

تولید هم‌زمان برق و تصفیه فاضلاب

علیرضا امیری‌تبار/ دانشکده مهندسی مکانیک وانرژی/ دانشگاه شهید بهشتی/a.amiritabar@mail.sbv.ac.ir
رقیه گوگ‌ساز قوچانی/ دانشکده مهندسی مکانیک وانرژی/ دانشگاه شهید بهشتی/ r_gavagsaz@sbv.ac.ir
مجید زندی/ دانشکده مهندسی مکانیک وانرژی/ 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: اپیل‌سوختی 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
Roghaye 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

[Downloaded from kiaeee.ir on 2026-11-25]

۱- مقدمه

بر اســاس یک تحقیق صورت گرفته، در حال حاضر پالایش و تصفیه فاضلاب در یک کشــور صنعتی مثل امریــکا نیازمند توانی در حدود ۱۵ گیــگاوات یا ۳ درصد توان الکتریکی تولیدی این کشــور اســت؛ در حالی‌که مجموع فاضلاب‌های شــهری، صنعتی و حیوانی، پتانسیل تولید $۵/۱\times ۱۰^{۱۱}$ کیلووات ســاعت یا معادل ۱۷گیگاوات توان را دارد. می‌تــوان گفت در صورت امکان تبدیل انــرژی فاضلاب، نه تنها برای تصفیــه آن نیازمند هیچ انرژی‌ای نخواهیم بود، بلکه فاضلاب می‌تواند به‌عنوان یکی از پتانسیل‌های تولید انرژی در آینده نیز محسوب گردد. در میان روش‌های اســتفاده از فاضلاب و ضایعــات، روش‌هایی چون ســوزاندن، گازی‌ســازی، پیرولیز، تخمیر یا تجزیه بی‌هوازی، به‌عنوان روش‌های تولید انرژی از ضایعات و فاضلاب‌ها شناخته شده است[۱]. بــا توجه بــه وجود مــواد مختلف در فاضــلاب، انرژی قابــل توجهی به‌صورت نهفته در ســاختار فاضلاب وجــود دارد که در صورت یافتن روش رهاســازی آن، انــرژی زیادی را می‌توان از این فرآیند بدســت آورد[۲].

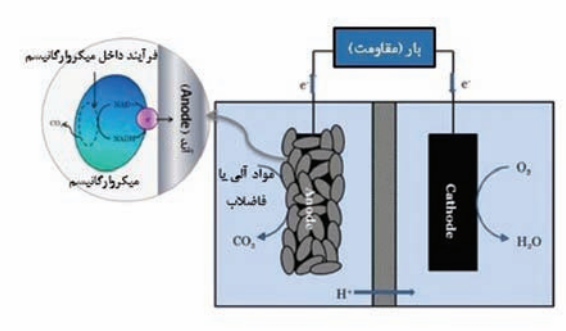
۲- تئوری تولید برق و تصفیه همزمان پساب

فاضلاب‌های شــهری، صنعتی و حیوانی، حاوی مواد نامحلول فراوانی هســتند که پیش از رهاســازی آن‌ها در طبیعت باید از آب جداسازی شده تا امکان برگشت آب به سیکل مصرف ممکن گردد. این مواد که بیشــتر موادآلی هستند، در گذشــته توسط روش‌های هوازی پالایش می‌شدند و انرژی مصرفی در آن‌ها معادل ۰.۳ تا ۰.۶ کیلووات ساعت بــه ازای هر مترمکعب پســاب بود. ســپس روش‌هــای جدیدتر مثل بیوراکتورهای دارای غشــا، از روش‌های قبلی کاراتر شــد ولی انرژی مصرفی آن‌ها نیز افزایش پیدا کرد و در محدوده ۱ تا ۲کیلووات ساعت به ازای هر مترمکعب رسید[۳].

در ســال‌های اخیر، تصفیه بیوشیمیایی فاضلاب، به‌عنوان روشی قابل قبول برای تولید الکتریسیته از فاضلاب محسوب شده است. این روش بر اســاس استفاده از میکروارگانیســم‌هایی عمل می‌کند که با تجزیه ســاختار مواد فاضلابی، الکتــرون موجود در آن‌هــا را آزاد کرده و به الکترود می‌رساند. بر این اساس، پیل‌های سوختی میکروبی، می‌تواند با تجزیه زیســت توده موجــود در فاضلاب‌ها، اجــزای آلی و غیرآلی موجود در فاضلاب را تصفیه و تولید انرژی الکتریکی نماید[۱].

۳- مفاهیم عملکردی پیل سوختی میکروبی

پیل ســوختی میکروبی (شکل ۱) یکی از انواع پیل‌های سوختی است که با استفاده از میکروارگانیسم‌هایی همچون قارچ‌ها، انرژی شیمیایی منابــع ورودی‌اش را بــه الکتریســیته تبدیل می‌کند. پیل ســوختی میکروبــی در ســاختار خود، از دو بخش اصلی به نــام الکترود (آند و کاتد) و محفظه تشــکیل شده اســت که در بین آن‌ها غشا قرار دارد. در آند میکروارگانیســم‌ها جهت زنده ماندن و تامین انرژی بقای خود مواد آلی ورودی را اکســید کرده که در نتیجه آن، کربن دی‌اکســید، الکتــرون و پروتون، آزاد می‌گردد. الکترون‌ها توســط یک الکترود که در محفظه آند وجود دارد جذب شــده و از طریق مدار خارجی جهت انتقال به محفظه کاتد، منتقل می‌شــود. پروتون‌هــای تولیدی نیز از طریق غشای میان دو محفظه که فقط نسبت به پروتون تراوا است، به محفظه کاتد منتقل می‌شــود. در محفظه هوازی کاتد، پروتون رسیده از غشا، الکترون رسیده از مدار خارجی و اکسیژن موجود با هم ترکیب شده و مدار پیل ســوختی 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 آلــی محلول در آب (یا به عبارتی تصفیه فاضلاب) در کنار تولید الکتریسیته از پیل سوختی می‌شود. اگرچه در حال حاضر با پیشــرفت علم، میزان برق تولیدی در حدی نیســت که بتوان از آن به‌عنوان یک منبع تولید الکتریســیته برای مصارف مختلف نام برد اما ایــن برق می‌تواند سیســتم تصفیه فاضلاب را از نیــاز به برق ورودی جهت فرآیندتصفیه، بی‌نیاز نماید.

۴- مقایســه تصفیه در پیل ســوختی میکروبی با روش‌های تصفیه سنتی

مقایسه سیستم‌های پیل ســوختی میکروبی در مقابل با سیستم‌های ســنتی تصفیــه فاضلاب، اهمیتِ نیاز به پیشــرفت 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 دســتگاه‌های هوادهی بود، پیل‌های ســوختی میکروبی در فرآیند خود نیازمند انرژی نبوده و حتی انرژی نیز تولید می‌کنند. در صورت اســتفاده این انرژی برای سیســتم‌های جانبی در پیــل، می‌توان راندمان عملکــردی آن را نیز افزایش داد.

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

آلودگــی سیســتم‌های تصفیــه ســنتی: یکــی دیگر از مشــکل‌های سیســتم‌های ســنتی، نیاز آن‌ها به عملیات هوازی در محیط اســت که این عمل اگر در محدوده شــهری وجود داشــته 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 پایین‌تر زیرســاختی: سیستم‌های نوین به‌علت ماهیت عملکرد بی‌هــوازی خود، می‌توانند در ابعاد کوچک‌تری به لحاظ ســطح زمین مورد نیاز ســاخته 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 مشــکل‌های سیستم‌های نوین، بالا بودن هزینــه مربوط به غشــای آن‌ها اســت که یکی از مــواردی که نیاز به پژوهش‌های گسترده دارد استفاده از غشاهای کم هزینه یا حتی عدم استفاده از غشا در ساختار پیل‌های سوختی میکروبی می‌باشد.

[Downloaded from kiaeee.ir on 2026-11-25]

۵-مسیر پیشرفت جهانی

با توجه به پژوهش‌های جهانی و انتشار پژوهش‌های مختلف در زمینه پیل‌هـای سـوختی میکروبی، اصلی‌ترین موضوع‌هـای مورد بحث در شـکل (۲)، آمده است. همچنین سرعت پیشرفت این زمینه علمی در جهان مشـهود 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.

غشـای به کار رفته: در حال حاضر بهترین نوع غشای به‌کار رفته که باعث بیشـینه شـدن راندمان تصفیه می‌گردد، از نوع غشـای نفیون می‌باشـد که با توجـه به نیاز به تعویض آن در بازه‌هایی مشـخص از کارکرد پیل سـوختی میکروبی، هزینه نگهـداری و تعمیرات در این سیستم افزایش و متاثر از آن خواهد بود. در حال حاضر در بخش‌های مختلف جهان پروژه‌هایی در دسـت انجام است. به‌طور مثال در ایران در مجموعه آزمایشـگاه‌های مهندسی انرژی‌های تجدیدپذیر دانشگاه شـهید بهشـتی پروژه‌ای با هدف جایگزینی غشا نفیون با یک غشا با قیمت بسیار پایین‌تر در دست انجام است. این غشا که آن را می‌توان جایگزین مناسـبی برای غشای نفیون معرفی نمود، دانشی به‌روز را با استفاده از تجهیزات ارزان قیمت درهم آمیخته و این محصول کارا را تولید نموده اسـت[۶]. گروهی دیگر از پژوهش‌ها نیز به دنبال حذف این غشـا بوده که در نتیجه آن مشـکل کاهش در راندمان الکتریکی پیل سـوختی میکروبی را به دنبال داشته اما هم‌چنان با هدف تصفیه آب در حال پیشرفت هستند[۷].

اسـتفاده از سوبسـترا (مواد یا فاضلاب ورودی به آند) با ترکیب‌های خـاص: در حال حاضر پژوهش‌هـای زیادی روی تاثیر مواد مختلف بر تـوان تولیدی پیل سـوختی میکروبی وجود دارد کـه موضوع اصلی آن تاثیـر مواد بر عملکرد قارچ‌هـا و همچنین بر مقاومت داخلی پیل سوختی میکروبی خواهد بود. وجود مواد مختلف در سوبسترا می‌تواند از طرفـی بـر مدت زمان موثر عملکرد غشـا تاثیر گذاشـته و نیاز به تعویض غشا را کمتر یا بیشتر نماید[۸].

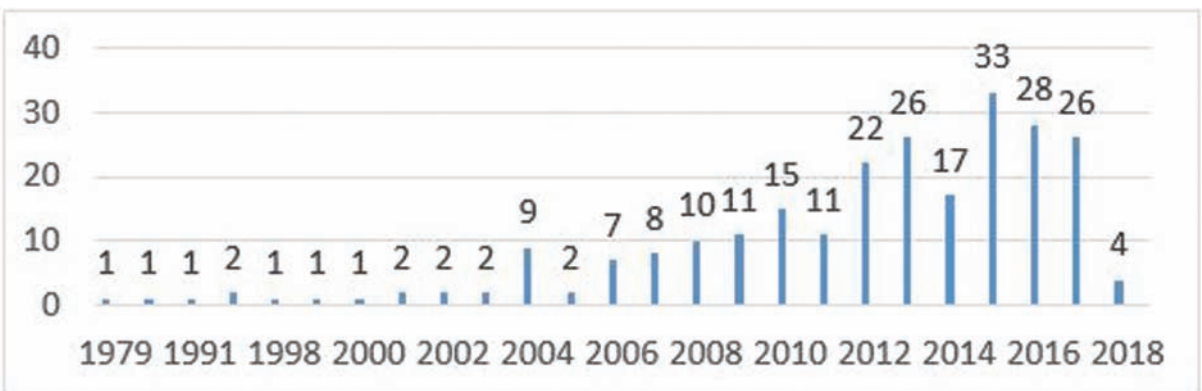
اسـتفاده از بیوکاتدهـا: اسـتفاده از بیوکاتدهـا یـا بـه عبارتـی گیاهـان در محفظـه کاتـد مزایایی از قبیـل افزایش میزان سـطح اکسـیژن محلـول در کاتـد و مصرف بعضـی مواد غیرآلـی همچون نیتـرات و نیتریـت را در بخـش کاتد بـه ارمغان مـی‌آورد که باعث افزایـش راندمـان تصفیـه فاضـلاب در بخـش کاتـد خواهد شـد. در ایـن زمینـه نوعـی از پیل‌های سـوختی میکروبی از نـوع وتلند یا مردابی در حال تحقیق و پیشـرفت اسـت کـه اصول آن بر وجود گیاهان بنا نهاده شده است[۹].

طراحـی سیسـتم‌های کنترلی کارا جهـت اسـتفاده از خروجی‌های چندین پیل سـوختی میکروبی: از مواردی که مورد تحقیق محققان واقع شـده است طراحی سیسـتم‌های کنترلی جهت استفاده موثر از الکتریسـیته خروجی پیل‌های سوختی میکروبی است. از آن‌جایی‌که خروجی توان هر پیل ثابت و یکنواخت نمی‌باشد و این‌که 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.

اسـتفاده از آند مناسـب: پژوهش‌های زیادی در مـورد نوع آند مورد اسـتفاده از نظر شـکل و جنس آن، انجام شـده است اما این موضوع همچنان تحت بررسی و بهینه‌سازی است.



شکل ۲: مهم‌ترین حوزه‌های پژوهشی پیل سوختی میکروبی



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

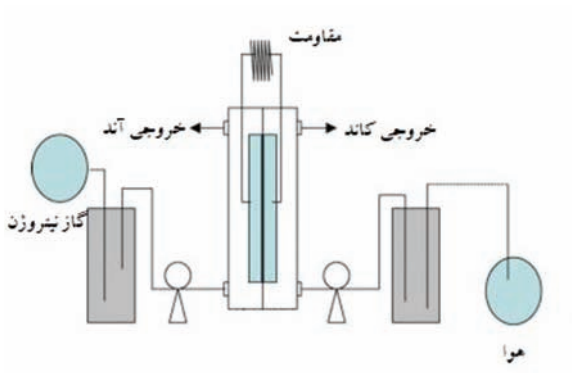
[Downloaded from kiaeee.ir on 2026-11-25]

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 الکترود آند 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.

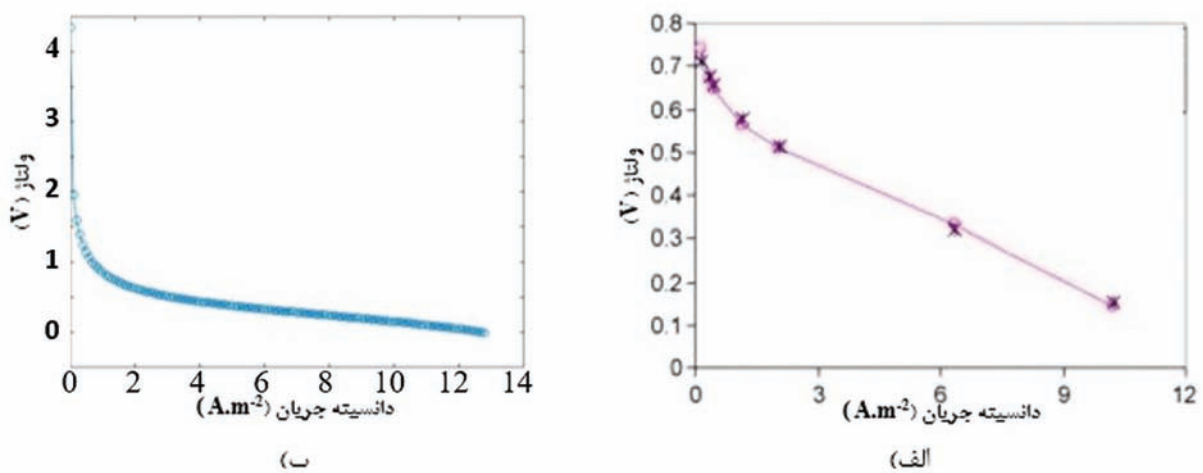
$$(CH2O)2 + 2H2O \rightarrow 2CO2 + 8H+ + 8e- \quad (۱)$$

$$O2 + 4e- + 4H+ \rightarrow 2H2O \quad (۲)$$

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.

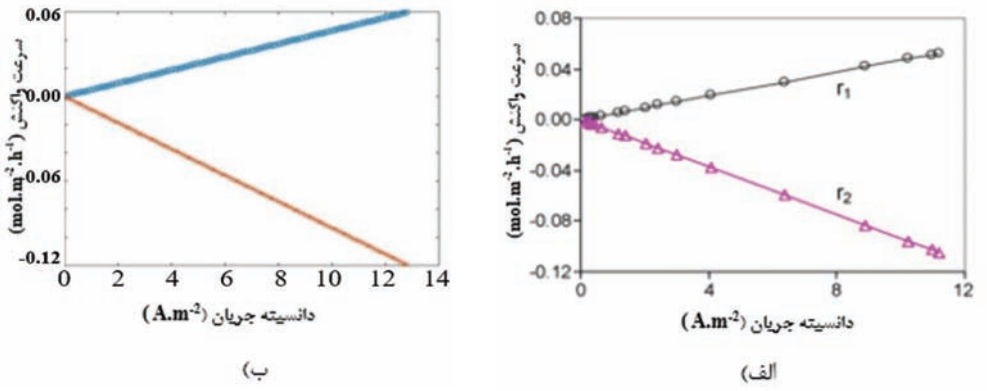
همان‌طورکه مشخص است، به‌جز در ناحیه جریان صفر (مدار باز) تا یک آمپر بر مترمربع سطح آند، در بقیه نقاط مدل‌سازی انجام شده با مدل مرجع هماهنگی و برابری دارد. با توجه به هم‌خوانی سایر نمودارهای وابسته، می‌توان علت این ناهم‌خوانی را وجود مغایرت در روش محاسبات عددی دانست که در بین این دو مدل وجود دارند. سایر 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 قارچ (X) موجود در محفظه می‌باشد که در مقاله زنگ و همکاران آمده است. همچنین نمودارهای (ب)، (پ) و (ت) به‌ترتیب مربوط به مقدارهای میزان قارچ موجود در محفظه،

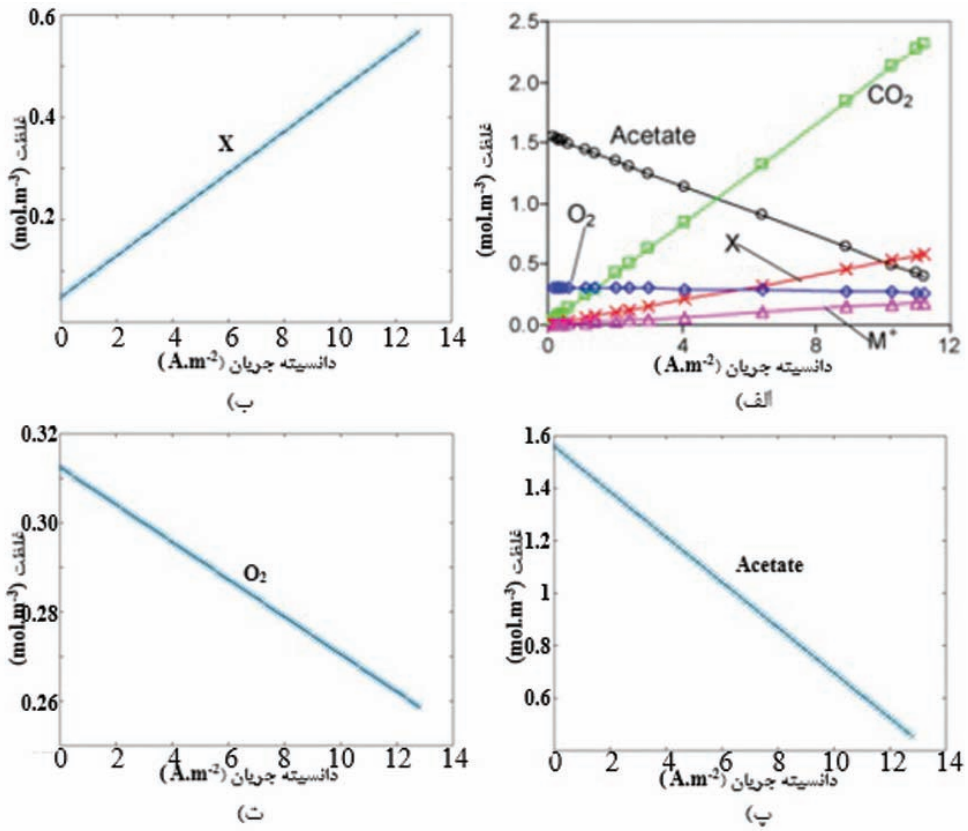


شکل ۵: مقایسه نتایج آزمایشگاهی الف) مدل‌سازی زنگ[۱۰] ب) مدل‌سازی این پژوهش

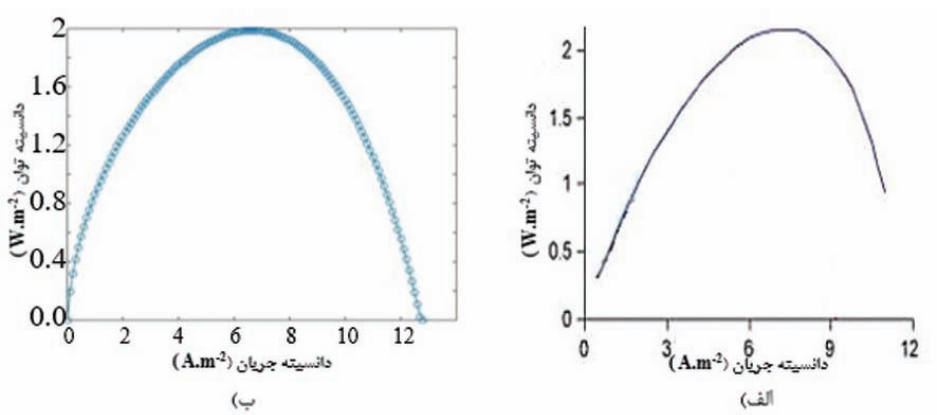
[Downloaded from kiaeee.ir on 2026-11-25]



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

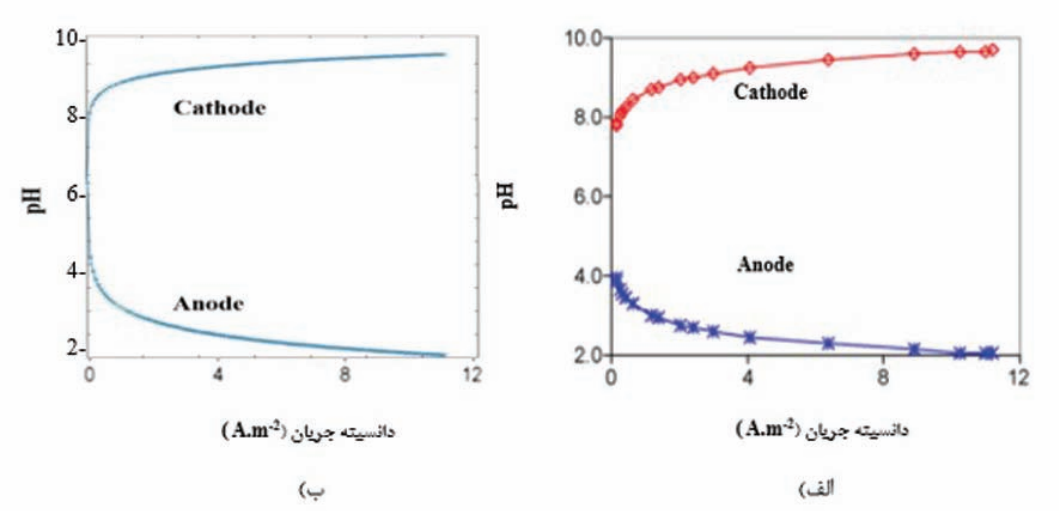


شکل ۷: مقایسه نتایج مقادیر پارامترهای محلول الف) مدلسازی زنگ[۱۰] ب)، پ) و ت) مدلسازی این پژوهش



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

[Downloaded from kiaeee.ir on 2026-11-25]



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

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. همان‌گونه‌که 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 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 .Amiritabar" ,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.

***

[Downloaded from kiaeee.ir on 2026-11-25]