

مدل سازی سه بعدی و گذرای پیل سوختی غشا پلیمری با میدان جریان پینی

ابراهیم افشاری*

مهدی مشرف دهکردی

محمد حسین خیام

محمود عدمی

سید علی اطمیابی

دانشیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران

استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران

کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی مالک اشتر اصفهان، اصفهان، ایران

دانشیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی مالک اشتر اصفهان، اصفهان، ایران

دانشجوی دکتری مکانیک، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران

چکیده

در پژوهش حاضر، یک مدل سه بعدی و گذرای پیل سوختی غشا پلیمری با میدان جریان پینی بررسی شده است. با حل عددی معادلات دیفرانسیل حاکم شامل معادلات بقای جرم، بقای ممنتوم، بقای گونه‌ها، بقای بار الکتریکی و بقای انرژی همراه با معادلات واکنش‌های الکتروشیمیایی، رفتار گذرای پیل بررسی شده است. ارائه نتایج مربوط به پارامترهای اساسی همچون چگالی جریان الکتریکی، توزیع غلظت گونه‌های شیمیایی، توزیع سرعت و خطوط جریان در پیل با میدان جریان پینی، درک کاملی از اصول اساسی پدیده‌های انتقال در پیل سوختی غشاء پلیمری فراهم می‌کند. نتایج نشان می‌دهد که استفاده از میدان جریان پینی، انتقال اکسیژن به لایه کاتالیست را بهبود می‌بخشد و در نتیجه باعث ایجاد چگالی جریان بالا می‌شود. همچنین، مدت زمان پایداری پیل سوختی از مرتبه ثانیه است که این موضوع نشان دهنده کوتاه بودن فرآیند راه‌اندازی پیل سوختی غشا پلیمری است. در این مدت زمان، پارامترهای عملکردی پیل سوختی مانند چگالی جریان، غلظت مولی واکنش‌دهنده‌ها و فشار پیل سوختی طی این مدت زمان به پایداری می‌رسند. **واژه‌های کلیدی:** پیل سوختی غشا پلیمری، حالت گذرا، میدان جریان پینی، دینامیک سیالات محاسباتی.

Three-dimensional and Transient Modeling of a PEM Fuel Cell with the Pin –type flow Field

E. Afshari

M. Mosharaf Dehkordi

M. H. Khayyam

M. Adami

S. A. Atyabi

Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Isfhan University, Isfhan, Iran

Department of Mechanical Engineering Faculty of Engineering, Isfhan University, Isfhan, Iran

Mechanical Engineering Department of Mechanical & Aerospace Engineering, Malek-Ashtar University, Isfhan, Iran

Department of Mech&Aerospace Engineering, Mechanical - Ashtar University

Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Isfhan University, Isfhan, Iran

Abstract

In the present study, a three-dimensional and transient model of a proton exchange membrane (PEM) fuel cell with pin-type flow field is investigated. The governing equations, including the mass, momentum, species, charge and energy conservation equation along with electrochemical reactions, are numerically solved to investigate the transient behavior of the fuel cell. The results associated with the current density, chemical species and velocity distributions, along with the streamline pattern clarify the basic concept of the transport phenomena in the PEM fuel cells. The numerical results show that using the pin-type flow field, increase the oxygen transfer rate into the catalyst layer which results to an increase in the current density average value. As the transient time of the fuel cell is about few seconds, its start-up process is very quick. During this transient time, the operating parameters of the fuel cell such as current density, mole fraction of the reactants and pressure of the fuel cell reach to their steady state condition.

Keywords: PEM fuel cell, Transient state, pin -type flow field, CFD.

۱- مقدمه

در پاسخ به توان مورد نیاز راننده‌ها نظیر راه‌اندازی، افزایش و کاهش سرعت، توقف و شتاب دادن در مواقع استفاده پیل در کاربردهای حمل و نقل می‌باشد. یک مدل دینامیکی پیل سوختی غشا پلیمری معمولاً برای روشن شدن بر هم کنش بین انتقال جرم و انرژی الکتروشیمیایی در حالتی که متغیرها و پارامترهای وابسته به پیل سوختی با زمان تغییر می‌کنند، ارائه می‌شود. در واقع، هدف از ارائه یک مدل دینامیکی برای پیل سوختی، بررسی جامع عملکرد گذرای پیل در برابر تغییر شرایط است. بدین صورت که هر گونه تغییر در پارامترهای عملکردی پیل مانند ولتاژ، جریان الکتریکی، فشار عملکردی، دما، میزان رطوبت، ضرایب استوکیومتری و ... باعث تغییر در رفتار عملکرد گذرای پیل سوختی می‌شود.

یکی از شیوه‌های نوین که فناوری آن در دهه اخیر به سرعت توسعه یافته است، استفاده از پیل سوختی جهت تأمین همزمان الکتریسیته و گرما به روش الکتروشیمیایی می‌باشد. پیل سوختی غشا پلیمری به دلیل چگالی توان بالا، تولید آلودگی کم، سر و صدای ناچیز و به‌خصوص راه‌اندازی سریع و پاسخ گذرای کوتاه در دماهای پایین به یک کاندیدای امیدوار کننده برای تولید قدرت در وسایل حمل و نقل الکتریکی تبدیل شده است. با توجه به اینکه در شرایط واقعی، پیل‌های سوختی حالت گذرا را تجربه می‌کنند، مدل‌سازی حالت گذرای پیل از اهمیت ویژه‌ای برخوردار می‌باشد. هدف اساسی مدل‌سازی گذرای پیل، دستیابی به عملیات دینامیک سریع و پایدار

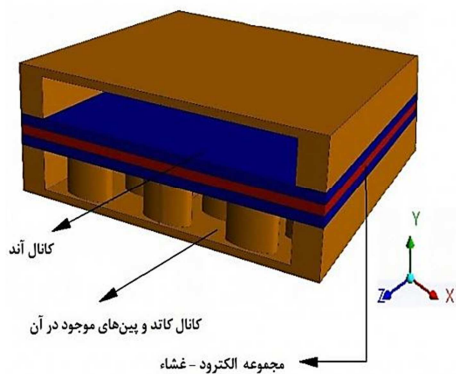
* نویسنده مکاتبه کننده، آدرس پست الکترونیکی: e.afshari@eng.ui.ac.ir

علاوه بر رفتار گذرای پیل، بررسی همزمان شکل هندسه کانال و تاثیر آن بر عملکرد پیل نیز اهمیت زیادی دارد. شکل و هندسه کانال جریان، بر توزیع مناسب واکنشگرها، توزیع یکنواخت جرم از طریق لایه انتشار گاز به سطح کاتالیست، خروج آب تولیدی از داخل پیل و زمان رسیدن به حالت دائم موثر است. طراحی میدان جریان دارای پارامترهای وابسته به هم بسیار زیادی است که اغلب آن‌ها نقش ناپایدار کننده بر روی عملکرد پیل سوختی خواهند داشت. ساختارهای مختلف کانال‌های جریان از قبیل کانال‌های موازی، مارپیچی تک، مارپیچی چند تایی، کانال‌های به هم پیوسته و پینی برای پیل‌های سوختی توسعه داده شده و استفاده گردیده است. هر کدام از این طرح‌ها، مشخصات و پی‌آمدهایی دارند. میدان جریان پینی می‌تواند علاوه بر فراهم آوردن سطح تماس مناسب با لایه پخش گاز (جهت کاهش مقاومت الکتریکی سطحی و عدم فشردگی زیاد این لایه)، باعث افزایش انتقال سوخت و اکسید کننده و ایجاد سوخت‌رسانی یکنواخت‌تر و افت فشار بهینه در سرتاسر میدان جریان گردد که بهبود کارایی پیل سوختی در مقایسه با میدان‌های جریان معمولی را به دنبال دارد. دینامیک سیالات محاسباتی ابزاری کارآمد به منظور تجزیه و تحلیل پدیده‌های مختلفی که در پیل سوختی غشا پلیمری در حالت گذرا اتفاق می‌افتد، می‌باشد. این ابزار می‌تواند مدل دینامیکی پیل سوختی غشا پلیمری را برای روشن شدن بر هم کنش بین انتقال جرم و انرژی الکتروشیمیایی در پیل در حالتی که متغیرها و پارامترهای وابسته به پیل سوختی با زمان نیز تغییر می‌کنند، برای میدان جریان پینی ارائه نماید.

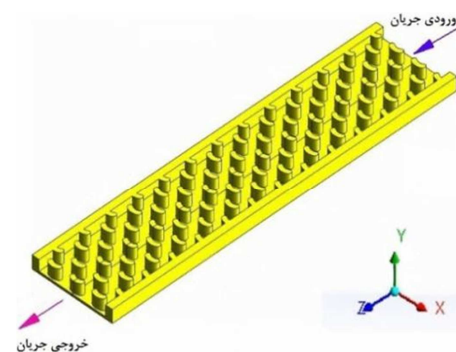
اکثر مطالعات در رابطه با پیل‌های سوختی غشاء پلیمری بر رفتار حالت پایا متمرکز شده است؛ اما در چند سال اخیر تلاش‌هایی برای شبیه‌سازی عددی رفتار دینامیک پیل‌ها انجام شده است. رفتار گذرای این پیل‌ها یک معیار مهم در کاربرد آن‌ها در سیستم‌های خودرو است. دانش صریح رفتار گذرای پیل‌های سوختی پلیمری در حال تبدیل شدن به یک موضوع تحقیقاتی اساسی، جهت طراحی کنترل‌کننده‌ها و همچنین برای بهینه‌سازی عملکرد گذرای پیل می‌باشد.

تاکنون تحقیقات عددی بسیاری در زمینه پیل‌های سوختی پلیمری انجام شده است. با این حال، بسیاری از آن‌ها بر اساس مدل ریاضی یک یا دو بعدی، دما ثابت و پایا می‌باشند که بر روی یک تک کانال از ساختار ساده پیل سوختی مانند کانال مستقیم توجه کرده‌اند. در مقابل، مدل‌های گذرا و شبیه‌سازی‌های عددی متناظر اندک هستند. باسل و همکاران [۱] ویژگی‌های منحنی قطبش پیل را با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی بر اساس مدل گذرای دو بعدی پیل سوختی پلیمری شبیه‌سازی کردند. آن‌ها به منظور بررسی اثر شرایط عملیاتی مختلف بر عملکرد پیل سوختی، یک مدل گذرا و دو بعدی را توسعه دادند. مدل آن‌ها می‌تواند ویژگی‌های منحنی قطبش یک پیل سوختی را با مقادیر مختلف اکسیژن شبیه‌سازی کرده و اثر شرایط عملیاتی مختلف مانند دمای گازهای خشک، چگالی جریان سطح، هم جهت و مختلف‌الجهت بودن جریان را به صورت کیفی توصیف نماید. ام و وانگ [۲] پاسخ گذرای چگالی جریان را برای تغییر گام در ولتاژ پیل برای اولین بار شبیه‌سازی کردند. آن‌ها یک مدل دو بعدی، هم دما و گذرا از پیل سوختی را بر اساس مدل‌های دینامیک سیالات محاسباتی پیشنهاد دادند. این مدل به طور همزمان سینتیک

الکتروشیمیایی، توزیع چگالی و انتقال چند جزئی را بررسی کرده است. آن‌ها نشان دادند که بعد از چند ثانیه از بارگذاری، توزیع چگالی جریان به شرایط پایا می‌رسد. وانگ و همکاران [۳] با استفاده از یک مدل دو بعدی هم دما، گذرا و دو فاز، ثابت‌های زمانی مختلفی برای پدیده مهم انتقال تخمین زده و پارامتر مشخصه وابسته به تغییر گام زمانی در ولتاژ پیل و رطوبت جریان گاز ورودی را تجزیه و تحلیل کردند. در مطالعه‌ای که توسط هومنگ [۴] انجام شد یک مدل دو بعدی، دو فاز، گذرا و غیر هم دما توسعه داده شد و نشان داده شد که در این مدل انتقال گرما به میزان قابل‌توجهی زمان ناپایایی را افزایش می‌دهد. سریجان و ییشیل یورت [۵] یک مدل دو بعدی، گذرا و تک فاز را که شامل انتقال آب در غشا و انتقال گونه‌ها در لایه نفوذ گاز بود و انتهای کانال‌های جریان بسته شده بود، شبیه‌سازی کردند. آن‌ها پاسخ گذرای سیستم را برای دو حالت جریان موازی و جریان مخالف تحت تغییرات پله‌ای ولتاژ و فشار مورد بررسی قرار دادند و نتیجه گرفتند که کانال آب نقش مهمی در رسیدن سیستم به حالت پایا دارد. چن و همکارانش [۶] یک مدل دو بعدی برای طراحی کانال‌های سوخت در پیل سوختی غشا پلیمری ارائه داده‌اند. آن‌ها با استفاده از یک طرح محاسباتی ساده و حل معادلات دیفرانسیل معمولی حاکم، به تجزیه و تحلیل اثرات برخی از پارامترهای عملکردی و طراحی، مانند سرعت ورودی، فشار ورودی، فعالیت کاتالیست، ارتفاع کانال و تخلخل لایه نفوذ گاز بر روی عملکرد پیل به منظور دستیابی به پیل سوختی با کارایی بالا پرداختند. نتایج آن‌ها نشان می‌دهد که یک طراحی با چگالی توان بالاتر همیشه با بهره‌وری سوخت بالاتر و بالعکس همراه است. مطالعه انجام شده به وسیله ام و وانگ بعدها توسط وانگ و همکارانش [۷] توسعه یافت؛ به گونه‌ای که آن‌ها یک مدل ناپایایی سه بعدی، تک فاز و هم دما را بررسی کردند. آن‌ها شبیه‌سازی عددی خود را به سمت تغییر پله‌ای ولتاژ پیل و رطوبت در ورودی هدایت کردند. هدی و چن [۸] با در نظر گرفتن یک حجم کنترل حرارتی در سمت کاند پیل سوختی غشا پلیمری، عملکرد حرارتی گذرای این پیل را بررسی نمودند. این آنالیز حرارتی به وسیله یک معادله یک بعدی برای کانال کاند انجام شده است. چادهاری و همکارانش [۹] با مدل‌سازی دو بعدی و گذرای پیل سوختی غشا پلیمری به بررسی محتوی آب غشا پرداختند. مقایسه عملکرد میزان آب در غشا با دو مدل تقریب شولدر و مدل نسبت بخار و مایع از دیگر اهداف این مقاله بوده است. وارم و پیچمنی [۱۰] پارامترهای عملکردی گذرای پیل‌های سوختی غشا پلیمری را بررسی کردند. آن‌ها با شبیه‌سازی عددی و گذرای پیل، تاثیر شرایط عملکردی بر تنش و کرنش غشا در مجاورت صفحه قطبی را بررسی کردند. بیکاش میشر و جون خیاو [۱۱] یک مدل سه بعدی که دارای کانال مارپیچی بود، شبیه‌سازی کرده و تاثیر پارامترهای مختلف در حالت شروع به کار پیل را بررسی کردند. در مدل آن‌ها، تک فاز یا دو فاز بودن سیستم به منظور درک تاثیر آب مایع در چگونگی عملکرد پیل و همچنین هم دما و غیر هم دما بودن مدل به منظور درک اثر دما بر عملکرد پیل مورد بررسی قرار گرفته است. اوبایو و همکاران [۱۲] میدان جریان و توزیع گازهای واکنشگر در یک کانال پیل سوختی غشا پلیمری را با قرار دادن یک سری پین به صورت متقاطع در کانال جریان که در جهت بهبود توزیع گازهای واکنش‌دهنده به کار می‌رود،

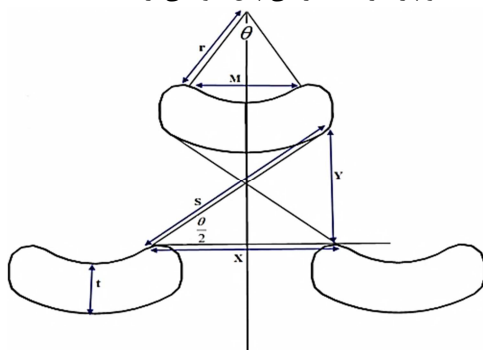


شکل ۱- مدل سه بعدی پیل با میدان جریان پینی در کانال کاتد



شکل ۲- میدان جریان پینی در کانال کاتد پیل سوختی

نحوه آرایش پین‌ها در کنار یکدیگر و پارامترهای هندسی مربوط به آن در شکل ۳ نمایش داده شده است. در این شکل، شعاع r انحنا پین، ضخامت پین، t زاویه مماسی برخورد جریان به پین بالایی، s فاصله مماسی برخورد جریان به پین Y فواصل افقی و عمودی بین دو پین مجاور می‌باشند. مقادیر این پارامترها در جدول خصوصیات و پارامترهای فیزیکی پیل سوختی ارائه شده است.



شکل ۳- پارامترهای هندسی مربوط به پین‌ها

۲-۲- فرضیات مدل

معادلات حاکم بر پیل سوختی بسیار پیچیده است و نیاز به حل آن‌ها برای درک پدیده‌های انتقال جرم، اندازه حرکت انتقال انرژی و سینتیک الکتروشیمیایی در داخل پیل سوختی دارد. برای پیاده‌سازی مدل عددی، فرضیات زیر در نظر گرفته شده است.

۱. تمامی گازها، ایده‌آل در نظر گرفته می‌شود.
۲. جریان لایه‌ای فرض می‌شود (عدد رینولدز حدود ۷۶ است).

به صورت عددی بررسی نمودند. اصطکاک کانال و افت فشار به وضوح با افزایش تخلخل لایه پخش گاز کاهش یافته است. تایمز و همکاران [۱۳] یک کانال تغییر شکل یافته را در یک مدل سه بعدی دینامیک سیالات محاسباتی به کار برده و آن را برای شبیه‌سازی پیل سوختی غشا پلیمری توسعه دادند. در کار آن‌ها، تخلخل و ضخامت لایه پخش گاز با فشردگی ناشی از فشار مونتاز کاهش یافته است. ضرایب پخش و نفوذپذیری بستگی به تخلخل لایه پخش گاز دارد که در اثر فشار مونتاز کاهش می‌یابد. مدل ارائه شده توسط آی سوزوکی و همکاران [۱۴] اثرات تخلخل و محتوای پلاتین کاتالیست بر خصوصیات منحنی قطبش پیل سوختی غشا پلیمری را بررسی کرده است. آن‌ها نشان دادند که افزایش تخلخل لایه پخش گاز محدودیت انتقال اکسیژن در چگالی جریان‌های بالا را کم کرده و عملکرد پیل بهبود می‌یابد.

در این مطالعه، با بررسی و حل سه بعدی طرح میدان جریان لوبیا شکل که در دسته آرایش پینی، طرح جدیدی برای پیل سوختی غشا پلیمری می‌باشد، رفتار گذرای پیل سوختی غشا پلیمری بررسی شده است. هدف اصلی این مطالعه بررسی رفتار گذرای پیل و ارائه نتایج مربوط به پارامترهای اساسی همچون توزیع سرعت و خطوط جریان، چگالی جریان الکتریکی، توزیع کسر گونه‌های شیمیایی و فشار است تا درک کاملی از اصول اساسی پدیده‌های انتقال در پیل سوختی غشاء پلیمری با میدان جریان پینی فراهم شود. انتظار می‌رود که نتایج، اطلاعات دقیقی در مورد پدیده‌های انتقال در حالت گذرا داخل پیل سوختی غشا پلیمری با این میدان جریان ارائه و درکی بهتر از توزیع واکنش‌دهنده‌ها در داخل پیل سوختی ارائه نماید.

۲- اصول تئوری

۲-۱- توصیف میدان جریان پینی پیل سوختی

شکل ۱ طرحواره از مدل سه بعدی میدان جریان پینی در کانال کاتد یک پیل سوختی غشا پلیمری و قسمت‌های مختلف آن را نشان می‌دهد. مدل پیل سوختی شامل: کانال جریان آند، لایه پخش گاز آند، لایه کاتالیست آند، غشا، لایه کاتالیست کاتد، لایه پخش گاز کاتد و کانال جریان کاتد همراه با پین‌های تعبیه شده در آن است. با توجه به پخش بالای هیدروژن در سمت آند، پین‌های لوبیایی شکل تنها در کانال کاتد تعبیه شده‌اند شکل ۲ آرایش سه بعدی پینی داخل صفحه قطبی کاتد و جهت حرکت سیال از بین پین‌ها را نشان می‌دهد. هر چند که تحلیل دو بعدی نیز برای درک صحیح و توصیف پدیده‌های انتقال در پیل با کانال مستقیم کافی می‌باشد؛ اما برای بررسی اثر هندسه در میدان جریان پینی، نیاز به یک مدل سه بعدی است. بدین منظور از یک مدل سه بعدی با در نظر گرفتن تمامی نواحی پیل استفاده شده و تاثیر پین‌ها بر عملکرد گذرای پیل بررسی شده است.

۳. مخلوط جریان‌های گاز، تراکم‌ناپذیر در نظر گرفته می‌شود.
۴. الکترودها، لایه‌های کاتالیست و غشا همگن هستند.
۵. آب تولید شده به صورت ذرات بسیار ریز در نظر گرفته شده است و بنابراین در جریان گازی، پدیده انتقال و واکنش‌های شیمیایی تأثیری نمی‌گذارند.
۶. از تأثیر گرانش صرف‌نظر می‌شود.
۷. از مقاومت تماسی بین لایه‌ها صرف‌نظر می‌شود.
۸. ساختار لایه کاتالیست، توده انباشته می‌باشد.
۹. غشا در مقابل گازهای واکنشگرها نفوذناپذیر است.
۱۰. پتانسیل مدار باز مرجع در کاتد تابعی از دما و در آند صفر است.

۲-۳- معادلات حاکم

معادلات حاکم بر مدل پیل به صورت کوپل، پاره‌ای و غیر خطی بوده و شامل معادلات بقای جرم، بقای مومنتوم، بقای انرژی، بقای بار الکتریکی همراه با واکنش‌های الکتروشیمیایی است. این معادلات حاکم و عبارت‌های چشمه در معادلات به ترتیب در جدول ۱ و ۲ خلاصه شده‌اند.

جدول ۱- معادلات حاکم بر مدل پیل سوختی

شماره	معادله	فرم ریاضی معادله حاکم
(۱)	پیوستگی	$\frac{\partial(\rho\epsilon)}{\partial t} + \nabla \cdot (\epsilon\rho\vec{u}) = 0$
(۲)	مومنتوم	$\frac{\partial(\rho\epsilon\vec{u})}{\partial t} + \nabla \cdot (\epsilon\rho\vec{u}\vec{u}) = \epsilon\nabla p + \nabla \cdot (\epsilon\mu^{eff}\nabla\vec{u}) + \vec{S}_u$
(۳)	بقای اجزا	$\frac{\partial(X_k)}{\partial t} + \nabla \cdot (\epsilon\vec{u}X_k) = \nabla \cdot (D_k^{eff}\nabla X_k) + \vec{S}_k$
(۴)	پتانسیل الکتروود	$\nabla(\sigma_e^{eff}\nabla\phi_e) + S_{\phi_e} = 0$
(۵)	پتانسیل فاز جامد	$\nabla(\sigma_s^{eff}\nabla\phi_s) + S_{\phi_s} = 0$
(۶)	انرژی	$\frac{\partial(\rho H)}{\partial t} + \nabla \cdot (\epsilon\rho H\vec{u}) = \frac{\partial}{\partial t}(\vec{k}_{eff}\nabla T) + S_e$

جدول ۲- ترم‌های چشمه و چاه

معادله	GDL	لایه‌های کاتالیست	غشا
مومنتوم	$-\frac{\mu}{K}\vec{u}$	$-\frac{\mu}{K}\vec{u}$	$-\frac{\mu}{K}\vec{u}$
گونه جرمی: اکسیژن	0	$\frac{j_c}{4F}$	0
گونه جرمی: هیدروژن	0	$-\frac{j_a}{2F}$	0
گونه جرمی: بخار آب	0	$-\nabla \cdot (\frac{n_d}{F}i) - \frac{j_c}{2F}$	0
پتانسیل جامد	0	-j	0
پتانسیل غشاء	0	-j	0
انرژی	0	$j(\eta + T\frac{dU_0}{dT}) + \frac{I^2}{\sigma_m^{eff}}$	$\frac{I^2}{\sigma_m}$

در معادلات ۱ تا ۶، $\vec{u}$ ، ρ ، μ ، ϵ ، P ، X_k ، ϕ_e ، ϕ_s ، k و H به ترتیب بردار سرعت، چگالی گازها، لزجت، ضریب تخلخل، فشار، کسر مولی جز k ام، پتانسیل الکتریکی در غشا، پتانسیل فاز جامد، ضریب هدایت حرارتی و آنتالپی است. در جدول (۲) نیز j_c ، j_a ، η ، n_d ، U_0 ، K ، F به ترتیب چگالی جریان الکتریکی انتقالی آند، چگالی جریان الکتریکی انتقالی کاتد، اضافه ولتاژ، ضریب پسای الکترو - اسمزیک، ولتاژ مدار باز، ضریب نفوذپذیری گاز در محیط متخلخل و ثابت فارادی می‌باشد.

به کمک روابط تجربی، ضریب رسانش یونی غشا بدست می‌آید [۱۵].

$$\sigma_k^{eff} = \epsilon^{1.5} \sigma_k \quad (۷)$$

در معادله (۴)، ضریب رسانش پروتونی غشا، σ_e ، تابع دما، T و رطوبت نسبی غشا، λ ، است.

$$\sigma_e = 100 \times \exp[1268(\frac{1}{303} - \frac{1}{T})] \times (0.005139\lambda - 0.00326) \quad (۸)$$

رطوبت نسبی غشا طبق رابطه تجربی اسپرینگر [۱۶] تعریف می‌شود.

$$\lambda = \begin{cases} 0.043 + 17.18a - 39.85a^2 + 36a^3 & \text{for } 0 < a < 1 \\ 14 + 1.4(a - 1) & \\ 14 + 1.4(a - 1) & \text{for } 1 < a < 3 \end{cases} \quad (۹)$$

فعالیت آب، a ، از رابطه زیر به دست می‌آید.

$$a = \frac{X_{H_2O}P}{P_{sat}} \quad (۱۰)$$

فشار اشباع، P_{sat} ، تنها تابع دما است [۱۷].

$$\log p_{sat} = -2.1794 + 0.02953(T - 273.15) - 9.1837 \times 10^{-5}(T - 273.15)^2 + 1.4454 \times 10^{-7}(T - 273.15)^3 \quad (۱۱)$$

ضرایب پخش گازها، D ، نیز وابسته به دما و فشار است.

$$D(T, P) = D_0(\frac{T}{T_0})^{\frac{3}{2}}(\frac{P_0}{P}) \quad (۱۲) \quad \text{در کانال‌ها}$$

$$D_k^{eff} = \epsilon^{1.5} D_k \quad (۱۳) \quad \text{در نواحی متخلخل}$$

ضریب پخش آب در غشا تابع دما و رطوبت نسبی غشا است.

$$D_w^m = \begin{cases} 3.1 \times 10^{-7} \times \lambda(e^{0.28\lambda} - 1)e^{\frac{-2346}{T}} & 0 < \lambda < 3 \\ 4.17 \times 10^{-8} \times \lambda(161e^{-\lambda} + 1)e^{\frac{-2346}{T}} & 3 < \lambda \end{cases} \quad (۱۴)$$

ضریب درگ الکترو - اسمزیک آب در غشا، n_d ، به کمک رابطه زیر به دست می‌آید.

$$n_d = \begin{cases} 1.0 & \lambda \leq 14 \\ 1.5 / 8(\lambda - 14) + 1.0 & \lambda > 14 \end{cases} \quad (۱۵)$$

ضریب رسانایی گرمایی موثر از روابط تجربی مشخص می‌شود [۱۶].

$$k_{eff} = \frac{1}{\frac{1 - \epsilon}{3k_s} + \frac{\epsilon}{2k_s + k_f}} - 2k_s \quad (۱۶)$$

k_f ضریب هدایت حرارتی در فاز سیال، k_s ضریب رسانایی گرمایی در فاز جامد می‌باشد.

معادله باتلر - ولمر، چگالی جریان الکتریکی را توصیف می‌کند. در آند هیدروژن به شکل آب کاهش می‌یابد، در کاتد نیز اکسیژن کاهیده می‌شود و معادله سینتیک انتقال بار به کار می‌رود [۱۸] و

جدول ۳- خصوصیات و پارامترهای فیزیکی پیل سوختی [۱۸-۲۱]

پارامتر	مقادیر
پارامترهای هندسی	
ارتفاع کانال	1.0 mm
طول کانال	40 mm
عرض کانال	7.69 mm
ضخامت جمع کننده جریان	1 mm
ضخامت لایه پخش گاز	260 μm
ضخامت لایه کاتالیست	10 μm
ضخامت غشا	230 μm
ارتفاع پین	1.0mm
فاصله طولی بین پین‌ها	1.58 mm
فاصله عرضی بین پین‌ها	1.21mm
ضخامت پین	0.5mm
زاویه مماسی برخورد جریان به پین بالایی	37.5 degree
شعاع انحنای پین	1mm
پارامترهای عملکردی	
نرخ استوکیومتری جریان هیدروژن/اکسیژن	1.1
دمای عملکرد پیل	353K
غلظت کلی آند	66.817 mol/m ³
غلظت کلی کاتد	17.808 mol/m ³
فشار ورودی آند/کاتد	1.2×10 ⁵ Pa
کسر مولی هیدروژن ورودی	0.365
کسر مولی اکسیژن ورودی	0.61
کسر مولی بخار آب ورودی در آند و کاتد	0.635
کسر مولی مرجع هیدروژن	0.55
کسر مولی مرجع اکسیژن	0.02
نرخ جریان جرمی ورودی کانال آند	3.61×10 ⁻⁶ kg/s
نرخ جریان جرمی ورودی کانال کاتد	7.80×10 ⁻⁶ kg/s
پارامترهای انتقالی	
ضریب انتقال آند و کاتد	1
چگالی جریان مبادله شده آند،	5×10 ⁸ A/m ³
چگالی جریان مبادله شده کاتد	1×10 ² A/m ³
ضریب پخش هیدروژن در کانال	9.15×10 ⁻⁵ m ² /s
ضریب پخش اکسیژن در کانال	2.2×10 ⁻⁵ m ² /s
خواص مواد	
ضریب رسانایی گرمایی موثر غشا	0.34W/m.K
ضریب پسا الکترو- اسمزیک	1
تخلخل لایه پخش گاز	0.3
تخلخل غشا/کاتالیست	0.28

۲-۵- روش حل ناپایا

در این مطالعه، از فرمول‌بندی با شیوه ضمنی استفاده شده است. فرمول‌بندی ضمنی به واسطه داشتن مشخصه‌های پایداری بیشتر، می‌تواند سریع‌تر از روش صریح به حل پایدار و همگرا برسد؛ اما این نوع فرمول‌بندی نسبت به شیوه صریح، به حافظه بیشتری نیاز دارد و در آن معیاری برای تعیین پایداری و اندازه گام زمانی وجود ندارد. انتخاب گام زمانی برای به دست آوردن راه حل دقیق و همگرایی مناسب حل بسیار مهم و سخت است و در این مطالعه، روش تطبیقی گام زمانی برای شبیه‌سازی گذرا انتخاب شده است. در این روش،

[۱۹].

$$j_a = aj_{0,a}^{ref} \left(\frac{X_{H_2}}{X_{H_2,ref}} \right)^{\frac{1}{2}} \left(\frac{\alpha_a + \alpha_c}{RT} \cdot F \cdot \eta \right) \quad (17)$$

$$j_c = -aj_{0,c}^{ref} \left(\frac{X_{O_2}}{X_{O_2,ref}} \right)^{\frac{1}{2}} \exp \left(\frac{-\alpha_c}{RT} \cdot F \cdot \eta \right) \quad (18)$$

α_a و α_c ضریب انتقال آند و کاتد است. اضافه ولتاژ، تابعی از پتانسیل Φ و پتانسیل مدار باز U_0 است.

$$\eta(x,y) = \Phi_s - \Phi_e - U_0 \quad (19)$$

ولتاژ مدار باز تابعی از دما بوده و به صورت زیر است.

$$U_0 = 1.23 - 0.9 \times 10^{-3} (T - 298.15) \quad (20)$$

چگالی جریان الکتریکی در جهت محوری در وجه مشترک بین غشا و لایه کاتالیست کاتد، IF ، از رابطه زیر مشخص می‌شود.

$$I(y) = -\sigma_e^{eff} \left. \frac{\partial \phi_e}{\partial x} \right|_x = IF \quad (21)$$

چگالی جریان الکتریکی متوسط نیز به صورت زیر محاسبه می‌شود.

$$I_{avg} = \frac{1}{L} \int_0^L I(y) dy \quad (22)$$

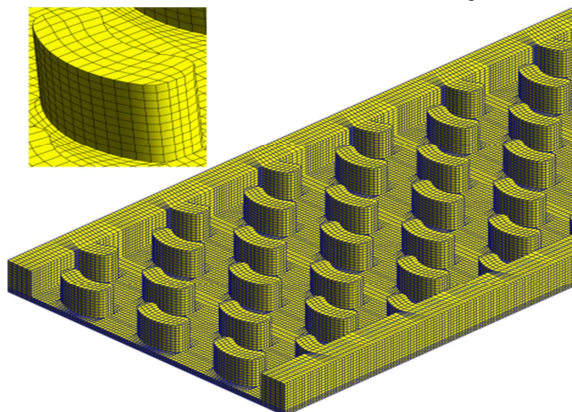
جدول ۳ پارامترهای فیزیکی و خصوصیات پیل را نشان می‌دهد.

۲-۴- شرایط مرزی

مدل‌سازی پیل، شامل حل دستگاه معادلات حاکم (معادلات ۱ تا ۶) با مجهولات میدان‌های سرعت در جهات x ، y و z ، میدان فشار، شارژ الکتریکی، دما و همچنین غلظت اکسیژن، هیدروژن، آب و نیتروژن می‌باشد. برای حل این مجهولات، نیازمند داشتن شرایط مرزی روشن و مناسب است. با انتخاب روش حل تک ناحیه‌ای، شرایط مرزی تنها در سطوح خارجی دامنه محاسباتی باید مشخص شود و نیازی به تعیین شرایط مرزی داخلی بین لایه‌های مختلف پیل سوختی نمی‌باشد. شرایط مرزی استفاده شده شامل: شرایط مرزی ورودی، شرایط مرزی خروجی و شرایط مرزی در دیواره‌ها است. در ورودی کانال‌های آند و کاتد، میزان جریان جرمی مشخص می‌باشد. در خروجی کانال‌های آند و کاتد نیز، می‌توان از شرط مرزی فشار خروجی بهره برد که در آن از فشار استاتیک به صورت نسبی در مرز خروجی استفاده می‌شود. جریان در مرزهای خروجی به صورت توسعه‌یافته در نظر گرفته می‌شود.

برای دیواره‌های کانال و همچنین دیواره پین‌ها موجود در کانال کاتد، برای پارامتر سرعت شرط عدم لغزش استفاده می‌شود و برای دیگر متغیرها، به جز شرط دمایی، شرط شار صفر در مرز کانال‌ها به کار می‌رود. دمای دیواره‌های کانال‌ها برابر دمای عملکرد پیل فرض شده است. در ناحیه جامد، شرایط مرزی آدیاباتیک در تمام مرزهای دامنه به کار می‌رود. شرط مرزی به کار رفته در دیواره ناحیه جمع کننده جریان الکتریکی آند و کاتد نیز ولتاژ می‌باشد که برای ناحیه آند ولتاژ صفر و برای سمت کاتد ولتاژ مدار باز نرنست اختصاص می‌یابد. در واقع پتانسیل الکتریکی در وجه مشترک لایه کاتالیست آند/لایه پخش گاز آند صفر و در وجه مشترک لایه کاتالیست کاتد/لایه پخش گاز کاتد برابر ولتاژ پیل در نظر گرفته می‌شود.

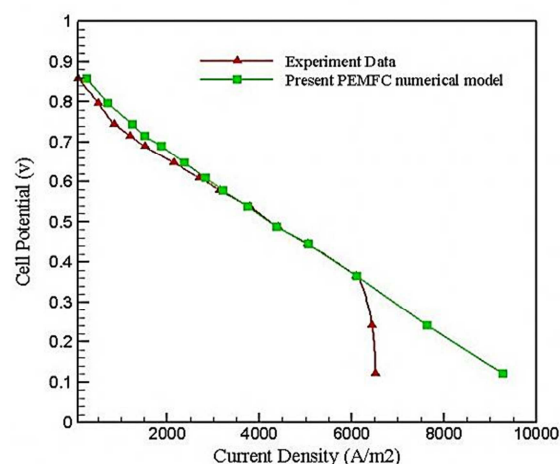
در شکل ۵ نیز شبکه‌بندی سه بعدی مربوط به صفحه قطبی کاتد و پین‌های موجود در آن نمایش داده شده است. مطالعه استقلال از شبکه نیز با افزایش چگالی مش (در ولتاژ کاری ۰/۴۷ ولت) انجام شده است. نتایج به دست آمده برای چهار مورد چگالی جریان میانگین مقایسه شده است و در نهایت مورد سوم با تعداد شبکه ۱۳۸۶۶۰ برای شبکه‌بندی انتخاب شده است.



شکل ۵- شبکه‌بندی صفحه قطبی کاتد و پین‌های تعبیه شده در آن

۳- نتایج و بحث

به منظور اعتبارسنجی نتایج، منحنی قطبش نتیجه شده از حل عددی، در شکل ۶ برای یک کانال ساده مستقیم (بدون پین) و به صورت پایا با منحنی قطبش در مطالعه تجربی وانگ [۲۴] مقایسه شده که توافق بسیار خوبی با نتایج تجربی دارد. دمای عملکرد در مطالعه تجربی ۳۲۳ کلوین، فشار ورودی سمت آند و کاتد ۱ اتمسفر و رطوبت نسبی گازهای واکنشگر در هر دو سمت آند و کاتد ۱۰۰٪ است. همین شرایط عملکردی برای مدل عددی نیز تنظیم شده است. عمده اختلاف مدل حاضر با نتایج تجربی، مربوط به چگالی جریان‌های بالا می‌باشد. در چگالی جریان‌های بالا، میزان آب مایع بسیار اهمیت پیدا می‌کند که باعث شناوری لایه پخش گاز شده و انتقال گازهای واکنشگر به لایه کاتالیست را مختل می‌کند. در اثر پدیده شناوری عملکرد پیل به شدت کاهش می‌یابد. با توجه به فرض آخر در بخش فرضیات مسئله، در این مدل‌سازی پیل تک فاز در نظر گرفته شده و تأثیر آب مایع بر عملکرد پیل نادیده گرفته شده است.



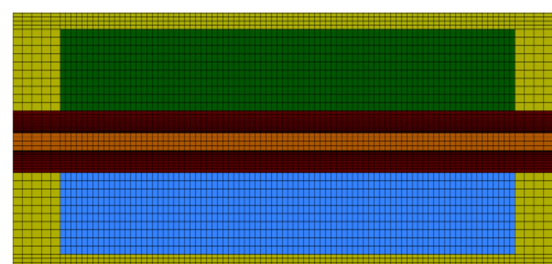
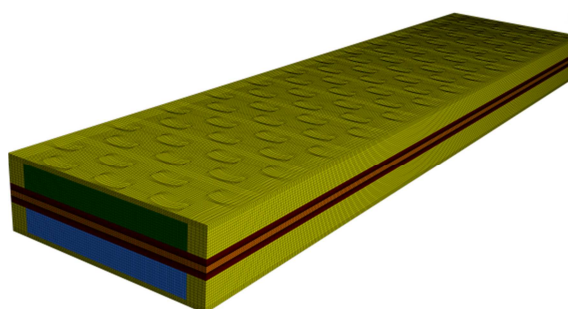
شکل ۶- منحنی قطبش تجربی [۲۴] و حل عددی مطالعه حاضر

مقداری که برای گام زمانی وارد می‌شود به عنوان مقدار اولیه اندازه گام زمانی محسوب می‌شود و با شروع محاسبات، اندازه گام زمانی برابر اندازه گام زمانی جاری خواهد بود. در روش گام زمانی تطبیق، نرم‌افزار به صورت خودکار اندازه گام زمانی را بر پایه خطای قطع جملات مرتبه بالاتر معادلات تیلور محاسبه می‌کند. اگر خطای برشی کوچک‌تر از اندازه تعیین شده باشد، گام زمانی بزرگ‌تر خواهد شد و اگر خطای قطع بزرگ‌تر باشد، اندازه گام زمانی کاهش خواهد یافت. برای تخمین خطای برشی از الگوریتم پیش‌بینی کننده- تصحیح کننده استفاده می‌شود. از الگوریتم پیزو برای شبیه‌سازی‌های ناپایا استفاده می‌شود. این الگوریتم از دو حلقه همزمان فشار - سرعت استفاده می‌کند. اگر چه معادلات حاکم غیر خطی و همبسته شده‌اند؛ ولی حلقه حل برای رسیدن به همگرایی باید به صورت متوالی باشد. جدول ۴ پارامترهای گام زمانی حل را نشان می‌دهد.

جدول ۴- پارامترهای گام زمانی حل عددی [۲۲ و ۲۳]

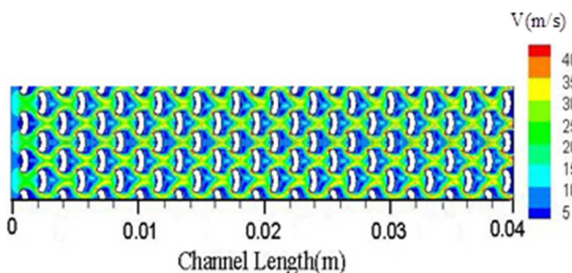
پارامترها	مقادیر (ثانیه)
گام زمانی اولیه	0.0005
خطای برشی	0.01
حداقل گام زمانی جاری	10^{-6}
حداکثر گام زمانی جاری	10
زمان پایان	10000
حداقل ضریب تغییر گام	0.5
حداکثر ضریب تغییر گام	5

به منظور شبکه‌بندی مدل و برای بهبود نتیجه حل معادلات، کاهش خطای برشی و کاهش هزینه محاسباتی، یک مدل متقارن از مساله در نظر گرفته شده است و در نواحی کاتالیست‌ها، غشا لایه پخش گاز، ابتدا و انتهای کانال‌ها و نواحی نزدیک پین‌ها شبکه ریزتر شده است. این شبکه‌بندی در شکل ۴ نشان داده شده است.



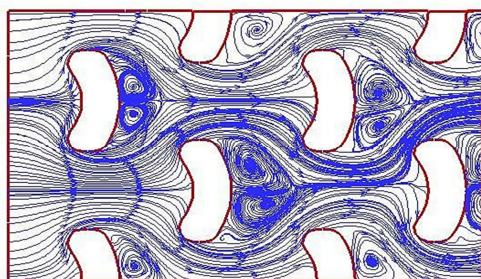
شکل ۴- مدل شبکه‌بندی شده پیل سوختی به صورت سه بعدی و نما از جلو

متر بر ثانیه (۵-۴۰ متر بر ثانیه) به دلیل نفوذ گازهای واکنش گر در طول کانال به لایه پخش گاز می‌باشد. در حالت کلی، هدف از وجود پین‌ها در میدان جریان بالا بردن سرعت نفوذ می‌باشد.



شکل ۹- کانتور سرعت در صفحه‌ای واقع در کانال کاتد در لحظه پایداری حل

در شکل ۱۰ خطوط جریان در مقطعی از کانال کاتد نشان داده شده است. جریان بعد از برخورد به پین‌ها مجبور به عبور از دو طرف آن‌ها شده و نواحی ماریج گونه‌ای را تشکیل می‌دهد. این امر باعث افزایش نفوذ گاز به داخل لایه پخش گاز و لایه کاتالیست کاتد می‌گردد. اکسیژن بیشتر در لایه پخش گاز باعث شده نرخ واکنش‌های شیمیایی افزایش یابد و دانسیته جریان (طبق رابطه ۱۷) افزایش یابد. آنچه که در این نمودار قابل توجه است وجود دو گردابه در پشت پین‌ها می‌باشد که به علت ایجاد ناحیه کم فشار پشت پین‌ها می‌باشد و باید در طراحی‌ها تا حد ممکن این گردابه‌ها با ایجاد پین و افزایش فشار از بین بروند.

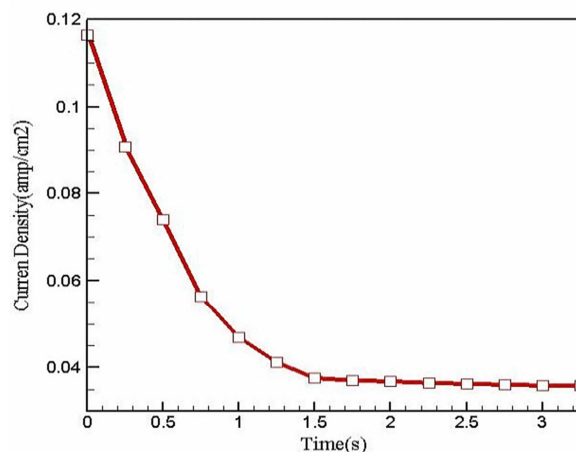


شکل ۱۰- خطوط جریان در مقطعی از کانال کاتد

در شکل ۱۱، کانتور توزیع غلظت مولی اکسیژن در مجموعه الکترود - غشا و کانال سمت کاتد برای سه زمان مختلف (۱ ثانیه، ۲ ثانیه و لحظه پایداری) نشان داده شده است.

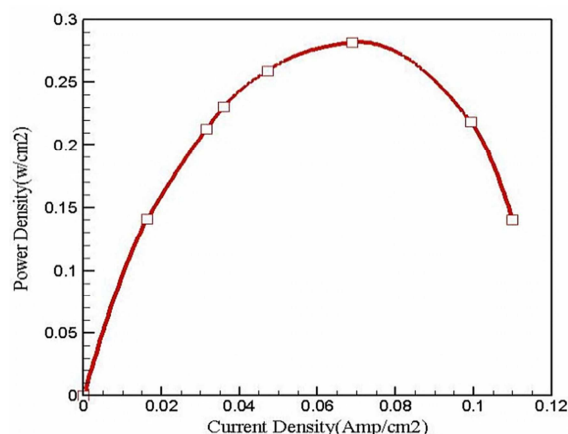
در هر یک از سه کانتور، به علت مصرف اکسیژن، غلظت آن در طول کانال کاهش می‌یابد. در کانتور الف (مربوط به زمان ۱ ثانیه) مقادیر غلظت اکسیژن از ۰/۰۴۲ کیلو مول بر متر مکعب به ۰/۰۳۶۵ کیلو مول بر متر مکعب در انتهای کانال می‌رسد. اما از یک کانتور به کانتور دیگر و با افزایش زمان، مقادیر غلظت مولی اکسیژن افزایش می‌یابد. این موضوع مربوط به ماهیت گذرای حل و افزایش دبی در هر لحظه از زمان می‌باشد. در شکل ۱۱ الف) به دلیل فرصت کم برای رسیدن اکسیژن به سرتاسر کانال کاتد و لایه پخش گاز، اکسیژن رسانی به صورت مناسب انجام نگرفته است؛ لذا به نسبت سایر لحظات از کمترین مقادیر غلظت برخوردار است؛ به طوری که در ورودی کانال

در شکل ۷، تغییرات چگالی جریان الکتریکی بر حسب زمان نشان داده شده است. به علت مصرف اکسیژن و انجام واکنش‌های الکتروشیمیایی در طول کانال، چگالی جریان الکتریکی نسبت به زمان روندی کاهشی دارد. مدت زمان پایداری پیل سوختی در حدود ۳/۵ ثانیه می‌باشد که این موضوع نشان می‌دهد از زمان راه‌اندازی پیل تا زمان پایداری آن، زمان بسیار کوچک است. این مدت زمان با توجه به طول کانال و ماهیت گازی واکنش‌دهنده‌ها قابل توجیه می‌باشد.



شکل ۷- چگالی جریان الکتریکی نسبت به زمان

برای بررسی بهتر عملکرد مدل، منحنی چگالی توان در شکل ۸ ارائه شده است. حداکثر تولید توان برای این مدل در ولتاژ حدود ۰/۴۷ ولت می‌باشد که در محدوده تلفات اهمی می‌باشد؛ بنابراین لازم نیست ارزیابی برای ولتاژ پایین‌تر صورت گیرد؛ زیرا عملکرد توانی کل پیل اهمیت دارد. با توجه به حصول بالاترین توان در این ولتاژ، سایر پارامترهای عملکردی پیل سوختی نیز در همین ولتاژ اخذ شده است.

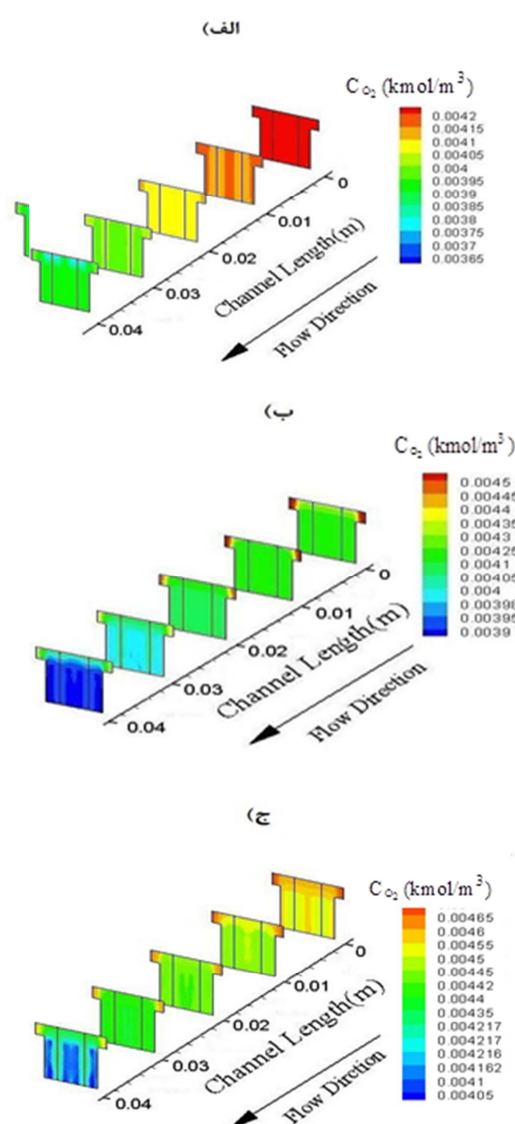


شکل ۸- چگالی توان الکتریکی پیل سوختی

کانتور سرعت در لحظه پایداری پیل برای میدان جریان پینی در شکل ۹ نشان داده شده است. به علت نفوذ گازهای واکنش گر به لایه پخش گاز و مصرف آن در طول کانال و در نتیجه تشکیل واکنش‌های شیمیایی از میزان دبی ورودی کاسته می‌شود و در نتیجه سرعت گازهای واکنش‌دهنده کم می‌شود. بیشینه مقدار سرعت در این کانتور ۴۰ متر بر ثانیه است. میزان کاهش سرعت در طول کانال کاتد ۳۵

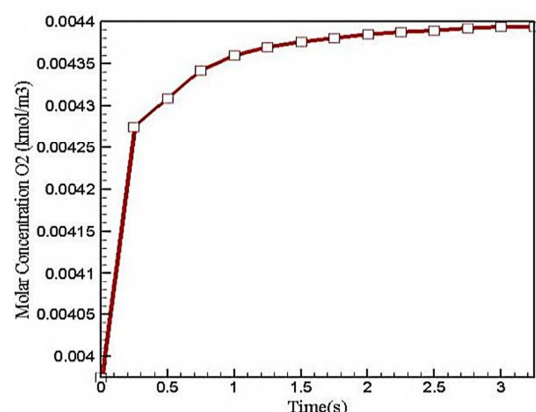
(صفحه اول) بیشینه مقدار خود یعنی 0.0042 کیلو مول بر متر مکعب را داراست و هر چه به صفحات خروجی نزدیک می‌شویم با توجه به نفوذ اکسیژن به لایه پخش گاز از غلظت اکسیژن در مجموعه الکتروود - غشاء کاسته می‌شود.

با گذشت زمان و با توجه به افزایش میزان دبی ورودی در هر لحظه، اکسیژن فرصت کافی برای رسیدن به انتهای کانال را دارد و بنابراین نسبت به لحظات گذشته مقادیر بیشتری از غلظت را داریم. در لحظه پایداری حل (کانتور ج)، صفحات مورد نظر از بیشترین مقادیر غلظت نسبت به سایر شکل‌ها برخوردار است؛ به طوری که در نزدیکی صفحه ورودی بیشینه مقدار غلظت مولی اکسیژن 0.0047 کیلو مول بر متر مکعب می‌باشد که این میزان بیشترین مقدار در میان سایر لحظات است. در بقیه نواحی نیز در این زمان، غلظت اکسیژن نسبت به زمان‌های دیگر بالاتر است.



شکل ۱۱- توزیع غلظت مولی اکسیژن در مجموعه الکتروود - غشاء و کانال کاتد پیل در سه زمان مختلف (الف) ۱ ثانیه (ب) ۲ ثانیه و (ج) لحظه پایداری

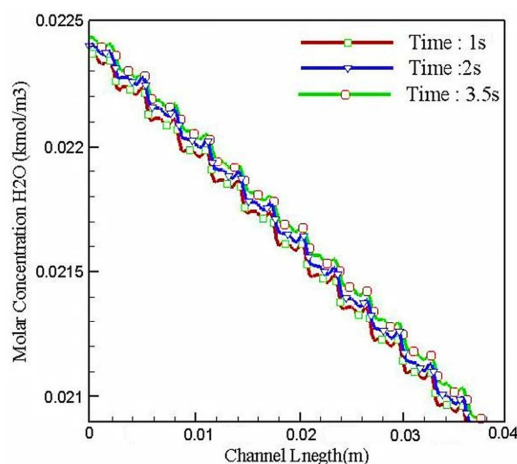
نمودار غلظت مولی اکسیژن در لایه کاتالیست کاتد نسبت به زمان در شکل ۱۲ نشان داده شده است. در حدود $3/5$ ثانیه طول می‌کشد تا این پارامتر به شرایط پایا برسد. همان طور که ملاحظه می‌شود در لحظه صفر، هیچ دبی وارد کانال نشده و غلظت اکسیژن صفر است؛ اما به مرور زمان این مقدار به 0.0044 کیلو مول بر متر مکعب می‌رسد. بعد از راه‌اندازی پیل سوختی و در لحظه ابتدایی با توجه به ورود ناگهانی گازهای واکنش‌دهنده و افزایش لحظه به لحظه دبی، مصرف اکسیژن کمتر از میزان ورود گازهای واکنش‌دهنده به پیل سوختی بوده و بنابراین غلظت اکسیژن با شیب تندی رو به افزایش است. با گذشت زمان با توجه به نفوذ اکسیژن به لایه پخش گاز و مصرف اکسیژن و تشکیل واکنش‌های کاتدی این شیب آهسته-تر می‌شود. تا اینکه بعد از گذشت حدود $3/5$ ثانیه غلظت اکسیژن درون لایه کاتالیست ثابت شده و به حالت پایدار می‌رسد که این موضوع به دلیل محدود بودن میزان واکنش‌های انجام شده درون پیل سوختی و محدودیت لایه کاتالیست برای انجام واکنش برمی‌گردد به طوری که بیشتر از این حد، امکان مصرف اکسیژن وجود ندارد و غلظت اکسیژن ثابت می‌گردد.



شکل ۱۲- تغییرات غلظت اکسیژن در لایه کاتالیست کاتد نسبت به زمان

در شکل ۱۳ منحنی غلظت اکسیژن در سمت کاتد در فصل مشترک لایه پخش گاز / لایه کاتالیست برای میدان جریان پینی در سه زمان مختلف نشان داده شده است. در هر سه زمان، در ابتدای کانال، غلظت اکسیژن بیشترین مقدار را دارد و به دلیل مصرف اکسیژن در طول کانال، این مقدار کاهش می‌یابد. ضمن اینکه آرایش پین‌ها در کانال کاتد باعث نوسانی شدن نمودار غلظت اکسیژن در طول کانال می‌شود. در زمان اول (۱ ثانیه) در ورودی کانال مقدار غلظت اکسیژن در حدود 0.00422 کیلو مول بر متر مکعب می‌باشد؛ اما به محض برخورد جریان با اولین ردیف پین، به دلیل کاهش سرعت جریان و افزایش میزان نفوذ، غلظت اکسیژن افزایش ناگهانی دارد. هر چه نقاط قله در نمودار غلظت اکسیژن به هم نزدیک‌تر شود، به علت افزایش غلظت اکسیژن، پیل عملکرد بهتری دارد. ضمن اینکه به هم نزدیک شدن قله‌ها به معنی یکنواخت‌تر شدن توزیع غلظت اکسیژن نیز می‌باشد و در نتیجه توزیع یکنواخت‌تر چگالی جریان را به دنبال دارد. به محض عبور جریان از دو طرف پین و در پشت پین به علت تشکیل گردابه و ناحیه کم فشار پشت آن، غلظت

می‌شود. هر چند این افزایش غلظت بخار آب نسبت به زمان بسیار اندک بوده و نمودارها به هم نزدیک می‌باشند.



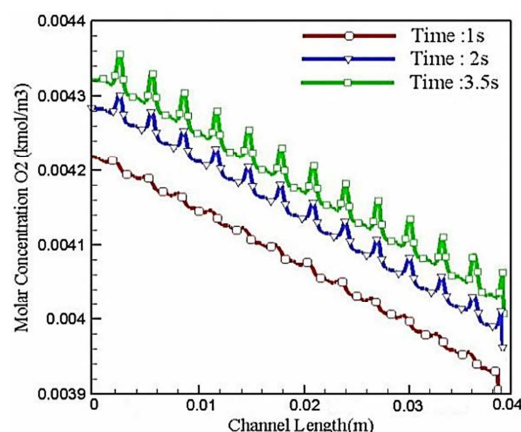
شکل ۱۴- غلظت بخار آب در فصل مشترک لایه پخش گاز / کاتالیست کاتد در سه زمان مختلف

۴- جمع بندی

در این مطالعه، یک مدل سه بعدی و تک فاز، جهت بررسی رفتار گذرای پیل در کانال کاتد و واکنش‌های الکتروشیمیایی درون آن ارائه شده است و نتایج مربوط به پارامترهای اساسی و عملکردی پیل سوختی همچون توزیع سرعت و خطوط جریان، چگالی جریان الکتریکی، توزیع کسر گونه‌های شیمیایی و فشار ارائه شده است. برای اعتبارسنجی حل از نتایج آزمایشگاهی نمودار قطبش استفاده شده است. نتایج نشان می‌دهند:

- در طول مدت زمان پایداری، چگالی جریان الکتریکی نسبت به زمان در حدود 0.0795 آمپر بر سانتی متر مربع افت می‌کند.
- در طول مدت زمان پایداری، حداکثر تولید توان در محدوده تلفات اهمی و برای ولتاژ 0.47 ولت در حدود 0.27 وات بر سانتی متر مربع است.
- غلظت اکسیژن در لایه کاتالیست کاتد نسبت به زمان سیر صعودی دارد که بیشینه مقدار آن تقریباً 0.044 کیلو مول بر متر مکعب می‌باشد که در حدود $3/5$ ثانیه اتفاق می‌افتد.
- بیشترین مقدار توزیع واکنش‌دهنده‌ها در مجموعه الکترود - غشاء و کانال کاتد پیل سوختی در زمان پایداری حل و در ورودی کانال (صفحه اول) به میزان 0.047 کیلو مول بر متر مکعب می‌باشد.
- بررسی کانتور سرعت مربوط به کانال کاتد نشان می‌دهد که به علت کاهش میزان دبی ورودی، سرعت گازهای واکنش‌دهنده نیز کم می‌شود. میزان کاهش سرعت در طول کانال کاتد 35 متر بر ثانیه ($5 - 40$ متر بر ثانیه) می‌باشد که این موضوع، مطلبی خوشایند در جهت بالا بردن سرعت نفوذ و تشکیل بیشتر واکنش-ها می‌باشد.
- در حالت کلی اهمیت استفاده از کانال با الگوی پینی به منظور افزایش نفوذ اکسیژن در لایه پخش گاز و در نتیجه بالا بردن دانسیته جریان بالا است.

اکسیژن اندکی کاهش می‌یابد. اما با گذشت زمان و با توجه به افزایش میزان دبی ورودی در هر لحظه، نسبت به لحظات گذشته افزایش می‌یابد. به عنوان نمونه در نمودار مربوط به زمان 2 ثانیه، مقدار غلظت اکسیژن در ورودی کانال در حدود 0.0428 است که با افزایشی به میزان 0.0006 کیلو مول بر متر مکعب نسبت به زمان 1 ثانیه مواجه شده است. این افزایش نسبی تا انتهای کانال وجود دارد. بیشینه مقدار غلظت اکسیژن مربوط به زمان $3/5$ ثانیه است که در ورودی کانال مقدار این پارامتر به حدود 0.0436 کیلو مول بر متر مکعب نیز می‌رسد. علاوه بر افزایش غلظت اکسیژن در طول زمان، میزان نوسانی بودن آن نیز کم می‌شود.



شکل ۱۳- غلظت اکسیژن سمت کاتد در فصل مشترک لایه پخش گاز / کاتالیست برای میدان جریان پینی در سه زمان مختلف

در شکل ۱۴ تغییرات غلظت بخار آب تولیدی در سمت کاتد در فصل مشترک لایه پخش گاز / کاتالیست در طول کانال در سه زمان مختلف نشان داده شده است. غلظت بخار آب به طور پیوسته در طول کانال در هر سه زمان کاهش می‌یابد؛ زیرا هر چه به انتهای کانال نزدیک می‌شویم با توجه به مصرف اکسیژن و نفوذ بیشتر آن به لایه پخش گاز، از مقدار غلظت اکسیژن کاسته شده و در نتیجه هنگام تشکیل واکنش‌های کاتدی بخار آب کمتری تولید می‌شود.

در زمان 1 ثانیه، غلظت بخار آب از مقدار 0.0224 کیلو مول بر متر مکعب در ابتدای کانال به میزان 0.015 کیلو مول بر متر مکعب کاهش یافته و به مقداری در حدود 0.0209 کیلو مول بر متر مکعب می‌رسد. همچنین وجود موانع پینی شکل در مسیر جریان باعث موجی شدن نمودار می‌گردد؛ به طوری که در ابتدای مسیر، برخورد جریان گاز به پین‌های موجود، سرعت جریان کاهش یافته و با افزایش میزان نفوذ، غلظت اکسیژن نیز افزایش می‌یابد که این عامل باعث افزایش غلظت بخار آب در این نواحی می‌گردد. اما بعد از عبور جریان از دو طرف پین، به دلیل وجود یک ناحیه کم فشار پشت پین، از غلظت اکسیژن کاسته شده که به تبع غلظت اکسیژن، غلظت بخار آب نیز کاهش می‌یابد.

با گذشت زمان با توجه به افزایش میزان غلظت اکسیژن در طول کانال، غلظت بخار آب نیز افزایش می‌یابد که علت آن به وضوح به دلیل دسترسی بیشتر لایه کاتالیست به اکسیژن است که باعث افزایش واکنش‌ها و در نهایت افزایش محصول بخار آب تولیدی

۵- علائم، نشانه‌ها

علائم انگلیسی

a	فعالیت آب در غشا (m^2/m^3)
C^i	غلظت جزء i (mol/m^3)
C_p	گرمای ویژه ($\text{J}/\text{kg.K}$)
D_k	پخشندگی جزء k (m^2/S)
F	ثابت فارادی (C/mol)
H	انتالپی (J)
I	چگالی جریان الکتریکی (A/m^2)
J	چگالی جریان انتقالی (A/m^3)
K	نفوذپذیری (m^2)
k_{eff}	رسانایی موثر ($\text{W}/\text{m.K}$)
k_s	رسانایی فاز جامد ($\text{W}/\text{m.K}$)
P	فشار (Pa)
R	ثابت عمومی گازها ($8.314\text{J}/\text{kg mol.K}$)
S	جمله چشمه در معادلات انتقال
T	دما (K)
u	سرعت (m/s)
X_k	کسر مولی جز k

علائم یونانی

ε	ضریب تخلخل
μ	لزجت (Pa.s)
η	اضافه پتانسیل (V)
ρ	چگالی (kg/m^3)
Φ_e	پتانسیل الکتریکی در غشا (V)
Φ_s	پتانسیل الکتریکی در فاز جامد (V)
λ	ثابت فعالیت در غشا
σ_k^{eff}	ضریب رسانش یونی غشا (S/m)

۶- مراجع

34, pp. 125-128, 2004.

[7] Wang Y., and Wang C.Y., Dynamics of polymer electrolyte fuel cells undergoing load changes, *Electrochimical Acta*, Vol. 51, pp. 3924-3933, 2006.

[8] Headley A. J., , Chen D., .Critical control volume sizing for improved transient thermal modeling of PEM fuel cells, *Int. J. Hydrogen Energy*, Vol. 40, No. 24, pp. 7762-7768, 2015.

[9] Chaudhary S., Sachan V. K, Bhattacharya, P. K., Two dimensional modelling of water uptake in proton exchange membrane fuel cell, *Int. J. Hydrogen Energy*, Vol. 39, No. , pp. 17802-17818, 2014

[10] Verma A., Pitchumani R., Influence of transient operating parameters on the mechanical behavior of fuel cells, *Int.J. Hydrogen Energy*, Vol. 40, No. 26, pp. 8442-8453, 2015.

[11] Bikash M., and Junxiao W., Study of the effects of various parameters on the transient current density at polymer membrane fuel cell start-up, *J. Power Sources*, Vol. 34, pp. 2296-2307, 2009.

[12] Obayopo S., Bello-Ochende T., and Meyer J., Modeling and optimization of reactant gas transport in a PEM fuel cell with a transverse pin fin insert in channel flow, *Int. J. Hydrogen Energy*, Vol.37, pp.10286-10298, 2012.

[13] Imdat T., and Merthan B., Numerical study of assembly pressure effect on the performance of proton exchange membrane fuel cell, *Int. J. Hydrogen Energy*, Vol. 35, pp. 2134-2140, 2010.

[14] Suzuki A., Hattori T., Miura R., Tsuboi H., Ozomu N., and Takaba H., "Porosity and Pt content in the catalyst layer of PEMFC: effects on diffusion and polarization characteristics, *J. Electrochem. Soc*, Vol. 5, pp. 1948-1961, 2010.

[15] Springer T., Zawodzinski T., and Gottesfeld S., Electrode materials and process for energy conversion and storage, *J. Electrochem. Soc*, Vol. 13, pp. 1-14, 1997.

[16] Dunn Martin L., and Minoru T., The effective thermal conductivity of composites with coated reinforcement and the application to imperfect interfaces, *J. Applied Physics*, Vol. 73, pp. 1711-1722, 1993.

[17] Wu H. W., A review of recent development: Transport and performance modeling of PEM fuel cells, *Applied Energy*, Vol. 165, pp. 81-106, 2016.

[18] Afshari E., Jazayeri S.A., and Mollayi Barzi Y., Effect of water phase change on temperature distribution in proton exchange membrane fuel cells, *Heat Mass Transfer*, Vol. 46, pp. 1295-1305, 2101.

[19] Carton J., and Olabi A., Three-dimensional proton exchange membrane fuel cell model: Comparison of double channel and open pore cellular foam flow plates, *Energy*, (In Press) 2016.

[20] Xing L., Liu X., Alaje T., Kumar R., Mamlouk, M., and Scott K., A two-phase flow and non-isothermal agglomerate model for a proton exchange membrane (PEM) fuel cell, *Energy*, Vol. 73, pp. 618-34, 2014.

[21] Afshari E., and Houreh N.B., Numerical predictions of performance of the proton exchange membrane fuel cell with baffle(s)-blocked flow field designs, *Int. J. Modern Physics B*, Vol. 28, No. 16, 1450097-1450113, 2014.

[22] Perng S.W., Wu H.W., and Jue T.C., Cheng, K.C., Numerical predictions of a PEM fuel cell performance enhancement by a rectangular cylinder installed transversely in the flow channel, *Applied Energy*, Vol. 86, pp. 1541-1554, 2009.

[23] Kandlikar S. G., See E. J., and Banerjee R., Modeling Two-Phase Pressure Drop along PEM Fuel Cell Reactant Channels, *J. Electrochem. Soc*. vol. 162, No. 7, F772-F782, 2015.

[24] Wang X., Zhang X., Yan W., and Lee D., A. Su , Determination of the optimal active area for proton exchange membrane fuel cells with parallel, interdigitated or serpentine designs, *Int. J. Hydrogen Energy*, Vol. 34, pp. 3823-3832, 2009.

[1] Van Bussel H., Dynamic model of solid polymer fuel cell water management, *J. Power Sources*, Vol. 71, pp. 218-222, 1998.

[2] Um S., and Wang C.Y., Computational fluid dynamics modeling of proton exchange membrane fuel cells, *J. Electrochem. Soc*, vol. 147, pp. 4485-4493, 2000.

[3] Wang Y., and Wang C.Y., Transient analysis of polymer electrolyte fuel cell, *J. Electrochem. Soc* ,Vol. 50, pp. 1307-1315, 2005.

[4] Meng H., Numerical investigation of transient responses of PEM fuel cell using a two-phase non-isothermal mixed-domain model, *J. Power .Sources*, Vol. 171, pp. 738-746, 2007.

[5] Serincan M.F., and Yesilyurt S., Transient Analysis of Proton Electrolyte Membrane Fuel Cell (PEMFC) at start-up and failure, *Willy. Interscience*, Vol. 2, pp. 118-127, 2007.

[6] Chen F., Ying Zhi W., Hsin C., Wei-Mon Y., Soong Y., Convenient two-dimensional model for design of fuel channels for proton exchange membrane fuel cells, *J. Power Sources*, Vol.