



بررسی عددی تأثیر مخالف بودن جهت جریان‌های گاز سلول‌های مجاور بر توان تولیدی و توزیع دما در یک پیل سوختی غشا پلیمری

محمدامین زیبائی^۱، جواد محمودی‌مهر^{۲*} و مسعود حامی^۳

^۱ کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه گیلان، رشت، ایران.

^۲ دانشیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه گیلان، رشت، ایران.

^۳ دکتری، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه گیلان، رشت، ایران.

یادداشت تحقیقاتی، تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۱/۰۲؛ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۴/۱۶؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۶/۰۹

چکیده

در پیل سوختی غشا پلیمری، افزایش چگالی جریان گاهی می‌تواند منجر توزیع غیریکنواخت دما و در نتیجه، گرادیان‌های دمایی شدید شود. در همین راستا، این پژوهش به صورت عددی به بررسی تأثیر جهت‌های مختلف جریان ورودی گاز بر عملکرد حرارتی و الکتروشیمیایی دو سلول مجاور در یک پیل سوختی غشای پلیمری می‌پردازد. در این مطالعه، معادلات حاکم به صورت پایا، سه بعدی و با نگرش حجم محدود در نرم‌افزار آنسیس فلونت حل شده‌اند. نتایج نشان می‌دهند که در تمامی حالت‌ها، بیشترین گرادیان دما در راستای ارتفاع سلول و کمترین آن در راستای طولی ایجاد می‌شود. همچنین مشخص شده است که عملکرد حرارتی و الکتروشیمیایی سلول‌ها همواره در نوعی تعارض عملکردی قرار دارند؛ به گونه‌ای که بهبود در یکی از شاخص‌ها با افت در شاخص دیگر همراه است. مطالعه موردی پنج حالت مختلف از جهت جریان نشان می‌دهد که یکنواخت‌ترین توزیع دما (کمترین گرادیان دمایی) مربوط به حالتی است که جهت جریان در هر دو سلول و هر دو ردیف کاملاً یکسان و موافق باشد (حالت اول). در این حالت، بیشینه تفاوت گرادیان دمایی نسبت به سایر حالت‌ها برابر با $4/4$ کلون بر سانتی‌متر محاسبه شده است. در مقابل، در حالتی که جهت جریان در هر دو سلول و در هر دو ردیف کاملاً مخالف یکدیگر باشد (حالت پنجم)، بیشترین مقدار چگالی جریان الکتریکی مشاهده می‌شود. اختلاف بیشینه چگالی جریان میان حالت‌های مختلف برابر با $0/29$ آمپر بر سانتی‌متر مربع (معادل $30/21$ درصد) بوده و این مقدار در ولتاژ کاری $0/75$ ولت به دست آمده است.

کلمات کلیدی: بررسی عددی؛ پیل سوختی غشا پلیمری؛ چگالی جریان؛ سلول‌های مجاور؛ گرادیان دمایی.

Numerical investigation of the effect of opposing gas flow directions in adjacent cells on power generation and temperature distribution in a polymer electrolyte membrane fuel cell

Mohammad Amin Zibaei¹, Javad Mahmoudimehr^{2,*}, Masoud Hami³

¹MSc graduate, Mechanical Engineering, University of Guilan, Rasht, Iran

²Assoc. Prof., Mechanical Engineering, University of Guilan, Rasht, Iran

³Ph.D, Mechanical Engineering, University of Guilan, Rasht, Iran

Abstract

In polymer electrolyte membrane fuel cells (PEMFCs), increasing the current density can lead to non-uniform temperature distribution and, consequently, severe thermal gradients. In this regard, the present study numerically investigates the effect of various inlet gas flow directions on the thermal and electrochemical performance of two adjacent cells in a PEMFC. In this study, the governing equations are solved under steady-state, three-dimensional conditions using the finite volume method in ANSYS Fluent. The results indicate that the highest temperature gradients occur along the vertical (height) direction of the cell, while the lowest gradients are observed along the longitudinal direction. The study also reveals a conflict between the thermal and electrochemical performance of the cells, in which a decline in the other accompanies improvement in the criterion. A case study of five different flow configurations shows that the most uniform temperature distribution (i.e., the lowest thermal gradient) occurs when the flow directions in both cells and rows are the same (Case 1). In this configuration, the maximum temperature gradient difference compared to other cases is calculated to be 4.4 K/cm. In contrast, the highest current density is observed when the flow directions in both cells and rows are opposite (Case 5). The maximum difference in current density among the configurations is 0.29 A/cm² (equivalent to 30.21%), obtained at an operating voltage of 0.75 V.

Keywords: Adjacent cells; Current density; Numerical investigation; Polymer electrolyte membrane fuel cell (PEMFC); Temperature gradient.

۱- مقدمه

رشد جمعیت و گسترش فعالیت‌های صنعتی، تقاضای بی‌سابقه‌ای برای منابع انرژی ایجاد کرده است. در طول سالیان گذشته، بخش عمده‌ای از این نیاز از طریق سوخت‌های فسیلی تأمین شده است. با این حال، ماهیت تجدیدناپذیر این منابع، همراه با مشکلاتی مانند بازده پایین و انتشار گازهای گلخانه‌ای، استفاده از آن‌ها را به یکی از نگرانی‌های اصلی در سطح جهانی تبدیل کرده است. در این راستا، استفاده از سیستم‌های تبدیل انرژی کارآمدتر و سازگار با محیط‌زیست برای تأمین انرژی پایدار ضروری است [۱ و ۲].

پیل سوختی یک مبدل انرژی الکتروشیمیایی است که انرژی انباشته در سوخت را به طور مستقیم به الکتریسیته تبدیل می‌کند. پیل‌های سوختی به دلیل نداشتن فرایند احتراق، انتشار گازهای آلاینده و مخرب را به حداقل رسانده و همچنین بازدهی بالاتری را نسبت به موتورهای احتراقی از خود نشان می‌دهند. علاوه بر این، ویژگی‌هایی نظیر قابلیت استفاده از سوخت‌های متنوع، عملکرد بی‌صدا و قابلیت دوام بالا آن را به گزینه‌ای جذاب برای تبدیل انرژی تبدیل کرده است [۳ و ۴].

در میان انواع مختلف پیل‌های سوختی، پیل سوختی غشا پلیمری به دلیل چگالی توان بالا، دمای عملیاتی پایین و راه‌اندازی سریع می‌تواند در کاربردهایی مختلفی نظیر خودروهای الکتریکی و واحدهای نیروگاه‌ها مورد استفاده قرار گیرند. به دلیل این مزایا، پیل‌های سوختی غشا پلیمری یک فناوری پیشرو در گذار به سمت سیستم‌های انرژی پایدار و کم‌کربن شناخته می‌شوند [۵-۷].

افزایش چگالی جریان در پیل‌های سوختی، گاهی می‌تواند با پیامدهایی همچون توزیع غیریکنواخت دما و شکل‌گیری گرادیان‌های حرارتی شدید همراه باشد. چنین گرادیان‌های کنترل‌نشده‌ای می‌توانند تنش‌های حرارتی در ساختار پیل ایجاد کرده و در نهایت منجر به ترک‌خوردگی اجزاء و کاهش عمر مفید آن شوند [۸]. از این رو، ضروری است که دو معیار کلیدی، یعنی چگالی جریان الکتریکی و گرادیان دمایی، به صورت هم‌زمان مورد بررسی قرار گیرند تا تعادل مناسبی میان آنها برقرار شود.

در این میان، جهت جریان‌های ورودی به پیل سوختی نقش تعیین‌کننده‌ای در نحوه توزیع و انتقال واکنش‌دهنده‌ها به نواحی فعال سلول دارد. علاوه بر این، نحوه ورود جریان تأثیر

مستقیمی بر توزیع دما در سراسر سلول دارد و جهت‌گیری مناسب می‌تواند از تجمع حرارت در یک ناحیه خاص جلوگیری کرده و یکنواختی دمایی بهتری را در سلول ایجاد کند [۹]. در سالیان گذشته پژوهش‌های عددی و تجربی متعددی بر روی پیل‌های سوختی غشا پلیمری در جهت بهبود عملکرد آن انجام گرفته است.

پارک و لی [۱۰] به صورت عددی و تجربی به بررسی ویژگی‌ها و تأثیر جریان متقاطع عبوری از ساختار متخلخل الکتروکود بین دو کانال جریان مجاور در یک پیل سوختی غشای پلیمری با آرایش کانال مارپیچی پرداختند. نتایج نشان می‌دهد که افت فشار کلی از ورودی تا خروجی کانال، در مقایسه با حالتی که لایه نفوذ گاز وجود ندارد (یعنی دیواره نفوذناپذیر)، به طور قابل توجهی کاهش می‌یابد. این کاهش در شرایط جریان پایین می‌تواند تا ۸۰ درصد نیز برسد. فرینگ و همکاران [۱۱] با استفاده از روش‌های آزمایشگاهی و شبیه‌سازی عددی، تأثیر کانال‌های جریان موازی و مارپیچ را بر عملکرد پیل سوختی غشای پلیمری مورد بررسی قرار دادند. یافته‌ها نشان می‌دهد که طراحی کانال مارپیچ، عملکرد الکتروشیمیایی بهتری نسبت به کانال موازی دارد. همچنین مشخص شده است که در طرح جریان موازی، چگالی جریان محلی در نواحی مرکزی تقریباً صفر است که این موضوع منجر به افت غلظت و کاهش عملکرد پیل می‌شود. اوبایا و همکاران [۱۲] با استفاده از شبیه‌سازی عددی، میدان جریان و توزیع گازهای واکنش‌دهنده را در کانال پیل سوختی غشای پلیمری مجهز به پره‌های سوزنی عرضی مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان می‌دهد که به کارگیری این پره‌ها در کانال جریان، ضمن کاهش افت فشار، بهبود قابل توجه عملکرد پیل سوختی را به همراه دارد. بیلگیلی و همکاران [۱۳] با استفاده از یک مدل سه بعدی محاسباتی، به بررسی عملکرد پیل‌های سوختی غشای پلیمری با موانع در کانال‌های جریان گاز پرداختند. این شبیه‌سازی‌ها در شرایط عملیاتی مختلفی از جمله ضریب استوکیومتری، رطوبت نسبی و دما انجام شده است تا تأثیر موانع در شرایط متنوع ارزیابی شود. نتایج مشخص می‌سازد که وجود موانع در کانال‌ها باعث بهبود توزیع غلظت در امتداد کانال و افزایش انتقال گازهای واکنش‌دهنده به نواحی فعال شده و در نتیجه، چگالی جریان افزایش می‌یابد. طغیانی و همکاران [۱۴] تأثیر فشار تجمعی را بر عملکرد

که مدل تک کاناله توزیع جریان را نشان نمی‌دهد که این امر منجر به تولید چگالی جریان بالاتر نسبت به مدل مقیاس کوچک می‌شود. بنابراین، آنها بیان کردند که پیش‌بینی عملکرد پیل سوختی برای مدل تک کاناله کامل نیست. پاشاکی و محمودی‌مهر [۲۰] با روش عددی، عملکرد یک پیل سوختی غشا پلیمری قوسی شکل را نسبت به حالت مستقیم مقایسه کردند. در این مطالعه برای تمام شرایط عملکردی مورد بررسی، خم‌شدگی باعث بهبود عملکرد می‌شود. مطابق نتایج به‌دست‌آمده، بالاترین اثرگذاری خم‌شدگی ۸/۳۳ درصد است که در زاویه خم‌شدگی ۲۰ درجه حاصل شده است. اشرفی و همکاران [۲۱] با روش عددی، به بررسی اثر هندسه کانال جریان بر عملکرد یک پیل سوختی غشا پلیمری در شرایط ناپایا پرداختند. آنها مشاهده کردند که پس از حدود ۷۰ ثانیه جریان به حالت پایا می‌رسد. زاهد و همکاران [۲۲] عملکرد یک پیل سوختی غشا پلیمری با لایه پخش گاز دندانه‌دار را بررسی کرده‌اند. آنها مشاهده کرده‌اند که دندانه‌دار شدن لایه پخش گاز همیشه باعث بهبود عملکرد می‌شود. در مطالعه آن‌ها بیشترین تأثیر دندانه‌دار شدن لایه پخش گاز حدود ۴/۰۸ درصد است که در فشار ۲ اتمسفر و درصد خلوص ۲۱ اکسیژن در سمت کاتد به دست می‌آید. فو و همکاران [۲۳] عملکرد یک پیل سوختی غشای پلیمری با کانال‌های موج‌مانند سینوسی موازی را به‌صورت سه‌بعدی شبیه‌سازی کردند. نتایج این مطالعه بیانگر آن است که در مقایسه با کانال‌های مستقیم معمولی، کانال‌های موج‌مانند سینوسی عملکرد بهتری در انتقال جرم دارند. همچنین، یافته‌های حاصل از بهینه‌سازی نهایی حاکی از آن است که استفاده از این نوع کانال موجب افزایش ۶/۱۶ درصدی در چگالی توان خالص می‌شود. یانگ و همکاران [۲۴] یک پیکربندی نوآورانه میدان جریان زنجیره‌ای شکل را با تمرکز بر بهبود فرایند انتقال جرم اکسیژن و توزیع چگالی جریان به‌صورت عددی بررسی کردند. در این تحقیق، بهبود ۱۸/۹ درصدی در چگالی توان در مقایسه با میدان جریان موازی حاصل شده است.

باتوجه به تحقیقات انجام شده؛ مشاهده می‌شود که در سال‌های اخیر تلاش‌های بسیاری در جهت ارتقای عملکرد پیل سوختی غشا پلیمری با تغییر در هندسه کانال‌های جریان و نحوه ورود جریان به کانال‌ها صورت گرفته است. در پژوهش‌های گذشته، جهت جریان‌ها در سلول‌های مجاور یک پیل سوختی

الکتروشیمیایی و حرارتی یک پیل سوختی غشای پلیمری با سه عرض مختلف کانال جریان مورد بررسی قرار دادند. نتایج حاکی از آن است که کاهش عرض کانال، به دلیل افزایش سرعت جریان، موجب بهبود عملکرد پیل می‌شود. همچنین مشخص شده است که با افزایش ضخامت غشا از ۱۵ به ۵۰ میلی‌متر، چگالی جریان حدود ۴۳ درصد کاهش می‌یابد که علت آن کاهش سرعت انتقال یون‌های هیدروژن در غشای ضخیم‌تر است. چن و همکاران [۱۵] عملکرد خروجی و کیفیت توزیع گاز در یک پیل سوختی غشای پلیمری را تحت شرایط عملیاتی مختلف شبیه‌سازی کردند. نتایج آن‌ها نشان می‌دهد که با افزایش چگالی جریان، نقش یکنواختی توزیع غلظت اکسیژن در تعیین ولتاژ خروجی برجسته‌تر می‌شود. همچنین، در نواحی با چگالی جریان کم تا متوسط، ولتاژ پیل سوختی عمدتاً به میانگین غلظت گاز وابسته است. رضازاده و همکاران [۱۶] با روش‌های عددی و آزمایشگاهی تأثیر شکل هندسی کانال‌های گاز را بر روی عملکرد یک پیل سوختی غشا پلیمری ارزیابی کردند. آنها مشاهده کردند که کانال‌های سینوسی شکل با ۵ قوس منجر به افزایش ۱۳ درصدی چگالی جریان الکتریکی نسبت به کانال‌های مستقیم می‌شود. ژیا و همکاران [۱۷] یک مدل سه‌بعدی و غیرهم‌دما را برای بررسی تأثیر نسبت‌های عرض کانال به دنده بر عملکرد یک پیل سوختی غشا پلیمری توسعه دادند. نتایج یافته‌های آنها نشان می‌دهد که افزایش این نسبت، انتقال گاز در الکتروود متخلخل را تسهیل می‌کند، اما به دلیل فاصله طولانی‌تر برای رسانش الکترون، باعث تلفات اهمی بالاتری می‌شود. قصابی و همکاران [۱۸] یک پیل سوختی غشای پلیمری را به‌صورت سه‌بعدی و چندفازی مدل‌سازی کردند. یافته‌ها نشان می‌دهد که افزایش نسبت استوکیومتری، غلظت واکنش‌دهنده‌ها را در ناحیه واکنش افزایش داده و منجر به ایجاد نقطه اکسترمم در منحنی‌های غلظت آب غشایی و میزان اشباع آب می‌شود. همچنین مشخص شده است که افزایش فشار و کاهش دما، باعث افزایش محتوای آب غشایی و بهبود انتقال واکنش‌دهنده‌ها می‌شود، هرچند این شرایط موجب افزایش سطح اشباع آب نیز می‌گردد. روسلی و همکاران [۱۹] به مقایسه مدل‌های سه‌بعدی تک کاناله و هفت کاناله مقیاس کوچک با مدل چندکاناله پرداختند تا تأثیر مقیاس مدل‌سازی بر عملکرد پیل سوختی غشا پلیمری تعیین شود. آنها دریافتند

غشا پلیمری نسبت به هم یکسان بوده است و تاکنون تأثیر جهت جریان مخالف در سلول های مجاور بررسی نشده است. در پژوهش حاضر، با هدف ایجاد بهبود چگالی جریان الکتریکی و ایجاد یکنواختی بیشتر در توزیع دما، شبیه سازی عددی و سه بعدی دو سلول از پیل سوختی غشا پلیمری که در مجاورت هم قرار دارند، انجام می پذیرد. به این منظور، اثر جهت های مختلف جریان های ورودی به کانال ها از دیدگاه معیارهای ارزیابی متشکل از چگالی جریان الکتریکی و گرادیان دمایی با یکدیگر مقایسه می شوند و جهت جریان بهینه از دیدگاه هر یک از این معیارها تعیین می گردد. در ادامه، اثرات دمای عملکردی و نرخ جرمی جریان های ورودی در ولتاژهای مختلف مورد بررسی قرار می گیرند.

به صورت خلاصه، اهداف و نوآوری های پژوهش حاضر به شرح زیر است:

- شبیه سازی سه بعدی پیل سوختی غشا پلیمری دوکاناله (دو سلول مجاور هم)
- بررسی معیارهای ارزیابی چگالی جریان الکتریکی و گرادیان دما
- مقایسه موافق و مخالف بودن جهت جریان های ورودی به کانال های مجاور بر روی معیارهای ارزیابی اشاره شده
- انتخاب جهت جریان بهینه از دیدگاه هر یک از معیارهای ارزیابی
- ارزیابی تأثیر دمای عملکردی، ضریب استوکیومتری سوخت و ضریب استوکیومتری هوا بر روی هر یک از جهت های جریان بهینه

۲- معرفی مسئله

شکل ۱ الف نمای سه بعدی دو سلول پیل سوختی غشا پلیمری را در مجاورت هم نشان می دهد. مطابق شکل، هر سلول دارای یک غشا (الکترولیت)، یک الکتروند و یک الکتروند کاتد و کانال های آنند و کاتد است. هر الکتروند نیز متشکل از لایه نفوذ گاز و لایه کاتالیست است [۲۵].

کانال های مشابه در سلول ها به صورت هم ردیف قرار گرفته اند؛ به طوری که کانال های آنند در ردیف بالا و کانال های کاتد در ردیف پایین قرار دارند. باتوجه به جهت ورود

جریان های گاز به داخل کانال ها، پنج حالت مختلف از جریان قابل تصور است.

در شکل ۱ ب، نمای سه بعدی از حالات پنج گانه جهت جریان در سلول های مجاور نمایش داده شده است. جزئیات مربوط به جهت جریان گاز در کانال های یک سلول و کانال های هر ردیف، در جدول ۱ تشریح شده است.

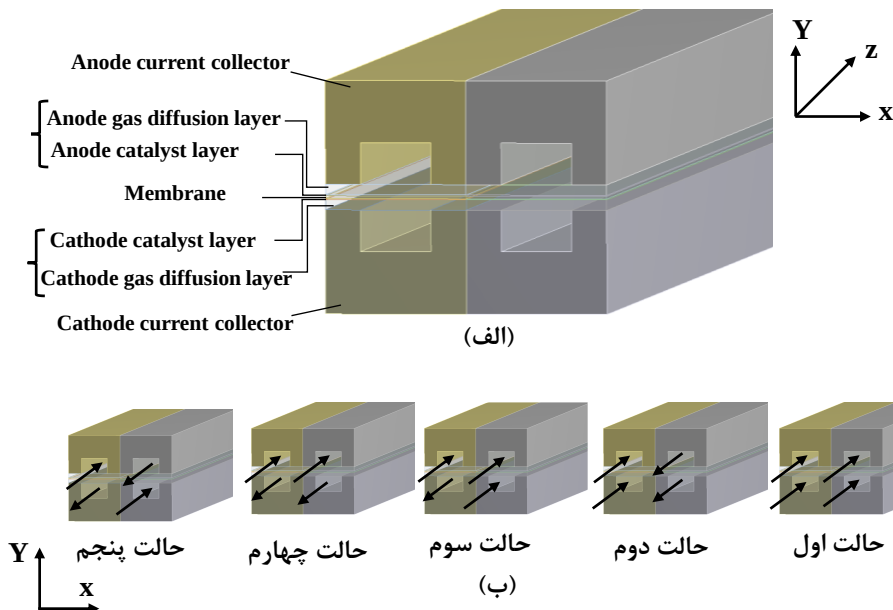
جدول ۱- جهت جریان گاز در کانال های یک سلول و کانال های هر ردیف.

شماره	جهت جریان ها در هر سلول	جهت جریان در کانال های هر ردیف
۱	هر دو سلول دارای جریان موافق	هر دو ردیف از کانال ها دارای جریان موافق
۲	هر دو سلول دارای جریان موافق	هر دو ردیف از کانال ها دارای جریان مخالف
۳	یک سلول دارای جریان موافق و یک سلول دارای جریان مخالف	یک ردیف از کانال ها دارای جریان موافق و ردیف دیگر دارای جریان مخالف
۴	هر دو سلول دارای جریان مخالف	هر دو ردیف از کانال ها دارای جریان موافق
۵	هر دو سلول دارای جریان مخالف	هر دو ردیف از کانال ها دارای جریان مخالف

همچنین، ابعاد هندسی پیل سوختی مورد استفاده در شبیه سازی حاضر در جدول ۲ ارائه شده است.

جدول ۲- ابعاد هندسه پیل سوختی شبیه سازی حاضر.

پارامتر	مقدار (mm)
ارتفاع جمع کننده جریان	۲
ضخامت لایه پخش گاز	۰/۲
ضخامت لایه کاتالیست	۰/۰۲
ضخامت غشا	۰/۰۵
ارتفاع کانال	۰/۸
عرض کانال	۱/۵
طول کانال	۱۲۵
عرض هر سلول	۳



شکل ۱- (الف) معرفی اجزای سازنده پیل سوختی و (ب) معرفی حالت‌های مختلف ورود جریان به دو سلول پیل سوختی غشا پلیمری در مجاورت هم

۳- روش شبیه‌سازی

در این بخش معادلات حاکم، شرایط مرزی، روش حل معادلات، استقلال از شبکه و اعتبارسنجی نتایج مورد بررسی قرار می‌گیرند.

۳-۱- معادلات حاکم

معادلات حاکم بر پدیده‌های الکتروشیمیایی و فیزیکی در پیل سوختی غشا پلیمری شامل معادله بقای جرم، معادله بقای مومنتوم، معادله بقای انرژی، معادله انتقال گونه‌ها، معادله پتانسیل و معادله انتقال آب هستند. این معادلات به صورت سه‌بعدی و در شرایط آرام و پایا حل می‌شوند.

معادله بقای جرم در رابطه (۱) نشان داده شده است که در این رابطه $\vec{u}$ بردار سرعت و ρ چگالی مخلوط است که از رابطه (۲) محاسبه می‌شود. همچنین، S_{H_2O} و S_{O_2} به ترتیب جملات چشمه ناشی از مصرف هیدروژن، مصرف اکسیژن و تولید آب هستند که به ترتیب از روابط (۳) تا (۵) تعیین می‌شوند [۲۶ و ۲۷].

$$\vec{V} \cdot (\rho \vec{u}) = S_{H_2} + S_{O_2} + S_{H_2O} \quad (1)$$

$$\rho = \frac{P}{RT \sum \frac{Y_i}{M_i}} \quad (2)$$

$$S_{H_2} = -\frac{j_{an}}{2F} M_{H_2} \quad (3)$$

$$S_{O_2} = -\frac{j_{ca}}{4F} M_{O_2} \quad (4)$$

$$S_{H_2O} = +\frac{j_{ca}}{2F} M_{H_2O} \quad (5)$$

در روابط P فشار، T دما، R ثابت جهانی گازها، F ثابت فارادی^۱، M_i جرم مولکولی گونه i و Y_i کسر جرمی گونه i هستند. همچنین، j_{an} و j_{ca} چگالی جریان حجمی تولیدشده در سمت آند و کاتد هستند که بر اساس رابطه باتلر-ولمر^۲ طی روابط (۶) و (۷) تعیین می‌شوند [۲۰ و ۲۸].

$$j_{an} = \xi_{an} j_{an}^{ref} \left(\frac{C_{H_2}}{C_{H_2}^{ref}} \right)^{\gamma_{an}} \left(\exp \left(\frac{\alpha_{an} F}{RT} \eta_{an} \right) - \exp \left(\frac{-\alpha_{ca} F}{RT} \eta_{an} \right) \right) \quad (6)$$

² Butler-Volmer

¹ Faraday Constant

مخلوط است. علاوه بر این، عبارت S_h چشمه گرما است که از رابطه (۱۵) تعیین می‌گردد [۲۰ و ۲۸].

$$\nabla \cdot (\rho C_p \vec{u} T) = -\nabla \cdot (k \nabla T) + S_h \quad (۱۴)$$

$$S_h = I^2 R_{ohm} + h_{react} - j_{an,ca} \eta_{an,ca} \quad (۱۵)$$

در این رابطه R_{ohm} مقاومت اهمی و h_{react} آنتالپی واکنش الکتروشیمیایی هستند.

نیرو محرکه یک واکنش الکتروشیمیایی، افت ولتاژ کلی است که تفاوت پتانسیل بین فاز جامد و الکترولیت را نشان می‌دهد. معادلات مربوط به توابع پتانسیل در روابط (۱۶) و (۱۷) ارائه شده‌اند [۱۴].

$$\nabla \cdot (\sigma_{sol} \nabla \varphi_{sol}) + S_{sol} = 0 \quad (۱۶)$$

$$\nabla \cdot (\sigma_{mem} \nabla \varphi_{mem}) + S_{mem} = 0 \quad (۱۷)$$

در روابط فوق σ_{sol} و σ_{mem} به ترتیب ضریب هدایت الکتریکی و ضریب هدایت یونی هستند. مقدار σ_{mem} از رابطه (۱۸) به دست می‌آید. همچنین، S_{sol} و S_{mem} جملات چشمه‌ای هستند که از روابط (۱۹) و (۲۰) حاصل می‌شوند [۲۰].

$$\sigma_{mem} = (0.514\lambda - 0.326) e^{1268 \left(\frac{1}{303} - \frac{1}{T} \right)} \quad (۱۸)$$

$$S_{sol} = -j_{an,ca} \quad (۱۹)$$

$$S_{mem} = +j_{an,ca} \quad (۲۰)$$

درگ الکترواسموتیک^۳ و پخش برگشتی^۴ آب عوامل انتقال آب در غشا هستند. درگ الکترواسموتیک خاصیتی است که در آن یون‌های پروتون آب را از سمت آند به کاتد انتقال می‌دهند. پخش برگشتی نیز خاصیتی است که در آن آب از سمت با غلظت بیشتر به سمت با غلظت کمتر می‌رود. معادله انتقال آب در رابطه (۲۱) نشان داده شده است [۲۰ و ۲۹].

$$\vec{\nabla} \cdot \left(\frac{n_d M_{H_2O}}{F} \vec{I} - D_w \vec{\nabla} C_w \right) = 0 \quad (۲۱)$$

$$\begin{aligned} j_{ca} &= \xi_{ca} j_{ca}^{ref} \left(\frac{C_{O_2}}{C_{O_2}^{ref}} \right)^{\gamma_{ca}} \left(-\exp \left(\frac{\alpha_{an} F}{RT} \eta_{ca} \right) \right. \\ &\quad \left. + \exp \left(\frac{-\alpha_{ca} F}{RT} \eta_{ca} \right) \right) \end{aligned} \quad (۷)$$

لازم به ذکر است که در روابط فوق ξ سطح فعال، j^{ref} چگالی جریان مرجع، C غلظت مولی، α ضریب انتقال بار، γ ضریب توانی غلظت مولی و η افت فعال سازی هستند. افت فعال سازی در آند و کاتد به ترتیب از روابط (۸) و (۹) محاسبه می‌شود. در روابط فوق، φ_{sol} پتانسیل فاز جامد، φ_{mem} پتانسیل الکترولیت و V_{OC} ولتاژ مدار باز هستند [۲۰ و ۲۸].

$$\eta_{an} = \varphi_{sol} - \varphi_{mem} \quad (۸)$$

$$\eta_{ca} = \varphi_{sol} - \varphi_{mem} - V_{OC} \quad (۹)$$

معادله مومنتوم طبق رابطه (۱۰) نوشته می‌شود. در این رابطه، S_u جمله چشمه است که از رابطه (۱۱) قابل محاسبه است. در معادله مومنتوم، μ لزجت دینامیکی، k_p نفوذپذیری محیط متخلخل و ε ضریب تخلخل هستند. [۲۰]

$$\vec{\nabla} \cdot (\rho \vec{u} \vec{u}) = -\vec{\nabla} P + \vec{\nabla} \cdot (\vec{\nabla} \mu \vec{u}) + S_u \quad (۱۰)$$

$$S_u = -\frac{\mu}{k_p} \varepsilon \vec{u} \quad (۱۱)$$

رابطه (۱۲) معادله انتقال گونه‌ها را نشان می‌دهد. در این معادله، D_i نفوذپذیری گونه i و D_i^{eff} نفوذپذیری مؤثر است که از رابطه (۱۳) به دست می‌آید. همچنین، S_i جملات چشمه را نشان می‌دهند که از روابط (۳) تا (۵) قابل تعیین هستند [۲۰ و ۲۹].

$$\vec{\nabla} \cdot (\rho \vec{u} Y_i) = \vec{\nabla} \cdot (\rho D_i^{eff} \nabla Y_i) + S_i \quad (۱۲)$$

$$D_i^{eff} = \varepsilon^{1.5} D_i \quad (۱۳)$$

رابطه (۱۴) معادله بقای انرژی را نشان می‌دهد. در این رابطه C_p ظرفیت گرمایی ویژه مخلوط، k هدایت گرمایی

^۴ Back Diffusion

^۳ Electro-Osmotic Drag

۳-۳- روش حل عددی

در پژوهش حاضر، هندسه پیل سوختی در نرم‌افزار انسیس دیزاین‌مدلر^۵ طراحی شده و مش‌بندی آن با استفاده از نرم‌افزار انسیس مشینگ^۶ انجام شده است. شبیه‌سازی پدیده‌های انتقال حرارت و جرم در پیل سوختی غشا پلیمری به صورت سه‌بعدی و در حالت پایا صورت گرفته است. این مدل با بهره‌گیری از روش حجم محدود و با استفاده از ماژول پیل سوختی در نرم‌افزار انسیس فلونت^۷ پیاده‌سازی شده است. همچنین، گسسته‌سازی معادلات با روش بالادست مرتبه دوم^۸ انجام شده و از روش سیمپل^۹ برای کوپل‌کردن سرعت و فشار استفاده شده است. لازم به ذکر است که حل تکراری معادلات تا رسیدن باقی‌مانده‌های عددی به 10^{-6} ادامه می‌یابد. شرایط عملکردی و پارامترهای ورودی در جدول ۳ و مشخصات فیزیکی و الکتروشیمیایی مدل در جدول ۴ ارائه شده‌اند.

۳-۴- استقلال از شبکه

جهت بررسی استقلال از شبکه مدل حاضر، چهار شبکه‌بندی متفاوت بررسی شده‌اند. در شکل ۲ نمای روبروی شبکه‌بندی‌های مختلف ارائه شده است. لازم به ذکر است که در این شبکه‌بندی‌ها از سلول‌های محاسباتی مکعبی سازمان یافته استفاده شده است. بر اساس نتایج، با تغییر تعداد سلول‌های محاسباتی از ۲۷۰,۰۰۰ به ۵۱۴,۰۸۰ (از شبکه‌بندی سوم به چهارم) چگالی جریان دچار تغییر قابل‌توجهی نشده و میزان افزایش آن کمتر از ۰/۲۳ درصد است. بنابراین، شبکه‌بندی سوم (با تعداد ۲۷۰,۰۰۰ سلول محاسباتی) به‌اندازه کافی ریز تشخیص داده‌شده و مبنای شبیه‌سازی فعلی قرار گرفته است.

جدول ۳- شرایط عملکردی و پارامترهای ورودی [۱۴].

پارامتر	مقدار
نرخ جرمی جریان در ورودی آند (Kg/s)	6×10^{-4}
نرخ جرمی جریان در ورودی کاتد (Kg/s)	5×10^{-4}
فشار عملکردی (Pa)	۲۰۰۰۰

که n_d ضریب درگ الکترواستتیک، D_w ضریب پخش آب و C_w غلظت جرمی آب در غشا هستند که به ترتیب از روابط (۲۲) تا (۲۴) محاسبه می‌شوند [۲۰].

$$n_d = 2.5 \frac{\lambda}{22} \quad (22)$$

$$D_w =$$

$$D_w = \begin{cases} 3.1 \times 10^{-7} \lambda [\exp(0.28\lambda) - 1] \exp\left(-\frac{2346}{T}\right) & \lambda \leq 3 \\ 4.17 \times 10^{-8} \lambda [1 + 161 \exp(-\lambda)] & \lambda > 3 \end{cases} \quad (23)$$

$$C_w = \frac{\rho_{m,dry}}{M_{m,dry}} \lambda \quad (24)$$

در روابط فوق، λ ظرفیت آب در غشا، $\rho_{m,dry}$ چگالی خشک غشا، $M_{m,dry}$ جرم خشک غشا، a_w فعالیت شیمیایی آب هستند. ظرفیت آب غشا و فعالیت شیمیایی آب از روابط زیر تعیین می‌شوند [۲۹].

$$\lambda = \begin{cases} 0.043 + 17.81a_w - 39.85a_w^2 + 36a_w^3 & 0 < a_w \leq 1 \\ 14 + 1.4(a_w - 1) & 1 \leq a_w \leq 3 \end{cases} \quad (25)$$

$$a_w = \frac{X_{H_2O} P}{P_{\text{sat}}} \quad (26)$$

۳-۲- شرایط مرزی

جریان‌های سوخت و هوا با نرخ جرمی و دمای ثابت وارد کانال‌ها می‌شوند و شرط مرزی فشار در خروجی کانال‌ها اعمال می‌گردد. همچنین، برای دیوارهای خارجی، شرط مرزی دمای ثابت در نظر گرفته شده است. علاوه بر این، پتانسیل الکتریکی فاز جامد در سمت آند صفر و در سمت کاتد برابر با ولتاژ پیل سوختی فرض شده است.

^۵ Second-order upwind

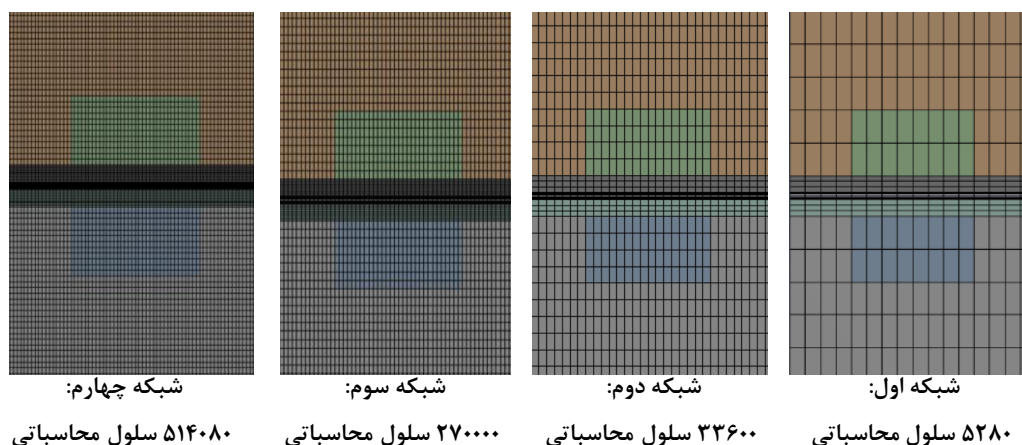
^۹ SIMPLE algorithm

^۵ ANSYS-DesignModeler18.2

^۶ ANSYS Meshing 18.2

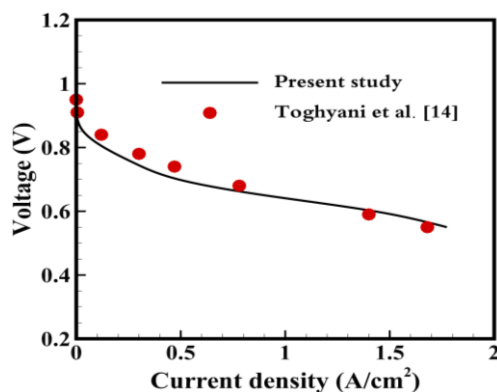
^۷ ANSYS Fluent 18.2

کسر جرمی هیدروژن در ورودی آند	۰/۸	کسر جرمی آب در ورودی آند	۰/۲
کسر جرمی اکسیژن در ورودی کاتد	۰/۲	کسر جرمی آب در ورودی کاتد	۰/۱



شکل ۲- نمای روبروی شبکه بندی های مختلف

است، نتایج دارای تطابق خوبی هستند؛ بنابراین اعتبار نتایج شبیه سازی قابل تأیید است.



شکل ۳- مقایسه منحنی قطبیت در شبیه سازی حاضر و مرجع [۱۴]

جدول ۴- مشخصات فیزیکی و الکتروشیمیایی مدل حاضر [۳۲-۳۰، ۱۴].

پارامتر	مقدار
چگالی جریان مرجع آند (A/m^2)	۱۰۰۰۰
چگالی جریان مرجع کاتد (A/m^2)	۲۰
ضریب انتقال بار آند و کاتد (-)	۲
غلظت مرجع هیدروژن ($kmol/m^3$)	۱
غلظت مرجع اکسیژن ($kmol/m^3$)	۱
غلظت مولی نسبی در سمت آند (-)	۰/۵
غلظت مولی نسبی در سمت کاتد (-)	۱
ضریب نفوذ گونه ها (m^2/s)	3×10^{-10}
جرم خشک غشا ($kg/kmol$)	۱۱۰۰
ضریب تخلخل لایه کاتالیست و لایه نفوذ گاز (-)	۰/۳
نفوذپذیری لایه کاتالیست و لایه نفوذ گاز (m^2)	$1/1 \times 10^{-10}$

۳-۵- اعتبارسنجی مدل عددی

برای حصول اطمینان از صحت نتایج شبیه سازی کار انجام شده، منحنی تغییرات چگالی جریان بر حسب ولتاژ (منحنی قطبیت) کار حاضر با نتایج مرجع [۱۴] مقایسه شده و در شکل ۳ نشان داده شده است. همان طور که قابل مشاهده

۳-۶- بررسی موازنه جرمی گونه ها

در این قسمت، همگرایی حل عددی از طریق موازنه جرمی گونه های واکنشی (هیدروژن، اکسیژن و آب) مورد بررسی قرار گرفته است. به طور نمونه، اطلاعات جدول ۵ مقدار نرخ جرمی گونه ها برای ولتاژ عملکردی ۰/۵۵ ولت را نشان می

جدول ۵ نشان‌دهنده برقراری موازنه جرمی برای تمامی گونه‌ها در پیل سوختی است.

دهد. در این جدول، مقدار جرم ورودی، جرم خروجی و نرخ مصرف یا تولید خالص هر گونه گزارش شده است. نتایج

جدول ۵- مقدار نرخ جرمی گونه‌ها در ولتاژ ۰/۵۵ ولت بر حسب ($\frac{\text{kg}}{\text{s}}$)

گونه واکنشی	کانال سوخت		کانال هوا		مقدار گونه‌ی مصرفی	مقدار گونه‌ی تولیدی
	ورودی	خروجی	ورودی	خروجی		
هیدروژن	$4/8 \times 10^{-10}$	$4/1054911 \times 10^{-10}$	-----	$1/9146155 \times 10^{-10}$	$6/9259427 \times 10^{-10}$	-----
اکسیژن	-----	$2/752855 \times 10^{-10}$	1×10^{-10}	$4/5047557 \times 10^{-10}$	$5/4949686 \times 10^{-10}$	-----
آب	$1/2 \times 10^{-10}$	$4/6438423 \times 10^{-10}$	5×10^{-10}	$7/6201766 \times 10^{-10}$	-----	$6/0640189 \times 10^{-10}$

۴- بحث و بررسی نتایج

در قسمت نتایج، تأثیر حالت‌های مختلف ورود جریان به پیل سوختی بر ویژگی‌های الکتروشیمیایی و حرارتی یک پیل سوختی غشا پلیمری بررسی می‌شود. در این راستا، معیار-های چگالی جریان الکتریکی و گرادیان دما در حالت‌های مختلف جریان با هم مقایسه می‌شوند و حالت برتر از دیدگاه هر معیار تعیین می‌گردد.

۴-۱- تحلیل الکتروشیمیایی

در این بخش، ابتدا نتایج شبیه‌سازی برای یک شرایط مرجع (مبنا) ارائه می‌شود. سپس، تأثیر سه عامل کلیدی شامل دما، ضریب استوکیومتری سوخت و ضریب استوکیومتری هوا بر عملکرد الکتروشیمیایی و حرارتی پیل سوختی بررسی می‌گردد. مشخصات دقیق شرایط مبنا که مبنای تحلیل‌های مقایسه‌ای قرار گرفته است، در جدول ۶ آورده شده است. این شرایط شامل مقادیر پایه برای دمای کاری، فشار گازها، دبی جرمی سوخت و هوا، و ضرایب استوکیومتری ورودی‌ها می‌باشد.

جدول ۶- مشخصات شرایط مبنا در کار حاضر [۱۴].

پارامتر	مقدار
فشار (Pa)	۲۰۰۰۰۰
دما (K)	۳۵۳
دبی جرمی سوخت (kg/s)	6×10^{-10}
ضریب استوکیومتری سوخت در ولتاژ ۰/۵۵ ولت	۴
دبی جرمی هوا (kg/s)	5×10^{-10}
ضریب استوکیومتری هوا در ولتاژ ۰/۵۵ ولت	۱/۱

۴-۱-۱- مقایسه عملکرد الکتروشیمیایی پیل سوختی

برای حالت‌های مختلف جریان در شرایط مبنا

منحنی تغییرات چگالی جریان بر حسب ولتاژ (منحنی قطبیت) برای حالات مختلف جریان در شکل ۴ ارائه شده است. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود، در تمامی حالت‌ها با کاهش ولتاژ، روند کاهش چگالی جریان در ابتدا شدید بوده، سپس کند شده و مجدداً زیاد می‌شود. شکل ۴ نشان می‌دهد که چگالی جریان حالت‌های چهار و پنج که دو حالت جهت جریان مخالف هستند در یک محدوده بوده و بالاتر از سایر حالات قرار دارند. در آرایش جریان مخالف، انتهای کانال یکی از سلول‌ها با ابتدای کانال سلول مجاور هم‌راستا می‌شود. این باعث ایجاد یک گرادیان قوی‌تر غلظتی بین دو سلول مجاور می‌شود، که به بهبود نفوذ گونه‌های واکنشی به مناطق واکنش کمک می‌کند. در نتیجه، واکنش‌های الکتروشیمیایی با شدت بیشتری رخ داده و چگالی جریان بالاتری تولید می‌شود.

همچنین، حالات اول و دوم که هر دو دارای جهت جریان موافق بوده در یک محدوده بوده و کمترین چگالی جریان خروجی را به خود اختصاص داده‌اند. مطابق شکل ۴، در ولتاژهای بالا و پایین، تفاوت بین چگالی جریان حالت‌های مختلف ناچیز است. این در حالی است که در ولتاژهای میانی، تفاوت بین نتایج قابل‌توجه است. بیشترین اختلاف چگالی بین حالت‌های مختلف در ولتاژ ۰/۸۵ ولت برابر ۰/۰۱ آمپر بر سانتی‌متر مربع، در ولتاژ ۰/۷ ولت برابر ۰/۱۴ آمپر بر

است. با عبور گونه‌های واکنشی از لایه‌های نفوذ گاز، واکنش‌ها انجام می‌شوند. در نتیجه، غلظت مولی گونه‌های واکنشی در طول کانال کاهش می‌یابد و در نزدیکی خروجی، غلظت آنها به حداقل می‌رسد. مطابق شکل ۶، در حالت‌های اول و چهارم توزیع غلظت مولی گونه‌های واکنشی در کانال‌های مجاور تقریباً مشابه است. علاوه بر این، مقدار غلظت مولی گونه‌ها در کانال‌های صفحه مرکزی در حالت‌های چهارم و پنجم کمتر از حالت‌های دیگر است. این موضوع به معنای مصرف بیشتر هیدروژن در حالت‌های چهارم و پنجم و به تبع آن، چگالی جریان بالاتر است.

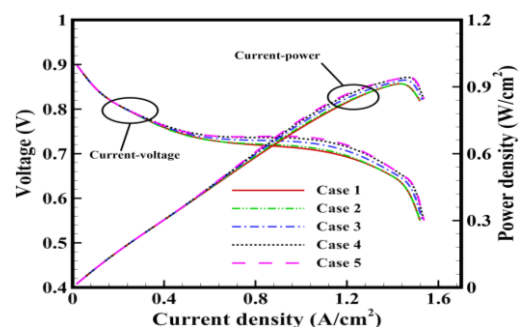
کانتورهای غلظت مولی آب و چگالی جریان تولیدی به ترتیب در سمت راست و چپ شکل ۷ نمایش داده شده‌اند. در سمت آند، حضور آب عمدتاً ناشی از رطوبت همراه گاز هیدروژن ورودی است که برای حفظ رطوبت غشا و عملکرد بهینه آن ضروری است. کاهش رطوبت می‌تواند منجر به کاهش هدایت پروتون و افزایش مقاومت الکتریکی داخلی شود که به افت ولتاژ و کاهش بازدهی پیل سوختی می‌انجامد. با حرکت پروتون‌ها از آند به کاتد، بخشی از این رطوبت نیز به همراه آن‌ها به سمت کاتد منتقل می‌شود. بنابراین، در طول کانال آند، به‌ویژه در نواحی میانی و خروجی، غلظت آب در سمت کاتد بیشتر از آند است.

در مقابل، در سمت کاتد، آب از دو منبع تأمین می‌گردد: یکی تولید مستقیم آب در نتیجه واکنش الکتروشیمیایی اکسیژن، و دیگری، انتقال آب از آند به کاتد توسط پدیده الکترواسموز. در نتیجه، با نزدیک شدن به ناحیه خروجی کانال کاتد، به دلیل تجمع هم‌زمان آب تولیدی و منتقل شده، غلظت مولی آب به بیشینه مقدار خود می‌رسد.

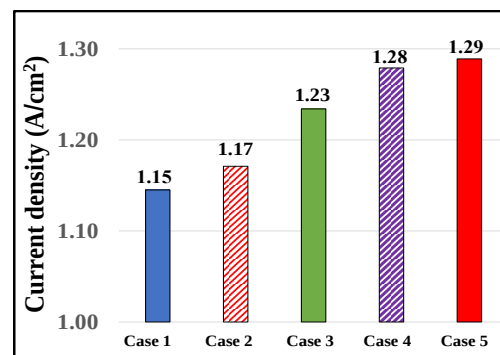
علاوه بر این، همان‌طور که در سمت چپ شکل ۷ مشاهده می‌شود، بیشترین چگالی جریان در نواحی خروجی زمانی رخ می‌دهد که جهت جریان گاز در هر دو سلول مجاور مخالف یکدیگر باشد (حالت چهارم). در این حالت، چگالی جریان در نواحی ورودی ناچیز است. در حالی که در حالت اول، چگالی جریان در خروجی به کمترین حد خود می‌رسد اما در ورودی بیشینه است.

سانتی‌متر مربع و در ولتاژ ۰/۵۵ ولت برابر ۰/۰۲ آمپر بر سانتی‌متر مربع است.

چگالی جریان مربوط به حالات مختلف در ولتاژ ۰/۷ ولت (که بیشترین اختلاف در آن وجود داشته) در قالب نمودار میله‌ای در شکل ۵ ارائه شده است. مطابق این شکل، چگالی جریان حالت پنجم به ترتیب ۱۰/۸۶ درصد، ۹/۳۰ درصد، ۴/۶۵ درصد و ۰/۷۸ بیشتر از حالت‌های اول تا چهارم است.

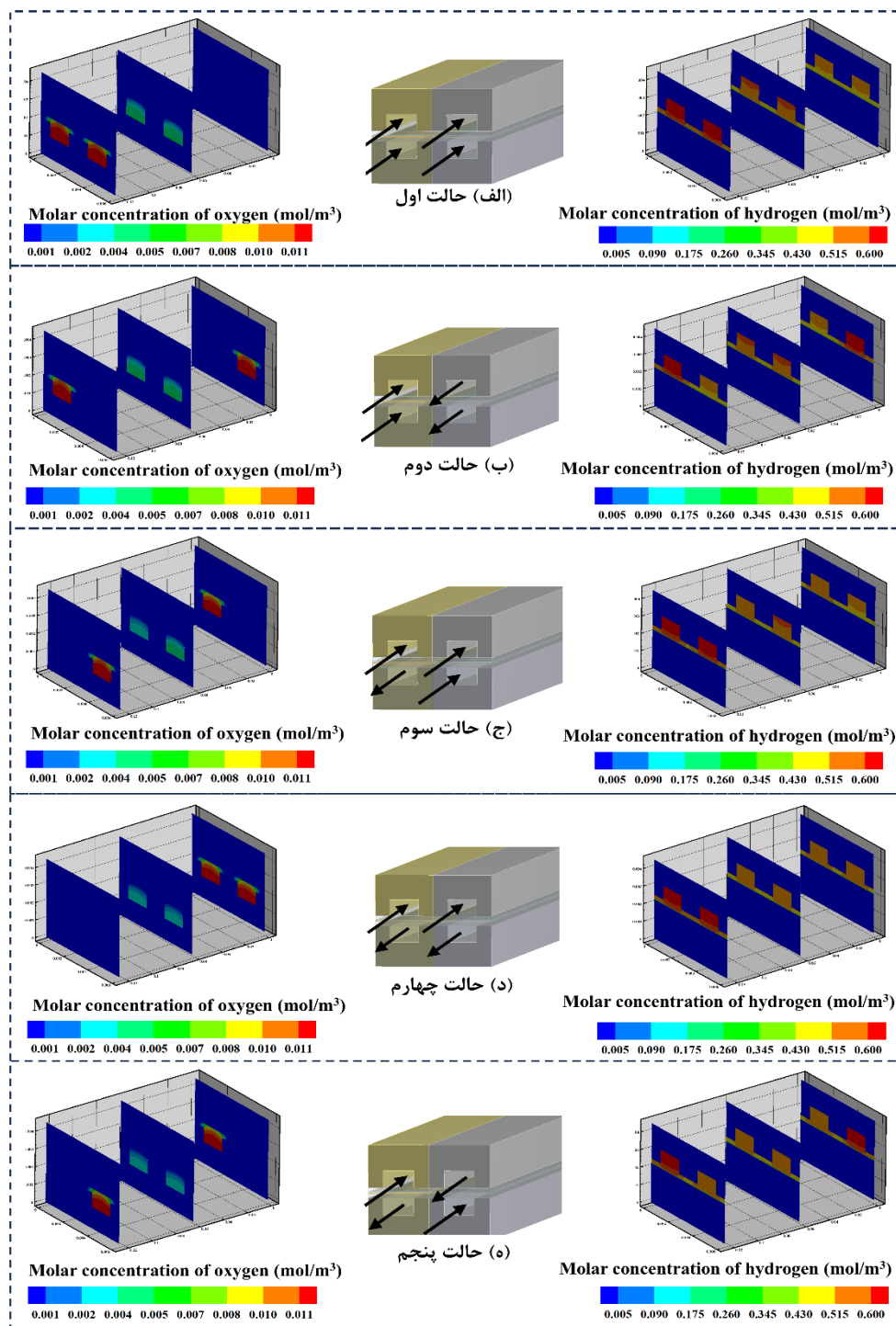


شکل ۴- نمودار تغییرات چگالی جریان بر حسب ولتاژ در حالت‌های مختلف در شرایط مبنا

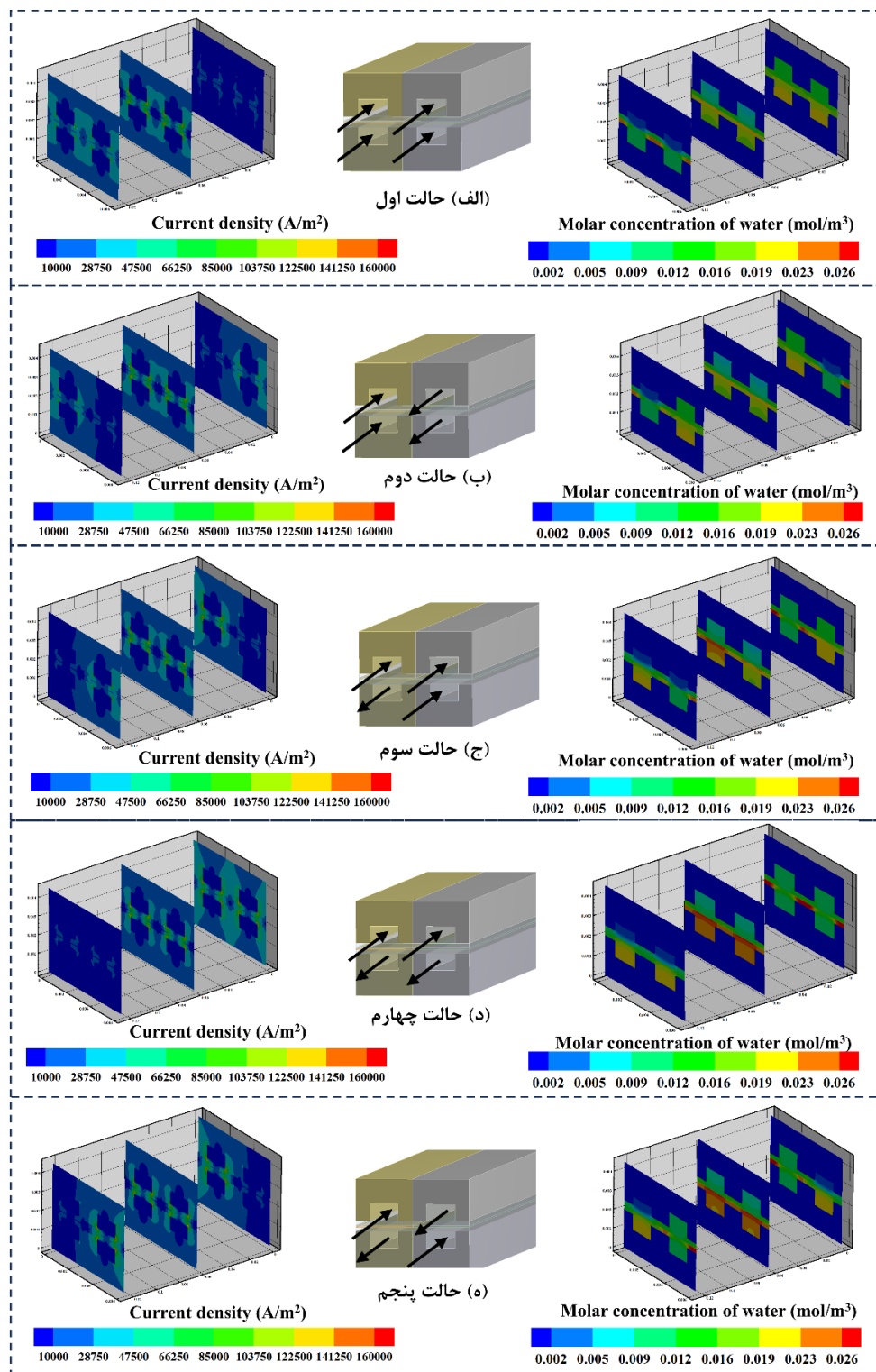


شکل ۵- مقایسه چگالی جریان حالت‌های مختلف در ولتاژ ۰/۷ ولت در شرایط مبنا

کانتورهای غلظت مولی گونه‌های واکنش‌دهنده شامل هیدروژن و اکسیژن برای حالت‌های مختلف جریان به ترتیب در سمت راست و چپ شکل ۶ نمایش داده شده است. همان‌طور که در این شکل قابل مشاهده است، نزدیک به ورودی کانال‌ها، غلظت هیدروژن و اکسیژن یکپارچه و بالا

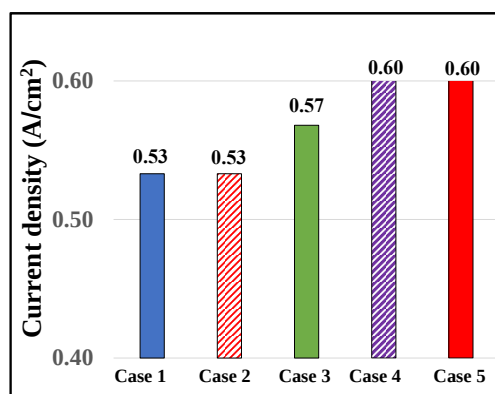


شکل ۶- کانتر سه بعدی غلظت مولی هیدروژن (سمت راست) و غلظت مولی اکسیژن (سمت چپ) در شرایط مبنا



شکل ۷- کانتور سه بعدی غلظت مولی آب تولیدی (سمت راست) و چگالی جریان تولیدی (سمت چپ) در شرایط مبنا

که ضریب استوکیومتری سوخت برابر نسبت میزان سوخت ورودی به میزان سوخت مصرفی می‌باشد.



شکل ۹- مقایسه چگالی جریان حالت‌های مختلف در دمای ۳۴۳ کلین و ولتاژ ۰/۸ ولت

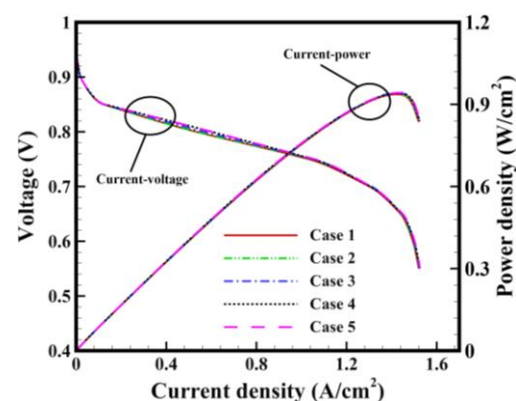
شکل ۱۰ منحنی تغییرات چگالی جریان بر حسب ولتاژ را در ضریب استوکیومتری سوخت دو نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، مقادیر چگالی جریان حالت‌های چهار و پنج که دو حالت جهت جریان مخالف هستند بر هم منطبق بوده و بالاتر از سایر حالات قرار دارند. همچنین، حالت اول کمترین چگالی جریان خروجی را به خود اختصاص داده است. از شکل ۱۰ می‌توان دریافت که بیشترین تفاوت چگالی جریان در ولتاژهای میانی قابل حصول است. در ولتاژهای بالا (به دلیل بالا بودن افت فعال‌سازی) و در ولتاژهای پایین (به دلیل بالا بودن افت غلظتی)، به‌گونه‌ای هستند که تأثیر جهت جریان بر چگالی جریان کمتر حس می‌شود.

چگالی جریان مربوط به حالات مختلف در ولتاژ ۰/۷۵ ولت (که بیشترین اختلاف در آن وجود داشته) در قالب نمودار میله‌ای در شکل ۱۱ ارائه شده است. مطابق این شکل، بیشترین تفاوت بین مقادیر چگالی جریان برابر ۰/۲۳ آمپر بر سانتی‌متر مربع (معادل ۲۱/۷۰ درصد) است.

۲-۱-۴- اثر دما بر چگالی جریان خروجی

برای بررسی اثر دما بر چگالی جریان، دما از ۳۵۳ کلین به ۳۴۳ کلین کاهش یافته است. شکل ۸ منحنی تغییرات چگالی جریان بر حسب ولتاژ را در دمای ۳۴۳ کلین نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، مقادیر چگالی جریان حالت‌های چهار و پنج که دو حالت جهت جریان مخالف هستند بر هم منطبق بوده و بالاتر از سایر حالات قرار دارند. همچنین، مقادیر چگالی جریان حالات اول و دوم که هر دو جهت جریان موافق بوده بر هم منطبق بوده و دارای کمترین چگالی جریان خروجی می‌باشند. به عبارت دیگر، می‌توان به این نتیجه رسید که با تغییر دما، نظم حالت‌های جریان در معیار چگالی جریان بدون تغییر باقی می‌ماند. همان‌طور که مشاهده می‌شود، بیشترین تفاوت مقادیر چگالی جریان در ولتاژهای بالا رخ داده است و در سایر ولتاژها، تفاوت اندک است.

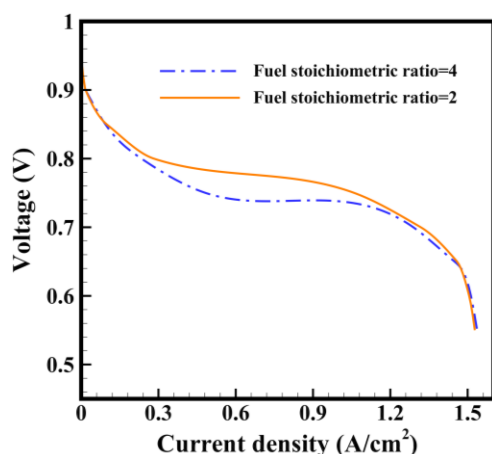
چگالی جریان مربوط به حالات مختلف در ولتاژ ۰/۸ ولت (که بیشترین اختلاف در آن وجود داشته) در قالب نمودار میله‌ای در شکل ۹ ارائه شده است. مطابق این شکل، بیشترین تفاوت بین مقادیر چگالی جریان برابر ۰/۰۷ آمپر بر سانتی‌متر مربع (معادل ۱۱/۶۷ درصد) است.



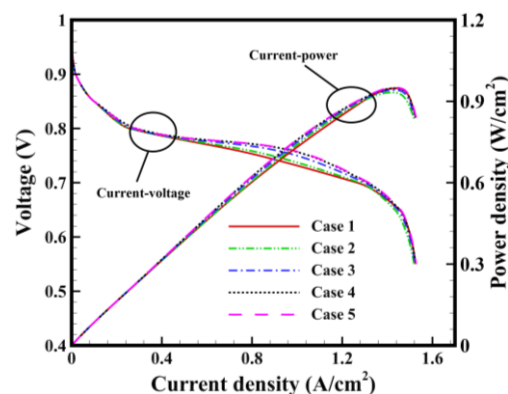
شکل ۸- نمودار تغییرات چگالی جریان بر حسب ولتاژ در حالت‌های مختلف در دمای ۳۴۳ کلین

۳-۱-۴- بررسی اثر ضریب استوکیومتری سوخت

در این مرحله، ضریب استوکیومتری سوخت به نصف کاهش یافته و از مقدار ۴ به ۲ رسیده است. لازم به ذکر است



شکل ۱۲- مقایسه چگالی جریان حالت پنج در دو ضریب استوکیومتری سوخت ۴ (شرایط مبنا) و ضریب استوکیومتری سوخت ۲



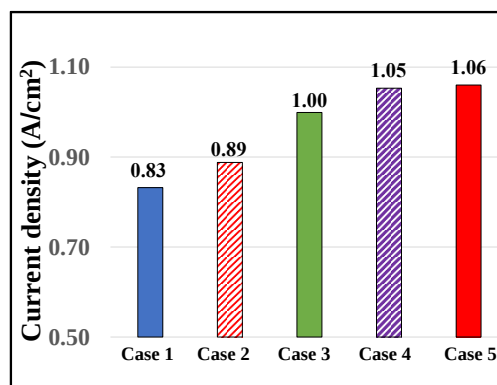
شکل ۱۰- نمودار تغییرات چگالی جریان بر حسب ولتاژ در حالت‌های مختلف در ضریب استوکیومتری سوخت برابر دو

۴-۱-۴- مقایسه دو مقدار ضریب استوکیومتری هوا

در این مرحله، ضریب استوکیومتری هوا دوبرابر شده و از ۱/۱ به ۲/۲ رسیده است. لازم به ذکر است که ضریب استوکیومتری هوا برابر نسبت میزان هوای ورودی به میزان هوای مصرفی می‌باشد.

شکل ۱۳ منحنی تغییرات چگالی جریان بر حسب ولتاژ را در ضریب استوکیومتری هوا برابر با ۲/۲ نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، مقادیر چگالی جریان حالت‌های چهار و پنج که دو حالت جهت جریان مخالف هستند بر هم منطبق بوده و بالاتر از سایر حالات قرار دارند. همچنین، حالت اول دارای پایین‌ترین چگالی جریان خروجی می‌باشد. به عبارت دیگر، می‌توان به این نتیجه رسید که با تغییر ضریب استوکیومتری هوا، رتبه حالت‌های جریان در معیار چگالی جریان بدون تغییر باقی می‌ماند. علاوه بر این، در شکل ۱۳ مشاهده می‌شود که با افزایش ضریب استوکیومتری هوا، افت ولتاژ در چگالی جریان‌های بالا کاهش می‌یابد؛ زیرا مقدار بیشتری اکسیژن در دسترس الکتروود کاتد قرار می‌گیرد.

چگالی جریان مربوط به حالات مختلف در ولتاژ ۰/۷۵ ولت (که بیشترین اختلاف در آن وجود داشته) در قالب نمودار میله‌ای در شکل ۱۴ ارائه شده است. مطابق این شکل، بیشترین تفاوت بین مقادیر چگالی جریان برابر ۰/۲۹ آمپر بر سانتی‌متر مربع (معادل ۳۰/۲۱ درصد) است.



شکل ۱۱- مقایسه چگالی جریان حالت‌های مختلف در ضریب استوکیومتری سوخت برابر دو و ولتاژ ۰/۷۵ ولت

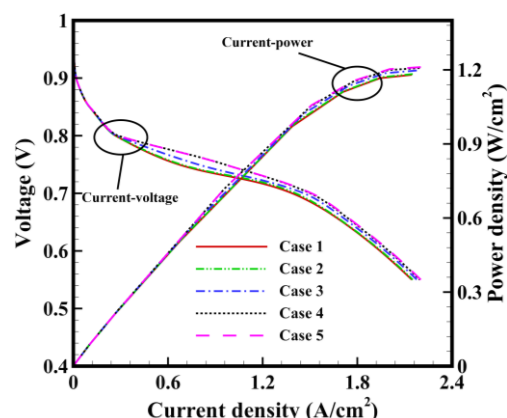
تأثیر ضریب استوکیومتری سوخت بر چگالی جریان حالت پنج در شکل ۱۲ نشان داده شده است. این شکل نشان می‌دهد که کاهش ضریب استوکیومتری سوخت از ۴ به ۲ منجر به افزایش چگالی جریان می‌شود. در واقع در شرایط مسئله فعلی، با کاهش ضریب استوکیومتری سوخت، به دلیل میزان نیاز واکنش بخش بیشتری از سوخت در واکنش شرکت می‌کند و این امر منجر به بالا رفتن چگالی جریان می‌شود.

داخل سلول گرما آزاد می کنند که منجر به افزایش دمای گاز می شود. بر اساس قانون گازهای ایده آل، افزایش دما باعث کاهش چگالی گاز شده و در نتیجه، سرعت جریان افزایش می یابد.

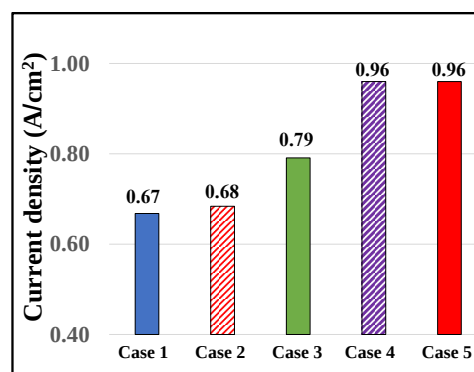
از کانتور دمای ارائه شده در سمت چپ شکل ۱۵ می توان دریافت که در نواحی نزدیک به دیواره کانال ها، به دلیل اعمال شرط مرزی دمای ثابت، دما حدود ۳۵۳ کلوین باقی مانده است. اما با دور شدن از دیواره ها و ورود به نواحی میانی کانال که واکنش های الکتروشیمیایی با شدت بیشتری انجام می شوند، افزایش دما به وضوح دیده می شود. این افزایش دما علاوه بر آنکه باعث بهبود واکنش های الکتروشیمیایی می شود، با کاهش چگالی گاز همراه است و در نتیجه، سرعت جریان گاز در این نواحی افزایش می یابد.

در شکل ۱۶، بیشینه گرادیان دمایی برای حالت های مختلف در سه راستای عرض، ارتفاع و طول با یکدیگر مقایسه شده است. نتایج این شکل نشان می دهد که در تمام حالات، گرادیان دما در راستای ارتفاع بیشترین مقدار و در راستای طول کمترین مقدار را دارد. دلیل این تفاوت به هندسه فیزیکی پیل سوختی بازمی گردد. از آنجایی که ارتفاع پیل سوختی بسیار کم است، حتی تغییرات جزئی دما در این راستا منجر به ایجاد گرادیان دمایی نسبتاً بزرگ می شود. در مقابل، طول پیل سوختی زیاد است و جریان گاز نیز در این راستا حرکت می کند و گرما را به طور پیوسته با خود جابه جا می نماید. بنابراین، با وجود اینکه ممکن است اختلاف دمای کلی در طول کانال قابل توجه باشد، اما به دلیل طول زیاد مسیر، گرادیان دمایی در راستای طول نسبت به سایر راستاها کمتر است.

علاوه بر این، حالت های اول و دوم که در آن هر دو سلول دارای جریان موافق هستند، گرادیان دمایی کمتری را تجربه می کنند. این در حالی است که حالت هایی که در آن هر دو سلول دارای جریان مخالف هستند (حالت های چهارم و پنجم) گرادیان دمایی بیشتری را تجربه می کنند. با توجه به نتایج به دست آمده، کمترین گرادیان دمایی بیشینه برابر ۸۴/۳ کلوین بر سانتی متر و بیشترین گرادیان دمایی بیشینه برابر ۸۸/۷ کلوین بر سانتی متر است که به ترتیب متعلق به حالت های اول و چهارم است.



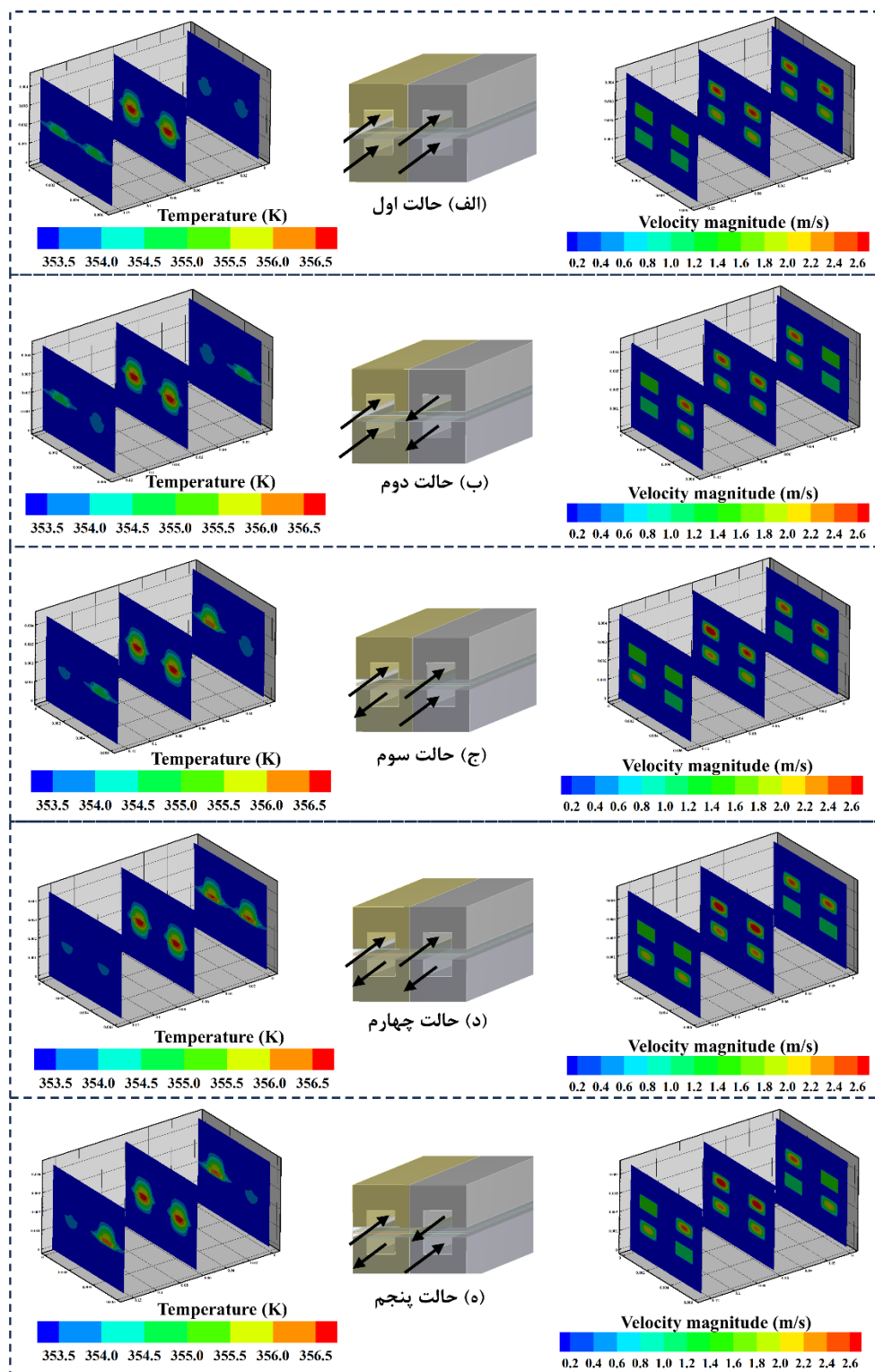
شکل ۱۳- نمودار تغییرات چگالی جریان بر حسب ولتاژ در حالت های مختلف در ضریب استوکیومتری هوا برابر ۲/۲



شکل ۱۴- مقایسه چگالی جریان حالت های مختلف در ضریب استوکیومتری هوا برابر ۲/۲ و ولتاژ ۰/۷۵ ولت

۴-۲- تحلیل حرارتی

کانتور توزیع سرعت در کانال های جریان و کانتور توزیع دما به ترتیب در سمت راست و چپ شکل ۱۵ نشان داده شده است. مطابق این شکل، سرعت هیدروژن در کانال سوخت (کانال بالا) بیشتر از سرعت هوا در کانال هوا (کانال پایین) است. درضمن، بیشینه سرعت گاز در کانال های جریان برابر ۲/۶ متر بر ثانیه است. علاوه بر این، سرعت جریان های گاز در نواحی خروجی بیشتر از سرعت گاز در نواحی ورودی است. این پدیده به کاهش تدریجی فشار گاز در طول کانال بازمی گردد که برای حفظ تداوم جریان، با افزایش سرعت جبران می شود. از سوی دیگر، واکنش های الکتروشیمیایی



شکل ۱۵- کانتور سه‌بعدی سرعت (سمت راست) و دما (سمت چپ) در شرایط مینا

مخالف یکدیگر باشد (حالت دوم)، عملکرد الکتروشیمیایی بهبود می‌یابد.

❖ در مقایسه دو سلول با جهت جریان مخالف در کنار هم با جمع‌بندی معیارهای مختلف مشخص شد که دو سلول با ردیف کانال با جهت جریان مخالف نسبت به هم چگالی جریان بیشتری را احصا می‌کنند (حالت پنجم).

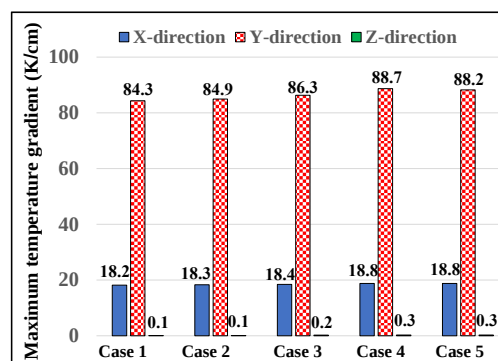
❖ با کاهش نرخ دبی جرمی سمت آند و نصف کردن آن، بهبود چگالی جریان مشاهده شده و اختلاف میان حالات به‌وضوح بیشتر نمایان می‌شود.

❖ فاصله نزدیک نتایج خروجی در ولتاژهای پایین به سبب کسری ورودی سمت کاتد بوده و با افزایش نرخ دبی جرمی سمت کاتد چگالی جریان خروجی زیاد می‌شود.

❖ برای تمامی حالت‌ها، گرادیان دمایی در راستای ارتفاع دارای بیشترین مقدار بوده و گرادیان دمایی در راستای طولی کمترین مقدار را به خود اختصاص داده است.

❖ حالت‌های اول و دوم که در آن هر دو سلول دارای جریان موافق هستند، گرادیان دمایی کمتری را تجربه می‌کنند. این در حالی است که حالت‌هایی که در آن هر دو سلول دارای جریان مخالف هستند (حالت‌های چهارم و پنجم) گرادیان دمایی بیشتری را تجربه می‌کنند.

❖ علاوه بر این پیشنهاد زیر برای ادامه کار ارائه می‌شود: اگرچه در مقاله حاضر، به‌منظور پرهیز از هزینه محاسباتی بالا، دو کانال در هر سمت آند و کاتد مورد توجه قرار گرفته است، اما شبیه‌سازی یک پشته کامل شامل تعدادی سلول که به‌صورت الگوهای مختلفی از جمله موازی، درهم‌تنیده و مارپیچی به هم مرتبط هستند، می‌تواند نتایج دقیق‌تر و جامع‌تری به‌همراه داشته باشد. همچنین، برای ارزیابی دقیق‌تر تأثیر حضور آب مایع بر نتایج مطالعه حاضر، پیشنهاد می‌گردد در پژوهش‌های آتی از مدل‌های دوفازی استفاده گردد.



شکل ۱۶- مقایسه گرادیان دمایی حالت‌های مختلف در سه راستا

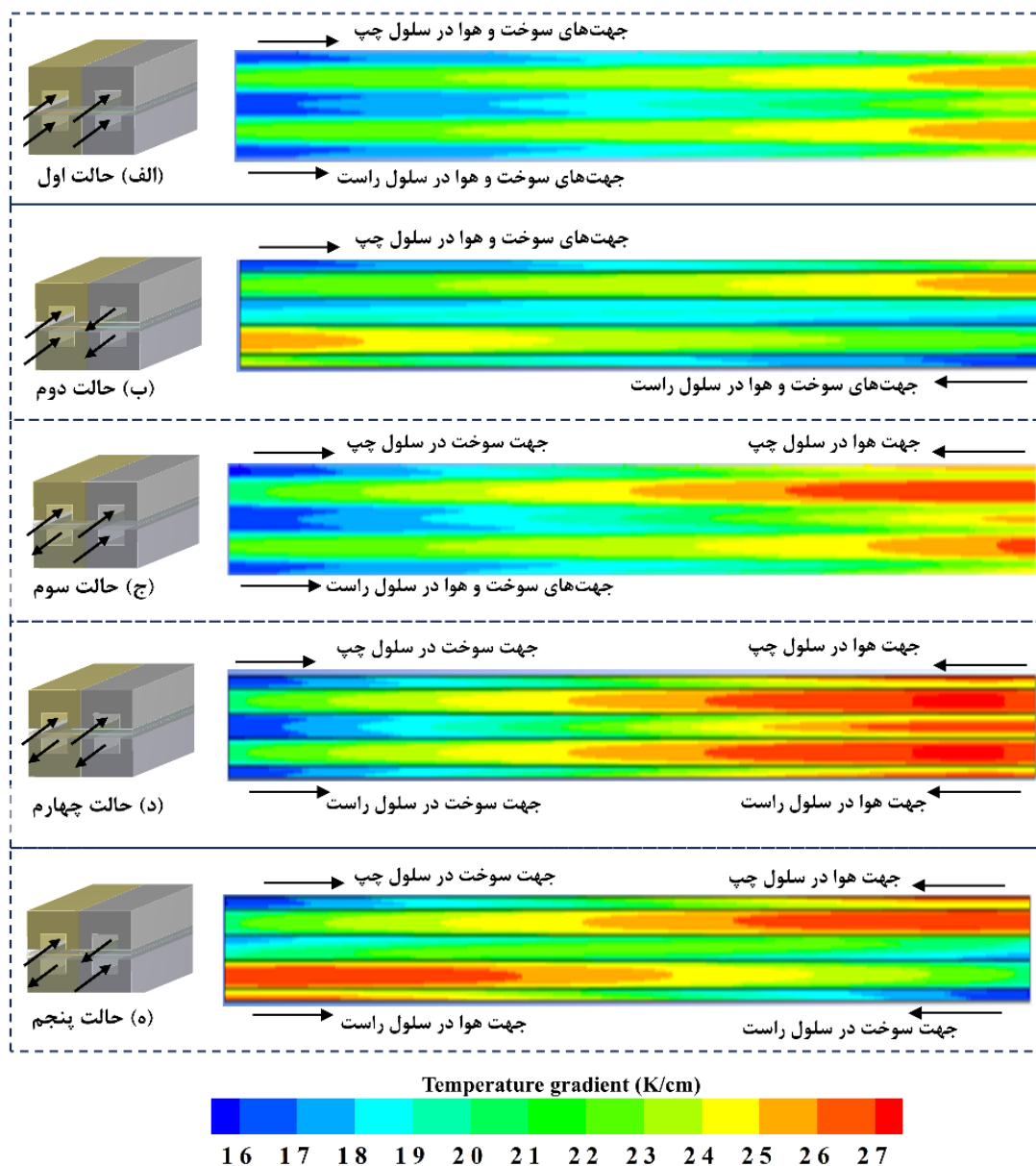
شکل ۱۷ توزیع گرادیان دمایی در لایه الکترولیت را نمایش می‌دهد. مطابق این شکل، بیشترین گرادیان دمایی در نواحی نزدیک به خروجی کانال سوخت ایجاد می‌شود. همچنین، مشاهده می‌شود که گرادیان دمایی ایجاد شده در پیل سوختی وابسته به جهت جریان‌های گاز است. در شرایطی که جریان‌های سوخت و هوا در یک سلول هم‌جهت باشند، گرادیان دمایی کمتری ایجاد می‌شود (حالت‌های اول و دوم). این در حالی است که مخالف‌بودن جهت جریان‌های سوخت و هوا در یک سلول سبب ایجاد گرادیان‌های دمایی بالاتری می‌شود (حالت‌های چهارم و پنجم). علاوه بر این، در حالت‌های اول و چهارم توزیع گرادیان دمایی در سلول‌های مجاور تقریباً به‌صورت متقارن است.

۵- نتیجه‌گیری

نتایج حاصل از پژوهش حاضر را می‌توان به‌طور کلی در موارد زیر خلاصه کرد:

❖ مخالف‌بودن جهت جریان در یک سلول پیل سوختی غشا پلیمری باعث بهبود عملکرد الکتروشیمیایی می‌شود (حالت‌های چهارم و پنجم). همچنین، حالات اول و دوم که هر دو جهت جریان موافق بوده در یک محدوده بوده و دارای پایین‌ترین چگالی جریان خروجی می‌باشند.

❖ در مقایسه دو سلول با جریان موافق در کنار هم، زمانی که جریان در ردیف کانال‌های دو سلول در جهت



شکل ۱۷- توزیع گرادیان دمایی در لایه الکترولیت

- technologies for solid oxide fuel cell (SOFC) applications: Aspect of gasification process and catalyst development. J Environ Manage 329: 117077.
- [3] Ganjian M, Alirezapouri MA, Farahabadi HB (2024) Fuel Cell-Based Hybrid Ship Design. J Solid Fluid Mech 14(2): 15-29.
- [4] Yang X, Meng X, Sun J, Song W, Sun S, Shao Z (2023) Study on internal dynamic response during cold start of proton exchange membrane fuel cell with parallel and serpentine flow fields. J Power Sources 561: 232609.
- [5] Qiao JN, Guo H, Ye F, Chen H (2024) A nonlinear contraction channel design inspired by typical mathematical curves: Boosting net power and water discharge of PEM fuel cells. Appl Energy 357:122474.
- [6] Meng H, Song J, Guan P, Wang H, Zhao W, Zou Y, Ding H, Wu X, He P, Liu F, Zhang Y (2024) High ion exchange capacity perfluorosulfonic acid resin proton exchange membrane for high temperature applications in polymer electrolyte fuel cells. J Power Sources 602: 234205.
- [7] Lim K, Vaz N, Lee J, Ju H (2020) Advantages and disadvantages of various cathode flow field designs for a polymer electrolyte membrane fuel cell. Int J Heat Mass Transf 163: 120497.
- [8] Qiu D, Peng L, Lai X, Ni M, Lehnert W (2019) Mechanical failure and mitigation strategies for the membrane in a proton exchange membrane fuel cell. Renew Sustain Energy Rev 113: 109289.
- [9] Hami M, Mahmoudimehr J (2025) Influence of flow configuration on heat-up and start-up processes of multi-channel solid oxide fuel cell: A comprehensive multi-criteria study. Appl Therm Eng 264: 125526.
- [10] Park J, Li X (2007) An experimental and numerical investigation on the cross flow through gas diffusion layer in a PEM fuel cell with a serpentine flow channel. J Power Sources 163(2):853-863.
- [11] Ferng YM, Su A, Lu SM (2008) Experiment and simulation investigations for effects of flow channel patterns on the PEMFC performance. Int J Energy Res 32(1):12-23.
- [12] 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 Energy 37(13): 10286-10298.
- [13] Bilgili M, Bosomoiu M, Tsotridis G (2015) Gas flow field with obstacles for PEM fuel cells at different operating conditions. Int J Hydrogen Energy 40(5): 2303-2311.

۶- علائم

a_w	فعالیت شیمیایی آب
C	غلظت مولی، kmol m^{-3}
c_p	ظرفیت گرمایی ویژه، $\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$
C_w	غلظت جرمی آب، kg m^{-3}
D	ضریب پخش، $\text{m}^2 \text{s}^{-1}$
F	ثابت فارادی، 96485 C mol^{-1}
h	انتالپی، J kg^{-1}
I	جریان، A
j	چگالی جریان، A m^{-2}
k	هدایت گرمایی، $\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$
k_p	نفوذپذیری، m^2
M	جرم مولکولی، kg kmol^{-1}
$M_{m,dry}$	معادل جرم خشک غشا، kg kmol^{-1}
n_d	ضریب درگ الکترواسموتیک
P	فشار، Pa
R	ثابت جهانی گازها، $8.314 \text{ kJ kmol}^{-1} \text{K}^{-1}$
R	مقاومت، Ω
RH	رطوبت نسبی
S	عبارت چشمه
T	دما، K
u	سرعت، m s^{-1}
V	ولتاژ، V
Y	کسر جرمی
α	ضریب انتقال بار
γ	وابستگی غلظت
ε	تخلخل
η	افت ولتاژ کلی، V
λ	محتوی آب غشا
μ	لزجت مکانیکی، $\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$
ξ	سطح فعال، m^{-1}
ρ	چگالی، kg m^{-3}
$\rho_{m,dry}$	چگالی خشک غشا، kg m^{-3}
σ	ضریب هدایت الکتریکی، $\Omega^{-1} \text{m}^{-1}$
$\emptyset$	تابع پتانسیل، V

۷- مراجع

- [1] Yuan Y, Abdullah M, Sajadi SM, Heidarshenas B, Malekshah EH, Aybar HŞ (2024) Numerical investigation of the effect of changing the geometry of a U-shaped fuel cell channel with asymmetric gas flow and its effect on hydrogen consumption. Int J Hydrogen Energy 50: 1167-1178.
- [2] Alaedini AH, Tourani HK, Saidi M (2023) A review of waste-to-hydrogen conversion

- [23] Fu L, Lin H, Liu J, Hua Z, Qiu N (2024) Optimization of sinusoidal wave-like channel design for HT-PEMFCs based on genetic algorithm. *Int J Heat Mass Transf* 232: 125964.
- [24] Yang X, Xiang Q, Fang D, Sun S, Hao J, Xie F, Shao Z (2024) Simulation and experimental investigation of a novel chain-shaped flow field for proton exchange membrane fuel cell. *Energy Convers Manag* 315:118797.
- [25] Li H, Xu B, Lu G, Du C, Huang N (2021) Multi-objective optimization of PEM fuel cell by coupled significant variables recognition, surrogate models and a multi-objective genetic algorithm. *Energy Convers Manag* 236:114063.
- [26] Akbari MH, Rismanchi B (2008) Numerical investigation of flow field configuration and contact resistance for PEM fuel cell performance. *Renew Energy* 33(8):1775-1783.
- [27] Siegel NP, Ellis MW, Nelson DJ, von Spakovsky MR (2004) A two-dimensional computational model of a PEMFC with liquid water transport. *J Power Sources* 128: 173-184.
- [28] Mahmoudimehr J, Darbandi A (2016) Technical study of a PEM fuel cell on the Psychrometric chart. *Int J Hydrogen Energy* 41(1): 607-613.
- [29] Guvelioglu GH, Stenger HG (2005) Computational fluid dynamics modeling of polymer electrolyte membrane fuel cells. *J Power Sources* 147(1-2):95-106.
- [30] Bilgili M, Bosomoiu M, Tsotridis G (2015) Gas flow field with obstacles for PEM fuel cells at different operating conditions. *Int J Hydrogen Energy* 40(5): 2303-2311.
- [31] Torkavannejad A, Sadeghifar H, Pourmahmoud N, Ramin F (2015) Novel architectures of polymer electrolyte membrane fuel cells: efficiency enhancement and cost reduction. *Int J Hydrogen Energy* 40(36):12466-12477.
- [32] Kahveci EE, Taymaz I (2018) Assessment of single-serpentine PEM fuel cell model developed by computational fluid dynamics. *Fuel* 217: 51-58.
- [14] Toghyani S, Nafchi FM, Afshari E, Hasanpour K, Baniasadi E, Atyabi S (2018) Thermal and electrochemical performance analysis of a proton exchange membrane fuel cell under assembly pressure on gas diffusion layer. *Int J Hydrogen* 43(9): 4534-4545.
- [15] Chen H, Liu B, Zhang T, Pei P (2019) Influencing sensitivities of critical operating parameters on PEMFC output performance and gas distribution quality under different electrical load conditions. *Appl Energy* 255: 113849.
- [16] Rezazadeh S, Rasouli Garaveran M, Ahmadi N, Sadeghi H (2020) Experimental and Numerical Analysis of Bipolar width and Gas Channels Geometrical Configuration Effect on Proton Exchange Membrane Fuel cell. *J Solid Fluid Mech* 10(4): 357-372.
- [17] Xia L, Xu Q, He Q, Ni M, Seng M (2021) Numerical study of high temperature proton exchange membrane fuel cell (HT-PEMFC) with a focus on rib design. *Int J Hydrogen Energy* 46(40): 21098-21111.
- [18] Ghasabehi M, Shams M, Kanani H (2021) Multi-objective optimization of operating conditions of an enhanced parallel flow field proton exchange membrane fuel cell. *Energy Convers Manag* 230: 113798.
- [19] Rosli MI, Lim BH, Majlan EH, Husaini T, Daud WRW, Lim SF (2022) Performance analysis of PEMFC with single-channel and multi-channels on the impact of the geometrical model. *Energies* 15(21):7960.
- [20] Pashaki MK, Mahmoudimehr J (2023) Performance superiority of an arc-shaped polymer electrolyte membrane fuel cell over a straight one. *Int J Hydrogen Energy* 48(36): 13633-13649.
- [21] Ashrafi H, Ahmadi SN, Pormahmod N, Mirzaee I, Damya A, Khalilzadegan A (2023) Investigating the effect of the geometry of gas injection channels on the performance and dynamic behavior of the polymer electrolyte membrane fuel cell. *J Solid Fluid Mech* 13(2): 121-128.
- [22] Zahed RP, Mahmoudimehr J, Amanifard N (2023) Performance superiority of a polymer electrolyte membrane fuel cell with corrugated gas diffusion layer: A numerical study. *Int J Hydrogen Energy* 48(87):34018-34033.