

## بررسی تولید انرژی الکتریسته از تصفیه فاضلاب سنتتیک در پیل سوخت میکروبی

زینب یآوری<sup>۱</sup>، حمیدرضا تشیعی<sup>۲</sup>، کاظم ندافی<sup>۳</sup>، حسن ایزانلو<sup>۴</sup>، محمد خزائی<sup>۵</sup>، محمدحسن محمودیان<sup>۶</sup>

### چکیده

**زمینه و هدف:** از پیل سوخت میکروبی (MFC)، به عنوان روشی نوین جهت تولید همزمان الکتریسته و تصفیه فاضلاب استفاده می‌شود. در MFC میکروارگانیسم‌ها به صورت یک کاتالیست عمل می‌کنند تا انرژی شیمیایی ذخیره شده در مواد آلی را به طور مستقیم به انرژی الکتریکی تبدیل کنند. این مطالعه با هدف تولید انرژی الکتریسته از تصفیه فاضلاب سنتتیک در پیل سوخت میکروبی انجام شد.

**روش بررسی:** پیل سوخت میکروبی دو محفظه‌ای با جریان پیوسته به مدت ۷۲۰h در دمای (۴±)°C در میزان‌های بارگذاری آلی و زمان‌های ماند هیدرولیکی متفاوت راهبری شد. **یافته‌ها:** میزان بارگذاری آلی و زمان ماند هیدرولیکی فاکتورهای اثرگذار در تولید توان الکتریکی و بازده حذف بار آلی شناخته شدند. بیشترین درصد حذف COD محلول در محدوده زمانی ۲/۵-۱/۵ ساعت به ۴۹٪ رسید که این محدوده زمانی می‌تواند به عنوان زمان ماند بهینه برای راهبری راکتور پیل سوخت میکروبی مورد استفاده قرار گیرد. بیشینه ولتاژ و توان تولیدی به ترتیب ۷۰۰mV و ۱۷۰۰mW/m<sup>2</sup> به دست آمد.

**نتیجه گیری:** با توجه به مزایایی از قبیل تولید مستقیم الکتریسته از فاضلاب و حذف قابل توجهی از بار آلی فاضلاب، استفاده از پیل‌های سوخت میکروبی (MFC) در مقیاس صنعتی پس از انجام مطالعات تکمیلی و برآورد اقتصادی، جهت تصفیه فاضلاب توصیه می‌شود. **کلید واژه‌ها:** منابع انرژی بیوالکتریکی؛ ولتاژ؛ بارگذاری آلی؛ توان؛ فرآورده‌های انرژی الکتریکی.

<sup>۱</sup> مربی بهداشت محیط، مرکز تحقیقات آلاینده‌های محیطی، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی قم، قم، ایران.  
<sup>۲</sup> استادیار بهداشت محیط، دانشکده بهداشت، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم پزشکی تهران، تهران، ایران.  
<sup>۳</sup> استاد بهداشت محیط، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی تهران، تهران، ایران.  
<sup>۴</sup> استادیار بهداشت محیط، مرکز تحقیقات آلاینده‌های محیطی، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی قم، قم، ایران.  
<sup>۵</sup> مربی بهداشت محیط، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی قم، قم، ایران.

نویسنده مسئول مکاتبات:

مرکز تحقیقات آلاینده‌های محیطی، دانشگاه علوم پزشکی قم، قم، ایران؛

آدرس پست الکترونیکی:

hizan52@gmail.com

تاریخ دریافت: ۸۹/۱۲/۱۲

تاریخ پذیرش: ۹۰/۳/۹

لطفاً به این مقاله به صورت زیر استناد نمایید:

Yavari Z, Tashauoei HR, Naddafi K, Izanloo H, Khazae M, Mahmoodian MH.  
Electricity Generation from Synthetic Wastewater Treatment in Microbial  
Fuel Cell. Qom Univ Med Sci J 2013;6(4):96-103.

## مقدمه

نیاز گسترده انسان به منابع انرژی همواره از مسایل اساسی در زندگی بشر بوده است و تلاش برای دستیابی به یک منبع تمام نشدنی انرژی از آرزوهای دیرینه انسان محسوب می‌شود. با توجه به افزایش سطح مصرف انرژی در جهان و ذخایر محدود سوخت‌های فسیلی، دیگر نمی‌توان به منابع موجود انرژی متکی بود. اگرچه نفت و سایر سوخت‌های فسیلی می‌توانند حداقل تا ۱۰۰ سال آینده نیازهای انرژی دنیا را تأمین کنند، اما انتشار مواد آلاینده حاصل از احتراق و افزایش دی‌اکسید کربن در جو، جهان را با تغییرات روزافزونی مواجه ساخته است که افزایش دمای زمین، تغییرات آب و هوایی، بالا آمدن سطح آب دریاها و در نهایت، تشدید منازعات بین‌المللی از جمله این پیامدها محسوب می‌شوند (۱). مواد تجدیدپذیر مانند زیست‌توده برای تولید انرژی مناسب است و در کاهش انتشار جهانی CO<sub>2</sub> نیز اثر دارد (۲). تکنولوژی پیل سوختی میکروبی (MFC (Microbial Fuel Cell، نوین‌ترین روش برای تولید الکتریسته از زیست‌توده با استفاده از باکتری‌ها است (۳). در سال ۱۹۱۱، Logan برای اولین بار توانست با استفاده از باکتری‌ها و فاضلاب حاوی گلوکز، الکتریسته تولید کند (۱). در اواخر دهه ۱۹۹۰، Kim و همکاران بیان کردند که باکتری‌ها در یک پیل سوختی زیستی می‌توانند به‌عنوان روشی برای تعیین غلظت لاکتات در آب استفاده شوند (۱).

پیل‌های سوختی از دو قسمت آند و کاتد تشکیل شده‌اند که توسط یک غشا از یکدیگر جدا می‌شوند. وجود اکسیژن در محفظه آند، تولید الکتریسته را محدود خواهد کرد. از این‌رو، سیستم باید به‌گونه‌ای طراحی شود تا باکتری‌ها دور از اکسیژن نگه داشته شوند. در حقیقت غشا، کار جداسازی باکتری‌ها از اکسیژن را انجام می‌دهد. معمولاً این غشا کاتیونی بوده و نسبت به پروتون خاصیت نفوذپذیری انتخابی دارد (۱). مجموعه میکروبی موجود در محفظه آند، ترکیبات آلی موجود در فاضلاب را اکسید کرده و الکترون‌ها را به الکتروود منتقل می‌کنند. الکترون‌ها از طریق یک سیم هادی از آند به الکتروود کاتد جریان می‌یابند تا جریان تولید شود، درحالی‌که پروتون‌های تولیدشده از میان غشای تبادل پروتون نفوذ می‌کنند. سپس الکترون‌ها و پروتون‌ها در کاتد با مولکول‌های اکسیژن ترکیب می‌شوند تا آب تشکیل شود (۱).

در کاتد هوای تزریق‌شده، اکسیژن محلول برای واکنش را فراهم می‌سازد (۴،۱). گستره وسیعی از مواد آلی از کربوهیدرات‌های ساده مانند گلوکز (۵)، استات و بوتیرات (۶) تا ترکیبات آلی پیچیده مانند فاضلاب خانگی (۷،۴)، فاضلاب دامداری‌ها (۸)، فاضلاب صنایع شکلات‌سازی و آبجوسازی (۹،۳)، به‌عنوان سوستر در MFCها به کار برده می‌شوند.

همچنین از باکتری‌های فعال الکتروشیمیایی متعددی برای انتقال الکترون‌ها به الکتروود استفاده می‌شود، که شونلا پوتریفشنس (*Shewanella putrefaciens*)، آنروموناس هیدروفیلا (*Aeromonas hydrophila*)، ژئوباکتریاسه (*Geobacteraceae*) و گونه‌هایی از باکتری‌های تخمیرکننده مانند کلسترییدیوم بوتیریکوم (*Clostridium butyricum*)، مهم‌ترین آنها می‌باشند. معمولاً این باکتری‌ها روی غشای بیرونی خود آنزیم‌های اکسایشی - کاهش‌دهنده الکتروشیمیایی مانند سیتوکروم‌ها را دارند و با آنها الکترون‌ها را به مواد خارجی انتقال می‌دهند (۲).

استفاده از گونه‌های میکروبی خالص به دلیل نیاز به شرایط بسیار استریل، محدودیت‌هایی دارد (۳). عملکرد MFCها توسط فاکتورهای متعددی همچون جنس الکتروود، مساحت سطح الکتروود، فاصله بین الکتروودها، شکل راکتور، غشای تبادل پروتون، درجه حرارت و غیره می‌تواند تحت تأثیر قرار گیرد (۱۰). بیشتر MFCها به‌منظور بهینه‌سازی شرایط رشد باکتریایی در pH خنثی راهبری می‌شوند. با این وجود غلظت کم پروتون‌ها در این pH باعث افزایش مقاومت درونی سلول در مقایسه با سلول‌های سوختی شیمیایی که از الکتروولیت‌های اسیدی استفاده می‌کنند، می‌شود.

در مطالعه‌ای که توسط Qing و همکاران پیرامون تولید الکتریسته با MFC از فاضلاب آبجوسازی انجام شد، حداکثر ولتاژ ۰/۵۷۰۷ و بازده حذف COD به ۴۳-۴۰٪ رسید (۳). همچنین در مطالعه دیگری که در آن فاضلاب صنایع شکلات‌سازی مورد بررسی قرار گرفت؛ بیشینه ولتاژ تولیدی پس از ۱۳۵ ساعت راهبری به ۳۹۸ mV رسید (۹). Ahn و همکاران (سال ۲۰۱۰) نیز توانستند ۲۵/۸۹٪ از COD فاضلاب شهری را حذف کنند (۴). این مطالعه با هدف قابلیت تصفیه فاضلاب و تولید همزمان الکتریسته در پیل سوخت میکروبی انجام شد.

برای حذف اسید اضافی مجدداً درون آب بدون یون قرار گرفت. تمامی این مراحل در دمای  $80^{\circ}\text{C}$  و به مدت 1hr انجام شد (۱۴). فاضلاب سنتتیک به طور پیوسته از طریق یک پمپ پرستالتیک (نانوزیست تک مدل P5۷۶۰) درون محفظه آند تزریق شد. برای برقراری شرایط یکنواخت و اختلاط کامل درون راکتور از مگنت استفاده شد. به منظور تأمین شرایط بی‌هوازی درون محفظه آند، گاز دی‌اکسیدکربن ( $\text{CO}_2$ ) به درون آن دمیده شد. از بافر فسفات (PBS)، به عنوان الکترون پذیرنده در کاتد استفاده شد (۱۰،۹،۲). برای فراهم کردن اکسیژن محلول در محفظه کاتد، این قسمت به طور پیوسته با استفاده از یک پمپ هوادهی شد. در این مطالعه از مجموعه باکتری‌های موجود در شکمبه نشخوارکنندگان استفاده شد. در هر میلی‌لیتر از محتویات شکمبه در حدود  $10^{11}$ – $10^9$  باکتری وجود دارد (۱۲). عملکرد MFC در شش مرحله بارگذاری و در سه زمان ماند متفاوت که در جدول شماره ۲ بیان شده است، مورد ارزیابی قرار گرفت. آزمایشها به حالت پیوسته و در شرایط آزمایشگاهی (دمای  $20^{\circ}\text{C} (\pm 4^{\circ}\text{C})$ ) انجام شد.

همچنین به منظور بررسی اثر میزان بارگذاری آلی بر حذف COD و تولید ولتاژ، راکتور به طور پیوسته طی مدت ۷۲۰ ساعت با استفاده از فاضلاب سنتتیک بر پایه گلوکز در شرایط آزمایشگاهی راهبری شد.

## روش بررسی

راکتور پیل سوختی مورد استفاده در این مطالعه شامل دو محفظه آند و کاتد (هر یک به حجم ۲۵۰ ml) بود که توسط یک غشای تبادل پروتون Nafion (Proton Exchange Membrane) PEM (DuPont Co USA) (۱۱۷) از یکدیگر جدا می‌شدند. الکتروود مورد استفاده در آند از جنس پارچه کربن و کاتد از جنس گرافیت مسطح ( $36\text{cm}^2$ ) انتخاب شد، که هریک توسط یک سیم تیتانیوم درون محفظه‌ها جای گرفتند. قبل از استفاده از غشا لازم است پیش تصفیه صورت گیرد. بدین منظور غشا به ترتیب ابتدا درون محلول آب اکسیژنه (۳۰٪)، آب بدون یون، محلول اسید سولفوریک ۰/۵M و در نهایت

جدول شماره ۱: ویژگی‌های فاضلاب سنتتیک مورد استفاده در راکتور

نوترینت	$\text{KH}_2\text{PO}_4$	KCl	NaCl	$\text{CaCl}_2$	$\text{MgSO}_4$	$\text{NH}_4\text{Cl}$	$\text{K}_2\text{HPO}_4$
غلظت (g/l)	۰/۶۸	۰/۷۴	۰/۵۸	۰/۱	۰/۱	۰/۲۸	۰/۸۷

ولتاژ تولیدی از MFC به طور پیوسته با استفاده از مولتی‌متر دیجیتالی [RIGOL Digital Multimeter (DM۳۰۵۱)] در هر بارگذاری تا رسیدن به ولتاژ ثابت، قرائت شد. جریان (A) با استفاده از رابطه

$$I = V/R$$

که در آن I جریان، V ولتاژ و R مقاومت است، محاسبه شد. توان (P) نیز از رابطه

$$P = V \times I$$

به دست آمد. برای محاسبه چگالی توان ( $\text{mW}/\text{m}^2$ ) و جریان

( $\text{mA}/\text{m}^2$ )، مقادیر به دست آمده به مساحت سطح الکتروود (معمولاً آند) تقسیم شد. چگالی حجمی توان نیز با تقسیم توان به حجم کل راکتور محاسبه شد. برای اندازه‌گیری بخش محلول COD در پایان هر بارگذاری نمونه برداشت شده از خروجی راکتور از فیلتر فایبر گلس واتمن (اندازه منافذ  $1/2\text{mm}$  و قطر  $4/7\text{cm}$ ) عبور داده شد. (Whatman, GF/C)، سپس با استفاده از روش ۵۲۲۰ استاندارد متد، COD فاضلاب سنتتیک اندازه‌گیری شد (۵۲۲۰، HACH COD system) (۱۴).

ولتاژ تولیدی از MFC به طور پیوسته با استفاده از مولتی‌متر دیجیتالی [RIGOL Digital Multimeter (DM۳۰۵۱)] در هر بارگذاری تا رسیدن به ولتاژ ثابت، قرائت شد. جریان (A) با استفاده از رابطه

$$I = V/R$$

که در آن I جریان، V ولتاژ و R مقاومت است، محاسبه شد. توان (P) نیز از رابطه

$$P = V \times I$$

به دست آمد. برای محاسبه چگالی توان ( $\text{mW}/\text{m}^2$ ) و جریان

جدول شماره ۲: روند تغییرات بارگذاری در راکتور پیل سوخت میکروبی

نوبت کاری	غلظت سوبسترا	میزان بارگذاری آلی (kg COD/m <sup>3</sup> -d)	زمان ماند هیدرولیکی (hr)	درصد حذف COD
۱		۶/۶۸۶	۳/۵	۱۲/۳۷
۲	۱g/l	۹/۳۶	۲/۵	۲۷/۸۳
۳		۱۵/۶	۱/۵	۳۶/۰۸۲
۴		۱۲/۲۷۴	۳/۵	۴۶/۳۷
۵	۲g/l	۱۷/۱۸۴	۲/۵	۴۹/۷۲
۶		۲۸/۶۴	۱/۵	۴۰/۷۸

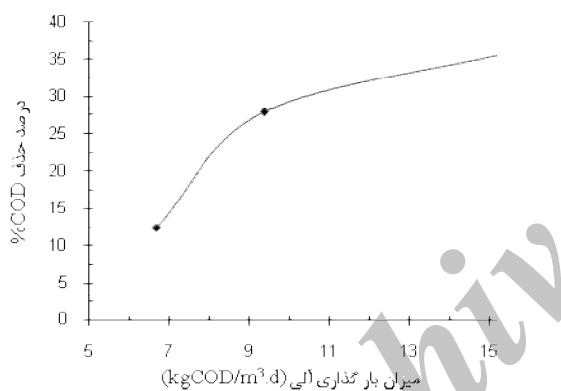
## یافته‌ها

با ورود فاضلاب به درون راکتور، ولتاژ به سرعت افزایش یافت و سپس ثابت شد. نتایج ولتاژ، چگالی جریان و توان و راندمان حذف COD در جدول شماره ۳ آورده شده است.

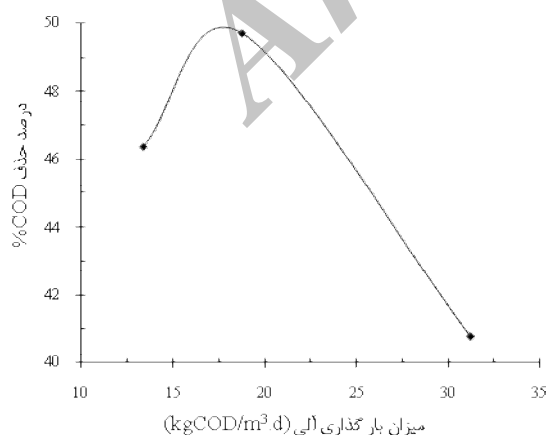
جدول شماره ۳: نتایج ولتاژ، چگالی توان، جریان و راندمان حذف COD

نوبت کاری	راندمان حذف %COD	چگالی توان mW/m <sup>2</sup>	چگالی جریان mA/m <sup>2</sup>	ولتاژ (mV)
۱	۱۲/۳۷	۴۳۹/۵	۴/۵۲	۶۸۵
۲	۲۷/۸۳	۹۱۷	۸/۳	۶۶۰
۳	۳۶/۰۳۷	۶۰۰/۸۹	۸/۷۵	۶۴۵
۴	۴۶/۳۷	۶۸۶/۸	۸/۳۳	۶۲۷
۵	۴۹	۶۳۳	۹/۹	۶۳۳
۶	۴۰	۱۷۰۰	۹/۴۶	۷۰۰

در نوبت‌های کاری چهارم تا ششم، با افزایش میزان بارگذاری بازده حذف ابتدا افزایش و سپس کاهش یافت. در بارگذاری‌های بیشتر از ۱۷/۱۸۴kgSCOD/m<sup>3</sup>.day با افزایش میزان بارگذاری آلی، بازده حذف COD محلول کاهش یافت. در این مرحله، بهترین بازده حذف در زمان ماند ۲/۵ ساعت به دست آمد (نمودار شماره ۲).



نمودار شماره ۱: ارتباط بازده حذف SCOD و میزان بارگذاری آلی در نوبت‌های کاری اول تا سوم



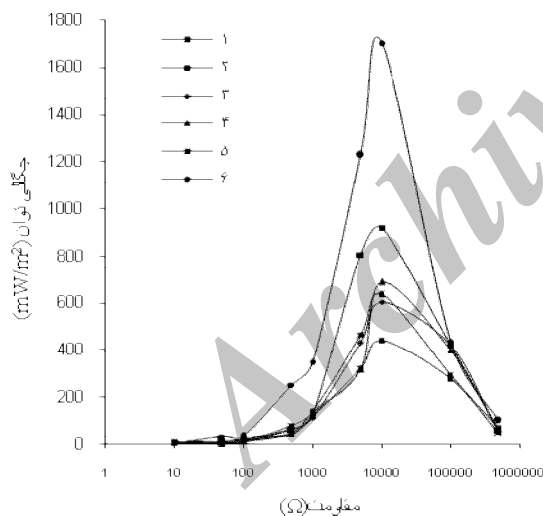
نمودار شماره ۲: ارتباط بازده حذف SCOD و میزان بارگذاری آلی در نوبت‌های کاری چهارم تا ششم

طی شش مرحله راهبری در راکتور، بیشینه ولتاژ به دست آمده در آخرین بارگذاری ۷۰۰mV بود که پس از ۲۱ روز به دست آمد. اما در نخستین ساعات بهره‌برداری نیز به دلیل فراهم بودن شرایط مناسب برای میکروارگانیسم‌ها ولتاژ تولیدی به ۶۸۵mV رسید. ماکزیمم چگالی جریان و توان به دست آمده به ترتیب ۹/۹mA/m<sup>2</sup> و ۱۷۰۰mW/m<sup>2</sup> بود. برای مقایسه اثر افزایش میزان بارگذاری و زمان ماند هیدرولیکی سه زمان ماند (۱/۵، ۲/۵ و ۳/۵ ساعت) که در مطالعات به‌عنوان زمان ماند بهینه برای حذف COD در نظر گرفته می‌شود، در این مطالعه نیز انتخاب شد. در سه مرحله نخست آزمایش با افزایش بارگذاری و کاهش زمان ماند، بازده حذف COD نیز افزایش یافت. در این بارگذاری‌ها، بیشترین میزان حذف در سومین نوبت کاری با میزان بارگذاری ۱۵/۶kgCOD/m<sup>3</sup>-d با زمان ماند ۱/۵ ساعت به دست آمد (نمودار شماره ۱).

با مقدار توان تولیدی در تناقض است. با کاهش زمان ماند، مقدار سوپسترا افزایش می‌یابد و در نتیجه میزان مصرف سوپسترا توسط باکتری‌ها نیز افزایش نشان می‌دهد، که در نتیجه توان تولیدی نیز افزایش خواهد یافت.

به‌منظور مطالعه اثر زمان ماند هیدرولیکی روی توان، سیستم موردنظر با غلظت ثابتی از سوپسترا در سه زمان ماند مختلف راهبری شد. (کاهش یا افزایش زمان ماند هیدرولیکی می‌تواند موجب کاهش ولتاژ و چگالی توان شود). در سه مرحله اول راهبری که زمان ماند از ۳/۵ به ۱/۵ رسید، بیشینه چگالی توان در زمان ماند ۲/۵ ساعت به دست آمد ( $917 \text{ mW/m}^2$ ).

در نوبت‌های کاری چهارم تا ششم بیشینه چگالی توان در آخرین نوبت کاری به  $1 \text{ V/W/m}^2$  رسید. فاکتور اصلی تأثیرگذار در توان، مقاومت درونی  $R_{int}$  است. از این‌رو هنگامی که ماکزیمم توان تولیدی خواهیم رسید که مقاومت درونی و بیرونی با یکدیگر برابر باشند. از نمودار شماره ۴ نیز می‌توان دریافت که در تمامی مراحل کاری، در مقاومت بیرونی معادل  $10 \text{ k}\Omega$  حداکثر توان تولیدی وجود دارد.



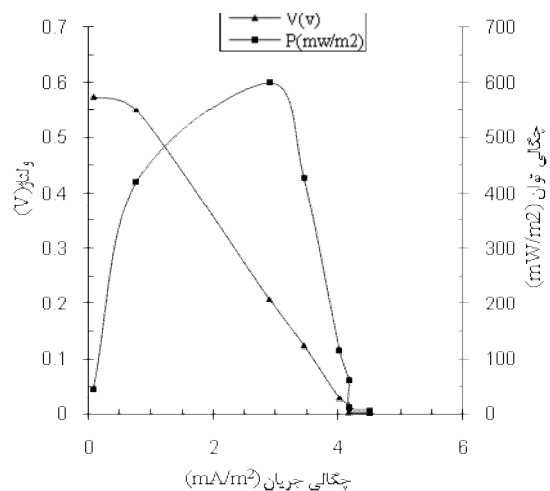
نمودار شماره ۴: ارتباط مقاومت و چگالی توان در نوبت‌های کاری متفاوت

بالا بودن مقاومت درونی سیستم، موجب کاهش توان تولیدی می‌شود. بنابراین، برای داشتن توان خروجی بالا و در عین حال ثابت، MFC باید به‌گونه‌ای طراحی شود که مقاومت درونی کمتری داشته باشد. در واقع، برای تعیین اینکه بیشینه چگالی توان در چه مقاومتی حاصل می‌شود بایستی مقاومت‌های مدار را تغییر

برای تعیین وابستگی عملکرد پیل سوخت میکروبی به مقاومت، از منحنی پلاریزاسیون استفاده می‌شود. برای رسم این منحنی، مقاومت‌هایی را در محدوده  $500 \text{ k}\Omega - 10 \text{ }\Omega$  (هر مقاومت ۱۰-۵ دقیقه)، موازی با مدار قرار داده و ولتاژهای معادل در این مقاومت‌ها توسط مولتی‌متر ثبت می‌شود.

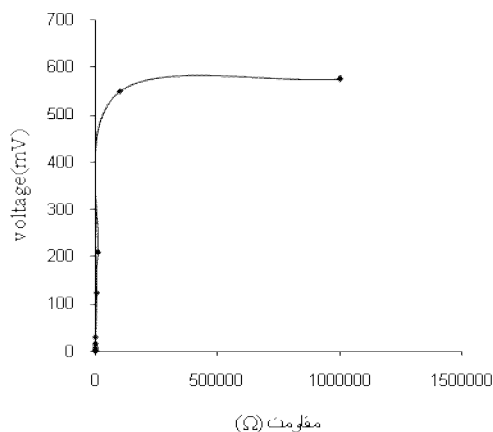
سپس چگالی جریان محاسبه شده و در برابر ولتاژ و چگالی توان رسم می‌شود (نمودار شماره ۳). منحنی پلاریزاسیون نشان می‌دهد چگونه چگالی توان و ولتاژ با تغییر چگالی جریان تغییر می‌کند. با توجه به منحنی پلاریزاسیون مشاهده می‌شود که چگالی توان با افزایش چگالی جریان زیاد شده و در نقطه‌ای به بیشینه مقدار خود می‌رسد ( $917 \text{ mW/m}^2$  و  $R=10000 \text{ }\Omega$ )، پس از این نقطه، به علت افزایش مقاومت اهمی و پتانسیل بیش از اندازه الکترودها، چگالی توان کاهش می‌یابد.

در سیستم‌های پیل سوخت میکروبی (MFC)، بیشینه چگالی توان هنگامی حاصل می‌شود که مقاومت درونی و بیرونی با یکدیگر برابر باشند. از این‌رو، با استفاده از این منحنی می‌توان مقاومتی را که در آن حداکثر تولید توان وجود دارد، به دست آورد. همچنین با استفاده از شیب این منحنی می‌توان مقاومت درونی راکتور را تعیین نمود.



نمودار شماره ۳: منحنی پلاریزاسیون

زمان ماند هیدرولیکی (HRT) (Hydraulic Retention Time)، پارامتر مهمی در تصفیه فاضلاب است که غلظت سوپسترای باقیمانده و مقدار اکسیژن محلول موجود در راکتور را نشان می‌دهد. در سیستم MFC، غلظت سوپسترا و مقدار اکسیژن محلول



نمودار شماره ۶: ارتباط بین مقاومت و ولتاژ

### بحث

با توجه به هدف پژوهش، قابلیت تصفیه فاضلاب و تولید همزمان الکتریسته در یک پیل سوخت میکروبی دو محفظه‌ای با جریان پیوسته در زمان ۷۲۰hr و در شرایط آزمایشگاهی (دمای  $(\pm 4^{\circ}\text{C}) 20^{\circ}\text{C}$ ) مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد علاوه بر تولید ولتاژ، COD فاضلاب تا حد قابل ملاحظه‌ای کاهش یافته است. در دوره راهبری سیستم، بیشینه ولتاژ تولیدی  $700\text{mV}$  بود که پس از زمان  $504\text{hr}$  به دست آمد.

در واقع تولید جریان در پیل سوخت میکروبی براساس انتقال الکترون بین سطح الکترودها است. از سوی دیگر، گلوکز سوبسترای است که به آسانی می‌تواند توسط میکروارگانیسم‌ها تجزیه شود. همچنین در مطالعه حاضر، درصد حذف COD محلول با افزایش میزان بارگذاری آلی در محدوده بارگذاری‌های به کار گرفته شده تا نوبت کاری پنجم افزایش یافت و بیش از ۴۹٪ COD محلول توانست میزان بارگذاری آلی را تا  $17/184\text{kgSCOD}/\text{m}^3\cdot\text{day}$  حذف کند، اما در آخرین نوبت کاری بازده حذف COD تا ۴۰٪ کاهش پیدا کرد.

این نتایج بیانگر آن است که با وجود اینکه تولید الکتریسته در این شرایط به بیشترین مقدار خود رسیده است ( $700\text{mV}$ )، ولی بازده حذف SCOD کاهش نشان می‌دهد. کاهش بازده حذف می‌تواند به علت تولید گاز (هیدروژن یا متان) و یا استفاده باکتری‌ها از سایر الکترون پذیرنده‌هایی مانند اکسیژن نفوذی از طریق غشا باشد.

این سطح از بازده‌های حذف، نشان‌دهنده کاهش غلظت سوبسترا

داد. با توجه به فرمول  $V=I.R$ ، ولتاژ و مقاومت رابطه مستقیمی با یکدیگر دارند. به بیان دیگر، با افزایش مقاومت، ولتاژ افزایش یافته و جریان کاهش می‌یابد.

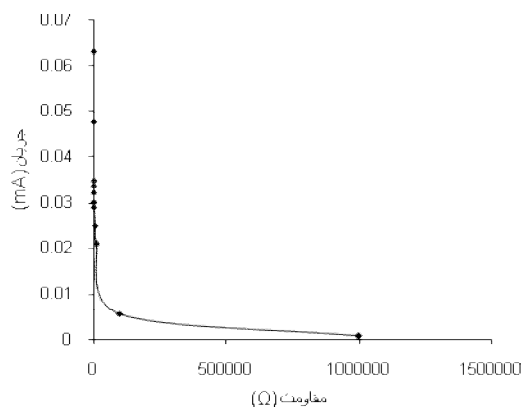
با افزایش مقاومت از  $10\Omega$  به  $50\Omega$  جریان تولیدی از  $0/09\text{mA}$  به  $0/046\text{mA}$  کاهش نشان می‌دهد. این وضعیت در نمودار شماره ۵ نیز قابل مشاهده است.

در مقاومت کمتر، تولید کمتر جریان می‌تواند وابسته به سرعت کمتر مصرف الکترون در کاتد نسبت به سرعت انتقال آن از مدار بیرونی باشد. تولید کمتر جریان بدین معنی است که برخی از الکترون‌ها توسط مکانسیم‌هایی غیر از واکنش کاتدی مصرف شده‌اند. بنابراین، این نکته قابل قبول است که تا وقتی در مدار مقاومت‌های زیاد قرار دارد و خروج الکترون‌ها از طریق مدار محدود است، الکترون‌ها در آنجا صرف کاهش سایر الکترون پذیرنده‌هایی مثل سولفات و نیترات یا اکسیژن نفوذی از محفظه کاتد می‌شوند.

در مقاومت کم، الکترون‌ها به آسانی از مدار بیرونی حرکت کرده و حامل‌های الکترونی روی میکرودهای موجود در محفظه آنجا را اکسید می‌کنند.

انتظار می‌رود اکسیداسیون بیشتر سوخت برای حذف آلودگی‌های آلی توسط میکرودها با سرعت زیاد در مقاومت‌های کمتر صورت گیرد (۱۵).

ارتباط میان مقاومت و ولتاژ در نمودار شماره ۶ نیز نشان داده شده است.



نمودار شماره ۵: ارتباط بین مقاومت و جریان

استفاده از پیل‌های سوخت میکروبی (MFC) در مقیاس صنعتی پس از انجام مطالعات تکمیلی و برآورد اقتصادی، جهت تصفیه فاضلاب توصیه می‌شود. در فرآیندهای هوازی تصفیه فاضلاب مانند لجن فعال، سیستم هوادهی در حدود ۵۰٪ انرژی تصفیه‌خانه فاضلاب را مصرف می‌کند. در MFCها، هوادهی تنها برای انتقال اکسیژن در کاتد نیاز است.

همچنین برآورد می‌شود در ازای هر کیلووات ساعت برق تولیدی از انرژی‌های تجدیدپذیر به جای زغال‌سنگ، می‌توان از انتشار حدود یک کیلوگرم CO<sub>2</sub> جلوگیری کرد (۱). در واقع، محفظه آند MFC همانند یک راکتور بی‌هوازی رشد معلق عمل کرده که معمولاً در فرآیندهای تصفیه فاضلاب کاربرد دارد و در مقایسه با فرآیندهای هوازی مانند لجن فعال، کاهش تولید جامدات از راکتور بیولوژیکی را در پی دارد.

به عبارت دیگر، انتظار می‌رود جامدات تولیدشده از یک واحد MFC بتوانند تا ۴۰٪ مقدار تولیدشده از یک فرآیند هوازی را کاهش دهند (۱). این مزیت علاوه بر اینکه کنترل و راهبری جامدات را در تصفیه‌خانه آسان می‌سازد، موجب کاهش هزینه‌ها نیز می‌شود.

### تشکر و قدردانی

بدین وسیله، از مرکز تحقیقات آلاینده‌های محیطی وابسته به دانشگاه علوم پزشکی قم که با کمک‌های مالی و آزمایشگاهی این پژوهش به (شماره طرح ۸۸۱۵۱) را یاری نمودند، سپاسگزاری می‌نمایم.

در خروجی و بیانگر عملکرد مؤثر گونه‌های میکروبی تخصصی‌شده موجود در سیستم که از منبع کربن موجود در فاضلاب سنتتیک استفاده می‌کنند، می‌باشند. نتایج این پژوهش با نتایج مطالعه Venkata و همکاران که نشان دادند با افزایش میزان بارگذاری آلی، بازده حذف COD به ۶۲/۵٪ می‌رسد قابل مقایسه است (۱۲). همچنین به نظر می‌آید که در محدوده بارگذاری‌های به کار گرفته شده در این مطالعه، زمان ماند بهینه برای دستیابی به بیشترین مقدار توان تولیدی در زمانهای ۱/۵ و ۲/۵ ساعت بوده است. نتایج به دست آمده از مطالعه Feng و همکاران نیز نشان داد در زمانهای ماند هیدرولیکی بین ۲/۵ و ۳/۵ ساعت، بیشینه چگالی توان تولید می‌شود و بیشترین بازده حذف COD نیز در این زمانها به دست می‌آید. بنابراین، این محدوده زمانی را می‌توان به‌عنوان زمان ماند بهینه برای راهبری راکتور پیل سوخت میکروبی معرفی نمود (۱۶). از طرفی، فاکتور مهمی که عملکرد راکتور را ارتقا می‌بخشد، به‌هم‌زدن پیوسته فاضلابی است که وارد آند می‌شود. در مطالعات گوناگونی بیان شده است انتقال آهسته پروتون بین آند و کاتد می‌تواند تولید توان را محدود کند. از این‌رو، به‌هم‌زدن فاضلاب به‌علت بالا بردن انتقال پروتون به کاتد و انتقال سوبسترا به آند ممکن است دانسته توان را افزایش دهد، همچنین گرادیان غلظت اسیدهای فرار تولیدشده از هیدرولیز و تخمیر مواد آلی در بیوفیلم را نیز کاهش دهد (۱).

### نتیجه‌گیری

طبق نتایج این مطالعه، با توجه به مزایایی از قبیل تولید مستقیم الکتریسته از فاضلاب و حذف قابل توجهی از بار آلی فاضلاب،

### References:

1. Logan BE. Microbial Fuel Cell. New York: John Wiley & Sons; 2008.
2. Logan BE, et al. Electricity Generation Using Membrane and Salt Bridge Microbial Fuel Cells. Water Res 2005;39(9):1675-1686.
3. Qing W, et al. Electricity Generation and Modeling of Microbial Fuel Cell from Continuous Beer Brewery Wastewater. Bioresour Technol 2009;100(18):4171-4175.

4. Ahn Y, Logan BE. Effectiveness of Domestic Wastewater Treatment Using Microbial Fuel Cells at Ambient and Mesophilic Temperatures. *Bioresour Technol* 2010;101(2):469-75.
5. Chaudhuri SK, Lovely DR. Electricity Generation by Direct Oxidation of Glucose in Mediatorless Microbial Fuel Cells. *J Nature Biotechnol* 2003;21(10):1229-1232.
6. Liu H, Cheng S, Logan BE. Production of Electricity from Acetate or Butyrate Using in a Single-Chamber Microbial Fuel Cell. *J Environ Sci Technol* 2005;39(2):658-662.
7. Jiang J, Zhao Q, Zhang J, Zhang G, Lee D. Electricity Generation from Bio-treatment of Sewage Sludge with Microbial Fuel Cell. *Bioresour Technol* 2009;100:5808-5812.
8. Bookie M, Jung Rae, Sanguine K, John O, Regan M, Bruce E, Logan BE. Electricity Generation from Swine Wastewater Using Microbial Fuel Cells. *J Water Research* 2005;39(20):4961-4968.
9. Patil SA, Surakasi VP, Koul S, Ijmulwar S, Vivek A, Shouche YS, Kapadnis BP. Electricity Generation Using Chocolate Industry Wastewater and Its Treatment in Activated Sludge Based Microbial Fuel Cell and Analysis of Developed Microbial Community in the Anode Chamber. *Bioresour Technol* 2009;100(21):5132-5139.
10. Behera M, Ghangrekar MM. Performance of Microbial Fuel Cell in Response to Change in Sludge Loading Rate at Different Anodic Feed pH. *Bioresour Technol* 2009;100(21):5114-5121.
11. Rismani-Yazdi H, Christy Ann D, Dehority Burk A, Morrison M, Zhongtang Yu, Tuovinen Olli H. Electricity Generation from Cellulose by Rumen Microorganisms in Microbial Fuel Cells. *J Biotechnol Bioeng* 2007;97(6):1398-1407.
12. Venkata MS, Veer Raghavulu S, Srikanth S, Sarma PN. Bioelectricity Production by Mediator Less Microbial Fuel Cell Under Acidophilic Condition Using Wastewater as Substrate: Influence of Substrate Loading Rate. *Current Sci* 2007;92(12):1720-1726.
13. Mansoori H, Nikkhah A, Rezaeian M, Mirhadi SA. The Comparison Rumen Microbial Population in Holstein and Sistani Cows. *Pajohesh Va Sazandegi* 2006;19(3):66-73. [Full Text in Persian]
14. APHA. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. Washington: American Water Works Association, Water Environment Federation; 1998.
15. Ghangrekar MM, Shinde VB. Microbial Fuel Cell: A New Approach of Wastewater Treatment Whit Power Generation. Proceeding of International Workshop on R&D Frontiers in Water and Wastewater Management 'Water 2006-NEERI', January 20-21, 2006, Nagpur, India.
16. Feng Y, Lee H, Wang X, Liu Y, He W. Continuous Electricity Generation by a Graphite Granule Baffled Air-cathode Microbial Fuel Cell. *Bioresour Technol* 2010;101(2):632-638.



## ***Electricity Generation from Synthetic Wastewater Treatment in Microbial Fuel Cell***

***Yavari Z.<sup>1</sup>; Tashauoei H.R.<sup>2</sup>; Naddafi K.<sup>3</sup>; Izanloo H.<sup>4</sup>;  
Khazae M.<sup>5</sup>; Mahmoodian M.H.<sup>5</sup>***

<sup>1</sup>*Instructor of Environmental Health, Research Center for Environmental Pollutants, Faculty of Health, Qom University of Medical Sciences, Qom, Iran.*

<sup>2</sup>*Assistant Professor of Environmental Health, Faculty of Health, Islamic Azad University, Tehran Medical Branch, Tehran, Iran.*

<sup>3</sup>*Professor of Environmental Health, Faculty of Health, Tehran University of Medical Sciences, Tehran, Iran.*

<sup>4</sup>*Assistant Professor of Environmental Health, Research Center for Environmental Pollutants, Faculty of Health, Qom University of Medical Sciences, Qom, Iran.*

<sup>5</sup>*Instructor of Environmental Health, Faculty of Health, Qom University of Medical Sciences, Qom, Iran.*

**Corresponding Author:**

Research Center for Environmental Pollutants, Faculty of Health, Qom University of Medical Sciences, Qom, Iran.

Email:  
hizan52@gmail.com

Received: 3 Mar, 2011

Accepted: 30 May, 2011

### ***Abstract***

***Background and Objectives:*** Microbial fuel cell (MFC) used for electricity generation and wastewater treatment, simultaneously. In MFC, microorganisms act as a catalyst to convert chemical energy stored in organic materials into electrical energy. This study was performed with the aim of electricity generation from synthetic wastewater treatment in microbial fuel cell.

***Methods:*** A dual chambered microbial fuel cell was operated in continuous flow for 720 hours at temperature  $20\pm 4^{\circ}\text{C}$  at different organic loading rates and hydraulic retention times.

***Results:*** Organic loading rate and hydraulic retention time were effective factors for the power production and removal of organic loading rate. Maximum COD removal efficiency was observed as 49% for a period of 1.5 to 2.5 hours that this range of time can be used as optimum retention time for operation of microbial fuel cell reactor. Maximum voltage and power production were obtained 700 mV and  $1700 \text{ mW/m}^2$ , respectively.

***Conclusion:*** Considering the advantages such as direct electricity generation from wastewater and considerable removal efficiency of organic loading rate, wastewater treatment in a microbial fuel cell, application of industrial scale microbial fuel cell for wastewater treatment is recommended after complementary studies and economic assessment.

***Keywords:*** Bioelectric Energy Sources; Voltage; Organic Loading; Power; Electric Power Supplies.