



شبیه سازی پیل سوختی غشاء پلیمری با کانال جریان ماریپیچی و مطالعه اثر دما بر عملکرد پیل و مقایسه منحنی قطبیت برای سه نوع کانال از میدان جریان

آرمان عبدلی^{۱*}، مجتبی دهقان منشادی^۲

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، رشته تبدیل انرژی، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، اصفهان

۲- دانشیار، مجتمع مکانیک و هوافضا، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، اصفهان

* armanabdoli72@yahoo.com

ارسال: مرداد ۹۶ پذیرش: مهر ماه ۹۶

چکیده

در این تحقیق به مدل سازی سه بعدی پیل سوختی غشاء پلیمری با کانال ماریپیچ پرداخته شده است، منحنی عملکرد پیل سوختی در ولتاژهای کاری مختلف به دست آورده شده است و به بررسی چگونگی توزیع گازهای واکنش دهنده پیل سوختی، مکان ایجاد چگالی جریان، نحوه توزیع دما و فشار در اجزای مختلف پیل سوختی پرداخته شده است، در ادامه از آنجا که وسیله پیل سوختی نیازمند به داشتن شرایط ایده آل جهت افزایش عمر و کارایی خود است، به مطالعه اثر دما بر خواص و پارامترهای فیزیکی آن پرداخته شده است و بهترین محدوده دمای برای کارکرد پیل های سوختی به دست آمده است و در نهایت با شبیه سازی، با افزایش تعداد کانال پیل سوختی از تک کانال ماریپیچ به ۱۶ کانال صورت پذیرفته و جهت مقایسه بهتر دو شکل کانال موازی و درهم تنیده با همین تعداد کانال نیز شبیه سازی شده است و منحنی عملکرد به دست آمده کارایی بهتر شکل کانال ماریپیچ را نسبت به موازی نشان داده است.

کلمات کلیدی: پیل سوختی غشاء پلیمری، کانال جریان ماریپیچ، منحنی قطبیت، کانال های موازی و درهم تنیده شده، چگالی توان پیل سوختی

۱. مقدمه

میزان کربن دی اکسید موجود در هوا امروزه به علت وجود منابع آلوده کننده فراوان از جمله وسایل حمل و نقل، مراکز صنعتی و .. بسیار بالاتر از حد مجاز بوده و عامل بسیار مهمی در تخریب محیط زیست، لایه ازون و به خطر افتادن سلامتی انسان می باشد. از طرفی کمبود منابع سوخت های فسیلی و مشکل تمام شدن آن ها نیازمند جایگزینی مناسب جهت تأمین توان مورد نیاز است. از میان کاندید های متعدد جهت تأمین توان، پیل سوختی وسیله ای است که قادر به تأمین برق و توان مورد نیاز بدون ایجاد هرگونه آلودگی برای محیط همراه با استفاده از منابع تجدید پذیر برای ایجاد توان خود می باشد. پیل های سوختی یک وسیله تبدیل مستقیم انرژی است که انرژی شیمیایی سوخت را به وسیله واکنش های الکتروشیمیایی به برق و الکتریسیته تبدیل می نماید. پیل سوختی از یک الکترولیت که بین دو الکترود آند و کاتد قرار گرفته است، شکل گرفته شده است. با استفاده از یک کاتالیزور در سطح الکترود آند و کاتد و فعال سازی واکنش دهنده های پیل سوختی، واکنش

های الکتروشیمیایی مد نظر پیل در سمت آند و کاتد اتفاق می‌افتد. دسته بندی های مختلف پیل سوختی از جمله، پیل سوختی غشاء پلیمری، پیل های قلیایی، پیل سوختی اسید فسفریک، اکسید جامد و پیل سوختی کربن مذاب و پیل سوختی متانولی با طراحی های مختلف برای هر مدل، شرایط کاری گوناگون و واکنش های الکتروشیمیایی متفاوت و جنس الکترولیت مختلف موجود است. یکی از متمایزترین ویژگی های پیل سوختی وجود ساختار الکتروشیمیایی پیل است و برخلاف موتورهای احتراقی که مولد حرارت می‌باشند، محدودیت های چرخه کارنو را ندارند و می‌توانند به عنوان جایگزین مناسبی برای موتورهای احتراق داخلی و توربین های بخار و گازی مطرح گردند. نحوه آرایش و طراحی پیل سوختی یکی از مسائل مهم در پیل سوختی است که توسط محققان مورد بررسی قرار گرفته شده است.

یکی از اولین و بیشترین مدل های ذکر شده برای پیل سوختی پلیمری، مدل برناردی-وربروگ می باشد [۱]. این یک مدل تک بعدی است که الکتروود نفوذپذیر گازی را چسبیده به الکترولیت پلیمری در نظر گرفته و انتقال اجزای خنثی و باردار از میان این لایه انجام می گیرد. خروجی شامل مجموعه ای از معادلات دیفرانسیل است که حل آن‌ها منجر به تعیین نمودار غلظت اجزای افت فشار و پتانسیل و شناسایی سهم عوامل متفاوت در افت پتانسیل خواهد شد.

وایت^۱ و همکاران در سال ۱۹۹۳ [۲] مدلی دوبعدی و پایا برای پیل سوختی توسعه دادند که شامل درگ الکترواسمزی، پخش آب و انتقال حرارت از فاز جامد به فاز گازی و انتقال حرارت جانبی شامل تبخیر و چگالش بود و به مطالعه کارایی طراحی های گوناگون رطوبت سنجی پیل پرداختند.

ژو و ونگ در سال ۲۰۰۵ به مدلسازی سه بعدی پیل سوختی پلیمری با سطح فعال ۵۰ سانتی متر مربع و کانال ماریپیچی پرداختند [۳]. فرضیات به کار رفته در این مدل، گاز تراکم ناپذیر، خواص ایزوتروپیک، صرف نظر از افت مقاومت الکتریکی در نواحی جامد و متخلخل پیل سوختی، فرض تک فاز ماندن آب در معادلات و استفاده از ضریب تصحیح برای بیان تخلخل مؤثر در اجزا است. آن‌ها در این مدلسازی نتیجه گرفتند که عملکرد پیل با استفاده از استوکیومتری کاتد برابر سه مناسب است و در چگالی جریان بالای پیل، در انتهای کاتد مقادیر چگالی جریان موضعی با نتایج آزمایشگاهی هم خوانی مناسبی ندارد.

در خصوص الگوهای میدان جریان ونگ^۲ تحقیقاتی انجام داد [۴] و نشان داد که رطوبت نسبی واکنش دهنده ها و طراحی میدان جریان، تأثیر خیلی زیادی بر عملکرد میدان جریان خواهد گذاشت. در تحقیق صورت گرفته ونگ نشان داد که طراحی میدان جریان با الگوی درهم تنیده عملکرد بهتری نسبت به طراحی موازی دارد. با داشتن رطوبت نسبی ثابت ۱۰۰ درصد برای آند، در ولتاژهای کاری پایین، رطوبت نسبی پایین کاتد، آب گرفتگی کاتد را کم کرده و عملکرد سلول را بهتر می‌نماید، در صورتی که در ولتاژهای کاری بالا، رطوبت نسبی بیشتر برای کاتد، غشاء را هیدراته نگه می‌دارد و منجر به عملکردی بهتر برای پیل سوختی می‌شود.

از آنجایی که صفحات دوقطبی یکی از مهمترین بخش های پیل سوختی می‌باشد، تحقیقات زیادی روی آن صورت گرفته است تا بهترین الگوی میدان جریان برای پیل سوختی مشخص گردد. از جمله متداول ترین الگوهایی که تا به حال معرفی شده است، الگوی میدان جریان موازی، پینی شکل، ماریپیچی، بند انگشتی، میدان جریان برگرفته شده از طبیعت و میدان حلزونی شکل است. مطابق با مطالعات زیاد انجام شده به همراه آزمایش های صورت گرفته، میدان جریان ماریپیچی در بین الگوهای جریان گفته شده بهترین عملکرد را نشان داده است [۵-۶].

جیتش^۳ به مقایسه سه نوع کانال پرداخت. کانال های مورد بررسی به شکل های کانال موازی، ماریپیچ و ماریپیچ مختلط (ماریپیچ - موازی) بوده است [۷]. با بررسی کانال موازی مشاهده کرد که توانایی حذف آب این هندسه پایین است و در کانال ماریپیچ

¹ White

² Wang

³ Jithesh

توانایی خارج کردن آب بیشتر است و از این منظر از کانال موازی بهتر می‌باشد و در نهایت کانال میدان جریان از نوع مارپیچ، موازی از هر دو عملکرد بهتری داشته و خروج آب بهتری را نیز دارد که برای عملکرد بهتر پیل، مناسب تر می‌باشد. در تحقیق انجام شده توسط افشاری و همکاران [۸] به بررسی نتایج مهم به دست آمده مربوط به تأثیر پارامترهای هندسی مختلف کانال‌های جریان بر عملکرد کلی پیل سوختی غشاء پلیمری پرداخته شده است. کانال‌های جریان گاز الگوهای جریان فیزیکی و یا مسیرهای ساخته شده در سطوح صفحات دوقطبی برای توزیع صحیح و هدایت گازهای واکنش دهنده در کانال می‌باشد غیریکنواختی توزیع جریان در میان واحدهای مختلف پیل به شدت بر عملکرد پیل سوختی تأثیر دارد بنابراین برای غلبه بر غیریکنواختی توزیع در دهه اخیر طراحی کانال‌های جریان کارآمدتر در میان جامعه تحقیقاتی مورد توجه می‌باشد مهمترین مساله در مورد عملکرد پیل سوختی توزیع همگن گازهای واکنش دهنده بر سطح نواحی کاتالیست و صفحه دوقطبی می‌باشد.

اطیابی و همکاران [۹] به بررسی یک مدل عددی که درک کاملی از اصول اساسی پدیده های انتقال در پیل سوختی غشاء پلیمری با میدان جریان لانه زنبوری فراهم می‌کند، معرفی شده است. مسئله به صورت مدل سه بعدی و حالت پایا در سیستم مختصات کارتیزین با استفاده از روش تک دامنه ای و روش حجم محدود حل شده است. مدل شامل معادلات دیفرانسیل پارهای همبسته شده غیرخطی بقاء جرم، بقا مومنتوم، بقا اجزا، بار الکتریکی و انرژی همراه با واکنش‌های الکتروشیمیایی است که برای الکترودهای پخش گاز در دو سمت آند و کاتد، لایه های کاتالیست آند و کاتد و ناحیه غشاء معتبر می‌باشد. این مدل دو منظوره مسئله پیل سوختی غشاء پلیمری با میدان جریان لانه زنبوری و پایا، نتایجی هم چون توزیع کسر گونه های جرمی، پتانسیل در نواحی مختلف و منحنی عملکرد پیل سوختی را در بر دارد.

از آنجا که طراحی صفحات دوقطبی و شکل میدان جریان بیشترین تأثیر را بر عملکرد پیل سوختی غشاء پلیمری می‌گذارد، منساف^۱ و همکاران [۱۰] به بررسی عرض کانال و تعداد پیچ ها در یک کانال مارپیچی پرداختند. آن ها همچنین به بررسی جهت جریان و تأثیر آن بر مصرف واکنش دهنده ها پرداختند. به وسیله روش حجم محدود معادلات در مختصات استوانه ای گسسته سازی شده است با افزایش تعداد پیچ های کانال مارپیچ، یکنواختی توزیع واکنش دهنده ها را بهبود می‌بخشد و شکل مارپیچی کانال با ایجاد نیروی گریز از مرکز عملکرد پیل سوختی را بهتر می‌نماید.

در این تحقیق ضمن مدلسازی سه بعدی پیل سوختی به بررسی رفتار فیزیکی پیل سوختی در دماهای کاری مختلف پرداخته شده است، نحوه تغییر خواص فیزیکی پیل سوختی با دماهای مختلف مورد ارزیابی دقیق تری قرار گرفته است و در نهایت مقایسه بین میدان جریان پیل سوختی با سه نوع شکل از کانال انجام شده است.

۲. مدل فیزیکی و عددی پیل های سوختی

پیل سوختی غشاء پلیمری، یک سلول الکتروشیمیایی است که به وسیله گاز هیدروژن تغذیه می‌شود. هیدروژن از سمت آند پیل سوختی وارد شد و اکسید می‌شود و اکسیژن ورودی به کاتد پیل سوختی کاهیده می‌شود. در طی فرآیند اکسید شدن هیدروژن، پروتون آزاد شده که از طریق غشاء تبادل کننده پروتون به سمت کاتد می‌رود در حالیکه الکترون آزاد شده طی اکسید هیدروژن، قادر به عبور از غشاء نبوده و با طی کردن مسیر در مدار خارجی پیل، جریان الکتریکی ایجاد می‌کند [۱۱].

معادلات پیل سوختی به صورت زیر اتفاق می‌افتد:

در سمت آند:

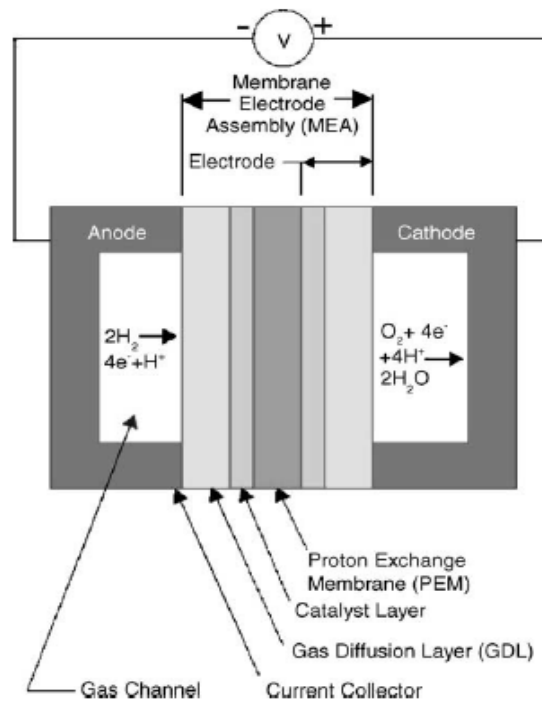


¹ Monsaf

در سمت کاتد:



معادله کلی انجام شده در پیل سوختی به صورت زیر خواهد بود.



شکل ۱- شماتیکی از اجزای داخلی پیل سوختی

با توجه به شکل ۱، قلب پیل سوختی را می‌توان غشاء الکترولیت یا غشاء تبادل کننده یون دانست که در یک مجموعه به عنوان MEA به همراه لایه کاتالیست و ناحیه پخش گاز قرار می‌گیرد. لایه کاتالیست از کاتالیزور مناسب در خود بهره می‌برد که در نزدیکی الکتروود غشاء جامد قرار گرفته است. کاتالیست می‌تواند از جنس ترکیب فلزی همراه با ذرات کاتالیزوری باشد، مانند کربن حاوی ذرات پلاتینیوم، همچنین کاتالیزور از ترکیب یونومری از جنس مشابه غشاء مانند نفیون ایجاد می‌گردد. آخرین جزء مجموعه، زیرلایه ای متخلخل و هادی الکتروسیسته است که به منظور نگه داری و حفاظت مکانیکی از بقیه لایه ها و همچنین توزیع و پخش واکنش دهنده ها از طریق آن به کار می‌رود. این سه جزء به وسیله دو صفحه متقارن محاصره می‌شود که صفحه دوقطبی نام دارد.

۳. فرضیات مدل سازی و معادلات حاکم

مناسب بودن هر مدل، وابسته به فرضیاتی است که بر اساس آن معادله ساخته می‌شود. از این فرضیات برای ساده سازی روابط و مدل ها استفاده می‌شود. برای مشخص کردن محدودیت ها و دقت نتایج ارائه این فرضیات ضروری است. فرضیاتی که در این تحقیق براساس پیچیدگی های زیاد پیل سوختی برای مدل سازی آن استفاده شده است، شامل موارد زیر است:

۱. مسأله به صورت پایا و هم دما مدل سازی شده است.

۲. خواص گازهای واکنش دهنده به صورت گاز ایده آل در نظر گرفته شده است.
۳. جریان واکنش گرها در ورودی پیل به صورت غیر قابل تراکم فرض شده است.
۴. فرض جریان آرام در طول کانال های گاز بر اساس سرعت جریان و گرادیان کوچک فشار استوار است.
۵. غشاء و لایه پخش کننده گاز که دارای محیط متخلخل می باشند دارای خواصی همگن و برابر در تمامی جهات می باشند.
۶. افت پتانسیل اهمیک ناچیز در اجزای صلب و جامد مانند بدنه و صفحات دو قطبی وجود دارد.
۷. آب تولیدی از واکنش های سمت کاتد پیل سوختی به صورت گازی در نظر گرفته شده است و به بیان دیگر مسأله حالت تک فاز حل شده است.

۱.۳ معادله بقای جرم

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho V) = 0 \quad (۴)$$

ترم اول از معادله (۴) برای حالت گذرا بوده و در این مدل سازی به خاطر فرض پایا بودن مسأله در نظر گرفته نمی شود. ρ در معادله بالا دانسیته مخلوط گازی می باشد. V سرعت مخلوط گازی است.

۲.۳ معادله بقای اندازه حرکت

$$\frac{\partial(\rho V)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho V V) = -\nabla p + \nabla \cdot (\mu^{elf} \nabla V) + S_m \quad (۵)$$

μ^{elf} در رابطه (۵) میانگین لزجت سیال است و S_m ترم مرجع اضافه شده به معادله مومنتوم است که نشان دهنده افت فشار داخل نواحی متخلخل بر اثر عبور جریان است و بر اساس نیروی داریسی بیان می شود.

۳.۳ معادله بقای انرژی

در هر قسمت از پیل سوختی معادله انرژی به صورت زیر برقرار است.

$$(\rho c_p)_{eff} (V \cdot \nabla T) = \nabla \cdot (K_{eff} \nabla T) + S_e \quad (۶)$$

C_p ظرفیت گرمایی ویژه مخلوط گازی است، S_e عبارت مرجع انرژی است و هدایت حرارتی K_{eff} و ظرفیت گرمایی مؤثر $C_{p,eff}$ به علت وجود قسمت های متخلخل به شکل زیر است [۱۲].

$$(\rho c_p)_{eff} = (1 - \varepsilon) \rho_s c_{p,s} + \varepsilon \rho c_p \quad (۷)$$

$$k_{eff} = -2k_s + \left[\frac{\varepsilon}{2k_s + k} + \frac{1 - \varepsilon}{3k_s} \right]^{-1} \quad (۸)$$

که ρ_s ، $c_{p,s}$ و k_s به ترتیب، چگالی، ظرفیت گرمایی ویژه و هدایت گرمایی ناحیه یکپارچه هستند.

۴.۳ معادله بقای گونه ها

این معادله بیانگر بقای یک جزء شیمیایی گازی در یک مخلوط گازی است.

$$\frac{\partial(\varepsilon\rho X_i)}{\partial t} + \nabla \cdot (v\varepsilon\rho X_i) = \nabla \cdot (\rho D_i^{eff} \nabla X) + S_{s,i} \quad (9)$$

X_i کسر جرمی اجزا گاز است و ترم مرجع $S_{s,i}$ نیز تولید و مصرف اجزاء را نشان می‌دهد. ترم اول سمت راست معادله بالا بیانگر نفوذ اجزاء است و D_i^{eff} ضریب نفوذ مؤثر در محیط متخلخل است که تابعی از تخلخل ε و انحنا τ است [۱۳].

$$D_{i,eff} = D_i \varepsilon^\tau \quad (10)$$

۵.۳. معادله بقای بار الکتریکی

انتقال جریان الکتریکی در پیل سوختی بر اساس معادله حاکم برای بار الکتریکی که به صورت زیر است، ایجاد می‌شود. برای جریان الکتریکی معادله (۱۱) تعریف می‌شود.

$$\nabla \cdot (K_s^{eff} \nabla \phi_s) = S_{\phi_s} \quad (11)$$

برای جریان یونی منتقل شده از غشاء معادله زیر برقرار است.

$$\nabla \cdot (K_m^{eff} \nabla \phi_m) = S_{\phi_m} \quad (12)$$

K_s^{eff} رسانایی الکتریکی در فاز صلب، K_m^{eff} رسانایی یونی در فاز یونی است. ϕ_m ، پتانسیل فاز الکترولیت، ϕ_s ، پتانسیل فاز جامد و S_{ϕ} عبارت مرجع که برای بیان انتقال حجمی جریان به کار می‌رود. تمام ترم‌های مرجع چشمه و چاه معادلات حاکم بر پیل سوختی در جدول ۱ آورده شده است.

جدول ۱- مقادیر ترم‌های مرجع برای معادلات پیل‌های سوختی [۱۴]

معادله بقا	کانال‌های پیل	لایه پخش گاز	لایه کاتالیست	غشاء مبادله کننده یون
بقای مومنتوم		$S_m = -\frac{\mu}{K} \varepsilon V$	$S_m = -\frac{\mu}{K} \varepsilon V$	
بقای انرژی			$S_e = j \left(\eta + T \frac{dU_0}{dT} \right) + RI^2$	RI^2
بقای گونه‌ها			$S_{si} = -\nabla \cdot \left(\frac{n_d}{F} I \right) - \frac{S_{sij}}{nF}$	$S_{si} = -\nabla \cdot \left(\frac{n_d}{F} I \right)$
بقای بار(الکترون)			$S_{\phi_s} = -j$	
بقای بار(پروتون)			$S_{\phi_m} = j$	

در جدول ۱ چگالی جریان انتقالی با j (آمپر بر مترمکعب) نشان داده شده است.

علاوه بر معادلات حاکم بر پیل سوختی، برای شبیه سازی پیل سوختی نیاز به داشتن خواص فیزیکی و پارامترهای درگیر در واکنش‌های الکتروشیمیایی پیل سوختی می‌باشد که در جداول ۲ و ۳ آورده شده است.

جدول ۲- پارامترهای الکتروشیمیایی پیل های سوختی پلیمری [۱۴]

پارامتر الکتروشیمیایی	سمت کاتد پیل سوختی	سمت آند پیل سوختی
چگالی جریان انتقالی (A/m^3)	$j_c = ai_{0,c} \frac{C_{O_2}}{C_{O_2}^{ref}} \left\{ \exp \left[\frac{-\alpha_c F \eta}{RT} \right] \right\}$	$j_a = ai_{0,an} \frac{C_{H_2}^{0.5}}{C_{H_2}^{ref}} \left\{ \frac{\alpha_a + \alpha_c}{RT} F \eta \right\}$
ولتاژ مدار باز (V)	$U_0 = 1.23 - 0.9 \times 10^{-3} (T - 298.15)$	$U_0 = 0$
ضریب انتقال بار	$\alpha_c = 1$	$\alpha_a + \alpha_c = 2$
اضافه پتانسیل سطح (V)	$\eta = \phi_s - \phi_m - U_0 \quad \phi_s = V_{cell}$	$\eta = \phi_s - \phi_m - U_0 \quad \phi_s = 0$

در جدول ۲ F ثابت فارادی است که مقدار آن ۹۶۴۸۵ کولمب بر مول است، α ضریب انتقال بار آند و کاتد است، i_0 چگالی تبدلی جریان بر حسب آمپر بر مترمربع است و اضافه ولتاژ سطحی نیز با η نمایش داده شده است. خواص فیزیکی پیل های سوختی که در مورد هدایت یونی غشاء، محتوای آب داخل آن و خواصی که مربوط به انتقال آب در غشاء است در جدول زیر آورده شده است.

جدول ۳- خواص فیزیکی غشاء تبادل کننده یون [۱۴]

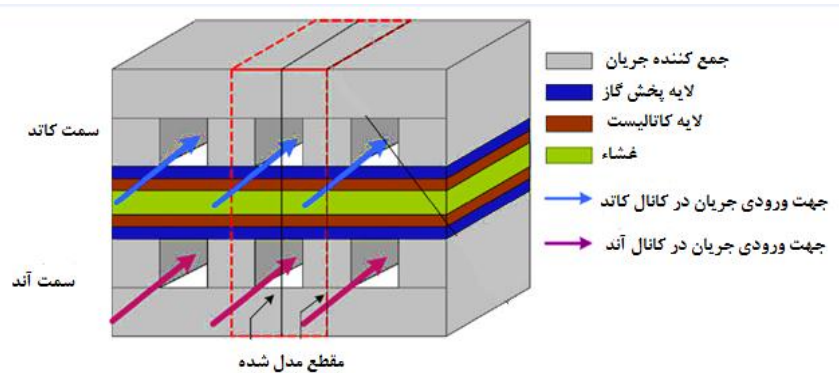
پارامتر خواص فیزیکی	روابط مربوط
فعالیت بخار آب	$a = P/P_{sat}$
رسانایی پروتونی غشاء ($\frac{\Omega}{m}$)	$K = (0.005139\lambda - 0.00326) \exp \left[1268 \left(\frac{1}{303} - \frac{1}{T} \right) \right]$
محتوای آب غشاء	$\lambda = \begin{cases} 0.043 + 17.18a - 39.85a^2 + 36a^3 & 0 < \alpha \leq 1 \\ 14 + 1.4(\alpha - 1) & 1 < \alpha \leq 3 \\ 16.8 & \alpha > 3 \end{cases}$
ضریب درگ الکترواسمزی (انتقال آب از آند به کاتد)	$n_d = \begin{cases} 1 & \lambda \leq 14 \\ \frac{1.5}{8(\lambda - 14)} + 1 & otherwise \end{cases}$

در جدول ۳ n_d ضریب کشش الکترواسمزی است، a فعالیت بخار آب است، λ محتوای آب غشاء است و K رسانایی پروتونی غشاء وابسته به دما و محتوای آب آن است.

۴. دامنه محاسباتی و شرایط مرزی مسأله

برای حل معادلات حاکم بر دامنه محاسباتی، دو روش قابل اجرا است. یک روش به این صورت است که دامنه حل به چندین زیر دامنه تقسیم گردد و سپس تمامی معادلات در هر یک از زیر دامنه ها حل شود. برای اجرای مناسب این شیوه از حل باید شرایط مرزی مناسبی بین هر یک از زیر دامنه ها اعمال شود. به این شرایط مرزی، شرایط مرزی داخلی گفته می شود. از آنجایی که اکثر شرایط مرزی داخلی نامشخص می باشند، استفاده از روش حل چندین زیر دامنه باعث پیچیده شدن حل و گرفتن نتایج نه چندان دقیق می گردد. از این رو به خاطر اینکه در شیوه حل تک ناحیه ای نیازمند تعریف شرایط مرزی داخلی نیست استفاده از آن برای حل سیستم پیل سوختی مناسب می باشد. در روش حل تک ناحیه ای، تمامی معادلات به صورت همزمان به کل دامنه پیل سوختی مطابق با شکل (۲) اعمال شده و با شرایط مرزی خارجی مناسب معادلات حل می شوند. شرط مرزی خارجی، شامل شروطی است که به سطوح خارجی پیل اعمال می گردد. این شیوه به دلیل نیاز نداشتن شرایط مرزی داخلی از سرعت حل

بالا تری برخوردار است و دقت بیشتری نسبت به روش حل چند دامنه ای دارد اما از طرفی هزینه محاسباتی این شیوه بالاتر می باشد [۱۵].



شکل ۲- دامنه مورد بررسی برای شبیه سازی پیل سوختی

۱.۴. شرایط مرزی ورودی

در ورودی کانال، دبی ورودی^۱ به عنوان شرط مرزی ورودی به کار می رود که نرخ جریان جرمی ورودی را مشخص می کند. این شرط برای ورودی هر دو سمت کانال آند و کاتد به کار می رود؛ اما مقادیر آن با توجه به میزان نسبت استوکیومتری آن ها تعیین می شود. ویژگی این شرط مرزی این است که به طور کلی تعیین جریان جرمی باعث می شود تا فشار کلی در پاسخ به حل ناحیه داخلی تغییر کند.

با محاسبه دما، فشار و غلظت های گونه ها در ورودی کانال، سرعت در ورودی مطابق رابطه زیر به صورت تابعی از چگالی جریان مورد نظر I ، سطح مقطع هندسی غشاء A_{MEA} ، سطح مقطع عرضی کانال A_{ch} و همچنین استوکیومتری نرخ جریان i محاسبه می شود.

$$u_{in} = \zeta \frac{i}{n_{elec} F} A_{MEA} \frac{1}{x_{i,in}} \frac{RT}{P_{in}} \frac{1}{A_{ch}} \quad (13)$$

در رابطه (۱۳)، R ثابت جهانی گازها، $x_{i,in}$ کسر جرمی واکنش گرهای O_2 و H_2 مرطوب ورودی، T دمای ورودی، P_{in} فشار استاتیک و n_{elec} تعداد الکترون ها به ازای هر مول از واکنش دهنده می باشد که برای اکسیژن مقدار ۴ در طرف کاتد و برای هیدروژن مقدار ۲ در طرف آند، منظور می شود. فشار جزئی بخار آب در ورودی، برابر با فشار اشباع در دمای مرطوب سازی واکنشگرهای ورودی می باشد. بنابراین در ورودی کانال کاتد و آند داریم.

$$x_{in}^{H_2O} = \frac{p_{sat}}{p_{in}} \quad (14)$$

در رابطه بالا، $x_{in}^{H_2O}$ نسبت مولی آب ورودی می باشد. چون نسبت نیتروژن به اکسیژن هوا ۷۹ به ۲۱ است، نسبت مولی اکسیژن نیز به دست می آید.

$$x_{in}^{O_2} = \frac{1 - x_{in}^{H_2O}}{1 + \frac{79}{21}} \quad (15)$$

نسبت مولی نیتروژن ورودی بر اساس رابطه (۱۶) محاسبه می شود.

¹ Mass flow inlet

$$X_{in}^{N_2} + X_{in}^{H_2O} + X_{in}^{O_2} = 1 \quad (16)$$

نسبت مولی هیدروژن ورودی بر اساس رابطه (۱۷) محاسبه می شود.

$$X_{in}^{H_2} + X_{in}^{H_2O} = 1 \quad (17)$$

در نهایت مقادیر جریان جرمی با استفاده از روابط زیر محاسبه و اختصاص داده می شوند.

$$\rho u_n = \frac{\dot{m}}{A} \quad (18)$$

دبی جرمی آند:

$$\dot{m}_{in} = \frac{\zeta_a \times I_{ref} \times A_{MEA}}{n_a \times F \times X_{in}^{H_2}} \quad (19)$$

و دبی جرمی ورودی به کاتد:

$$\dot{m}_{in} = \frac{\zeta_c \times I_{ref} \times A_{MEA}}{n_c \times F \times X_{in}^{O_2}} \quad (20)$$

۲.۴. شرایط مرزی خروجی

در خروجی کانال های میدان جریان پیل سوختی از شرط مرزی فشار خروجی برای کانال آند و کاتد استفاده می شود. فشار خروجی به صورت فشار استاتیک نسبی در مرز، جهت عدم ایجاد یک سری از شرایط برگشت جریان به خاطر ایجاد گرادیان فشار و مشکل در همگرایی محاسبات اعمال می گردد. در خروجی آند و کاتد دمای ثابتی نیز که دمای عملکرد پیل است برای مرزها انتخاب می شود و جریان در مرز خروجی مطابق با رابطه (۲۱) به صورت توسعه یافته و با شار صفر در نظر گرفته می شود. غلظت مولی اجزای گازی پیل سوختی شامل هیدروژن و اکسیژن و بخار آب که با c^i مشخص شده است، مشخص کننده جریان در مرز خروجی است.

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial n} = 0; \quad \frac{\partial C^i}{\partial n} = 0; \quad \frac{\partial \phi_e}{\partial n} = 0; \quad \frac{\partial T}{\partial n} = 0 \quad (21)$$

۳.۴. شرایط مرزی دیواره ها

دیواره های جانبی پیل های سوختی به صورت آدیاباتیک در نظر گرفته شده است. شرایط مرزی دمایی برای حل معادله انرژی توزیع دما در داخل پیل سوختی، حرارت تولید شده با توجه به واکنش های الکتروشیمیایی در حال وقوع در سطح لایه کاتالیست و نیز با توجه به جریان در مجموع الکتروود غشاء است. انتقال حرارت بین منطقه مایع و منطقه جامد حل شده است. دمای هوا و سوخت ورودی ۳۵۳ درجه کلون است. در ناحیه جامد، شرایط مرزی آدیاباتیک در تمام مرزهای دامنه به کار می رود. بر روی دیواره ها شرط عدم لغزش برای سرعت و شرط شار صفر برای دیگر متغیرها، به استثناء شرایط دمایی در مرز کانال ها به کار می رود. در دیواره های کانال ها هر کدام از شرایط دما ثابت یا شار صفر را می توان به کار برد.

$$\bar{u} = 0; \quad \frac{\partial P}{\partial n} = 0; \quad \frac{\partial C^i}{\partial n} = 0; \quad \frac{\partial \phi_e}{\partial n} = 0; \quad T = 353K, \quad \frac{\partial T}{\partial n} = 0 \quad (22)$$

۵. شیوه و الگوریتم حل

شیوه حل انتخابی برای دستگاه معادلات تشکیل شده حل تکراری می‌باشد؛ زیرا استفاده از حل مستقیم برای دستگاه معادلات و تشکیل ماتریس وارون، حجم محاسباتی را خیلی بالا می‌برد. در نرم افزار فلونت برای حل دستگاه از روش تکراری گوس سایدل استفاده می‌شود. در معادلات ناویر استوکس متغیرهای سرعت در راستاهای مختلف و همچنین متغیر فشار وجود دارد. با بدست آوردن متغیرهای سرعت از معادلات ناویر- استوکس در جهات مختلف و بدست آوردن فشار از معادله پیوستگی برای حل استفاده می‌شود که این شیوه از حل روش فشار مبنا نام دارد. این در حالی است که متغیر فشار به صورت ضمنی به معادله پیوستگی ارتباط دارد، از این رو از روش های Projection (تصحیح کننده) جهت صریح کردن ارتباط فشار و سرعت استفاده می‌شود. در اینجا از روش SIMPLE برای این کار استفاده شده است. گسسته سازی معادلات انتقالی به روش پیشرو بوده است که از طریق آن مقدار متغیر با کمک درونیابی روی صفحات ذخیره می‌شود. روش درونیابی برای معادله مومنوم و گونه‌ها و انرژی به روش پیشرو مرتبه دو^۱ به کار گرفته شد و برای معادله شارژ و درصد رطوبت غشاء گسسته‌سازی روش پیشرو مرتبه اول به کار گرفته شد. برای دیگر معادلات مشابه پخش - جابه‌جایی ترم پخش با روش اختلاف مرکزی با دقت مرتبه دو گسسته سازی شده است.

۱.۵. روش چند شبکه‌ای در حل معادلات پیل سوختی

روش چند شبکه‌ای برای حل کننده فشار مبنا استفاده می‌شود. روش چند شبکه‌ای با استفاده از تصحیح محاسبات بر روی سطوح شبکه‌ای درشت^۲ باعث افزایش سرعت همگرایی حل می‌شود. عموماً وقتی تعداد گره‌های شبکه خیلی زیاد باشند نفوذ خطاها در حل زیاد شده و باعث توقف همگرایی خواهد شد؛ بنابراین استفاده از این روش به طور قابل توجهی تعداد تکرارها و زمان مورد نیاز پردازشگر کامپیوتر برای رسیدن به همگرایی را کاهش می‌دهند.

۲.۵. نوع چرخه

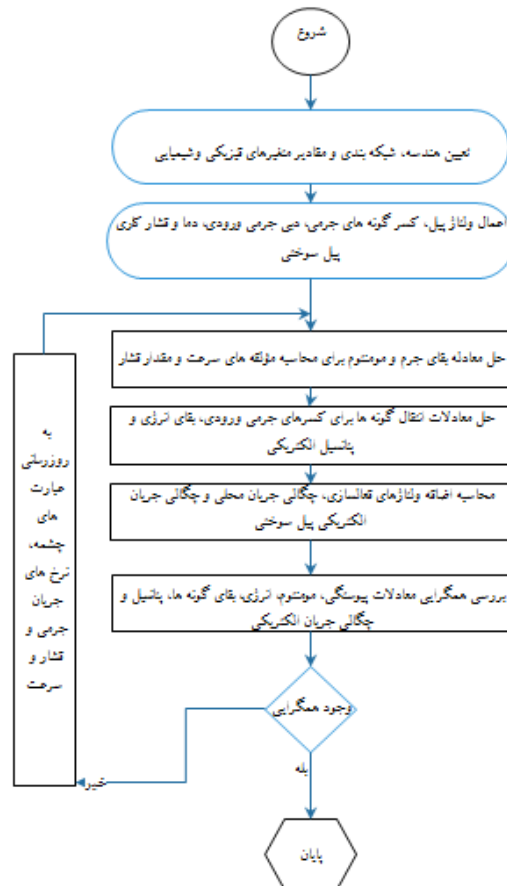
چون در روش‌های چند شبکه‌ای لازم است محاسبات از سطح شبکه ریز به سطح شبکه درشت و یا برعکس انتقال پیدا کند؛ لذا می‌توان روش‌های مختلفی برای چگونگی و توالی این انتقال‌ها در نظر گرفت که با عنوان چرخه‌های چند شبکه‌ای^۳ شناخته می‌شوند. چرخه‌های موجود شامل: چرخه V، چرخه W، چرخه F و چرخه Flexible است در این مطالعه از چرخه F استفاده شده است. روش چند شبکه‌ای F-cycle ترکیبی از چرخه‌های V و W است؛ بنابراین این چرخه محاسبات بیشتری نسبت به V-cycle نیاز دارد؛ ولی نسبت به چرخه W کمتر است. همان طور که انتظار می‌رود خصوصیات همگرایی آن نسبت به چرخه V بهتر به نتیجه مطلوب می‌رسد و از لحاظ نحوه همگرایی معادل با چرخه W است.

¹ second order upwind discretization

² Course grid

³ Multigrid cycle

۳.۵. الگوریتم حل



شکل ۳- الگوریتم مورد استفاده جهت حل معادلات پیل سوختی

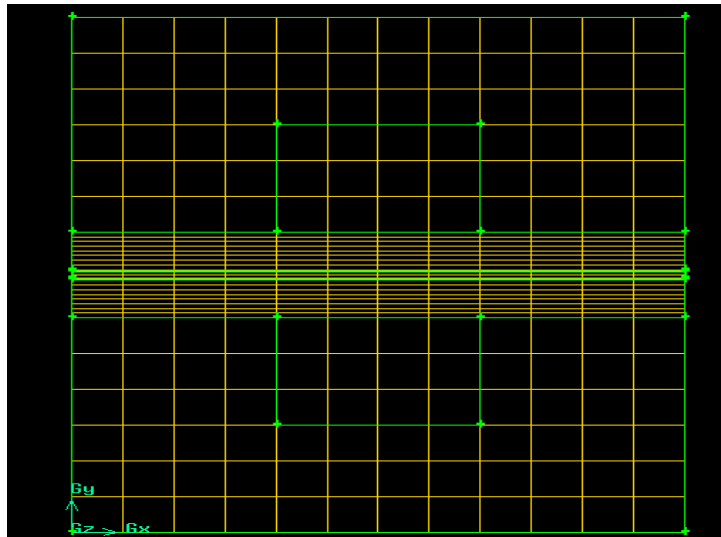
۶. مدل سازی و شبکه بندی هندسه

پیل سوختی به صورت سه بعدی مدل سازی شده است و دارای مشخصات ابعادی زیر مطابق جدول (۴) است.

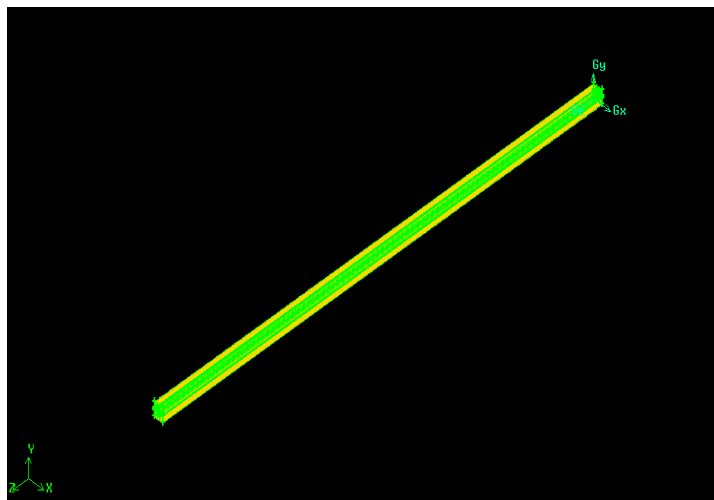
جدول ۴- مشخصات ابعادی پیل سوختی شبیه سازی شده

اجزا	مشخصات	اندازه
غشاء پیل سوختی		
	وزن معادل	۱۱۰۰ (کیلوگرم بر کیلو مول)
	ضخامت	۰.۰۳۶ میلی متر
ناحیه پخش گاز (آند و کاتد)		
	ضخامت	۰.۲۱ میلی متر
	تخلخل	۰.۵
لایه کاتالیست (آند و کاتد)		
	ضخامت	۰.۰۱۲ میلی متر
	نسبت سطح به حجم	۲۰۰۰۰۰ بر میلی متر
کانال میدان جریان		
	شکل کانال مارپیچ	
	طول کانال	۰.۶ میلی متر
	عرض کانال	۰.۸ میلی متر
	ارتفاع کانال	۱۲۵ میلی متر

طراحی و شبکه بندی مدل توسط نرم افزار گمبیت انجام گرفته و مش بندی به صورت سازمان یافته انجام شده است. در شکل های (۴) و (۵) شبکه بندی هندسه نمایش داده شده است.



شکل ۴- شبکه بندی پیل سوختی مدل سازی شده



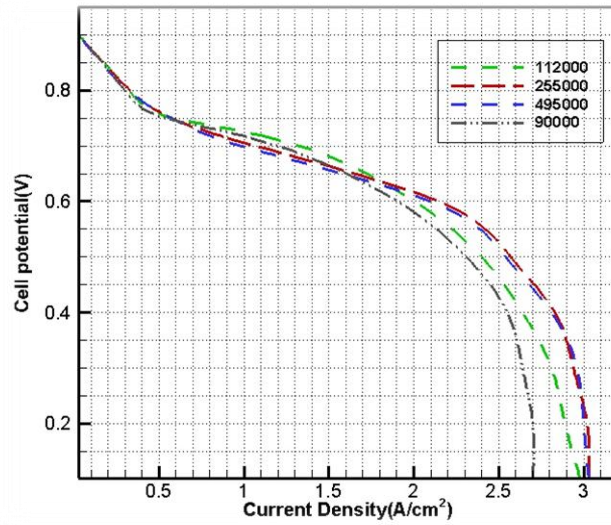
شکل ۵- شبکه بندی پیل سوختی در راستای Z

جدول ۵- بررسی استقلال از شبکه جهت شبکه بندی مناسب پیل سوختی

تعداد المان	چگالی جریان در ولتاژ ۰.۹
۴۹۵۰۰۰	۰.۳۱۹۹۹۵
۲۵۵۰۰۰	۰.۳۱۸۳۵۷
۱۱۲۰۰۰	۰.۳۲۱۳۵۸
۹۰۰۰۰	۰.۳۴۲۳۴۰

جهت بررسی دقیق استقلال از شبکه، منحنی قطبیت پیل سوختی که چگالی جریان پیل برای هر ولتاژ کاری را مشخص می کند، همانند شکل (۶) به دست آورده شده است. طبق منحنی قطبیت پیل سوختی و جدول (۵)، با افزایش تعداد المان ها، منحنی

قطبیت دچار تغییرات شده و با تعداد المان ۲۵۵۰۰۰ منحنی قطبیت بعد از ریز کردن شبکه ثابت مانده و تغییراتی کمی داشته، بنابراین ۲۵۵۰۰۰ المان برای مدلسازی پیل سوختی انتخاب شده است.

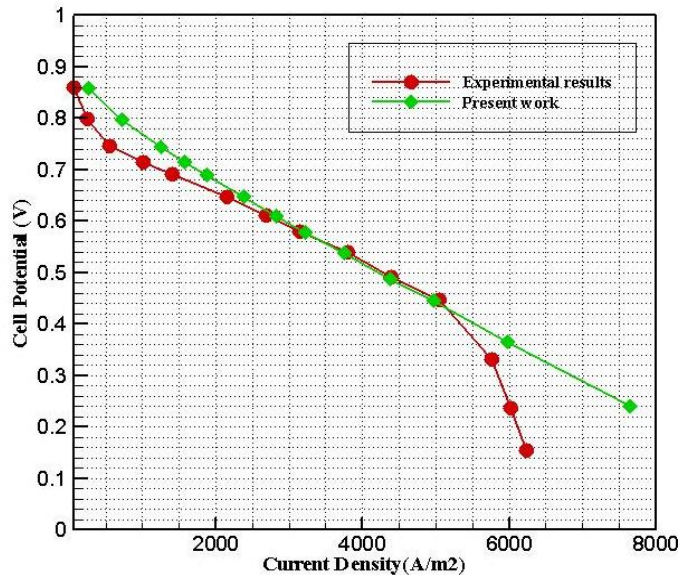


شکل ۶- بررسی استقلال از شبکه برای شبیه سازی پیل سوختی

۷. نتایج و بحث

۱.۷. صحت سنجی

جهت صحت سنجی معادلات انجام گرفته به شبیه سازی پیل سوختی تک کانال با کار آزمایشی انجام شده توسط ونگ [۱۶] پرداخته شده است.



شکل ۷- صحت سنجی مدلسازی پیل سوختی با مقاله آزمایشگاهی [۱۶]

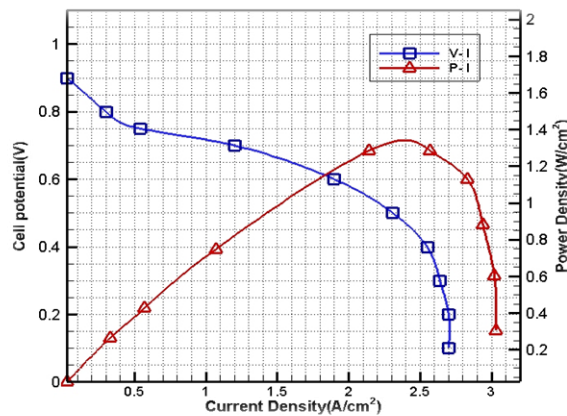
منحنی قطبیت مهمترین ویژگی یک پیل سوختی است که جهت مقاصد تشخیصی، برآورد کردن و کنترل پیل سوختی به کار می‌رود. در منحنی قطبیت پیل سوختی، ارتباط بین ولتاژهای کاری پیل سوختی و جریان یا چگالی جریان آن مشخص می‌شود.

¹ Wang

و از این اطلاعات می‌توان نقطه طراحی پیل سوختی مشخص شود و همچنین توان پیل سوختی که به صورت حاصل ضرب جریان در ولتاژ است، حاصل می‌شود. در شکل (۷) مقادیر صحت سنجی با نتایج حاصل از آزمایش پیل سوختی نمایش داده شده است که در چگالی های جریان متوسط و پایین، نتایج هم خوانی مناسبی با منحنی کار آزمایشی دارد، اما در چگالی های بالای جریان اختلاف مشاهده می‌شود. علت اصلی این ختلاف افت غلظتی اتفاق افتاده در پیل سوختی بوده که تولید آب مایع در حالت دوفازی و آزمایشگاهی باعث ایجاد مشکل شناوری و سرریز شدن در میدان جریان پیل سوختی می‌شود و عدم دسترسی واکنش دهنده ها به سطح لایه کاتالیست باعث ایجاد چگالی جریان پایین تر در حالت واقعی نسبت به حالت تک فاز می‌گردد.

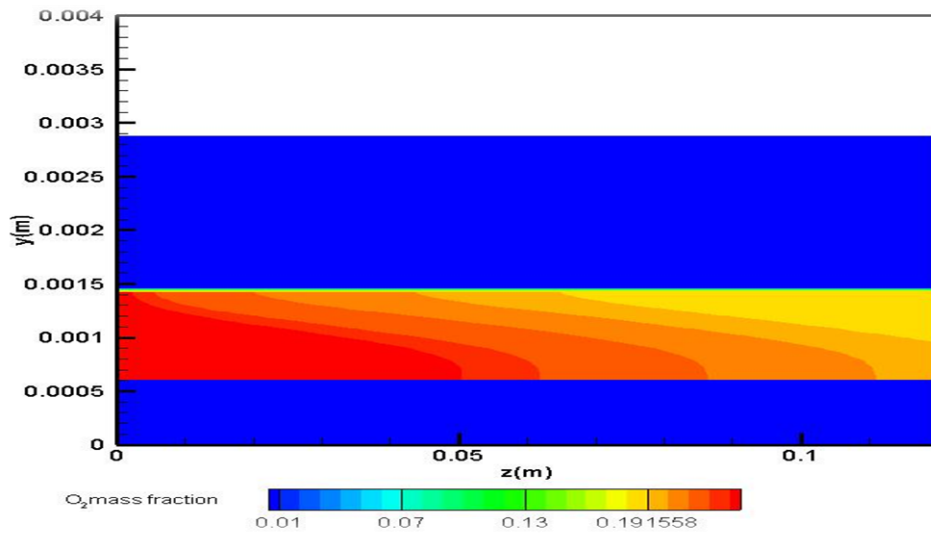
۲.۷. نتایج

شکل (۸) منحنی قطبیت که مشخصه عملکردی یک پیل سوختی است را نشان برای شبیه سازی انجام شده نشان می‌دهد. در این نمودار در ابتدا ولتاژ پیل سوختی در نزدیکی ولتاژ مدار باز آن قرار دارد و میزان ولتاژ پیل سوختی به خاطر وجود افت های ولتاژی که شامل افت اهمی و افت فعالسازی و افت غلظتی است با افزایش جریان کاسته شده و منحنی مطابق شکل زیر را ایجاد می‌کند.



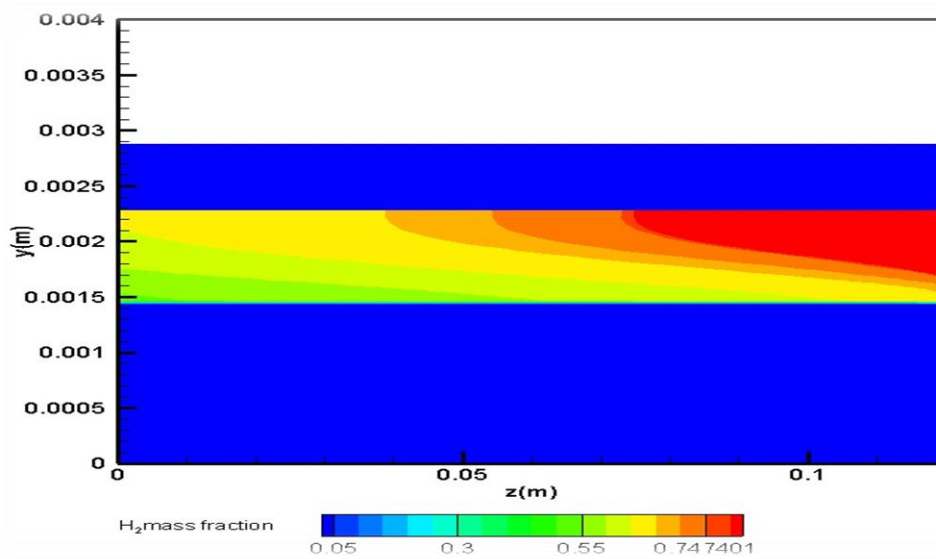
شکل ۸- منحنی قطبیت و چگالی توان برای شبیه سازی پیل سوختی پلیمری

در قسمت اول منحنی قطبیت عامل ایجاد افت ولتاژ افت فعالسازی پیل است، در قسمت میانی پیل سوختی عامل ایجاد افت ولتاژ، افت اهمی به خاطر عبور الکترون از اجزا داخلی است و افت در قسمت آخر پیل سوختی افت ناشی از غلظت و خالی شدن یک باره لایه کاتالیست از واکنش دهنده ها می‌باشد. منحنی چگالی توان نیز از حاصل ضرب ولتاژ پیل در چگالی جریان آن حاصل می‌شود و همانطور که دیده میشود بیشترین میزان چگالی توان پیل سوختی مدل شده ۱.۲۸ وات بر سانتی متر مربع است که به این معنا است که با کنار هم گذاشتن سلول های زیادی از این تک سلول های پیل سوختی در یک استک پیل سوختی قادر به رسیدن به توان های بالا خواهیم بود. شکل (۹) کانتور کسر جرمی اکسیژن در طول کانال کاند پیل سوختی را نمایش می‌دهد.



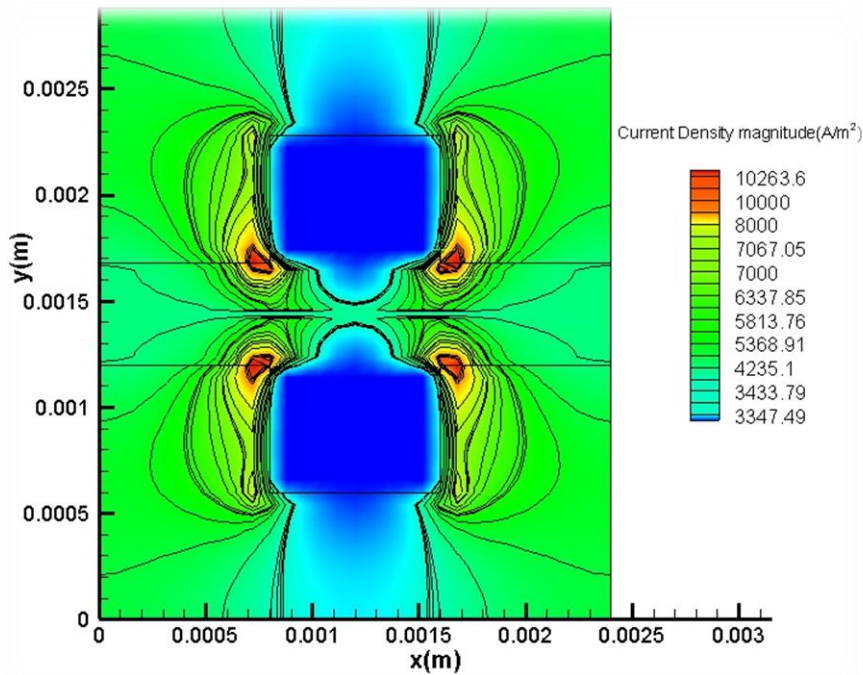
شکل ۹- کانتر کسر جرمی اکسیژن در کانال کاتد پیل سوختی

همانطور که ملاحظه می شود در ابتدای ورودی کانال در سمت چپ مقادیر اکسیژن بالایی وارد شده و در طول کانال به علت انجام واکنش های الکتروشیمیایی اکسیژن ورودی مصرف شده و هرچه به انتهای کانال نزدیک میشود میزان آن کاسته می شود. مقادیر بالای اکسیژن برای بهتر انجام شدن واکنش های پیل سوختی لازم می باشد که در این مدل مقادیر اکسیژن در انتهای کانال تمام نشده که نشان می دهد مقادیر مناسبی از اکسیژن در کانال برای انجام واکنش شیمیایی موجود است. در شکل (۱۰) کانتر کسر جرمی هیدروژن در کانال آند پیل سوختی نمایش داده شده است.



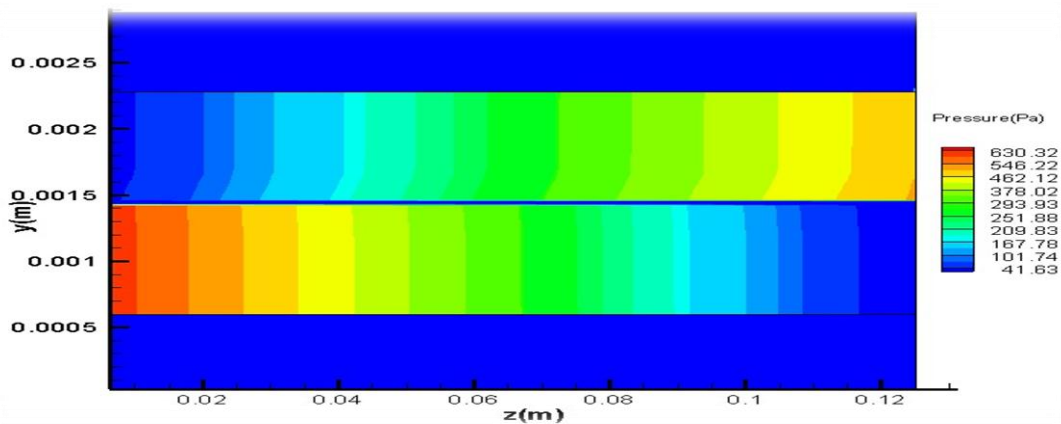
شکل ۱۰- کانتر کسر جرمی هیدروژن در کانال آند پیل سوختی

همانطور که در شکل (۱۰) دیده می شود ورودی کانال آند در سمت مخالف کاتد است و هیدروژن وارد شده در ابتدای کانال غلظت بالایی داشته و هرچه در طول کانال حرکت می کند، مصرف شده و کسر جرمی آن کاهش می یابد. مخالف جهت بودن ورودی کاتد و آند پیل سوختی جهت انتقال بیشتر آب و هیدراته کردن غشاء یک ویژگی مثبت است از این رو جهت مخالف حرکت گازها در سمت کاتد و آند پیل سوختی در نظر گرفته شده است. در شکل (۱۱) کانتر بزرگی چگالی جریان در مقطع عمود بر کانال در وسط محور Z نمایش داده شده است.



شکل ۱۱- کانتور چگالی جریان

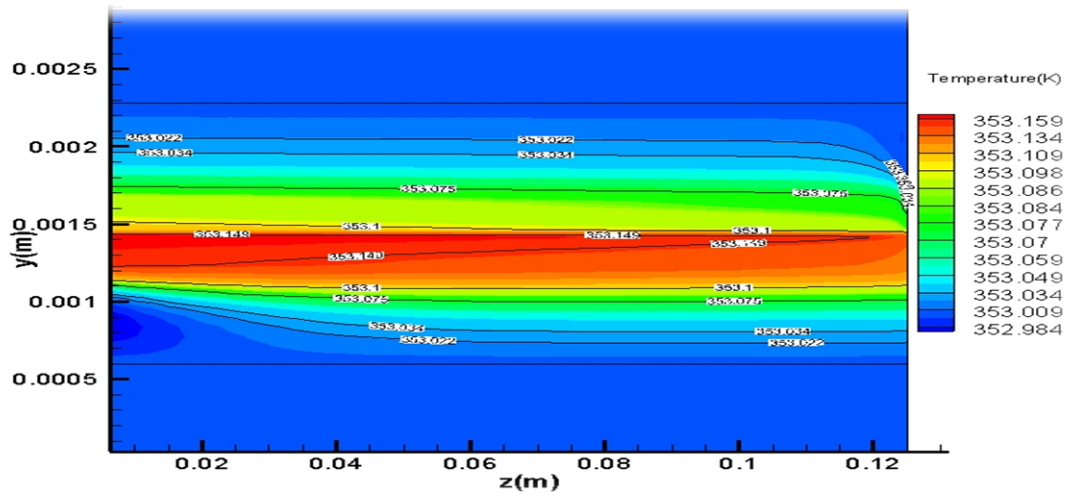
از شکل بالا می توان مشاهده نمود بیشترین چگالی جریان در نواحی حول کانال آند و کاتد پیل سوختی و بین آن ها به وجود می آید. این امر به خاطر وجود لایه کاتالیست در این قسمت است که بخش عمده واکنش های الکتروشیمیایی پیل سوختی روی آن اتفاق می افتد. در شکل (۱۲) کانتور توزیع فشار در طول کانال پیل سوختی آورده شده است.



شکل ۱۲- کانتور توزیع فشار استاتیکی در پیل سوختی

همانطور که از شکل (۱۲) مشاهده می شود در ورودی کاتد پیل سوختی فشار بالا است و با عبور جریان گازهای واکنش گر در کانال به دلیل اصطکاک با دیواره کانال فشار افت می کند، همچنین در سمت آند پیل سوختی نیز در ورودی فشار بالاتر است و در طی حرکت و در خروجی کانال آند فشار افت می نماید. همانطور که دیده می شود فشار سمت کاتد پیل سوختی از آند بالاتر است و وجود افت فشار جهت خارج کردن آب های تشکیل شده در کانال به بیرون از آن لازم و ضروری است ولی مقادیر بالای افت فشار باعث کم شدن توان خروجی پیل سوختی شده و اثر منفی دارد. افت فشار بدست آمده در مدل سازی پیل مقدار ۵۸۹ پاسکال است. میزان افت فشار لازم برای خروج کردن آب باید از ۱۰۰ پاسکال بر متر [۱۷] بزرگتر باشد که در

این مدل برقرار است. در ادامه به بررسی نحوه توزیع دما در پیل سوختی پرداخته شده است و کانتور توزیع دما در شکل (۱۳) نمایش داده شده است.

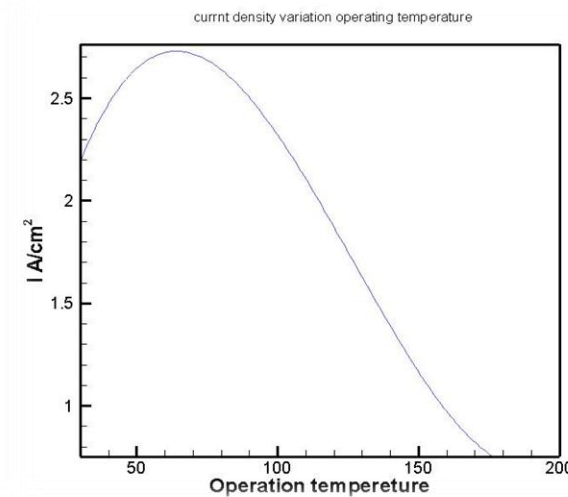


شکل ۱۳- کانتور توزیع دما در پیل سوختی

همانطور که در شکل (۱۳) دیده می‌شود توزیع دما در سمت کاتد پیل سوختی مقادیر بالاتری را نشان می‌دهد و به ویژه در نزدیک غشاء و لایه کاتالیست کاتد که واکنش های الکتروشیمیایی باعث ایجاد حرارت می‌شود، میزان دما بیشتر است. یکنواختی دما در توزیع دما به میزان ۱ درجه کلون تغییرات دارد و از این نظر تنش های حرارتی بالا به پیل وارد نمی‌شود.

۳.۷. مطالعه اثر تغییرات دما بر پیل سوختی

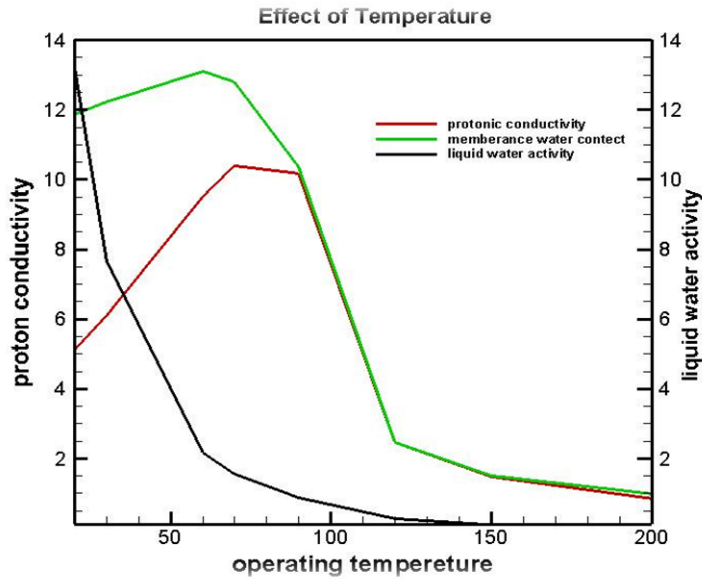
از آنجا که در مدلسازی انجام شده، دمای کاری پیل سوختی ۸۰ درجه سلسیوس در نظر گرفته شده بود به بررسی رفتار پیل سوختی در دماهای مختلف پرداخته شده است.



شکل ۱۴- عملکرد پیل سوختی در دماهای مختلف

از منحنی مربوط به شکل (۱۴) می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش دما، عملکرد پیل سوختی به خاطر بیشتر شدن رطوبت واکنش دهنده ها، بهبود می‌یابد ولی از دمای ۷۰ و ۸۰ درجه سلسیوس به بعد به خاطر خشک شدن غشاء، هدایت پروتونی صورت نگرفته و عملکرد پیل بدتر می‌شود. بهترین دمای کاری پیل سوختی در محدوده ۷۰ تا ۸۰ درجه سلسیوس است. جهت

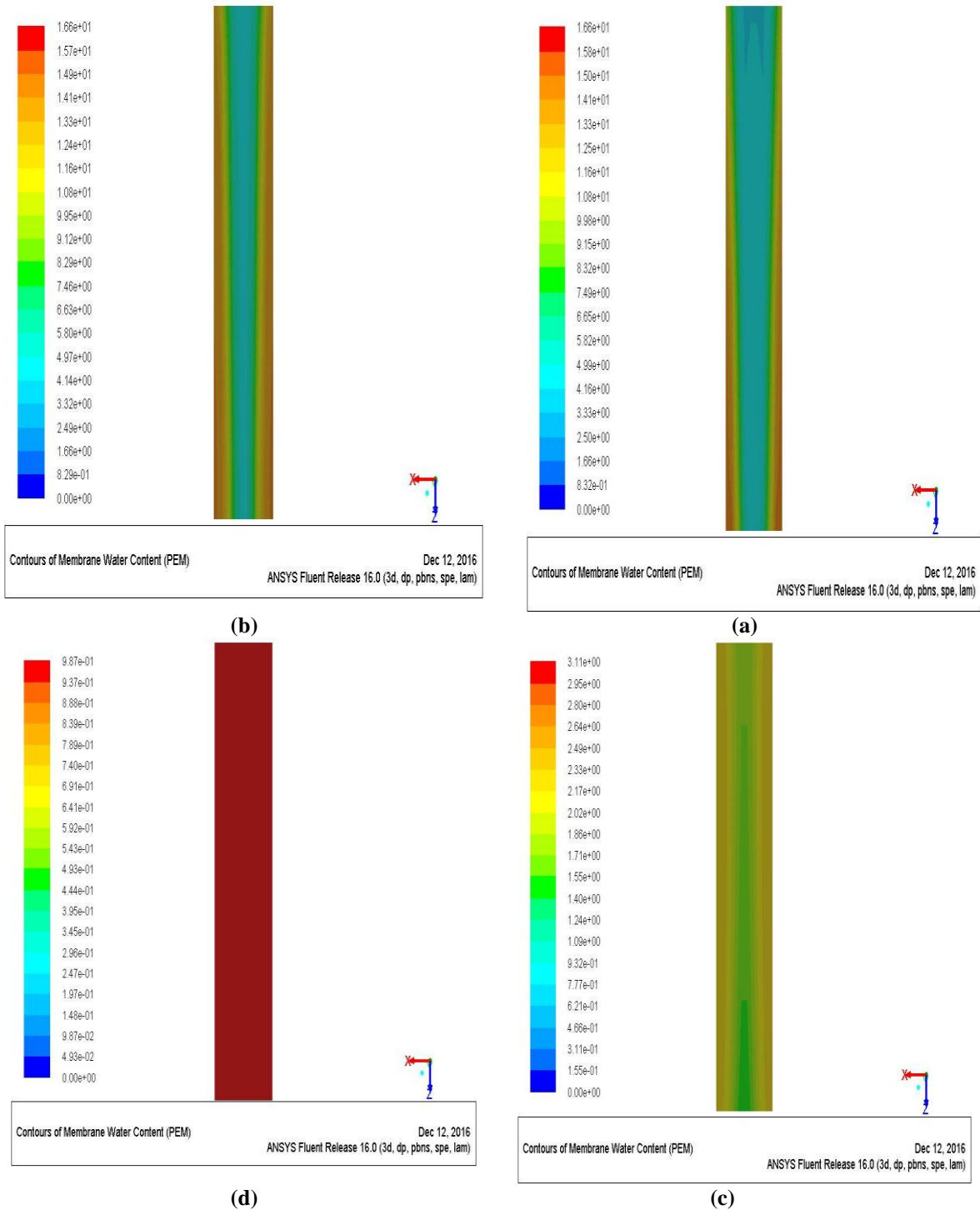
بررسی علت بهبود عملکرد پیل سوختی با افزایش دما، به مشخصات و خواص غشاء پیل سوختی در دماهای مختلف پرداخته شده است و سه خاصیت هدایت پروتونی غشاء، محتوای آب غشاء و فعالیت آب که هر سه مورد در (جدول ۳) بیان شده اند، در دماهای مختلف بررسی شده است.



شکل ۱۵- تأثیر دما بر خواص فیزیکی غشاء پیل سوختی

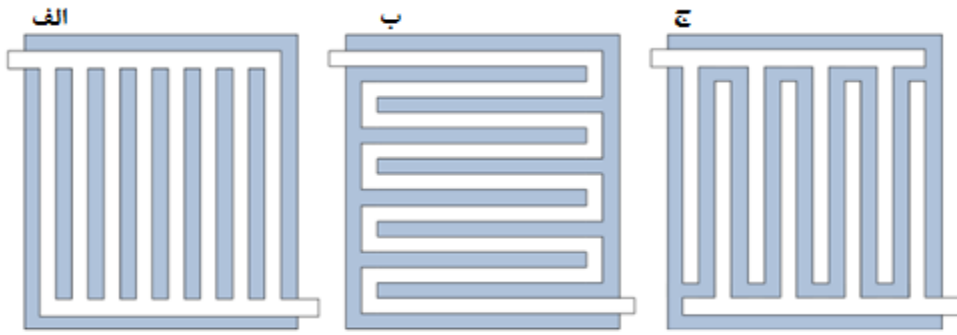
با افزایش دمای عملکرد پیل سوختی تا ۸۰ درجه سلسیوس، هدایت پروتونی غشاء بهبود یافته است و جذب آب آن بیشتر شده است و این دو پارامتر به صورت مستقیم با هم در ارتباط هستند که روابط جدول (۳) را نشان می‌دهد ولی با ادامه افزایش دما، به خاطر خشک شدن غشاء، همانطور که انتظار داشتیم مقادیر هدایت پروتونی، محتوای آب کاسته شده و در دمای ۲۰۰ درجه سلسیوس خواص فیزیکی غشاء بسیار اندک می‌شوند. لازم به تذکر است فعالیت آب مایع به دما مربوط است که در حالت کلی در دماهای پایین بیشتر است و با افزایش دما روندی نزولی دارد و نحوه تغییرات آن در اینجا به ساختار پیل سوختی ارتباط چندانی ندارد.

در ادامه محتوای آب در دماهای مختلف روی غشاء آورده شده است که نتایج بیانگر وجود بیشترین میزان آب روی غشاء در دمای ۷۰ درجه است که عملکرد بهتر پیل را منجر می‌شود و در دماهای بالا میزان آب روی غشاء پیل سوختی به میزان صفر رسیده است و خشک شدن غشاء و نامطلوب بودن این محدوده از دما برای کارکرد پیل سوختی را نمایش می‌دهد.

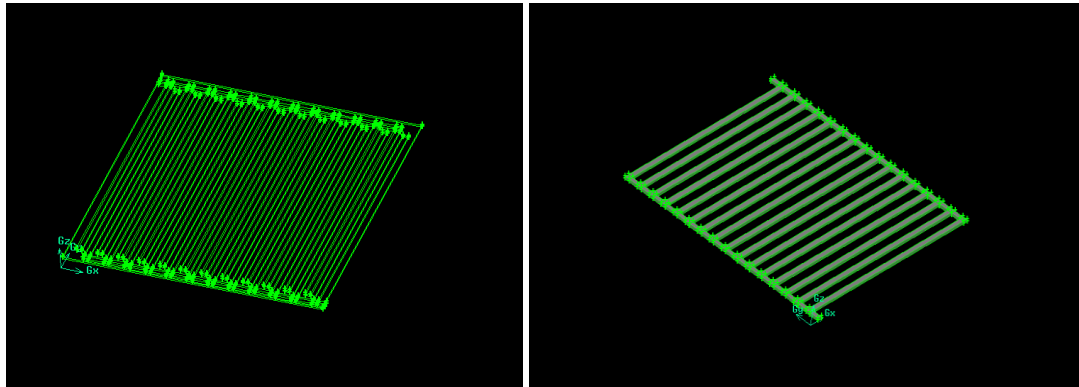


شکل ۱۶- کانتور محتوای آب غشاء در دماهای (a) ۳۰، (b) ۷۰، (c) ۱۲۰، (d) ۲۰۰ درجه سلسیوس

در انتها مدل تک کانال مارپیچ پیل سوختی به مدل مارپیچ همراه با ۱۶ کانال توسعه داده شده است و جهت ارزیابی با دو مدل دیگر، پیل سوختی با کانال درهم تنیده و کانال موازی با همین تعداد کانال مورد مقایسه قرار گرفته است.

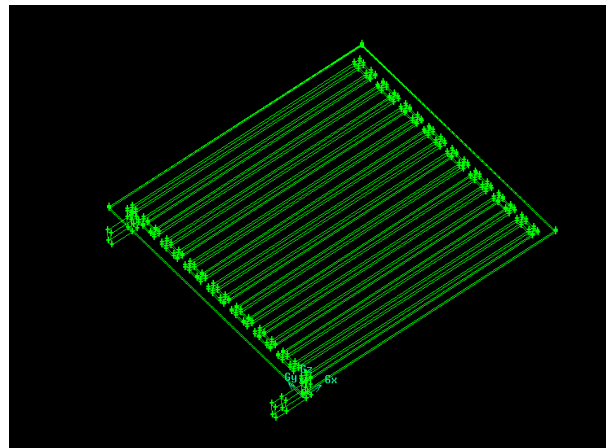


شکل ۱۷- کانال الف موازی- ب مارپیچ - ج درهم تنیده [۱۸]



مدل درهم تنیده شده طراحی شده

مدل موازی طراحی شده



مدل مارپیچ طراحی شده

شکل ۱۸- کانال های طراحی شده جهت مقایسه عملکرد پیل سوختی

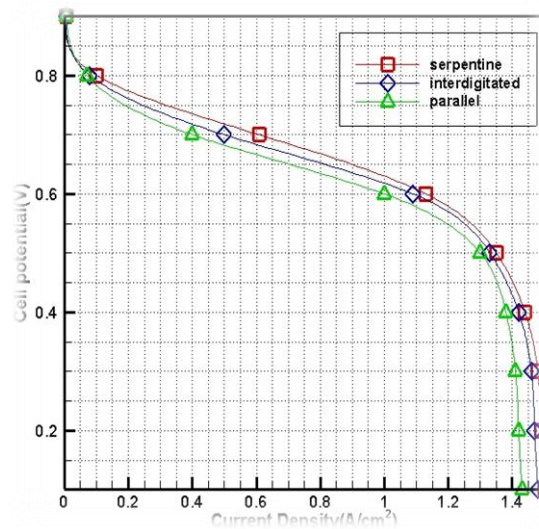
جدول ۶- ابعاد در نظر گرفته شده برای مقایسه سه میدان جریان

مقدار (میلی متر)	ابعاد
46	طول کانال گاز، L
1.0	عرض کانال گاز، W
0.4	عمق کانال گاز، $H_{channel}$
0.25	ضخامت لایه انتشار گاز، H_{gd}
0.2	ارتفاع لایه کاتالیست، H_{CL}

جدول ۷- پارامترهای مدل‌سازی برای سه هندسه مختلف از میدان جریان

پارامتر	نشانه	واحد	مقدار
تخلخل لایه کاتالیست	$\epsilon_{catalyst}$	-	0.4
تخلخل لایه پخش گاز	ϵ_{gdl}	-	0.5
نفوذپذیری لایه پخش گاز آند/کاتد	K_{gdl}	m^2	1.76×10^{-10}
نفوذپذیری لایه کاتالیست	K_{Cl}	m^2	1.76×10^{-11}
وزن تعادلی غشاء	M	kg/mol	1.1
هدایت پذیری الکتریکی	σ	1/ohm.m	5000
ضریب انتقال بار آند	α_{an}	-	0.5
ضریب انتقال بار کاتد	α_{cath}	-	1.5
ضریب هدایت حرارتی جمع کننده/لایه پخش گاز/لایه کاتالیست	$K_{cl,gdl,cat}$	W/m.K	150

در نهایت منحنی عملکرد برای سه هندسه مارپیچ، درهم تنیده و موازی با ابعاد و تعداد کانال برابر در شکل (۱۹) به دست آورده شده است.



شکل ۱۹- منحنی عملکرد برای پیل سوختی با سه کانال مارپیچ، درهم تنیده و موازی

با توجه به شکل (۱۹) عملکرد کانال درهم تنیده و موازی تقریباً مشابه هم بوده و کانال مارپیچ تا حدودی عملکرد بهتری را نشان می‌دهد و کانال موازی بدترین عملکرد را نشان داده و در ولتاژهای کاری پایین بیشترین چگالی جریان بدست آمده از کانال موازی نسبت به دو کانال دیگر پایین تر بوده است و این امر را به دلیل مسدود شدن کانال‌های پیل سوختی از آب تولیدی از پیل و نامناسب بودن طراحی موازی در جهت خروج محصولات می‌توان جست و جو کرد.

۸. نتیجه گیری

شبه سازی پیل های سوختی پلیمری کمک بسیار زیادی می‌نماید تا با فرآیندهای الکتروشیمیایی و شیمیایی و مکانیکی داخل اجزای پیل آشنایی کاملی پیدا کرد. همانطور که دیده می‌شود رفتار منحنی قطبیت پیل سوختی از یک رفتار ویژه در ولتاژهای کاری مختلف پیروی می‌کند. در ولتاژهای کاری بالا چگالی جریان بدست آمده از پیل سوختی پایین بوده و با کاهش ولتاژ

کاری، چگالی جریان خروجی از پیل افزایش می‌یابد و مطابق با منحنی توان-چگالی جریان یک نقطه کاری بهینه که دارای بیشترین توان خروجی است حاصل می‌گردد. در این تحقیق در ولتاژ ۰.۵ بیشترین توان خروجی از پیل سوختی تک کانال ماریچ حاصل شده است. انتخاب نقطه طراحی بستگی به فضای در دسترس داشته اگر فضای لازم برای پیل سوختی کوچک باشد از چگالی های توان بالا استفاده شده و در صورت داشتن فضای مناسب از پیل سوختی با توان کمتر و ابعاد بزرگتر می‌توان استفاده کرد. با شبیه سازی پیل سوختی دیده شد که فشار پیل سوختی در طول کانال خود از ورودی تا خروجی دچار افت می‌گردد که میزان افت فشار برای پیل برای جلوگیری از کاهش توان آن نباید خیلی بالا باشد و همچنین مقادیر پایین فشار نیز برای خروج محصولات تولیدی از واکنش گرهای پیل مانند آب با مشکل همراه است از این رو تعامل نسبی بین افت فشار در پیل باید برقرار باشد. دمای بررسی شده نشان می‌دهد بیشترین دمای حاصل از پیل در نزدیک لایه کاتالیست کاتد آن است و با مطالعه دماهای کاری ۳۰ تا ۲۰۰ درجه پیل سوختی، بهترین دمای کاری برای پیل ۷۰ تا ۸۰ درجه سلسیوس بدست آمده است. با افزایش یا کاهش دما از این مقادیر خواص فیزیکی اجزاء پیل سوختی از حالت ایده آل خارج شده و عمر پیل سوختی کم می‌شود. در نهایت مدل تک کانال ماریچ به ۱۶ کانال توسعه داده شده و با دو مدل درهم تنیده و موازی مورد مقایسه قرار گرفته است و مشاهده شده چگالی جریان ماکزیمم بدست آمده از کانال ماریچ نسبت به دو مدل دیگر بیشتر بوده و عملکرد بهتری برای کانال ماریچ مشاهده شده است.

۹. مراجع

1. D. M. Bernardi and M. W. Verbrugge, "Mathematical model of a gas diffusion electrode bonded to a polymer electrolyte," *AICHE J.*, vol. 37, no. 8, pp. 1151-1163, 1991.
2. T. V Nguyen and R. E. White, "A water and heat management model for Proton- Exchange- Membrane fuel cells," *J. Electrochem. Soc.*, vol. 140, no. 8, pp. 2178-2186, 1993.
3. H. Ju, H. Meng, and C.-Y. Wang, "A single-phase, non-isothermal model for PEM fuel cells," *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 48, no. 7, pp. 1303-1315, 2005.
4. X.-D. Wang, Y.-Y. Duan, W.-M. Yan, and F.-B. Weng, "Effect of humidity of reactants on the cell performance of PEM fuel cells with parallel and interdigitated flow field designs," *J. Power Sources*, vol. 176, no. 1, pp. 247-258, 2008.
5. H. Liu, P. Li, D. Juarez-Robles, K. Wang, and A. Hernandez-Guerrero, "Experimental study and comparison of various designs of gas flow fields to PEM fuel cells and cell stack performance," *Front. Energy Res.*, vol. 2, p. 2, 2014.
6. D. Spornjak, A. K. Prasad, and S. G. Advani, "In situ comparison of water content and dynamics in parallel, single-serpentine, and interdigitated flow fields of polymer electrolyte membrane fuel cells," *J. Power Sources*, vol. 195, no. 11, pp. 3553-3568, 2010.
7. P. K. Jithesh, A. S. Bansode, T. Sundararajan, and S. K. Das, "The effect of flow distributors on the liquid water distribution and performance of a PEM fuel cell," *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 37, no. 22, pp. 17158-17171, 2012.
۸. عدمی، "خصوصیات هندسی میدانهای جریان پیل سوختی غشا پلیمری،" کنفرانس انرژی های تجدید پذیر و تولید پراکنده ایران.
۹. اطیابی، "اثر تخلخل لایه پخش گاز و فشار بر عملکرد پیل سوختی غشاء پلیمری با میدان جریان لانه زنبوری،" *مجله مکانیک سازه ها* و شماره ۳، ۱۳۹۲.
10. T. Monsaf, B. M. Hocine, S. Youcef, and M. Abdallah, "Unsteady three-dimensional numerical study of mass transfer in PEM fuel cell with spiral flow field," *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 42, no. 2, pp. 1237-1251, 2017.
11. S. Litster and G. McLean, "PEM fuel cell electrodes," *J. Power Sources*, vol. 130, no. 1, pp. 61-76, 2004.
12. E. A. Ticianelli, C. R. Derouin, A. Redondo, and S. Srinivasan, "Methods to advance technology of proton exchange membrane fuel cells," *J. Electrochem. Soc.*, vol. 135, no. 9, pp. 2209-2214, 1988.
13. F. Barbir, *PEM fuel cells: theory and practice*. Academic Press, 2012.

14. E. Afshari and S. A. Jazayeri, "Analyses of heat and water transport interactions in a proton exchange membrane fuel cell," *J. Power Sources*, vol. 194, no. 1, pp. 423–432, 2009.
15. E. Afshari, M. Mosharaf-Dehkordi, and H. Rajabian, "An investigation of the PEM fuel cells performance with partially restricted cathode flow channels and metal foam as a flow distributor," *Energy*, vol. 118, pp. 705–715, 2017.
16. X.-D. Wang, X.-X. Zhang, W.-M. Yan, D.-J. Lee, and 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, no. 9, pp. 3823–3832, 2009.
17. H. Li et al., "A review of water flooding issues in the proton exchange membrane fuel cell," *J. Power Sources*, vol. 178, no. 1, pp. 103–117, 2008.
18. A. P. SASMITO, "Modeling of Transport Phenomena in Polymer Electrolyte Fuel Cell Stacks: Thermal, Water, and Gas Management." 2010.