



## تولید هم‌زمان برق و تصفیه فاضلاب

علیرضا امیری‌تبار / دانشکده مهندسی مکانیک و انرژی / دانشگاه شهید بهشتی / a.amiritabar@mail.sbv.ac.ir  
رقيه گوگساز قوچانی / دانشکده مهندسی مکانیک و انرژی / دانشگاه شهید بهشتی / r\_gavagsaz@sbv.ac.ir  
مجید زندی / دانشکده مهندسی مکانیک و انرژی / دانشگاه شهید بهشتی / m\_zandi@sbv.ac.ir

### چکیده

وجود مشکل‌های جهانی ناشی از استفاده سوخت‌های فسیلی و تلاش برای یافتن روش‌های جایگزین تامین انرژی بشر از یک سو و وجود انرژی فراوان و نهفته در مواد دورریختنی و فاضلاب از سوی دیگر، استفاده از فاضلاب به‌عنوان یک منبع انرژی را عملی مقرون به صرفه و مفید به لحاظ زیست محیطی قلمداد می‌کند. از طرفی استفاده دوباره از آب در چرخه بازیاب مجدد پساب‌ها به‌صورت موضعی، بخشی از راه‌کارهای منطقی جهت مقابله با چالش جهانی نیازمندی آب در جامعه بشری می‌باشد. بازیاب دوباره فاضلاب و برگشت آب در سیکل مصرف نیازمند انرژی زیادی می‌باشد. استفاده از پیل‌های سوختی میکروبی به‌عنوان راه‌حلی در این مسیر قابل بررسی است. در تصفیه پساب به‌صورت موضعی و با استفاده از این نوع پیل‌های سوختی، امکان تولید انرژی مورد نیاز سیستم نیز فراهم می‌گردد.

**کلمات کلیدی:** اپیل سوختی میکروبی، وتلند، تولید برق، تصفیه فاضلاب موضعی، مدل‌سازی، شبیه‌سازی، غشا

## Congeneration of Electricity and Wastewater Treatment

Alireza Amiritabar/ Faculty of Mechanical Engineering and Energy Shahid Beheshti University/ a.amiritabar@mail.sbv.ac.ir  
Roghayeh Gavagsaz Ghoachani/ Faculty of Mechanical Engineering and Energy Shahid Beheshti University/ roggav@yahoo.com  
Majid Zandi/ Faculty of Mechanical Engineering and Energy Shahid Beheshti University/ m\_zandi@sbv.ac.ir

### Abstract

Environmental problems suffering from fossil fuels, trying to find alternative human energy supply and the presence of huge amount of energy in wastewater, considers sewage as an economically viable and environmentally-friendly option source of energy. Also, wastewater treatment in a localized manner consults reuse of water in the water cycle, but a recovery of wastewater and the return of water to the water cycle requires lots of energy. Using microbial fuel cells as a solution to this path is considerable and wastewater treatment, using these types of fuel cells, would make it possible to generate the energy required by the system.

**Keywords:** Microbial fuel cell, Wetland, Generating Electricity, Localized Wastewater treatment, Modeling, Simulating, Membrane

## ۱- مقدمه

بر اساس یک تحقیق صورت گرفته، در حال حاضر پالایش و تصفیه فاضلاب در یک کشور صنعتی مثل آمریکا نیازمند توانی در حدود ۱۵ گیگاوات یا ۳ درصد توان الکتریکی تولیدی این کشور است؛ در حالی که مجموع فاضلاب‌های شهری، صنعتی و حیوانی، پتانسیل تولید  $10^{11} \times 5$  کیلووات ساعت یا معادل ۱۷ گیگاوات توان را دارد. می‌توان گفت در صورت امکان تبدیل انرژی فاضلاب، نه تنها برای تصفیه آن نیازمند هیچ انرژی‌ای نخواهیم بود، بلکه فاضلاب می‌تواند به‌عنوان یکی از پتانسیل‌های تولید انرژی در آینده نیز محسوب گردد. در میان روش‌های استفاده از فاضلاب و ضایعات، روش‌هایی چون سوزاندن، گازی‌سازی، پیرولیز، تخمیر یا تجزیه بی‌هوازی، به‌عنوان روش‌های تولید انرژی از ضایعات و فاضلاب‌ها شناخته شده است [۱]. با توجه به وجود مواد مختلف در فاضلاب، انرژی قابل توجهی به‌صورت نهفته در ساختار فاضلاب وجود دارد که در صورت یافتن روش رهاسازی آن، انرژی زیادی را می‌توان از این فرآیند بدست آورد [۲].

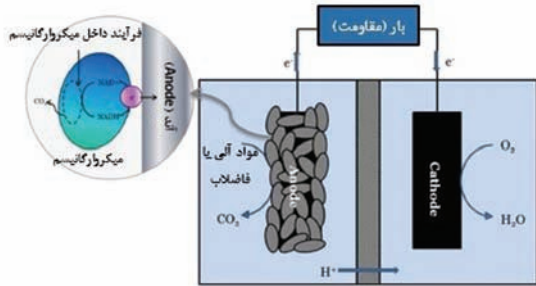
## ۲- تئوری تولید برق و تصفیه هم‌زمان پساب

فاضلاب‌های شهری، صنعتی و حیوانی، حاوی مواد نامحلول فراوانی هستند که پیش از رهاسازی آن‌ها در طبیعت باید از آب جداسازی شده تا امکان برگشت آب به سیکل مصرف ممکن گردد. این مواد که بیشتر مواد آلی هستند، در گذشته توسط روش‌های هوازی پالایش می‌شدند و انرژی مصرفی در آن‌ها معادل ۰.۳ تا ۰.۶ کیلووات ساعت به ازای هر مترمکعب پساب بود. سپس روش‌های جدیدتر مثل بیوراکتورهای دارای غشا، از روش‌های قبلی کارتر شد ولی انرژی مصرفی آن‌ها نیز افزایش پیدا کرد و در محدوده ۱ تا ۲ کیلووات ساعت به ازای هر مترمکعب رسید [۳].

در سال‌های اخیر، تصفیه بیوشیمیایی فاضلاب، به‌عنوان روشی قابل قبول برای تولید الکتریسیته از فاضلاب محسوب شده است. این روش بر اساس استفاده از میکروارگانیسم‌هایی عمل می‌کند که با تجزیه ساختار مواد فاضلابی، الکترون موجود در آن‌ها را آزاد کرده و به الکترون می‌رساند. بر این اساس، پیل‌های سوختی میکروبی، می‌تواند با تجزیه زیست توده موجود در فاضلاب‌ها، اجزای آلی و غیر آلی موجود در فاضلاب را تصفیه و تولید انرژی الکتریکی نماید [۱].

## ۳- مفاهیم عملکردی پیل سوختی میکروبی

پیل سوختی میکروبی (شکل ۱) یکی از انواع پیل‌های سوختی است که با استفاده از میکروارگانیسم‌هایی همچون قارچ‌ها، انرژی شیمیایی منابع ورودی‌اش را به الکتریسیته تبدیل می‌کند. پیل سوختی میکروبی در ساختار خود، از دو بخش اصلی به نام الکترون (آند و کاتد) و محفظه تشکیل شده است که در بین آن‌ها غشا قرار دارد. در آند میکروارگانیسم‌ها جهت زنده ماندن و تامین انرژی بقای خود مواد آلی ورودی را اکسید کرده که در نتیجه آن، کربن دی‌اکسید، الکترون و پروتون، آزاد می‌گردد. الکترون‌ها توسط یک الکترون‌ده در محفظه آند وجود دارد جذب شده و از طریق مدار خارجی جهت انتقال به محفظه کاتد، منتقل می‌شود. پروتون‌های تولیدی نیز از طریق غشای میان دو محفظه که فقط نسبت به پروتون تراوا است، به محفظه کاتد منتقل می‌شود. در محفظه هوازی کاتد، پروتون رسیده از غشا، الکترون رسیده از مدار خارجی و اکسیژن موجود با هم ترکیب شده و مدار پیل سوختی به‌طور خلاصه توسط دو جزء الکترون‌ده و الکترون‌گیر کامل می‌گردد [۴].



شکل ۱: شماتیک عملکرد پیل سوختی میکروبی [۵].

در این فرآیند وارد کردن فاضلاب به‌عنوان سوخت ورودی پیل، منجر به کاهش مواد آلی محلول در آب (یا به عبارتی تصفیه فاضلاب) در کنار تولید الکتریسیته از پیل سوختی می‌شود. اگرچه در حال حاضر با پیشرفت علم، میزان برق تولیدی در حدی نیست که بتوان از آن به‌عنوان یک منبع تولید الکتریسیته برای مصارف مختلف نام برد اما این برق می‌تواند سیستم تصفیه فاضلاب را از نیاز به برق ورودی جهت فرآیند تصفیه، بی‌نیاز نماید.

## ۴- مقایسه تصفیه در پیل سوختی میکروبی با روش‌های تصفیه سنتی

مقایسه سیستم‌های پیل سوختی میکروبی در مقابل با سیستم‌های سنتی تصفیه فاضلاب، اهمیت نیاز به پیشرفت علمی و حرکت به سوی سیستم‌های نوین تولید هم‌زمان انرژی و تصفیه فاضلاب را بیش از پیش نمایان می‌نماید.

سیستم‌هایی با هزینه پایین عملکردی: بر خلاف سیستم‌های سنتی در تصفیه‌خانه‌ها که نیازمند انرژی زیادی برای دستگاه‌های هوادهی بود، پیل‌های سوختی میکروبی در فرآیند خود نیازمند انرژی نبوده و حتی انرژی نیز تولید می‌کنند. در صورت استفاده این انرژی برای سیستم‌های جانبی در پیل، می‌توان راندمان عملکردی آن را نیز افزایش داد.

سیستم‌های پراکنده: یکی از مزایای استفاده از سیستم‌های سنتی تصفیه فاضلاب، استفاده از روش‌های جمع‌آوری و انتقال فاضلاب از نقاط مختلف یک منطقه بوده که خود عاملی هزینه‌بر بوده و نیاز به سیستم‌های زیرساخت شهری دارد. اما در سیستم‌های پیل سوختی میکروبی، عملکرد تصفیه می‌تواند به صورت موضعی در کنار خود فرآیندهای تولید فاضلاب قرار گیرد.

آلودگی سیستم‌های تصفیه سنتی: یکی دیگر از مشکل‌های سیستم‌های سنتی، نیاز آن‌ها به عملیات هوازی در محیط است که این عمل اگر در محدوده شهری وجود داشته باشد باعث بوجود آمدن مشکل‌هایی همچون بوی نامطبوع در آن محیط خواهد شد. اما فرآیند تصفیه پیل سوختی میکروبی عملیاتی بی‌هوازی بوده و انتقال بو به محیط نخواهد داشت.

هزینه پایین تر زیرساختی: سیستم‌های نوین به‌علت ماهیت عملکرد بی‌هوازی خود، می‌توانند در ابعاد کوچک‌تری به لحاظ سطح زمین مورد نیاز ساخته شوند و همچنین با توجه به موضعی بودن عملیات تصفیه آب، هزینه ساخت و انتقال سیستم‌های تصفیه مرکزی به صفر می‌رسد.

از طرفی یکی از اصلی‌ترین مشکل‌های سیستم‌های نوین، بالا بودن هزینه مربوط به غشای آن‌ها است که یکی از مواردی که نیاز به پژوهش‌های گسترده دارد استفاده از غشاهای کم هزینه یا حتی عدم استفاده از غشا در ساختار پیل‌های سوختی میکروبی می‌باشد.

## ۵- مسیر پیشرفت جهانی

با توجه به پژوهش‌های جهانی و انتشار پژوهش‌های مختلف در زمینه پیل‌های سوختی میکروبی، اصلی‌ترین موضوع‌های مورد بحث در شکل (۲)، آمده است. همچنین سرعت پیشرفت این زمینه علمی در جهان مشهود بوده و نشان‌دهنده آینده تصفیه آب در جهان می‌باشد (شکل ۳). موضوع‌هایی در زمینه پیشرفت این فناوری وجود دارد که در این بخش به چند مورد از آن‌ها اشاره می‌شود.

**غشای به کار رفته:** در حال حاضر بهترین نوع غشای به کار رفته که باعث بیشینه شدن راندمان تصفیه می‌گردد، از نوع غشای نفیون می‌باشد که با توجه به نیاز به تعویض آن در بازه‌هایی مشخص از کارکرد پیل سوختی میکروبی، هزینه نگهداری و تعمیرات در این سیستم افزایش و متاثر از آن خواهد بود. در حال حاضر در بخش‌های مختلف جهان پروژه‌هایی در دست انجام است. به‌طور مثال در ایران در مجموعه آزمایشگاه‌های مهندسی انرژی‌های تجدیدپذیر دانشگاه شهید بهشتی پروژه‌ای با هدف جایگزینی غشا نفیون با یک غشا با قیمت بسیار پایین‌تر در دست انجام است. این غشا که آن را می‌توان جایگزین مناسبی برای غشای نفیون معرفی نمود، دانشی به‌روز را با استفاده از تجهیزات ارزان قیمت درهم آمیخته و این محصول کارا را تولید نموده است [۶]. گروهی دیگر از پژوهش‌ها نیز به دنبال حذف این غشا بوده که در نتیجه آن مشکل کاهش در راندمان الکتریکی پیل سوختی میکروبی را به دنبال داشته اما همچنان با هدف تصفیه آب در حال پیشرفت هستند [۷].

**استفاده از سوپسترا (مواد یا فاضلاب ورودی به آند) با ترکیب‌های خاص:** در حال حاضر پژوهش‌های زیادی روی تاثیر مواد مختلف بر

توان تولیدی پیل سوختی میکروبی وجود دارد که موضوع اصلی آن تاثیر مواد بر عملکرد قارچ‌ها و همچنین بر مقاومت داخلی پیل سوختی میکروبی خواهد بود. وجود مواد مختلف در سوپسترا می‌تواند از طرفی بر مدت زمان موثر عملکرد غشا تاثیر گذاشته و نیاز به تعویض غشا را کمتر یا بیشتر نماید [۸].

**استفاده از بیوکاتدها:** استفاده از بیوکاتدها یا به عبارتی گیاهان در محفظه کاتد مزایایی از قبیل افزایش میزان سطح اکسیژن محلول در کاتد و مصرف بعضی مواد غیرآلی همچون نیترات و نیتريت را در بخش کاتد به ارمغان می‌آورد که باعث افزایش راندمان تصفیه فاضلاب در بخش کاتد خواهد شد. در این زمینه نوعی از پیل‌های سوختی میکروبی از نوع وتلند یا مردابی در حال تحقیق و پیشرفت است که اصول آن بر وجود گیاهان بنا نهاده شده است [۹].

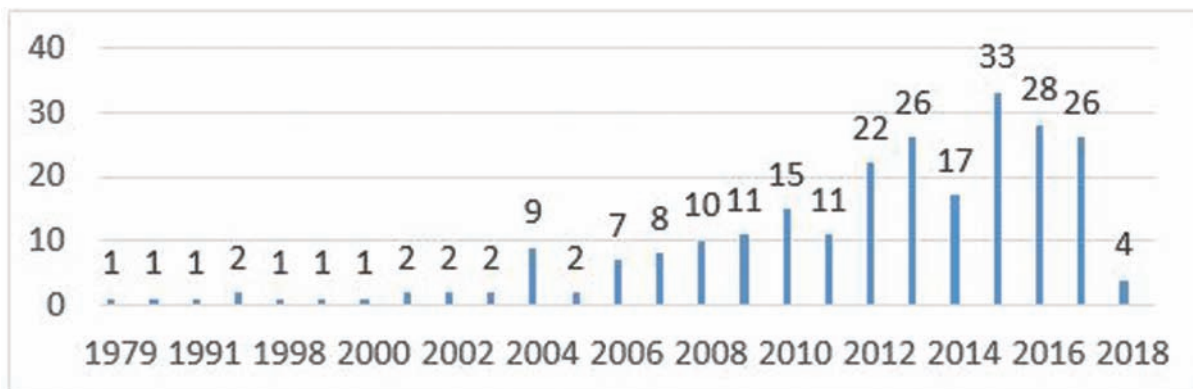
**طراحی سیستم‌های کنترلی کارا جهت استفاده از خروجی‌های چندین پیل سوختی میکروبی:** از مواردی که مورد تحقیق محققان واقع شده است طراحی سیستم‌های کنترلی جهت استفاده موثر از الکتریسیته خروجی پیل‌های سوختی میکروبی است. از آنجایی که خروجی توان هر پیل ثابت و یکنواخت نمی‌باشد و این که مقدار آن نیز کم است، در نتیجه با یک سیستم کنترلی مناسب می‌توان از خروجی چندین پیل استفاده نمود به نحوی که خروجی کل یکنواخت و قابل استفاده باشد.

**استفاده از آند مناسب:** پژوهش‌های زیادی در مورد نوع آند مورد استفاده از نظر شکل و جنس آن، انجام شده است اما این موضوع همچنان تحت بررسی و بهینه‌سازی است.



افزایش توان خروجی و یا لا رفتن راندمان تصفیه - امکان افزایش ابعاد پیل سوختی میکروبی در حد صنعتی

شکل ۲: مهم‌ترین حوزه‌های پژوهشی پیل سوختی میکروبی



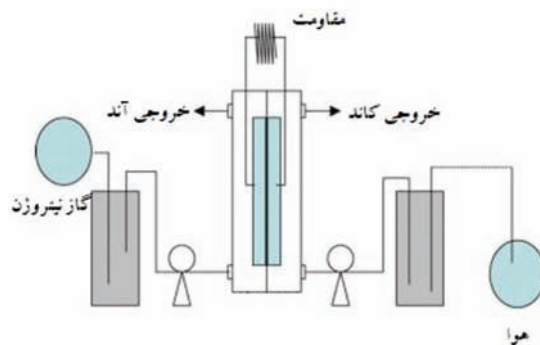
شکل ۳: نمودار تعداد پژوهش‌های مرتبط در زمینه پیل سوختی میکروبی به تفکیک سال انتشار

## ۶- مدل‌سازی پیل سوختی میکروبی با هدف تولید برق و تصفیه فاضلاب

در این بخش با توجه به مقدمات عملکردی شامل مدل‌سازی، ساخت و صحت‌سنجی، پارامترهای خروجی یک نمونه آزمایشگاهی پیل سوختی میکروبی بررسی شده است.

**مدل‌سازی:** تا به حال مدل‌های زیادی براساس عملکرد پیل‌های سوختی میکروبی به‌وجود آمده‌اند که بیش‌تر آن‌ها بر اساس بیان معادله‌های دیفرانسیلی هستند که نیازمند انجام محاسبه‌های بالایی بوده اما دقت عملکردی آن‌ها نسبت به مدل‌های ساده‌تر آن‌چنان بیش‌تر نمی‌باشد. همچنین مدل بیان شده در این قسمت با توجه به ملاحظه‌های لازم در مدل‌سازی پیل سوختی میکروبی با هدف بهینه‌سازی‌های بعدی با رویکرد تولید برق و تصفیه فاضلاب انتخاب شده است. این مدل بر اساس پژوهش‌های زنگ و همکاران [۱۰] بیان شده و مزیت آن نسبت به مدل زنگ قابلیت استفاده از سایر غشاهای ساخته شده مثل غشای ارایه شده است که در ادامه نتایج پارامترهای خروجی براساس مدل‌سازی پیشنهادی، بررسی شده است.

در این مدل جریان هر دو قسمت آند و کاتد به‌صورت پیوسته در نظر گرفته شده‌اند، به‌نحوی که مواد پس از ورود به هر محفظه با سرعتی ثابت از آن خارج می‌گردند. این شاخصه در فرآیند تصفیه فاضلاب از موضوع‌های اصلی می‌باشد و باید به آن توجه نمود. شماتیک این فرآیند در شکل (۴) نشان داده شده است.



شکل ۴: شماتیک پیل سوختی میکروبی دو محفظه‌ای پیوسته مطابق مدل زنگ و همکاران [۱۰].

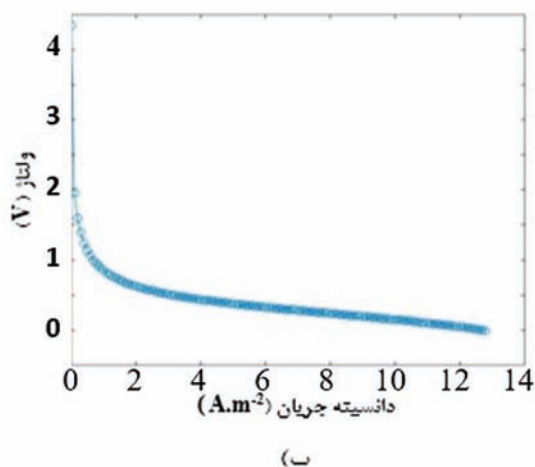
برخلاف اکثر مدل‌ها در این مدل، رشد بیوفیلم بر سطح الکتروآند در نظر گرفته نمی‌شود اما دقت این مدل و سادگی آن، نسبت به سایر مدل‌ها برتری دارد. در این مدل از استات به‌عنوان سوخت مورد استفاده در آند استفاده شده است. بر اثر تجزیه آن توسط میکروارگانیسم‌ها واکنش (۱) به وقوع می‌پیوندد و در طرف دوم پیل سوختی میکروبی یعنی کاتد، واکنش تشکیل آب بر اثر پیوند هیدروژن رسیده از آند، الکترون رسیده از مدار خارجی و اکسیژن موجود در محفظه، مطابق واکنش (۲) شکل می‌گیرد.



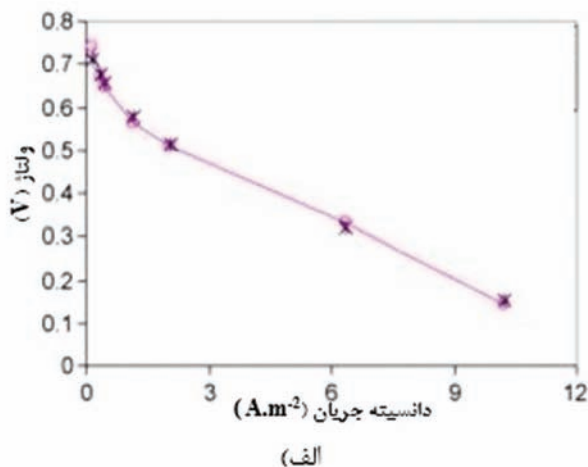
این دو معادله، معادله‌های اصلی از تغییر رخ داده از دیدگاه مواد، در پیل سوختی میکروبی است. سرعت پیشرفت و غلظت اجزای واکنش، مواردی هستند که مدل‌سازی و روابط مربوط به آن‌ها را تکمیل می‌کند. مدل‌سازی و محاسبه‌های عددی در نرم‌افزار متلب انجام گرفته است. پس از انجام محاسبه‌های مربوط به مدل در نظر گرفته شده در محیط نرم‌افزار متلب، نخستین نمودار خروجی مدل‌سازی، نمودار تغییر ولتاژ بر حسب جریان پیل است. شکل (۵) مقایسه دو نمودار جریان - ولتاژ مربوط به مدل‌سازی زنگ و همکاران (۵-الف) و مدل‌سازی انجام شده در این تحقیق (۵-ب) را نشان می‌دهد.

همان‌طور که مشخص است، به‌جز در ناحیه جریان صفر (مدار باز) تا یک آمپر بر مترمربع سطح آند، در بقیه نقاط مدل‌سازی انجام شده با مدل مرجع هماهنگی و برابری دارد. با توجه به هم‌خوانی سایر نمودارهای وابسته، می‌توان علت این ناهم‌خوانی را وجود مغایرت در روش محاسبات عددی دانست که در بین این دو مدل وجود دارند. سایر نمودارهای مورد بررسی در مدل‌سازی، در شکل‌های (۶) تا (۹) نشان داده شده است. در شکل (۶)، نمودارهای (الف) و (ب) به‌ترتیب مربوط به مدل مرجع و مدل‌سازی انجام شده، هستند. همان‌گونه که در شکل (۶) قابل مشاهده است، سرعت پیشرفت واکنش آند  $r_1$  و واکنش کاتد  $r_2$  در مدل‌سازی این پژوهش به‌طور کامل مطابق مدل‌سازی زنگ و همکاران است.

در شکل (۷)، نمودار (الف) مربوط به تغییر مقدار استات، کربن دی‌اکسید، اکسیژن و مقدار چارج (X) موجود در محفظه می‌باشد که در مقاله زنگ و همکاران آمده است. همچنین نمودارهای (ب)، (پ) و (ت) به‌ترتیب مربوط به مقدارهای میزان چارج موجود در محفظه،

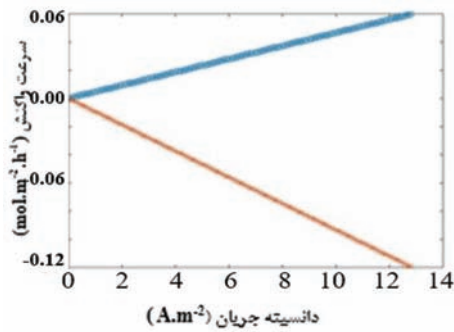


(ب)

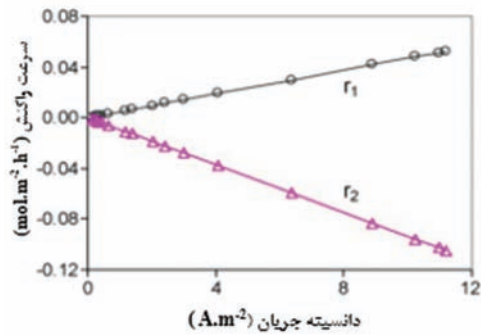


(الف)

شکل ۵: مقایسه نتایج آزمایشگاهی (الف) مدل‌سازی زنگ [۱۰] (ب) مدل‌سازی این پژوهش

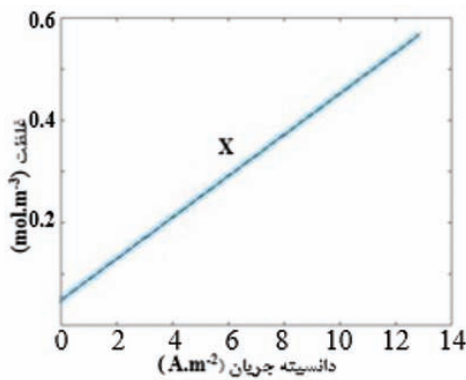


(ب)

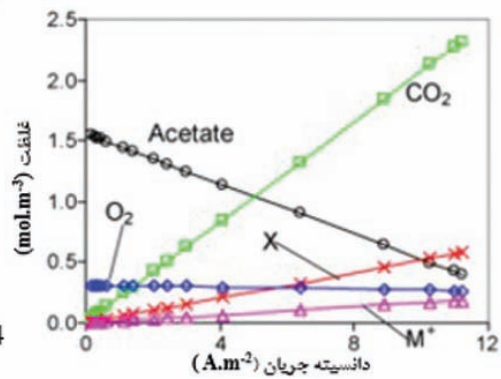


(الف)

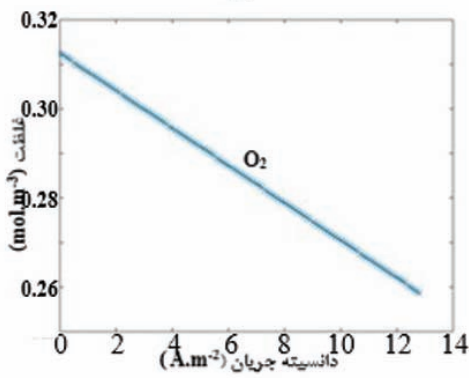
شکل ۶: مقایسه نتایج پیشرفت واکنش‌ها (الف) مدلسازی زنگ [۱۰] (ب) مدلسازی این پژوهش



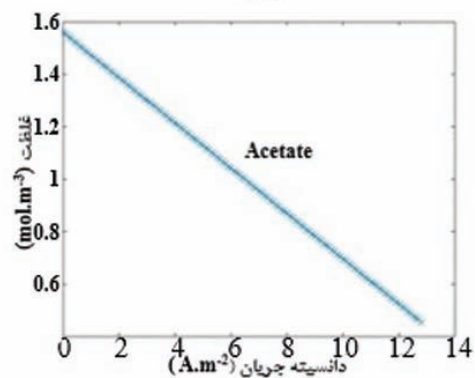
(ب)



(الف)

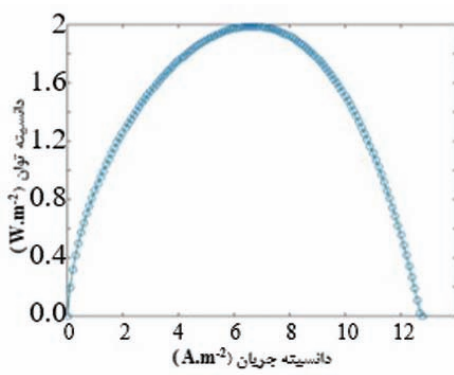


(ت)

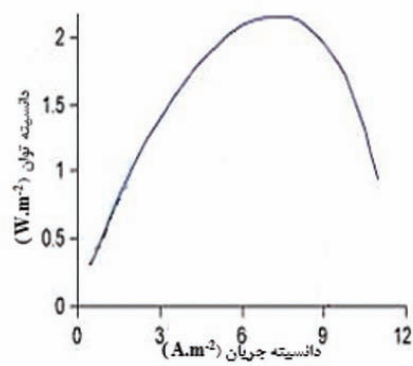


(پ)

شکل ۷: مقایسه نتایج مقادیر پارامترهای محلول (الف) مدلسازی زنگ [۱۰] (ب، پ) و (ت) مدلسازی این پژوهش

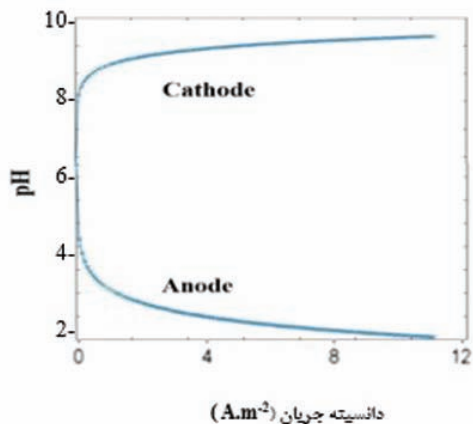


(ب)

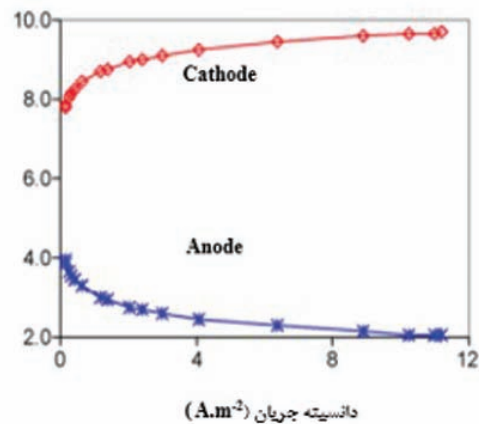


(الف)

شکل ۸: مقایسه نتایج مقادیر pH دو محفظه (الف) مدلسازی زنگ [۱۰] (ب) مدلسازی این پژوهش



(ب)



(الف)

شکل ۹: مقایسه نتایج دانسیته توان (الف) مدل‌سازی زنگ [۱۰] (ب) مدل‌سازی این پژوهش

انجام شده در زمینه پیل‌های سوختی میکروبی است، پیشنهاد شده است. نتایج پارامترهای عملکردی در این مدل ساده پیشنهادی با مدل‌سازی انجام شده توسط زنگ و همکاران مقایسه شده است. با توجه به نتایج بدست آمده در این مدل پیشنهادی، تغییر پارامترهای عملکردی بسیار شبیه مدل‌سازی زنگ و همکاران می‌باشد.

#### ۸- مراجع

- [1] Z. G. He Zhen ,Fei Zhang” ,Using Microbial Fuel Cells to Treat Raw Sludge and Primary Effluent for Bioelectricity Generation : Final Report.2013 “,
- [2] Y .H .Jia et al” ,.Hydrogen production from wastewater using a microbial electrolysis cell “,Korean J .Chem .Eng .,vol,27 . no .6 .pp.2010 ,1859-1854 .
- [3]V .G .Gude” ,Wastewater treatment in microbial fuel cells- An overview “,J .Clean .Prod .,vol ,122 .pp.2016 ,307-287 .
- [4]S .Yang ,B .Jia ,and H .Liu” ,Effects of the Pt loading side and cathode-biofilm on the performance of a membrane-less and single-chamber microbial fuel cell “,Bioresour .Technol .,vol . ,100no ,3 .pp.2009 ,1202-1197 .
- [5]Waste and Wastewater Clean-up using Microbial Fuel Cells.2016 “,
- [6]S .Eslami” ,Microbial Fuel Cells) Thesis “,(Shahid Beheshti, 2015
- [7]A .Amiratabar” ,Cogeneration of energy and wastewater treatment by using Constructed Wetland Microbial Fuel Cell )CWMFC) (Thesis “,(Shahid Beheshti.2018 ,
- [8]J .T .Teleken et al” ,.Mathematical Modeling of the Electric Current Generation in a Microbial Fuel Cell Inoculated With Marine Sediment “,Brazilian J .Chem .Eng .,vol ,34 .no ,1 .pp. 2017 ,225-211
- [9]Z .Najafgholi and M .Rahimnejad” ,Improvement of sediment microbial fuel cell performance by application of sun light and biocathode “,Korean J .Chem .Eng .,vol ,33 .no .1 .pp. 2016 ,158-154
- [10]Y .Zeng ,Y .F .Choo ,B.-H .Kim ,and P .Wu” ,Modelling and simulation of two-chamber microbial fuel cell “,J .Power Sources, vol. 195, no. 1, pp. 79-89, 2010.

\*\*\*

مقدار استات مقدار اکسیژن موجود در محفظه است که در مدل بررسی شده محاسبه شده‌اند. همان‌گونه که در شکل (۷) نشان داده شده است، نتایج مدل‌سازی در این پژوهش شامل تغییر میزان قارچ در محفظه آند (شکل ۷-ب)، تغییر میزان استات داخل محفظه آند (شکل ۷-پ) و تغییر میزان اکسیژن در محفظه کاتد (شکل ۷-ت) با تقریب خوبی مانند نتایج مدل‌سازی زنگ و همکاران (شکل ۷-الف) است.

شکل ۸- الف) نتایج مربوط به تغییر مقدار اسیدیته محفظه‌های آند و کاتد در مقاله زنگ و همکاران آمده است. شکل ۸- ب) مربوط به مقدارهای اسیدیته در دو محفظه آند و کاتد بوده و نتایج مدل‌سازی این پژوهش را نشان می‌دهد. همان‌گونه که قابل مشاهده است، تغییر مقدارهای اسیدیته در محفظه‌های آند و کاتد در مدل‌سازی این پژوهش بسیار مشابه نتایج مدل‌سازی زنگ است. همچنین در شکل ۹- الف) و ب) به ترتیب تغییر مقدار دانسیته توان در مدل‌سازی زنگ با مدل‌سازی این پژوهش مقایسه شده است. نتایج شبیه‌سازی نشان‌دهنده تطابق تغییر دانسیته توان در مدل‌سازی این پژوهش و مدل‌سازی زنگ می‌باشد.

#### ۷- نتیجه‌گیری

تصفیه فاضلاب به‌صورت موضعی با کم‌ترین مصرف انرژی امروزه از چالش‌های جامعه شهری می‌باشد. در سیستم‌های پیل سوختی میکروبی هردوی این اهداف قابل تحقق است. همچنین با توجه به قابلیت موضعی بودن تصفیه فاضلاب، مشکل‌های ناشی از سیستم‌های جمع‌آوری فاضلاب در شهرها نیز برطرف می‌گردد. از طرفی شاخص برجسته این سیستم تولید برق، سیستم تصفیه آب بوده که سیستم‌های پر هزینه سنتی را به سیستم‌های بدون هزینه تبدیل خواهد نمود. بر اساس بررسی‌های انجام شده، پژوهش در زمینه پیل‌های سوختی میکروبی و به‌خصوص در مدل‌سازی آن‌ها و در چند سال اخیر مورد توجه زیادی قرار گرفته و رو به گسترش است. در این پژوهش علاوه بر معرفی فناوری پیل‌های سوختی میکروبی به‌عنوان راه‌کاری جهت چالش جهانی تصفیه فاضلاب در جامعه بشری، مدلی ساده بر اساس مدل زنگ و همکاران که از مهم‌ترین مدل‌سازی‌های