

بررسی عددی انتقال حرارت و جریان سیال در پیل سوختی غشای پلیمری و کانال‌های خنک‌کاری

رضا اورکی^۱، مجتبی مروج^{۱ و ۲*}

^۱ گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران

^۲ استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه پیام نور، ایران

*مسئول مکاتبات: moravej60@pnu.ac.ir

◀ واژگان کلیدی

پیل سوختی غشای پلیمری
میدان جریان
کانال‌های خنک‌کاری
کانال‌های جریان
توزیع چگالی جریان و دما

◀ تاریخچه مقاله

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۸/۰۵
تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۹/۱۶

◀ چکیده

در این مقاله، به روش عددی انتقال حرارت و جریان سیال در پیل سوختی غشای پلیمری و کانال‌های خنک‌کاری، با الگوی کانال موازی و استفاده از آب مایع در کانال‌های مجزای تعبیه شده در صفحه دو قطبی، بررسی گردیده و عملکرد چهار طرح مختلف میدان جریان گاز و خنک‌کاری، براساس عدم نیاز به شرط مرزی حرارتی بیرونی، بکنواختی دما با استفاده از نرم‌افزار انسیس-فلوئنت شبیه‌سازی و با یکدیگر مقایسه گردیده است. نتایج نشان داد که با افزایش عدد رینولدز جریان خنک‌کاری از ۴۰ به ۸۰۰، افت فشار در مسیر کانال جریان خنک‌کاری از ۴۰ تا ۴۰۰ به صورت نمایی از ۳۵۰ تا حدود ۷۰۰ رشد می‌کند و پس از آن ثابت با تغییر عدد رینولدز جریان خنک‌کاری از ۴۰ تا ۴۰۰ به صورت نمایی از ۳۵۰ تا حدود ۷۰۰ رشد می‌کند و پس از آن ثابت می‌شود. همچنین نتایج نشان داد که بهترین عملکرد پیل در عدد رینولدز ۶۰ بدست آمده است، زیرا با افزایش عدد رینولدز جریان خنک‌کاری و افزایش افت فشار توان پارازیتی سیستم بالا می‌رود.

Numerical study of heat transfer and fluid flow in the fuel cell of polymer membranes and cooling channels

Reza Oraki¹, Mojtaba Moravej^{1, 2}

¹Mechanical Engineering Department, Islamic Azad University, Ahvaz, Iran

²Mechanical Engineering Department, Payame Noor University, Iran

► Abstract

In this paper, the numerical method of heat transfer and fluid flow in the fuel cell of polymer membranes and cooling channels, with the parallel channel pattern and the use of liquid water in separate channels embedded in the bipolar plane, is investigated and the performance of four different field designs Gas flow and cooling, based on the absence of the need for an external thermal boundary condition, the temperature uniformity is simulated and compared using Ansys-Fluent software. The results showed that by increasing the Reynolds number of the cooling flow from 40 to 800, the pressure drop in the cooling flow channel path reaches from 40 to 640 Pascals. On the other hand, the Nusselt number of the cooling flow increases exponentially from 350 to about 700 by changing the Reynolds number from 40 to 400, and then it is fixed. The results also showed that the best cell performance was obtained at Reynolds number 60, because with increasing Reynolds number, the cooling flow and increasing pressure drop of the system's noise power increases.

► Keywords

Polymer membrane fuel cell
Flow field
Cooling channels
Flow channels
Flow density distribution and temperature

► Article history

Received: 26 Oct 2020

Accepted: 06 Dec 2020

۱ مقدمه

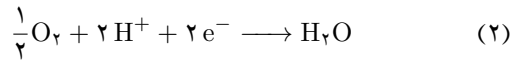
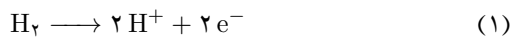
و تأثیر آن بر عملکرد پیل پرداخته می‌شود. کومر و ردی [۶، ۷] یک مدل عددی بصورت سه‌بعدی جهت پیش‌بینی عملکرد پیل سوختی غشای پلیمری در صورت استفاده از فوم فلزی (به عنوان میدان جریان) با استفاده از نرم‌افزار انسیس-فلوئنت، ارائه کرده‌اند. نتایج آنها نشان داد که در میدان جریان متخلخل، توزیع واکنشگرها و توزیع دانسیته جریان یکنواخت‌تر می‌باشد. چن و همکاران [۸]، برای بررسی تأثیر میدان جریان خنک‌کاری بر توزیع یکنواخت دما در پیل سوختی غشای پلیمری یک صفحه شامل چندین میدان جریان تنها یک صفحه را مستقل از پیل به عنوان چاه حرارتی را به صورت سه‌بعدی شبیه‌سازی نمودند. با در نظر گرفتن شاخص یکنواختی توزیع دما آنها به این نتیجه رسیده‌اند که در میدان جریان مارپیچ با وجود افت فشار بیشتر نسبت به میدان جریان موازی، صفحه توزیع یکنواخت دمایی بیشتری را تجربه می‌کند. چوی و همکاران [۹]، به بررسی میدان جریان موازی و مارپیچی ساده و همچنین موازی و مارپیچی اصلاح‌شده برای خنک‌کاری پیل با توان ۵ کیلووات پرداختند. نتایج آنها نشان داد که با افزایش عدد رینولدز در کانال‌های خنک‌کاری اختلاف دمایی کمتری در صفحه خنک‌کاری به وجود می‌آید و توزیع یکنواخت‌تر می‌شود و همچنین با افزایش عدد رینولدز اگرچه توزیع دما یکنواخت‌تر می‌شود اما توان پارازیتی سیستم تولید پیل به دلیل دبی بیشتر پمپ خنک‌کاری بالاتر می‌رود. نام و همکاران [۱۰]، با یک آرایش مارپیچی ثابت خنک‌کاری به بررسی چند مسیره کردن کانال‌های جریان در نتیجه افزایش انتقال حرارت جابجایی از این محل‌ها پرداخته‌اند. نتایج آنها نشان داده که میدان خنک‌کاری مارپیچ چند مسیره از لحاظ دمایی بیشینه سطح و توزیع یکنواخت دما عملکرد بهتری نسبت به میدان خنک‌کاری مارپیچی تک مسیره است. در مدل آنها تنها لایه پخش گاز و صفحه متصل به آن در نظر گرفته شده است. بیک و همکاران [۱۱]، شش مدل مارپیچی خنک‌کاری پیل را روی یک صفحه با سطح ۳۲۴ سانتی متر مربع شبیه‌سازی کرده‌اند. آنها روی صفحه از شرط مرزی شار حرارتی ثابت استخراجی از شرکت بالارد استفاده کرده‌اند. مقایسه میدان‌های جریان از لحاظ دمایی بیشینه و کمینه و اختلاف دما، افت فشار و شاخص یکنواختی دما انجام شده است. نتایج آنها نشان داد که با افزایش دبی جریان خنک‌کاری، یکنواختی توزیع دما و افت فشار افزایش می‌یابد. اصغری و همکاران [۱۲]، به مدیریت حرارتی یک پیل با توان ۵ کیلووات با میدان جریان خنک‌کاری مارپیچ پرداخته‌اند. آنها تعداد کانال‌های خنک‌کاری بهینه به عنوان پارامتر طراحی هدف از موازنه بین حداقل بودن افت فشار مسیر و حداکثر بودن یکنواختی توزیع دما به دست آورده‌اند. نتایج آنها نشان می‌دهد که توان مصرفی پمپ خنک‌کاری در حدود ۵/۰ کیلووات است. ساسمیتو و همکاران [۱۳]، به مدل‌سازی عددی هم‌بسته آرایش‌های مختلف کانال خنک‌کاری و کانال‌های گاز برای توده پیل و اثر نرخ جریان خنک‌کننده بر یکنواختی پرداخته‌اند. نتایج آنها نشان داد که با کاهش ولتاژ عملکردی پیل دمای ماکزیمم پیل با وجود خنک‌کاری کاهش می‌یابد. افشاری و همکاران [۱۴]، به بررسی مدل عددی جریان سیال در کانال مواج برای خنک‌کاری پیل پرداخته‌اند. کانال‌های خنک‌کاری در یک صفحه تعبیه شده‌اند و شار حرارتی ثابت به این صفحه اعمال شده است. آنها با استفاده از کانال مواج در مقابل کانال‌های موازی ساده، به کاهش ۵٪، ۲۳٪ و ۸٪ به

سوخت‌های فسیلی امروزه حدود ۸۰ درصد انرژی دنیا را تأمین می‌کنند. این سوخت‌ها منابعی محدودی داشته و باعث بروز مشکلات زیست محیطی از قبیل گرمایش جهانی، تغییرات اقلیمی، آب شدن کوه‌های یخ، بالا آمدن سطح آب دریا، باران‌های اسیدی، از بین رفتن لایه اوزون و غیره می‌شوند. تولید ناچیز گازهای گلخانه‌ای و بی‌نیازی به سوخت‌های فسیلی و همچنین بازده بالا نسبت به موتورهای احتراق داخلی و طول عمر بیشتر نسبت به باتری باعث محبوبیت روزافزون پیل سوختی در قرن حاضر شده است. امکان ذخیره‌سازی بلند مدت، انتقال توسط خط لوله با مقاومت مقاومت حداقلی، وزن کم، چگالی بالای انرژی، انتشار بسیار کم آلاینده‌ها و سهولت تولید از ویژگی‌های هیدروژن است که به عنوان سوخت در اکثر پیل‌های سوختی استفاده می‌شود. با توجه به محدودیت منابع انرژی و مشکلات زیست محیطی ناشی از این آلاینده‌ها لزوم استفاده از روش‌های تبدیل انرژی با راندمان بالاتر و همچنین استفاده از سوخت‌هایی که آلوده‌کننده نبوده و امکان تولید آن از منابع تجدیدپذیر و تجدیدناپذیر ممکن باشد اهمیت پیدا می‌کند. پیل‌های سوختی به عنوان وسایل تبدیل‌کننده مستقیم انرژی شیمیایی به انرژی الکتریکی می‌توانند یک راه‌حل قابل اطمینان برای رفع مشکل انرژی و مشکلات زیست محیطی باشند [۱]. در حال حاضر، پیل‌های سوختی به دلیل داشتن کارایی بالا، دمای پایین و شروع به کار سریع توجه زیادی را به خود جلب کرده‌اند. پیل‌های سوختی از مبدل‌های انرژی پاک هستند که انرژی ذخیره شده در هیدروژن و اکسیژن را به الکتریسیته تبدیل می‌نمایند. آنها همچنین به علت دارا بودن چگالی توان بالا، شروع به کار سریع و آلودگی کم به عنوان جایگزین اصلی برای تولید توان اتومبیل‌ها، ایستگاه‌های توان ثابت و زیردریایی‌ها در نظر گرفته می‌شوند [۲-۴].

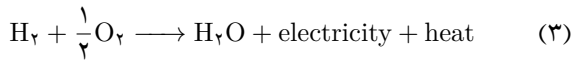
در باب نیازهای توسعه پیل‌های سوختی پلیمری چهار حوزه نقش اصلی را ایفا می‌کنند که عبارت‌اند از: کاهش قیمت مواد و هزینه تولید اجزا، بهبود نرخ افت بازده در زمان بکارگیری، قابلیت تحمل انجماد در زمان راه‌اندازی، بهینه‌سازی مدیریت آب و گرما درون الکترودهای پخش گاز و کانال‌های جریان. که در سه حوزه از چهار حوزه ذکر شده، مدل‌سازی ریاضی می‌تواند نقش بسیار مؤثری را بر کاهش هزینه‌های پژوهشی ایفا نماید. اجزای تشکیل‌دهنده پیل سوختی پلیمری، غشا (الکترولیت)، لایه کاتالیستی (الکتروود)، لایه پخش گاز، صفحات دو قطبی می‌باشند. عوامل مهم و تاثیرگذار بر توزیع یکنواخت گازهای واکنش دهنده در سطح فعال غشا، کارایی پیل سوختی و نحوه تأمین آب لازم برای مرطوب نگه داشتن غشا و تخلیه آب تولیدشده در کاتد دارند، را می‌توان به الگوی میدان‌های جریان، عرض و عمق کانال‌ها و همچنین طول و فاصله بین آنها، که بر روی صفحات دو قطبی قرار دارند، اشاره نمود.

ایده پیل سوختی نخستین بار توسط ویلیام گرو دانشمند انگلیسی در سال ۱۸۳۹ مطرح گردید. این ایده بر مبنای عکس فرآیند الکترولیز آب بنا نهاده شده بود [۵]. مطالعات بسیاری بر روی انواع مختلف پیل سوختی ارائه شده تا عملکرد پیل شامل مشخصات غشا و قطب‌ها، الکتروشیمی پیل و تأثیر دما، فشار و رطوبت ورودی بر عملکرد پیل سوختی را مورد مطالعه و بررسی قرار دادند. در این بخش به مرور مطالعاتی با موضوع خنک‌کاری

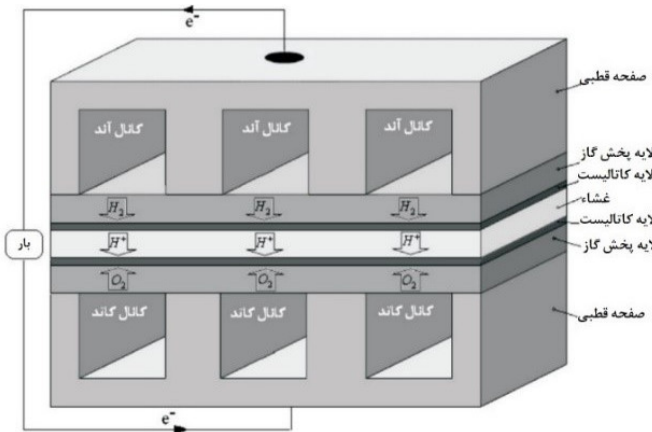
گازی به دو پروتون و الکترون تبدیل می‌شود. در سمت کاتد پروتون و الکترون با اکسیژن ترکیب شده و آب تولید می‌شود. واکنش کلی پیل سوختی غشای پلیمری در معادله (۱) ارائه شده است.



واکنش کلی پیل که گرمازا است، مجموع واکنش‌های (۱) و (۲) می‌باشد، و به صورت رابطه (۳) نوشته می‌شود.



بدین ترتیب انرژی شیمیایی هیدروژن مستقیماً به انرژی الکتریکی تبدیل شده و به آن احتراق سرد هیدروژن گفته می‌شود؛ زیرا این واکنش حتی می‌تواند در دمای اتاق رخ دهد [۲۰]. همچنین طبق شکل ۱، برای تولید ولتاژ کافی، چندین حجره به صورت ردیفی به هم متصل می‌شوند و تشکیل توده پیل سوختی را خواهند داد.



شکل ۱: نمای شماتیک یک پیل سوختی غشای پلیمری [۱۹].

۳ مدل فیزیکی و عددی

در حالت کلی، جهت دستیابی به عملکرد مناسب و مورد نظر پیل سوختی، چند پیل تکی بصورت ردیفی را کنار هم قرار می‌دهند. یک پیل سوختی متشکل از یک مجموعه الکتروکود-غشا برای هدایت یونها و انجام واکنش الکتروشیمیایی و دو صفحه قطبی برای هدایت الکترون و توزیع جریان می‌باشد. کانال‌های جریان خنک‌کاری جهت دفع گرمای ناشی از واکنش‌های الکتروشیمیایی که یک عامل بسیار مهم برای عملکرد مناسب پیل است، در صفحات قطبی یا صفحات خنک‌کاری مخصوص تعبیه می‌گردد [۱۱].

مطابق شکل ۲ دامنه محاسباتی در نظر گرفته شده در این شبیه‌سازی عددی، شامل غشا، کاتالیست‌های آنود و کاتد، لایه پخش گاز سمت آنود و کاتد، کانال‌های گاز آنود و کاتد، صفحات دو قطبی و کانال خنک‌کاری سمت کاتد در محیط شبکه‌بندی به سلول‌های کوچک تقسیم شده‌اند. در واقع حرارت تولید شده در پیل سوختی که از طریق هدایت حرارتی به صفحه خنک‌کاری وارد گردیده، به صورت شار حرارتی که به سطح صفحه خنک‌کاری وارد می‌شود.

ترتیب در دمای بیشینه سطح، اختلاف دمای سطح و شاخص یکنواختی دما رسیده‌اند و به عملکرد بهتری در خنک‌کاری پیل رسیده‌اند. در پژوهشی دیگر افشاری و همکاران [۱۵]، به مطالعه خنک‌کاری و توزیع دمای یک توده پیل با سطح مربعی و سطح فعال ۲۲۵ سانتی متر مربعی با چهار الگوی کانال جریان مختلف با شار حرارتی متغیر در صفحات خنک‌کاری پرداخته‌اند. افشاری و همکاران [۱۶]، در پژوهشی از فوم فلزی در میدان جریان خنک‌کاری توده پیل استفاده کرده‌اند. نتایج نشان داد که در مقایسه بین کانال خنک‌کاری موازی، مارپیچی استفاده از فوم فلزی در کانال بهترین گزینه برای کاهش اختلاف دمای سطح، بیشینه و میانگین دمای سطح است. همچنین به دلیل ثابت نفوذپذیری بالا، به دلیل استفاده از ضریب تخلخل بالا این روش افت فشار پایینی داشت. قاسمی و همکارانش [۱۷]، به مدل‌سازی هم بسته پیل سوختی با کانال جریان مارپیچ و شش نوع کانال خنک‌کاری مختلف پرداخته‌اند. نتایج آنها نشان داده که مدل حلزونی در قیاس با مدل‌های مارپیچ و مدل‌های مارپیچ-حلزونی بهترین شاخص یکنواختی دما و عملکرد پیل را دارد؛ اما برای حالتی که افت فشار اهمیت بالایی دارد، همچنین آنها دریافتند که در تولید گرمای پیل، گرمای مهمی، گرمای فعال‌سازی و گرمای واکنش به ترتیب ۲۰، ۳۵ و ۴۵ درصد گرمای کل را تشکیل می‌دهند. راهگشایی و همکاران [۱۸]، با بررسی سه میدان جریان خنک‌کاری با سطح فعال ۵۰ سانتی متر مربع شامل دو نوع مارپیچی معمول و یک موازی ساده به صورت همبسته با پیل سوختی یکنواختی توزیع دما، افت فشار و عملکرد کلی پیل سوختی را مقایسه کرده‌اند. نتایج آنها نشان داده است که شاخص یکنواختی میدان جریان موازی را بالاتر از میدان جریان مارپیچی گزارش کرده‌است.

هرچند در مطالعات زیادی به بررسی پیل سوختی بدون در نظر گرفتن کانال‌های خنک‌کاری انجام گرفته یا صرفاً کانال‌های خنک‌کاری مدل‌سازی شده و گرمای تولیدی در داخل پیل صرفاً به عنوان یک شرط مرزی برای مدل‌سازی در نظر گرفته شده‌اند. طبیعی است این شرط مرزی غیردقیق است. در این مطالعه، به مدل‌سازی هم‌زمان پیل (عملکرد سیالاتی، انتقال حرارت، انتقال جرم و روابط الکتروشیمیایی) همراه با مدل‌سازی کانال‌های خنک‌کاری با در نظر گرفتن چگالی توان حجمی و جرمی و شاخص یکنواختی بالا پرداخته می‌شود.

۲ پیل سوختی غشای پلیمری

نمای شماتیک یک پیل سوختی غشای پلیمری در شکل ۱ نشان داده شده‌است. پیل سوختی دستگاه‌های الکتروشیمیایی هستند که بر اساس انتقال اکسیژن و هیدروژن کار می‌کنند و برق، آب و گرما تولید می‌کنند. که در آن مجاری گاز به طور مداوم سوخت و اکسیدکننده را پس از ورود به کانال، به لایه پخش گاز نفوذ کرده و سپس به لایه کاتالیست می‌رسد.

در سطح مشترک غشا و لایه کاتالیست نیم‌واکنش‌های آنود و کاتد رخ می‌دهند. هیدروژن که عمده‌اً به عنوان سوخت و هوا به عنوان اسیدکننده قبل از ورود به پیل مرطوب خواهند شد. در سمت آنود، هیدروژن از میان لایه پخش گاز آنود که از کربن پارچه‌ای یا کربن کاغذی ساخته شده است به طرف کاتالیست آنود پخش می‌شود. در لایه کاتالیست مولکول‌های هیدروژن

در این روابط S ضریب استوکیومتری، M جرم مولکولی، I حاصل ضرب سطح فعال پیل در چگالی جریان مرجع، r کسر مولی، F ثابت فارادی، اعداد ثابت تعداد الکترون برای واکنش هر مول اکسیژن یا هیدروژن، Q گرمای تولیدی در پیل، c_p ظرفیت گرمایی سیال خنک‌کاری و ΔT اختلاف دما در سیال خنک‌کاری است.

فشار جزئی بخار آب در ورودی، برابر با فشار اشباع در دمای مرطوب‌سازی واکنش‌گرهای ورودی می‌باشد. بنابراین برای نسبت مولی آب در ورودی کانال کاتد و آند داریم.

$$x_{in}^{H_2O} = (\%RH) \times \frac{p_{sat}}{p_{in}} \quad (7)$$

برای نسبت مولی اکسیژن طبق رابطه (۸) داریم.

$$x_{in}^{O_2} = \frac{1 - x_{in}^{H_2O}}{4/76} \quad (8)$$

برای محاسبه کسر مولی نیتروژن و هیدروژن می‌توان از روابط (۹) و (۱۰) استفاده کرد.

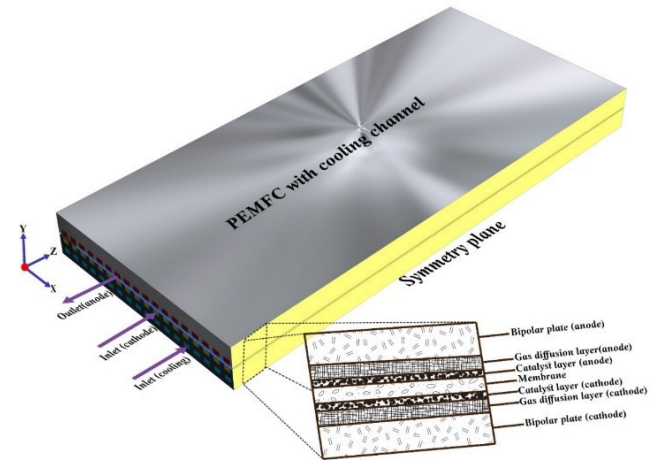
$$x_{in}^{N_2} + x_{in}^{H_2O} + x_{in}^{O_2} = 1 \quad (9)$$

$$x_{in}^{H_2} + x_{in}^{H_2O} = 1 \quad (10)$$

در خروجی کانال‌ها از شرط مرزی فشار خروجی استفاده شده است. دیواره‌های خارجی عایق لحاظ شده و شرط عدم لغزش روی آنها صادق است. دمای ورودی گاز برابر با دمای عملکردی پیل یعنی 80° درجه سلسیوس و دمای ورودی سیال خنک‌کاری 40° درجه سلسیوس لحاظ شده است. در جداول ۱ تا ۳ پارامترهای مورد استفاده برای شبیه‌سازی، در نظر گرفته شده‌اند.

جدول ۱: پارامترهای الکتروشیمیایی پیل سوختی غشای پلیمری [۲۲].

| مقدار | واحد | نشانه | |
|-----------------------|-------------------|----------------------|------------------------------|
| ۱۰۰۰۰ | Am^{-2} | I_{avg} | چگالی جریان الکتریکی میانگین |
| ۳۰۰ | K | T_{ref} | دمای مرجع |
| ۱ | bar | P_{ref} | فشار مرجع |
| ۹۶۴۸۷ | $Cmol^{-1}$ | F | ثابت فارادی |
| ۸/۳۱۴ | $Jmol^{-1}K^{-1}$ | R | ثابت جهانی گازها |
| ۵۰۰۰ | Am^{-2} | $j_{a,ref}$ | چگالی جریان مرجع آند |
| ۶ | Am^{-2} | $j_{c,ref}$ | چگالی جریان مرجع کاتد |
| ۰/۰۵۶۴ | $kmolm^{-3}$ | $C_{H_2,ref}$ | غلظت مرجع آند |
| $3/39 \times 10^{-3}$ | $kmolm^{-3}$ | $C_{O_2,ref}$ | غلظت مرجع کاتد |
| ۱ و ۰/۵ | - | γ_c, γ_a | توان غلظتی آند |
| ۰/۵ | - | α_a | ضریب تبادل آند |
| ۱/۵ | - | α_c | ضریب تبادل کاتد |
| 11×10^{-5} | m^2s^{-1} | $D_{H_2}^0$ | ضریب پخش مرجع هیدروژن |
| $2/3 \times 10^{-5}$ | m^2s^{-1} | $D_{O_2}^0$ | ضریب پخش مرجع اکسیژن |
| $7/35 \times 10^{-5}$ | m^2s^{-1} | $D_{H_2O}^0$ | ضریب پخش مرجع بخار آب |
| $1/1 \times 10^{-5}$ | m^2s^{-1} | $D_{N_2}^0$ | ضریب پخش مرجع نیتروژن |



شکل ۲: نمای شماتیک از ساختار پیل و خنک‌کننده شامل مدل هندسی استفاده‌شده برای شبیه‌سازی عددی و شرایط مرزی.

۱.۳ فرضیات حل حدی

یکی از مهم‌ترین بخش‌ها در حل عددی مسئله، فرضیات اعمال‌شده بر معادلات و شرایط مسأله است. فرضیات اعمال‌شده طی فرآیند مدل‌سازی، نشان‌دهنده محدودیت، دقت و همچنین راهنمایی برای توجیه و تفسیر نتایج هستند. از سوی دیگر با توجه به پیچیدگی معادلات حاکم بر پیل سوختی غشای پلیمری، لحاظ فرضیات صحیح و ساده‌کننده بدون آن‌که مدل و نتایج از واقعیت فاصله بگیرند، بسیار حائز اهمیت است. در این مقاله فرضیات زیر اعمال شده‌اند.

۱. مخلوط گازهای واکنش‌گر در پیل، گاز کامل هستند.
۲. جریان در کانال‌ها دائم و سیال تراکم‌ناپذیر است.
۳. با توجه به پایین بودن سرعت سیال درون کانال‌های پیل، جریان داخل کانال‌ها آرام است.
۴. لایه‌های کاتالیست و غشا یکنواخت و همگن هستند. لزجت مخلوط گاز ثابت است.
۵. از عبور گاز داخل غشا صرف‌نظر می‌شود.
۶. آب مایع به عنوان سیال خنک‌کاری در کانال‌های خنک‌کاری جریان دارد.

۲.۳ شرایط مرزی و پارامترهای ورودی

حل دستگاه معادلات حاکم بخش الکتروشیمیایی پیل با مجهولات سرعت، فشار، غلظت‌ها، دما و پتانسیل و همچنین معادلات حاکم بر بخش خنک‌کاری، نیازمند شرایط مرزی مناسب است. در ورودی کانال‌های آند و کاتد و خنک‌کاری از شرط مرزی نرخ جریان جرمی ورودی استفاده شده و دبی ورودی به کانال آند، کاتد و خنک‌کاری از روابط زیر به دست می‌آید.

$$\dot{m}_{air-in} = \frac{SO_2 M_{air} I}{r_{O_2} 4F} \quad (4)$$

$$\dot{m}_{H_2-in} = \frac{SH_2 M_{H_2} I}{r_{H_2} 2F} \quad (5)$$

$$\dot{m}_{cooling} = \frac{Q}{c_p \Delta T} \quad (6)$$

مومنتوم، اجزا، پروتون، الکترون و انرژی هستند. با محاسبه ترم‌های چشمه و چاه واکنش‌های الکتروشیمیایی، ابتدا برای مرحله اول مصرف واکنشگرها و تولید آب معادلات گونه‌های جرمی و معادله بار الکتریکی و انرژی در مرحله بعد به کار برده خواهد شد. با توجه به هندسه و عدد رینولدز که از ۴۰ تا ۸۰۰ می‌باشد، جریان فرض می‌شود که جریان آرام و سیال غیر قابل تراکم است.

$$\nabla \cdot (\rho \vec{u}) = 0, \quad (11)$$

$$\nabla \cdot (\rho \vec{u} \vec{u}) = -\nabla p + \nabla \cdot (\mu^{\text{eff}} \nabla \vec{u}) + S_m, \quad (12)$$

$$\nabla \cdot (\vec{u} \varepsilon \rho X_i) = \nabla \cdot (\rho D_{i,\text{eff}} \nabla X_i) + S_{s,i}, \quad (13)$$

$$\nabla \cdot (K_s^{\text{eff}} \nabla \phi_s) = S_{\phi_s}, \quad (14)$$

$$\nabla \cdot (K_m^{\text{eff}} \nabla \phi_m) = S_{\phi_m}, \quad (15)$$

$$(\rho c_p)_{\text{eff}} (\vec{u} \cdot \nabla T) = \nabla \cdot (k_{\text{eff}} \nabla T) + S_e. \quad (16)$$

۴.۳ معادلات غشای پلیمری

انتقال آب، توسط دو عامل اصلی نفوذ و درگ الکترواسمزی از طریق غشای پلیمری بین دو سمت آند و کاتد صورت می‌پذیرد. همچنین برای انتقال پروتون از سمت آند به کاتد، همراه با کشیده شدن آب از آند به کاتد جابجا می‌گردد که با درگ الکترواسمزی شناخته می‌شود. معادلات غشا در جدول ۴ به ترتیب محتوای آب، فعالیت بخار آب، ضریب درگ الکترو-اسمزیک، رسانایی پروتونی و پخش آب در غشا را بیان می‌کنند.

جدول ۴: خواص فیزیکی [۲۲].

$$\lambda = \begin{cases} 0.043 + 17/18a - 39/85a^2 + 36a^3, & 0 < \alpha \leq 1 \\ 14 + 1/4(\alpha - 1), & 1 < \alpha \leq 3 \\ 16/8, & \alpha > 3 \end{cases}$$

$$a = \frac{P_{\text{H}_2\text{O}}}{P_{\text{sat}}}$$

$$n_d = \begin{cases} 1, & \lambda \leq 14 \\ \frac{1/5}{\lambda(\lambda - 14)} + 1, & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\sigma_P = (0.005139\lambda - 0.00326) \exp \left[1268 \left(\frac{1}{30.3} - \frac{1}{T} \right) \right]$$

$$D_e^{\text{H}_2\text{O}} = \begin{cases} 3/1 \times 10^{-7} \lambda (e^{0.28\lambda} - 1) e^{-\frac{1274}{T}}, & 0 < \lambda \leq 3 \\ 4/17 \times 10^{-8} \lambda (1 + 161e^{-\lambda}) e^{-\frac{1274}{T}}, & \lambda > 3 \end{cases}$$

۴ حل عددی

معادلات حاکم بر پیل سوختی به روش حجم محدود گسسته‌سازی شده و برای یافتن مجهولات سرعت، فشار، دما، نسبت جرمی اجزا و بار الکتریکی در نرم‌افزار آنسیس-فلوئنت و با روش تک دامنه حل می‌شوند. الگوریتم سیمپل برای همبستگی سرعت و فشار و روش بالادستی مرتبه دو برای حل معادلات بقای جرم، مومنتوم و انرژی در نظر گرفته شده است. به دلیل همبستگی و غیرخطی بودن معادلات حاکم روند تکرار برای حل در نظر گرفته شده است.

جدول ۲: خصوصیات و پارامترهای نواحی پیل سوختی غشای پلیمری.

| پارامتر | مقدار |
|--|--------------------------|
| پارامترهای هندسی | |
| ناحیه | ضخامت (mm) |
| جمع‌کننده جریان الکتریکی | ۳ |
| کانال‌های جریان | ۱ |
| لایه پخش گاز | ۰/۲ |
| لایه کاتالیست | ۰/۰۲ |
| غشا (نافیون ۲۱۲) | ۰/۰۵۱ |
| میدان جریان با سطح فعال ۹۱ cm ^۲ | ۹۱ × ۱۰۰ |
| خواص جمع‌کننده جریان [۲۱] | |
| چگالی (kgm ^{-۳}) | ۴۰۰۰ |
| ظرفیت گرمایی ویژه (Jkg ^{-۱} K ^{-۱}) | ۸۷۱ |
| ضریب هدایت گرمایی (Wm ^{-۱} K ^{-۱}) | ۱۰۰ |
| خواص لایه پخش گاز [۲۱] | |
| چگالی (kgm ^{-۳}) | ۳۴۰۰ |
| ظرفیت گرمایی ویژه (Jkg ^{-۱} K ^{-۱}) | ۵۶۸ |
| ضریب هدایت گرمایی (Wm ^{-۱} K ^{-۱}) | ۱۰ |
| نفوذپذیری هیدرولیکی | ۱/۰۲ × ۱۰ ^{-۱۲} |
| ضریب تخلخل | ۰/۸ |
| زاویه تماس | ۱۵۰ |
| خواص لایه کاتالیست [۲۱] | |
| چگالی (kgm ^{-۳}) | ۹۵۰ |
| ظرفیت گرمایی ویژه (Jkg ^{-۱} K ^{-۱}) | ۷۱۰ |
| ضریب هدایت گرمایی (Wm ^{-۱} K ^{-۱}) | ۱۰ |
| نفوذپذیری هیدرولیکی | ۱/۱ × ۱۰ ^{-۱۲} |
| ضریب تخلخل | ۰/۷ |
| زاویه تماس | ۱۱۰ |
| خواص غشا [۲۱] | |
| چگالی (kgm ^{-۳}) | ۱۹۷۰ |
| ظرفیت گرمایی ویژه (Jkg ^{-۱} K ^{-۱}) | ۱۶۵۰ |
| ضریب هدایت گرمایی (Wm ^{-۱} K ^{-۱}) | ۰/۹۵ |
| نفوذپذیری هیدرولیکی | ۶/۹۹ × ۱۰ ^{-۱۲} |
| ضریب تخلخل | ۰/۵ |

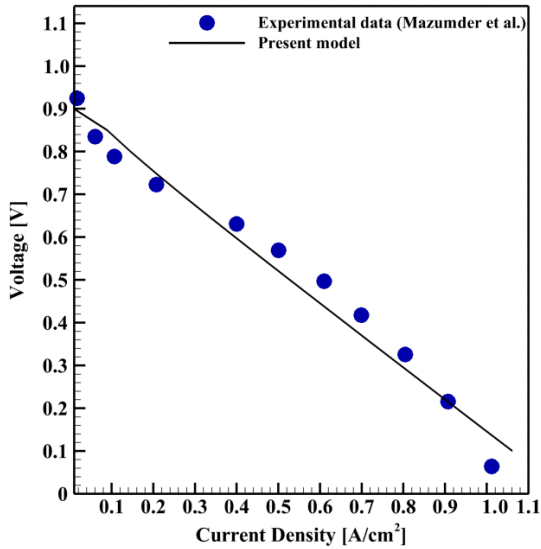
جدول ۳: شرایط مرزی در نواحی پیل سوختی غشای پلیمری.

| ناحیه | نوع شرط مرزی | واحد | مقدار |
|--------------|-----------------------|--------------------------------------|-------------------------|
| ورودی آند | جریان جرمی | kgs ^{-۱} | ۲/۰۸ × ۱۰ ^{-۶} |
| | استوکیومتری | - | ۱/۱۰ |
| | کسر جرمی هیدروژن | - | ۱ |
| | فشار کاری | atm | ۱/۱ |
| ورودی کاتد | دمای کاری | K | ۳۵۳ |
| | جریان جرمی | kgs ^{-۱} | ۲/۰۸ × ۱۰ ^{-۵} |
| | استوکیومتری | - | ۳ |
| | کسر جرمی اکسیژن | - | ۰/۱۲ |
| | کسر جرمی آب | - | ۰/۴۲ |
| | رطوبت نسبی | % | ۱۰۰ |
| دیواره | فشار کاری | atm | ۱/۱ |
| | دمای کاری | K | ۳۵۳ |
| | پتانسیل الکتریکی آند | V | ۰ |
| | پتانسیل الکتریکی کاتد | V | V _{cell} |
| دیواره خارجی | شرط مرزی دیواره‌ها | $\frac{\partial \Phi_s}{\partial n}$ | ۰ |

۳.۳ معادلات حاکم

مدل شامل معادلات دیفرانسیل همبسته‌شده غیرخطی شامل بقای جرم، مومنتوم، بارالکتریکی و انرژی با واکنش‌های الکتروشیمیایی است. معادلات (۱۱) تا (۱۶)، معادلات حاکم بر جریان سیال شامل معادله بقای پیوستگی،

مقایسه شده و تطابق خوبی بین نتایج عددی و تجربی مشاهده می‌شود. در چگالی جریان‌های بالا، اهمیت میزان آب مایع بسیار می‌شود که باعث شناوری لایه پخش گاز شده و در نتیجه موجب اختلال در انتقال گازهای واکنشگر به لایه کاتالیست می‌گردد. به موجب پدیده شناوری و بسته شدن بخشی از تخل‌های لایه پخش گاز، عملکرد پیل به شدت افت می‌کند.

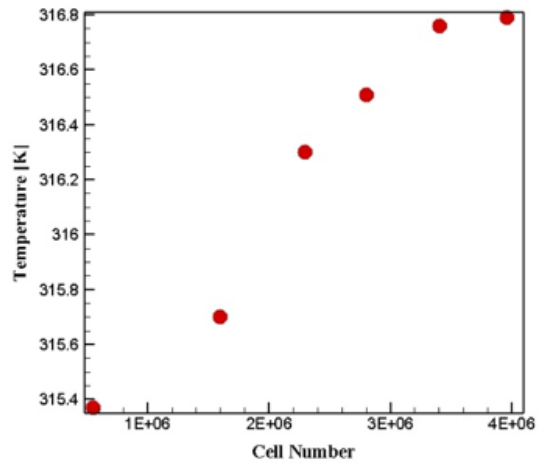


شکل ۵: مقایسه ولتاژ-چگالی جریان بین مدل موازی و مرجع [۲۳].

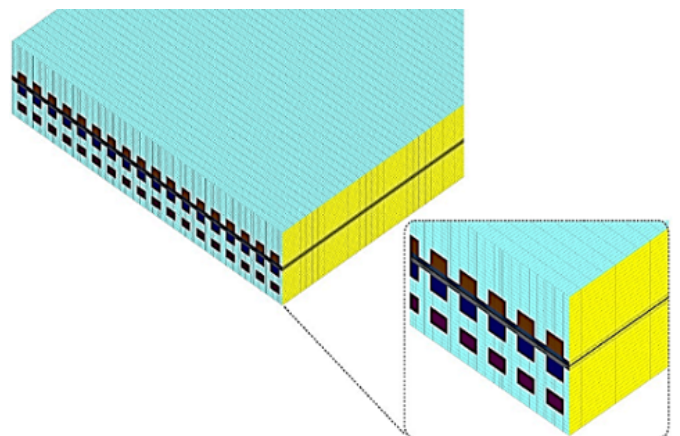
عملکرد یک پیل سوختی را می‌توان بر اساس منحنی ولتاژ-جریان تشریح کرد. این منحنی، ولتاژ خروجی پیل سوختی را برای یک جریان خروجی مشخص نشان می‌دهد. پیل‌های بزرگ‌تر الکتریسیته بیشتری نسبت به پیل‌های کوچک‌تر تولید می‌کنند به همین دلیل مقادیر جریان در این منحنی با تقسیم بر مساحت پیل بی‌بعد شده تا امکان مقایسه پیل‌ها در همه ابعاد فراهم شود. شکل ۶ ولتاژ را به ازای مقادیر مختلف چگالی جریان نمایش می‌دهد. مقایسه منحنی‌های قطبش برای اعداد رینولدز مختلف جریان خنک‌کاری نشان می‌دهد که افزایش دبی جریان خنک‌کاری در رینولدز بالا، افت عملکرد پیل احساس می‌شود. شکل ۷ روند تغییرات افت فشار در کانال‌های خنک‌کاری برحسب عدد رینولدز از ۴۰ تا ۸۰۰ را نشان می‌دهد. همانطور که در شکل قابل مشاهده است با افزایش عدد رینولدز افت فشار بالا می‌رود و چنانچه عدد رینولدز از ۴۰ به ۸۰۰ برسد، افت فشار از ۴۰ به ۶۴۰ پاسکال می‌رسد. شکل ۸ توصیفی از روند تغییرات عدد ناسلت میانگین در کانال‌های خنک‌کاری برحسب عدد رینولدز را نشان می‌دهد. مطابق شکل، با افزایش عدد رینولدز، عدد ناسلت میانگین به نزدیک ۸۰۰ می‌رسد و ناسلت میانگین، بعد از تغییر عدد رینولدز از ۶۰۰ به ۸۰۰ تغییر خاصی نکرده است. ماکزیمم عدد ناسلت به ۸۰۰ رسیده است. در عدد رینولدز ۴۰ عدد ناسلت به ۳۰۰ رسیده است. همانطور که شکل ۹ عدد ناسلت محلی در طول کانال‌های خنک‌کاری بر حسب عدد رینولدز جریان خنک‌کاری را نشان می‌دهد. همانطور که از شکل قابل مشاهده است، در طول کانال جریان خنک‌کاری ناسلت محلی رو به افزایش است. برای اعداد رینولدز ۴۰ و ۶۰ از مقدار ۲۵۰ شروع و به ۳۰۰۰ ختم می‌شود. با افزایش عدد رینولدز در طول کانال به طور متوسط برای اعداد رینولدز بالاتر از ۲۰۰ در محدوده‌ای با دامنه تغییرات بسیار کم قرار می‌گیرند.

روند همگرایی حل تکراری، بر اساس رسیدن مقادیر باقی‌مانده‌های حل به زیر معیار همگرایی است. معیار همگرایی در نظر گرفته شده برای معادلات پیوستگی، مومنتوم، بقای اجزا، پتانسیل بار الکتریکی، پتانسیل یون، معادله محتوای آب و غیره 10^{-3} و برای معادله انرژی 10^{-6} است. علاوه بر این می‌توان با مشاهده تغییرات اندک یک پارامتر خاص نظیر دما یا شدت جریان الکتریکی، به همگرایی حل پی برد.

به منظور بررسی عدم وابستگی نتایج به تعداد سل‌های شبکه، وابستگی افت فشار و دمای ماکزیمم سطح به تعداد سل‌های شبکه بررسی شده است. تعداد کل سلول‌های محاسباتی ۱۴۹۲۴۰۰ است. در شکل ۳، چگالی جریان (ولتاژ ۰/۶۵ ولت) برای چهار شبکه محاسباتی شامل درشت، متوسط، ریز و خیلی ریز محاسبه و ارائه شده است. با افزایش تعداد المان‌های شبکه از درشت تا ریز، دما زیاد شده و با افزایش تعداد المان از ریز به خیلی ریز، تغییرات کمی در نتایج ایجاد شده است. از این رو شبکه‌بندی ریز به‌عنوان شبکه نهایی انتخاب شده و جزئیات آن در شکل ۴ ارائه شده است.



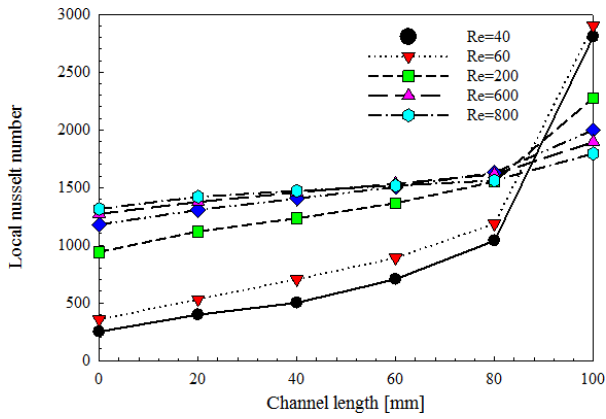
شکل ۳: دمای نقطه‌ای از غشا بر حسب تعداد شبکه محاسباتی شبکه‌بندی‌های مختلف.



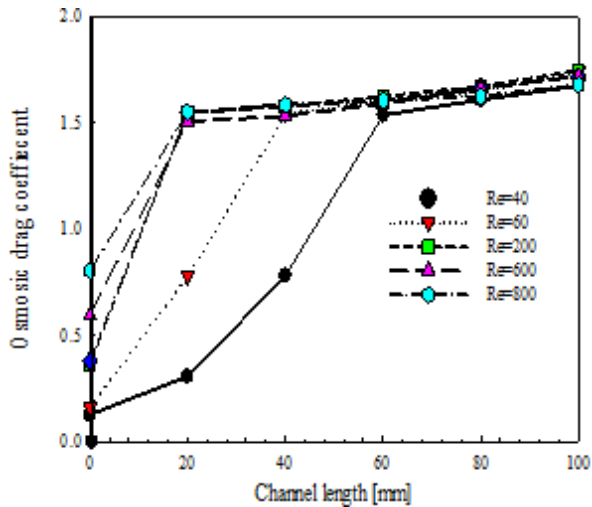
شکل ۴: شبکه‌بندی و نمای نزدیک از شبکه‌بندی.

۵ نتایج

به منظور صحه‌گذاری نتایج، منحنی دانسیته جریان-ولتاژ شکل ۵ برای پیل سوختی با الگوی جریان گاز موازی با داده‌های مزومدر و همکاران [۲۳]

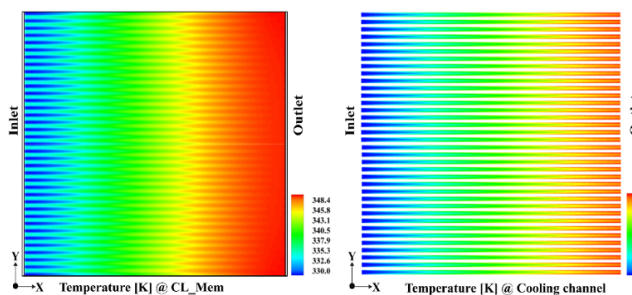


شکل ۹: نمودار تغییرات عدد ناسلت محلی در طول کانال خنک‌کاری



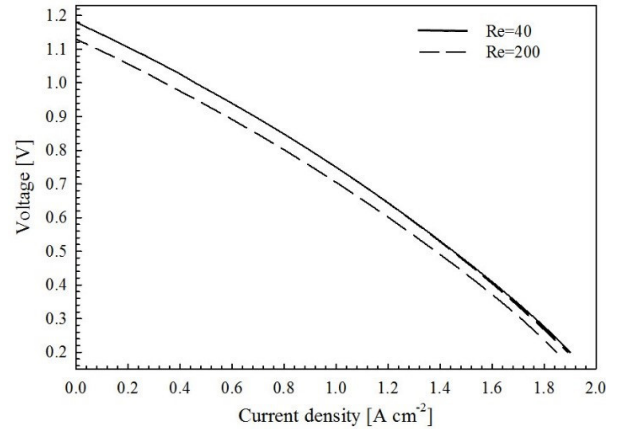
شکل ۱۰: نمودار ضریب درگ الکترواسمزیک در طول کانال جریان در قسمت غشا بر حسب عدد رینولدز جریان خنک‌کاری.

شکل ۱۱ کانتور تغییرات دمایی در فصل مشترک لایه کاتالیست و غشا (سمت چپ) و کانتور دمایی مربوط به صفحه‌ای در وسط کانال خنک‌کاری را نشان می‌دهد. دمای سیال خنک‌کاری از ابتدای کانال جریان تا انتها ۳۲ درجه اختلاف را نشان می‌دهد. این اختلاف دما برای فصل مشترک لایه کاتالیست و غشا به میزان ۱۸ درجه است. کانتور تغییرات غلظت اکسیژن و آب در فصل مشترک لایه کاتالیست و لایه پخش گاز در شکل ۱۲ نشان داده شده است. از طریق شکل مشخص است که در ابتدای کانال جریان سمت کاتد به دلیل دسترس بودن بیشتر اکسیژن در لایه کاتالیست واکنش‌های بیشتری انجام می‌شود و آب بیشتری تشکیل می‌شود. بنابراین نسبت به انتهای کانال شاهد آب بیشتری هستیم.

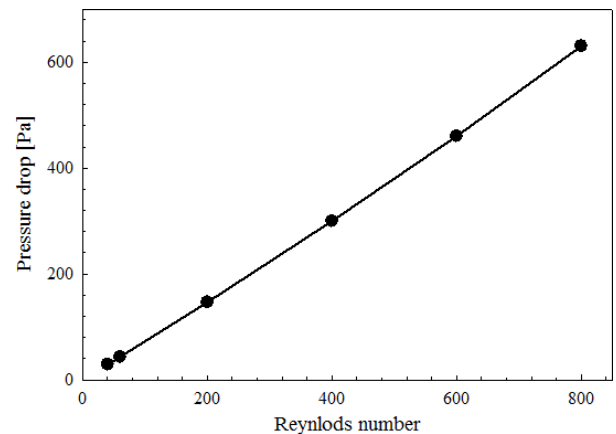


شکل ۱۱: کانتور دمایی فصل مشترک لایه کاتالیست- غشا و صفحه‌ای در وسط کانال خنک‌کاری.

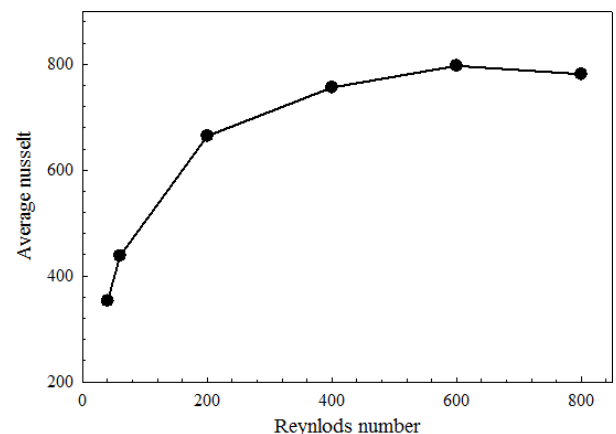
در شکل ۱۰ روند تغییرات ضریب درگ الکترواسمزی در طول کانال جریان برای رینولدزهای مختلف جریان خنک‌کاری ارائه شده است. مطابق شکل، در طول کانال جریان در ورودی جریان کانال کاتد نسبت به خروجی کمتر است. در خروجی جریان کاتد که نزدیک ورودی جریان آنند است به دلیل بیشتر بودن غلظت هیدروژن نسبت به انتهای کانال جریان آنند، تعداد بیشتری از پروتون‌های موجود در غشا و عبور به سمت کاتد درگ تقویت می‌شود.



شکل ۶: نمودار ولتاژ برحسب چگالی جریان برای رینولدزهای مختلف جریان خنک‌کاری.



شکل ۷: نمودار افت فشار برحسب عدد رینولدز.



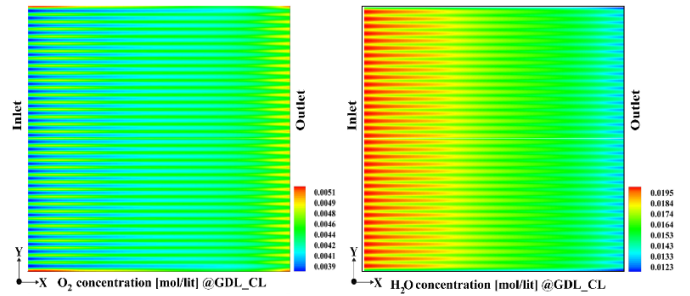
شکل ۸: نمودار تغییرات عدد ناسلت میانگین برحسب عدد رینولدز.

فهرست علائم

| | |
|-----------------|--|
| c_p | ظرفیت گرمایی ویژه (JkgK^{-1}) |
| c_r | ضریب ثابت میعان آب |
| D_w | ضریب پخش آب در غشا (m^2s^{-1}) |
| V | ولتاژ (V) |
| F | ثابت فارادی (Cmol^{-1}) |
| h_l | انتالپی (JkgK^{-1}) |
| I_{ref} | جریان الکتریکی مرجع (A) |
| K_p | نفوذپذیری (m^2) |
| K | ضریب هدایت گرمایی ($\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$) |
| M_m | وزن معادل غشای خشک (kg) |
| \dot{m}_{H_2} | نرخ جریان جرمی (kgs^{-1}) |
| n_d | ضریب درگ الکترو-اسمزیک |
| P | فشار (Pa) |
| \dot{Q}_i | نرخ انتقال حرارت در مرز سیستم (W) |
| R | ثابت جهانی گازها ($\text{Jmol}^{-1}\text{K}^{-1}$) |
| Re | عدد رینولدز |
| R_{ohm} | مقاومت الکتریکی اهمی (Ωm^{-1}) |
| $R_{a,c}$ | مقاومت گرمایی آند و کاتد |
| r_w | نرخ میعان |
| S_p | ترم چشمه معادله مومنت |
| S_h | ترم چشمه گرمایی (W) |
| \dot{S}_{in} | آنترابی جریان ورودی |
| Sc | عدد اشمیت |
| s | کسر حجمی آب مایع |
| T | دما (K) |
| t_{cat} | ضخامت لایه کاتالیست روی کربن (m) |
| \vec{u} | بردار سرعت (ms^{-1}) |
| \dot{v} | نرخ جریان حجمی (Lm^{-1}) |
| X | متغیر مجهول |
| x_{H_2O} | کسر جرمی آب |
| α | ضریب انتقال بار الکتریکی |
| ΔG | انرژی آزاد تشکیل (kJmol^{-1}) |
| ΔH | ارزش گرمایی (kJmol^{-1}) |
| δQ | اتلاف گرما (kJ) |
| ϵ | ضریب تخلخل |
| ϵ_{pt} | نسبت سطح مؤثر پلاتین |
| η | اضافه ولتاژ فعال سازی (V) |
| θ_c | زاویه سطح تماس |
| λ | محتوی آب غشا |
| ζ | استوکومتری جریان |
| μ | ویسکوزیته دینامیکی (Nsm^{-1}) |
| a | آند |
| c | کاتد |
| e | الکتروولت |
| eff | مؤثر |
| | مؤثر ^۲ |
| g | گاز |
| ref | مرجع |
| in | ورودی |

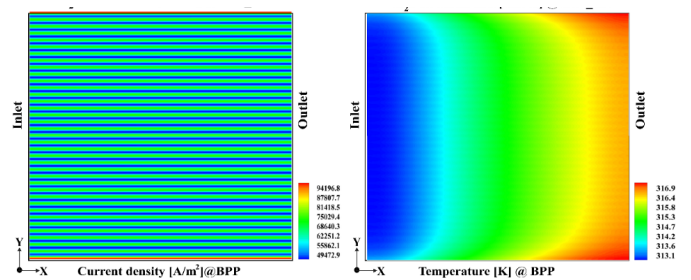
مراجع

- [1] Dyer, Christopher K. Fuel cells for portable applications. *Journal of Power Sources*, 106(1-2):31-34, 2002.
- [2] Wan, ZM, Wan, JH, Liu, J, Tu, ZK, Pan, M, Liu, ZC, and Liu, W. Water recovery and air humidification by condensing the moisture in the outlet gas of a proton exchange membrane fuel cell stack. *Applied Thermal Engineering*, 42:173-178, 2012.
- [3] Li, Ke, Ye, Gongbo, Pan, Jingjing, Zhang, Haining, and Pan, Mu. Self-assembled nafion@/metal oxide nanoparti-



شکل ۱۲: کانتور غلظت اکسیژن و آب در فصل مشترک لایه پخش گاز و کاتالیست.

شکل ۱۳ کانتور دما و چگالی جریان کاتد را در صفحه جمع کننده جریان کاتد ارائه می دهد. ماکزیمم دمای بدست آمده در صفحه به ۳۱۷ کلوین رسیده و چگالی جریان به ۰/۹۴ آمپر بر سانتی متر مربع رسیده است.



شکل ۱۳: کانتور چگالی جریان و دما در جمع کننده جریان کاتد.

۶ نتیجه گیری

در این مقاله، جریان سیال خنک کننده و انتقال حرارت برای یک پیل غشای پلیمری همراه با کانال های خنک کاری با سطح فعال ۹۱ سانتی متر مربع به صورت سیمتری، خنک شونده با آب مایع با استفاده از نرم افزار انسیس-فلوئنت شبیه سازی شده اند. هدف در این مطالعه دستیابی به عدد رینولدز مناسب برای حفظ دمای پیل در محدوده مناسب است.

نتایج نشان می دهد که با افزایش عدد رینولدز از ۴۰ تا ۶۰۰ دمای پیل کاهش می یابد. دمای مناسب برای پیل معمولاً زیر ۸۰ درجه سلسیوس است. نتایج نشان می دهد که با افزایش عدد رینولدز جریان خنک کاری از ۴۰ به ۸۰۰، افت فشار در مسیر کانال جریان خنک کاری از ۴۰ به ۶۴۰ پاسکال می رسد. عدد ناسلت جریان خنک کاری با تغییر عدد رینولدز جریان خنک کاری از ۴۰ تا ۴۰۰ به صورت نمایی از ۳۵۰ تا حدود ۷۰۰ رشد می کند و پس از آن ثابت می شود. علاوه بر آن نتایج نشان داد که بهترین عملکرد پیل در عدد رینولدز ۶۰ به دست آمده است زیرا با افزایش عدد رینولدز جریان خنک کاری و افزایش افت فشار توان پارازیسی سیستم بالا می رود. همچنین با افزایش عدد رینولدز تغییر خاصی در منحنی عملکرد پیل سوختی به وجود نمی آید. با افزایش عدد رینولدز، عدد ناسلت میانگین به نزدیک ۸۰۰ می رسد و ناسلت میانگین، بعد از تغییر عدد رینولدز از ۶۰۰ به ۸۰۰ تغییر خاصی نکرده است. ماکزیمم عدد ناسلت به ۸۰۰ رسیده است. در عدد رینولدز ۴۰ عدد ناسلت به ۳۰۰ رسیده است. چگالی توان حجمی و وزنی به دست آمده برای یک استک با توان ۵ کیلووات، به ترتیب ۰/۷۸ کیلووات بر لیتر و ۰/۰۰۰۴۷ کیلووات بر کیلوگرم است.

- [13] Sasmito, Agus P., Birgersson, Erik, and Mujumdar, Arun S. Numerical investigation of liquid water cooling for a proton exchange membrane fuel cell stack. *Heat Transfer Engineering*, 32(2):151-167, 2011.
- [14] Afshari, Ebrahim, Ziaei-Rad, Masoud, and Dehkordi, Mehdi Mosharaf. Numerical investigation on a novel zigzag-shaped flow channel design for cooling plates of pem fuel cells. *Journal of the Energy Institute*, 90(5):752-763, 2017.
- [15] Afshari, Ebrahim, Ziaei-Rad, Masoud, and Jahantigh, Nabi. Analytical and numerical study on cooling flow field designs performance of pem fuel cell with variable heat flux. *Modern Physics Letters B*, 30(16):1650155, 2016.
- [16] Afshari, Ebrahim, Ziaei-Rad, Masoud, and Shariati, Zahra. A study on using metal foam as coolant fluid distributor in the polymer electrolyte membrane fuel cell. *International Journal of Hydrogen Energy*, 41(3):1902-1912, 2016.
- [17] Ghasemi, M., Ramiar, A., Ranjbar, A.A., and Rahgoshay, S.M. A numerical study on thermal analysis and cooling flow fields effect on pemfc performance. *International Journal of Hydrogen Energy*, 42(38):24319-24337, 2017.
- [18] Rahgoshay, S.M., Ranjbar, A.A., Ramiar, A., and Alizadeh, E. Thermal investigation of a pem fuel cell with cooling flow field. *Energy*, 134:61-73, 2017.
- [19] Berning, T and Djilali, N. Three-dimensional computational analysis of transport phenomena in a pem fuel cell—a parametric study. *Journal of Power Sources*, 124(2):440-452, 2003.
- [20] Larminie, James, Dicks, Andrew, and McDonald, Maurice S. *Fuel cell systems explained*, vol. 2. J. Wiley Chichester, UK, 2003.
- [21] SGL Group: Sigracet GDL for Fuel Cells, 2016.
- [22] Ge, Shan-Hai and Yi, Bao-Lian. A mathematical model for pemfc in different flow modes. *Journal of Power Sources*, 124(1):1-11, 2003.
- [23] Mazumder, Sandip and Cole, James Vernon. Rigorous 3-d mathematical modeling of PEM fuel cells. *Journal of The Electrochemical Society*, 150(11):A1503, 2003.
- cles hybrid proton exchange membranes. *Journal of Membrane Science*, 347(1-2):26-31, 2010.
- [4] Oh, Si-Doek, Kim, Ki-Young, Oh, Shuk-Bum, and Kwak, Ho-Young. Optimal operation of a 1-kW PEMFC-based CHP system for residential applications. *Applied Energy*, 95:93-101, 2012.
- [5] Barbir, Frano. *PEM fuel cells: theory and practice*. Academic press, 2012.
- [6] Chen, F.C., Gao, Z., Loutfy, R.O., and Hecht, M. Analysis of optimal heat transfer in a pem fuel cell cooling plate. *Fuel Cells*, 3(4):181-188, 2003.
- [7] Kumar, Atul and Reddy, Ramana G. Materials and design development for bipolar/end plates in fuel cells. *Journal of Power Sources*, 129(1):62-67, 2004. Selected papers presented at the conference High Energy Density Electrochemical Power Sources.
- [8] Senn, S. M. and Poulikakos, D. Polymer electrolyte fuel cells with porous materials as fluid distributors and comparisons with traditional channeled systems. *Journal of Heat Transfer*, 126(3):410-418, Jun 2004.
- [9] Choi, Jongmin, Kim, Yoon-Ho, Lee, Yongtaek, Lee, Kyu-Jung, and Kim, Yongchan. Numerical analysis on the performance of cooling plates in a pemfc. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 22(7):1417-1425, Jul 2008.
- [10] Nam, Jin Hyun, Lee, Kyu-Jin, Sohn, Sangho, and Kim, Charn-Jung. Multi-pass serpentine flow-fields to enhance under-rib convection in polymer electrolyte membrane fuel cells: Design and geometrical characterization. *Journal of Power Sources*, 188(1):14-23, 2009.
- [11] Baek, Seung Man, Yu, Seung Ho, Nam, Jin Hyun, and Kim, Charn-Jung. A numerical study on uniform cooling of large-scale pemfcs with different coolant flow field designs. *Applied Thermal Engineering*, 31(8):1427-1434, 2011.
- [12] Asghari, Saeed, Akhgar, Hooman, and Imani, Bagher Faghieh. Design of thermal management sub-system for a 5kw polymer electrolyte membrane fuel cell system. *Journal of Power Sources*, 196(6):3141-3148, 2011.