

# بهبود عملکرد پیل سوختی میکروبی با ساخت نانوکامپوزیت زیستی سلولزی به عنوان الکترود آند

مهرداد مشکور، مصطفی رحیم‌نژاد\*

مرکز تحقیقات سوخت‌های زیستی و انرژی‌های تجدید پذیر، دانشکده مهندسی شیمی، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل، ایران

## مهدی مشکور

گروه مهندسی و تکنولوژی چوب، دانشکده مهندسی چوب و کاغذ، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران

**چکیده:** پیل سوختی میکروبی یکی از منابع تجدیدپذیر انرژی می‌باشد که در آن میکروارگانیسم‌ها نقش زیست کاتالیستی در واکنش‌های اکسایش و کاهش یک سوسترا مانند گلوکز را برعهده دارند. از اجزای اصلی در پیل سوختی میکروبی الکترودها هستند. در این پژوهش یک الکترود آند نانوکامپوزیت زیستی متخلخل با بستر سلولز باکتریایی و فاز پراکنده پلی‌آنیلین به صورت هیدروژل ساخته شد. برای سنتز این الکترود از روش پلیمریزاسیون اکسایشی شیمیایی درجا در ۴ غلظت گوناگون از مونومر آنیلین بر روی سلولز باکتریایی استفاده شد. درستی سنتز با آنالیز FT-IR و عکس برداری FE-SEM بررسی شد. عملکرد آند یاد شده در پیل سوختی میکروبی در حضور مخلوطی از میکروارگانیسم‌ها مورد بررسی قرار گرفت. مقاومت الکترودهای ساخته شده و توان و جریان تولیدی پیل در حضور این الکترودها اندازه گیری شد. در بیشترین غلظت به کاررفته از مونومر آنیلین در فرایند ساخت الکترود دانسیته توان  $375 \text{ mW/m}^2$  و دانسیته جریان  $603 \text{ mA/m}^2$  به دست آمد.

**واژه‌های کلیدی:** پیل سوختی میکروبی؛ الکترود؛ نانوکامپوزیت زیستی؛ سلولز باکتریایی؛ پلی‌آنیلین؛ هیدروژل.

**KEYWORDS:** Microbial fuel cell; Anode, Nano-biocomposite; Bacterial cellulose; Polyaniline.

## مقدمه

غشای تبادل پروتون به محفظه کاتدی می‌رسند و در آنجا با اکسیژن به‌عنوان یک پذیرنده الکترون واکنش داده و این واکنش‌های الکتروشیمیایی به‌طور پیوسته انجام می‌شوند [۳، ۴]. استفاده از مواد الکترودی مناسب می‌تواند تأثیر به‌سزایی در بهبود عملکرد پیل سوختی میکروبی داشته باشد. پژوهش‌ها نشان می‌دهد که جنس الکترود آند و همچنین ساختار آن تأثیر مستقیم روی انتقال الکترون و اکسایش سوسترای موجود دارد [۵]. الکترودهای گوناگون به دلیل تفاوت در ویژگی‌هایی مانند

پیل سوختی میکروبی دستگاهی است که انرژی ذخیره شده در مواد آلی را به انرژی الکتریکی تبدیل می‌کند. این کار توسط کاتالیست‌های زیستی که همان میکروارگانیسم‌ها هستند صورت می‌گیرد [۱، ۲]. به‌طور کلی پیل سوختی میکروبی شامل دو الکترود آند و کاتد در حضور یا بدون غشای تبادل پروتون می‌باشد. به این ترتیب که میکروارگانیسم‌ها در محفظه آندی سوسترای آلی را مصرف می‌کنند و الکترون و پروتون تولید می‌کنند. الکترون‌ها از مدار خارجی به الکترود کاتد و پروتون‌ها از طریق

\*عهده دار مکاتبات

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

یک نمک که نیتروژن‌های ایمین را روی ساختار این پلیمر پروتونه می‌کند، رسانای جریان الکتریسیته می‌باشد [۱۸، ۱۷]. ویژگی‌های دلخواه این پلیمر رسانا مانند رسانایی و خاصیت کاتالیستی در واکنش‌های ردوکس باعث شده است که برای پوشش‌دهی بسترهای سلولزی و ساخت الکترودهای سلولزی مورد استفاده قرار گیرند. در این پژوهش نانوکامپوزیت زیستی هیدروژل سلولز باکتریایی - پلی‌آنیلین در غلظت‌های گوناگون آنیلین ساخته شد. الکترودهای یاد شده در یک پیل سوختی میکروبی دو محفظه‌ای به‌عنوان الکتروود آند قرار داده شدند. به علت سطح زیاد و گسترده سلولز باکتریایی و رسانایی پلی‌آنیلین و ترکیب این ویژگی‌ها در یک کامپوزیت انتظار می‌رود که عملکرد پیل سوختی میکروبی در مقایسه با حالاتی که از الکترودهای رایج تجاری مانند گرافیت استفاده می‌شود بهبود یابد.

### بخش تجربی

#### میکروارگانسیم

میکروارگانسیم مورد استفاده از تصفیه‌خانه بی‌هوازی قائم‌شهر به‌صورت لجن بی‌هوازی بسیار غلیظ تهیه شد. از آنجایی که میکروارگانسیم‌های مورد مطالعه شامل مخلوطی از میکروارگانسیم‌های گوناگون بودند، بنابراین نیاز به فراهم کردن شرایط سترون نیز وجود نداشت. برای استفاده آسان‌تر از لجن به عنوان مایه تلقیح، نخست لجن با آب مقطر رقیق شد و سپس در محیط کشت شامل مواد مغذی گلوکز، پیتون و عصاره مخمر با pH حدود ۷/۴ و در شرایط بی‌هوازی و در ظرفی که هوا به داخل آن نفوذ نکند تا پیش از رسیدن به فاز سکون و در فاز لگاریتمی رشد داده شد و سپس به یخچال برای غیرفعال کردن رشد میکروارگانسیم‌ها منتقل شد و در آنجا نگهداری شد. مایع کدر به دست آمده به عنوان مایه تلقیح مورد استفاده قرار گرفت. شایان گفتن است که برای ایجاد شرایط بی‌هوازی از گاز نیتروژن استفاده شد. میزان مایه تلقیح برای راه اندازی پیل ۷ درصد حجمی از کل حجم کاری محفظه آندی پیل بود. همچنین برای به‌دست آوردن نمودار رشد میکروارگانسیم‌ها از سنجش کدورت محیط کشت به‌وسیله دستگاه اسپکتروفتومتر استفاده شد.

#### ساختار پیل سوختی میکروبی

از یک پیل دو محفظه‌ای شامل محفظه آند و محفظه کاتد با حجم کاری هر کدام ۲۵۰ میلی لیتر استفاده شد. این دو محفظه

زیست‌سازگاری، سطح ویژه و رسانایی الکتریکی و همچنین ویژگی‌های الکتروشیمیایی تأثیرهای متفاوتی بر رشد فیلم میکروبی انتقال الکترون، مقاومت الکتروود و سرعت واکنش‌های اکسایش و کاهش روی سطح الکتروود می‌گذارند. بنابراین انتخاب یک الکتروود مناسب یکی از مسائل بسیار تأثیرگذار بر عملکرد پیل سوختی میکروبی می‌باشد. افزون بر این از نظر اقتصادی هم استفاده از الکترودهای با قیمت تمام‌شده پایین، تأثیر چشمگیری روی کاهش هزینه راه‌اندازی و به‌کارگیری پیل اعمال می‌کند [۶].

الکترودهای رایج مورد استفاده در پیل‌های سوختی بیش‌تر دارای بسترهای کربنی مانند گرافیت، کربن کاغذی و کربن پارچه‌ای هستند [۷]. برای بهبود عملکرد این الکترودها موادی با سطح ویژه بالا، خاصیت کاتالیستی مناسب و... مانند گرافن، گرافن اکساید و نانولوله‌های کربنی برای اصلاح سطح مواد الکتروودی یاد شده به کار گرفته شده‌اند [۸، ۹]. ساخت الکترودهای کامپوزیتی که شامل موادی با ویژگی‌های گوناگون و دلخواه در کنار هم است، قدمی دیگر در مسیر بهبود ویژگی‌های الکترودها بوده است. ساخت و تولید کامپوزیت‌ها و نانو کامپوزیت‌های مورد استفاده در صنعت الکترونیک با بسترهای سلولزی به سبب امتیازهای ذاتی الیاف سلولزی در مقیاس میکرو و نانو، به‌طور گسترده در کانون توجه پژوهشگران در سراسر دنیا قرار گرفته و پژوهش‌های بسیاری در این زمینه انجام شده است [۱۰]. در بین مواد سلولزی، سلولز باکتریایی که فراورده‌ی یک سنتز میکروبی است به علت ارزان بودن و فراهم نمودن سطحی وسیع ناشی از تخلخل بالای آن به عنوان یک بستر مناسب برای پوشش‌دهی با مواد دیگر و ساخت کامپوزیت‌ها به کار می‌رود [۱۱، ۱۲]. همچنین به سبب ویژگی زیست‌سازگاری، مناسب برای رشد میکروارگانسیم‌ها می‌باشد. به‌منظور ساخت کامپوزیت‌های برپایه سلولز باکتریایی از مواد رسانا مانند نانولوله‌های کربنی یا پلیمرهای رسانا مانند پلی‌آنیلین استفاده شده است [۱۳ - ۱۵].

در سال‌های اخیر استفاده از پلیمرهای رسانا در ساخت مواد الکتروودی توسعه فراوانی یافته است. یک پلیمر رسانای رایج پلی‌آنیلین است. پلی‌آنیلین یکی از پلیمرهای مزدوج می‌باشد که کاربردهای خاصی شامل: الکتروود باتری‌های دارای وزن کم، دستگاه‌های محافظ الکترومغناطیس و پوشش‌های ضد خوردگی را با فرایند دوپه کردن پیدا می‌کند [۱۶]. این پلیمر در مقیاس حجمی به نسبت زیاد از منابع گوناگون در دسترس می‌باشد. پلی‌آنیلین در حالت اکسایش امرالدینی و دوپه شده به‌وسیله

همزن گذاشته شد. مدتی به طول انجامید تا دمای همه محلول‌های روی همزن به ۵ درجه سلسیوس برسد. سپس ۱۰ میلی‌لیتر محلول آهن کلرید به هریک از ظرف‌های دارای غلظت‌های گوناگون مونومر افزوده شد. مدت زمان لازم برای تکمیل فرایند پلیمریزاسیون یک شبانه‌روز بود. پس از این مدت فیلم‌های سلولز باکتریایی پوشش داده شده به‌وسیله پلی آنیلین در محلول ۰/۱ مولار هیدروکلریک اسید شستشو داده شد تا فرآورده‌های جانبی فرایند پلیمریزاسیون و همچنین مونومرهای باقی‌مانده از روی فیلم یاد شده شسته شوند. این مرحله چندین بار تکرار شد تا از حذف کامل مواد اضافی اطمینان به دست آمد. سپس فیلم‌های شستشو داده شده در محلول ۰/۱ مولار هیدروکلریک اسید نگاه‌داری شدند [۱۹].

### اندازه‌گیری توان و جریان

توان و جریان به‌وسیله دستگاه ثبت داده (DGHS-ELR2510, Danesh Gostar Co.) توسط ولتاژ اندازه‌گیری شده  $E_{MFC}$  در عرض بارهای الکتریکی متفاوت محاسبه می‌شود:

$$P = I \times E_{MFC} \quad (1)$$

جریان تولیدشده به‌وسیله پیل در مقیاس آزمایشگاهی با اندازه‌گیری پتانسیل در عرض بار الکتریکی (مقاومت بیرونی  $R_{ext}$ ) و با استفاده از رابطه  $I = E_{MFC} / R_{ext}$  محاسبه می‌شود. از این‌رو داریم:

$$P = E_{MFC}^2 / R_{ext} \quad (2)$$

شکل ۱ شمای پیل سوختی مورد مطالعه (در حالت بزرگ‌نمایی) در حال آزمون را نشان می‌دهد.

### نتیجه‌ها و بحث

نتیجه‌های به دست آمده از آزمون طیف‌سنجی ATR-FTIR برای نمونه سلولز باکتریایی پیش از فرایند پلیمریزاسیون اکسایشی شیمیایی پلی‌آنیلین و پس از آن در شکل ۲ نشان داده شده است. پیک‌های  $1470$  و  $1560$   $cm^{-1}$  به ترتیب نشان‌دهنده تغییر شکل کششی  $C=C$  در حلقه‌های کینونیدی<sup>(۱)</sup> و حلقه‌های بنزنی هستند که متعلق به پلی‌آنیلین هستند. پیک  $1284$   $cm^{-1}$  کشش پیوند  $C-N$  مربوط به حلقه بنزن را نشان می‌دهد. پیک ناحیه  $800$   $cm^{-1}$  ارتعاش کششی پیوند رزونانس آروماتیک  $C-H$  را نشان می‌دهد [۱۸].

توسط یک غشای تبادل پروتون نفیون ۱۱۷ (sigma Aldrich USA) از هم جدا شدند. الکترودهای نانوکامپوزیت زیستی پلیمری با فاز پراکنده پلی‌آنیلین بر روی بستر سلولز باکتریایی به‌عنوان الکترودهای آند در سامانه پیل سوختی میکروبی مورد استفاده قرار گرفتند. اندازه‌های الکترودهای مذکور برای استفاده به‌عنوان آند در پیل  $4\text{cm} \times 2\text{cm}$  بود؛ و از گرافیت الکتروود کاتد استفاده شد. علت این کار، قدرت خوب انتقال الکترون و قیمت به نسبت پایین الکتروود گرافیت بود. اندازه‌های الکتروود یاد شده برای استفاده به‌عنوان کاتد در پیل  $4\text{cm} \times 2\text{cm}$  بود.

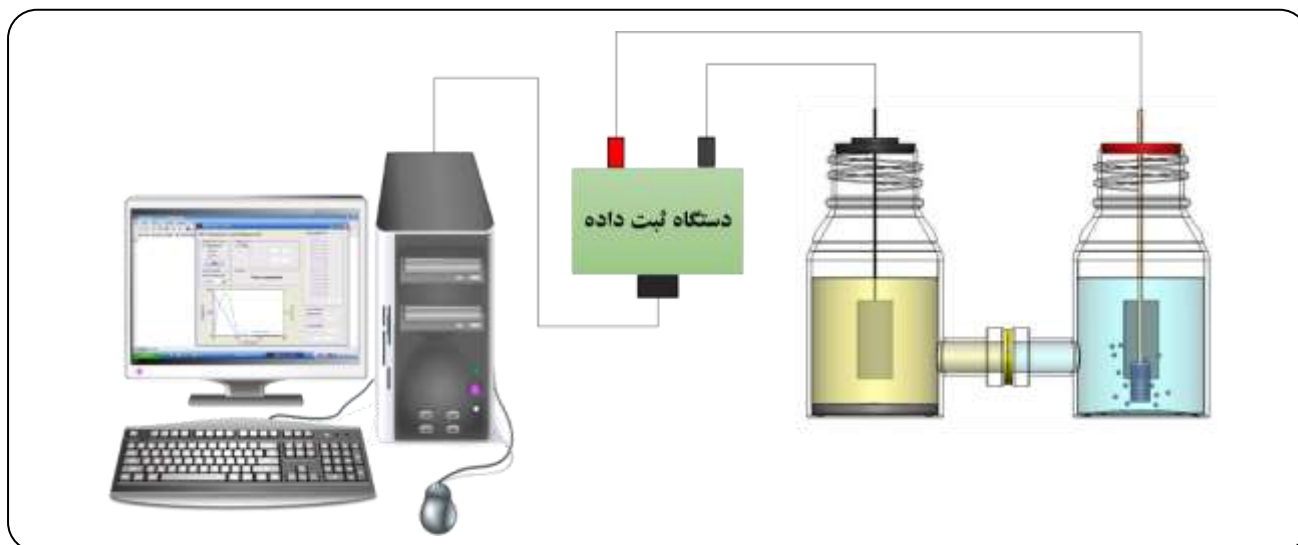
### ساخت نانوکامپوزیت زیستی سلولز باکتریایی - پلی آنیلین

برای ساخت الکتروود پلیمری نانوکامپوزیتی زیستی از سنتز شیمیایی درجای پلیمر رسانای پلی‌آنیلین بر روی بستر سلولز باکتریایی استفاده شد. سلولز باکتریایی به‌صورت شیت از تعاونی دانش‌بنیان نانونوین پلیمر مستقر در پارک علم و فناوری مازندران تهیه شد.

برای سنتز پلیمر یاد شده از روش پلیمریزاسیون شیمیایی اکسایشی استفاده شد. در این روش برای آغاز فرایند پلیمریزاسیون نیاز به یک اکسنده وجود دارد. استفاده از آمونیوم پرسولفات و آهن کلرید به‌عنوان عامل اکسنده در سنتز پلی‌آنیلین بسیار رایج و مرسوم می‌باشد. عامل مؤثر دیگر در این فرایند، وجود یک عامل دوپه‌کننده می‌باشد. رایج‌ترین و بهترین عامل دوپه‌کننده که تاکنون در مقاله‌ها گزارش شده است، هیدروکلریک اسید می‌باشد [۱۹].

پس از خالص‌سازی مونومر، حجم‌های گوناگونی از آن به ترتیب ۱۰۰، ۲۰۰، ۳۰۰ و ۴۰۰ میکرولیتر هرکدام به‌طور جداگانه در ۱۰ میلی‌لیتر هیدروکلریک اسید (DAE JUNG, Korea) نیم‌مولار ریخته، به مدت ۱۰ دقیقه به‌وسیله همزن مغناطیسی به‌خوبی هم زده شد. سپس یک قطعه فیلم سلولز باکتریایی به اندازه‌های  $5\text{cm} \times 4\text{cm}$  در داخل هر یک از این چهار ظرف قرار داده شد. ظرف‌های یادشده در داخل حمام یخ و بر روی هم‌زن با سرعت ۱۲۰ دور بر دقیقه قرار گرفتند. به‌طور هم‌زمان محلولی آبی از آهن کلرید (DAE JUNG, Korea) نیز ساخته شد، این‌طور که ۲۶ گرم از آهن کلرید را در ۴۰ میلی‌لیتر آب یون‌زدایی شده به‌وسیله همزن مغناطیسی حل کرده و درون حمام یخ بر روی

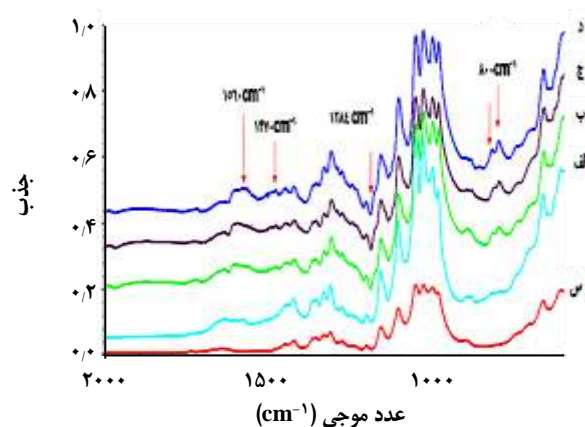
(۱) Quinonoid



شکل ۱- شمای پیل سوختی میکروبی دو محفظه‌ای استوانه‌ای در حال ثبت داده‌های خروجی آن.

به طیف‌های به‌دست‌آمده برای غلظت‌های گوناگون آنیلین می‌توان دریافت که با افزایش غلظت آنیلین، تعداد بیش‌تری از حلقه‌های بنزی با پلیمریزاسیون اکسایشی، اکسایش یافته و به حلقه‌های کینونیدی تبدیل می‌شوند تا جایی که در غلظت‌های بالا (۰٫۳ و ۰٫۴)، تعداد به نسبت برابری از این دو حلقه نمایان شده است.

با مطالعه ساختار سطح الیاف سلولز باکتریایی خام و الیاف پوشش داده‌شده به‌وسیله پلی‌آنیلین و مقایسه ریزنگاره‌های الکترونی به‌دست‌آمده از میکروسکوپ FE-SEM، (شکل ۳) مشخص شد که پس از فرایند سنتز درجا، نانوفلس<sup>(۱)</sup>‌های پلی‌آنیلین به‌خوبی سطح الیاف سلولز باکتریایی را پوشاندند [۲۱] (شکل ۳). این پوشش در غلظت‌های پایین مونومر آنیلین کمتر بوده و هرچه غلظت مونومر در فرایند پلیمریزاسیون بیش‌تر شد، پوشش یاد شده نیز افزایش یافت. به‌طوری‌که در غلظت‌های بالا گویی الیاف سلولز باکتریایی به‌طور کامل به‌وسیله نانوفلس‌ها پوشانیده شده‌اند. نکته جالب این است که این نانوفلس‌ها در شرایطی روی الیاف سلولز باکتریایی باقی مانده بودند که در آخرین مراحل پس از فرایند پلیمریزاسیون، برای شستشو و حذف مواد زائد از روی کامپوزیت سنتز شده و همچنین آماده‌سازی نمونه برای عکس‌برداری، طی چند مرحله شستشو با آب و اسید در فشار انجام شد. بنابراین قدرت اتصال میان الیاف سلولز باکتریایی و نانوفلس‌های پلی‌آنیلین مستحکم‌تر از آن بوده که حتی پس از شستشو با مقدارهای فراوان آب و اسید، از سطح الیاف حذف شوند.

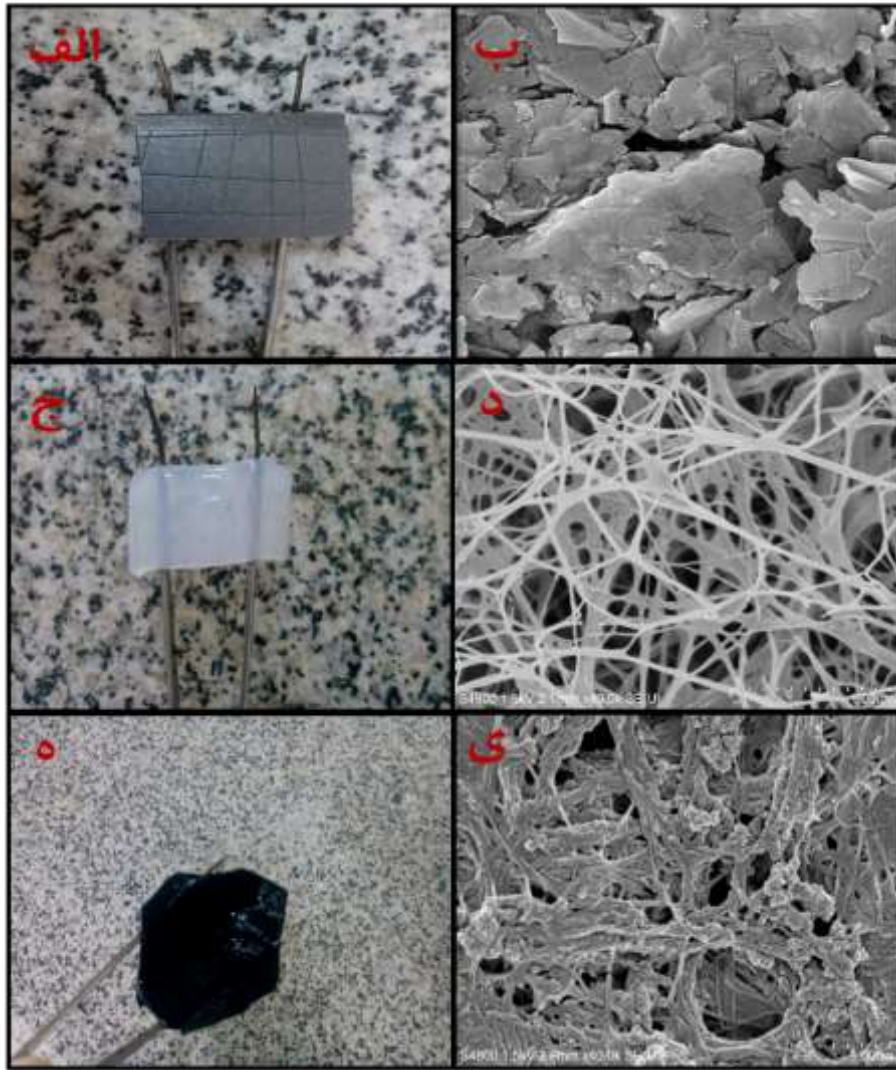


شکل ۲- طیف‌های ATR مربوط به سلولز باکتریایی و نانوبیوکامپوزیت‌های سلولز باکتریایی - پلی‌آنیلین با غلظت‌های (الف): ۰٫۱، (ب): ۰٫۲، (ج): ۰٫۳ و (د): ۰٫۴ مولار مونومر آنیلین در محلول اولیه در فرایند پلیمریزاسیون

همان‌گونه که در شکل هم قابل دیدن است، شدت پیک‌ها در  $1470 \text{ cm}^{-1}$  و  $1560 \text{ cm}^{-1}$  به تقریب یکسان بود که این بیانگر تعداد واحدهای برابر از حلقه‌های کینونیدی و حلقه‌های بنزی در پلی‌آنیلین سنتز شده روی الیاف سلولز باکتریایی است. بر اساس آنچه در منابع آورده شده است، در شکل رسنای پلی‌آنیلین یعنی شکل امرالدینی، تعداد حلقه‌های کینونیدی و بنزی برابر هستند. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که پلی‌آنیلین سنتز شده همان شکل امرالدین بوده که دارای رسانایی الکتریکی بالایی می‌باشد [۲۰]. با نگاهی دقیق‌تر

(۱) Nano flake





شکل ۳- الکترودهای الف: گرافیت، ج: سلولز باکتریایی و ه: سلولز باکتریایی - پلی آنیلین با غلظت ۰/۴ مولار آنیلین و عکس‌های میکروسکوپی از سطح آن‌ها (ب، د و ه)

عملکرد یک پیل سوختی با منحنی پلاریزاسیون و دانسیته توان تولیدشده تعیین می‌شود و هدف اصلی در پیل‌های سوختی نیز افزایش توان و جریان تولیدشده می‌باشد. با قرار دادن مقاومت‌های گوناگون در مدار خارجی سامانه منحنی پلاریزاسیون پیل رسم می‌شود.

نتیجه‌های به دست آمده از نمودار توان - جریان و ولتاژ - جریان برای دو الکتروده گرافیت و همچنین سلولز باکتریایی در شکل ۵ آمده است. بیشینه دانسیته توان برای الکتروده گرافیت در  $1 \text{ mW/m}^2$  در دانسیته جریان  $10 \text{ mA/m}^2$  به دست آمد. درحالی‌که

برای انجام آزمون‌های پیل سوختی، قرار داشتن در شرایط پایا الزامی می‌باشد. بدین منظور با استفاده از آزمون دانسیته نوری (کدورت سنجی)، رشد جمعیت میکروارگانیسم‌ها از زمان تلقیح و راه‌اندازی پیل، در دوره‌های زمانی ۲ و ۴ ساعته اندازه‌گیری شد و زمان رسیدن به رشد جمعیت صفر یا همان فاز سکون، زمان آغاز آزمون‌های مربوط به پیل در نظر گرفته شد. این زمان در این پژوهش مطابق شکل ۴، ۲۴ ساعت به دست آمد. همچنین تا مدت بیش از ۵۰ ساعت قند گلوکز به عنوان خوراک در دسترس میکروارگانیسم‌ها قرار خواهد داشت.

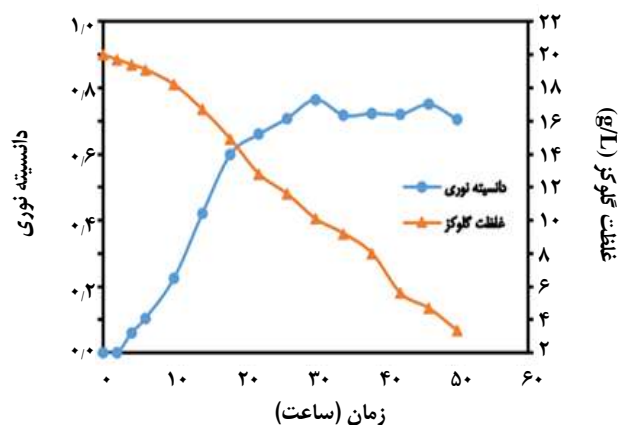
این مقادارها برای سلولز باکتریایی که به صورت یک الکتروکود هیدروژل است به ترتیب  $2/1 \text{ mW/m}^2$  در  $12/1 \text{ mA/m}^2$  به دست آمد. با مقایسه تصویرهای FE-SEM از سطح دو الکتروکود یاد شده به تداخل بالای سلولز باکتریایی در مقایسه با گرافیت پی برده می شود (شکل ۳). این سطح بالا که برآمده از تداخل سلولز باکتریایی است در حضور محلول بافری و میکروارگانسیم های الکترونزا رسانایی خوبی را برای عبور الکترون ها ایجاد می کند. در حقیقت سلولز باکتریایی با استفاده از رسانایی محلول در یک سطح گسترده توانست از گرافیت که تداخل آن کم می باشد پیشی گرفته و عملکرد بهتری را به عنوان الکتروکود در پیل نشان دهد.

مقدارهای دانسیته جریان برای پیل سوختی استوانه ای با الکتروکود کاتد گرافیتی و با آندهای پلیمری گوناگون نانوکامپوزیتی زیستی با غلظت های متفاوت از آنیلین در شکل ۶ آورده شده است. همان گونه که در پیش هم بیان شد رسم این نمودار پس از رسیدن پیل به شرایط پایای رشد میکروارگانسیم ها انجام گرفت. دیده شد که با افزایش غلظت مونومر آنیلین در ترکیب کامپوزیت یاد شده، دانسیته توان و جریان تولید شده توسط پیل نیز افزایش یافته است. به طوری که توان تولید بر اساس حجم محفظه آند و جریان تولیدی نرمالیزه شده بر واحد سطح آند برای الکتروکودهای گوناگون با غلظت  $0/1$ ،  $0/2$ ،  $0/3$  و  $0/4$  مولار آنیلین به ترتیب  $145$ ،  $240$ ،  $330$  و  $375 \text{ mW/m}^2$  و  $230$ ،  $401$ ،  $560$  و  $603$  به دست آمد. این عددها بسیار بزرگ تر از عدد به دست آمده برای الکتروکود آند از جنس سلولز باکتریایی بدون پوشش پلیمری بود. این اختلافها در نمودار یاد شده در واقع نشان دهنده افزایش سطح فعال و رسانای سلولز باکتریایی به وسیله پلیمریزاسیون پلی آنیلین بر روی الیاف آن است.

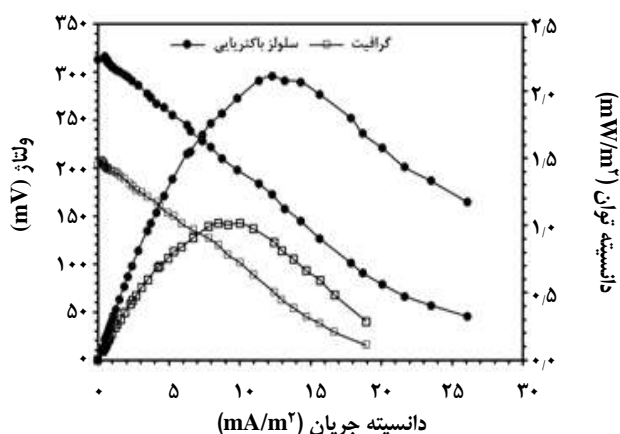
شیب قسمت خطی منحنی ولتاژ - جریان مربوط به الکتروکودهای کامپوزیتی پلیمری که بیانگر مقاومت درونی پیل می باشد نیز در شکل ۶ نشان داده شده است. این مقدار برای غلظت های  $0/1$ ،  $0/2$ ،  $0/3$  و  $0/4$  مولار آنیلین به ترتیب  $796$ ،  $499$ ،  $367$  و  $310 \Omega$  به دست آمد. این مقادارهای با مقادارهای مقاومت درونی به دست آمده از روش قله دانسیته توان نیز همخوانی داشتند.

### نتیجه گیری

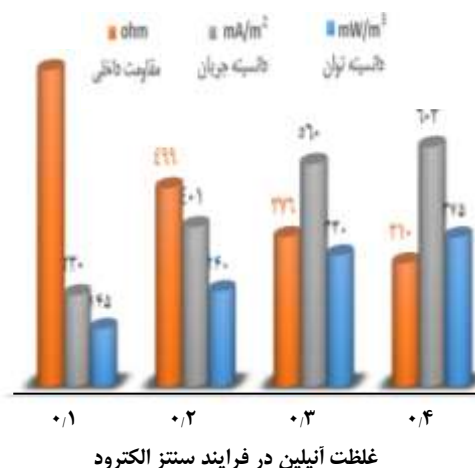
در این پژوهش، یک الکتروکود متخلخل نانوکامپوزیت زیستی در حالت هیدروژل ساخته و از آن به عنوان الکتروکود آند در پیل سوختی میکروبی استفاده شد. نتیجه های به دست آمده از نمودار توان - جریان،



شکل ۴- نمودار رشد میکروارگانسیم ها و مصرف قند توسط آن ها.



شکل ۵ - نمودار پلاریزاسیون پیل سوختی میکروبی در حضور الکتروکودهای سلولز باکتریایی و گرافیت به عنوان آند.



شکل ۶ - نمودار میله ای دانسیته توان، دانسیته جریان و مقاومت درونی پیل سوختی میکروبی برای نانویوکامپوزیت های سلولز باکتریایی- پلی آنیلین در غلظت های گوناگون مونومر آنیلین بر حسب مولار.

### قدردانی

نویسندگان بر خود لازم می‌دانند تا از حمایت‌های مادی و معنوی دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان و به ویژه دانشگاه کیوتو ژاپن قدردانی نمایند. همچنین می‌بایست تشکری ویژه از شرکت "دانش گستر همگام با صنعت طبرستان" نمود که ساخت دستگاه‌های تست پیل سوختی و فراهم نمودن برخی از اجزای اصلی پیل را برای انجام و تکمیل این کار پژوهشی عهده دار شد.

تاریخ دریافت: ۱۳۹۴/۱۲/۲۸ ؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۴/۲۷

ولتاژ - جریان سلولز باکتریایی بدون پوشش پلی‌آنیلین در مقایسه با گرافیت نتیجه‌های بهتری را در برداشت. علت این امر را می‌توان به تخلخل بالا و رسانایی محلول بافری قسمت آند نسبت داد. همچنین پوشش پلی‌آنیلین بر روی الیاف سلولز باکتریایی که به طور کامل واضح توسط تصویرهای میکروسکوپ الکترونی و آنالیز FT-IR تأیید شد، منجر به افزایش چشمگیر دانسیته جریان ( $603 \text{ mA/m}^2$ ) شد. به علت زیست‌سازگاری بالای آند ساخته شده، فیلم زیستی متراکمی قادر به رشد کردن بر روی سطح آن بوده که این منجر به انتقال تعداد بیش‌تر و همچنین سریع‌تر الکترون‌های تولیدی از میکروارگانیسم‌ها به سطح الکتروود برای انتقال به سطح کاتد (تولید جریان بالاتر) می‌شود.

### مراجع

- [1] Rahimnejad M., Ghoreyshi A.A., Najafpour G., Jafary T., [Power Generation from Organic Substrate in Batch and Continuous Flow Microbial Fuel Cell Operations](#). *Appl. Energy*. **88**(11): 3999-4004 (2011).
- [2] Hassan S.H., El-Rab S.M.G., Rahimnejad M., Ghasemi M., Joo J.-H., Sik-Ok Y., Kim I.S., Oh S.-E., [Electricity Generation from Rice Straw Using a Microbial Fuel Cell](#). *Int. J. Hydrogen Energy*. **39**(17): 9490-9496 (2014).
- [3] Mashkour M., Rahimnejad M., [Effect of Various Carbon-Based Cathode Electrodes on the Performance of Microbial Fuel Cell](#). *Biofuel Res. J.*, **2**(4): 296-300 (2015).
- [4] Rahimnejad M., Adhami A., Darvari S., Zirepour A., Oh S.-E., [Microbial Fuel Cell as New Technology for Bioelectricity Generation: A Review](#), *AEJ.*, **54**(3): 745-756 (2015).
- [5] 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*. **140**: 12-17 (2015).
- [6] Zhou M., Chi M., Luo J., He H., Jin T., [An Overview of Electrode Materials in Microbial Fuel Cells](#). *J. Power Sources*. **196**(10): 4427-4435 (2011).
- [7] Hindatu Y., Annuar, M., Gumel A., [Mini-Review: Anode Modification for Improved Performance of Microbial Fuel Cell](#). *Renewable Sustainable Energy Rev.*, **73**: 236-248 (2017).
- [8] Yazdi A.A., D'Angelo L., Omer N., Windiasti G., Lu X., Xu J., [Carbon Nanotube Modification of Microbial Fuel Cell Electrodes](#), *Biosens. Bioelectron.* **85**: 536-552 (2016).
- [9] ElMekawy A., Hegab H.M., Losic D., Saint C.P., Pant D., [Applications of Graphene in Microbial Fuel Cells: The Gap Between Promise and Reality](#), *Renewable Sustainable Energy Rev.*, **72**: 1389-1403 (2017).

- [10] Mashkour M., Kimura T., Kimura F., Mashkour M., Tajvidi M., [Tunable Self-Assembly of Cellulose Nanowhiskers and Polyvinyl Alcohol Chains Induced by Surface Tension Torque](#). *Biomacromolecules*. **15**(1): 60-65 (2013).
- [۱۱] خواجوی ر.، مفتاحی ا.، اصفهانی ا.ج.، ستاری م.، سنتز سلولز میکروبی از سویه بومی و بررسی شبکه نانو الیافی به دست آمده از ساکاریدهای گوناگون، *نشریه شیمی و مهندسی شیمی ایران*، (۳) ۳۱: ۷۹ تا ۹۳ (۱۳۹۱).
- [12] Mashkour M., Moradabadi Z., Khazaeian A., [Physical and Tensile Properties of Epoxy Laminated Magnetic Bacterial Cellulose Nanocomposite Films](#). *J. Appl. Polym. Sci.*, **134**(30): 1-7 (2017).
- [13] Kim Y.H., Park S., Won K., Kim H.J., Lee S.H., [Bacterial Cellulose–Carbon Nanotube Composite as a Biocompatible Electrode for the Direct Electron Transfer of Glucose Oxidase](#). *J. Chem. Technol. Biotechnol.*, **88**(6): 1067-1070 (2013).
- [14] Shi Z., Zang S., Jiang F., Huang L., Lu D., Ma Y., Yang G., [In Situ Nano-Assembly of Bacterial Cellulose–Polyaniline Composites](#). *RSC Adv.*, **2**(3): 1040-1046 (2012).
- [15] Zou L., Qiao Y., Zhong C., Li C.M., [Enabling Fast Electron Transfer Through Both Bacterial Outer-Membrane Redox Centers and Endogenous Electron Mediators by Polyaniline Hybridized Large-Mesoporous Carbon Anode for High-Performance Microbial Fuel Cells](#). *Electrochim. Acta.*, **229**: 31-38 (2017).
- [16] Baker C.O., Huang X., Nelson W., Kaner R.B., [Polyaniline Nanofibers: Broadening Applications for Conducting Polymers](#). *Chem. Soc. Rev.*, **46**(5): 1510-1525 (2017).
- [17] Marins J.A., Soares B.G., Dahmouche K., Ribeiro S.J., Barud H., Bonemer D., [Structure and Properties of Conducting Bacterial Cellulose-Polyaniline Nanocomposites](#), *Cellulose*, **18**(5): 1285-1294 (2011).
- [18] Lee B.-H., Kim H.-J., Yang H.-S., [Polymerization of Aniline on Bacterial Cellulose and Characterization of Bacterial Cellulose/Polyaniline Nanocomposite Films](#), *Curr. Appl Phys.*, **12**(1): 75-80 (2012).
- [19] Müller D., Mandelli J., Marins J., Soares B., Porto L., Rambo C., Barra G., [Electrically Conducting Nanocomposites: Preparation and Properties of Polyaniline \(PAni\)-Coated Bacterial Cellulose Nanofibers \(BC\)](#), *Cellulose*, **19**(5): 1645-1654 (2012).
- [20] Lee H.-J., Chung T.-J., Kwon H.-J., Kim H.-J., Tze W.T.Y., [Fabrication and Evaluation of Bacterial Cellulose-Polyaniline Composites by Interfacial Polymerization](#), *Cellulose*, **19**(4): 1251-1258 (2012).
- [21] Wang H., Bian L., Zhou P., Tang J., Tang W., [Core–Sheath Structured Bacterial Cellulose/Polypyrrole Nanocomposites with Excellent Conductivity as Supercapacitors](#), *J. Mater. Chem. A.*, **1**(3): 578-584 (2013).