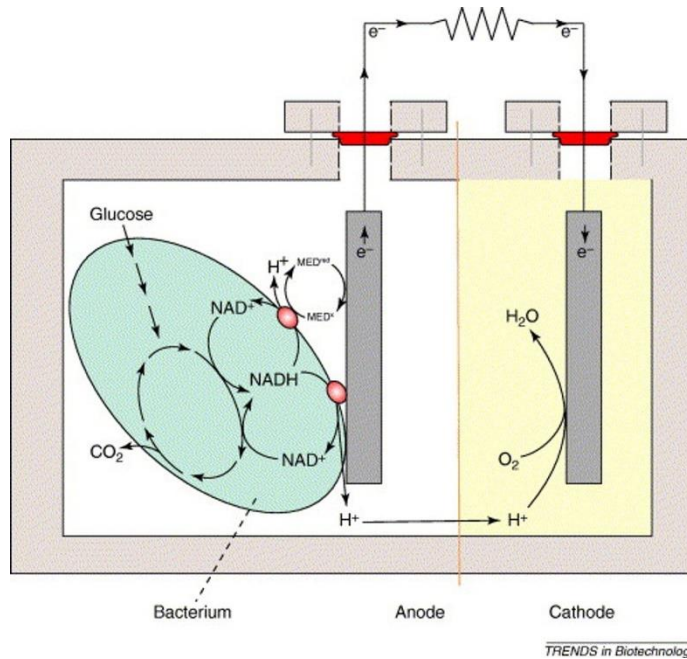


ماهنامه علمی تخصصی پایا شهر

ISSN ۲۹۸۰-۷۷۸۶

۱- مقدمه

منابع انرژی تجدیدپذیر پاک به دلیل پایداری و توزیع آنها در همه جا برای حل تقاضای انرژی در سراسر جهان مهم هستند [۱-۳]. در میان این منابع انرژی تجدیدپذیر متداول، سلول سوختی میکروبی (MFC) است که اخیراً مورد بررسی قرار گرفته است. MFCها این قابلیت را دارند که از جوامع میکروبی به عنوان کاتالیزور استفاده کنند و الکتروسیته طیف وسیعی از مواد آلی و معدنی (به عنوان سوخت میکروبی یا انرژی) را از طریق فعالیت بیوکاتالیستی تجمع میکروبی جذب کنند [۴-۱۲]. در سیستم‌های الکتروشیمیایی میکروبی، واکنش‌های کاهش اکسیداسیون از طریق دو مرحله متوالی انجام می‌شود. در مرحله اول، برهمکنش میکروبی-آند برای اکسید کردن بستر آلی (دهنده الکترون) به پروتون‌ها و الکترون‌های آزاد شده آزاد آغاز می‌شود [۱۳]. ثانیاً، انتقال الکترون‌های تولید شده از آند به کاتد از طریق مدار الکتریکی خارجی و انتقال پروتون‌های آزاد به کاتد برای تشکیل آب و جریان بیوالکتریک از طریق کاهش اکسیژن (پذیرنده الکترون) [۱۴]، همانطور که در طرح ۱ نشان داده شده است. بسترهای اهداکننده الکترون تامین کنندگان اصلی الکترون‌ها در MFC هستند [۱۵]، این بسترها از ترکیبات با وزن مولکولی کم تا ترکیبات با وزن مولکولی بالا متغیر هستند [۱۶]. توان تولید شده به عوامل مختلفی از جمله در دسترس بودن نرخ بارگذاری آلی، قابلیت نرخ بارگذاری میکروارگانیسم‌ها، اثر فاصله الکترودها و مقدار مقاومت بستگی دارد [۱۷]. هنگامی که فضای بین دو الکترودها کاهش می‌یابد، مقاومت اهمی کاهش می‌یابد، در نتیجه پروتون‌ها مسافت کمتری برای سفر دارند. نشان داد که کاهش فاصله بین دو الکترودها از ۴ به ۲ سانتی متر منجر به کاهش مقاومت اهمی و افزایش توان خروجی به ۶۷ درصد می‌شود [۱۸]. در حالی که مطالعات دیگر نتایج متناقض را ثابت می‌کند. آنها به این نتیجه رسیده‌اند که وقتی دو الکترودها نزدیک به یکدیگر قرار می‌گیرند، این منجر به افزایش انتشار اکسیژن از کاتد به آند می‌شود. در نتیجه مهار تنفس بی‌هوازی با ارتقای تنفس هوازی رخ می‌دهد، بنابراین چگالی توان کاهش می‌یابد [۱۹-۲۱]. باتری سلول سوختی میکروبی در تولید برق [۲۲، ۲۳]، تصفیه فاضلاب خانگی و آبجوسازی [۲۴]، حسگرهای زیستی [۲۵، ۲۶]، اصلاح زیستی [۲۷-۲۹] و به عنوان منبع برق از راه دور [۳۰] استفاده شده است. تلاش‌های مختلفی برای ساخت MFCهای بزرگتر یا اتصال چند MFC به صورت سری (عملکرد پشته MFC) برای افزایش توان خروجی انجام شده است [۳۱]. ویژگی‌های بیوالکتروشیمیایی لجن فعال در ادبیات مورد بررسی قرار گرفته است و نتایج امیدوارکننده عملکرد خوب آن را برای استفاده در عملیات و ساخت MFCها نشان می‌دهد [۲۲، ۲۳، ۲۴]. بنابراین در مطالعه ما، تلاش‌هایی برای تقویت فعالیت پیل سوختی میکروبی کمتر میانجی تک محفظه کاتد هوا (ACSCMMFC) با عملکرد پارامترها به عنوان مثال، توسعه یافته است. (بار مواد معدنی و ویتامین‌ها، اثر مقاومت، و طراحی سلولی MFC بر اساس سیستم‌های فاصله گذاری).



شکل ۱. یک پیل سوختی میکروبی تک محفظه، کاتد از یک طرف در معرض هوا و از طرف دیگر در معرض آنالیت حاوی بستر قرار می گیرد.

۲- جزئیات و روش ها

۲-۱- ساختارهای سلول سوختی میکروبی

دو طرح شفاف پیل سوختی میکروبی تک محفظه کاتد هوا Perspex با سطح فعال الکتروود ۲۵ سانتی متر مربع ساخته شده است. یکی با حجم کار ۵۰ میلی لیتر (طول ۶ سانتی متر و قطر ۴ سانتی متر)، دیگری با حجم ۲۰ میلی لیتر (طول ۳ سانتی متر و قطر ۴ سانتی متر). این از یک آند و یک کاتد تشکیل شده است که هر دو از کاغذ کربن ساخته شده اند، الکتروود کاتد با پلی تترا فلئورواتیلن (PTFE) به عنوان لایه های انتشار در سمت در معرض هوا قرار می گیرد [۳۲]. لایه کاتالیست با مخلوط کردن ۰٫۳ میلی گرم سانتی متر مربع از بارگذاری ۳۰ درصد پلاتین که روی کربن VulcanXC-۷۲R و محلول Nafion (محلول Nafion ۵ درصد از آلد ریچ) پشتیبانی می شود، تهیه می شود تا خمیر کاتالیزوری تشکیل شود که در سمت رو به آب کشیده می شود تا از دست دادن آب و انتشار اکسیژن را کاهش دهد. به MFC ها آند و طرف کاتد با بارگذاری پلاتین در دو طرف محلول قرار می گیرند. سلول ها از طریق یک مدار خارجی (مدار باز یا ۵۵۰ اهم) متصل می شوند. عملکرد MFC ها با توجه به تولید برق و تجزیه زیستی بستر ارزیابی می شود.

۲-۲- تهیه و تولید محلول بصری مصنوعی

ظروف MFC با لجن فعال هوازی از تصفیه خانه فاضلاب شهری پس از فیلتراسیون لجن هوازی برای حذف مواد جامد حل نشده عرضه می شوند. سلول های سوختی میکروبی با فاضلاب مصنوعی با محیط تغذیه می شوند. محیط تغذیه برای ۱ گرم استات با استفاده از اجزایی که در ادامه گفته می شوند (بر حسب گرم در لیتر آب دیونیزه) تهیه می شوند: ۰٫۲ آمونیوم کلرید؛ ۲٫۵ بی کربنات سدیم؛ ۰٫۴۲ پتاسیم فسفات؛ ۰٫۳۳ پتاسیم کلرید؛ ۰٫۳ سدیم کلرید؛ ۱٫۲۶ دی پتاسیم فسفات؛ ۰٫۱۵ کلسیم کلرید در دی هیدروژن مونوکسید؛ ۳٫۱۵ منیزیم کلرید؛ عصاره مخمر ۱٫۱۰ میلی لیتر محیط معدنی تهیه شده همانطور که در جای دیگر ذکر شد [۳۳]. مقدار pH با استفاده از (HANNA pH۲۱۱) به ۷pH تنظیم می



ماهنامه علمی تخصصی پایا شهر

ISSN ۲۹۸۰-۷۷۸۶

شود. هنگامی که ولتاژ سلول به زیر ۵۰ میلی ولت کاهش یابد، رسانه های تغذیه تازه می شوند. MFC های تلقیح شده تحت حالت دسته ای تغذیه کار می کنند.

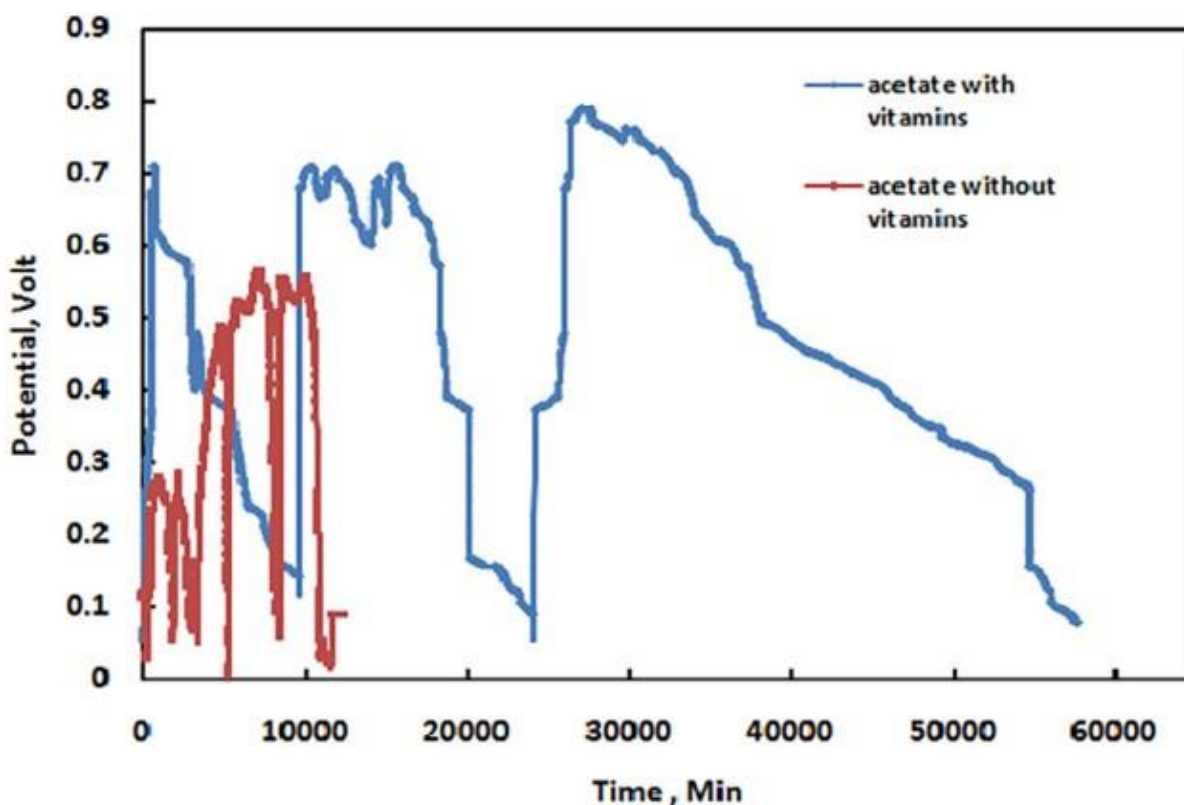
۳-۲- عملکرد پیل سوختی میکروبی

دو MFC مختلف یا پس از تلقیح سلول های میکروبی لجن فعال با محیط تغذیه مبتنی بر استات یا پس از تلقیح سلول های میکروبی لجن فعال بدون محیط تغذیه عمل می کنند. پتانسیل بین آند و کاتد هر ۵ دقیقه با یک مولتی متر و سیستم جمع آوری داده (جک آزمایشگاهی U6 - PRO) ثبت می شود. منحنی های پلاریزاسیون با تغییر مقاومت خارجی (R_{ext}) از ۱۰۰ تا ۱۲۵ کیلو اهم، پس از یک حالت ثابت توان و تولید الکتریسیته برای محاسبه حداکثر جریان و چگالی توان به دست می آیند.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- تاثیر مواد معدنی و ویتامین ها

عملکرد دو سلول سوختی میکروبی تک محفظه بدون غشا (MSCMFC) ارزیابی شده است. سلول اول با ۳۵ میلی لیتر محیط استات بدون ویتامین و مواد معدنی تغذیه می شود. سلول دیگر با ۳۵ میلی لیتر محیط استات حاوی مواد معدنی و ویتامین ها تلقیح شده و سپس ۱۵ میلی لیتر لجن هوازی مطابق شکل ۱ به هر مجموعه اضافه می شود. در صورت وجود مواد معدنی و ویتامین ها، ولتاژ سلول به تدریج افزایش می یابد. یک مقدار حداکثر ولتاژ (۷۹۱ میلی ولت) در طول زمان تخریب و سپس با کاهش ترکیب رسانه ای پس از چرخه های متوالی تکرار، به مقدار پایین تر آن (۵۰ میلی ولت) کاهش می یابد. در حالی که ولتاژ سلول در غیاب مواد معدنی و ویتامین ها به مقدار ولتاژ (۵۶۴ میلی ولت) افزایش می یابد، سپس مقدار ولتاژ به ۵۰ میلی ولت کاهش می یابد. پتانسیل سلول مدار باز در صورت عدم وجود (خط قرمز) و وجود (خط آبی) مواد معدنی و ویتامین ها به ترتیب به ۵۶۴ میلی ولت و ۷۹۱ میلی ولت تثبیت می شود. این را می توان به الزامات سلول های میکروبی زنده برای فعال کردن عملکردهای آنزیمی خود نسبت داد که به نمک های فلزی به عنوان کوآنزیم های کوفاکتورها برای افزایش انرژی زیستی و تجزیه زیستی متکی هستند. از سوی دیگر، مواد معدنی و ویتامین ها به میکروارگانیسم ها در تشکیل بیوفیلم کمک می کنند، همانطور که قبلاً نشان داده شده است [۳۴]. برخی از موجودات می توانند از مواد پروتئینی به عنوان منبع نیتروژن استفاده کنند. برخی دیگر از یون های آمونیوم (NH_4^+) یا یون های نترات (NO_3^-) برای پروتئین ها استفاده می کنند. منبع مهم فسفر یون فسفات (PO_4^{3-}) برای تولید DNA، RNA و ATP و فسفر است. عناصر معدنی مانند آهن، مس، مولیبدن و روی به عناصر کمیاب اطلاق می شود که به مقدار کم برای افزایش رشد باکتری استفاده می شود [۳۵].



شکل ۲. عملکرد MFC در ولتاژ مدار باز در حضور و غیاب مواد معدنی و ویتامین ها.

۳-۲- اثر فاصله بین آند و کاتد

در پیل سوختی تک محفظه، هیچ مرزی بین آند و کاتد وجود ندارد، بنابراین انتشار اکسیژن محلول بر تنفس آندی تأثیر می گذارد و این منجر به مهار انتقال مستقیم الکترون از سلول های زنده چسبیده به سطح آندی می شود. در این راستا، تأثیر فاصله الکتروود و تولید ولتاژ در پیل سوختی میکروبی تک محفظه (SCMFC) با کارکرد سلول در فواصل مختلف بین آند و کاتد ۳ و ۶ سانتی متری با استفاده از ۲۵ میلی لیتر استات به عنوان محیط تعیین می شود. لجن فعال هوازی به عنوان تلقیح برای غنی سازی میکروب های فعال الکتروشیمیایی اضافه می شود، شکل ۲ نشان دهنده رابطه بین ولتاژ در مقابل زمان SCMFC در فواصل مختلف بیش از سه چرخه فرآیند تغذیه-بج با مقاومت نامحدود و جریان صفر است. در نتیجه، حداکثر پتانسیل پتانسیل مدار باز (OCP) در حدود ۹۴۶ میلی ولت (خط قرمز) در ۳ سانتی متر به دست می آید که به طور قابل توجهی بیشتر از پتانسیل به دست آمده در مورد ۶ سانتی متر (۷۹۱ میلی ولت (خط آبی)) پس از سه سانتی متر است. عملیات تکرارپذیر می توان نتیجه گرفت که میکروارگانیسم ها چسبیده، کلونیزه می شوند و خود را روی سطح آند می کارند تا یک بیوفیلم تشکیل دهند. بیوفیلم آندی الکترون ها را به خارج از سلول منتقل می کند و پروتون را به گیرنده هیدروژن نهایی (O₂) منتقل می کند.



ماهنامه علمی تخصصی پایا شهر

ISSN ۲۹۸۰-۷۷۸۶

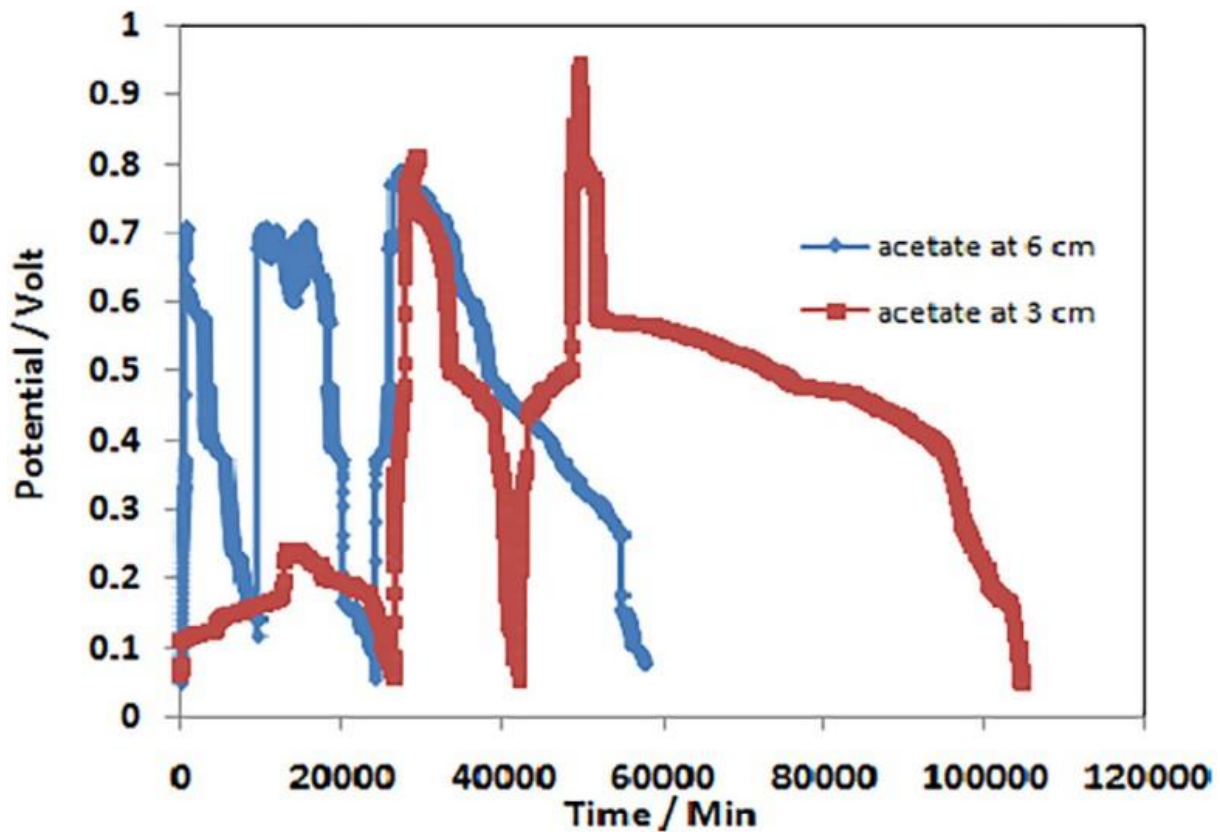
۳-۳- اثر مقاومت خارجی

SCMFC با فاصله ۳ سانتی متر با لجن فعال هوازی و محیط استات از طریق درگاه نمونه برداری در بالا تلقیح می شود. SCMFC تحت یک مقاومت خارجی ثابت $X = 550$ عمل می کند تا رابطه بین مقاومت ها، پتانسیل، چگالی جریان و چگالی توان را همانطور که در شکل ۳ نشان داده شده است بررسی کند. می توان مشاهده کرد که پتانسیل، چگالی جریان و چگالی توان دارای به همین ترتیب، بازده ولتاژ به آرامی افزایش می یابد که به دنبال آن افزایش سریع برای چهار روز آینده است. حداکثر ولتاژ ۱۱۸ میلی ولت مربوط به چگالی جریان ۱۷۳ میلی آمپر در متر مربع و چگالی توان ۲۱ میلی وات متر مربع است، کاهش نرخ مصرف استات منجر به کاهش ولتاژ خروجی به حدود ۳۰ میلی ولت می شود. پس از تازه سازی مشاهده شده است که افزایش ولتاژ خروجی به ۲۰۲ میلی ولت با حداکثر چگالی جریان ۲۹۴ میلی آمپر متر مربع و چگالی توان ۶۰ میلی وات متر مربع بازیابی می شود. سپس، ولتاژ خروجی به مقدار ۱۰ میلی ولت شناور می شود. محیط استات با محیط تازه جایگزین می شود، از طریق این توالی ولتاژ خروجی به ۲۱۸ میلی ولت با حداکثر چگالی جریان ۳۱۷ میلی آمپر متر مربع و چگالی توان ۶۹ میلی وات متر مربع افزایش یافته و سپس به ۳۰ میلی وات کاهش می یابد. این چگالی توان کوچک است سلول کمتر از ۸۶ میلی وات متر مربع است که از MFCهایی با فاصله ۶ سانتی متر در حداکثر چگالی جریان ۳۵۴ میلی آمپر متر مربع با پتانسیل بالاتر ۲۴۳ میلی وات در همان بار به دست می آید. این نتایج نشان داد که سطح الکتروود در SCMFC بزرگ به طور مؤثری نسبت به راکتورهای SCMFC کوچکتر استفاده می شود زیرا: (۱) انتقال جرم بین دو الکتروود یک عامل محدود کننده است، احتمالاً انتقال پروتون از آند به کاتد [۳۶]. (۲) الکترون ها راحت تر در مدار حرکت می کنند و حامل های الکترونی میکرووب های موجود در آند را اکسید می کنند. راکتور بزرگتر را می توان با مقاومت خارجی برای حذف آلاینده های آلی با سرعت بالا کار کرد.

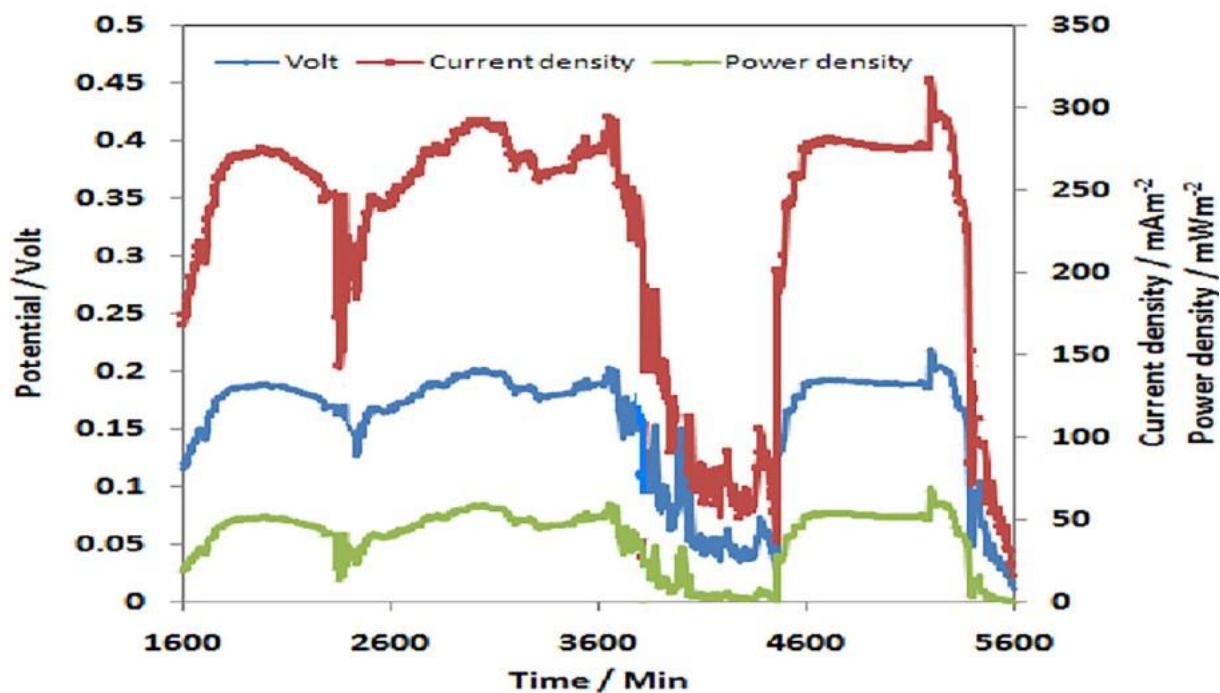
۳-۴- خصوصیات الکتروود

SCMFCها با فاصله بین آند و کاتد ۳ سانتی متر در مقاومت های خارجی مختلف کار می کنند و عملکرد آن با عملکرد ثبت شده از اجرای عادی با فاصله ۶ سانتی متر مقایسه می شود. چگالی جریان پس از یک حالت ثابت محاسبه می شود و در برابر پتانسیل در مقاومت های خارجی مختلف از ۱۰۰ تا ۱۲۵ کیلو اهم در سراسر آند و کاتد برای به دست آوردن منحنی های قطبش و توان همانطور که در شکل ۴ (a,b) نشان داده شده است رسم می شود. رابطه بین مقاومت داخلی و چگالی جریان از منحنی پلاریزاسیون برقرار شده و از شیب ولتاژ در مقابل جریان همانطور که در شکل ۴ (a) نشان داده شده است محاسبه می شود. شکل ۴ (b) منحنی توان را برای توصیف پیل سوختی میکروبی تک محفظه بدون واسطه تحت مقاومت خارجی متفاوت از ۱۰۰ تا ۱۲۵ کیلو اهم نشان می دهد. می توان مشاهده کرد که حداکثر مقدار چگالی توان ۲۴,۵ میلی وات به توان میلی متر با حداکثر مقدار چگالی جریان ۶۵۲,۵ میلی آمپر به توان میلی متر مطابقت دارد. چگالی توان کمتر از مقدار MFC بزرگتر با مواد الکتروود زیرلایه و مساحت یکسان است (حداکثر چگالی توان ۱۰۸,۳ میلی وات به توان میلی متر مربوط به حداکثر مقدار چگالی جریان ۹۸۲,۶۱ میلی آمپر به توان میلی متر). می توان نتیجه گرفت که اگرچه مقدار ولتاژ در فاصله ۳ سانتی متر (۹۴۶ میلی وات) بالاتر از مقدار ولتاژ به دست آمده در ۶ سانتی متر (۷۹۱ میلی وات) است، چگالی توان تولید شده به دلیل مقاومت داخلی بالا محدود می شود. با توجه به مقاومت داخلی نسبی بالای خود (R_{in}) در ۷۱ اهم نسبت به ۶ سانتی متر در ۵۹ اهم عملکرد کمی دارد. فاصله بین الکتروودها در MFCهای غشایی بسیار نزدیک به یکدیگر قرار دارند، بنابراین انتشار اکسیژن از کاتد به آند افزایش

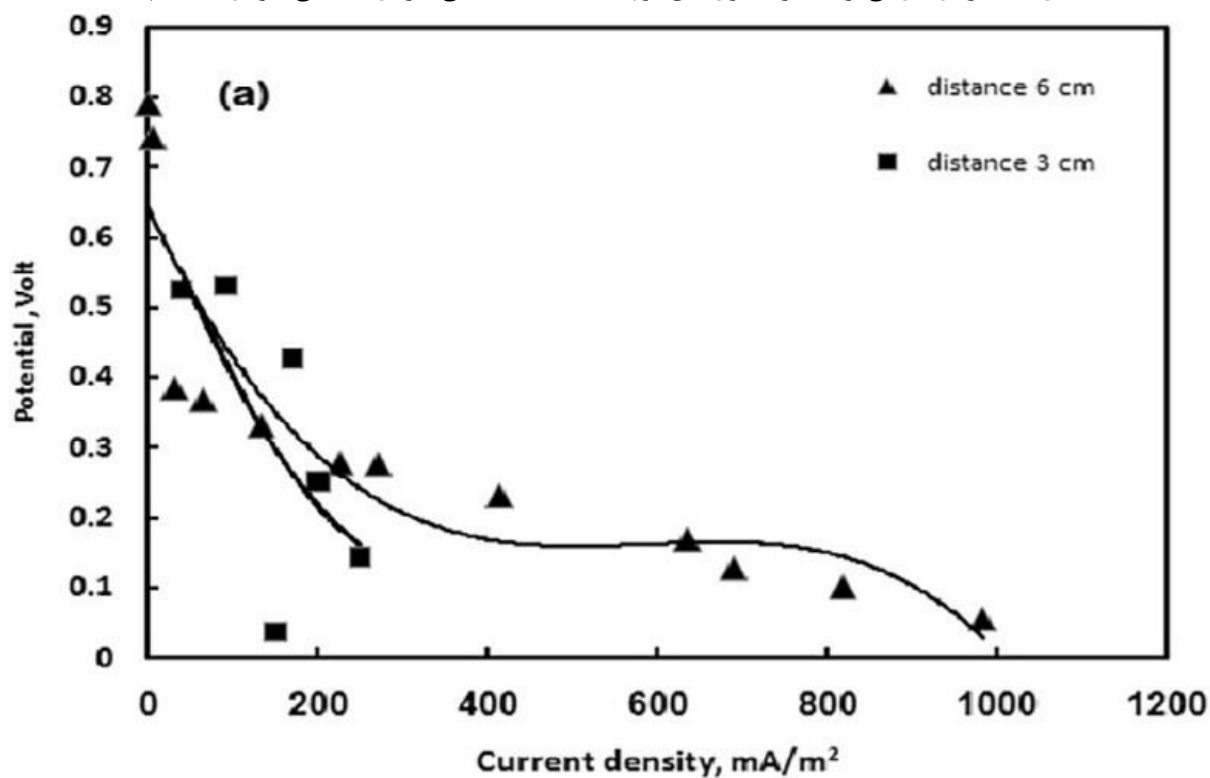
می‌باید [۱۹-۲۱]. این می‌تواند بازدارنده تنفس بی‌هوازی باشد و تنفس هوازی را تقویت کند، که هر دو باعث کاهش کارایی MFC می‌شوند.



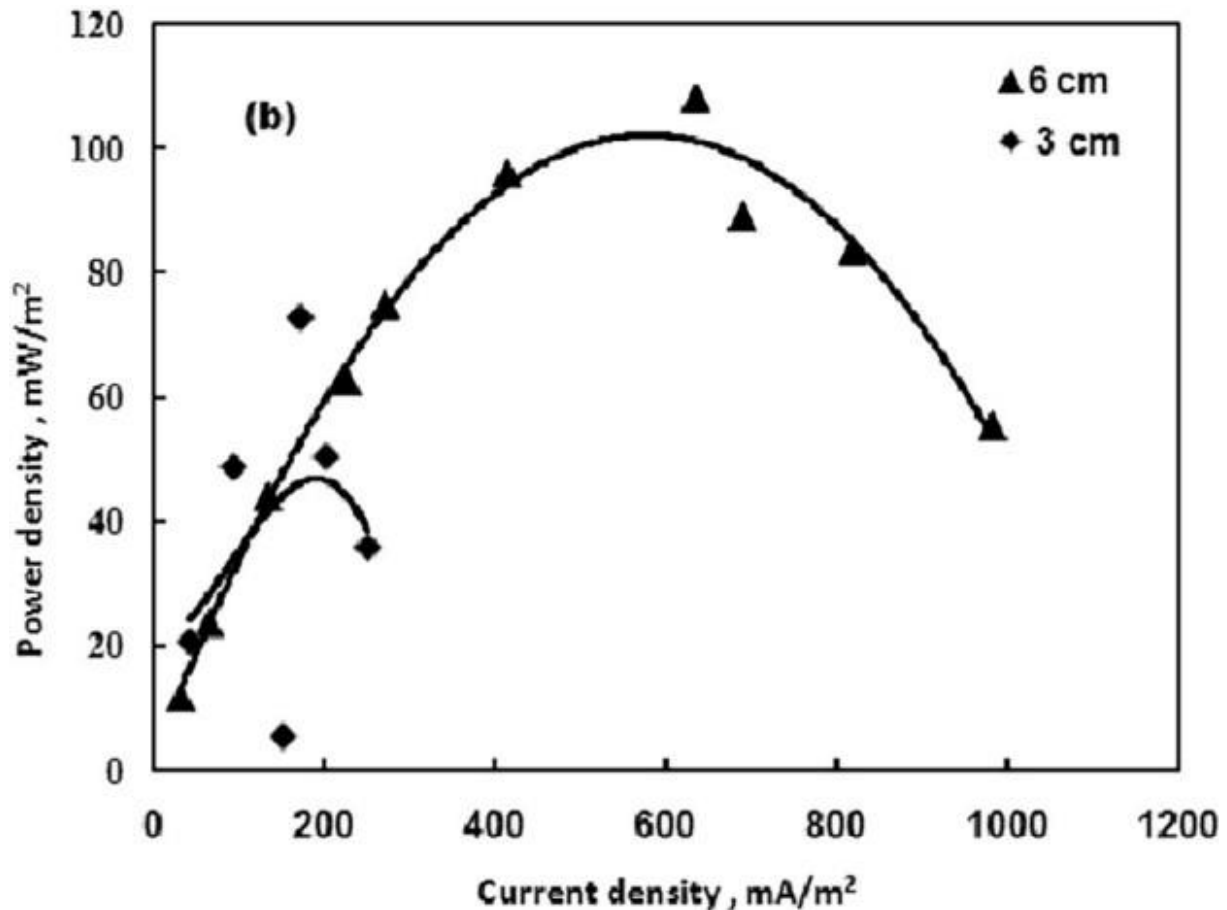
شکل ۳. تفاوت ولتاژ بین فاصله الکترودهای ۶ و ۳ سانتی متری بین آنود و کاتود.



شکل ۴. تأثیر بار خارجی بر عملکرد سلول های کوچک با فاصله ۳ سانتی متر در ۳ سانتی متر در ۵۵۰ اهم.



شکل ۵. منحنی پلاریزاسیون



شکل ۶. منحنی توان ML-MFC با فاصله بین آند و کاتد ۳ و ۶ سانتی متر است.

۴- نتیجه گیری

پیل سوختی میکروبی یک دستگاه الکتروشیمیایی است که آلاینده های آلی را از طریق فعالیت کاتالیزوری زیستی میکروب های فعال الکتروشیمیایی به الکتریسیته تبدیل می کند. پیل سوختی میکروبی تک محفظه حداکثر پتانسیل ۵۶۴ و ۷۹۱ میلی ولت را در غیاب و حضور ویتامین ها نشان داد. با کاهش فاصله بین آند و کاتد از ۶ به ۳ سانتی متر، تولید برق از ۱۰۸,۳ به ۲۴,۵ میلی وات متر مربع کاهش می یابد. فاصله بین الکترودها در MFC های بدون غشاء بسیار نزدیک به یکدیگر قرار دارند و باعث واکنش کاتدی ضعیف می شوند، بنابراین انتشار اکسیژن از کاتد به آند باعث مهار تنفس بی هوازی و ترویج تنفس هوازی و کاهش بازده MFC می شود. چگالی توان بالا به دست آمده در فاصله بین آند و کاتد ۶ سانتی متر است) MFC تک محفظه به عنوان یک پیل سوختی معمولی عمل می کند که نوید بزرگی را برای کاربردهای دیگر مانند منابع تغذیه قابل حمل و منابع تغذیه برای سنسورهای از راه دور با استفاده از سوخت های خانگی ارائه می دهد.



منابع و مراجع

۱. Khater Dena Z, El-Khatib KM, Hazaa MM, Hassan RYA. Development of bioelectrochemical system for monitoring the biodegradation performance of activated sludge. *Appl Biochem Biotechnol* ۲۰۱۵; ۱۷۵(۷):۳۵۱۹-۳۰.
۲. Khater Dena Z, El-Khatib KM, Hazaa MM, Hassan RYA. Development of bioelectrochemical system for monitoring the biodegradation performance of activated sludge. *Appl Biochem Biotechnol* ۲۰۱۵; ۱۷۵(۷):۳۵۱۹-۳۰.
۳. Reddy LV, Kumar SP, Wee Y. Microbial Fuel Cells (MFCs) – a novel source of energy for new millennium. *Appl Microbiol Microb Biotechnol* ۲۰۱۰; ۹۵۶-۹۶۴.
۴. Allen R. Microbial fuel-cells: electricity production from carbohydrates. *Appl Biochem Biotechnol* ۱۹۹۳; ۳۹(۴۰):۲۷-۴۰.
۵. Zhang D, Yang F, Shimotori T, Wang K, Huang Y. Performance evaluation of power management systems in microbial fuel cell-based energy harvesting applications for driving small electronic devices. *J Power Sources* ۲۰۱۲; ۲۱۷:۶۵-۷۱.
۶. Chang I, Jang J, Gil G, Kim M, Kim H, Cho B, et al. Continuous determination of biochemical oxygen demand using microbial fuel cell type biosensor. *Biosens Bioelectron* ۲۰۰۴; ۱۹(۶):۶۰۷-۱۳.
۷. Joo H, Soo H, Sik M, Seop I, Kim M, Hong B. A mediator-less microbial fuel cell using a metal reducing bacterium, *Shewanella putrefaciens*. *Enzyme Microb Technol* ۲۰۰۲; ۳۰:۱۴۵-۵۲.
۸. Chang IS, Moon H, Bretschger O, Jang JK, Park HI, Neilson KH, et al. Electrochemically active bacteria (EAB) and mediator-less microbial fuel cells. *J Microbiol Biotechnol* ۲۰۰۶; ۱۶(۲):۱۶۳-۷۷.
۹. Ramanaviciene A. Hemoproteins in design of biofuel cells. *Fuel Cell* ۲۰۰۹; ۱:۲۵-۳۶.
۱۰. Gil G, Chang I, Kim BH, Kim M, Jang J, Park HS, et al. Operational parameters affecting the performance of a mediator-less microbial fuel cell. *Biosens Bioelectron* ۲۰۰۳; ۱۸(۴):۳۲۷-۳۴.
۱۱. Moon H, Chang IS, Kang KH, Jang JK, Kim BH. Improving the dynamic response of a mediator-less microbial fuel cell as a biochemical oxygen demand (BOD) sensor. *Biotechnol Lett* ۲۰۰۴; ۲۶:۱۷۱۷-۲۱.
۱۲. Hassan SHA, Seong Y, Oh S. Enzyme and microbial technology power generation from cellulose using mixed and pure cultures of cellulosedegrading bacteria in a microbial fuel cell. *Enzyme Microb Technol* ۲۰۱۲; ۵۱ (۵):۲۶۹-۷۳.
۱۳. Selim RYAHMM, Kamal AM, Ali DMM. Bioelectrochemical systems for measuring microbial cellular functions. *Electroanalysis* ۲۰۱۷; ۲۹(۶):۱۴۹۸-۵۰۵.
۱۴. Logan BE, Regan JM. Electricity-producing bacterial communities in microbial fuel cells. *Trends Microbiol* ۲۰۰۶; ۱۴(۱۲):۵۱۲-۸.
۱۵. Liu Z, Liu J, Zhang S, Su Z. Study of operational performance and electrical response on mediator less microbial fuel cells fed with carbon- and proteinrich substrates. *Biochem Eng J* ۲۰۰۹; ۴۵:۱۸۵-۹۱.
۱۶. Fornero J, Rosenbaum M, Angenent L. Electric power generation from municipal, food, and animal wastewaters using microbial fuel cells. *Electroanalysis* ۲۰۱۰; ۲۲(۷-۸):۸۳۲-۴۳.
۱۷. Yan E, Aaron L, Gostomski PA. Gaseous pollutant treatment and electricity generation in microbial fuel cells (MFCs) utilising redox mediators. *Environ Sci Biotechnol* ۲۰۱۴; ۱۳:۳۵-۵۱.
۱۸. Liu H, Cheng S, Logan BE. Power generation in fed-batch microbial fuel cells as a function of ionic strength, temperature, and reactor configuration. *Environ Sci Technol* ۲۰۰۵; ۳۹(۱۴):۵۴۸۸-۹۳.
۱۹. Fan Y, Hu H, Liu H. Enhanced Coulombic efficiency and power density of aircathode microbial fuel cells with an improved cell configuration. *J Power Sources* ۲۰۰۷; ۱۷۱:۳۴۸-۵۴.
۲۰. Kim J, Cheng S, Oh S, Logan B. Power generation using different cation, anion, and ultrafiltration membranes in microbial fuel cells. *Environ Sci Technol* ۲۰۰۷; ۴۱(۳):۱۰۰۴-۹.
۲۱. Jang J, Pham T, Chang I, Kang K, Moon H, Cho K. Construction and operation of a novel mediator- and membraneless microbial fuel cell. *Process Biochem* ۲۰۰۴; ۳۹(۸):۱۰۰۷-۱۲.
۲۲. Ieropoulos I, Melhuish C, Greenman J. EcoBot-II: an artificial agent with a natural metabolism. *Adv Robot Syst* ۲۰۰۵; ۲:۲۹۵-۳۰۰.



۲۳. Shantaram A, Beyenal H, Veluchamy R, Lewandowski Z. Wireless sensors powered by microbial fuel cells. *Environ Sci Technol* ۲۰۰۵;۳۹:۵۰۳۷-۴۲.
۲۴. Liu H, Ramnarayanan R, Logan BE. Production of electricity during wastewater treatment using a single chamber microbial fuel cell. *Environ Sci Technol* ۲۰۰۴;۳۸(۷):۲۲۸۱-۵.
۲۵. Chang IS, Moon H, Bretschger O, Jang JK, Park HI, Neelson KH, et al. Residence time distribution in microbial fuel cell and its influence on COD removal with electricity generation. *Biochem Eng J* ۲۰۰۵;۲۷:۵۹-۶۵.
۲۶. Chang I, Jang J, Gil G, Kim M, Kim H, Cho B. Continuous determination of biochemical oxygen demand using microbial fuel cell type biosensor. *Biosens Bioelectron* ۲۰۰۴;۱۹(۶):۶۰۷-۱۳.
۲۷. Zhang G, Zhang H, Ma Y, Yuan G. Membrane filtration biocathode microbial fuel cell for nitrogen removal and electricity generation. *Enzyme Microb Technol* ۲۰۱۴;۶۰:۵۶-۶۳.
۲۸. Li W, Zhang S, Chen G, Hua Y. Simultaneous electricity generation and pollutant removal in microbial fuel cell with denitrifying biocathode over nitrite. *Appl Energy* ۲۰۱۴;۱۲۶:۱۳۶-۴۱.
۲۹. He Z, Angenent L. Application of bacterial biocathodes in microbial fuel cells. *Electroanalysis* ۲۰۰۶;۱۸(۱۹-۲۰):۲۰۰۹-۱۵.
۳۰. Doty C. For Africa, energy from dirt. *New York Times*; ۲۰۰۸.
۳۱. Aelterman P, Rabaey K, Pham H, Boon N, Verstraete W. Continuous electricity generation at high voltages and currents using stacked microbial fuel cells. *Environ Sci Technol* ۲۰۰۶;۴۰(۱۰):۳۳۸۸-۹۴.
۳۲. Khater Dena Z, El-khatib K, Hassan RY. Exploring the bioelectrochemical characteristics of activated sludge using cyclic voltammetry. *Appl Biochem Biotechnol* ۲۰۱۸;۱۸۴(۱):۹۲-۱۰۱.
۳۳. Khater Dena Z, El-khatib KM, Hassan HM. Microbial diversity structure in acetate single chamber microbial fuel cell for electricity generation. *J Genet Eng Biotechnol* ۲۰۱۷;۱۵(۱):۱۲۷-۳۷.
۳۴. Beech I, Beech JS. Biocorrosion: towards understanding interactions between biofilms and metals. *Curr Opin Biotechnol* ۲۰۰۴;۱۵(۳):۱۸۱-۶.
۳۵. J Hayek SA, Ibrahim SA. Current limitations and challenges with lactic acid bacteria : a review. *Food Nutr Sci* ۲۰۱۳;۳(۴):۷۳-۸۷.
۳۶. Chang IS, Jang JK, Gil GC, Kim M, Kim HJ, Kim BH. Continuous determination of biochemical oxygen demand using a microbial fuel cell type novel biosensor. *Biosens Bioelectron* ۲۰۰۴;۱۹(۶):۵۳۳۷.