



تحلیل آزمایشگاهی و عددی پیل سوختی پلیمری با یک کانال مارپیچ متقارن جدید

حسین رجبیان^۱، حسین امیری^{۲*}، مجتبی رحیمی^۳، سید محمد باقر مرعشی^۴ و علیرضا عرب سلغار^۵^۱ دانشجوی فوق لیسانس، دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته، کرمان^۲ استادیار، پژوهشکده انرژی، دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته، کرمان^۳ استادیار، گروه فیزیک و گروه پیل سوختی حرارت بالا، دانشگاه ولی عصر (عج) رفسنجان، رفسنجان^۴ کارشناس آزمایشگاه، گروه فیزیک و گروه پیل سوختی حرارت بالا، دانشگاه ولی عصر (عج) رفسنجان، رفسنجان^۵ استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه ولی عصر (عج) رفسنجان، رفسنجان، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۴/۱۱/۲۵؛ تاریخ بازنگری: ۱۳۹۵/۰۷/۰۴؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۵/۰۹/۱۱

چکیده

در این مقاله، ابتدا یک پیل سوختی پلیمری با الگوی جدید کانال جریان، با عنوان الگوی کانال مارپیچ متقارن (جدید) طراحی و ساخته شده است. پیل ساخته شده، دارای توان نامی حدود ۱۰ وات، مساحت ناحیه فعال ۲۵ سانتی‌متر مربع و دارای غشاء نفیون-۱۱۷ است. با استفاده از دستگاه تست پیل سوختی، اثر دما و رطوبت نسبی گازهای سمت کاتد بر عملکرد آن (نمودار ولتاژ - چگالی جریان پیل) مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج آزمایشگاهی نشان داد که پیل ساخته شده قادر است، ماکزیمم چگالی توان (حدود ۰/۴۵ وات بر سانتی‌متر مربع) را تولید نماید. سپس مدل‌سازی عددی سه‌بعدی و کامل پیل سوختی ساخته شده (شامل همه ۹ لایه پیل سوختی) و در ابعاد واقعی انجام شده است. بدین منظور، معادلات دیفرانسیل پاره‌ای همبسته شده غیرخطی بقاء جرم، بقاء اندازه حرکت (مؤمتم)، بقاء اجزاء، بقاء انرژی و شارژ به همراه روابط سینتیک الکتروشیمیایی در نواحی مختلف پیل به صورت الگوی تک ناحیه‌ای و تک فاز (فقط فاز گاز)، تدوین و به کمک نرم‌افزار تجاری فلوئنت حل شده‌اند. نتایج مدل‌سازی عددی نشان می‌دهد که کانال مارپیچ متقارن (جدید) قادر است، حتی در چگالی‌های جریان بالا توزیع دما و غلظت مطلوبی را در سراسر ناحیه فعال ایجاد نماید.

کلمات کلیدی: پیل سوختی پلیمری؛ کانال جدید؛ شبیه‌سازی عددی؛ طراحی و ساخت.

Experimental and Numerical Analysis of PEM Fuel Cell Performance with a New Helically Symmetrical Flow Channel

H. Rajabian¹, H. Amiri^{1*}, M. Rahimi², S.M.B. Marashi², A. Arab Solghar³¹ Department of Energy, Graduate University of Advance Technology, Kerman, Iran.² Department of Physics, Faculty of Science, Vali-e-Asr University of Rafsanjan, Rafsanjan, Iran.³ Department of Mechanics, Vali-e-Asr University of Rafsanjan, Rafsanjan, Iran.

Abstract

In this paper, a Proton Exchange Membrane (PEM) fuel cell with new symmetrical flow channel pattern was designed and fabricated in-house. The fabricated PEM fuel cell has nominal power of 10 W, with an active area of 25 cm² and Nafion 117 membrane. Using a fuel cell test station, the effects of temperature and relative humidity on the performance of fabricated PEM fuel cell (i.e. voltage - current density curve) was examined. Laboratory results showed that fabricated PEM fuel cell is able to produce maximum power density of about 0.45 [Wcm⁻²] or 11W power. A comprehensive three-dimensional, single phase and non-isothermal model is developed for the fabricated PEMFC. The presented model is a nine-layer model that consists of current collectors, flow channels, gas diffusion layers, catalysts layers at the anode and the cathode as well as the membrane. A commercial CFD software (Fluent) was used to solve the governing equation. Comparison of numerical and experimental results shows that there is a good agreement between them. The results indicate that the new flow pattern can produce uniform temperature, current density and concentration distributions over the PEM fuel cell active area.

Keywords: PEM Fuel Cell; New Flow Pattern; Numerical Simulation; Design and Fabrication.

* نویسنده مسئول؛ تلفن: ۰۳۴۳۳۷۶۶۱۱؛ فکس: ۰۳۴۳۳۷۶۶۱۷

آدرس پست الکترونیک: hosseinamiri2010@gmail.com

۱- مقدمه

سوخت‌های فسیلی علاوه بر این که یکی از عوامل اصلی آلودگی محیط‌زیست در جهان می‌باشند، منابع آن‌ها نیز در آینده‌ای نزدیک به پایان خواهد رسید. در دهه‌های اخیر، افزایش بازده استفاده از سوخت‌های فسیلی و استفاده از انرژی‌های تجدید پذیر به‌عنوان دو راه‌کار اساسی برای برون‌رفت از چالش‌های استفاده از سوخت‌های فسیلی، مورد توجه قرار گرفته است. پیل‌های سوختی به دلیل بازده بالا، سبب کاهش مصرف سوخت‌های فسیلی و در نتیجه کاهش آلودگی‌های زیست‌محیطی می‌شوند. علاوه بر این در صورتی که از هیدروژن به‌دست‌آمده از الکترولیز آب با استفاده از انرژی‌های تجدید پذیر به‌عنوان سوخت استفاده شود، انرژی الکتریکی را در یک چرخه پاک زیست‌محیطی تولید می‌نمایند.

پیل‌های سوختی اولیه به دلیل بهینه نبودن بسیاری از اجزا از جمله، عملکرد نسبتاً پایین و هزینه بالا، قابل رقابت با موتورهای احتراق داخلی نبودند. در سال‌های گذشته، تحقیقات زیادی برای افزایش بازده، قابلیت اطمینان، تداوم و پیوستگی کاری و بالا بردن کارایی پیل‌های سوختی صورت گرفته است. پیل سوختی پلیمری به دلیل مزایای فراوان همچون، غشا جامد، چگالی توان بالا، راه‌اندازی سریع، پایداری سیستم، دمای کاری پایین (معمولاً زیر ۱۰۰ درجه سلسیوس)، بازده بالا و انتشار آلاینده‌گی کم، بسیار مورد توجه قرار گرفته است. یک پیل سوختی پلیمری از قسمت‌های مختلفی همچون: صفحات دوقطبی، الکترودها، کاتالیست، غشا و اجزای دیگری همچون، کانال‌های خنک‌کننده و... تشکیل شده است. کانال‌های جریان سیال روی صفحات دوقطبی قرار دارند و نقش رساندن اکسیدکننده و سوخت را به سطح واکنش (لایه کاتالیست) بر عهده دارند. این کانال‌ها نقش بسیار مهمی را در عملکرد و بازده پیل سوختی پلیمری دارند. شکل و الگوی کانال جریان بر انتقال گازهای واکنشگر، بهره‌گیری مؤثر از گازهای واکنشگر، مدیریت آب و عملکرد پیل تأثیر زیادی می‌گذارد. با طراحی بهینه این کانال‌ها می‌توان در کاهش هزینه و وزن و افزایش عملکرد پیل سوختی گام‌های مؤثر و کاربردی برداشت؛ بنابراین طراحی کارآمد و بهینه کانال‌های جریان، توجه محققان زیادی را به خود جلب کرده است [۱-۵]. تحقیقات واتکینز و همکاران [۶] نشان داد که با طراحی

بهینه کانال‌ها می‌توان با بهبود جریان واکنشگرها در سطح کاتالیست چگالی توان الکتریکی پیل سوختی را تا ۵۰ درصد افزایش داد. در بهینه‌سازی طراحی کانال‌های جریان سیال، دو مبحث طراحی سطح مقطع کانال جریان و طراحی مسیر کانال مطرح می‌شود. در مبحث طراحی سطح مقطع کانال، اختر و همکاران [۱] به‌صورت عددی در زمینه‌ی اثر سطح مقطع کانال بر پیل تحقیقاتی انجام دادند. بر اساس تحقیقات آن‌ها بهترین سطح مقطع از بین مقاطع مختلف کانال با سطح مقطع، مستطیلی است که بهترین کارایی را از نظر دفع (خروج آب از پیل) دارا است؛ این نتیجه با نتیجه منچ و همکاران [۲] و هانتانن و همکاران [۳] تطابق دارد. گروجیکیچ و همکاران [۴]، با استفاده از یک مدل تک فاز هم‌دم و سه‌بعدی از پیل سوختی به بهینه‌سازی ضخامت کاتد، عرض و ضخامت کانال گاز کاتد پیل سوختی پلیمری پرداختند. مانسو و همکاران [۵]، به‌طور عددی به بررسی اثر نسبت ارتفاع به عرض در کانال‌هایی با سطح مقطع مستطیلی و مسیر کانال مارپیچ پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد که در ولتاژهای بالا (چگالی جریان پایین)، اثر نسبت ارتفاع به عرض کم است، ولی در ولتاژهای پایین (چگالی جریان بالا)، با کاهش نسبت ارتفاع به عرض کارایی پیل افزایش می‌یابد. یانگ و همکاران [۷]، با استفاده از یک مدل عددی دوبعدی به بهینه‌سازی هندسه کانال جریان شامل، نسبت عرض کانال به عرض شانه (فاصله بین دو کانال) و ارتفاع کانال پرداخته‌اند. علاوه بر بررسی اثر سطح مقطع کانال، مطالعات زیادی نیز روی اثر مسیر کانال بر کارایی پیل سوختی انجام شده است. جریوسوینتا و همکاران [۸]، با استفاده از یک مدل عددی سه‌بعدی به بررسی اثر طول، انحناء در گوشه‌ها (روش ماشین‌کاری) و عمق کانال جریان مارپیچ بر کارایی پیل سوختی پرداختند. بر این اساس با توجه به نتایج آزمایشگاهی و مدل‌سازی، بهترین عملکرد از لحاظ توزیع سرعت، فشار و ولتاژ خروجی پیل (منحنی ولتاژ - چگالی جریان پیل سوختی)، مربوط به کانال ۶ مسیره مارپیچ با گوشه‌های تیز است. لئو و همکاران [۹]، به بررسی اثر مانع در مسیر کانال جریان بر غلظت واکنشگرها در کاتالیست و افزایش چگالی جریان پرداختند. در این مدل‌سازی، اثر تشکیل آب در ولتاژهای پایین در نظر گرفته شده است. بر اساس نتایج به‌دست‌آمده از این مدل‌سازی غلظت واکنشگرها

اساس با خلاف جهت کردن مسیرهای آند و کاتد، مقدار رطوبت در غشا توزیع یکنواخت‌تری داشته، در نتیجه دوام و بازده پیل افزایش می‌یابد. راموس آلواردو و همکاران [۱۷]، با به‌کارگیری مدل سه‌بعدی تک فاز در نرم‌افزار فلوننت، کارایی تک سل پیل سوختی پلیمری با دو نوع کانال مارپیچ متقارن را مورد بررسی قرار دادند. نتایج حاصل از این مدل‌سازی نشان داد که الگوی بهینه کانال‌های متقارن، سبب بهبود توزیع سوخت در سطح کاتالیست و در نتیجه موجب بهبود عملکرد پیل سوختی می‌شود. بررسی جامع طراحی کانال‌های پیل سوختی پلیمری توسط آیجینا و همکاران [۱۸]، نشان داد که پارامترهای هندسی کانال‌های جریان سیال می‌توانند تأثیر قابل توجهی بر کارایی کلی پیل سوختی پلیمری داشته باشند. علاوه بر این مشکلات این پیل‌ها شامل، انتقال جرم، مدیریت آب و عدم توزیع یکنواخت گونه‌های واکنشگر را می‌توان با انتخاب مناسب طرح کانال برطرف کرد و کارایی پیل سوختی را افزایش داد. مانسو و همکاران [۱۹] در یک مقاله مروری، جمع‌بندی و خلاصه نتایج تحقیقات و نوشته‌های علمی سال‌های اخیر در مورد بررسی اثر پارامترهای هندسی کانال‌های جریان بر کارایی پیل سوختی پلیمری را ارائه نمود. لئو و همکاران [۲۰]، با انجام یک سری از آزمایش‌ها به بررسی اثر مسیر کانال‌های جریان بر کارایی تک سل پیل سوختی پلیمری پرداختند. آن‌ها مسیرهای مختلف موجود در تحقیقات پیشین شامل، کانال‌های مارپیچ، موازی (دو طرح)، متقاطع، درهم‌تنیده و حلزونی را با طرح‌های جدید پیشنهادی خودشان با عنوان کانال‌های مارپیچ متقارن، مورد بررسی قرار دادند. نتایج آن‌ها نشان داد، کانال‌های مارپیچ از نظر انتقال جرم و مدیریت آب، بهترین کارایی را دارند و کانال‌های مارپیچ متقارن را برای پیل‌های سوختی پلیمری با سطح‌فعال نسبتاً بزرگ پیشنهاد کردند.

همان‌طور که در مرور بر مطالعات گذشته نشان داده شد، بررسی اثر کانال‌های جریان و طراحی الگوهای جدید کانال جریان، یکی از زمینه‌های مطالعاتی فعال در زمینه‌ی پیل‌های سوختی پلیمری است. در این تحقیق، با الهام از مطالعات پیشین، برای اولین بار، یک الگوی جدید مسیر کانال جریان با عنوان کانال مارپیچ متقارن طراحی و ساخته شده است و عملکرد آن در یک پیل سوختی پلیمری به‌صورت آزمایشگاهی و در شرایط مختلف، مورد بررسی قرار گرفته

در سطح کاتالیست با افزایش عرض و تعداد موانع افزایش می‌یابد. علاوه بر این در چگالی جریان‌های پایین، وجود مانع اثر قابل توجهی بر ولتاژ خروجی پیل ندارد؛ ولی در چگالی جریان‌های بالا این اثر محسوس است. در ادامه وانگ و همکاران [۱۰]، با استفاده از یک مدل سه‌بعدی برای پیل سوختی به بررسی اثر استفاده از مانع در کانال‌های مارپیچ پرداختند. بررسی آن‌ها نشان داد که استفاده از مانع در جریان‌های بالا (ولتاژ پایین)، کارایی پیل را افزایش می‌دهد. اطیابی و همکاران [۱۱]، اثر وجود مانع در کانال‌های جریان کاتد بر انتقال واکنش‌دهنده‌ها و عملکرد پیل سوختی غشا پلیمری را مورد بررسی قرار دادند. بررسی آن‌ها نشان داد که انتقال موضعی واکنش‌دهنده‌ها، تولید چگالی جریان محلی و عملکرد پیل در حضور موانع بهبود می‌یابند. حیدری و افشاری [۱۲]، به بررسی به‌کارگیری فوم فلزی به‌عنوان کانال پخش گاز پرداختند. بررسی آن‌ها نشان داد که با استفاده از فوم فلزی به‌عنوان پخش‌کننده گاز، توزیع دما داخل پیل یکنواخت‌تر و ماکزیمم دما کمتر هست، ولی افت فشار بیشتری در کانال‌های جریان اتفاق می‌افتد.

تاکانی و همکاران [۱۳]، به بررسی مدل‌های رایج (موازی، مارپیچ و درهم‌تنیده) کانال‌های پیل سوختی پلیمری دمابالا به‌صورت آزمایشگاهی پرداختند. آن‌ها نشان دادند که کانال مارپیچ با ۵ مسیره بهترین نتیجه را از نظر چگالی توان با توجه به کمترین افت فشار گاز به دست می‌دهد. وانگ و همکاران [۱۴]، با استفاده از یک مدل دوبعدی، به‌صورت عددی به بررسی اثر تعداد مسیر در کانال‌های مارپیچ بر انتقال گونه‌ها و عملکرد پیل سوختی پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد که کانال مارپیچ تک مسیره، به‌عنوان بهترین طراحی از لحاظ حذف آب و عملکرد پیل است. وانگ و همکاران [۱۵]، با استفاده از مدلی سه‌بعدی و دو فاز به‌صورت عددی به مطالعه اثر مساحت ناحیه فعال (ابعاد پیل) پیل سوختی پلیمری بر ویژگی‌های حالت پایدار پیل شامل، توزیع و انتقال اکسیژن و آب پرداختند. آن‌ها بررسی خود را روی کانال‌های مارپیچ، موازی و درهم‌تنیده انجام دادند. چن و همکاران [۱۶]، به‌صورت آزمایشگاهی و حل عددی با استفاده از روش بخشی و مدل متمرکز به بررسی اثر الگوها و روش‌های مختلف چیدمان کانال‌های جریان بر توزیع چگالی جریان و مقدار آب در پیل سوختی پلیمری پرداختند. بر این

سپس مدل تولید شده در این نرم‌افزار توسط دستگاه ماشین تراش روی صفحات گرافیت ماشین‌کاری شده است. مدل ساخته شده و مدل طراحی شده در نرم‌افزار، در شکل ۱ نشان داده شده‌اند. هر دو مدل، ابعاد و مساحت یکسانی دارند. ابعاد ناحیه فعال طوری انتخاب شده است که بتوان توان نامی ۱۰ وات را از پیل گرفت. این ابعاد، در شکل ۱ نشان داده شده است. از این نوع کانال هم برای الکتروود آند و هم برای الکتروود کاتد استفاده شده است. ابعاد سطح مقطع کانال، $1 \times 1/2$ میلی‌متر مربع و قطر سوراخ‌های ورودی و خروجی واکنش‌گرها، ۴ میلی‌متر انتخاب شده‌اند. مساحت سطح فعال پیل، حدود ۲۵ سانتی‌متر مربع است. پیل سوختی ساخته شده که شامل دو صفحه نگه‌دارنده، دو صفحه جمع‌کننده مسی، دو صفحه دوقطبی گرافیتی با کانال‌های ساخته شده روی آن‌ها، دو کانال‌های پخش گاز و مجموعه الکتروود-غشاء است، در شکل ۲ نشان داده شده است. مجموعه غشاء-الکتروود از پلاتین با باردهی $0/4$ میلی‌گرم بر سانتی‌متر مربع پلاتین در سمت کاتد و $0/1$ میلی‌گرم بر سانتی‌متر مربع پلاتین در سمت آند، به‌عنوان کاتالیست و از نفیون-۱۱۷ به‌عنوان غشاء تشکیل شده است.

۲-۲- فرایند آزمایش‌ها

کارایی پیل سوختی ساخته شده در دما و رطوبت نسبی مختلف توسط دستگاه تست پیل سوختی 850e به همراه مرطوب ساز، مورد ارزیابی قرار گرفته است. دستگاه تست پیل سوختی 850e، توانایی اندازه‌گیری و کنترل مقدار دبی هیدروژن و اکسیژن، ولتاژ و جریان پیل را دارد. علاوه بر این، این دستگاه قابلیت اندازه‌گیری فشار خروجی پیل و کنترل آن را دارد. این آزمایش‌ها در دو دمای ۶۰ و ۸۰ درجه سلسیوس انجام شده است.

در این مطالعه، میزان رطوبت نسبی آند همواره ۱۰۰ درصد در نظر گرفته شده است. به‌منظور بررسی اثر رطوبت نسبی سمت کاتد بر کارایی پیل، آزمایش‌ها در سه رطوبت نسبی شامل، رطوبت نسبی ۳۰، ۵۰ و ۱۰۰ درصد انجام شده است. برای تمامی آزمایش‌ها دبی خشک هیدروژن و اکسیژن هر دو برابر $0/4$ لیتر بر دقیقه می‌باشند. پیل ساخته شده به‌صورت انتها باز با فشار خروجی $1/7$ بار مورد آزمایش قرار گرفته است. با توجه به اینکه کارایی پیل در جریان‌های

است. به‌منظور مطالعه دقیق‌تر ویژگی‌های کانال پیشنهادی، پیل سوختی به‌صورت عددی نیز مورد مطالعه قرار گرفته، نتایج مدل‌سازی عددی با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شده است. لازم به ذکر است که در بسیاری از بررسی‌های عددی انجام شده روی پیل‌های سوختی پلیمری به‌منظور کم کردن پیچیدگی‌های حل عددی، یا فقط یک برش از پیل مدل شده [۲۱-۲۴] و یا از مدل‌سازی عددی یک و یا چندلایه از پیل سوختی (معمولاً لایه کاتالیست آند و کاتد) و یا ابعاد آن (یک‌بعدی و دوبعدی به‌جای سه‌بعدی) صرف‌نظر شده است [۲۲، ۲۵، ۲۶]. هرچند هرکدام از مطالعات پیشین سهمی در افزایش دانش ما نسبت به پیل‌های سوختی دارند، ولی مدل نشدن کامل پیل سوختی سبب می‌شود که نتوان عملکرد پیل را به‌درستی و با دقت مطلوب تعیین کرد. ضمن اینکه تعیین شرایط مرزی بین لایه‌ها نیز به‌درستی قابل انجام نخواهد بود. بدین منظور و برای درک صحیح دینامیک سیال و فرآیندهای الکتروشیمیایی پیل سوختی، مدل‌سازی عددی تک پیل ساخته شده با در نظر گرفتن تمام لایه‌های پیل سوختی (شامل کانال‌ها، ناحیه پخش گاز، لایه کاتالیست و غشاء) و در ابعاد واقعی انجام شده است.

۲- فرایند ساخت و آزمایش کانال جریان

۲-۱- طراحی و ساخت کانال

نتایج حاصل از مطالعات پیشین نشان می‌دهد که بهترین نوع کانال برای پیل سوختی پلیمری، کانال‌های مارپیچ است که بهترین کارایی را از نظر مدیریت آب و جلوگیری از غرقاب شدن پیل دارد. مهم‌ترین مشکل کانال‌های مارپیچ ساده، افت فشار زیاد آن‌ها است که مقدار تلفات پارازیتی (استفاده از انرژی الکتریکی تولیدی پیل در سامانه‌های جانبی خودش) شامل، الکتریسیته لازم برای پمپاژ سوخت و اکسیدکننده به پیل را افزایش می‌دهد. برای غلبه بر این مشکل، در این تحقیق برای اولین بار، یک نوع خاص از کانال‌های مارپیچ به‌عنوان کانال‌های مارپیچ متقارن (جدید) پیشنهاد، طراحی و ساخته شده است. بدین منظور، ابتدا مدل الگوی پیشنهادی برای پیل در نرم‌افزار طراحی سالیدورک^۱ ساخته شده است.

¹ Flooding

² SolidWork

جدول ۱- پارامترهای ثابت در انجام آزمایش‌ها

مقدار	واحد	متغیر
۰/۴	لیتر بر دقیقه استاندارد	دبی حجمی هوای خشک ورودی
۰/۴	لیتر بر دقیقه استاندارد	دبی حجمی هیدروژن خشک ورودی
٪۱۰۰	-	درصد رطوبت نسبی گازهای آند
۱/۷	بار	فشار خروجی ^۲ گازهای آند و کاتد

۳- مدل‌سازی عددی پیل سوختی

برای درک صحیح دینامیک سیال و فرایندهای الکتروشیمیایی پیل سوختی، یک حل عددی کامل شامل، معادلات ناویر-استوکس، بقاء گونه‌های جرمی، بقاء انرژی و بقا بار الکتریکی در تمام لایه‌های پیل سوختی شامل، کانال‌های جریان گاز آند و کاتد، لایه‌های پخش‌کننده گاز آند و کاتد، لایه‌های کاتالیست آند و کاتد و غشاء به کار گرفته شده است.

جدول ۲- پارامترهای متغیر در انجام آزمایش‌ها

دامنه تغییرات	واحد	متغیر
با استفاده از معادله (۱)	-	دمای گازهای ورودی سمت کاتد
دمای پیل سوختی	سلسیوس	دمای گازهای ورودی سمت آند
٪۳۰، ٪۵۰ و ٪۱۰۰	-	درصد رطوبت نسبی گازهای کاتد
۶۰ (۳۳۳)، ۸۰ (۳۵۳)	سلسیوس (کلوین)	دمای کاری پیل سوختی

۳-۱- معادلات حاکم

یکی از مهم‌ترین مراحل در مدل‌سازی ریاضی پدیده‌ها و سیستم‌های فیزیکی، انتخاب فرضیات مناسب و منطقی است. در این تحقیق، فرضیات زیر در نظر گرفته شده است:

خلاف جهت نسبت به جریان‌های هم‌جهت بهتر است [۱۶] جریان هیدروژن در سمت آند و اکسیژن در سمت کاتد، در خلاف جهت هم می‌باشند.

۲-۳- شرح آزمایش‌ها

در جداول ۱ و ۲، پارامترهای ثابت و متغیر و دامنه تغییرات آن‌ها و متغیرهای خروجی اندازه‌گیری شده در آزمایش‌ها، نمایش داده شده است. جزئیات شرایط آزمایش به شرح ذیل است:

۱- دبی حجمی هوا و هیدروژن خشک ورودی به مرطوب‌کننده برابر ۰/۴ لیتر بر دقیقه استاندارد^۱ است. دبی جرمی با استفاده از دمای کاری پیل و تبدیل واحد مناسب به دست می‌آید. به‌عنوان مثال، با توجه به شرایط فوق در دمای ۸۰ درجه سلسیوس، رطوبت نسبی ۵۰ درصد کاتد، دمای مرطوب ساز ۶۳ درجه سلسیوس به دست می‌آید و کسر جرمی هیدروژن ۰/۲۶۸۹، کسر جرمی اکسیژن ۰/۲۲۴۸، دبی جرمی آند^۶ $10^{-6} \times 2/45.3$ کیلوگرم بر ثانیه و دبی جرمی کاتد^۵ $10^{-5} \times 2/30.26$ کیلوگرم بر ثانیه است.

۲- دمای ورودی سمت آند برای هر آزمایش برابر دمای پیل بوده، اما برای سمت کاتد با توجه به میزان رطوبت ورودی متغیر دمای ورودی گازهای شرکت‌کننده به پیل متغیر است. برای ایجاد رطوبت نسبی موردنیاز در دمای کاری پیل، دمای گازهای ورودی به مرطوب ساز و دمای مرطوب ساز به نحوی تنظیم شده که رطوبت نسبی موردنظر پیل به دست آید. این دما از معادله (۱) به دست می‌آید:

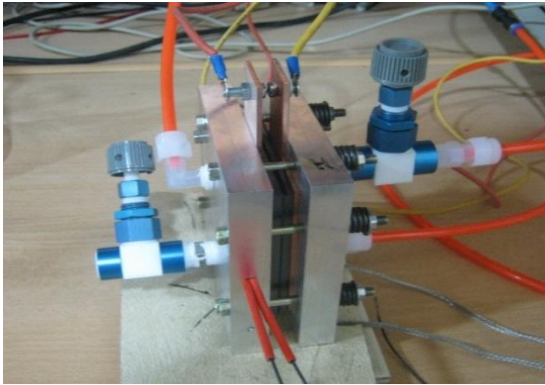
$$P_{sat}(T_{in}^{ca}) = \frac{RH^{ca} \times P_{sat}(T)}{RH_{HF}} \quad (1)$$

در معادله بالا P_{sat} ، T_{in}^{ca} ، RH^{ca} ، $RH^{HF} = 100\%$ و T به ترتیب، فشار اشباع بخار آب، دمای ورودی گازهای کاتد (دمای مرطوب ساز)، رطوبت نسبی کاتد، رطوبت نسبی مرطوب ساز و دمای پیل سوختی می‌باشند.

۳- هر آزمایش چهار بار تکرار شده تا نتایج مورد اعتماد باشند.

² Back Pressure

¹ SLPM



شکل ۲- پیل سوختی پلیمری ساخته‌شده به همراه اتصالات

برای مدل‌سازی عددی پیل سوختی، از روش تک ناحیه‌ای استفاده شده است. معادلات حاکم بر پیل سوختی پلیمری با توجه به فرایندهای فیزیکی و شیمیایی پیل شامل، معادلات بقای جرم، مؤنتم، انرژی، گونه‌های شیمیایی و جریان الکتریکی است.

این معادلات بعد از اعمال فرضیات فوق به صورت رابطه (۲) درمی‌آیند [۲۴، ۱۱]:

- معادله بقاء جرم:

$$\nabla \cdot (\rho \vec{V}) = 0 \quad (2)$$

که ρ چگالی و \vec{V} بردار سرعت است.

- معادله بقاء مؤنتم [۲۷]:

$$\frac{1}{\varepsilon} (\rho \vec{V}) \cdot \nabla \vec{V} = -\nabla P + \nabla \cdot (\mu^{eff} \nabla \vec{V}) + S_M \quad (3)$$

P فشار سیال، μ^{eff} لزجت متوسط و مؤثر مخلوط، S_M ترم چشمه مؤنتم و ε ضریب تخلخل است.

معادله بقاء انرژی:

$$\nabla \cdot (\rho C_p \vec{V} T) = \nabla \cdot (k^{eff} \nabla T) + S_T \quad (4)$$

C_p ظرفیت گرمایی ویژه متوسط مخلوط، T دما، k^{eff} ضریب هدایت حرارتی مؤثر و S_T ترم چشمه بقاء انرژی است.

- معادله بقاء برای گونه‌ها (اجزا):

$$\nabla \cdot (\vec{V} Y_i) = \nabla \cdot (\rho D_i^{eff} \nabla Y_i) + S_{S-i} \quad (5)$$

Y_i کسر جرمی گونه i ، D_i^{eff} ضریب پخش مؤثر در محیط متخلخل و S_{S-i} ، ترم چشمه برای گونه i می‌باشند. ضرایب نفوذ مؤثر گازها در محیط متخلخل از معادله (۶) به دست می‌آیند [۲۸]:

۱- گازها، بخار و مخلوط آن‌ها، گاز ایدئال (کامل) در نظر گرفته شده‌اند.

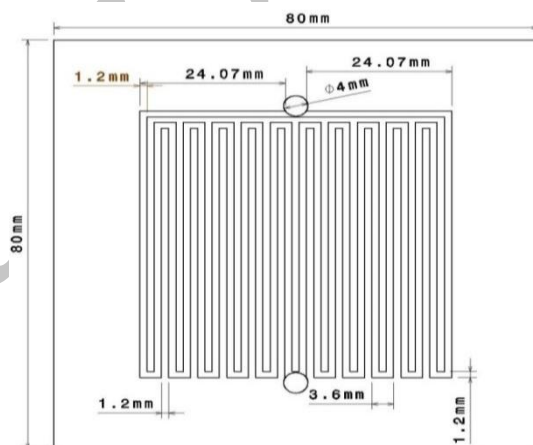
۲- جریان در همه‌جا آرام در نظر گرفته شده است (با توجه به ابعاد کانال‌ها و دبی ورودی، عدد رینولدز در کانال‌ها در حدود ۱۰۰۰ است؛ بنابراین این فرض صحیحی است و خطایی ایجاد نمی‌کند).

۳- با توجه به اینکه سرعت سیال کم و دمای پیل نسبتاً پایین است، گازها تراکم ناپذیر در نظر گرفته شده‌اند.

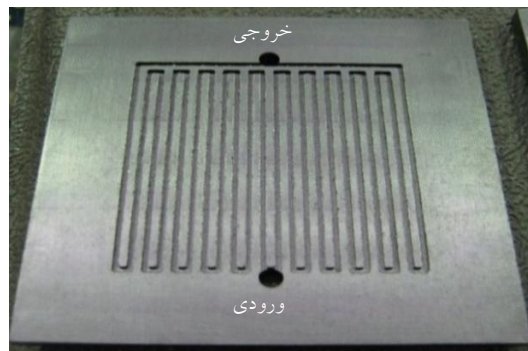
۴- مدل‌سازی پایا در نظر گرفته شده است.

۵- الکترودها، لایه‌های کاتالیست و غشاء ایزوتروپیک می‌باشند.

۶- آب به صورت بخار در نظر گرفته شده است و از تغییر فاز آن به مایع و برعکس صرف‌نظر شده است.



(الف)



(ب)

شکل ۱- الگوی کانال مارپیچ متقارن (جدید) (الف) نقشه طراحی کانال به همراه اندازه‌ها (ب) کانال مارپیچ متقارن (جدید) ساخته شده

$$j_c = aj_{0-c} \left(\frac{C_{O_2}}{C_{O_2}^{ref}} \right) \left\{ \begin{array}{l} -\exp\left(\frac{\alpha_c F \eta_c}{RT}\right) + \\ \exp\left(\frac{-(1-\alpha_c) F \eta_c}{RT}\right) \end{array} \right\} \quad (11)$$

که در این روابط F ثابت فارادی، R ثابت جهانی گازها، α ضریب انتقال بار برای سمت آند و کاتد با توجه به زیروند، a ضریب سطح ظاهری به سطح واقعی کاتالیست، j_0 چگالی جریان مرجع است.

در جدول ۳، η افت فعال‌سازی، K نفوذپذیری هیدرولیکی و U_0 انرژی درونی واکنش است. C_i غلظت گونه i بوده و با استفاده از معادله $C_i = \frac{P_i}{RT}$ به دست می‌آید. C_{total} غلظت کل مخلوط است.

۳-۲- شرایط مرزی و روش حل معادلات

برای حل معادلات حاکم شرایط مرزی زیر در نظر گرفته شده است:

(۱) دبی جرمی و کسر مولی ورودی و فشار خروجی آند و کاتد برابر مقادیر آزمایشگاهی می‌باشند.

(۲) دیوارهای صفحات نگاه‌دارنده و محیط اطراف تک سل غیرقابل نفوذ و سرعت در آن‌ها برابر صفر در نظر گرفته شده است.

(۳) دما در مرزهای خارجی پیل برابر دمای کاری پیل است (دما ثابت).

(۴) پتانسیل الکتریکی در وجه مشترک لایه کاتالیست کاتد/لایه پخش گاز کاتد، برابر ولتاژ پیل و در وجه مشترک لایه کاتالیست آند/لایه پخش گاز آند صفر در نظر گرفته شده است. در بقیه سطوح مشتق اختلاف پتانسیل برابر صفر در نظر گرفته شده است.

معادلات حاکم بر پیل سوختی همراه با شرایط مرزی مشخص شده، با استفاده از نرم‌افزار فلوننت حل شده‌اند. در این نرم‌افزار، معادلات حاکم با استفاده از روش حجم محدود حل می‌شوند. در این تحقیق، میدان‌های سرعت و فشار با استفاده از الگوریتم سیمپل، گسسته‌سازی و حل شده‌اند. به علت همبسته بودن مجموعه معادلات، برای حل آن‌ها از یک‌روند تکراری استفاده شده است. در جدول ۴، پارامترهای اساسی در حل مسئله نشان داده شده است.

$$D_i^{eff} = \varepsilon^{1.5} D_i \quad (6)$$

• بقاء بار الکتریکی

اختلاف پتانسیل عامل انتقال الکترون، در فاز جامد (الکتروُد) و انتقال یون پروتون، در غشاء است. اختلاف پتانسیل بین فاز جامد و غشاء، در لایه کاتالیست افت پتانسیل فعال‌سازی نامیده می‌شود. چگالی جریان بار در پیل سوختی شامل، جریان یون در غشاء j_m و جریان الکترون در فاز جامد رسانای الکترون j_s است. در هر نقطه از پیل سوختی مجموع جریان‌ها باید برابر جریان مدار خارجی پیل باشد (یعنی: $j = j_m + j_s$) با توجه به اینکه در هر شرایط کاری، جریان مدار خارجی پیل j ثابت است، معادله بقاء جریان به صورت رابطه (۷) است:

$$\nabla \cdot j_m + \nabla \cdot j_s = 0 \quad (7)$$

با استفاده از قانون اهم، معادلات بقاء بار را می‌توان به اختلاف پتانسیل مرتبط کرد. این معادلات به صورت زیر می‌باشند [۲۳]:

معادله اختلاف پتانسیل برای انتقال الکترون در جامد:

$$\nabla \cdot (\sigma_s^{eff} \nabla \phi_s) = S_{\phi_s} \quad (8)$$

معادله اختلاف پتانسیل برای انتقال یون (پروتون) در غشاء:

$$\nabla \cdot (\sigma_m^{eff} \nabla \phi_m) = S_{\phi_m} \quad (9)$$

در معادلات (۸) و (۹)، σ_s^{eff} هدایت الکتریکی مؤثر در فاز جامد، σ_m^{eff} هدایت یونی مؤثر در غشای پلیمری، ϕ_s پتانسیل فاز جامد و ϕ_m پتانسیل غشاء است. ترم‌های منبع در این معادلات، فقط در لایه‌های کاتالیست مخالف صفر هستند و در آنجا هم به صورت $S_{\phi_s} = -S_{\phi_m}$ باهم رابطه دارند.

ترم‌های چشمه در معادلات بقاء در جدول ۳ آمده است. در این جدول j_a و j_c به ترتیب، چگالی جریان در واکنش‌های آندی و کاتدی می‌باشند که در این تحقیق با استفاده از معادله باتلر-ولمر مدل‌سازی شده، از معادلات (۱۰-۱۱) به دست می‌آیند [۲۴]:

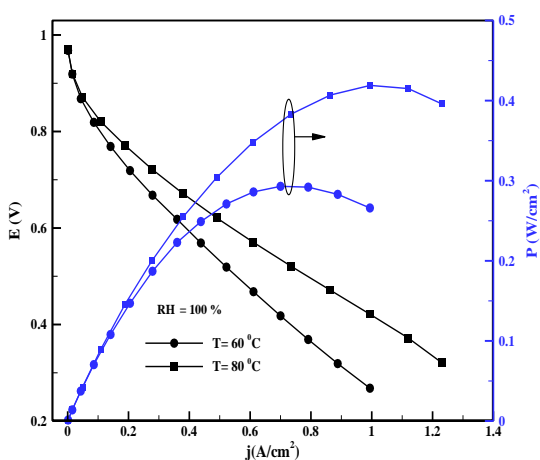
$$j_a = aj_{0-a} \left(\frac{C_{H_2}}{C_{H_2}^{ref}} \right)^{0.5} \left\{ \begin{array}{l} \exp\left(\frac{\alpha_a F \eta_a}{RT}\right) - \\ \exp\left(\frac{-(1-\alpha_a) F \eta_a}{RT}\right) \end{array} \right\} \quad (10)$$

۴- نتایج و بحث

۴-۱- نتایج آزمایشگاهی

۴-۱-۱- تأثیر دمای کاری بر کارایی پیل ساخته‌شده

در پیل‌های سوختی دو مبحث برای دما مطرح می‌شود؛ یکی دمای کاری پیل و دیگری توزیع دما درون پیل است. دمای کاری، دمایی است که طراح سعی می‌کند با استفاده از سامانه‌های سرمایش و حتی گرمایش، قسمت‌های قابل دسترسی را در این دما نگه دارد.



شکل ۵- نمودار ولتاژ- جریان پیل سوختی ساخته‌شده در رطوبت نسبی ۱۰۰ درصد کاتد

با این وجود به دلیل چشمه‌های حرارتی، دما در قسمت‌های داخلی پیل یکسان نیست و دارای توزیع غیریکنواخت است. این توزیع غیریکنواخت در ادامه مورد بحث و بررسی قرار می‌گیرد. در شکل ۵، اثر دمای کاری بر کارایی پیل ساخته‌شده در رطوبت نسبی کاتد ۱۰۰ درصد را نشان می‌دهد. در این شکل، نمودار ولتاژ و چگالی توان پیل برحسب چگالی جریان الکتریکی رسم شده‌اند. چگالی توان حاصل ضرب ولتاژ پیل سوختی در چگالی جریان است و در نقطه بهینه، مشتق چگالی توان برابر صفر است. در این شکل، نقطه ماکزیمم نمودار چگالی توان نقطه بهینه ایدئال برای کارکرد پیل سوختی است؛ زیرا در این نقطه، پیل بهترین جریان خروجی و توان را به‌صورت هم‌زمان دارا است. همان‌طور که در این شکل دیده می‌شود، پیل ساخته شده

جدول ۳- ترم‌های چشمه برای نواحی مختلف

معادله	لایه پخش گاز	لایه‌های کاتالیست	غشاء
مؤمنتم	$S_M = -\frac{\mu}{K} \vec{V}$	$S_M = -\frac{\mu}{K} \vec{V}$	$S_M = -\frac{\mu}{K} \vec{V}$
انرژی	$S_T = 0$	$S_T = j \left(\eta + T \frac{dU_0}{dT} \right) + \frac{I^2}{\sigma_{eff}}$	$S_T = \frac{I^2}{\sigma_{eff}}$
گونه‌های	$S_{S-H_2} = 0$	$S_{S-H_2} = \frac{j_a}{2FC_{total-a}}$	$S_{S-H_2} = 0$
جرمی	$S_{S-O_2} = 0$	$S_{S-O_2} = \frac{j_c}{4FC_{total-c}}$	$S_{S-O_2} = 0$
	$S_{S-H_2O} = 0$	$S_{S-H_2O} = \frac{j_c}{2FC_{total-c}}$	$S_{S-H_2O} = 0$
پتانسیل جامد	$S_{\phi_s} = 0$	$S_{\phi_s} = j$	$S_{\phi_s} = 0$
پتانسیل غشاء	$S_{\phi_m} = 0$	$S_{\phi_m} = j$	$S_{\phi_m} = 0$

جدول ۴- پارامترهای اساسی پیل سوختی پلیمری

پارامتر	مقدار	توضیحات
ϵ^{GDL}	۰/۵۵	تخلخل لایه پخش کننده گاز
K^{GDL}	$1/12 \times 10^{-12} [m^2]$	ضریب لایه پخش کننده گاز
σ_s^{GDL}	$5000 [ohm^{-1} \cdot m^{-1}]$	رسانایی الکتریکی لایه پخش کننده گاز
ϵ^{ca}	۰/۴۷۵	تخلخل لایه‌های کاتالیست
σ_s^{ca}	$1000 [ohm^{-1} \cdot m^{-1}]$	رسانایی لایه‌های کاتالیست
K^{ca}	$1/12 \times 10^{-12} [m^2]$	نفوذپذیری لایه‌های کاتالیست
$\sigma_s^{current}$	$[ohm^{-1} \cdot m^{-1}]$ ۸۳۰۰۰	رسانایی الکتریکی صفحات جمع کننده
D_{H_2}	$11 \times 10^{-5} [m^2 \cdot s^{-1}]$	ضریب پخش مرجع هیدروژن
D_{H_2O}	$7/35 \times 10^{-5} [m^2 \cdot s^{-1}]$	ضریب پخش مرجع آب
D_{O_2}	$3/2 \times 10^{-5} [m^2 \cdot s^{-1}]$	ضریب پخش مرجع اکسیژن
P_{Ref}	$101325 [Pa]$	فشار مرجع
σ_m	$1/23 [ohm^{-1} \cdot m^{-1}]$ ۰/۰۰۳۳۹	رسانایی یونی غشا
$C_{O_2}^{ref}$	$[knol \cdot m^{-3}]$	غلظت مرجع اکسیژن
$C_{H_2}^{ref}$	$0/0564 [knol \cdot m^{-3}]$	غلظت مرجع هیدروژن

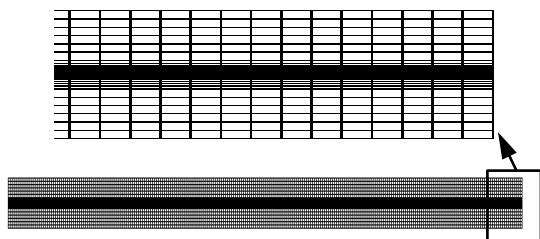
با افزایش رطوبت نسبی کاهش می‌یابد؛ زیرا در این حالت مقدار آب تولیدی در پیل زیاد است و با افزایش رطوبت نسبی ورودی مقدار آب موجود در سمت کاتد زیاد شده، آب‌گرفتنی در ناحیه وسیع‌تری از لایه پخش گاز کاتد اتفاق می‌افتد.

۴-۲- نتایج حل عددی پیل سوختی

به منظور اطمینان یافتن از استقلال نتایج از شبکه‌بندی مستطیلی به کار گرفته شده، محاسبات برای چندین شبکه‌بندی مختلف انجام شد و چگالی جریان در ولتاژ ۰/۶ ولت به عنوان ولتاژ شاخص، در جدول ۵ ارائه شده است. نتایج به‌دست‌آمده نشان می‌دهد که برای شبکه‌بندی مستطیلی با تعداد ۶۵۰۰۰۰ حجم کنترل، می‌توان نتایج را مستقل از شبکه‌بندی در نظر گرفت؛ بنابراین در محاسباتی که در ادامه می‌آید چنین شبکه‌بندی‌ای به کاررفته شده است. در این شبکه‌بندی، تعداد گره در جهت طول کانال ۶۰ عدد و در جهت عرض مسیر کانال‌ها ۲۶۰ عدد است و این شبکه‌بندی به نحوی انجام شده است که لایه کاتالیست و غشاء ریزترین تقسیم‌بندی را داشته باشند. در شکل ۷، نمای روبرو از نواحی مدل‌سازی شده به همراه شبکه‌بندی آن نمایش داده شده است.

جدول ۵- بررسی استقلال از مش نتایج در ولتاژ ۰/۶ ولت

تعداد حجم کنترل	چگالی جریان (آمپر بر سانتی‌متر مربع)
۴۰۰۰۰۰	۰/۳۷۴
۶۵۰۰۰۰	۰/۳۶۵
۱۱۰۰۰۰۰	۰/۳۶



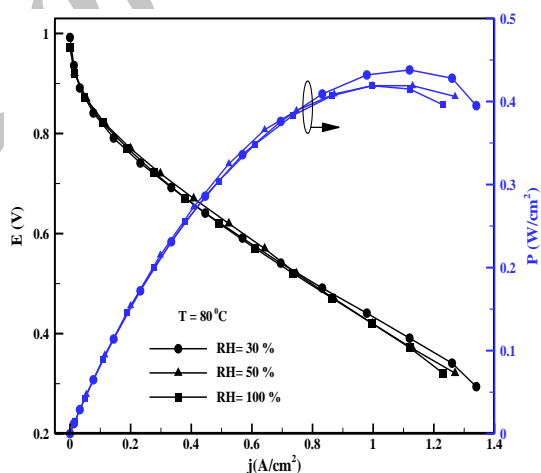
شکل ۷- نمای روبرو از شبکه‌بندی نواحی مدل‌سازی شده

قادر است، در نقطه کارکرد بهینه چگالی توان ۰/۴۴ وات بر سانتی‌متر مربع (توان ۱۱ وات) را تولید نماید.

همان‌طور که این شکل نشان می‌دهد، افزایش دما سبب افزایش کارایی پیل می‌شود. این افزایش به دلیل کاهش افت فعال‌سازی و افت اهمی با افزایش دما است. همان‌طور که دیده می‌شود، منحنی رفتار پیل در دماهای پایین به همدیگر نزدیک هستند و با افزایش چگالی جریان این نمودارها از هم فاصله بیشتری می‌گیرند. دلیل این رفتار، این است که افت اهمی و تا حدی افت فعال‌سازی به چگالی جریان وابسته می‌باشند و با افزایش چگالی جریان این افت‌ها نیز بیشتر شده، نمودار ولتاژ-جریان در دو دما اختلاف بیشتری پیدا می‌کنند.

۴-۱-۲- اثر میزان مرطوب‌سازی (رطوبت نسبی) گازهای کاتد

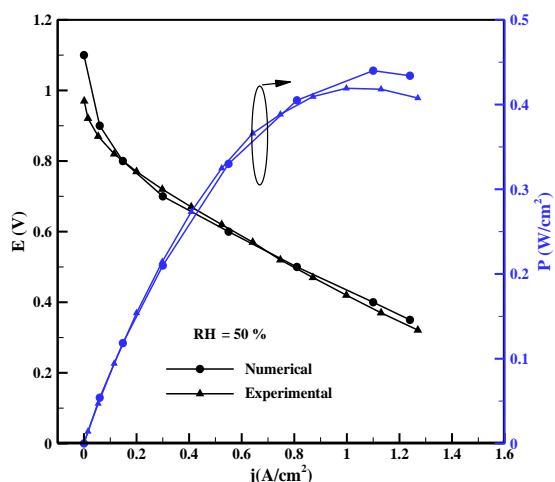
در شکل ۶، اثر رطوبت نسبی گازهای کاتد (اکسیژن) بر کارایی پیل سوختی نشان داده شده است.



شکل ۶- اثر رطوبت نسبی سمت کاتد بر نمودار ولتاژ-جریان پیل سوختی ساخته‌شده در دمای ۸۰ درجه سلسیوس

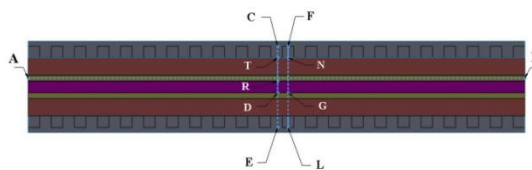
همان‌طور که در شکل ۶ دیده می‌شود، اثر رطوبت نسبی در محدوده مورد بررسی خیلی زیاد نیست. دلیل این رفتار، این است که به علت پدیده انتقال آب به‌وسیله درگ الکترواسمزیک در صورتی که گازها در سمت آند مرطوب باشد، سمت کاتد نیز تا حدی مرطوب خواهد شد. با افزایش چگالی جریان‌های بالاتر از ۰/۸ آمپر بر سانتی‌متر مربع عملکرد پیل

باهم مقایسه شده‌اند. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در این شرایط، همخوانی خوبی بین نتایج آزمایشگاهی و نتایج عددی وجود دارد. خطای نسبی بین نتایج عددی و آزمایشگاهی کمتر از ۵ درصد است.



شکل ۹- مقایسه نتایج عددی و آزمایشگاهی در دمای پیل ۸۰ درجه سلسیوس و رطوبت نسبی ۵۰ درصد سمت کاتد

همان‌طور که می‌دانیم مقدار رطوبتی که هوای خشک می‌تواند به‌صورت رطوبت در خود ذخیره کند (فشار بخار) با افزایش دما به‌سرعت افزایش می‌یابد؛ بنابراین هرچه دما بالاتر باشد، پیل سوختی با مقدار بیشتری رطوبت موجود در پیل به حالت غرقابی می‌رسد. دلیل دقت بسیار خوب روش عددی این است که در این شرایط، چون دمای پیل بالا است (۸۰ درصد سلسیوس)، غرقابی شدن کانال‌های پیل که می‌تواند صحت فرضیات ۱ و ۶ را از بین ببرد، در این دما در چگالی جریان‌های بالاتر از ۱/۲ آمپر بر سانتیمتر مربع اتفاق می‌افتد؛ در نتیجه دقت نتایج به‌دست‌آمده بسیار خوب است. همان‌طور که در این شکل دیده می‌شود، در چگالی‌های جریان‌های بالاتر از ۱ آمپر بر سانتی‌متر مربع دقت نتایج عددی به‌طور مجانبی رو به کاهش است و روش عددی به دلیل اینکه قادر نیست غرقابی بودن را مدل نماید، مقدار ولتاژ را بیشتر از مقدار واقعی محاسبه می‌نماید. در دماهای کمتر از ۸۰ درجه سلسیوس نتایج عددی ممکن است، خطای بیشتری داشته باشند.



شکل ۸- نمای شماتیک از نواحی مدل‌سازی شده به همراه خطوط کمکی برای ارائه نتایج

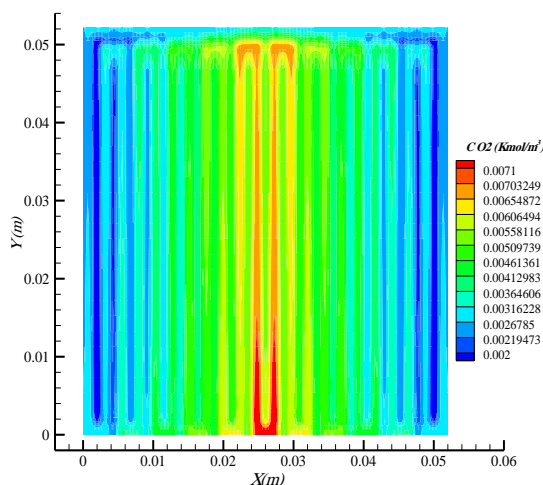
شکل ۸ نواحی مدل‌سازی شده در نرم‌افزار و خطوطی را نشان می‌دهد که برای نشان دادن نتایج مورد استفاده قرار گرفته است.

از آنجایی که به دلایل مختلف مثل خطاها در کمیت‌های فیزیکی استفاده شده، خطا ایجاد شده در اثر فرضیات ساده کننده و خطا در روش عددی به کار گرفته شده ممکن است نتایج روش‌های عددی با خطا همراه باشند، باید همواره نتایج حل‌های عددی را با نتایج آزمایشگاهی و یا نتایج عددی تأیید شده مقایسه کرد تا از صحت نتایج عددی اطمینان پیدا نمود.

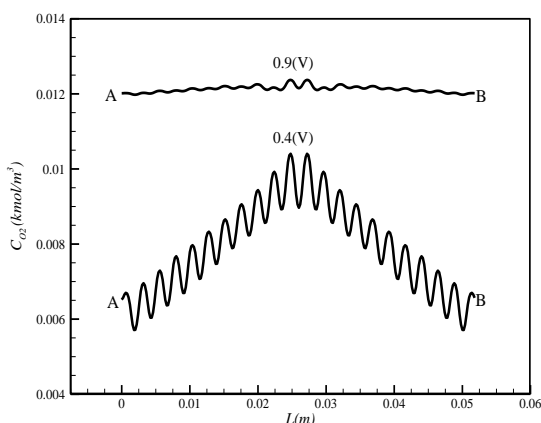
۴-۲-۱- اعتبار سنجی روش عددی

متداول‌ترین راه برای اعتبار مدل پیل سوختی، مقایسه منحنی قطبیت پیل سوختی (نمودار ولتاژ-برحسب چگالی جریان الکتریکی) است. یکی از اهداف ساخت پیل، اعتبارسنجی روش عددی با استفاده از نتایج آزمایشگاهی است. به دلیل ابعاد بسیار کوچک پیل سوختی در راستای عمود بر غشاء (از مرتبه میلی‌متر)، اندازه‌گیری خواص و کمیت‌های فیزیکی و اثر آن‌ها بر کارایی پیل مسئله‌ای چالش‌برانگیز است. حل عددی این امکان را فراهم می‌نماید که بتوان اثر پارامترها و کمیت‌های فیزیکی که به‌طور آزمایشگاهی قابل‌اندازه‌گیری نیستند یا به‌سختی قابل اندازه‌گیری هستند و یا هزینه انجام آن‌ها زیاد است را بر کارایی پیل بررسی و تحلیل کرد. بعد از اطمینان یافتن از صحت نتایج عددی، در ادامه با استفاده از حل عددی به بررسی پیل سوختی ساخته شده خواهیم پرداخت. نتایج ارائه‌شده از این قسمت به بعد برای دمای ۸۰ درجه سلسیوس و رطوبت نسبی ۵۰ درصد بوده، مگر اینکه در متن به مقادیری غیر از این اشاره شود. در شکل ۹، منحنی‌های ولتاژ و توان برحسب چگالی جریان به‌دست‌آمده از نتایج آزمایشگاهی و حل عددی در دمای ۸۰ درجه سلسیوس و رطوبت نسبی ۵۰ درصد و برای کانال مارپیچ متقارن (جدید)

(چگالی جریان پایین) به علت مصرف بسیار کم اکسیژن، غلظت زیاد و توزیع یکنواختی در کل لایه داریم؛ در حالی که در ولتاژ پایین مثل ۰/۴ ولت به علت مصرف زیاد سوخت در لایه کاتالیست، غلظت اکسیژن از وسط (قسمت ورودی) به سمت گوشه‌ها کاهش می‌یابد، دلیل رفتار نوسانی وجود شانه کانال است. شانه، دیواره کانال عبور گاز بوده که علاوه بر ایجاد مسیر برای عبور گاز، نقش انتقال بار الکتریکی و حرارت را به صفحات جمع‌کننده جریان الکتریکی را بر عهده دارد. در این نمودار، بیشترین غلظت در ناحیه وسط کانال‌ها و کمترین آن، در وسط شانه است.



شکل ۱۰- توزیع غلظت اکسیژن در لایه میانی کاتالیست کاتد در چگالی جریان $[A \cdot cm^{-2}]$ ۱/۱ (ولتاژ ۰/۴ ولت)



شکل ۱۱- نمودار مقایسه غلظت اکسیژن در دو ولتاژ متفاوت ۰/۹ و ۰/۴ ولت بر روی خط AB

۴-۲-۳- توزیع دما در پیل

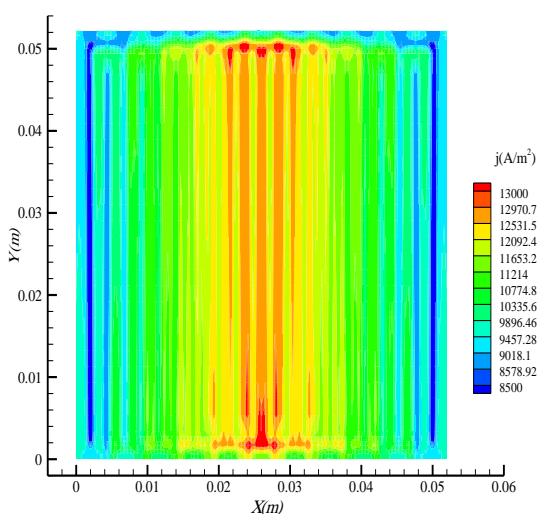
توزیع دما یکنواخت در پیل سوختی پلیمری، نقش اساسی در طول عمر آن دارد؛ زیرا تنش‌های حرارتی در غشاء و کاتالیست، سبب کاهش طول عمر پیل می‌شوند. از آنجایی که برخلاف کانال‌ها سرعت در لایه کاتالیست کم بوده، انتقال حرارت در این لایه غالباً به صورت رسانایی اتفاق می‌افتد. در شکل ۱۲، توزیع دما در لایه میانی کاتالیست کاتد و در ولتاژ ۰/۴ ولت نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، توزیع دمای یکنواختی (بیشینه اختلاف دما حدود ۹ درجه کلون) در پیل ایجاد شده است. در این شکل، توزیع دما از قسمت‌های وسط به کناره‌ها با توجه به کاهش واکنشگر اکسیژن در حال کاهش است. دلیل اینکه این نقاط بیشترین دما را دارند، این است که غلظت اکسیژن بنا به

۴-۲-۲- توزیع اکسیژن در پیل

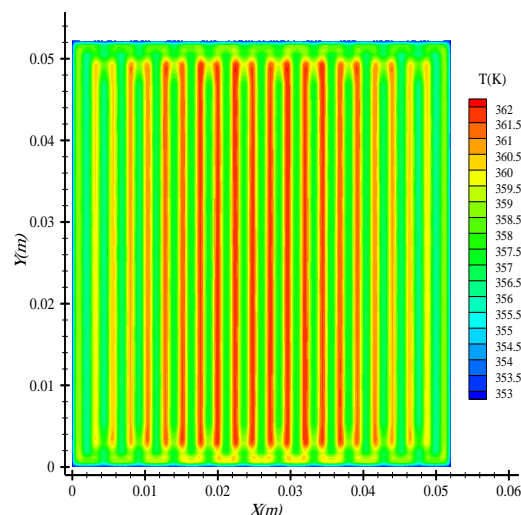
برای اینکه پیل سوختی عملکرد خوبی داشته باشد، باید توزیع سوخت و اکسیدکننده در لایه کاتالیست به نحو مطلوبی انجام شود. می‌دانیم که توزیع غلظت سوخت و اکسیدکننده داخل پیل وابسته به مقدار مصرف آن‌هاست و با تغییر چگالی جریان، مقادیر مصرف آن‌ها نیز تغییر می‌کند. به‌منظور بررسی اثر چگالی جریان، توزیع غلظت اکسیژن در دو چگالی جریان (دو ولتاژ) متفاوت مورد بررسی قرار گرفته است. در شکل ۱۰ توزیع اکسیژن در فصل مشترک کاتالیست کاتد و غشاء کانال نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، از ورودی کانال به سمت خروجی میزان غلظت اکسیژن رفته‌رفته کاهش می‌یابد که به دلیل نفوذ و مصرف آن در لایه کاتالیست در امتداد کانال عبور گاز است. پدیده غالب برای انتقال واکنشگرها از کانال جریان به لایه کاتالیست پخش است. برای انتقال گونه‌ها به این روش، نیاز به کاهش غلظت از کانال به سمت لایه کاتالیست است. نتایج ارائه شده نشان می‌دهد که کانال ساخته شده می‌تواند حتی در چگالی جریان‌های بالا یک توزیع نسبتاً یکنواختی را برای اکسیژن در لایه کاتالیست ایجاد نماید.

در شکل ۱۱، توزیع غلظت اکسیژن در راستای خط AB در صفحه وسط لایه کاتالیست برای دو ولتاژ $[A \cdot cm^{-2}]$ ۰/۴ و ۱/۱ (ولت $[A \cdot cm^{-2}]$ ۰/۰۲۵) نشان داده شده است. همان‌طور که این شکل نشان می‌دهد، در ولتاژهای بالا

در خم‌ها سریع‌تر و چگالی جریان افزایش یافته است. شکل ۱۴ توزیع چگالی جریان روی خط AB در صفحه میانی لایه کاتالیست کاتد برای دو ولتاژ را نشان می‌دهد. همان‌طور که در این شکل دیده می‌شود، برای هر دو ولتاژ چگالی جریان از وسط به دو سمت در حال کاهش است که به دلیل بالا بودن میزان غلظت اکسیژن در قسمت ورودی است. علت موج‌دار بودن خطوط، به خاطر وجود شانه‌ها بین کانال‌های جریان گاز است.



دلایلی که گفته شد، در این نواحی بیشتر است و دیواره‌ها برابر دمای کاری پیل (۳۵۳ درجه کلوین) است.



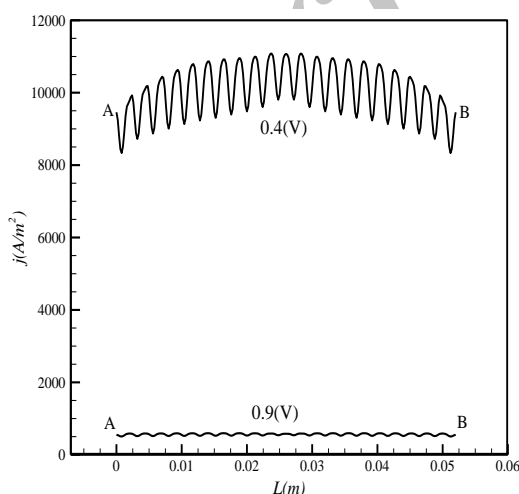
شکل ۱۲- توزیع دما در صفحه میانی لایه کاتالیست کاتد برای ولتاژ ۰/۴ ولت

۴-۲-۴- توزیع چگالی جریان

در این قسمت، به بررسی چگونگی توزیع چگالی جریان در لایه کاتالیست می‌پردازیم. یکی از ویژگی‌هایی که در طراحی کانال‌ها باید مدنظر قرار داد، این است که با توزیع یکنواخت واکنشگرها توزیع دمای یکنواختی را در کل پیل ایجاد نماییم. در شکل ۱۳، توزیع چگالی جریان در دمای ۸۰ درجه سلسیوس، رطوبت نسبی ۵۰ درصد و ولتاژ ۰/۴ ولت (چگالی جریان متوسط $1/1 [A \cdot cm^{-2}]$) در سطح مشترک کاتالیست و غشاء سمت کاتد نشان داده شده است. همان‌طور که این شکل نشان می‌دهد، چگالی جریان از الگوی نسبتاً خوب و یکنواخت برخوردار است. این یکنواختی، نشان‌دهنده توزیع یکنواخت واکنشگرها در لایه کاتالیست است. همان‌طور که در شکل ۱۳ دیده می‌شود، بیش‌ترین چگالی جریان در ورودی و سپس در نواحی اتفاق می‌افتد که کانال‌های جریان تغییر مسیر می‌دهند.

باید توجه کرد، هرچند در حالت کلی غلظت اکسیژن از ورودی به سمت خروجی کاهش می‌یابد و به تبع آن چگالی جریان نیز باید کاهش یابد، ولی به علت اینکه تغییر مسیر کانال سبب می‌شود تا به علت نیروی اینرسی، اختلاط و نفوذ اکسیژن به لایه کاتالیست افزایش یافته، در نتیجه آن واکنش‌ها

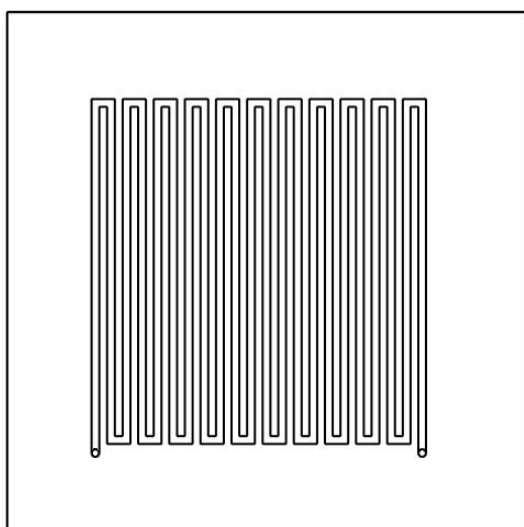
شکل ۱۳- توزیع چگالی جریان در سطح مشترک غشاء و کاتالیست کاتد برای ولتاژ پیل ۰/۴ ولت (چگالی جریان $1/1 [A \cdot cm^{-2}]$)



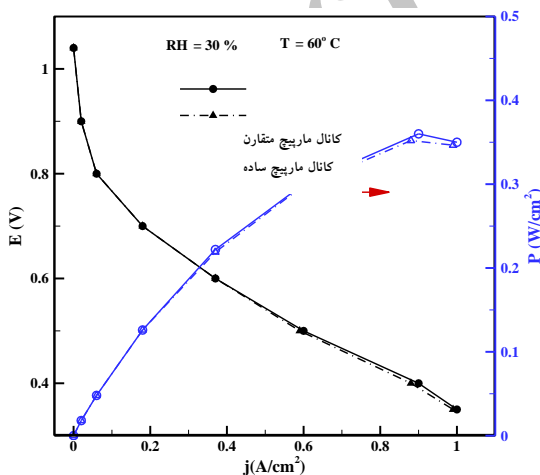
شکل ۱۴- منحنی توزیع چگالی جریان بر روی خط AB در صفحه میانی لایه کاتالیست کاتد

می‌کند؛ بنابراین برای گرفتن بیشینه توان خروجی از پیل، توان موردنیاز کمپرسور باید کمینه شود. افت فشار در پیل به دلیل عبور گاز از محیط متخلخل و نیروی اصطکاک بین جریان (لزجت سیال) و دیوارهای کانال است.

در شکل‌های ۱۷ و ۱۸، کانتور توزیع فشار نسبی در صفحه وسط کانال‌های مارپیچ ساده و مارپیچ متقارن (جدید) نشان داده شده است. همان‌طور که در این دو شکل دیده می‌شود، از ورودی به سمت خروجی فشار افت می‌نماید و این افت فشار برای کانال مارپیچ ساده، بسیار بیشتر است.



شکل ۱۵- نمای شماتیکی از کانال مارپیچ ساده



شکل ۱۶- مقایسه نمودار ولتاژ-جریان پیل سوختی با کانال مارپیچ متقارن (جدید) و مارپیچ ساده

۴-۲-۵- بررسی اثر مسیر کانال

کانال مارپیچ ساده، یکی از بهترین طرح‌های مسیر از نظر مدیریت آب است که از غرقاب شدن کانال‌های جریان جلوگیری می‌نماید. مهم‌ترین مشکل این کانال، افت فشار زیاد در کانال‌های جریان است که تلفات انگلی (استفاده از انرژی الکتریکی تولیدی پیل در سیستم جانبی خودش) را افزایش داده، باعث می‌شود، کارایی کلی پیل کاهش یابد. در این قسمت با استفاده از مدل‌سازی عددی به مقایسه بین کارایی کانال ساخته شده در این تحقیق و کانال مارپیچ ساده می‌پردازیم. به منظور مقایسه این دو کانال، مدل مارپیچ ساده با توجه به ابعاد مدل مارپیچ متقارن (جدید) با همان مشخصات هندسی و خواص فیزیکی آماده شد تا به بررسی ویژگی‌های این کانال پرداخته شود. بدین منظور، کانال مارپیچ ساده کاملاً مشابه و با همان مشخصات هندسی کانال مارپیچ متقارن (جدید) (از لحاظ سطح مقطع کانال، تعداد مسیرها و مساحت سطح فعال) در نرم‌افزار سالدورک طراحی شده و در ادامه بعد از شبکه‌بندی در نرم‌افزار گمیت وارد نرم‌افزار فلونت برای تحلیل شده است. شکل ۱۵، نمای روبرو کانال مارپیچ ساده را نشان می‌دهد. در شکل ۱۶، نمودار ولتاژ-جریان پیل برای دو الگو کانال جریان در شرایط کاری دمایی ۶۰ درجه سانتی‌گراد و رطوبت نسبی ۳۰ درصد نشان داده شده است.

همان‌طور که این شکل نشان می‌دهد، نمودار ولتاژ-چگالی جریان کانال مارپیچ متقارن (جدید) به مقدار بسیار کم از طرح کانال مارپیچ ساده بهتر است؛ اما باید دقت کرد که این به معنی عدم برتری کانال مارپیچ متقارن (جدید) نیست. در ادامه دلیل این ادعا ذکر خواهد شد.

۴-۲-۶- بررسی فشار

یکی از نکاتی که در طراحی کانال‌های جریان واکنشگرها (هوا و سوخت) باید موردتوجه قرار گیرد، این است که افت فشار گازهای عبوری از آن‌ها در حد ممکن کم باشد. افت فشار کم، سبب کاهش تلفات انگلی (استفاده از انرژی الکتریکی تولیدی پیل در سیستم‌های جانبی خودش) می‌شود. واکنشگرها (خصوصاً اکسیدکننده که معمولاً هوا است)، معمولاً به‌وسیله یک کمپرسور برای پیل تأمین می‌شود که این کمپرسور، بخشی از توان تولیدی خروجی پیل سوختی را مصرف (تلف)

محاسبه توان مورد مصرفی کمپرسور فرض شده است که گازها ایدئال و تراکم به صورت هم‌دما انجام شود. به منظور ساده‌تر شدن ارزیابی کارایی دو کانال جریان پارامتر بی‌بعدی به نام فاکتور کارایی^۱ استفاده شده است. این پارامتر به صورت نسبت توان خالص تولیدی پیل به توان کمپرسور تعریف می‌شود و مقدار آن برای دو کانال در شکل ۱۹ نشان داده شده است. همان‌طور که دیده می‌شود، فاکتور کارایی برای کانال مارپیچ متقارن در همه چگالی جریان پیل بیشتر از کانال مارپیچ متقارن ساده است و با افزایش جریان، این اختلاف افزایش می‌یابد؛ به طوری که در چگالی جریان‌های بالاتر این اختلاف به ۴ تا ۵ برابر می‌رسد.

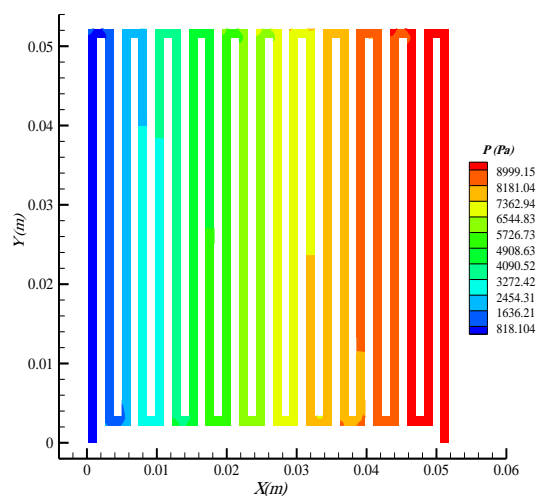
جدول ۶- مقایسه افت فشار در کاتد و توان مصرفی

کمپرسور در کانال مارپیچ متقارن (جدید) و مارپیچ ساده

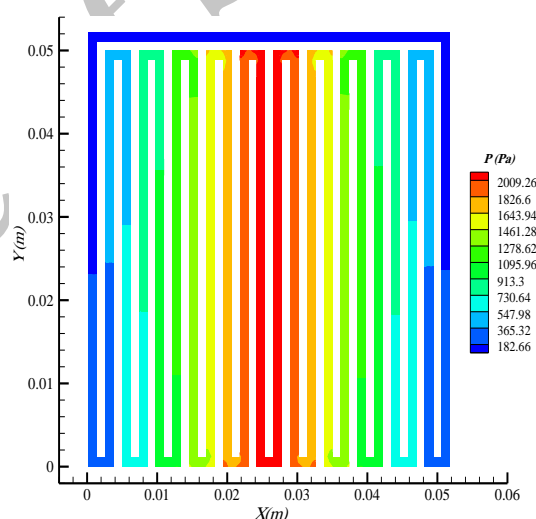
توان خالص تولیدی $P_{Net} (W)$	توان مصرفی کمپرسور $P_{Comp} (W)$	افت فشار در کاتد $\Delta p (Pa)$	جریان پیل $i (A)$	ولتاژ پیل $E (V)$	نوع کانال
۸/۹۶	۰/۰۴۴	۲۰۵۶	۲۲/۵	۰/۴	مارپیچ متقارن (جدید)
۵/۵۱	۰/۰۴۱	۱۹۴۸	۹/۲۵	۰/۶	
۰/۴۱	۰/۰۴۰	۱۹۲۷	۰/۵	۰/۹	
۸/۶۰	۰/۲۰۶	۹۹۳۵	۲۲	۰/۴	مارپیچ ساده
۵/۲۱	۰/۱۹۰	۹۱۳۰	۹	۰/۶	
۰/۲۶	۰/۱۸۹	۹۰۹۲	۰/۵	۰/۹	

همان‌طور که بخش قبل گفته شد، بهبود الکتریکی به‌دست‌آمده (نمودار ولتاژ-جریان) در اثر استفاده از کانال مارپیچ متقارن (جدید) نسبتاً کم است، ولی این به معنی یکسان بودن عملکرد کلی پیل سوختی نیست که با این دو نوع کانال ساخته می‌شوند. دلیل این امر، آن است که همان‌طور که در جدول ۶ دیده می‌شود، توان خالص پیل و در نتیجه، عملکرد کلی پیل سوختی با کانال مارپیچ متقارن (جدید) خصوصاً در چگالی جریان‌های بالا، به‌طور قابل‌ملاحظه‌ای بهتر از کانال مارپیچ ساده است.

^۱ Performance Factor (PF)



شکل ۱۷- کانتور توزیع فشار نسبی در کانال کاتد مارپیچ ساده دمای ۶۰ درجه سلسیوس، رطوبت نسبی ۳۰ درصد و ولتاژ ۰/۴ ولت



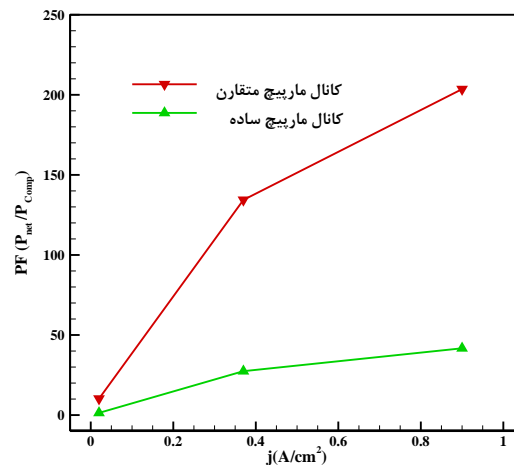
شکل ۱۸- کانتور توزیع فشار نسبی در کانال کاتد مارپیچ متقارن (جدید) دمای ۶۰ درجه سلسیوس و رطوبت نسبی ۳۰ درصد و ولتاژ ۰/۴ ولت

در جدول ۶، افت فشار در کاتد و توان مصرفی کمپرسور و توان خالص تولیدی ($P_{net} = V \times I - P_{Comp}$) در کانال مارپیچ متقارن (جدید) و مارپیچ ساده در ولتاژهای مختلف پیل سوختی باهم مقایسه شده‌اند. توان خالص تولیدی پیل سوختی ناشی از توان تولیدی آن منهای توان مصرفی توسط اجزا و تجهیزات جانبی موردنیاز برای عملکرد آن هست. برای

حاصله نشان داد، هرچند نمودار ولتاژ- جریان پیل سوختی با کانال جدید به صورت نسبتاً کمی بهتر از کانال مارپیچ ساده است، ولی افت فشار و توان مصرفی در این کانال، بسیار کمتر از کانال مارپیچ ساده است.

۶- مراجع

- [1] Akhtar N, Qureshi A, Scholta J, Hartnig C, Messerschmidt M, Lehnert W (2009) Investigation of water droplet kinetics and optimization of channel geometry for PEM fuel cell cathodes. *Int J Hydrogen Energy* 34(7): 3104-3111.
- [2] Mench M, Wang C, Ishikawa M (2003) In situ current distribution measurements in polymer electrolyte fuel cells. *J Electrochem Soc* 150(8): A1052-A1059.
- [3] Hontanon E, Escudero M, Bautista C, Garcia-Ybarra P, Daza L (2000) Optimisation of flow-field in polymer electrolyte membrane fuel cells using computational fluid dynamics techniques. *J Power Sources* 86(1): 363-368.
- [4] Grujicic M, Zhao C, Chittajallu K, Ochterbeck J (2004) Cathode and interdigitated air distributor geometry optimization in polymer electrolyte membrane (PEM) fuel cells. *Mat Sci Eng B-Solid* 108(3): 241-252.
- [5] Manso AP, Marzo FF, Mujika MG, Barranco J, Lorenzo A (2011) Numerical analysis of the influence of the channel cross-section aspect ratio on the performance of a PEM fuel cell with serpentine flow field design. *Int J Hydrogen Energy* 36(11): 6795-6808.
- [6] Watkins DS, Dircks KW, Epp DG (1992) Fuel cell fluid flow field plate. Google Patents.
- [7] Yang WJ, Wang HY, Kim YB (2014) Channel geometry optimization using a 2D fuel cell model and its verification for a polymer electrolyte membrane fuel cell. *Int J Hydrogen Energy* 39(17): 9430-9439.
- [8] Jaruwasupant N, Khunatorn Y (2011) Effects of difference flow channel designs on proton exchange membrane fuel cell using 3-D model. *Energy Procedia* 9: 326-337.
- [9] Liu HC, Yan WM, Soong CY, Chen F (2005) Effects of baffle-blocked flow channel on reactant transport and cell performance of a proton exchange membrane fuel cell. *J Power Sources* 142(1): 125-133.
- [10] Wang XD, Duan YY, Yan WM (2007) Novel serpentine-baffle flow field design for proton exchange membrane fuel cells. *J Power Sources* 173(1): 210-221.



شکل ۱۹- مقایسه ضریب کارایی پیل با کانال مارپیچ متقارن (جدید) و مارپیچ ساده

۵- جمع بندی و نتیجه گیری

در این مقاله، ابتدا یک پیل سوختی پلیمری با الگوی جدید کانال جریان، الهام گرفته از مطالعات پیشین، با عنوان الگوی کانال مارپیچ متقارن (جدید) طراحی و ساخته شده است. پیل تک سل با توان نامی ۱۰ وات بوده، دارای مساحت ناحیه فعال ۲۵ سانتی متر مربع است. در ادامه با استفاده از دستگاه تست پیل سوختی اثر دما و رطوبت نسبی گازهای سمت کاتد بر عملکرد آن مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج آزمایشگاهی نشان داد که پیل ساخته شده قادر است، ماکزیمم چگالی توانی حدود ۰/۴۵ وات بر مترمربع (توان ۱۱W) را تولید نماید. سپس مدل سازی عددی سه بعدی و کامل پیل سوختی ساخته شده (شامل همه لایه های پیل سوختی) انجام شده است. بدین منظور، معادلات بقاء جرم، بقاء اندازه حرکت (مؤنتم)، بقاء اجزاء، بقاء انرژی و شارژ به همراه روابط سینتیک الکتروشیمیایی در نواحی مختلف پیل به صورت الگوی تک ناحیه ای و تک فاز تدوین و به کمک نرم افزار تجاری فلونت حل شده اند. مقایسه نتایج آزمایشگاهی و عددی، همخوانی بسیار خوب بین آن‌ها را نشان داد. در ادامه نحوه توزیع خواص و کمیت های ترموفیزیکی مختلف در قسمت های مختلف پیل مورد و در شرایط کاری مختلف از قبیل، درصد رطوبت نسبی کاتد و دما کاری بر عملکرد پیل بررسی قرار گرفت. نهایتاً مقایسه ای عددی بین کارایی کانال مارپیچ متقارن (جدید) و کانال مارپیچ ساده انجام شد. نتایج

- [20] Liu H, Li P, Juarez-Robles D, Wang K, Hernandez-Guerrero A (2014) Experimental study and comparison of various designs of gas flow fields to PEM fuel cells and cell stack performance. *Front Energy Res* 2.
- [21] Hassanzadeh H, Ferdowsara A, Barzagary M (2014) Modeling of two phase flow in the cathode of gas diffusion layer of proton exchange membrane fuel cell. *Modares Mech Eng* 14(2): 55-62. (In Persian)
- [22] Obayopo SO, Bello-Ochende T, Meyer JP (2012) Modelling and optimization of reactant gas transport in a PEM fuel cell with a transverse pin fin insert in channel flow. *Int J Hydrogen Energ* 37(13): 10286-10298.
- [23] Khazaei I, Sabadban H (2016) Numerical study of changing the geometry of the flow field of a PEM fuel cell. *Heat Mass Transfer* 52(5): 993-1003.
- [24] Cao TF, Mu YT, Ding J, Lin H, He YL, Tao WQ (2015) Modeling the temperature distribution and performance of a PEM fuel cell with thermal contact resistance. *Int J Heat Mass Tran* 87: 544-556.
- [25] Afshari E, Jazayeri S (2009) Analyses of heat and water transport interactions in a proton exchange membrane fuel cell. *J Power Sources* 194(1): 423-432.
- [26] Khazaei I (2013) Effect of placing different obstacles in flow fields on performance of a PEM fuel cell: numerical investigation and experimental comparison. *Heat Mass Transfer* 49(9): 1287-1298.
- [27] Jeon D, Greenway S, Shimpalee S, Van Zee J (2008) The effect of serpentine flow-field designs on PEM fuel cell performance. *Int J Hydrogen Energ* 33(3): 1052-1066.
- [28] O'Hayre RP, Cha SW, Colella W, Prinz FB (2006) *Fuel cell fundamentals*. John Wiley & Sons, New York.
- [11] Atyabi SA, Afshari E, Adami M (2014) Effects of baffle-blocked flow cathode channel on reactant transport and cell performance of a PEMFC. *Modares Mech Eng* 14(4): 158-166. (In Persian)
- [12] Heidari S, Afshari E (2015) Comparison between different models of polymer membrane fuel cell using a metal foam as a flow distributor. *Modares Mech Eng* 15(3). (In Persian)
- [13] Taccani R, Zuliani N (2011) Effect of flow field design on performances of high temperature PEM fuel cells: Experimental analysis. *Int J Hydrogen Energ* 36(16): 10282-10287.
- [14] Wang XD, Duan YY, Yan WM, Peng XF (2008) Local transport phenomena and cell performance of PEM fuel cells with various serpentine flow field designs. *J Power Sources* 175(1): 397-407.
- [15] Wang XD, Zhang XX, Yan WM, Lee DJ, Su A (2009) Determination of the optimal active area for proton exchange membrane fuel cells with parallel, interdigitated or serpentine designs. *Int J Hydrogen Energ* 34(9): 3823-3832.
- [16] Chen YS, Peng H (2011) Predicting current density distribution of proton exchange membrane fuel cells with different flow field designs. *J Power Sources* 196(4): 1992-2004.
- [17] Ramos-Alvarado B, Hernandez-Guerrero A, Juarez-Robles D, Li P (2012) Numerical investigation of the performance of symmetric flow distributors as flow channels for PEM fuel cells. *Int J Hydrogen Energ* 37(1): 436-448.
- [18] Aiyejina A, Sastry MKS (2011) PEMFC flow channel geometry optimization: A review. *J Fuel Cell Sci Tech* 9(1): 011011-011011.
- [19] Manso AP, Marzo FF, Barranco J, Garikano X, Garmendia Mujika M (2012) Influence of geometric parameters of the flow fields on the performance of a PEM fuel cell. A review. *Int J Hydrogen Energ* 37(20): 15256-15287.