



Available online: <https://ijhe.tums.ac.ir>

مقاله پژوهشی



## کاربرد پیل سوختی میکروبی دو محفظه‌ای با کاتد هوادهی شده برای تولید بیوالکتریسیته همزمان با تصفیه فاضلاب صنعتی

فرح راشدی<sup>۱</sup>، ناهید نویدجوی<sup>۱\*</sup>، علی احمد آقاپور<sup>۱</sup>، مصطفی رحیم نژاد<sup>۲</sup>

۱- گروه مهندسی بهداشت محیط، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی ارومیه، ارومیه، ایران  
۲- گروه مهندسی شیمی، دانشکده مهندسی شیمی، دانشگاه صنعتی نوشیروان، بابل، ایران

### اطلاعات مقاله:

### چکیده

**زمینه و هدف:** پیل سوختی میکروبی (MFC)، یک فناوری نوین و امید بخش بود که با استفاده از توانایی کاتابولیسی میکروارگانیسم‌ها همزمان با حذف مواد آلی و سایر آلاینده‌های فاضلاب، انرژی زیستی تولید می‌کند. از موثرترین عامل بر عملکرد پیل سوختی میکروبی، الکترودها هستند. هدف از این مطالعه، بررسی عملکرد پیل سوختی میکروبی در حذف COD و تولید بیوانرژی از فاضلاب مصنوعی و فاضلاب واقعی نوشابه سازی است.

**روش بررسی:** در این تحقیق پیل سوختی میکروبی دو محفظه‌ای، با غشای نافیون و کاتد هوادهی شده با استفاده از دو الکتروده از جنس نمد کربنی و گرافیت مسطح، توسط فاضلاب مصنوعی با غلظت  $5000 \text{ mg/L COD}$  و فاضلاب واقعی نوشابه سازی راه اندازی شد. راندمان حذف مواد آلی و حداکثر میزان ولتاژ، شدت توان و جریان تولیدی اندازه‌گیری و ارزیابی گردید.

**یافته‌ها:** نتایج آزمایشات نشان داد، که حداکثر راندمان حذف COD آندی با فاضلاب مصنوعی، با الکتروده نمد کربنی ۹۲ درصد حاصل گردید. هم زمان با عمل تصفیه حداکثر ولتاژ، دانسیته توان و دانسیته جریان تولیدی به ترتیب  $469 \text{ mV}$ ،  $175/28 \text{ mW/m}^2$  و  $855 \text{ mA/m}^2$  مشاهده گردید. در راه‌اندازی راکتور MFC با فاضلاب واقعی نوشابه سازی، حداکثر میزان حذف مواد آلی، تولید ولتاژ، شدت جریان و شدت توان، به ترتیب ۸۵ درصد و  $460 \text{ mV}$ ،  $635 \text{ mA/m}^2$ ،  $91/6 \text{ mW/m}^2$  کسب گردید.

**نتیجه‌گیری:** نتایج نشان داد سیستم MFC، توانایی تصفیه فاضلاب نوشابه سازی همزمان با تولید بیوانرژی را دارد. مقایسه یافته‌ها بیانگر کارایی بالای پیل سوختی میکروبی با استفاده از فاضلاب مصنوعی در تولید بیوالکتریسیته و حذف مواد آلی نسبت به فاضلاب واقعی (نوشابه سازی) بوده، که دلیل آن وجود املاح و سایر آلاینده‌های مداخله‌گر در فاضلاب واقعی است.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۷/۱۸  
تاریخ ویرایش: ۱۴۰۰/۰۹/۲۴  
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۹/۲۸  
تاریخ انتشار: ۱۴۰۰/۰۹/۳۰

**واژگان کلیدی:** فاضلاب نوشابه سازی، پیل سوختی میکروبی، حذف اکسیژن مورد نیاز شیمیایی، بیوانرژی، تصفیه فاضلاب صنعتی

پست الکترونیکی نویسنده مسئول:  
n.navidjouy@gmail.com

Please cite this article as: Rashadi F, Navidjouy N, Aghapour AA, Rahimnejad M. Application of dual chamber microbial fuel cell with aeration cathode for bioelectricity generation and simultaneous industrial wastewater treatment. Iranian Journal of Health and Environment. 2021;14(3):473-86.



## مقدمه

افزایش نگرانی، از کاهش منابع طبیعی انرژی و کاهش سوخت‌های فسیلی، باعث شده تکنولوژی‌های سبز، که اثرات کمتری بر روی محیط زیست داشته و همزمان با حذف آلاینده‌ها انرژی زیستی تولید می‌کنند، توسعه پیدا کنند. درک کاهش سوخت‌های فسیلی و افزایش گرمای زمین توسط محققان نقطه عطفی در نگرش به مقوله انرژی و آینده بشر روی این کره خاکی بوده، که تحت این تغییر نگرش، مسئله توسعه پایدار مطرح گردید (۱). از طرفی انتظارات جامعه کنونی، جهت رفع این نگرانی‌ها، استفاده از انرژی‌های تجدید شونده یکی از راه‌حل‌های تولید انرژی پایدار و بازیافت فاضلاب و پساب بوده، بطوری‌که با کمترین مسائل زیست محیطی، بتواند وارد چرخه آب شود (۲). لذا تصفیه فاضلاب اگر به همراه تکنولوژی‌های جدید باشد، به عنوان یک فرایند پایدار تلقی می‌گردد. از طرفی سیستم‌های تصفیه متداول آلاینده‌ها نیاز بالای به مصرف انرژی و مواد شیمیایی دارد. تحقیقات در زمینه جایگزینی روش‌هایی که به همراه تصفیه آلاینده‌ها بتواند انرژی نیز تولید کند، از اهمیت و اولویت بالایی برخوردار است (۳). از جمله این روش‌های سبز پیل سوختی میکروبی ((Microbial fuel Cell (MFC)) است. که از زیست توده به عنوان مواد تجدید پذیر برای تولید انرژی استفاده کرده و به عنوان یک تکنولوژی نوین برای حذف و بازیافت مواد آلی و دیگر آلاینده‌های معدنی مانند نوترینت‌ها، هیدروکربن‌های نفتی، حلال‌های کلر، پرکلرات و رنگ‌های آزو و آلاینده‌های دارویی از محیط‌های آبی مطرح است (۴). در این بیوراکتورها، انرژی ذخیره شده در باندهای شیمیایی ترکیبات آلی، با انجام واکنش‌های کاتالیتیکی توسط میکروارگانیسم‌ها به انرژی الکتریسیته تبدیل می‌گردد (۵). یک پیل سوختی میکروبی از دو قسمت آند و کاتد تشکیل شده که در آند عمل اکسایش و در کاتد عمل کاهش انجام می‌شود. در محفظه آند که اجتماع باکتری‌ها باعث تشکیل بیوآند شده، بایستی شرایط بی‌هوازی بوده و به هیچ عنوان اکسیژن وجود نداشته باشد. چرا که وجود اکسیژن فعالیت باکتری‌های بی‌هوازی را در بیوآند مختل کرده و تولید جریان الکتریکی را محدود خواهد کرد. ولی محفظه

کاتد به طور مداوم هوادهی می‌گردد تا اکسیژن محلول مورد نیاز برای انجام واکنش در کاتد را فراهم سازد (۶). الکتروآند از طریق یک مدار الکتریکی خارجی به الکتروآند متصل شده و از این طریق جریان الکترون‌ها به شکل جریان الکتریسیته تبدیل می‌گردد. اصول بهره‌برداری از MFC، در استخراج و انتقال الکترون، از سلول‌های میکروبی بر روی الکتروآند بوده که با توجه به استقرار باکتری‌ها بر روی الکتروآند به آن بیوآند می‌گویند (۷). در MFC دو محفظه‌ای در یک محفظه جداگانه آند و در یک محفظه کاتد قرار می‌گیرد که توسط یک غشای تبادل پروتون (غشای کاتیونی)، از همدیگر جدا می‌شوند. این غشا، نسبت به پروتون خاصیت نفوذپذیری انتخابی دارد و نسبت به آنیون‌ها، الکترون و اکسیژن غیر قابل نفوذ است. الکترون از طریق یک سیم هادی از بیوآند به الکتروآند کاتد جریان می‌یابد و پروتون‌های تولید شده از میان غشای تبادل نفوذ می‌کنند، تا در محفظه کاتد الکترون‌ها و پروتون‌ها با مولکول اکسیژن ترکیب و آب تولید شود (۸). عواملی مانند جنس الکتروآند، مساحت سطح الکتروآند، درجه حرارت، نوع و غلظت سوبسترا، جمعیت میکروارگانیسم‌ها از پارامترهای موثر بر عملکرد MFC هستند (۹). در عصر حاضر، به خاطر افزایش هزینه تصفیه فاضلاب با روش‌های متداول و انتشار گازهای گلخانه‌ای، کاهش آلودگی از وظایف اصلی تصفیه فاضلاب بوده و استفاده از فناوری پیل سوختی میکروبی، مزایایی نسبت به سایر روش‌های متداول در تصفیه فاضلاب دارد. از جمله به خاطر ترکیب فرایند بیولوژیکی و الکتروشیمیایی پسایی با ردپای کم کربن تولید می‌کند، و به خاطر بی‌هوازی بودن، لجن تولیدی بسیار کم است (۱۰). از طرفی چندین فرایند زیست محور از جمله حذف همزمان کربن، نیتروژن، حذف فلزات سنگین را می‌تواند در بیوراکتور انجام دهد. بنابراین سیستم‌های MFC هم می‌توانند جایگزین و تکمیل کننده انرژی مرسوم معمولی باشد (۱۱). از معایب فناوری MFC، گرفتگی غشا بوده که باعث کاهش انرژی تولیدی می‌گردد، و مشکلات اساسی مربوط به تجاری سازی و بالای استفاده از غشای پروتونی (PEM) است (۱۲). هدف از انجام این مطالعه، بررسی تولید جریان الکتریسیته

می‌شود (۱۳). پس از آن به مدت ۱ h در آب جوش قرار داده و در مرحله بعد به مدت ۱ h در اسید سولفوریک ۰/۵ M در حال جوش قرار گرفته و در مرحله آخر نیز به مدت ۱ h در آب جوش قرار می‌گیرد. در این مطالعه از الکترودهای گرافیت مسطح و نمد کربنی با ابعاد ۵ × ۴ cm بعنوان الکترودهای آند و کاتد استفاده گردید. الکترودهای کاربردی قبل از استفاده بایستی ۲۴ h در HCL، ۱ M و بعد ۲۴ h در NaOH، ۱ M، اخیسانده شده و سپس با آب مقطر دوبار تقطیر شستشو داده تا ناخالصی‌های آن از بین برود (۱۴). به منظور انتقال جریان بیوالکتریسته از طریق مدار خارجی از سیم مسی استفاده شد. نمای پیل سوختی میکروبی طراحی شده به صورت شماتیک در شکل ۱ نشان داده شده است.

#### – تهیه و کشت میکروارگانیسم‌ها

از لجن بی‌هوازی تصفیه خانه فاضلاب شهری، شهر ارومیه به عنوان ماده تلقیحی در محفظه آندی پیل سوختی استفاده شده است. بدین منظور ابتدا جهت آماده سازی میکروارگانیسم‌های بی‌هوازی ماده تلقیحی به محیط کشت ساختگی شامل (گلوکز ۵ g/L، عصاره مخمر ۳ g/L، پیتون ۱ g/L) اضافه شده و به مدت ۲۴ h در شرایط بی‌هوازی و دمای ۳۰ °C انکوبه گردید (۱۴). به منظور تشکیل لایه بیوفیلم بر روی الکترو آند، ماده تلقیحی ترکیبی به میزان ۱۰ درصد حجمی به محفظه آند اضافه گردید. برای تنظیم pH در محدوده ۷/۴ ± ۰/۲ از بافر فسفات استفاده گردید.

برای تهیه فاضلاب مصنوعی از ترکیبات گلوکز ۵ g/L، کلرید آمونیم ۰/۵ g/L، کلرید پتاسیم ۰/۷۴ g/L، کلرید سدیم ۰/۵۸ g/L، کلرید کلسیم ۰/۱۱ g/L، سولفات منگنز ۰/۱ g/L، فسفات هیدروژن دی پتاسیم ۰/۲۵ g/L، فسفات دی هیدروژن پتاسیم ۱/۴ g/L و ۰/۱ mL/L میکرونوترینت‌ها استفاده شد و در محفظه کاتد از بافر ۱۰۰ mM استفاده گردید (۱۳).

#### – طراحی آزمایشات

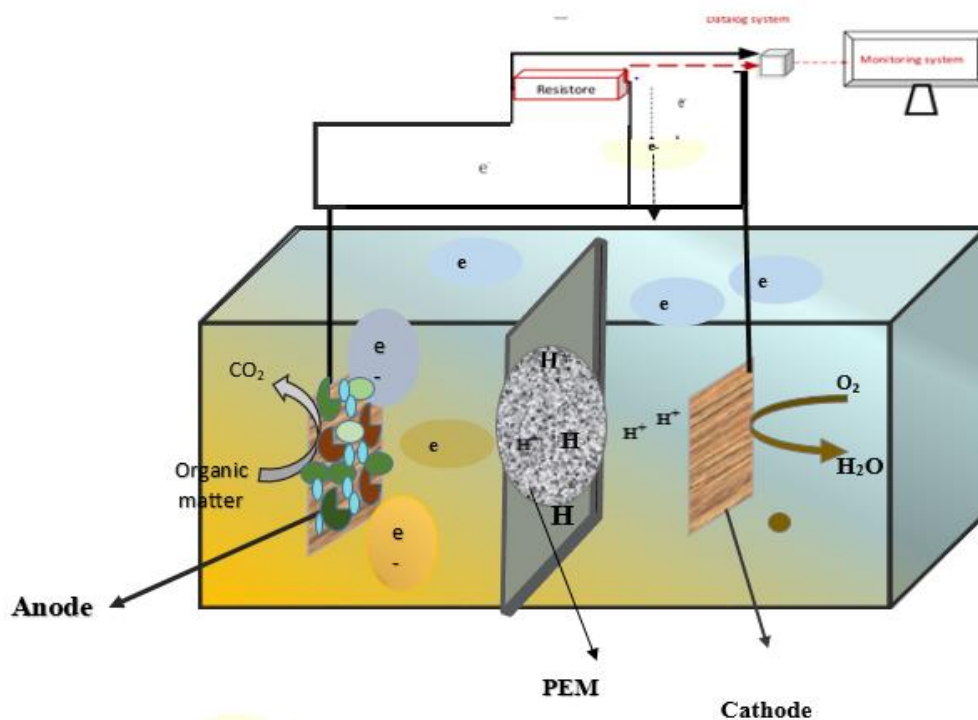
این تحقیق یک مطالعه تجربی بوده که عملکرد پیل سوختی میکروبی در تصفیه فاضلاب صنعتی مصنوعی با فاضلاب واقعی نوشابه سازی در یک سیستم منقطع با استفاده از

و حذف COD (Chemical Oxygen Demand) در پیل سوختی میکروبی دو محفظه‌ای، با کاتد هوادهی شده و با غشای نافینون، برای دو نمونه فاضلاب صنعتی (سینتیک و واقعی) با استفاده از دو الکتروود مختلف از جنس نمد کربنی و گرافیت مسطح هست. از فاضلاب صنعتی کارخانه نوشابه سازی شهر ارومیه به عنوان فاضلاب واقعی در این تحقیق استفاده گردید. از فاضلاب نوشابه سازی بدلیل محتوی مواد قندی زیاد، که از نظر غلظت و سهولت تجزیه پذیری این نوع فاضلاب‌ها برای میکروارگانیسم‌های بی‌هوازی محفظه آند پیل‌های سوختی میکروبی مناسب هستند، استفاده شد. نتایج حاصله از این مطالعه و مطالعات مشابه می‌تواند، محققان را در رسیدن به هدف استفاده از MFC در مقیاس‌های واقعی برای تصفیه فاضلاب‌های صنایع غذایی مختلف و تولید بیوانرژی یاری رساند.

## مواد و روش‌ها

### – راه اندازی و ساختار پیل سوختی میکروبی

این مطالعه، از نوع مطالعه تجربی بوده و در آزمایشگاه پایلوت دانشکده بهداشت انجام گرفت. راکتور MFC با استفاده از ورقه‌های پلاکسی گلاس به صورت دو محفظه‌ای، مکعب به صورت H شکل ساخته و بصورت تغذیه ناپیوسته راه اندازی گردید. حجم محفظه آند و کاتد هر کدام ۵۰۰ mL با حجم کاری ۸۰ درصد انتخاب گردید. راکتور، شامل محفظه آند و کاتد بوده که توسط یک غشای تبادل پروتون از هم جدا شده و جنس محفظه‌ها پلاکسی گلاس (plexiglass) و حجم کاری مفید هر کدام ۵۰۰ mL طراحی گردید. دو محفظه توسط یک غشای تبادل پروتون از جنس نفیون ۱۱۷ با ابعاد ۵×۵ cm از هم تفکیک شدند. غشای انتخاب شده قبل از استفاده در پیل سوختی میکروبی، در چهار مرحله مختلف تحت عملیات پیش فرآوری قرار گرفت، تا ناخالصی‌ها از روی نفیون حذف گردد و خاصیت رسانایی مطلوب آن حاصل گردد. مراحل خالص سازی بدین صورت بوده است، که ابتدا نفیون در محلول ۳۰ درصد پراکسید هیدروژن به مدت ۱ h جوشانده



شکل ۱- نمای شماتیک پیل سوختی میکروبی با ساختار مکعبی

ثابت بوده است (۱۵).

– روش آنالیز

ولتاژ تولیدی در پیل سوختی میکروبی با استفاده از سیستم ثبت جریان متصل به سیستم کامپیوتر هر ۳۰ min به صورت اتوماتیک ثبت می‌گردد. بعد از رسیدن پیل به شرایط ثابت از نظر تولید ولتاژ با اعمال مقاومت‌های متغیر (۱۰۰ KΩ - ۰/۱) حداکثر جریان و حداکثر توان پیل در شرایط مختلف بهره برداری با انواع فاضلاب مصنوعی و واقعی تعیین گردید. جهت برآورد دانسیته توان و دانسیته جریان در الکترودهای گرافیت مسطح و نمد کربنی بایستی میزان جریان و توان تولیدی نسبت به سطح آند نرمالیزه گردد. پارامتر COD توسط دستگاه اسپکترومتر DR ۵۰۰۰ در شرایط Closed Reflux و رنگ سنجی طبق روش ۵۲۲۰D کتاب استاندارد متد انجام شد.

برای تعیین کارایی MFC در حذف COD آندی از معادله ۱ استفاده شده است.

$$\text{COD} \text{ حذف } (\%) = \frac{COD_i - COD_e}{COD_i} \times 100 \quad (1)$$

دو الکتروند نمد کربنی و گرافیت مسطح مورد مقایسه قرار گرفت. نمونه‌های واقعی فاضلاب صنعت نوشابه سازی مطابق با روش‌های استاندارد نمونه برداری انجام و در بطری‌های پلی اتیلنی و تحت شرایط دمایی ۴ °C به آزمایشگاه منتقل گردید. مشخصات فاضلاب صنعتی کارخانه نوشابه سازی مورد استفاده در این مطالعه طبق جدول ۱ ارائه گردیده است. جهت راهبری راکتور پیل سوختی میکروبی، در محفظه آند از فاضلاب صنعتی کارخانه نوشابه سازی و در محفظه کاتد از بافر فسفات ۱۰۰ mM استفاده شده است. اکسیژن مورد نیاز برای واکنش احیاء در کاتد توسط یک توزیع‌کننده شیپوری هوا تامین گردید و برای ایجاد شرایط بی‌هوازی در محفظه آند، ۵ min گاز نیتروژن به این محفظه تزریق شد. برای تخمین شرایط بی‌هوازی، اکسیژن محلول (DO) در ابتدای و حین راهبری با اکسیژن سنج اندازه گیری گردید. جهت رشد و فعالیت مناسب میگرورگان‌های بیوفیلم آند pH فاضلاب صنعتی با استفاده از بافر فسفات در محدوده ۷/۴±۰/۲ تنظیم گردید و در طول راهبری راکتور، دما در محدوده ۳۰±۱ °C

جدول ۱- مشخصات فاضلاب صنعتی کارخانه نوشابه سازی

مشخصات	واحد	میانگین و انحراف معیار
pH	-	۶/۰±۲/۶
هدایت الکتریکی (EC)	μs /cm	۲۹۸۰±۱۰
مواد جامد محلول (TDS)	mg /L	۲۲۶±۲
اکسیژن مورد نیاز بیوشیمیایی (BOD)	mg /L	۱۸۰۰±۲۰
اکسیژن مورد نیاز شیمیایی (COD)	mg/L	۳۵۴۰±۲۰

### یافته‌ها

نتایج حاصله از بررسی عملکرد پیل سوختی میکروبی با دو الکتروود نمد کربنی و گرافیت مسطح در تولید حداکثر شدت توان و حداکثر ولتاژ نسبت به شدت جریان در یک شرایط منقطع و با استفاده از فاضلاب سنتتیک با غلظت  $COD=5000 \text{ mg/L}$  در نمودار ۱ و ۲ نشان داده شده است. در مراحل اولیه راه‌اندازی راکتور میزان ولتاژ و میزان جریان در هر دو الکتروود پایین بوده، ولی بعد از چند مرحله راه‌اندازی و تلقیح میکروارگانیسم‌ها، لایه بیوفیلم بطور کامل بر روی آند تشکیل گردیده و منحنی پلاریزاسیون و شدت توان برای هر دو الکتروود ثبت گردید.

میزان حذف COD در محفظه آندی پیل سوختی میکروبی با استفاده از الکترودهای مختلف و فاضلاب مصنوعی به عنوان سوپسترا در طی چهار مرحله راه‌اندازی هر کدام به مدت ۷۲ h بررسی و نتایج حاصله در نمودار ۳ ثبت گردیده است. در هر چهار مرحله بعد از گذشت ۲۴ h حداکثر راندمان حذف مواد آلی صورت گرفته و بعد از گذشت سه مرحله بارگذاری در راکتور حاصل گردیده است.

CODi: غلظت COD اولیه (mg/L)

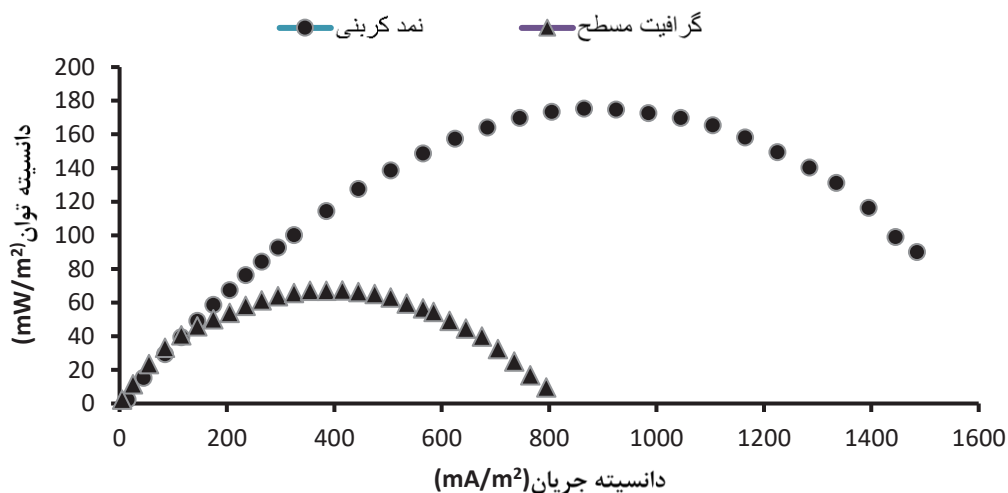
CODE: غلظت COD نهایی (mg/L)

برای ثبت داده‌های لازم جهت محاسبه توان، ولتاژ، جریان و همچنین رسم نمودار توان برحسب جریان و نمودار ولتاژ برحسب جریان از دستگاه تست پیل سوختی میکروبی جریان ثابت ساخت شرکت دانش گستر همگام با صنعت "طبرستان" مدل DGHS-EL25101 استفاده گردید. جریان در پیل سوختی به صورت خودکار با تقسیم ولتاژ بر مقاومت معین طبق معادله ۲ محاسبه و ثبت شد. همچنین سیستم محاسبات توان تولیدی را به صورت حاصل ضرب ولتاژ و جریان فراهم آورد (معادله ۳). امکان مشاهده لحظه‌ای منحنی پلاریزاسیون و منحنی چگالی توان که به ترتیب بیانگر تغییرات ولتاژ و چگالی توان پیل سوختی نسبت به چگالی جریان است. و مقادیر ولتاژ، جریان و توان به صورت خودکار با استفاده از کامپیوتر متصل به دستگاه تست پیل سوختی میکروبی و راکتور پیل سوختی میکروبی ثبت گردید (۱۶).

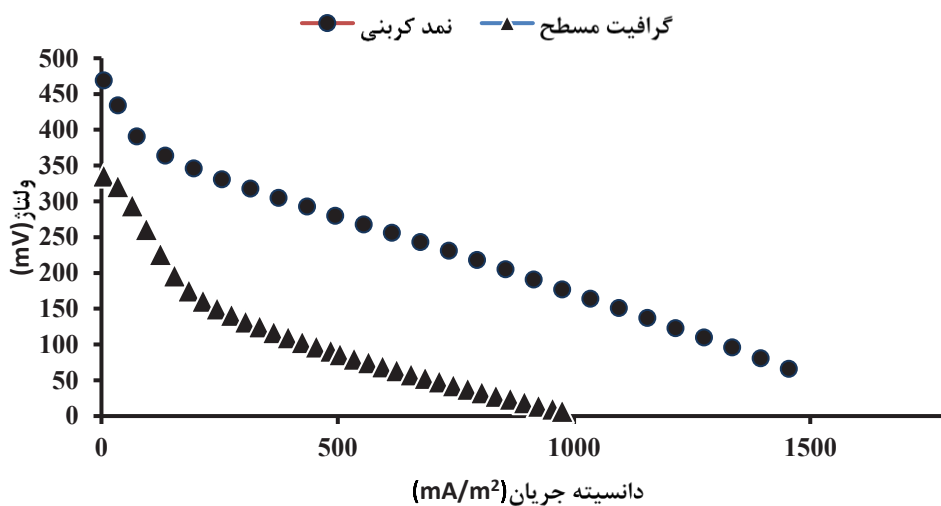
$$I=V/R \quad (2)$$

$$P=VI \quad (3)$$

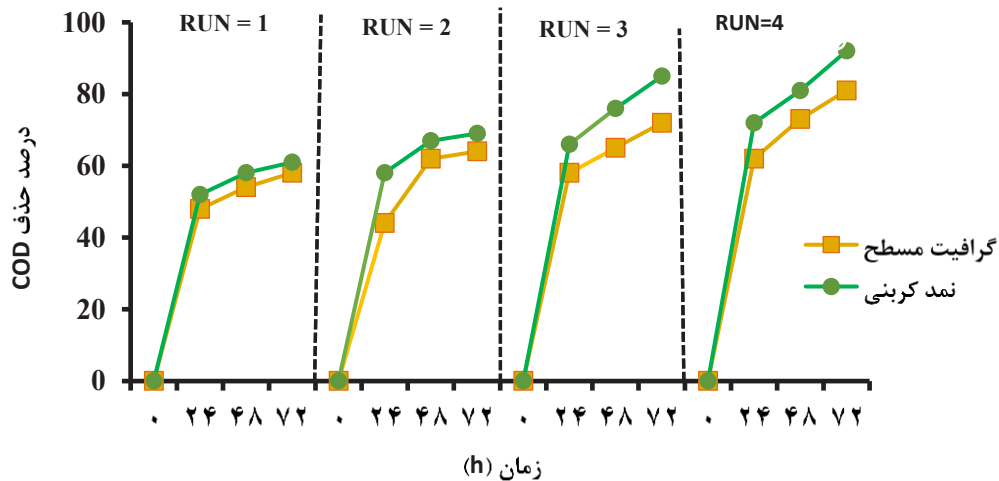
I: شدت جریان (آمپر)      R: مقاومت (اهم)  
V: ولتاژ (ولت)              P: توان تولیدی (وات)



نمودار ۱- شدت توان نسبت به شدت جریان در فاضلاب مصنوعی با الکترودهای مختلف در غلظت COD برابر  $5000 \text{ mg/L}$



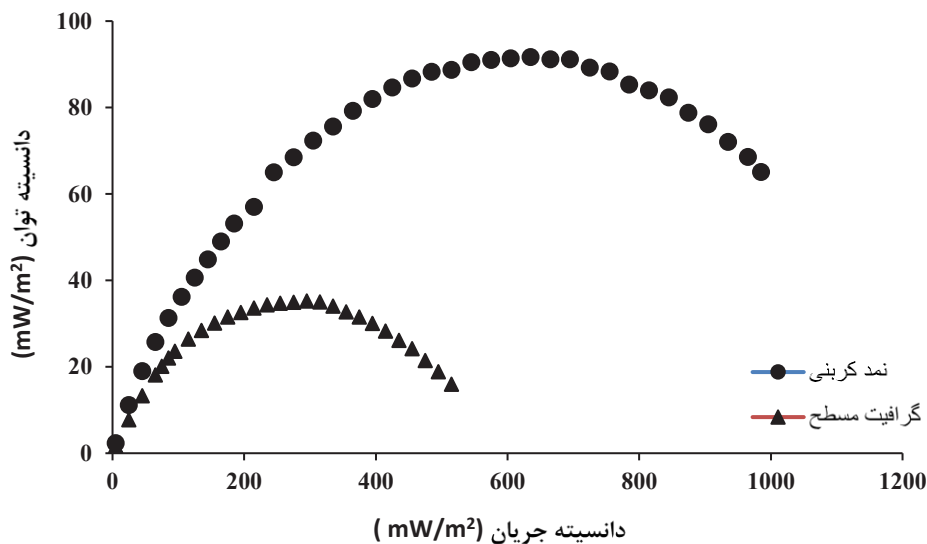
نمودار ۲- ولتاژ تولیدی نسبت به شدت جریان در فاضلاب مصنوعی با الکترودهای مختلف در غلظت COD برابر  $5000 \text{ mg/L}$



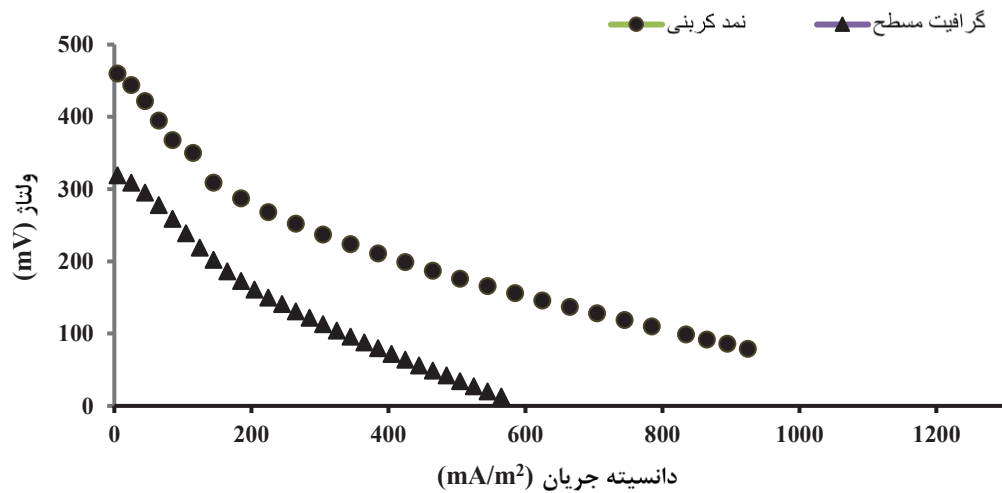
نمودار ۳- تغییرات حذف COD نسبت به زمان در مراحل مختلف راه اندازی پیل سوختی میکروبی با فاضلاب مصنوعی با الکترودهای نمود کربنی و گرافیت مسطح در غلظت COD برابر  $5000 \text{ mg/L}$

از فاضلاب مصنوعی مورد مقایسه قرار گرفت. نتایج منحنی‌های شدت توان نسبت به شدت جریان در نمودار ۴ و منحنی قطبیت (ولتاژ نسبت به شدت جریان) در نمودار ۵ برای الکترودهای مختلف ارزیابی قرار گرفت. کارایی بالای الکترود نمود کربن نسبت به گرافیت مسطح در تصفیه فاضلاب واقعی نوشابه سازی را تایید می‌کند. عملکرد الکترود نمود کربنی در هر دو فاضلاب (مصنوعی و نوشابه سازی) بهتر از گرافیت مشاهده گردید.

در مرحله بعدی سیستم MFC با استفاده از فاضلاب صنعتی واقعی از کارخانه نوشابه سازی با بکارگیری الکترودهای نمود کربنی و گرافیت مسطح در طی ۴ مرحله ۷۲ ساعته راه اندازی و نتایج راندمان پیل سوختی میکروبی در حذف COD در نمودار ۶ نشان داده شده است. عملکرد پیل سوختی میکروبی تغذیه شده با فاضلاب واقعی نوشابه سازی در شدت توان و شدت جریان تولیدی بعد از رسیدن MFC به شرایط پایدار بررسی و با نتایج حاصله



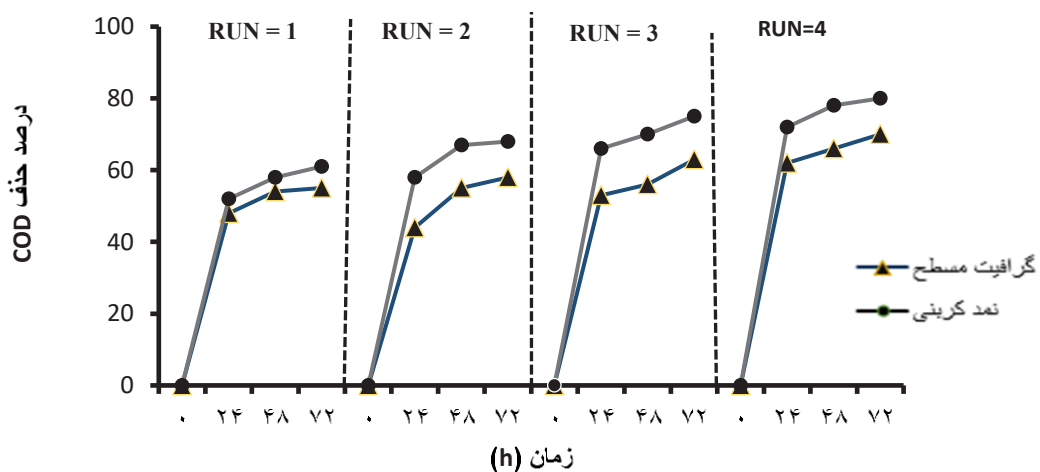
نمودار ۴- شدت توان نسبت به شدت جریان در فاضلاب واقعی نوشابه سازی با الکترودهای مختلف



نمودار ۵- ولتاژ تولیدی نسبت به شدت جریان در فاضلاب واقعی نوشابه سازی با الکترودهای مختلف

نمد کربنی ۸۵ درصد و برای الکترود گرافیت مسطح ۷۰ درصد بدست آمده است. در مقایسه با میزان حذف COD با استفاده از فاضلاب مصنوعی کارایی کمتری دارد.

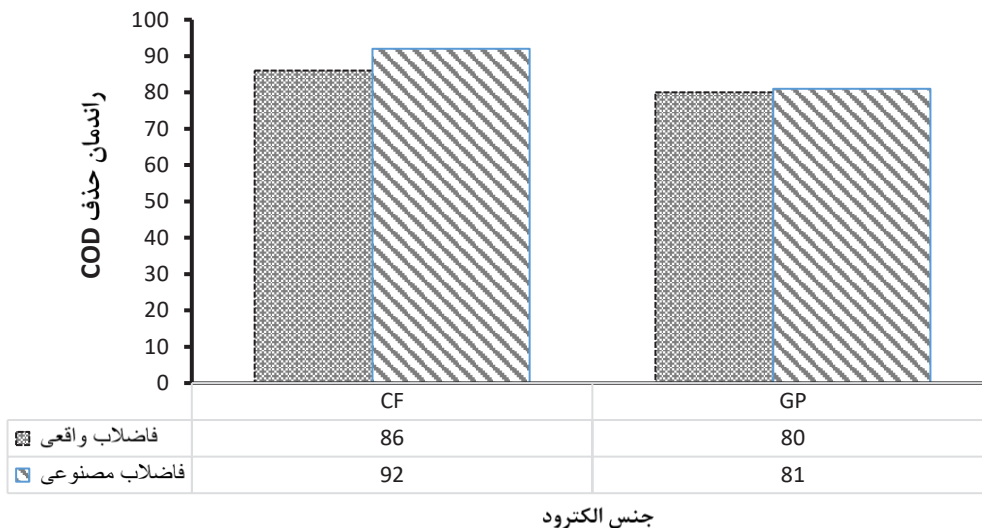
میزان حذف COD نسبت به زمان در مراحل مختلف راه اندازی MFC با فاضلاب واقعی نوشابه سازی در نمودار ۶ نشان داده شده است. حداکثر راندمان حذف COD برای الکترود



نمودار ۶- تغییرات حذف COD نسبت به زمان در مراحل مختلف راه اندازی پیل سوختی میکروبی با فاضلاب واقعی نوشابه سازی

با فاضلاب مصنوعی در حذف COD و تولید شدت توان و جریان نسبت به پیل سوختی میکروبی دو محفظه‌ای تغذیه شده با فاضلاب واقعی بالاتر است.

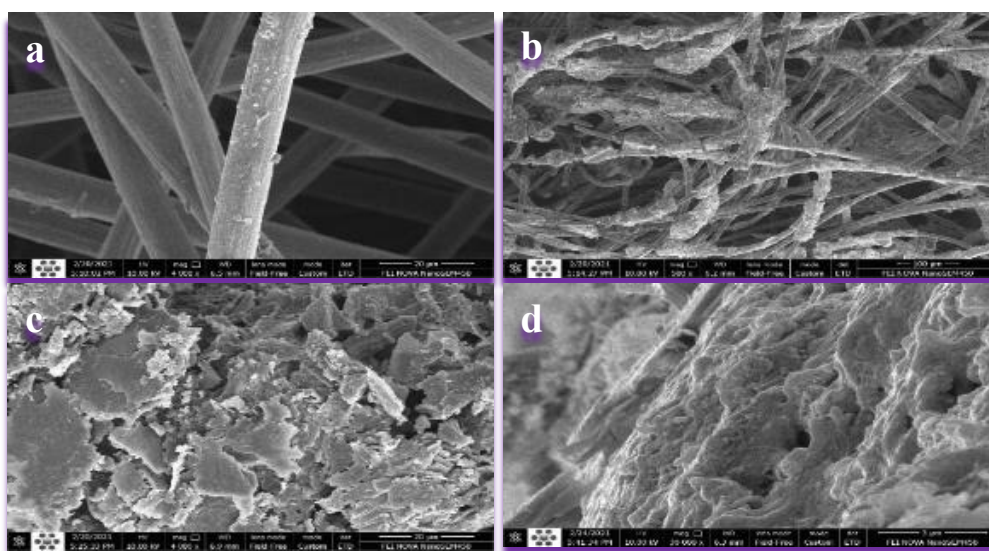
نتایج عملکرد MFC راه اندازی شده با فاضلاب مصنوعی و فاضلاب واقعی نوشابه سازی در نمودار ۷، مورد مقایسه قرار گرفت. کارایی پیل سوختی میکروبی دو محفظه‌ای تغذیه شده



نمودار ۷- میزان حذف COD در فاضلاب مصنوعی و نوشابه سازی با استفاده از الکترودهای نمد کربنی و گرافیت مسطح

تصاویر SEM از نمد کربنی بدون لایه بیوفیلم (بدون میکروارگانیزم) و نمد کربنی بعد از تشکیل لایه بیوفیلم را نشان می‌دهد. تصاویر الکترود گرافیت مسطح قبل و بعد از تلقیح باکتری‌ها به وضوح در شکل ۲ (c و d) ثبت گردیده است.

تصاویر SEM حاصله با استفاده از میکروسکوپ الکترونی بیانگر تشکیل لایه بیوفیلم بعد از راه اندازی پیل سوختی میکروبی با میکروارگانیزم‌های بی‌هوازی در محفظه آند، بر روی سطح الکترودهای نمد کربنی و گرافیت مسطح است. شکل ۲ (a و b)



شکل ۲- تصاویر SEM از الکترود نمد کربنی قبل (a) و بعد از تشکیل لایه بیوفیلم (b)، الکترود گرافیت مسطح قبل (c) و بعد از تشکیل لایه بیوفیلم (d)

## بحث

کربن حداکثر توان  $16/26 \text{ mW/m}^2$  تولید نمایند (۲۲). در بررسی مشابه دیگر توسط Colombo و همکاران در سال (۲۰۲۱)، با به کارگیری الکتروود نمد کربنی شدت توان  $356 \text{ mW/m}^2$  تولید کنند که با نتایج مطالعه حاضر همخوانی دارد (۲۳).

نتایج حاصله از میزان حذف COD در محفظه آندی پیل سوختی میکروبی با استفاده از الکتروودهای مختلف و فاضلاب مصنوعی به عنوان سوپسترا در نمودار ۳ نشان می‌دهد، بخش اعظمی از مواد آلی در طی ۲۴ ساعت اول مورد مصرف میکروارگانیسم‌های بی‌هوازی قرار می‌گیرد. این مقدار برای نمد کربنی ۶۱ درصد و گرافیت مسطح ۵۸ درصد بدست آمده است. در مرحله دوم بارگذاری، این مقدار به ترتیب ۶۹ و ۶۲ درصد برای CF و GP نشان از تشکیل بیشتر لایه بیوفیلم و تغذیه بیشتر میکروارگانیسم‌های بی‌هوازی از گلوکز به عنوان منبع کربن است. بعد از گذشت ۷۲ ساعت میزان حذف COD در مرحله سوم به ۸۳ درصد برای نمد کربنی و ۷۱ درصد گرافیت مسطح حاصل گردید و در نهایت در مرحله چهارم راه اندازی MFC با فاضلاب مصنوعی راندمان ۹۲ و ۸۱ درصد به ترتیب برای الکتروود CF و GP تعیین گردید. در ادامه بررسی به علت اسیدی شدن محفظه آند و تجمع مواد سمی در محیط و کاهش مواد غذایی برای میکروارگانیسم‌ها بعد از این مرحله افزایش چشمگیری در حذف COD مشاهده نمی‌شود در تحقیقات پیشین به عمل آمده توسط Dimou و همکاران در سال (۲۰۱۷) در تصفیه فاضلاب با استفاده از GP درصد حذف مواد آلی را ۹۱ درصد بدست آورده‌اند (۲۴). نتایج این تحقیق و مطالعات پیشین بیانگر دستاوردهای امیدوار کننده در مسیر کاربردی بودن سیستم MFC برای تصفیه فاضلاب‌های صنعتی به همراه تولید انرژی پاک است.

مطابق با نتایج نمودار ۴ و ۵ حداکثر ولتاژ، شدت توان و جریان تولیدی در تصفیه فاضلاب نوشابه سازی با استفاده از الکتروودهای نمد کربنی به ترتیب  $460 \text{ mV}$ ،  $91/6 \text{ mW/m}^2$  و  $635 \text{ mA/m}^2$  و برای الکتروود گرافیت مسطح  $319 \text{ mV}$ ،  $35 \text{ mW/m}^2$  و  $315 \text{ mA/m}^2$  بدست

نتایج بدست آمده از این مطالعه نشان داد، جنس الکتروود، نوع و غلظت سوپسترا در محفظه آندی از پارامترهای تاثیرگذار در عملکرد پیل سوختی میکروبی دو محفظه‌ای در حذف COD و تولید جریان خواهد بود. طبق نتایج، نمودار ۱ و ۲ میزان حداکثر شدت توان و حداکثر ولتاژ و جریان تولیدی پیل سوختی میکروبی دو محفظه‌ای به ترتیب  $336 \text{ mV}$  و  $44/12 \text{ mW/m}^2$  و  $455 \text{ mA/m}^2$  با استفاده از گرافیت مسطح (GP) و  $466 \text{ mV}$  و  $175/28 \text{ mW/m}^2$  و  $855 \text{ mA/m}^2$  نمد کربن (CF) حاصل گردید. مقایسه نتایج نشان می‌دهد، حداکثر ولتاژ، شدت توان و شدت جریان با استفاده از الکتروود نمد کربنی به میزان بالاتری حاصل گردیده است و دلیل آن ساختار الکتروود نمد کربنی بوده که دارای منافذ زیادی بوده و اتصال میکروارگانیسم‌های الکتروژن به سطح الکتروود نمد کربن بخوبی انجام می‌گیرد (۱۷). اساس کار سیستم پیل سوختی میکروبی بر نقل و انتقال الکترون‌ها استوار بوده، لذا وجود خلل و فرج روی الکتروود نمد کربنی نقل و انتقال الکترون را تسهیل می‌نماید. در گرافیت مسطح، سطحی عظیم و بافت مکانیکی خوب و پایداری وجود دارد (۱۸). ولی به دلیل سطح مسطح و صاف الکتروود گرافیت مسطح، اتصال میکروارگانیسم‌ها ضعیف بوده و سرعت و میزان انتقال الکترون پایین بوده است (۱۹). نتایج تحقیقات پیشین مشابه مطالعات انجام گرفته توسط Yavare و همکاران در سال ۲۰۱۳، با استفاده از الکتروودهای گرافیت مسطح و کربن نمدی در پیل سوختی میکروبی، توانستند بیشینه میزان حذف COD را  $49/7$  درصد گزارش دهند (۲۰). در مطالعه مشابه دیگر توسط Abbasi و همکاران در سال (۲۰۱۵) انجام گرفت، در این بررسی فاضلاب صنایع مختلفی توسط MFC مورد تصفیه قرار گرفت و در نتیجه این بررسی، توانستند راندمان حذف COD بین ۸۵ تا ۹۰ درصد با زمان ماند هیدرولیکی  $96 \text{ h}$  را استحصال کنند (۲۱). در بررسی دیگر توسط Mashkour و همکاران، توانستند با استفاده از گرافیت مسطح به همراه گلوکز به عنوان منبع

به الکتروود آند، عملکرد بهتری نسبت به گرافیت مسطح در کاهش مواد آلی، تولید توان و ولتاژ و جریان داشته است. MFC تغذیه شده با فاضلاب مصنوعی کارایی نسبتاً بهتری در حذف COD و تولید جریان بیوالکتریسته دارد. به هنگام راه اندازی پیل سوختی میکروبی با فاضلاب واقعی (نوشابه سازی) با الکترودهای نمد کربنی و گرافیت مسطح، به خاطر دارا بودن ناخالصی‌ها و آلاینده‌های سمی فعالیت میکروارگانسیم‌های الکتروژن، در محفظه آند را تحت تاثیر قرار داده و باعث کاهش کارایی سیستم MFC شده است. نتایج حذف COD و تولید جریان بیانگر کارایی قابل قبول پیل سوختی میکروبی در تصفیه فاضلاب صنعتی واقعی از جمله فاضلاب صنایع غذایی بوده و می‌توان به عنوان یکی از منابع تولید انرژی‌های تجدید پذیر برای تولید بیوانرژی از زیست توده استفاده کرد. لذا با توجه به نتایج مطالعه حاضر استفاده از پیل سوختی میکروبی دو محفظه‌ای به عنوان پیش تصفیه در تصفیه خانه‌های صنایع غذایی مانند نوشابه سازی جهت انجام تصفیه اولیه و بازیافت بیوانرژی از فاضلاب پیشنهاد می‌گردد.

### ملاحظات اخلاقی

نویسندگان کلیه نکات اخلاقی شامل عدم سرقت ادبی، انتشار دوگانه، تحریف داده‌ها و داده‌سازی را در این مقاله رعایت کرده‌اند. کد اخلاق این مقاله IR.UMSU.REC.1399.313 است.

### تشکر و قدردانی

این مقاله حاصل بخشی از پایان نامه دانشجوی کارشناسی ارشد رشته مهندسی بهداشت محیط در سال ۱۳۹۹ و کد طرح ۲۸۱۴ است که با حمایت مالی دانشگاه علوم پزشکی و خدمات بهداشتی، درمانی شهر ارومیه، در آزمایشگاه تحقیقاتی دانشکده بهداشت اجرا شده است. بدین وسیله از کلیه کسانی که ما را در اجرای این پایان نامه یاری نمودند، کمال تشکر را داریم.

آمد. عملکرد نسبتاً پایین برای فاضلاب‌های واقعی در مقایسه با فاضلاب مصنوعی می‌تواند، ناشی از ترکیبات و ناخالصی‌هایی باشد که در فاضلاب‌های صنعتی واقعی وجود داشته و بر روی فعالیت‌های میکروارگانسیم‌ها تاثیر گذاشته و باعث کاهش عملکرد و یا نابودی یک سری از توده‌های زیستی بدلیل وجود سایر مواد سمی در فاضلاب واقعی صنایع است. در سال ۲۰۱۲ Malakootian و همکاران توانستند از تصفیه فاضلاب لبنیات سازی راندمان حذف COD برابر با ۷۶ درصد را بدست آورند (۲۵). در مطالعه به عمل آمده توسط Rahmani و همکاران در سال ۲۰۲۰ با استفاده از الکتروود کربن نمدی با فاضلاب مصنوعی با COD برابر با ۵۰۰۰ ولتاژ ۳۷۰ mV را کسب کنند (۱۳). طبق مطالعات به عمل آمده توسط Pramanik با استفاده از الکتروود کربن نمدی و با استفاده از هگزا سیانو فرات به دانسیته جریان  $2000 \text{ mA/m}^2$  حداکثر ولتاژ  $378 \text{ mV}$  و حداکثر دانسیته توان  $1410 \text{ mW/m}^2$  و راندمان کلمبیک ۲۲ درصد برسند (۲۶).

بررسی نتایج مطالعات پیشین و مطالعه حاضر، نشان از همخوانی این مطالعات داشته و در این تحقیق راندمان و عملکرد بهتری در تصفیه فاضلاب و تولید جریان نشان می‌دهد. بررسی مرفولوژی سطح الکترودها نشان داد، که پوشش کامل از باکتری‌های الکتروژن بی‌هوازی در سطح الکتروود نمد کربنی بصورت متراکم صورت گرفته است. الکتروود گرافیت مسطح بدلیل داشتن سطح صاف و عدم روزه‌های کافی، استقرار میکروارگانسیم‌های بی‌هوازی کمتر باشد.

### نتیجه گیری

نتایج حاصل این تحقیق نشان داد، جنس و ساختار الکتروود نقش به‌سزایی در عملکرد پیل سوختی میکروبی دو محفظه‌ای دارد. با مقایسه نتایج راندمان حذف COD و تولید جریان الکتریسته با دو الکتروود نمد کربنی و گرافیت مسطح مشخص گردید، الکتروود نمد کربنی به علت نقل و انتقال بهتر الکترون‌ها از میکروارگانسیم‌ها

## References

- Liu J, Liu Y, Feng C, Wang Z, Jia T, Gong L, et al. Enhanced performance of microbial fuel cell using carbon microspheres modified graphite anode. *Energy Science & Engineering*. 2017;5(4):217-25.
- Yu F, Wang C, Ma J. Applications of graphene-modified electrodes in microbial fuel cells. *Materials*. 2016;9(10).
- Tsai H-Y, Hsu W-H, Huang Y-C. Characterization of carbon nanotube/graphene on carbon cloth as an electrode for air-cathode microbial fuel cells. *Journal of Nanomaterials*. 2015;2015:686891.
- Soltani F, Navidjoui N, Khorsandi H, Rahimnejad M, Alizadeh S. A novel bio-electro-Fenton system with dual application for the catalytic degradation of tetracycline antibiotic in wastewater and bioelectricity generation. *RSC Advances*. 2021;11(44):27160-73.
- Logan BE, Wallack MJ, Kim K-Y, He W, Feng Y, Saikaly PE. Assessment of microbial fuel cell configurations and power densities. *Environmental Science & Technology Letters*. 2015;2(8):206-14.
- Rahman A, Borhan MS, Rahman S. Evaluation of microbial fuel cell (MFC) for bioelectricity generation and pollutants removal from sugar beet processing wastewater (SBPW). *Water Science and Technology*. 2018;77(1-2):387-97.
- Logan BE. Exoelectrogenic bacteria that power microbial fuel cells. *Nature Reviews Microbiology*. 2009; 7(5): 375-81.
- Kumar SS, Kumar V, Malyan SK, Sharma J, Mathimani T, Maskarenj MS, et al. Microbial fuel cells (MFCs) for bioelectrochemical treatment of different wastewater streams. *Fuel*. 2019;254:115526.
- Rahimnejad M, Adhami A, Darvari S, Zirepour A, Oh S-E. Microbial fuel cell as new technology for bioelectricity generation: A review. *Alexandria Engineering Journal*. 2015;54(3):745-56.
- Lovley DR. Microbial fuel cells: novel microbial physiologies and engineering approaches. *Current Opinion in Biotechnology*. 2006;17(3):327-32.
- Nam JY, Kim HW, Lim KH, Shin HS. Effects of organic loading rates on the continuous electricity generation from fermented wastewater using a single-chamber microbial fuel cell. *Bioresource Technology*. 2010;101:S33-37.
- Markos J. *Mass Transfer in Chemical Engineering Processes*. UK: Intechopen; 2011.
- Rahmani AR, Navidjoui N, Rahimnejad M, Alizadeh S, Samarghandi MR, Nematollahi D. Effect of different concentrations of substrate in microbial fuel cells toward bioenergy recovery and simultaneous wastewater treatment. *Environmental Technology*. 2020;1-9. doi: 10.1080/09593330.2020.1772374.
- Rahmani AR, Navidjoui N, Rahimnejad M, Nematollahi D, Leili M, Samarghandi MR, et al. Application of the eco-friendly bio-anode for ammonium removal and power generation from wastewater in bio-electrochemical systems. *Journal of Cleaner Production*. 2020;243.
- Wang H, Ren ZJ. A comprehensive review of microbial electrochemical systems as a platform technology. *Biotechnology advances*. 2013; 31(8): 1796-807.
- He C-S, Mu Z-X, Yang H-Y, Wang Y-Z, Mu Y, Yu H-Q. Electron acceptors for energy generation in microbial fuel cells fed with wastewaters: A mini-review. *Chemosphere*. 2015;140:12-17.
- Zhao Y, Ma Y, Li T, Dong Z, Wang Y. Modification of carbon felt anodes using double-oxidant HNO<sub>3</sub>/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> for application in microbial fuel cells. *RSC Advances*. 2018;8(4):2059-64.
- Di Lorenzo M, Scott K, Curtis TP, Head IM. Effect of increasing anode surface area on the performance of a single chamber microbial fuel cell. *Chemical Engineering Journal*. 2010;156(1):40-48.
- Wei J, Liang P, Huang X. Recent progress in electrodes for microbial fuel cells. *Bioresource Technology*. 2011;102(20):9335-44.
- Yavari Z, Tashauoei H, Naddafi K, Izanloo H,

- Khazae M, Mahmoodian M. Electricity generation from synthetic wastewater treatment in microbial fuel cell. Qom University of Medical Sciences Journal. 2013;6(4):96-103 (in Persian).
21. Abbasi U, Jin W, Pervez A, Bhatti ZA, Tariq M, Shaheen S, et al. Anaerobic microbial fuel cell treating combined industrial wastewater: Correlation of electricity generation with pollutants. Bioresource Technology. 2016;200:1-7.
22. Mashkour M, Rahimnejad M. Effect of various carbon-based cathode electrodes on the performance of microbial fuel cell. Biofuel Research Journal. 2015;2(4):296-300.
23. Colombo A, Schievano A, Trasatti SP, Morrone R, D'Antona N, Cristiani P. Signal trends of microbial fuel cells fed with different food-industry residues. International Journal of Hydrogen Energy. 2017;42(3):1841-52.
24. Dimou O. Performance of pilot scale plug flow microbial fuel cell for sustainable wastewater treatment and energy recovery [dissertation]. UK: Heriot-Watt University; 2017.
25. Malakootian M, Amin M, Mansourian H, Jaafarzadeh N. Electricity production through treatment of simulated wastewater of food industries using dual chamber microbial fuel cell (MFC) with Nafions membrane. Iranian Journal of Health and Environment. 2011;4(4):385-400 (in Persian).
26. Pramanik S, Rana M. Bioelectricity generation using carbon felt electrode in microbial fuel cell (MFC) inoculated with mixed cultures. Trends in Renewable Energy. 2017;3(2):129-40.



Available online: <https://ijhe.tums.ac.ir>

Original Article



## Application of dual chamber microbial fuel cell with aeration cathode for bioelectricity generation and simultaneous industrial wastewater treatment

Farah Rashadi<sup>1</sup>, Nahid Navidjoui<sup>1,\*</sup>, Ali Ahmad Aghapour<sup>1</sup>, Mostafa Rahimnejad<sup>2</sup>

1- Environmental Health Engineering, School of Public Health, Urmia University of Medical Sciences, Urmia, Iran

2- Department of Chemical Engineering, Faculty of Chemical Engineering, Noshirvan University of Technology, Babol, Iran

### ARTICLE INFORMATION:

**Received:** 10 October 2021

**Revised:** 15 December 2021

**Accepted:** 19 December 2021

**Published:** 21 December 2021

**Keywords:** Beverage wastewater, Microbial fuel cell, Chemical oxygen demand removal, Bioenergy, Industrial wastewater treatment

**\*Corresponding Author:**

[n.navidjoui@gmail.com](mailto:n.navidjoui@gmail.com)

### ABSTRACT

**Background and Objective:** Microbial fuel cell (MFC) is a new green technology that uses the catabolic ability of microorganisms to produce bioenergy while simultaneously removing organic matter and other wastewater contaminants. Electrode material is one of the factors affecting the performance of microbial fuel cells. The aim of this study was to investigate the performance of microbial fuel cells in COD removal and bioenergy production from synthetic and real beverage wastewater.

**Materials and Methods:** In this research, a two-chamber microbial fuel cell with Nafion membrane and aerated cathode was set up using two electrodes made of carbon felt and flat graphite after being contacted by synthetic wastewater with a concentration of COD 5000 mg/L and real beverage wastewater. Organic matter removal efficiency and voltage, power density and maximum current were determined.

**Results:** Experimental results showed that maximum COD removal efficiency of 92 % was achieved in synthetic wastewater and with a carbon felt electrode. In this condition, maximum voltage, power density and output current density of 469 mV, 175.28 mW/m<sup>2</sup>, and 855 mA/m<sup>2</sup>, were obtained, respectively. However, by using real industrial wastewater (beverage), maximum removal efficiency of COD, voltage, power density and output current density, related to carbon felt electrodes were obtained as 84 %, 460 mV, 91/65 mW/m<sup>2</sup>, and 635 mA/m<sup>2</sup>, respectively.

**Conclusion:** The findings showed that synthetic wastewater outperforms microbial fuel cells in terms of bioelectric production and organic matter removal as compared to real wastewater (beverage). The reason for the decrease in the cell performance might be the presence of solids and other confounding pollutants in real wastewater.

Please cite this article as: Rashadi F, Navidjoui N, Aghapour AA, Rahimnejad M. Application of dual chamber microbial fuel cell with aeration cathode for bioelectricity generation and simultaneous industrial wastewater treatment. *Iranian Journal of Health and Environment*. 2021;14(3):473-86.

