

# بررسی پارامترهای دما و شدت جریان سابستریت بر عملکرد پیل سوختی میکروبی دو محفظه ای

مرتضی اسفندیاری\*<sup>+</sup>

گروه مهندسی شیمی، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه بجنورد، بجنورد، ایران

**چکیده:** در سال های اخیر مصرف انرژی در صنایع گوناگون به سرعت در حال افزایش می باشد. سوخت های فسیلی که منابع اصلی تأمین انرژی به شمار می روند نیز به علت محدودیت و ناپایداری و همچنین به دلیل آلودگی های زیست محیطی و انتشار گازهای گلخانه ای، بشر را ملزم به تأمین انرژی از منابع جایگزین و ترجیحاً تجدیدپذیر نموده است. یکی از منابع تجدیدپذیر استفاده از پیل های سوختی میکروبی به منظور تولید الکتریسیته می باشد. در پیل های سوختی میکروبی میکروارگانیسم ها در محفظه بی هوازی آند در اثر اکسایش سابستریت، پروتون و الکترون تولید می کنند. پروتون ها با نفوذ از غشای تبادل پروتونی و الکترون ها از طریق مدار خارجی به سمت محفظه کاتد می روند. الکترون ها و پروتون ها در حضور پذیرنده الکترون یعنی اکسیژن آب تولید می کنند. در نتیجه فرایند پیل سوختی میکروبی از نظر اقتصادی نیز دارای اهمیت زیادی می باشد. یکی از راه های شناسایی پیل سوختی میکروبی، مدل سازی یا شبیه سازی می باشد. بدین منظور پس از مدل سازی و شبیه سازی پیل سوختی میکروبی دو محفظه ای، دو متغیر تأثیر گذار بر روی پیل سوختی میکروبی شامل شدت جریان سابستریت و دما مورد بررسی قرار گرفت. بدین منظور پس از بررسی این متغیرها، شدت جریان سابستریت در سه حالت ( $Q_a = 22.5 \frac{cm^3}{h}$ ,  $0.8 Q_a = 18 \frac{cm^3}{h}$ ,  $1.2 Q_a = 27 \frac{cm^3}{h}$ )، بیشترین توان به دست آمده از شدت جریان ۲۲/۵ سانتیمتر معکب بر ساعت به دست آمد و همچنین برای اثرهای دما از دمای ۲۹۸ تا ۳۳۳ درجه کلوین مورد بررسی قرار گرفت که بیشترین توان در دمای ۲۹۸ کلوین به دست آمد.

**واژه های کلیدی:** پیل سوختی میکروبی؛ استات؛ آند؛ دما، شدت جریان؛ توان.

**KEYWORDS:** Microbial fuel cell; Acetate; Anode; Temperature; Flow; Power.

## مقدمه

دما یکی پارامترهای مهم بر روی عملکرد پیل سوختی میکروبی می باشد از آنجایی تغییرها در دما تأثیرهایی بر روی سینتیک سامانه، انتقال جرم (انرژی فعال سازی، ضریب انتقال جرم و هدایت محلول)، ترمودینامیک (انرژی آزاد گیبس، پتانسیل الکتروود) و .. دارد. اگر چه پژوهش ها در این زمینه در سال های گذشته افزایش یافته است ولی هیچ اطلاعات مفیدی در مورد تأثیر دما در پیل های سوختی

کارایی پیل های سوختی میکروبی در مقیاس آزمایشگاهی خیلی کم تر از کارایی ایده ال می باشد در نتیجه برای افزایش کارایی پیل های سوختی میکروبی باید فاکتورهای متعددی همچون جنس الکتروود، فاصله بین الکتروودها، شکل راکتور، غشای تبادل پروتون، میزان گرما، غلظت سابسریت، غلظت اکسیژن و... می تواند تحت تأثیر قرار گیرد [۱].

\*E-mail: M.esfandyari@ub.ac.ir

\*عهده دار مکاتبات

مورد استفاده در پیل های سوختی میکروبی اعم از کربوهیدرات های ساده مانند گلوکز، استات، لاکتات و بوتیرات و پساب کارخانه های گوناگون مانند رنگ، نشاسته سازی و... می باشد.

یکی از مهم ترین پارامترهای پیل های سوختی میکروبی پیوسته، شدت جریان خوراک ورودی به پیل و به دنبال آن زمان ماند هیدرولیکی آنولیت در داخل پیل می باشد. در مطالعه ای توسط رحیم نژاد و همکاران [۵] زمان ماند هیدرولیکی پیل های سوختی میکروبی پیوسته مورد بررسی قرار گرفت. محفظه آند با حجم ۸۰۰ میلی لیتر از گونه خالص *Saccharomyces cerevisiae* به عنوان بایو کاتالیست و قرمز خنثی با غلظت ۲۰۰ میکرو مولار به عنوان واسطه خارجی استفاده شد. و همچنین رحیم نژاد و همکاران در سال ۲۰۱۴ و ۲۰۱۵ میلادی مروری کامل بر اثرهای شدت جریان سابسטרیت و ... بر روی عملکرد پیل سوختی میکروبی دو محفظه ای انجام داده اند [۶، ۷]. در مطالعه ای در سال ۲۰۱۴ میلادی، از پساب صنعتی به عنوان الکترولیت محفظه آند استفاده شد و اثر زمان ماند هیدرولیکی در توان خروجی پیل مورد بررسی قرار گرفت [۸].

در سال ۲۰۱۲ میلادی، پژوهشی توسط وینفلید و همکاران برای بررسی تغییر میزان شدت جریان بر روی عملکرد مجموعه پیل سوختی میکروبی انجام شد. این پیل ها از نظر هیدرولیکی اتصال پشت سر هم داشتند. چگونگی عملکرد پیل و میزان دسترسی میکروارگانیسم به مواد مغذی در شدت جریان بالاتر مناسب تر بود [۹]. در پژوهشی توسط جانگ و همکارانش، اثر شدت جریان خوراک ورودی شامل پساب و مواد مغذی بر عملکرد پیل سوختی و میزان حذف بار آلی مورد بررسی قرار گرفت [۱۰].

در فرایند پیل های سوختی میکروبی سابسטרیت هم به عنوان منبع کربن و هم به عنوان منبع انرژی نقش مهمی بازی می کند. هم چنین سابسטרیت تأثیر زیادی روی عملی بودن فرایند از نظر اقتصادی و عملکرد کلی پیل دارد. بنابراین مطالعه های زیادی در زمینه نوع سابسטרیت مصرفی در پیل شده است. منبع کربن مورد استفاده نیز می تواند هم از کربوهیدرات های ساده همچون گلوکز، استات، بوتیرات و لاکتات و هم از پساب صنایع گوناگون باشد [۱۱]. تأثیر غلظت سابسטרیت بر جامعه میکروبی و تولید توان در پیل سوختی میکروبی نیز مشهود می باشد.

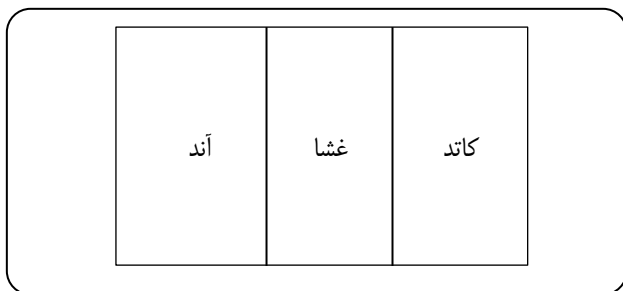
تاکنون مطالعه های بسیار گسترده ای بر روی عملکرد پیل های سوختی میکروبی صورت گرفته است. که بیش تر مطالعه های انجام شده، مطالعه های آزمایشگاهی شامل بررسی پارامترهای گوناگون بر عملکرد پیل سوختی می باشد. اگر چه در آغاز پیدایش یک فناوری،

میکروبی وجود ندارد. ولی دیده شده است دما یک عامل حیاتی در عملکرد پیل سوختی میکروبی برای حذف COD و تولید توان می باشد. و نشان داده شده است که با افزایش دما توان خروجی و حذف COD افزایش می یابد. [۲]

همچنین دما به عنوان یک پارامتر مهم در فرایند تجزیه و هضم بی هوازی مطرح می باشد. با این که اغلب واکنش های آندی در شرایط بی هوازی انجام می گیرد، تأثیر دما در این شرایط باید مورد بررسی قرار گیرد. اغلب فرایندهای بی هوازی در بازه ی مزوفیلیک از دما عمل می کنند و با توجه به این که دمای بهینه برای میکروارگانیسم های مزوفیلیک در اطراف ۳۵ تا ۴۰<sup>0</sup>C می باشد. بنابراین این دامنه دمایی، بهترین حالت برای انجام واکنش های بی هوازی است. [۳] وقتی دما از این مقدار پایین تر بیاید، فعالیت میکروارگانیسم ها به تدریج کم می شود. عملکرد پیل های سوختی میکروبی براساس تولید برق از تصفیه ی پساب در بازه ی دمایی بالاتر بهبود می یابد. هر چند که ثابت شده پیل های سوختی میکروبی به اندازه ی تجزیه کننده های بی هوازی متعارف در بازه ی دمایی به نسبت پایین هم (یعنی بین ۴ تا ۱۵ درجه ی سلسیوس) چندان حساس نیستند. برتری که پیل های سوختی میکروبی نسبت به دیگر تجزیه کننده های متعارف دارند توانایی تجزیه در نرخ های پایین جریان و دماهای پایین می باشد تا آن جایی که همین ویژگی سبب می شود که در منطقه های سردسیر، بتوان از پیل سوختی میکروبی به عنوان یک وسیله ی مناسب برای تصفیه ی پساب استفاده کرد. [۴]

*Larrosa-Guerrero* و همکاران [۲] نشان داده اند که هر چقدر دما بالاتر می رود توان خروجی از پیل سوختی میکروبی افزایش می یابد. همچنین تغییرهای دما بر روی هدایت الکتریکی خوراک تأثیرگذار است که در آن با افزایش دما، هدایت الکتریکی خوراک نیز افزایش می یابد.

پیل های سوختی میکروبی سامانه های بیوکاتالیستی هستند که با مصرف سابسטרیت توسط میکروارگانیسم، الکتریسیته تولید می کنند. در اثر اکسایش مواد آلی توسط میکروارگانیسم، الکترون، پروتون و دی اکسید کربن تولید می شود. به واکنش های متابولیک اجازه داده نمی شود که تا کامل شدن پیش بروند و الکترون های واسطه از سلول بیرون کشیده می شوند تا کار الکتریکی انجام دهند. سابسטרیت نقش مهمی را در فرایندهای زیستی بازی می کند زیرا هم به عنوان منبع کربن و هم به عنوان منبع انرژی عمل می کند. نوع سابسטרیت بر ترکیب جامعه باکتریایی در فیلم زیستی آند و بر فاکتورهای پیل سوختی میکروبی از جمله دانسیته توان تأثیر می گذارد. سابسטרیت های



شکل ۱- شمایی از مدل مورد نیاز در پیل سوختی میکروبی.

### محفظه کاتد

بیشتر پژوهشگران ماده مصرفی در پیل‌های سوختی میکروبی در قسمت کاتد را هوا در نظر می‌گیرند، ولی می‌توان مواد دیگری هم در نظر گرفت. در کاتد هوای تزریق شده، اکسیژن محلول برای واکنش را فراهم می‌سازد [۱۶، ۱۴].

اگر اکسیژن را به عنوان ماده مصرفی در کاتد در نظر بگیریم واکنشی که در کاتد اتفاق می‌افتد به صورت زیر می‌باشد [۱۷].



### مدل سازی پیل سوختی میکروبی

شمایی از این مدل در شکل ۱ نشان داده شده است. برای هر قسمت معادله‌ها به صورت مجزا نوشته می‌شوند [۱۶].

### فرضیه‌های مورد استفاده در مدل

در این مطالعه فرض‌های زیر در مدلسازی مورد استفاده قرار گرفته است:

- از استات به عنوان گونه الکترون دهنده (سابستریت) استفاده شده است.

- جامعه میکروبی به طور کامل در شرایط بی‌هوازی قرار دارد و سطح آند تنها پذیرنده نهایی الکترون است. بنابراین از فرایندهای مانند تخمیر، متان زدایی و نشت اکسیژن از غشا چشم‌پوشی شده است.

- هوا به عنوان خوراک ورودی به محفظه کاتد در نظر گرفته شده است.

- فرایند به صورت پیوسته در نظر گرفته شده است [۱۸].

### معادله‌های بقای جرم

در پیل‌های سوختی دونیم واکنش افزایش/کاهش جدا از هم و به ترتیب در محفظه‌های آندی و کاتدی انجام گرفته و سابستریت

مطالعه‌های آزمایشگاهی ضروری می‌باشد. ولی مدل‌سازی ریاضی و شبیه‌سازی فرایند نقش بسیار مهمی در بررسی پیل سوختی میکروبی بازی می‌کند.

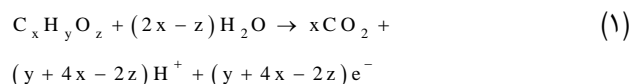
در مقاله حاضر، ابتدا واکنش‌های شیمیایی که در کاتد و آند صورت می‌گیرند شرح داده شده‌اند. سپس ساختار مدل پیشنهادی ارائه شده است. با استفاده از واکنش‌ها و موازنه جرم پیل سوختی میکروبی دو محفظه ای شبیه‌سازی می‌شود. با استفاده از داده‌های موجود، مدل پیشنهادی مورد ارزیابی قرار می‌گیرد و در ادامه با استفاده از مدل ارائه شده تأثیر متغیرهای گوناگون مانند دمای فرایند، غلظت سابستریت و... مورد بررسی قرار می‌گیرد. و سرانجام براساس تأثیر پارامترهای گوناگون، بیشینه توان تولیدی از پیل سوختی میکروبی مورد بررسی تعیین می‌شود.

### واکنش‌های شیمیایی در پیل سوختی میکروبی

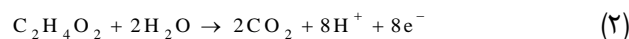
#### محفظه آند

سابستریت نقش مهمی را در هر فرایند زیستی بازی می‌کند زیرا به عنوان منبع کربن و انرژی عمل می‌کند. نوع سابستریت بر ترکیب جامعه باکتریایی در لایه زیستی آند و بر عملکرد پیل سوختی میکروبی شامل دانسیته توان و بازده کولمبیک تأثیر می‌گذارد. گستره وسیعی از مواد آلی از کربوهیدرات‌های ساده مانند گلوکز، اسیدلاکتیک، استات و بوتیرات تا ترکیب‌های آلی پیچیده مانند پساب‌های خانگی، پساب‌های دامداری‌ها، پساب‌های صنایع شکلات‌سازی و آبجوسازی به عنوان سابستریت در پیل‌های سوختی میکروبی به کار برده شده‌اند [۱۳، ۱۲]. غلظت سابستریت، ترکیب سابستریت و نوع سابستریت بر توانایی میکروبی پیل و تولید پروتون و الکترون تأثیر دارد [۱۴].

اگر سابستریت را یک هیدروکربن خالص در نظر بگیریم، واکنشی که در آند اتفاق می‌افتد به صورت زیر می‌باشد:



در بیشتر پیل‌های سوختی میکروبی از استات به عنوان سابستریت استفاده می‌شود که منجر به بازده کولمبیک و توان خروجی بالا می‌شود [۲]. در نتیجه در این مطالعه، استات به عنوان سابستریت در نظر گرفته شد. با انتخاب استات به عنوان سابستریت، واکنشی که در آند صورت می‌گیرد به صورت زیر می‌باشد [۱۵]:



جدول ۱- معادله‌های مدل پیشنهادی

شماره	معادله	شرح معادله
(۴)	$r_s(t) = \frac{dS(t)}{dt} = k_1^0 \exp\left(\frac{\alpha F}{RT} \eta_a\right) \frac{C_{AC}}{K_{AC} + C_{AC}} X$	معادله سرعت مصرف سابستریت
(۵)	$r_c(t) = \frac{dO_2(t)}{dt} = -k_2^0 \exp\left(\frac{(\beta - 1)F}{RT} \eta_c\right) \frac{C_{O_2}}{K_{O_2} + C_{O_2}}$	معادله سرعت مصرف اکسیژن در محفظه کاتد
(۶)	$V_a \frac{dC_{AC}}{dt} = Q_a (C_{AC}^{in} - C_{AC}) - A_m r_s(t)$	معادله بقای جرم سابستریت در محفظه آند
(۷)	$V_a \frac{dC_{CO_2}}{dt} = Q_a (C_{CO_2}^{in} - C_{CO_2}) + 2A_m r_s(t)$	معادله بقای جرم کربن دی اکسید در محفظه آند
(۸)	$V_a \frac{dC_H}{dt} = Q_a (C_H^{in} - C_H) + 8A_m r_s(t)$	معادله بقای جرم هیدروژن در محفظه آند
(۹)	$V_a \frac{dX}{dt} = Q_a \frac{(X^{in} - X)}{f_x} + A_m Y_{ac} r_s(t) - V_a K_{dec} X$	معادله بقای جرم زیست توده در محفظه آند
(۱۰)	$V_c \frac{dC_{O_2}}{dt} = Q_c (C_{O_2}^{in} - C_{O_2}) + A_m r_c(t)$	معادله بقای جرم اکسیژن در محفظه کاتد
(۱۱)	$V_c \frac{dC_{OH}}{dt} = Q_c (C_{OH}^{in} - C_{OH}) - 4A_m r_c(t)$	معادله بقای جرم غلظت OH <sup>-</sup> در محفظه کاتد
(۱۲)	$V_c \frac{dC_M}{dt} = Q_c (C_M^{in} - C_M) + A_m N_M$	معادله بقای جرم غلظت M در محفظه کاتد
(۱۳)	$N_M = 3600 \frac{i_{cell}}{F}$	معادله شار یون های M <sup>+</sup> از آند به بخش کاتد
(۱۴)	$C_a \frac{d\eta_a}{dt} = 3600 i_{cell} - 8F r_s(t)$	موازنه بار در آند
(۱۵)	$C_c \frac{d\eta_c}{dt} = -3600 i_{cell} - 4F r_c(t)$	موازنه بار در کاتد
(۱۶)	$i_{cell} = F \sum_i Z_i N_i$	جریان الکتریسته
(۱۷)	$U_{cell} = U^0 - \eta_a + \eta_c - \left(\frac{d^m}{K^m} + \frac{d_{cell}}{K_{aq}}\right) i_{cell}$	ولتاژ پیل سوختی میکروبی

همه معادله‌های مورد نیاز در نرم افزار MATLAB نوشته شده و پس از نوشتن معادله‌های بقای جرم و معادله‌های الکتروشیمیایی نیاز به یک روش حل عددی برای معادله‌های دیفرانسیل می‌باشد که در این مقاله، از روش Ode45 استفاده شده است. که همان روش رانگ - کاتای مرتبه ۴ با اندازه قدم متغیر می‌باشد.

### مقدارهای عددی پارامترهای مورد نیاز

مقدارهای عددی بعضی از پارامترهای مورد نیاز در مدل پیشنهادی، با توجه به کارهای قبلی منتشر شده در مقاله‌ها جمع‌آوری شده اند، این مقادیر برای سابستریت استات در جدول ۲ گزارش شده است [۱۸، ۱۶، ۱۴].

### نتیجه‌ها و بحث

#### اعتبار سنجی عملکرد مدل پیشنهادی برای پیل سوختی میکروبی

از آنجاکه استفاده گسترده و صنعتی از پیل‌های سوختی میکروبی مستلزم کاربرد آن‌ها در حالت پیوسته است، پرداختن به این موضوع

نقش الکترون دهنده و در بیش‌تر موارد اکسیژن نقش پذیرنده نهایی الکترون را بازی می‌کنند. در پیل‌های سوختی میکروبی، اگر توجه خود را تنها به محفظه بی‌هوازی آندی معطوف داریم، به ترتیب آزنیم‌های درون سلولی میکروبوها، غشای سلولی آن‌ها و سرانجام الکتروود آند، نقش الکترون گیرنده را بازی می‌کنند. الکترون‌ها پس از انتقال به الکتروود آند، از طریق مدار الکتریکی خارجی به الکتروود کاتد رسیده و در معرض اکسیژن قرار می‌گیرند. در مطالعه حاضر از فرایندهای درون سلولی صرف نظر کرده و تنها فرایندهای انتقال الکترون درون محفظه آند هادی الکتریسته و الکتروود آند را در نظر می‌گیریم [۱۶].  
به منظور بررسی مدل ارایه شده، نخست خلاصه ای از معادله‌های آن در جدول ۱ ارایه شده است [۱۸].

#### روش حل عددی مدل

پس از استخراج معادله‌های لازم (۱ تا ۱۷) برای مدل سازی پیل سوختی میکروبی، لازم است روش حل عددی مناسب تعیین شود. در این بخش به چگونگی حل عددی معادله‌های یادشده می‌پردازیم.

الزامی به نظر می‌رسد. در حالت پیوسته، جریان ورودی دارای سابستریت با شدت جریان حجمی و غلظت مشخص وارد آند شده، تولید الکتروسیسته می‌کند. برای اعتبار سنجی مدل پیشنهادی از داده‌های پیل سوختی میکروبی پیوسته با شدت جریان حجمی ۲۲/۵ سانتیمتر معکب بر ساعت در غلظت ۱/۵۶ مول بر متر معکب (سابستریت) استفاده شد.

برای بررسی عملکرد پیل سوختی میکروبی، نمودار تغییرهای غلظت اجزای گوناگون شامل محفظه آند و کاتد نسبت به دانسیته جریان در شکل ۲ و شکل ۳ رسم شده است. همان‌گونه که مشخص است غلظت مواد اولیه کم‌تر شده و غلظت فراورده‌ها افزایش پیدا کرده‌اند. شبیه‌سازی‌های در دمای ۳۰ درجه سلسیوس با شدت جریان سابستریت ۲۲/۵ سانتیمتر معکب بر ساعت صورت گرفته است. در شکل ۲، چگونگی تغییرهای غلظت پیش بینی شده نسبت به دانسیته جریان رسم شده‌اند. همان‌گونه که مشاهده می‌شود غلظت فراورده‌ها در محفظه آند از مقدار اولیه صفر شروع شده و با افزایش دانسیته جریان افزایش پیدا می‌کند. همان‌گونه که از شکل‌ها مشخص است بین داده‌ها و نتیجه‌های شبیه‌سازی تطابق خوبی وجود دارد. در نتیجه می‌توان از این مدل برای پیش بینی و بررسی پارامترهای گوناگون روی عملکرد پیل سوختی میکروبی مورد بررسی قرار داد.

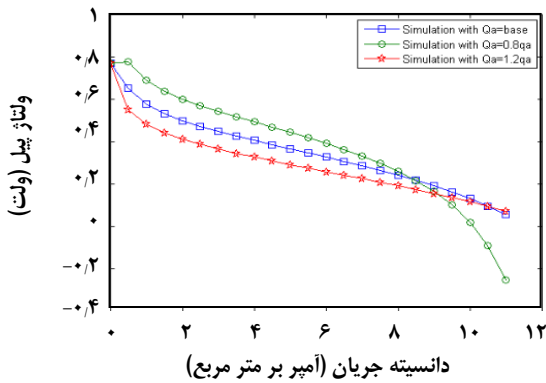
شکل ۳ تغییر غلظت مواد اولیه و فراورده‌ها در محفظه کاتد نسبت به دانسته جریان رسم شده‌اند.

#### تغییر ولتاژ تولیدی و دانسیته توان با شدت جریان سابستریت

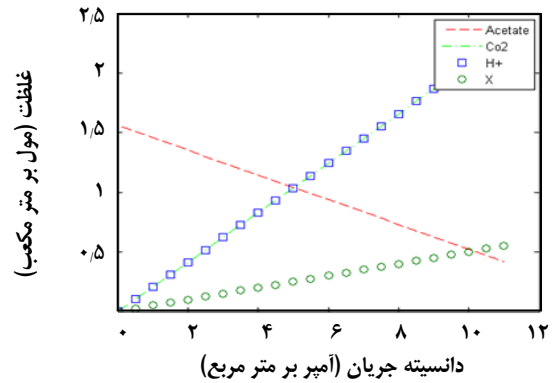
با توجه به نتیجه‌های شبیه‌سازی می‌توان تغییر ولتاژ و دانسیته توان بر حسب دانسیته جریان در شکل ۴ و شکل ۵ رسم شده‌اند. بدین منظور شدت جریان سابستریت در سه حالت گوناگون ( $Q_a = 22.5 \frac{cm^3}{hr}$ ,  $0.8 Q_a = 18 \frac{cm^3}{hr}$ ,  $1.2 Q_a = 27 \frac{cm^3}{hr}$ ) تنظیم نموده و براساس این شدت جریان‌ها نمودار تغییرهای ولتاژ بر حسب دانسیته جریان رسم شده است. با افزایش شدت جریان سابستریت ولتاژ تولیدی کاهش می‌یابد. دلیل این امر این است که بیش‌تر واکنش آندی در سطح الکتروود آند صورت می‌گیرد و با توجه به این‌که پیل سوختی میکروبی می‌باشد با افزایش شدت جریان باعث شسته شدن سطح آند یا همان زیست‌فیلم تشکیل شده می‌باشد. در نتیجه با کاهش زیست‌فیلم واکنش کمتری اتفاق می‌افتد و ولتاژ تولید کاهش می‌یابد. در نتیجه با توجه به محدود بودن حجم پیل سوختی میکروبی نمی‌توان گفت که افزایش شدت جریان

جدول ۲- مقدارهای عددی پارامترهای مدل پیشنهادی [۱۴، ۱۶، ۱۸]

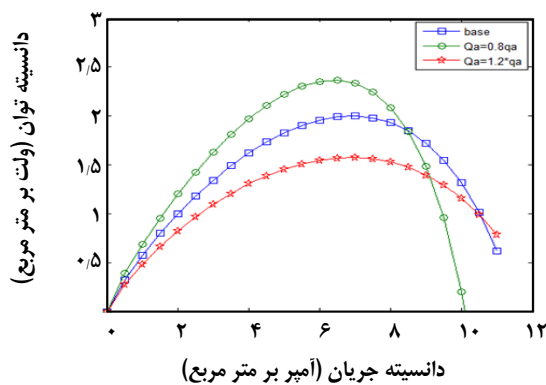
نماد	مقدار	واحد
F	۹۶۴۸۵/۵	coulombs/ mol
R	۸/۳۱۴۴	J/mol K
$d^{cell}$	۲۲	mm
$k^{aq}$	۵	$ohm^{-1} cm^{-1}$
$k^m$	۱۷	$ohm^{-1} cm^{-1}$
$d^m$	۰/۱۷۷۸	mm
$C_a$	۴۰۰	F/ m
$C_c$	۵۰۰	F/m
$V_a$	۵۵	$cm^3$
$V_c$	۵۵	$cm^3$
$A_m$	۵	$cm^2$
$Y_{ac}$	۰/۰۵	--
$K_{Dec}$	۰/۰۰۰۸۳۳	$h^{-1}$
$f_x$	۱۰	--
$Q_a$	۲۲/۵	$cm^3/h$
$Q_c$	۱۱۱۰	$cm^3/h$
$C_{Ac}^{in}$	۱/۵۶	$mol/m^3$
$C_{CO_2}^{in}$	۰	$mol/m^3$
$X^{in}$	۰	$mol/m^3$
$C_{O_2}^{in}$	۰/۳۱۲۵	$mol/m^3$
$C_H^{in}$	۰	$mol/m^3$
$C_M^{in}$	۰	$mol.m^{-3}$
$C_{OH}^{in}$	۰	$mol.m^{-3}$
$U^0$	۰/۷۷	volt
$k_1^0$	۰/۲۰۷	$mol^2/. m^2. h$
$k_2^0$	۰/۰۰۰۳۲۸۸	$mol^{12}/m^4. h$
$K_{AC}$	۰/۵۹۲	$mol/m^3$
$K_{O_2}$	۰/۰۰۴	$mol/m^3$
$\alpha$	۰/۰۵۱	--
$\beta$	۰/۶۶۳	--



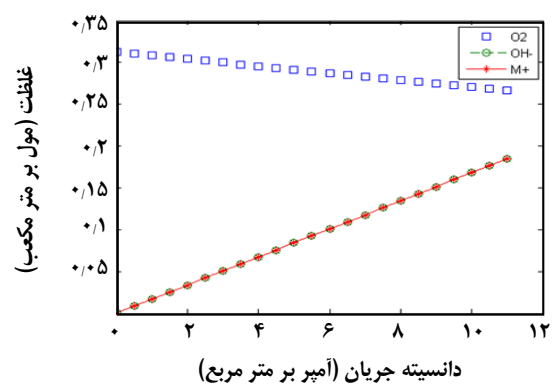
شکل ۱- تغییر ولتاژ خروجی پیل سوختی میکروبی بر حسب دانسیته جریان



شکل ۲- تغییر غلظت اجزای محفظه آند بر حسب دانسیته جریان



شکل ۳- تغییر دانسیته توان خروجی پیل سوختی میکروبی بر حسب دانسیته جریان.



شکل ۴- تغییر غلظت اجزای محفظه کاتد بر حسب دانسیته جریان.

کاهش می یابد. پس حالت بهینه برای عملکرد پیل سوختی میکروبی در دمای محیط می باشد که این مزیتی از پیل های سوختی میکروبی نسبت به پیل های سوختی دیگر می باشد. در نتیجه بهترین عملکرد پیل سوختی میکروبی در همان دمای ۲۵ سلسیوس می باشد. که نتیجه های به دست آمده از این پژوهش با نتیجه های مقاله ها مطابقت دارد.

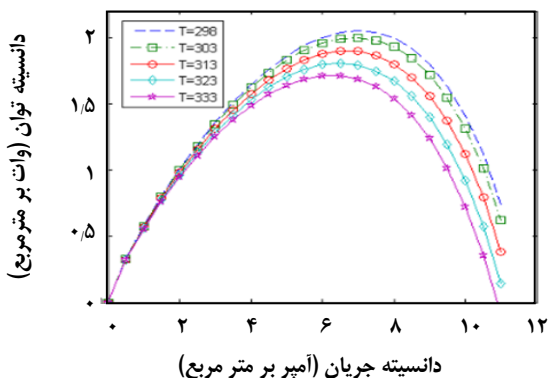
### نتیجه گیری

یک مدل جامع و ساده، برای عملکرد پیل سوختی میکروبی دومحفظه ای در حالت پیوسته مدل سازی و شبیه سازی شد و نشان داده شد که نتیجه های مدل سازی با نتیجه های تجربی هم خوانی قابل پذیرشی وجود دارد. که می توان از این مدل، برای پیش بینی غلظت سابستریت، غلظت کربن دی اکسید محلول، اکسیژن محلول در محفظه کاتد، توان تولیدی، ولتاژ و ... استفاده نمود. با توجه

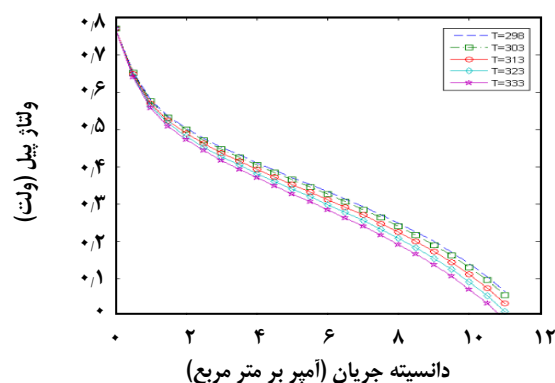
سابستریت باعث افزایش توان پیل سوختی می شود بلکه با افزایش شدت جریان سابستریت باعث خارج شدن خیلی از مواد بدون انجام واکنش از پیل سوختی میکروبی می شود. بهینه شدت جریان سابستریت همان شدت جریان اولیه برابر با ۲۲/۵ سانتی متر معکب بر ساعت می باشد. زمانی که ولتاژ کاهش می یابد دانسیته توان هم کاهش می یابد، زیرا دانسیته توان حاصل ضرب دانسیته جریان در ولتاژ می باشد.

### تغییر ولتاژ تولیدی و دانسیته توان با دما

با توجه به شرایط اولیه ارائه شده در بخش ۶-۱، پیل سوختی میکروبی را شبیه سازی نموده و سپس در دماهای گوناگون (از ۲۹۸ تا ۳۳۳ کلونین) تغییرهای توان تولیدی و دانسیته توان بر حسب دانسیته جریان به ترتیب در شکل ۶ و شکل ۷ رسم شده اند، براساس این شکل ها، با افزایش دما ولتاژ تولیدی و دانسیته توان



شکل ۷- تغییر دانسیته توان پیل سوختی میکروبی بر حسب دانسیته جریان.



شکل ۶- تغییر ولتاژ تولیدی پیل سوختی میکروبی بر حسب دانسیته جریان.

$C_{AC}^{in}$	غلظت سابستریت ورودی به محفظه آند
$V_a$	حجم مورد استفاده در آند
$C_{AC}$	غلظت سابستریت در محفظه آند
$A_m$	سطح مقطع غشای مورد استفاده
$C_{CO_2}^{in}$	غلظت دی اکسید کربن ورودی به محفظه آند
$C_{CO_2}$	غلظت دی اکسید کربن در محفظه آند
$C_H^{in}$	غلظت هیدروژن ورودی به محفظه آند
$C_H$	غلظت هیدروژن در محفظه آند
$X^{in}$	غلظت زیست توده ورودی به محفظه آند
$X$	غلظت زیست توده در محفظه آند
$Y_{ac}$	بازده باکتریایی
$f_x$	نشان دهنده کسر متقابل شتو
$k_{dec}$	ثابت از بین رفتن بیو مس ها
$Q_c$	شدت جریان ورودی به محفظه کاتد
$V_c$	حجم کاتد
$C_{O_2}^{in}$	غلظت اکسیژن ورودی به محفظه کاتد
$C_{OH}^{in}$	غلظت یون هیدروکسید ورودی به محفظه کاتد
$C_{OH}$	غلظت یون هیدروکسید در محفظه کاتد
$C_M^{in}$	غلظت یون M ورودی
$N_M$	شار یون های $M^+$ از آند به بخش کاتد از طریق غشا
$C_M$	غلظت M در محفظه کاتد
$d^m$	ضخامت غشاء
$d_{cell}$	فاصله بین الکترودها
$k^m$	هدایت غشاء
$k^{aq}$	هدایت محلول
$U_{cell}$	ولتاژ پیل سوختی میکروبی

به جامعیت و سادگی مدل، می توان از آن برای بهینه سازی در حالت پیوسته و همچنین کنترل آن استفاده نمود. با استفاده از مدل مورد نظر، تأثیرهای متغیرهای شدت جریان سابستریت و دما بر روی توان پیل سوختی میکروبی مورد بررسی قرار گرفت که نتیجه‌ها نشان داد بهترین عملکرد پیل سوختی میکروبی دو محفظه ای، در شدت جریان ۲۲/۵ سانتی‌متر معکب بر ساعت و دمای ۲۵ درجه سلسیوس می باشد که به ترتیب برابر با ۲/۴ و ۲/۱ وات بر مترمربع می باشد.

### فهرست نمادها

$X$	غلظت زیست توده
$\eta_a$	افت پتانسیل در قسمت آند
$C_{AC}$	غلظت سابستریت (استات)
$k_1^0$	ثابت سرعت واکنش آند در حالت استاندارد
$K_{AC}$	نصف نرخ سرعت ثابت برای استات
$\alpha$	ضریب انتقال بار واکنش آندیک
$F$	ثابت فارادی
$R$	ثابت جهانی گازها
$T$	دمای عملیاتی پیل
$C_{O_2}$	غلظت اکسیژن محلول در محفظه کاتد
$\eta_c$	افت پتانسیل در محفظه کاتد
$k_2^0$	ثابت سرعت واکنش تحت شرایط استاندارد
$\beta$	ضریب انتقال بار از واکنش کاتدیک
$K_{O_2}$	نصف نرخ سرعت واکنش اکسیژن محلول
$Q_a$	شدت جریان ورودی به محفظه آند
$U^0$	ولتاژ مدارباز

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۶/۱۵ ؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۱۰/۳

## مراجع

- [1] Tong X.-L., Lin H.-L., Xin J.-H., Liu F., Li M., Zhu X.-P., [Recent Advances as Materials of Functional Metal-Organic Frameworks](#), *Journal of Nanomaterials*, **2013**: 1-11 (2013).
- [1] Behera, M., M. Ghangrekar, [Performance of Microbial Fuel Cell in Response to Change in Sludge Loading Rate at Different Anodic Feed pH](#), *Bioresource Technol.*, **100(21)**: 5114-5121 (2009).
- [2] Larrosa-Guerrero A., Scott K., Head I.M., Mateo F., Ginesta A., Godineza C., [Effect of Temperature on the Performance of Microbial Fuel Cells](#), *Fuel*, **89(12)**: 3985-3994 (2010).
- [3] Min B., Roman O.B., Angelidaki I., [Importance of Temperature and Anodic Medium Composition on Microbial Fuel Cell \(MFC\) Performance](#), *Biotechnol. Lett.*, **30(7)**: 1213-1218 (2008).
- [4] Oliveira V.B., Simões M., Melo L.F., Pinto A.M.F.R., [Overview on the Developments of Microbial Fuel Cells](#), *Biochemical Engineering Journal*, **73**: 53-64 (2013).
- [5] 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).
- [6] Rahimnejad M., Adhami A., Darvari S., Zirepour A., Oh S.E., [Microbial Fuel Cell as New Technology for Bioelectricity Generation: A Review](#), *Alex. Eng. J.*, **54(3)**: 745-756 (2015).
- [7] Rahimnejad, M., Bakeri, G., Najafpour, G., Ghasemi, M., Oh, S.E., [A Review on the Effect of Proton Exchange Membranes in Microbial Fuel Cells](#), *Biofuel Res. J.*, **1(1)**: 7-15 (2014).
- [8] Cai J., Zheng P., Qaisar M., Xing Y., [Effect of Operating Modes on Simultaneous Anaerobic Sulfide and Nitrate Removal in Microbial Fuel Cell](#), *J Ind. Microbiol. Biotechnology*, **41(5)**: 795-802 (2014).
- [9] Winfield, J., Ieropoulos I., Greenman J., [Investigating a Cascade of Seven Hydraulically Connected Microbial Fuel Cells](#), *Bioresource Technol.*, **110**: 245-250 (2012).
- [10] Juang D., Yang P., Kuo T., [Effects of Flow Rate and Chemical Oxygen Demand Removal Characteristics on Power Generation Performance of Microbial Fuel Cells](#), *Int. J. Environ. Sci. Te.*, **9(2)**: 267-280 (2012).
- [11] Pant, D., Van Bogaert, G., Diels, L. Vanbroekhoven, K., [A Review of the Substrates Used in Microbial Fuel Cells \(MFCs\) for Sustainable Energy Production](#), *Bioresource Technol.*, **101(6)**: 1533-1543 (2010).
- [12] Rabaey, K. Verstraete W., [Microbial Fuel Cells: Novel Biotechnology for Energy Generation](#), *TREND. Biotechnol.*, **23(6)**: 291-298 (2005).
- [13] Harnisch F. Freguia S., [A Basic Tutorial on Cyclic Voltammetry for the Investigation of Electroactive Microbial Biofilms](#), *Chemist. Asian J.*, **7(3)**: 466-475(2012).
- [14] Esfandyari, M., Fanaei, M.A., Gheshlaghi, R. Mahdavi, M.A., [Mathematical Modeling of Two-Chamber Batch Microbial Fuel Cell With Pure Culture of Shewanella](#), *Chem. Eng. Res. Des.*, **117**: 34-42(2017).
- [15] Esfandyari M., Fanaei M.A., Gheshlaghi R., Mahdavi M.A., [Neural Network and Neuro-Fuzzy Modeling to Investigate the Power Density and Columbic Efficiency of Microbial Fuel Cell](#), *J. Taiwan Inst. Chem. Eng.*, **58**: 84-91(2016).



- [16] Esfandyari M., Fanaei M.A., Gheshlaghi R., Mahdavi M.A., [Dynamic Modeling of a Continuous Two-Chamber Microbial Fuel Cell with Pure Culture of Shewanella](#), *Int. J. Hydrogen Energ.*, **42(33)**: 21198-21202(2017).
- [17] Rittmann, B.E. McCarty P.L., “[Environmental Biotechnology: Principles and Applications](#)”, Tata McGraw-Hill Education (2012).
- [18] Zeng Y., Choo Y.F., Kim B.H., Wu P., [Modelling and Simulation of Two-Chamber Microbial Fuel Cell](#), *J. Power Sources*, **195(1)**: 79-89(2010).