

مقاله پژوهشی

بهبود عملکرد پیل سوختی میکروبی با استفاده از الکتروُد گرافیت مسطح اصلاح شده با نیکل جهت تجزیه مواد آلی فاضلاب و تولید همزمان جریان بیوالکتریسته

فاطمه محمودزاده^{۱،۲}، ناهید نویدجوی^{۳،۴*}، صابر علیزاده^۴، مصطفی رحیم نژاد^۵^۱ کمیته تحقیقات دانشجویی، دانشگاه علوم پزشکی ارومیه، ارومیه، ایران^۲ گروه مهندسی بهداشت محیط، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی ارومیه، ارومیه، ایران^۳ مرکز تحقیقات عوامل اجتماعی مؤثر بر سلامت، پژوهشکده بالینی، دانشگاه علوم پزشکی ارومیه، ارومیه، ایران^۴ دانشکده شیمی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران^۵ گروه مهندسی شیمی، مرکز تحقیقات سوخت های زیستی و انرژی های تجدیدپذیر، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل، ایران

*نویسنده مسئول: مرکز تحقیقات عوامل اجتماعی مؤثر بر سلامت، پژوهشکده بالینی، دانشگاه علوم پزشکی ارومیه، ارومیه، ایران. ایمیل: n.navidjouy@gmail.com

دریافت: ۱۴۰۲/۱۰/۲۴ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۶/۱۷

چکیده

مقدمه: پیل سوختی میکروبی یک فرایند نوظهور در زمینه تصفیه فاضلاب و تولید همزمان بیوانرژی است. کاربرد نانوذرات نیکل جهت اصلاح سطح الکترودها می تواند بر کارایی این فرایند در تولید انرژی و تصفیه فاضلاب مؤثر باشد.

اهداف: این مطالعه، با هدف بررسی تاثیر اصلاح الکترود آند با نانو ذرات نیکل در تولید بیوانرژی و حذف مواد آلی از فاضلاب با استفاده از سیستم پیل سوختی میکروبی انجام گردید.

مواد و روش ها: پیل سوختی میکروبی دو محفظه ای مجهز به الکترودهای آند گرافیت مسطح و گرافیت مسطح اصلاح شده در شرایط دمایی و راهبری ثابت راه اندازی گردید، حداکثر ولتاژ، دانسیته جریان و توان تولیدی، همچنین راندمان حذف مواد آلی فاضلاب با استفاده از پیل سوختی میکروبی بررسی شد.

نتایج: کارایی فرایند پیل سوختی میکروبی در تولید انرژی و حذف مواد آلی با استفاده از گرافیت مسطح اصلاح شده با نیکل در مقایسه با گرافیت مسطح بهبود یافت، در نتیجه حداکثر ولتاژ، دانسیته توان و جریان تولیدی با استفاده از گرافیت مسطح اصلاح شده ۴۲۲ میلی ولت، ۱۰۶/۵۸ میلی وات بر مترمربع و ۷۳۰ میلی آمپر بر مترمربع حاصل شد. حداکثر راندمان حذف مواد آلی (COD) بعد از ۲۴ ساعت به ۸۰ درصد رسید. اما با استفاده از الکترود گرافیت مسطح، راندمان حذف به ۷۶ درصد کاهش یافت.

نتیجه گیری: نتایج نشان داد استفاده از نانوذرات نیکل در اصلاح سطح آند به دلیل رسانایی و سازگاری مناسب با لایه بیوفیلم، می تواند منجر به بهبود کارایی فرایند پیل سوختی میکروبی گردد و به عنوان یک فرایند نوین دارای پتانسیل بالقوه جهت تصفیه فاضلاب های شهری و صنایع حاوی آلاینده های آلی در مقیاس عملی مورد استفاده قرار گیرد.

کلمات کلیدی: پیل سوختی میکروبی، نانوذرات نیکل، گرافیت مسطح، تصفیه فاضلاب

۱. مقدمه

انواع فاضلاب های خانگی، صنایع مختلف از جمله آبجوسازی (۳)، لبنی (۴)، نساجی و رنگ (۵)، دارویی (۶)، پساب های کشاورزی و شیرابه محل دفن پسماند بوده (۷) و راندمان حذف COD برای فاضلاب صنایع آبجوسازی، غذا و لبنیات به ترتیب بین ۲۱ تا ۱۰۰ درصد و ۸۸ درصد حاصل شده است (۸).

یک پیل سوختی میکروبی دو محفظه ای از سه قسمت اصلی، محفظه آندی، غشا تبادل پروتون و محفظه کاتدی تشکیل شده است (۹). محفظه بی هوازی آند شامل

پیل سوختی میکروبی (MFCs) microbial fuel cells امروزه به عنوان فرایندی نوظهور جهت تصفیه انواع فاضلاب های شهری و صنایع مختلف و منبع انرژی تجدیدپذیر شناخته شده است (۱). در این فرایند، انرژی ذخیره شده در پیوندهای شیمیایی ترکیبات آلی توسط میکروارگانیسم ها به انرژی الکتریسته تبدیل می گردد (۲).

از قابل توجه ترین مزیت های پیل سوختی میکروبی در مقایسه با سایر فرایندهای تصفیه فاضلاب، توانایی آن در تصفیه محدوده گسترده ای از COD (chemical oxygen demand) است.

سایر روش‌های اصلاح برای الکتروود آند مانند $\text{Ni@Fe}_2\text{O}_3$ /MXenecf (۲۰) به‌میزان قابل توجهی در بهبود عملکرد فرایند پیل سوختی میکروبی و افزایش توان تولیدی تاثیرگذار بوده، و به‌عنوان یک کاتالیست کم‌هزینه، دارای مقاوت بالا و سطح مناسب جهت رشد بیوفیلم و دوستدار محیط زیست معرفی گردیده است (۱۷، ۱۸).

۲. اهداف

این مطالعه با هدف پاسخ به سوالات زیر انجام شد:

- (۱) میزان تاثیر اصلاح سطح الکتروود آند در تجزیه مواد آلی در پیل سوختی میکروبی چقدر است؟
 - (۲) میزان تاثیر اصلاح سطح الکتروود آند در حداکثر ولتاژ، دانسیته جریان، دانسیته توان تولیدی در پیل سوختی میکروبی چقدر است؟
 - (۳) حضور نانوذرات نیکل چه تاثیری در رشد و فعالیت باکتری‌های الکتروژنز در سطح الکتروود آند دارد؟
- لذا در مطالعه حاضر از نانوذرات نیکل جهت اصلاح سطح الکتروود گرافیت مسطح به‌عنوان بیوآند، به‌وسیله روش ترسیب الکتروشیمیایی مورد استفاده قرار گرفت. همچنین راندمان تجزیه COD و میزان توان تولیدی توسط دو الکتروود گرافیت مسطح و گرافیت مسطح اصلاح‌شده مقایسه شد.

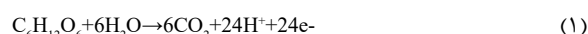
۳. مواد و روش‌ها

مطالعه حاضر از نوع مطالعه تجربی بوده که در مقیاس آزمایشگاهی، با استفاده از راکتور پیل سوختی میکروبی دو محفظه‌ای و به‌صورت تغذیه ناپیوسته راه‌اندازی شد.

۳.۱. ساخت پیل سوختی میکروبی

راکتور پیل سوختی میکروبی مورد استفاده در این مطالعه به‌صورت دو محفظه‌ای از جنس ورقه‌های پلکسی گلاس شامل محفظه آند و کاتد با حجم مفید ۳۵۰ میلی‌لیتر طراحی گردید. غشای تبادل پروتون (Nafion 117, Sigma-Aldrich, USA) با ابعاد ۵×۵ سانتی‌متر جهت جداسازی محفظه آند و کاتد، همچنین تبادل یون H^+ تولیدی از محفظه آند به کاتد استفاده شد (۲۱). به‌منظور حذف هر گونه ناخالصی، غشا مطابق با کاتالوگ طی پنج مرحله، به‌ترتیب ابتدا یک ساعت در آب دیونیزه، سپس یک ساعت در محلول پراکسید هیدروژن ۳ درصد، یک ساعت در آب دیونیزه، یک ساعت در HCL یک مولار و در نهایت به‌مدت یک ساعت در آب دیونیزه تحت عملیات پیش تصفیه قرار گرفت. تمامی این مراحل در دمای ۸۰ درجه سانتی‌گراد انجام شد (۲۲). نمک کربن (CF)، گرافیت (Gp) و گرافیت اصلاح‌شده با استفاده از عنصر نیکل (Nickle@ Graphite Plate: Ni@GP) با ابعاد ۴×۳ سانتی‌متر

سوبسترا و اجتماع باکتری‌های الکتروژنز است. مواد آلی به‌وسیله فعالیت اکسیداتیو باکتری‌ها تجزیه و e^- و H^+ تولید می‌شود (معادله ۱) (۱۰-۱۲). الکترون تولیدی توسط الکتروود آند جذب شده و از طریق یک مدار که شامل یک مقاومت خارجی است به سمت کاتد جریان پیدا می‌کند. همچنین H^+ تولیدشده از طریق غشای تبادل پروتون به محفظه کاتدی انتقال یافته و در محفظه کاتدی، اکسیژن به‌عنوان پذیرنده نهایی الکترون احیا و ترکیب H_2O تولید می‌شود. (معادله ۲) (۱۰، ۱۱).



مطالعات اخیر نشان‌دهنده، توجه محققین به اصلاح ساخت الکتروود جدید برای آند و کاتد به‌عنوان یک رویکرد موثر جهت بهبود عملکرد MFCS است (۱۳). مطالعه مروری Hiudatu و همکاران در سال ۲۰۱۷ با بررسی تاثیر نانولوله کربنی، فولاد ضدزنگ، پلیمرهای رسانا، اکسیدهای فلزی و الکترولیت‌ها برای پوشش سطح الکتروود آند نشان داد، استفاده از نانوذرات مختلف به‌منظور اصلاح الکتروودهای آند با توجه به ویژگی و ساختار منحصر به فرد هر ماده عملکرد متفاوتی را دارد. نتایج کلی این مطالعه نشان می‌دهد اصلاح سطح آند با تغییر در خواص فیزیکی و شیمیایی آن به‌وسیله بهبود اتصال میکروبی، افزایش سطح قابل دسترسی الکتروشیمیایی الکتروودها، افزایش رسانایی و انتقال الکترون خارج سلولی، کارایی MFCS را بهبود می‌بخشد (۱۴). نتایج مطالعه Yu و همکاران نیز با بررسی الکتروود گرافن نشان داد، گرافن به‌دلیل خواص فیزیکی و شیمیایی عالی آن، از جمله سطح ویژه بالا، رسانایی الکتریکی و زیست‌سازگاری فوق‌العاده به‌عنوان الکتروود کاتد و آند در MFC استفاده شده است. اما استحکام مکانیکی پایین، استفاده آن در مقیاس بزرگ را با مشکل مواجه کرده است، بنابراین جهت کاربرد واقعی گرافن و رفع این محدودیت، اصلاح گرافن از طریق فرایندهای فرآیند غوطه‌وری، تبخیر آمونیاک، الکترواستاتیکی، فوم نیکل نه تنها خواص مکانیکی آن را حفظ کرده بلکه ساختار متخلخل، رسانایی گرافن را نیز افزایش می‌دهد. به‌طوری که دانسیته توان الکتروود گرافن اصلاح‌شده به ۲۶۶۸ میلی‌وات بر مترمربع به‌دست آمد که نسبت به گرافن ۱۸ برابر افزایش داشت (۱۵).

همچنین در مطالعات مختلف دیگر استفاده از نانوذرات نیکل به‌عنوان پوششی جهت اصلاح الکتروودهای کاتد از جمله Ni/C (۱۶)، Ti/Ni (۱۷)، rGO/Ni (۱۸)، Fe/Ni (۱۹) و

به عنوان الکترودهای کاتد و آند مورد استفاده قرار گرفت.

۲.۳. روش آماده سازی و ساخت الکترودها

الکترودهای آند و کاتد قبل از استفاده جهت حذف ناخالصی های موجود، به مدت ۲۴ ساعت در HCL یک مولار، سپس ۲۴ ساعت در NaOH یک مولار خیسانده و در نهایت با آب مقطر دوبار تقطیر شست و شو داده شد (۲۳). بعد از شست و شو، جهت اصلاح گرافیت مسطح با عنصر نیکل،

به روش ترسیب الکتروشیمیایی از نیکل سخت استفاده گردید. این فرایند در یک راکتور تک محفظه ای متشکل از یک صفحه فلزی نیکل به عنوان آند و صفحه گرافیت مسطح به عنوان کاتد در محلول الکترولیت حاوی سولفات نیکل، کلراید آمونیوم و اسید بوریک مطابق با غلظت های جدول ۱ در دمای محیط با اعمال چگالی جریان ۷۰۰ میلی آمپر بر سانتی متر مربع انجام شد.

جدول ۱. مواد شیمیایی مورد نیاز در محلول الکترولیت ترسیب الکتروشیمیایی

نام ماده شیمیایی	فرمول	غلظت (g/L)
سولفات نیکل	$\text{NiSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$	۸/۹
آمونیم کلراید	NH_4Cl	۱/۵
اسید بوریک	H_3BO_3	۱/۵

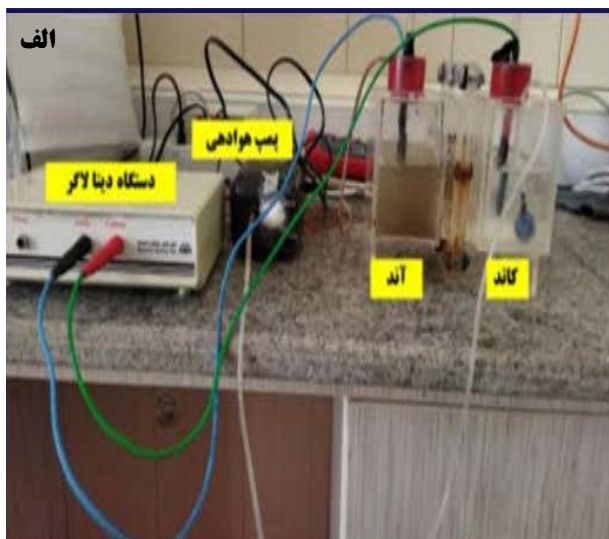
۳.۳. تعیین ویژگی های سطح آند

قبل از راه اندازی و راهبری سیستم پیل سوختی میکروبی، به منظور بررسی حضور و نحوه قرار گیری نانوذرات نیکل و تشکیل لایه بیوفیلم بعد از راهبری آنالیز میکروسکوپ الکترون روبشی اثر میدانی (FE-SEM; JEOL JSM-840A, Japan) با ولتاژ ۲۰ کیلوولت استفاده گردید، همچنین ترکیب و درصد وزنی عناصر تشکیل دهنده الکترود Ni@GP با استفاده از آنالیزهای پراش اشعه ایکس (XRD; Ultima IV, Rigaku) و طیف سنجی پراش انرژی پرتو ایکس (EDX; Bruker)

XFlash6L10) تعیین شد.

۴.۳. راه اندازی سیستم

راکتور پیل سوختی میکروبی دو محفظه ای در حالت تغذیه ناپیوسته، در حمام بخار با شرایط دمای ثابت (30 ± 1 درجه سانتی گراد) و فشار اتمسفر مجهز به غشا تبادل پروتون و الکترود کاتد یکسان از جنس CF و الکترودهای آند متفاوت از جنس GP و Ni@GP راه اندازی شد. تصویر ۱ (الف و ب) به ترتیب راکتور پیل سوختی میکروبی و سیستم در محفظه شیشه ای کنترل دما در حال کار را نشان می دهد.



تصویر ۱. سیستم پیل سوختی میکروبی در حال کار تحت شرایط دمایی ثابت

(میلی گرم بر لیتر) $\text{COD} = 5000$ مورد استفاده در محفظه آند، با استفاده از گلوکز با غلظت ۵ گرم بر لیتر به عنوان سوبسترا و ترکیبات NH_4CL , KCL , NaCL , CaCL_2 , MgSO_4 , K_2HPO_4 , KH_2PO_4 و

از لجن بی هوازی تصفیه خانه فاضلاب شهری ارومیه جهت تامین جمعیت میکروبی باکتری های الکتروژن و به عنوان ماده تلقیح در محفظه آند استفاده شد. فاضلاب صنعتی شبیه سازی شده با غلظت

برای تعیین کارایی سیستم پیل سوختی میکروبی در حذف COD آندی آنالیز شد.

COD آندی با غلظت اولیه ۵۰۰ میلی گرم بر لیتر در شرایط Closed Reflux و رنگ‌سنجی در ۶۰۰ نانومتر با استفاده از دستگاه اسپکتروفتومتر DR ۵۰۰۰ انجام شد. راندمان تجزیه COD آندی با استفاده از الکترودهای GP و Ni@GP از طریق معادله ۵ تعیین شد (۹). در طول راهبری راکتور، pH در محدوده خنثی و دمای 30 ± 1 درجه سانتی‌گراد تنظیم شد، همچنین به‌منظور اطمینان از صحت نتایج، برخی از آزمایشات دوبار تکرار شد.

$$\text{COD} = \frac{\text{COD}_i - \text{COD}_e}{\text{COD}_i} \times 100 \quad (5)$$

COD_i: غلظت COD (میلی گرم بر لیتر) اولیه

COD_e: غلظت COD (میلی گرم بر لیتر) نهایی

۴. نتایج

۴.۱. ویژگی‌های ساختاری و مورفولوژی الکترودها

ویژگی‌های ساختاری الکترودهای گرافیت مسطح اصلاح‌شده با نیکل با استفاده از آنالیزهای XRD، EDX و تصاویر FE-SEM تعیین گردید. نتایج XRD و آزمون EDX در تصویر، همچنین تصاویر آنالیز FE-SEM در تصویر ارائه شده است. نتایج تصویر ۲ (الف) میزان تبلور لایه نیکل بر سطح الکترودها به‌وسیله آنالیز پراش اشعه ایکس (XRD) را نشان می‌دهد. مشاهده پیک‌های ایجادشده در 2θ های ۴۴/۲۲، ۵۱/۹ و ۷۷ به ترتیب به پراش صفحات ۱۰۰، ۴۰ و ۲۰ نسبت داده شد که براساس طیف مرجع به شماره (r1-3600-Ni) سنتز نانوذرات نیکل روی گرافیت مسطح را مورد تایید قرار می‌دهد. همچنین در الگوی XRD مربوط به Ni@GP هیچ پیک اضافی‌ای ظاهر نشده است که نشان‌دهنده خلوص ذرات سنتز شده است. تصویر ۲ (ب و ج) نتایج حاصل از آنالیز EDX و تصاویر نقشه پراکندگی عنصری از سطح الکترودها Ni@GP را نشان می‌دهد که بیانگر میزان نیکل داپ‌شده بر سطح الکترودهای گرافیت مسطح است. مطابق با تصاویر، نیکل و کربن به ترتیب ۹۲/۰۶ و ۷/۲۴ درصد وزنی سطح الکترودها Ni@GP را تشکیل می‌دهند. همچنین پراکندگی و توزیع یکنواخت ذرات نیکل روی صفحات گرافیت مسطح در تصاویر نقشه پراکندگی پراکندگی عنصری از سطح الکترودها Ni@GP به وضوح قابل مشاهده است.

۱ میلی‌لیتر بر لیتر از میکرونوترینت‌ها ساخته و همچنین برای ایجاد شرایط مناسب جهت رشد میکروارگانیسم‌های بی‌هوازی pH محفظه آند با استفاده از بافر فسفات ۰/۱ مولار در ۷/۲ تنظیم شد (۲۳). در هر مرحله اجرا قبل از راه‌اندازی سیستم، جهت ایجاد شرایط بی‌هوازی در آند، گاز N_2 به مدت ۵ دقیقه در محفظه تزریق گردید و محفظه کاتد نیز به‌طور مداوم با استفاده از پمپ هوا به‌منظور تامین اکسیژن مورد نیاز هوادهی شد (۲۴).

۵.۳. محاسبه میزان ولتاژ، دانسیته توان و جریان تولیدی

ولتاژ تولیدی به‌صورت پیوسته با استفاده از دستگاه دیتالاگر ساخت شرکت دانش‌گستر همگام با صنعت «طبرستان» مدل DGHS-EL2501 و سیستم کامپیوتر در هر ۳۰ دقیقه ثبت گردید. این سیستم با استفاده از نرم‌افزارهای MINITAB و MATLAB قادر است به‌صورت آنالاین داده‌های ولتاژ و جریان را ثبت کند. در راهبری سیستم جهت ثبت منحنی مدار باز ولتاژ (OCV) بدون اعمال مقاومت، ولتاژ تولیدی به‌صورت آنالاین هر ۳۰ دقیقه ثبت گردید. بعد از ایجاد شرایط پایدار و تولید ولتاژ ثابت، حداکثر دانسیته توان و دانسیته جریان تولیدی با اعمال مقاومت‌های متغیر ۰/۱ تا ۱۰۰ کیلو اهم به‌دست آمد. سپس حداکثر دانسیته توان و دانسیته جریان با توجه به معادلات ۳ و ۴ نرمالیزه و منحنی‌های ولتاژ و دانسیته توان در مقابل جریان ترسیم شد (۲۵).

$$I = V/R \quad (3)$$

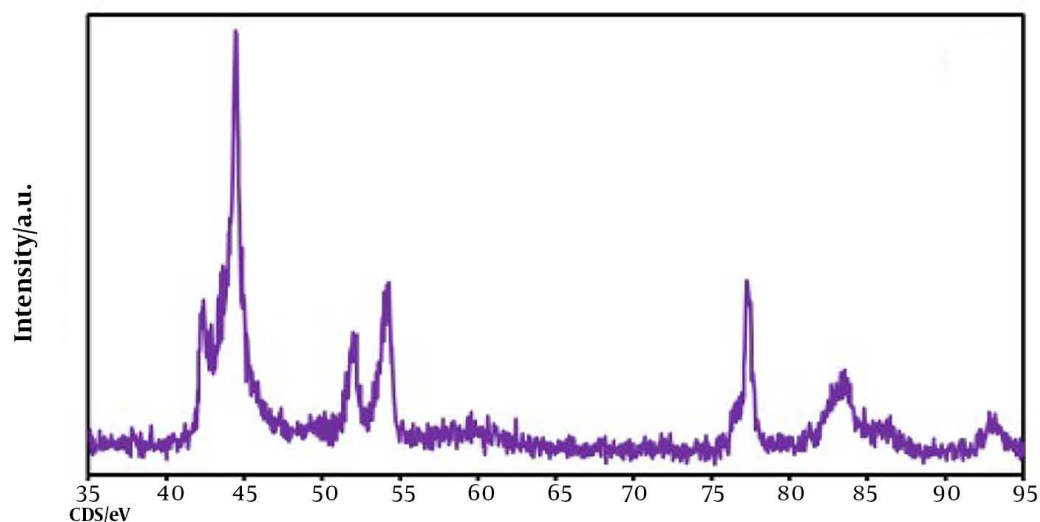
$$P = VI \quad (4)$$

که در این معادلات I نشان‌دهنده شدت جریان (آمپر)، R مقاومت (اهم)، V ولتاژ (ولت)، P توان تولیدی (وات) است. جهت محاسبه دانسیته توان (میلی‌وات بر مترمربع) و دانسیته جریان (میلی‌آمپر بر مترمربع) مقادیر حاصله به مساحت سطح الکترودها تقسیم گردید.

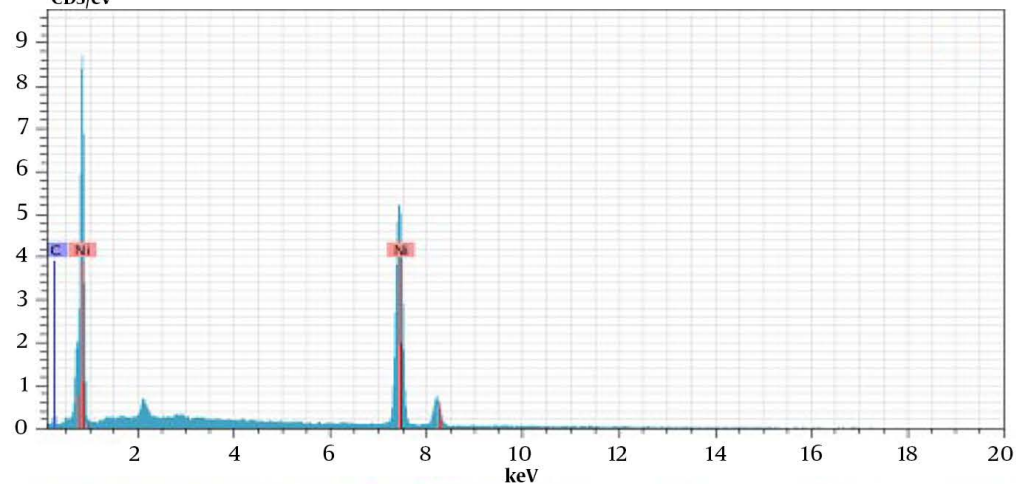
۶.۳. نمونه‌برداری و اندازه‌گیری اکسیژن مورد نیاز شیمیایی

نمونه‌برداری از راکتور پیل سوختی میکروبی، به‌صورت تابعی از زمان‌های مورد نظر انجام گرفت. نمونه‌های برداشته‌شده از محفظه آند به مدت ۵ دقیقه و با دور ۳۵۰۰ در دقیقه سانتریفیوژ شدند. همچنین، جهت اطمینان بیشتر از کاغذ صافی ۰/۴۵ میکرون واتمن به‌منظور جداسازی جامدات معلق و مواد باقی‌مانده استفاده گردید. سپس، محلول حاصل

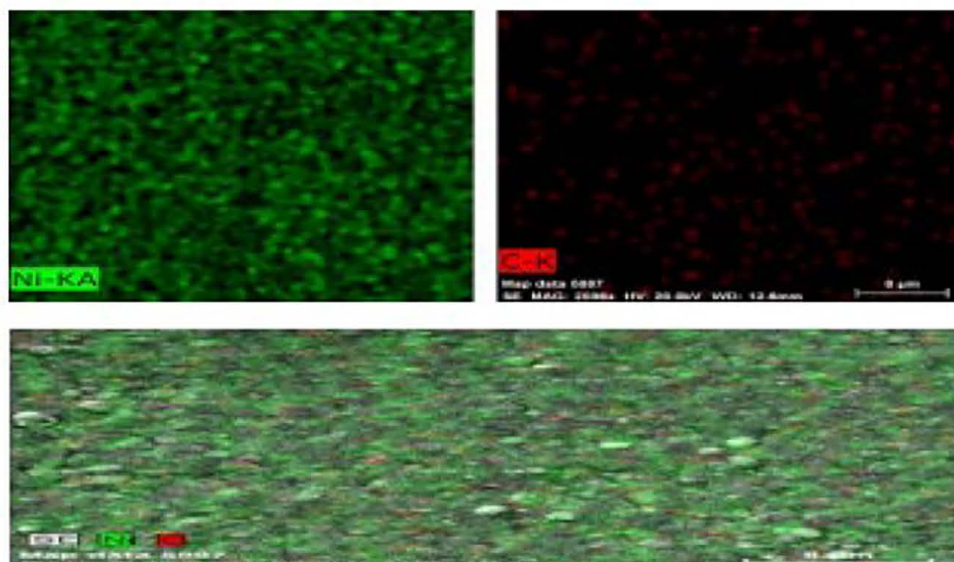
الف



ب



ج



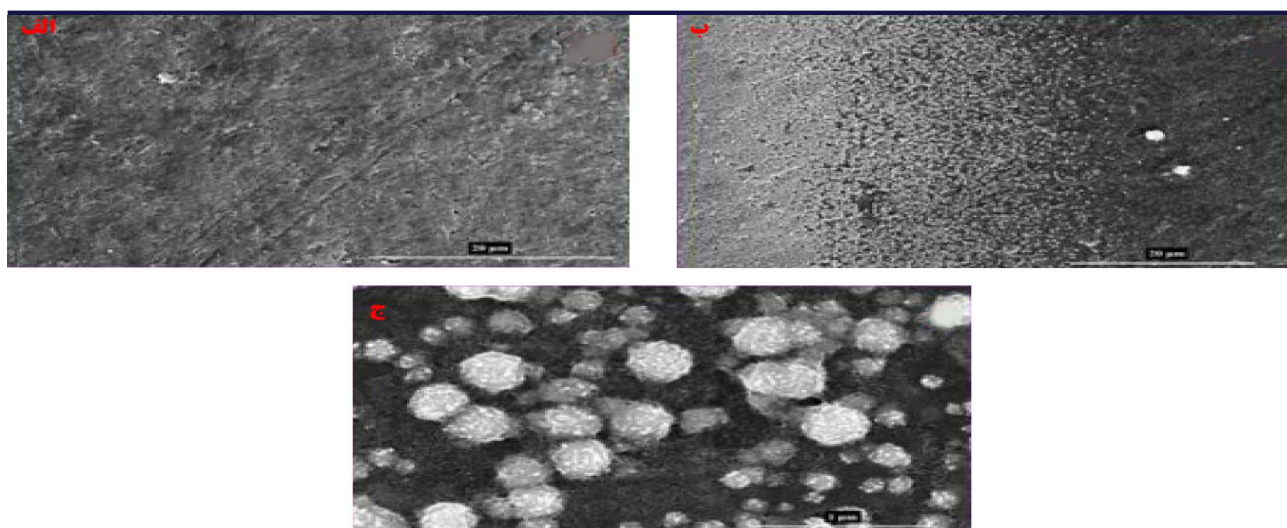
تصویر ۲. الف، الگوی XDR؛ ب، الگوی EDX؛ ج، نقشه‌برداری عنصری الکترونی Ni@GP

به الکترونی گرافیت قبل از اصلاح و بعد از اصلاح با نیکل در دو نمای دور و نزدیک بیانگر پوشاندگی مطلوب و یکنواخت سطح GP با نیکل است.

تصاویر واقعی و نتایج آنالیز FE-SEM الکترونی GP قبل از پوشش نیکل و بعد از داپ به وسیله نیکل در تصاویر ۳ و ۴ ارائه شده است. تصویر ۳ (الف) و (ب) نشان‌دهنده تصاویر واقعی و تصویر ۴ (الف)، (ب) و (ج) به ترتیب تصاویر FE-SEM مربوط



تصویر ۳. تصاویر واقعی الکتروود گرافیت؛ الف، قبل از اصلاح (GP)؛ ب، بعد از ترکیب نیکل (Ni@GP)

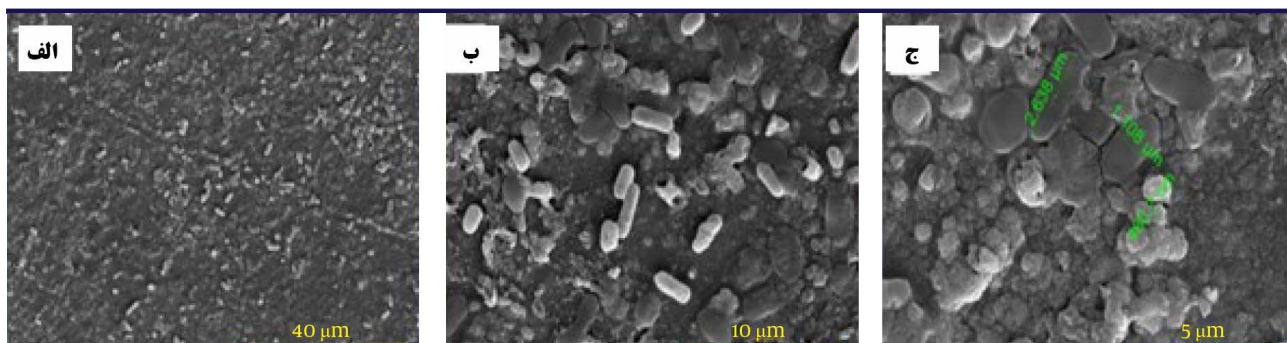


تصویر ۴. تصاویر MES-EF الف، گرافیت قبل از پوشش نیکل (GP)؛ ب، نمای دور از Ni@GP؛ ج، نمای نزدیک از Ni@GP

۲.۴. تعیین رشد و تشکیل لایه بیوفیلم در سطح الکتروود Ni@GP

راه اندازی و در پایان راهبری MFC در تصویر ۵ نشان می‌دهد که حضور نیکل به عنوان یک کاتالیست در سطح الکتروود گرافیت مسطح مانع از فعالیت باکتری‌های الکتروژن‌زننده، و تشکیل لایه بیوفیلم بعد از راهبری پیل سوختی میکروبی بر روی الکتروود اصلاح شده با نیکل به وضوح قابل مشاهده است.

نتایج آنالیز FE-SEM الکترودهای Ni@GP قبل و بعد از تشکیل لایه بیوفیلم به ترتیب در تصویر ۵ نشان داده شده است. مقایسه نتایج آنالیز FE-SEM الکتروود Ni@GP قبل از

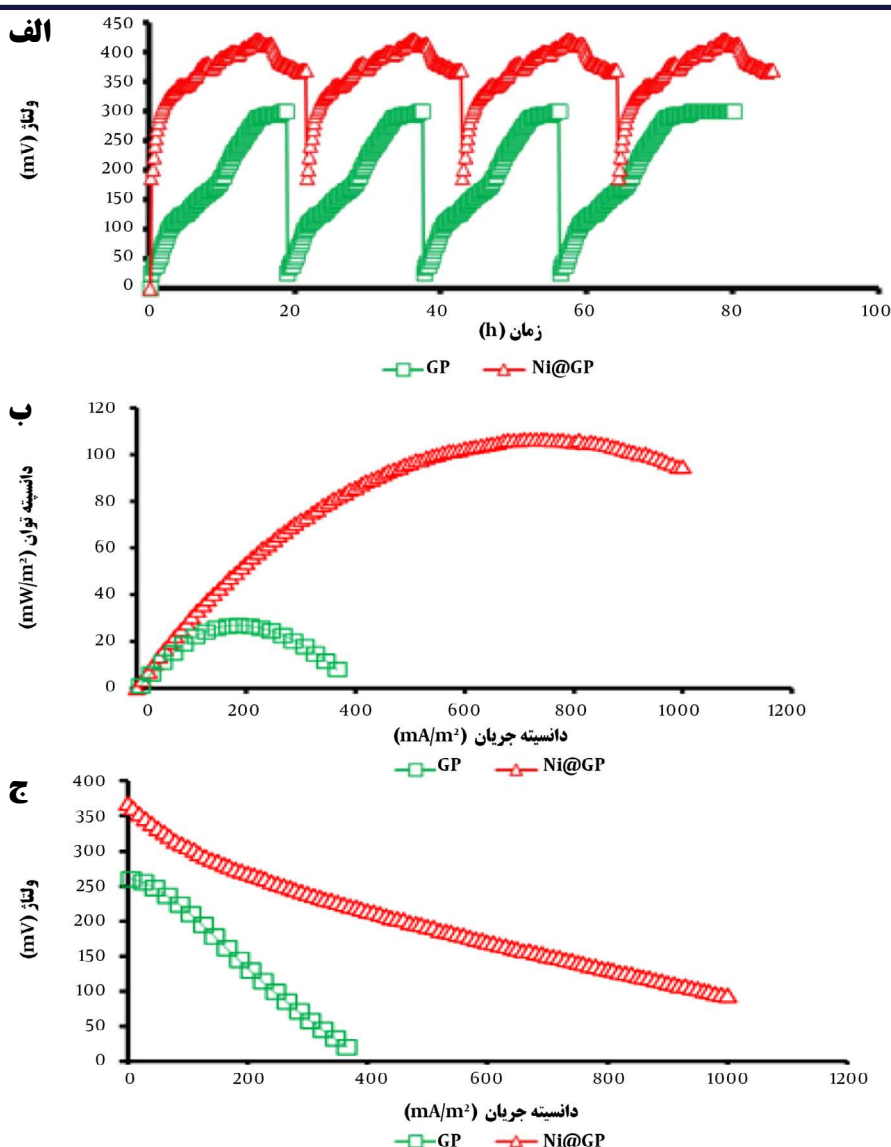


تصویر ۵. تصاویر FE-SEM از سطح الکترودهای Ni@GP قبل از راه اندازی و در پایان راهبری MFC؛ الف، گرافیت مسطح اصلاح شده قبل از راه اندازی MFC؛ ب و ج، گرافیت مسطح اصلاح شده بعد از راهبری MFC در دو نمای دور و نزدیک

۳.۴. عملکرد الکتروشیمیایی پیل سوختی میکروبی

نتایج ولتاژ مدار باز (OCV) طی ۸۰ ساعت کار MFC با استفاده از دیتالاگر متصل به سیستم کامپیوتری هر نیم ساعت به صورت خودکار ثبت گردید. تصویر ۶ (الف) در هر مرحله بارگذاری با توجه به تغذیه سیستم با سوبسترای جدید ولتاژ به سرعت افزایش یافت، سپس به یک حالت پایدار رسید و به دلیل تخلیه سوبسترا و بارگذاری مجدد کاهش پیدا کرد. تکرار نتایج منحنی ولتاژ مدار باز در طی چهار مرحله بارگذاری به وسیله الکترواد اصلاح شده Ni@GP بیانگر مقاومت و پایداری نیکل در طول زمان و همچنین توسعه و رشد بیوفیلم است. براساس نتایج منحنی ولتاژ مدار باز میانگین ولتاژ تولیدی با استفاده از الکترواد اصلاح شده Ni@GP ۴۲۲ mV به دست آمد

که در مقایسه با GP افزایش قابل توجهی را نشان داد. منحنی های پلاریزاسیون و دانسیته توان بعد از چند مرحله بارگذاری و تشکیل لایه بیوفیلم، همچنین اطمینان از حصول شرایط پایدار MFC از نظر تولید ولتاژ با اعمال مقاومت های متغیر ۱۰۰ - ۰/۱ کیلو اهم برای الکترودهای GP، Ni@GP ترسیم گردید. همانطور که در تصویر ۶ (ب) و (ج) مشاهده می شود. اصلاح سطح الکترواد با استفاده از نانوذرات نیکل در افزایش میزان دانسیته توان و دانسیته جریان تولیدی در MFC موثر است. به طوری که حداکثر دانسیته توان و دانسیته جریان با استفاده از الکترواد Ni@GP نسبت به الکترواد GP به میزان ۳/۹۴ برابر افزایش یافت. حداکثر دانسیته توان و جریان با استفاده از Ni@GP و GP به ترتیب ۱۰۶/۵۸ میلی وات بر مترمربع ۷۳۰ میلی آمپر بر مترمربع و ۲۷/۰۱ میلی وات بر مترمربع، ۱۸۵ میلی آمپر بر مترمربع حاصل شد.

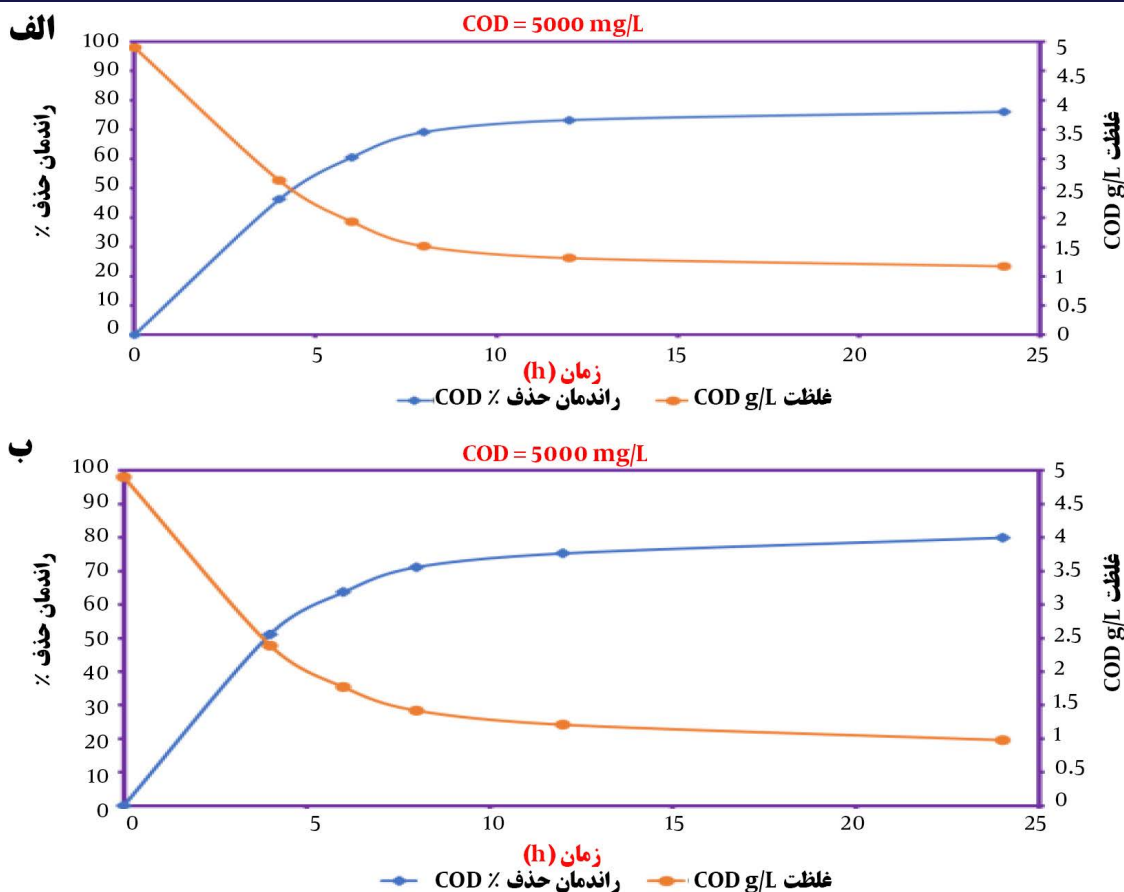


تصویر ۶. الف، منحنی ولتاژ (OCV) بر حسب زمان؛ ب، دانسیته توان؛ ج، ولتاژ بر حسب دانسیته جریان با استفاده از الکترودهای GP و Ni@GP

۴.۴. راندمان تجزیه COD آندی

نتایج حاصل از بررسی تأثیر ارتقای الکترود بر راندمان حذف COD آندی با استفاده از فاضلاب صنعتی سنتتیک با

COD ۵۰۰۰ میلی گرم بر لیتر در تصویر ۷ (الف) و (ب) ارائه شده است. راندمان حذف ترکیبات آلی با استفاده از الکترود گرافیت اصلاح شده با عنصر نیکل و گرافیت بعد از گذشت ۲۴ ساعت به ترتیب ۸۰ و ۷۶ درصد حاصل شد.



تصویر ۷. الف، راندمان حذف COD با استفاده از الکترود GP؛ ب، راندمان حذف COD با استفاده از الکترود Ni@GP

۵. بحث

در مطالعه حاضر میزان تأثیر اصلاح سطح الکترود گرافیت مسطح با نیکل به عنوان بیواند در تولید جریان بیوالکتریسته و حذف مواد آلی فاضلاب با استفاده از پیل سوختی میکروبی مورد بررسی قرار گرفت. بیشترین دانسیته توان و جریان تولیدی با استفاده از الکترود گرافیت مسطح اصلاح شده با نیکل به ترتیب، ۱۰۶/۵۸ میلی وات بر مترمربع و ۷۳۰ میلی آمپر بر مترمربع حاصل شد. حداکثر راندمان تجزیه مواد آلی نیز با استفاده از الکترود اصلاح شده به ۸۰ درصد رسید.

آنالیز تجزیه و تحلیل نتایج آنالیزهای EDX، XRD، همچنین مقایسه تصاویر واقعی و FE-SEM الکترود گرافیت مسطح قبل و بعد از اصلاح، حضور نانوذرات نیکل و پوشش مطلوب و یکنواخت سطح الکترود را مورد تأیید قرار می دهد.

خواص سطح آند در بهبود عملکرد پیل سوختی میکروبی از اهمیت بالایی برخوردار بوده و اصلاح آند با استفاده از نانوذرات نیکل سازگاری مناسبی با میکروارگانیسم های محفظه آند داشته و لایه بیوفیلم به خوبی بر سطح الکترود تشکیل شده است. (تصویر ۵) که با کاهش مقاومت داخلی، افزایش انتقال الکترون خارج سلولی و افزایش توان خروجی بهبود پیدا کرد.

نتایج این مطالعه نشان داد، الکترود گرافیت مسطح اصلاح شده به وسیله نیکل بیشترین راندمان تولید انرژی را نسبت به الکترود گرافیت مسطح دارد. به عبارتی دیگر نیکل به دلیل رسانایی و قدرت انتقال الکترون بالا به عنوان یک کاتالیزور باعث افزایش خواص الکترواکتیویته الکترودها و بهبود عملکرد در پیل های سوختی میکروبی می شود. نتایج مطالعه قاسمی و همکاران با کاربرد Ni جهت اصلاح سطح کربن سیاه به عنوان الکترود کاتد نیز نتایج مطالعه حاضر را تأیید و

آند منجر به افزایش دانسیته توان و دانسیته جریان تولیدی همچنین بهبود عملکرد پیل سوختی میکروبی در حذف مواد آلی می‌شود. به‌طوری که در مطالعه نامبرده حداکثر راندمان حذف COD و حداکثر توان تولیدی با استفاده از PANI-SA/CB به ترتیب ۹۳/۴ درصد و ۵۱۵ میلی‌وات بر مترمربع به دست آمد که بسیار بیشتر از الکترود CB است (۲۹).

به‌طور کلی فرایند پیل‌های سوختی میکروبی به دلیل توانایی تبدیل مستقیم انرژی موجود در مواد به انرژی الکتریسیته و قابلیت استفاده از منابع تجدیدپذیر، به‌عنوان یک تکنولوژی نوین و پتانسیل بالا جهت تصفیه فاضلاب مطرح هستند. با این وجود، هنوز هم چالش‌هایی در طول راهبری و اجرای این فناوری وجود دارد، که بایستی بررسی و کنترل گردد، حفظ و تامین جمعیت میکروبی مورد نیاز، میکروارگانیسم‌های مورد استفاده در پیل سوختی میکروبی جهت رشد و فعالیت نیاز به شرایط خاص از جمله دما، pH و غذای مناسب دارند. بدین‌منظور در مطالعه حاضر ابتدا جهت آماده‌سازی میکروارگانیسم‌های بی‌هوازی ماده تلقیح محیط کشت ساختگی حاوی گلوکز، پپتون، عصاره مخمر و آمونیوم کلراید اضافه شده و سپس به مدت ۲۴ ساعت در شرایط بی‌هوازی و دمای ۳۰ درجه سانتی‌گراد انکوبه گردید. غشا نیز نقش مهمی در ساختار و عملکرد سیستم‌های پیل سوختی میکروبی ایفا می‌کند. با توجه به پدیده انسداد و رسوب غشا همراه با فعالیت طولانی مدت سیستم از این‌رو، استفاده از غشاهای سفالی و سرامیکی با پایداری مکانیکی و شیمیایی بالا، دسترسی آسان و همچنین غشاهای ترکیبی و غشاهای پلی‌پروپیل پارچه‌ای بافته‌نشده، با توجه به تأثیر آن‌ها بر عملکرد کلی سیستم و هزینه عملیاتی جهت تجاری‌سازی بایستی بیشتر در آینده مورد بررسی قرار گیرد.

۱.۵. نتیجه‌گیری

براساس یافته‌های مطالعه حاضر، بیشترین توان الکتریکی تولیدی و راندمان تجزیه COD با استفاده از سیستم پیل سوختی میکروبی دارای الکترود اصلاح‌شده، حاصل شد. با مقایسه نتایج بیوالکتریسیته تولیدی و راندمان تجزیه COD آندی، با استفاده از گرافیت مسطح و گرافیت مسطح اصلاح‌شده مشخص گردید کاربرد نانوذرات نیکل در اصلاح سطح الکترود آند به دلیل سازگاری مناسب با لایه بیوفیلم، افزایش رسانایی و انتقال الکترون خارج سلولی باعث افزایش تولید توان و بهبود عملکرد در پیل‌های سوختی میکروبی در تولید بیوالکتریسیته و حذف ترکیبات آلی در MFC می‌گردد. لذا نتایج حاصله می‌تواند در مقیاس‌های واقعی به‌منظور بهبود کارایی فرایند پیل سوختی میکروبی برای تصفیه فاضلاب‌های صنایع

نیکل را به‌عنوان کاتالیزوری اقتصادی و جایگزین مناسب برای پلاتین در بهبود عملکرد پیل‌های سوختی میکروبی معرفی می‌کند. مطابق با یافته‌های این مطالعه اصلاح سطح کربن سیاه با استفاده از نیکل منجر به افزایش توان تولیدی از ۳۷/۹ میلی‌وات بر مترمربع به ۹۴/۴ میلی‌وات بر مترمربع شد (۲۶). همچنین در مطالعه مشابه دیگر Ouis و همکاران با اصلاح سطح الکترود گرافیت به‌عنوان بیوآند به‌وسیله پلیمر رسانا (PPY) حداکثر دانسیته توان الکترود اصلاح‌شده ۳/۵۷ برابر در مقایسه با گرافیت لخت بیشتر بوده و با استفاده از الکترودهای CG و PPY/CG به ترتیب ۲۵ و ۷ میلی‌وات بر مترمربع به دست آمد. نتایج این مطالعه نشان داد که اصلاح الکترود گرافیتی به‌وسیله مواد رسانا باعث افزایش انتقال الکترون و در نتیجه افزایش توان و بازدهی در MFC شده که به چسبندگی بالای گونه‌های باکتریایی روی آند و تشکیل بیوفیلم پایدارتر نسبت داده شده است (۲۷). نتایج مطالعه حاضر و مطالعات پیشین نشان می‌دهد استفاده از نیکل به‌عنوان یک کاتالیزور با کارایی بالا و اقتصادی در بیوآند و بیوکاتد منجر به بهبود عملکرد پیل سوختی میکروبی و افزایش بازدهی می‌شود (۱۹، ۲۰، ۲۸).

یکی از عوامل موثر در پایداری نانوذرات نشانده‌شده روی الکترودها به روش نشانند بستگی دارد. نتایج منحنی ولتاژ مدار باز در تصویر ۶ (الف) نشان می‌دهد میزان ولتاژ تولیدی طی چهار مرحله بارگذاری و استفاده از الکترود Ni@GP در آند تغییری نداشته و از پایداری مطلوبی برخوردار است. لذا روش ترسیب الکتروشیمیایی می‌تواند به‌عنوان روشی مناسب جهت اصلاح الکترودهای آند با استفاده از عنصر نیکل در پیل سوختی میکروبی مورد بهره‌برداری قرار گیرد.

حداکثر راندمان تجزیه COD آندی بعد از ۲۴ ساعت زمان واکنش در غلظت ۵۰۰۰ میلی‌گرم بر لیتر سوبسترا، با استفاده از الکترودهای گرافیت مسطح و گرافیت مسطح اصلاح‌شده با نیکل به ترتیب ۸۰ و ۷۶ درصد حاصل شد. نتایج این مطالعه نشان داد اصلاح سطح الکترود آند با استفاده از نیکل به‌عنوان یک کاتالیست با افزایش رسانایی، تقویت اتصال میکروبی و افزایش انتقال الکترون خارج سلولی باعث افزایش ۳/۹ برابری توان خروجی شده، که در نهایت افزایش تولید بیوالکتریسیته با استفاده از الکترود Ni@GP منجر به بهبود کارایی تجزیه آلاینده‌های آلی و COD در فرایند پیل سوختی میکروبی شده است. نتایج مطالعه Wang و همکاران نیز با مقایسه عملکرد الکترودهای برس کربن carbon brush (CB) برس کربن اصلاح‌شده با پلی‌انیلین-آلژینات سدیم polyaniline/sodium alginate/carbon brush (PANI-SA/CB) و برس کربن اصلاح‌شده با پلی‌انیلین (PANI/CB) polyaniline/carbon brush به‌عنوان بیوآند نیز تایید می‌کند، استفاده از کاتالیست‌های زیست‌سازگار به‌منظور بهبود الکترودهای

References

1. Tsai H-Y, Hsu W-H, Huang Y-C, Kim JH. Characterization of Carbon Nanotube/Graphene on Carbon Cloth as an Electrode for Air-Cathode Microbial Fuel Cells. *J Nanomaterials*. 2015;2015(1). <https://doi.org/10.1155/2015/686891>.
2. Du Z, Li H, Gu T. A state of the art review on microbial fuel cells: A promising technology for wastewater treatment and bioenergy. *Biotechnol Adv*. 2007;25(5):464-82. [PubMed ID:17582720]. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2007.05.004>.
3. Wang X, Feng YJ, Lee H. Electricity production from beer brewery wastewater using single chamber microbial fuel cell. *Water Sci Technol*. 2008;57(7):1117-21. [PubMed ID:18441441]. <https://doi.org/10.2166/wst.2008.064>.
4. Kelly PT, He Z. Understanding the application niche of microbial fuel cells in a cheese wastewater treatment process. *Bioresour Technol*. 2014;157:154-60. [PubMed ID:24549237]. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2014.01.085>.
5. Gupta S, Mittal Y, Tamta P, Srivastava P, Yadav AK. 4 - Textile wastewater treatment using microbial fuel cell and coupled technology: a green approach for detoxification and bioelectricity generation. In: Abbassi R, Yadav AK, Khan F, Garaniya V, editors. *Integrated Microbial Fuel Cells for Wastewater Treatment*. Oxford, England: Butterworth-Heinemann; 2020. p. 73-92.
6. Thapa BS, Pandit S, Patwardhan SB, Tripathi S, Mathuriya AS, Gupta PK, et al. Application of Microbial Fuel Cell (MFC) for Pharmaceutical Wastewater Treatment: An Overview and Future Perspectives. *Sustainability*. 2022;14(14). <https://doi.org/10.3390/su14148379>.
7. Molognoni D, Chiarolla S, Cecconet D, Callegari A, Capodaglio AG. Industrial wastewater treatment with a bio-electrochemical process: assessment of depuration efficiency and energy production. *Water Sci Technol*. 2018;77(1-2):134-44. [PubMed ID:29339612]. <https://doi.org/10.2166/wst.2017.532>.
8. Brunschweiler S, Hofmann T, Glas K. Industrial wastewater treatment with simultaneous energy recovery using microbial fuel cells—a review. *Brewing Sci*. 2020;73.
9. Navidjoui N, Soltani F, Rahimnejad M. Chapter 12 - Application of biological fuel cell in wastewater treatment. In: Rahimnejad M, editor. *Biological Fuel Cells*; Elsevier; 2023. p. 301-20.
10. Navidjoui N, Soltani F, Rahimnejad M. Application of biological fuel cell in wastewater treatment. In: Rahimnejad M, editor. *Biological Fuel Cells: Fundamental to Applications*. Amsterdam, Netherlands: Elsevier Science; 2023. p. 301-20.
11. Soltani F, Navidjoui N, Khorsandi H, Alizadeh S, Rahimnejad M. [Tetracycline Removal from Wastewater and Electricity Generation in Microbial Electro-Fenton System in Different Electrical Circuit Conditions]. *J Mazandaran Univ Med Sci*. 2022;32(208):123-34. Persian.
12. Dehghani S, Moghiseh Z, Mohebrad B. [Performance of bioelectrochemical process using steel wool and carbon cloth electrodes to remove phenol in the aquatic envi-

مختلف و تولید بیوانرژی مورد بهره‌برداری قرار گیرد.

تشکر و قدردانی:

این مقاله حاصل بخشی از پایان‌نامه دانشجوی کارشناسی ارشد رشته مهندسی بهداشت محیط در سال ۱۴۰۲ با کد اخلاق (IR.UMSU.REC.1401.270) است که با حمایت مالی دانشگاه علوم پزشکی ارومیه، در آزمایشگاه تحقیقاتی دانشکده بهداشت اجرا شده است. بدین‌وسیله از کلیه کسانی که ما را در اجرای این پایان‌نامه یاری نمودند، کمال تشکر را داریم.

مشارکت نویسندگان:

ن. ن.، ف. م.، س. ع.، و م. ر. ایده و طراحی مطالعه؛ ف. م. و ن. ن. جمع‌آوری داده‌ها، نویسنده ف. م.، ن. ن. و س. ع.؛ آنالیز و تفسیر نتایج؛ ف. م.، ن. ن.، س. ع.، و م. ر. نگارش نسخه اول مقاله. همه نویسندگان نتایج را بررسی نموده و نسخه نهایی مقاله را تایید نمودند.

تضاد منافع:

نویسندگان اعلام می‌کنند که هیچ‌گونه منافع مالی رقابتی یا روابط شخصی شناخته شده‌ای ندارند که بتواند بر کار گزارش شده در این مقاله تأثیر بگذارد.

بازبایی داده‌ها:

مجموعه داده ارائه شده در مطالعه با درخواست از نویسندگان مربوطه در حین ارسال یا پس از انتشار در دسترس است.

کد اخلاق:

IR.UMSU.REC.1401.270

حمایت مالی و معنوی:

این مقاله حاصل پایان‌نامه کارشناسی ارشد مهندسی بهداشت محیط در سال ۱۴۰۲ و با کد پروژه (IR.UMSU.REC.1401.270) است که با حمایت مالی دانشگاه علوم پزشکی ارومیه و در آزمایشگاه تحقیقاتی دانشکده بهداشت انجام شده است. از کلیه کسانی که در انجام این پایان‌نامه ما را یاری کردند، صمیمانه تشکر و قدردانی می‌شود.

ronment]. *Koomesh*. 2016;18(3):380-7. Persian.

13. Zhong D, Liao X, Liu Y, Zhong N, Xu Y. Enhanced electricity generation performance and dye wastewater degradation of microbial fuel cell by using a petaline NiO@ polyaniline-carbon felt anode. *Bioresour Technol*. 2018;258:125-34. [PubMed ID:29524687]. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2018.01.117>.
14. Hindatu Y, Annuar MSM, Gumel AM. Mini-review: Anode modification for improved performance of microbial

- fuel cell. *Renewable Sustainable Energy Rev.* 2017;**73**:236-48. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.01.138>.
15. Yu F, Wang C, Ma J. Applications of Graphene-Modified Electrodes in Microbial Fuel Cells. *Materials (Basel)*. 2016;**9**(10). [PubMed ID:28773929]. [PubMed Central ID:PMC5456629]. <https://doi.org/10.3390/ma9100807>.
16. Choi Y-J, Mohamed HO, Park S-G, Al Mayyahi RB, Al-Dhaifallah M, Rezk H, et al. Electrophoretically fabricated nickel/nickel oxides as cost effective nanocatalysts for the oxygen reduction reaction in air-cathode microbial fuel cell. *Int J Hydrogen Energy*. 2020;**45**(10):5960-70. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.05.091>.
17. Satar I, Daud WRW, Kim BH, Somalu MR, Ghasemi M, Bakar MHA, et al. Performance of titanium-nickel (Ti/Ni) and graphite felt-nickel (GF/Ni) electrodeposited by Ni as alternative cathodes for microbial fuel cells. *J Taiwan Institute Chem Engin*. 2018;**89**:67-76. <https://doi.org/10.1016/j.jtice.2018.04.010>.
18. Pattanayak P, Papiya F, kumar V, Pramanik N, Kundu PP. Deposition of Ni-NiO nanoparticles on the reduced graphene oxide filled polypyrrole: evaluation as cathode catalyst in microbial fuel cells. *Sustainable Energy Fuels*. 2019;**3**(7):1808-26. <https://doi.org/10.1039/c9se00055k>.
19. Liu J, Vipulanandan C. Effects of Fe, Ni, and Fe/Ni metallic nanoparticles on power production and biosurfactant production from used vegetable oil in the anode chamber of a microbial fuel cell. *Waste Manag*. 2017;**66**:169-77. [PubMed ID:28404510]. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.04.004>.
20. Tahir K, Miran W, Jang J, Maile N, Shahzad A, Moztahida M, et al. Nickel ferrite/MXene-coated carbon felt anodes for enhanced microbial fuel cell performance. *Chemosphere*. 2021;**268**:128784. [PubMed ID:33131741]. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.128784>.
21. Rahmani AR, Navidjouy 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. *J Cleaner Prod*. 2020;**243**. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118589>.
22. Yavari Z, Tashauoei H, Naddafi K, Izanloo H, Khazae M, Mahmoodian M. [Electricity Generation from Synthetic Wastewater Treatment in Microbial Fuel Cell]. *Qom Univ Med Sci J*. 2013;**6**(4). Persian.
23. Soltani F, Navidjouy 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 Adv*. 2021;**11**(44):27160-73. [PubMed ID:35480664]. [PubMed Central ID:PMC9037666]. <https://doi.org/10.1039/d1ra04584a>.
24. 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]. *Iran J Health Environ*. 2021;**14**(3):473-86. Persian.
25. Li N, Liu L, Yang F. Power generation enhanced by a polyaniline-phytic acid modified filter electrode integrating microbial fuel cell with membrane bioreactor. *Separation Purification Technol*. 2014;**132**:213-7. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2014.05.028>.
26. Ghasemi M, Daud WRW, Rahimnejad M, Rezayi M, Fatemi A, Jafari Y, et al. Copper-phthalocyanine and nickel nanoparticles as novel cathode catalysts in microbial fuel cells. *Int Jo Hydrogen Energy*. 2013;**38**(22):9533-40. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2013.01.177>.
27. Ouis M, Kameche M, Innocent C, Charef M, Kebaili H. Electro-polymerization of pyrrole on graphite electrode: enhancement of electron transfer in bioanode of microbial fuel cell. *Polymer Bulletin*. 2017;**75**(2):669-84. <https://doi.org/10.1007/s00289-017-2048-5>.
28. Jeremiasse AW, Hamelers HVM, Saakes M, Buisman CJN. Ni foam cathode enables high volumetric H₂ production in a microbial electrolysis cell. *Int J Hydrogen Energy*. 2010;**35**(23):12716-23. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2010.08.131>.
29. Wang Y, Wen Q, Chen Y, Zheng H, Wang S. Enhanced performance of microbial fuel cell with polyaniline/sodium alginate/carbon brush hydrogel bioanode and removal of COD. *Energy*. 2020;**202**. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.117780>.

Research Article

Improvement of the Performance of Microbial Fuel Cells by Using a Graphite Plate Electrode Modified with Nickel for the Removal of Organic Matter from Wastewater and Simultaneous Bioelectricity Generation

Fatemeh Mahmoodzadeh ^{1,2}, Nahid Navidjouy ^{2,3,*}, Saber Alizadeh ⁴, Mostafa Rahimnejad ⁵

¹Student Research Committee, Urmia University of Medical Sciences, Urmia, Iran

²Department of Environmental Health Engineering, School of Public Health, Urmia University of Medical Sciences, Urmia, Iran

³Social Determinants of Health Research Center, Clinical Research Institute, Urmia University of Medical Sciences, Urmia, Iran

⁴Faculty of Chemistry, Bu-Ali-Sina University, Hamedan, Iran

⁵Department of Chemical Engineering, Biofuel and Renewable Energy Research Center, Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Iran

*Corresponding Author: Social Determinants of Health Research Center, Clinical Research Institute, Urmia University of Medical Sciences, Urmia, Iran. Email: n.navidjouy@gmail.com

Received 14/01/2024; Accepted 07/09/2024

Abstract

Background: Microbial fuel cells (MFCs) are an innovative and environmentally friendly process for wastewater treatment and simultaneous bioenergy production. Using nickel nanoparticles for surface modification of electrodes can enhance the efficiency of this process in power generation and wastewater treatment.

Objectives: This study aimed to investigate the effect of modifying the anode electrode with nickel nanoparticles on bioenergy production and the removal of organic matter from wastewater using an MFC system.

Methods: A two-chamber MFC equipped with graphite plate anode electrodes and nickel-modified graphite plate electrodes was set up under constant temperature and operational conditions. The maximum voltage, current density, and power density, as well as the efficiency of organic matter removal from wastewater, were examined.

Results: The efficiency of the MFC process in energy production and organic matter removal improved with the use of a nickel-modified graphite plate compared to a graphite plate. Consequently, the maximum voltage, power density, and current density achieved with nickel-modified flat graphite were 422 mV, 106.58 mW/m², and 730 mA/m², respectively. Additionally, the maximum chemical oxygen demand (COD) removal efficiency reached %80 after 24 hours. However, with graphite plate electrodes, the COD removal efficiency decreased to %76.

Conclusion: The results showed that the use of nickel nanoparticles in anode surface modification, due to their compatibility with the biofilm layer, can enhance the efficiency of MFCs as a suitable technology for bioenergy production and the treatment of municipal and industrial wastewater containing organic pollutants.

Keywords: Microbial Fuel Cell, Nickel, Nanoparticles, Graphite Plate, Wastewater, Purification