

علمی- پژوهشی

شبیه‌سازی سه بعدی اثر هندسه و توزیع دما بر عملکرد پیل سوختی

اکسید جامد

مه‌دی کیهان‌پور^۱ و مجید قاسمی^{۲*}

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

(تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۴/۲۵؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۸/۰۱)

چکیده

رشد سریع جمعیت، نیاز به منابع تجدید پذیر انرژی را افزایش خواهد داد. از طرفی وسعت آلودگی ناشی از سوخت‌های فسیلی، زندگی در کره خاکی را دچار مشکل ساخته است. به هر ترتیب ضرورت انتخاب جایگزین مناسب، ارزان قیمت و تمیز برای سوخت‌های فسیلی آشکار است. از جمله انرژی مطرح، انرژی الکتریکی تولید شده به وسیله پیل‌های سوختی است که به دلیل بازدهی بالا، عدم آلاینده‌گی محیط زیست و نیز مصرف هیدروژن به عنوان سوخت، در حال حاضر راه حل مناسبی می‌باشد. در این پژوهش پیل سوختی اکسید جامد با دو هندسه متفاوت به صورت سه بعدی شبیه‌سازی شده است. معادلات حاکم بر عملکرد پیل سوختی شامل الکتروشیمیایی، مومنتم، انتقال جرم و انرژی به صورت همگیر (کوپل شده) با استفاده از یک کد المان محدود، حل و بررسی شده‌اند. نتایج نشان داد که هندسه لوله‌ای با مشخصه‌های یکسان هندسی و مکانیکی دارای عملکرد بهتری نسبت به مدل صفحه‌ای است. از حل معادله انرژی در حالت توزیع غیریکنواخت دما ملاحظه گردید که چگالی توان پیل سوختی تا حدود ۷٪ کاهش می‌یابد. همچنین مشخص شد تغییرات فشار کاتدی بر عملکرد پیل سوختی اثر بیشتری نسبت به فشار آندی دارند. در پایان نتایج نشان داد افزایش ضخامت آند اثر قابل توجهی نسبت به افزایش ضخامت سایر اجزای پیل سوختی بر عملکرد آن دارد.

واژه‌های کلیدی: پیل سوختی اکسید جامد لوله‌ای، انرژی، المان محدود، شبیه‌سازی سه بعدی

3D Simulation of Effect of Geometry and Temperature Distribution on SOFC Performance

Keyhanpour, M.

Ghasemi, M.

Mechanical Engineering Department, K. N. T. University of Technology

(Received: 16/July/2021; Accepted: 23/October/2021)

ABSTRACT

Rapid population growth will increase the need for renewable energy resources. On the other hand, the extent of pollution from fossil fuels has made life on Earth difficult. However, the need to choose a suitable, cheap and clean alternative to fossil fuels is obvious. One of the proposed energy sources is electrical energy generated by fuel cells, which are currently a suitable solution due to high efficiency, non-pollution of the environment and the use of hydrogen as fuel. In this research, a solid oxide fuel cell with two different geometries is simulated in three dimensions. The equations governing the performance of the fuel cell, including electrochemical, momentum, mass transfer, and energy, were coupled, solved and investigated by using a finite element code. The results showed that the tubular geometry with the same dimensions and mechanical characteristics has a better performance than the planar type. By solving the energy equation in the case of non-uniform temperature distribution, it was shown that the power density of the fuel cell reduces by about 7%. It was also found that cathodic pressure changes have a greater effect on fuel cell performance than anodic pressure changes. Furthermore, the results showed that increasing the thickness of the anode has a significant effect on increasing its performance compared to increasing the thickness of other fuel cell components.

Keywords: Tubular SOFC, Energy, Finite Element, 3D Simulation

۱- دانشجوی دکتری (نویسنده پاسخگو): Kasra.keyhanpoor@gmail.com

۲- استاد (نویسنده پاسخگو): ghasemi@kntu.ac.ir

۱- مقدمه

در سال‌های اخیر کشورهای مختلف به دنبال منابع انرژی نو و سازگار با محیط زیست هستند. منابعی که بتوانند جای خالی سوخت‌های فسیلی را در سال‌های آینده پر کنند. سوخت‌های فسیلی به‌عنوان منابعی تمام‌شدنی و محدود و همچنین آلاینده محیط زیست روز به روز کم‌تر شده و بنابر پیش‌بینی‌ها در سال‌های نه چندان دور به اتمام خواهند رسید. در این شرایط، پیل‌های سوختی به‌عنوان یکی از منابع انرژی در دسترس، سازگار با محیط زیست و با بازدهی مناسب در میان منابع مختلف مطرح هستند. پیل سوختی دستگاهی است که سوخت معمولاً هیدروژن را دریافت و از راه واکنش‌های الکتروشیمیایی، گرما و الکتریسته تولید می‌کند. پیل‌های سوختی شامل انواع مختلفی از جمله پیل‌های سوختی پلیمری، قلیایی، اسید فسفریک، کربنات مذاب و اکسید جامد می‌شوند. تفاوت گونه‌های متفاوت پیل سوختی می‌تواند در نوع سوخت، واکنش‌های الکتروشیمیایی، جنس قطعات مختلف، اندازه‌ها و دمای عملکردی آن‌ها باشد [۱]. پیل‌های سوختی اکسید جامد و غشا پلیمری انواع پیل‌های سوختی کاربردی‌تر هستند. پیل سوختی اکسید جامد با دمای کارکرد متوسط و بالا در بازه 700°C تا 1000°C و همچنین ویژگی‌های مفیدی از جمله بازدهی مناسب، کار با انواع سوخت مانند هیدروژن و سوخت‌های پایه کربن، دوام بالای قطعات و همچنین قابلیت کارکرد در سیستم‌های تولید انرژی هم-زمان از منابع انرژی امید بخش است [۲]. همان‌طور که اشاره شد پیل سوختی اکسید جامد یک فناوری پیشرفته برای تبدیل انرژی شیمیایی در سوخت‌های هیدروکربن به انرژی الکتریکی و گرمایش با استفاده از یک واکنش الکتروشیمیایی است [۳]. فناوری پیل سوختی اکسید جامد دارای مزایای زیادی نسبت به فناوری‌های احتراقی است که در ذیل به اختصار تشریح گردیده است:

۱- راندمان بالا، به‌ویژه در مقیاس کوچک:

پیل سوختی اکسید جامد از فناوری‌های متداول مانند موتورهای احتراق و توربین‌های گازی متفاوت است و دارای مراحل احتراق و تبدیل حرارت به کار مکانیکی به‌منظور تولید الکتریسته نیست و مستقیم به‌وسیله استفاده از واکنش‌های شیمیایی برق تولید می‌کند.

۲- انعطاف‌پذیری سوخت:

پیل سوختی اساساً وسیله‌ای است که سوخت (مانند هیدروژن، متانول، گاز طبیعی، بنزین و...) و اکسیدان (مانند هوا و اکسیژن) را به برق، آب و حرارت تبدیل می‌کند. به‌عبارت دیگر پیل سوختی شبیه یک باتری بوده ولی بر خلاف باتری نیاز به انبارش (شارژ) ندارد. تا زمانی که سوخت و هوای مورد نیاز پیل تأمین شود، سامانه کار خواهد کرد. پیل‌های سوختی می‌توانند سوخت‌های حاوی هیدروژن مانند متانول، اتانول، گاز طبیعی و حتی بنزین و گازوئیل را مورد استفاده قرار دهند.

۳- کاهش انتشار آلاینده‌های خروجی:

سیستم‌های پیل سوختی برای فرآیند تولید توان نیازی به احتراق ندارند، به همین دلیل تولید گازهای گلخانه‌ای از جمله اکسیدهای نیتروژن یا ذرات ریز معلق، از این سیستم‌ها کم است. به‌علاوه، ترکیبات گوگرد برای پیل سوختی، سمی هستند که باید از سوخت استخراج گردند بنابراین اکسیدهای گوگرد خروجی از پیل ناچیز می‌گردد.

۴- عملکرد بدون صدا و عدم لرزش:

تبدیل الکتروشیمیایی سوخت نیاز به بخش‌های متحرک برای تولید توان را از بین می‌برد. سیستم‌های پیل سوختی فاقد اجزای متحرک هستند. با توجه به این ویژگی سیستم پیل سوختی اکسید جامد دارای ارتعاش و سروصدا نیستند که یک ویژگی مطلوب در فضاهای باز و بسته است [۴].

در ادامه نحوه عملکرد پیل سوختی به اختصار بیان گردیده است. پیل سوختی اکسید جامد معمولی از دو کانال، یکی برای سوخت و دیگری برای هوا (اکسیدکننده) تشکیل شده است که جریان سوخت و هوا را هر کدام به ترتیب به سطح الکترودهای آند و کاتد می‌رساند. الکترودهای آند و کاتد متخلخل می‌باشند لذا تخلخل الکترودها باعث می‌شود که اجزاء گازی هوا و سوخت از میان روزنه‌های موجود عبور کنند و خود را به نزدیکی سطح مشترک الکترودها و الکترولیت برسانند که با لایه‌ای از یک کاتالیست مناسب پوشانده شده است، در اثر واکنش الکتروشیمیایی که در الکترودها کاتد اتفاق می‌افتد یون اکسیژن تولید می‌گردد. از آنجا که جنس الکترولیت از نوعی

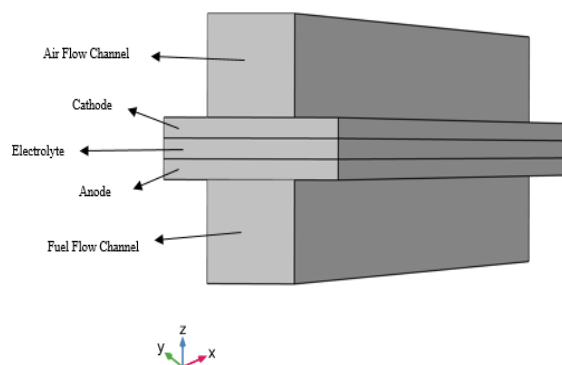
ساختند که در الکترولیت آن $ZrO_2/85$ و $CaO 15\%$ وجود داشت و از پلاتینیوم متخلخل به‌عنوان الکتروُد استفاده می‌کرد. مساحت و ضخامت آن به ترتیب $5/2 \text{ cm}^2$ و 15 cm بود. روشن است که تلاش‌های صورت گرفته برای بهبود بازدهی و عملکرد پیل سوختی اکسید جامد روندی را دنبال کرده که بیشتر بر استفاده از جنس‌های مختلف در الکتروُد‌ها، الکترولیت و پارامترهای هندسی پیل تمرکز داشته است [۵]. در سال ۲۰۱۷ راناسینگ و همکارانش، یک پیل سوختی اکسید جامد صفحه‌ای را در شرایط پایا و سه‌بعدی بررسی کردند. در این پژوهش دماهای عملکردی و همچنین نوع الگوی جریان در پیل سوختی مطالعه شد. نتایج نشان داد بازدهی پیل سوختی در دمای عملکردی بالاتر و همچنین با جریان با الگوی شعاعی افزایش می‌یابد [۶]. در سال ۲۰۱۳ کایا و همکارانش یک پیل سوختی اکسید جامد لوله‌ای به‌صورت پایا و دوبعدی شبه‌سازی و بررسی کردند. در این پژوهش انتقال حرارت در پیل سوختی صفحه‌ای بررسی شد. نتایج نشان داد 80% گرمای تولید در پیل از راه‌های گوناگون انتقال حرارت از آن دفع می‌گردد. آن‌ها با شبه‌سازی یک مدل توانستند بیشترین اختلاف دما را در نقاط مختلف پیل که منجر به تنش‌های گرمایی می‌گردد به 6 درجه برسانند. در این حالت $W 23/03$ گرمای تولیدی در پیل در ولتاژ $V 0/7$ و دمای کاری $700^\circ C$ به مقدار $W 4/61$ رسید [۷]. در سال ۲۰۱۸ پارک و همکارانش یک پیل سوختی اکسید جامد در دمای کارکرد پایین را مورد بررسی قرار دادند. نتایج آن‌ها نشان داد ضخامت الکتروُد‌ها و الکترولیت، دمای عملکرد و رسانایی یونی و الکتریکی با بازدهی پیل سوختی رابطه مستقیم دارد. آن‌ها همچنین نشان دادند در پیل سوختی میکرو-لوله‌ای، بیشترین تلفات ولتاژ مربوط به کاتد است [۸]. چن و همکارانش در سال ۲۰۱۹ یک پیل سوختی اکسید جامد میکرو-لوله‌ای را به‌منظور تولید متان در فشارهای مختلف به‌صورت آزمایشگاهی و عددی بررسی و مطالعه کردند. نتایج نشان داد، افزایش فشار با تشکیل متان رابطه مستقیم دارد به‌نحوی که افزایش سه بار فشار عملکردی منجر به تشکیل بیشتر $\frac{\text{mol}}{\text{m}^3} 0/69$ متان می‌گردد [۹]. صیادیان و همکارانش در سال ۲۰۲۱ پیل سوختی

سرامیک است که در محدوده دمای عملکرد پیل سوختی اکسید جامد یعنی $600^\circ C$ تا $1000^\circ C$ (به فناوری مواد بکار رفته در پیل بستگی دارد) خاصیت هدایت یونی دارد لذا الکترولیت یون اکسیژن تولیدشده در سطح الکتروُد کاتد را از درون خود عبور می‌دهد و آن را به سطح الکتروُد آند می‌رساند تا با هیدروژن سوخت واکنش دهد و الکترون تولید گردد. با توجه به اینکه الکترولیت تنها خاصیت هدایت یونی دارد لذا الکترون تولیدشده در سطح الکتروُد کاتد نمی‌تواند از الکترولیت عبور کند بنابراین از یک مدار خارجی خود را به سمت الکتروُد کاتد می‌رساند و این سیکل مدام تکرار می‌گردد. در اثر عبور الکترون از مدار خارجی برق تولید می‌گردد که می‌تواند برای مصارف گوناگون مورد استفاده قرار گیرد. دو طرح متداول پیل سوختی اکسید جامد معمولی شامل هندسه صفحه‌ای و لوله‌ای است. همان‌طور که بیان شد چهار جزء اصلی یک پیل سوختی اکسید جامد بدین قرارند: آند، الکترولیت، کاتد و اتصال‌دهنده. در پایان این بخش به اختصار پیشینه کارکرد پیل سوختی و چند نمونه از تحقیقات صورت گرفته در این حوزه شرح داده می‌شود. پیل سوختی اکسید جامد تقریباً از ۱۰۰ سال قبل به کار برده شده است. تحقیقات بر روی پیل سوختی اکسید جامد از دهه ۱۹۳۰ با کارهای بور و پریس که نشأت گرفته از کشف تحسین‌برانگیز رسانایی یونی بود، آغاز شد. به هر حال این نوع از پیل سوختی تنها توجهات را تا دهه ۱۹۷۰ به خود جلب کرد. به نظر می‌رسید این طرح پتانسیل بالایی برای تولید الکتروسیسته با بازدهی بالا تا حدود 70% و 90% را در مواقع ترکیب با توربین‌های گازی دارد ولی با توجه به هزینه‌های ساخت بالا و ارزان‌تر بودن استفاده از سوخت‌های فسیلی، توانایی رقابت با نیروگاه‌هایی که از سوخت فسیلی استفاده می‌کردند را نداشت. بور و پریس بر اساس نیاز به الکترولیتی با قابلیت کنترل بیشتر نسبت به الکترولیت‌های مذاب، پیل سوختی اکسید جامد را توسعه دادند. آن‌ها از جزئی جامد که توسط ویلهلم نرنست در سال ۱۸۹۹ گسترش یافته بود استفاده نمودند. یک الکترولیت مشابه بر اساس زیرکونیوم توسط ویسبارت و روکا در سال ۱۹۶۲ در شرکت الکترونیکی وستینگ هوس استفاده شده بود. آن‌ها در این شرکت یک پیل سوختی

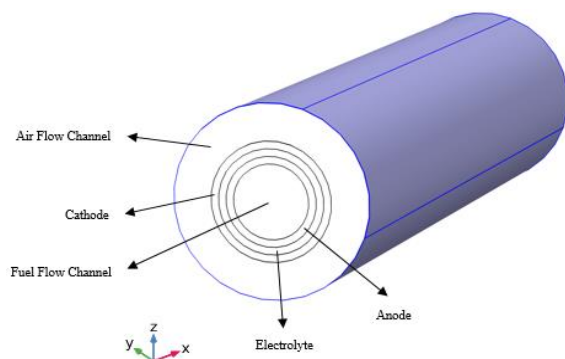
با یک کد المان محدود تعریف، حل و بررسی شده‌اند. خواص سیالاتی و ترموفیزیکی مخلوط گازها مانند لزجت دینامیکی، چگالی و غیره با استفاده از ماژول ترمودینامیک کامسول به صورت تابعی از دما، فشار و کسر مولی گونه‌های مختلف تعریف شده است. همچنین اثر پارامترهای گوناگون همچون دمای کاری، فشار کاندی و آندی و ضخامت قسمت‌های گوناگون پیل سوختی مورد بررسی قرار گرفته است.

۲- هندسه

در این پژوهش ابتدا هندسه یک پیل سوختی اکسید جامد صفحه‌ای به صورت سه‌بعدی مطابق شکل ۱ شبیه‌سازی شد. در ادامه با ضخامت‌ها و اندازه‌های یکسان مدل لوله‌ای آن نیز جهت مقایسه مورد شبیه‌سازی قرار گرفت. دو هندسه مذکور در شکل‌های ۱ و ۲ نشان داده شده است.



شکل (۱): هندسه پیل سوختی اکسید جامد صفحه‌ای



شکل (۲): هندسه پیل سوختی اکسید جامد لوله‌ای

اندازه‌های بخش‌های گوناگون پیل سوختی در جدول ۱ نشان داده شده است [۶].

اکسید جامد را به صورت دو بعدی و چند فیزیکی مورد بررسی قرار دادند. در این پژوهش پیل سوختی صفحه‌ای به صورت پایا و با حل هم‌زمان معادله انرژی مطالعه گردید. نمایش توزیع دما، محاسبه و استخراج اعداد بی‌بعد اثرگذار و همچنین اثر آن‌ها بر بازدهی پیل سوختی از جمله نتایج پژوهش بود [۱۰]. در سال ۲۰۲۰ عماد فحص و همکارانش اثر تنش‌های گرمایی را در یک پیل سوختی اکسید جامد صفحه‌ای به صورت دو بعدی مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها نشان دادند با توجه به دمای کاری بالای پیل سوختی اکسید جامد، تنش گرمایی می‌تواند منشأ ایجاد و گسترش تنش باشد. گوشه پایینی آند و گوشه بالایی کاتد به عنوان محل‌های مستعد برای رشد ترک پیش‌بینی شد و همچنین نشان داده شد که تنش می‌تواند تا ۱/۵٪ موجب تغییر اندازه کاتد گردد [۱۱]. در سال ۲۰۱۷ کامور و همکارانش یک پیل سوختی اکسید جامد صفحه‌ای تک محفظه‌ای را با مخلوط اکسیژن، نیتروژن و متان به عنوان سوخت ورودی به صورت عددی و با حل هم‌زمان معادله انرژی مورد مطالعه قرار دادند. نتایج آن‌ها نشان داد بالاترین در قسمت آند اتفاق می‌افتد که به دلیل واکنش‌های اکسید متان است. در پایان نشان داده شد دلیل ناکارآمدی این نوع پیل سوختی مقدار قابل توجه هیدروژن است که بدون شرکت در واکنش از پیل سوختی خارج می‌گردند [۱۲]. آن‌ها همچنین در پژوهشی دیگر در سال ۲۰۲۰ کامور و همکارانش یک پیل سوختی صفحه‌ای تک محفظه‌ای را به صورت پایا و گذرا بررسی کردند. در این پژوهش همچنین اثر آند، کاتد و الکترولیت حمایت‌شده مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد اثر آند حمایت‌شده بر عملکرد پیل سوختی بیشتر از سایر موارد است و در پایان عملکرد کاتد با گذشت زمان مطالعه گردید [۱۳].

در این پژوهش عملکرد یک پیل سوختی اکسید جامد لوله‌ای در مقایسه با نوع صفحه‌ای آن مورد مطالعه قرار گرفته است. همچنین در ادامه با حل معادله انرژی، اثر توزیع دما بر عملکرد پیل مطالعه شد. هندسه پیل سوختی در دو حالت صفحه‌ای و لوله‌ای به صورت سه‌بعدی شبیه‌سازی شده و معادلات مربوطه که شامل الکتروشیمیایی، انتقال جرم، انرژی و منتوم می‌باشند به صورت کوپل شده و

جدول (۱): اندازه بخش‌های گوناگون هندسه

پارامتر	اندازه (میلی‌متر)
طول پیل سوختی	۱۰
ارتفاع کاتد	۰/۱
ارتفاع آند	۰/۱
ارتفاع الکترولیت	۰/۱
ارتفاع کانال ورودی سوخت و هوا	۰/۵

برینکمن استفاده می‌شود. در معادله زیر ε و K به ترتیب ضریب تخلخل و نفوذپذیری محیط می‌باشند.

$$\frac{\rho}{\varepsilon} \left((V \cdot \nabla) \frac{V}{\varepsilon} \right) = -\nabla P + \nabla \cdot \left(\frac{1}{\varepsilon} (\tau) \right) - \left(K^{-1} \mu + \frac{S_{mass}}{\varepsilon^2} \right) V \quad (۴)$$

انتقال جرم با دو روش نفوذ و جابجایی در کانال‌ها و الکترودها انجام می‌گردد.

برای بررسی انتقال جرم هرگونه از معادله ماکسول-استفان مطابق با رابطه (۷) استفاده شده است. تعاریف عبارتهای معادله (۷) در ذیل نشان داده شده است.

$$\nabla \cdot j_i + \rho (V \cdot \nabla) \omega_i = R_i \quad (۷)$$

$$j_i = -\rho \omega_i \sum_k D_{ik,eff} d_k \quad (۸)$$

$$d_k = \nabla x_k + \frac{1}{P} [(x_k - \omega_k) \nabla P] \quad (۹)$$

$$D_{ik} = 1.883 \times 10^{1.5} \frac{\left(\frac{1}{M_i} + \frac{1}{M_k} \right)^{1/2}}{P \sigma_{ik}^2 \Omega_D} \quad (۱۰)$$

$$M_n = \left(\sum_i \frac{\omega_i}{M_i} \right)^{-1} \quad (۱۱)$$

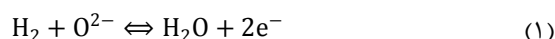
$$x_k = \frac{\omega_k}{M_k} M_n \quad (۱۲)$$

$$D_{ik,eff} = D_{ik} \times \varepsilon^{1.5} \quad (۱۳)$$

در معادله (۷)، ω_i ، R_i و j_i به ترتیب کسر جرمی، تولید جرم حاصل از واکنش‌های الکتروشیمیایی و شار جرمی از راه نفوذ برای هرگونه (زیربند i) می‌باشند. در معادلات ۸ و ۹، d_k ، M_n و x_k به ترتیب عامل محرک انتقال به روش نفوذ^۱، جرم مولی و کسر مولی می‌باشند. در رابطه ۱۰، Ω_D و σ به ترتیب انتگرال برخورد نفوذ^۲ و طول مشخصه^۳ را نشان می‌دهند. با استفاده از روابط ۱۰ و ۱۳ ضریب نفوذ دوتایی^۴ و ضریب نفوذ مؤثر دوتایی در محیط متخلخل محاسبه

۳- معادلات

واکنش‌های الکتروشیمیایی که با ولتاژهای متفاوت الکتروود الکترولیت به ترتیب در آند و کاتد انجام می‌شود، به صورت ذیل است:



رابطه کلی واکنش الکتروشیمیایی نیز به صورت ذیل خواهد بود:



برای تحلیل میدان جریان‌های سوخت و هوا در کانال‌های آند و کاتد از معادلات بقای جرم و ممنتوم استفاده می‌شود. جریان‌های سوخت و هوا با فرض گاز ایده‌آل، به صورت پایا و تراکم پذیر در نظر گرفته شده است. معادلات مذکور به صورت ذیل می‌باشند [۱۴]:

$$\nabla (\rho \cdot V) = S_{mass} \quad (۴)$$

$$\rho \frac{DV_f}{Dt} = -\nabla P + \nabla \cdot \tau \quad (۵)$$

در معادله ۱، S_{mass} چشمه جرمی حاصل از واکنش‌های الکتروشیمیایی است. این عبارت در الکترودهای آند و کاتد به کار می‌رود. در معادله (۲) نیز، عبارتهای V ، τ ، P و ρ به ترتیب میدان سرعت، تنش‌های برشی، فشار و چگالی جریان می‌باشند. برای بررسی جریان در محیط متخلخل الکتروود با صرف نظر کردن از نیروی وزن، از معادله دارسی-

¹ Diffusional Driving Force

² Diffusion Collision Integral

³ Characteristic Length

⁴ Binary Diffusion Coefficient

$$i_{loc} \quad (20)$$

$$= i_{0,a} \left(\frac{C_{H_2}}{C_{H_2,ref}} \right) \exp \left(\frac{0.5F\eta}{RT} \right) - \left(\frac{C_{H_2O}}{C_{H_2O,ref}} \right) \exp \left(- \frac{1.5F\eta}{RT} \right)$$

$$i_{loc} \quad (21)$$

$$= i_{0,c} \left(\exp \left(\frac{3.5F\eta}{RT} \right) - x_{O_2} \left(\frac{C_{tot}}{C_{O_2,ref}} \right) \exp \left(- \frac{0.5F\eta}{RT} \right) \right)$$

$$i = a_v i_{loc} \quad (22)$$

در روابط (۲۰-۲۲) عبارتهای i_0 ، i_{loc} ، C_{tot} ، C_{H_2O} ، چگالی جریان محلی، غلظت کل گونه‌ها، غلظت مولی آب، غلظت مولی مرجع آب و سطح ویژه می‌باشند.

مقدار مشخصه‌های فیزیکی و الکتریکی الکترولیت و الکترودها در جدول ۱ نشان داده شده است.

جدول (۲): مشخصه‌های فیزیکی و الکتریکی پیل سوختی

اندازه	واحد	پارامتر (نماد)
۲۵	$\frac{S}{m}$	رسانندگی یونی در الکترولیت (σ_m)
۱۰۰۰	$\frac{S}{m}$	رسانندگی الکترونی در الکترود (σ_s)
۰/۱	$\frac{A}{m^2}$	چگالی جریان تبدالی در آند $(i_{0,a})$
۰/۰۱	$\frac{A}{m^2}$	چگالی جریان تبدالی در کاتد $(i_{0,c})$
10^{-9}	$\frac{1}{m^2}$	سطح ویژه (a_v)
10^{-10}	$\frac{1}{m^2}$	ضریب نفوذپذیری (K)
۰/۴	-	ضریب تخلخل (ε)

واکنش‌های الکتروشیمیایی درون الکترودها و جریان‌های یونی و الکتریکی باعث ایجاد چشمه‌های گرمایی و توزیع دمایی غیریکنواخت در پیل سوختی می‌گردند.

می‌شود. در معادلات (۱، ۳ و ۴) S_{mass} نیز به صورت زیر تعریف می‌شود.

$$S_{mass} = \sum M_i R_i \quad (14)$$

$$R_i = - \frac{u_i i}{nF} \quad (15)$$

در معادله فوق، u_i ، i ، F و n به ترتیب ضریب استوکیومتری واکنش الکتروشیمیایی، چگالی جریان الکتریکی، ثابت فارادی و تعداد الکترون‌های شرکت‌کننده در واکنش می‌باشند. علامت منفی برای مصرف اکسیژن و هیدروژن و علامت مثبت برای تولید آب است. پروتون‌ها از راه غشا و الکترون‌ها از طریق الکترودها حرکت می‌کنند و موجب جریان‌های یونی و الکتریکی می‌شوند. معادلات بقای شارژ (اهم) برای بررسی میدان جریان‌های یونی و الکتریکی به صورت ذیل تعریف می‌شوند:

$$\nabla \cdot (\sigma_m \nabla \phi_m) = S_{pot} \quad (16)$$

$$\nabla \cdot (\sigma_s \nabla \phi_s) = -S_{pot} \quad (17)$$

در معادلات فوق، σ_m و ϕ_m به ترتیب رسانندگی یونی و پتانسیل الکتریکی در الکترولیت اکسید جامد می‌باشند. σ_s و ϕ_s نیز معرف رسانندگی الکتریکی و پتانسیل الکتریکی در الکترودها هستند. S_{pot} چشمه پتانسیل الکتریکی است که در لایه الکتروود کاتدی i و در لایه الکتروود آندی $-i$ است. پتانسیل اضافی^۱ (تلفات) در آند $(\eta_{act,a})$ و کاتد $(\eta_{act,c})$ به صورت ذیل تعریف می‌گردند:

$$\eta_{act,a} = \phi_s - \phi_m - E_{eq,H_2} \quad (18)$$

$$\eta_{act,c} = \phi_s - \phi_m - E_{eq,O_2} \quad (19)$$

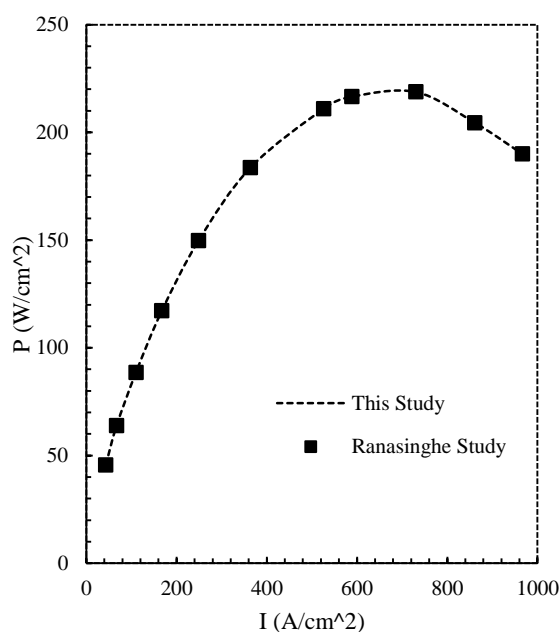
در روابط فوق، E_{eq} پتانسیل تعادلی^۲ است که با رابطه نرنست مشخص می‌شود [۱۱]. در ادامه برای تعیین رابطه بین جریان و افت پتانسیل آند و کاتد از رابطه بوتلر-ولمر استفاده می‌گردد.

¹ Over Potential

² Equilibrium Potential

۴- حل عددی و اعتبار سنجی

برای اعتبار‌سنجی حل عددی با نرم‌افزار کامسول، پژوهش عددی راناسینگ و همکارانش شبیه‌سازی شد. نتایج نمودار چگالی توان- چگالی آمپر در نمودار شکل ۳ با یکدیگر مقایسه شد. با توجه به شکل، انطباق نتایج بر یکدیگر مشاهده می‌گردد.



شکل (۳): اعتبار سنجی

شرایط کاری پیل سوختی صفحه‌ای در جدول ۴ مشخص شده است.

جدول (۴): شرایط پیل سوختی

اندازه	واحد	پارامتر (نماد)
۱۰۰۰-۹۰۰-۸۰۰	°C	دمای کاری (T)
۱	Atm	فشار مرجع (P _{ref})
۲	Pa	اختلاف فشار در کانال آند (P)
۶	Pa	اختلاف فشار در کانال کاتد (P)
۰/۸۵۷۱۴	-	کسر مولی H ₂ در آند (x _{H₂})
۰/۱۱۰۵۹	-	کسر مولی O ₂ در کاتد (x _{O₂})
۰/۴۸۴۹۶	-	کسر مولی H ₂ O در کاتد (x _{H₂O})

معادله انرژی برای تحلیل میدان دما در پیل سوختی به صورت ذیل است.

$$\nabla \cdot \left((\rho C_p)_{\text{eff}} \nabla T \right) = \nabla \cdot (k_{\text{eff}} \nabla T) + S_{\text{temp}} \quad (23)$$

در معادله فوق، $(\rho C_p)_{\text{eff}}$ ، k_{eff} ، S_{temp} به ترتیب چشمه گرمایی، رسانندگی گرمایی مؤثر و ظرفیت گرمایی ویژه مؤثر می‌باشند. S_{temp} شامل تلفات گرمایی اهمی و واکنش-های الکتروشیمیایی می‌شود. تلفات اهمی با توجه به جریان یون‌ها و الکترون‌ها در الکترولیت، آند و کاتد ایجاد می‌گردد. چشمه‌های گرمایی مذکور با روابط ذیل محاسبه می‌شوند:

$$Q_{\text{ohm}} = \frac{i^2}{\sigma} \quad (24)$$

$$Q_{\text{elec}} = \left(\eta_{\text{act}} + \frac{T \cdot \Delta S_r}{n \cdot F} \right) i \quad (25)$$

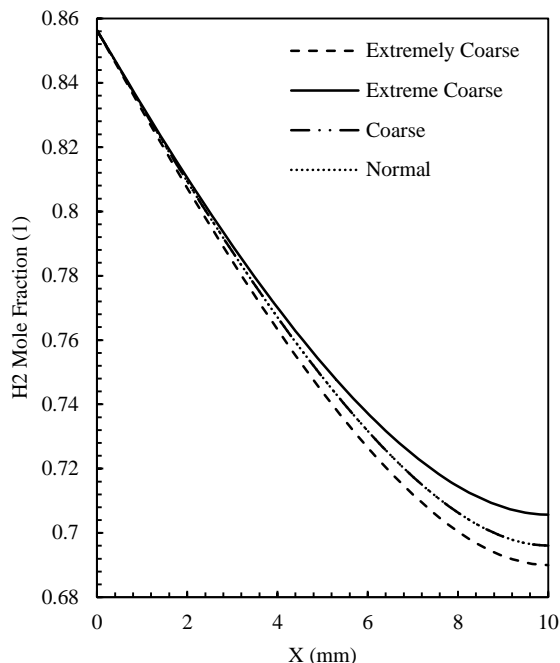
در روابط فوق، i ، σ ، η_{act} ، ΔS_r و n به ترتیب چگالی جریان الکتریکی، رسانندگی الکتریکی، تلفات فعال‌سازی، تغییر آنتروپی ناشی از واکنش‌های الکتروشیمیایی، تعداد الکترون‌ها در آند و یا کاتد و ثابت فارادی می‌باشند.

عبارت‌های استفاده شده برای تحلیل معادلات میدان دما در جدول ۲ نشان داده شده است [۶ و ۱۱].

جدول (۳): مشخصه‌های ترموفیزیکی پیل سوختی

اندازه	واحد	پارامتر (نماد)
۶/۲۳	$\frac{W}{m \cdot K}$	رسانندگی گرمایی آند ($k_{\text{eff},a}$)
۱۰	$\frac{W}{m \cdot K}$	رسانندگی گرمایی کاتد ($k_{\text{eff},c}$)
۲/۷	$\frac{W}{m \cdot K}$	رسانندگی گرمایی الکترولیت ($k_{\text{eff},e}$)
۵۹۵	$\frac{J}{kg \cdot K}$	ظرفیت گرمایی ویژه آند ($C_{p,a}$)
۵۷۳	$\frac{J}{kg \cdot K}$	ظرفیت گرمایی ویژه کاتد ($C_{p,c}$)
۶۰۶	$\frac{J}{kg \cdot K}$	ظرفیت گرمایی ویژه الکترولیت ($C_{p,e}$)
۶۸۷۰	$\frac{kg}{m^3}$	چگالی آند (ρ_a)
۵۹۰۰	$\frac{kg}{m^3}$	چگالی کاتد (ρ_c)
۶۵۷۰۰	$\frac{kg}{m^3}$	چگالی الکترولیت (ρ_e)

مش‌زنی عادی با میانگین کیفیت مش ۰/۸۴ برای سایر مراحل حل استفاده می‌گردد.



شکل (۴): استقلال از شبکه محاسباتی

۶- شرایط مرزی

برای حل معادلات مسأله، شرایط مرزی مطابق با جدول ۵ تعیین و اعمال گردید.

با فرض تغییرات ولتاژ ۰/۹۵ V تا ۰/۲ V و حالت پایا معادلات در دو هندسه صفحه‌ای و لوله‌ای مورد حل قرار گرفته‌اند. هندسه لوله‌ای در دو حالت عدم حل و حل معادله انرژی بررسی شده است.

با توجه به شکل ۵ مشاهده می‌گردد که در هندسه لوله‌ای با فرض ضخامت‌های یکسان و شرایط مشابه با پیل سوختی صفحه‌ای، عملکرد افزایش می‌یابد. همچنین نشان داده شد که حل معادله انرژی و اثر توزیع غیریکنواخت دما بر پارامترهای گوناگون منجر به کاهش عملکرد پیل سوختی در مقایسه با حالت دما ثابت می‌گردد. تغییر هندسه از صفحه‌ای به لوله‌ای تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر عملکرد پیل سوختی دارد. از جمله دلایل آن می‌توان به مصرف بیشتر هیدروژن در آند لوله‌ای اشاره کرد که با سطح تماس بیشتر بین جریان سوخت و الکتروود در حالت لوله‌ای

در پژوهش راناسینگ و همکارانش، پیل سوختی صفحه‌ای سه‌بعدی در دو حالت جریان مخالف و شعاعی به صورت عددی بررسی گردید.

۵- روش حل و استقلال از شبکه

در این پژوهش معادلات الکتروشیمیایی، پیوستگی، ممنتوم، انتقال جرم و انرژی در نرم‌افزار کامسول تعریف، کوپل و حل شده‌اند. حل عددی کامسول بر مبنای روش المان محدود انجام می‌شود. در این مسأله الگوریتم حل GMRES است. هندسه سه‌بعدی مسأله با نرم‌افزار سالیدورک ترسیم شده است.

برای حل معادلات از ماژول پایا با چهار پله^۱ به شرح ذیل استفاده می‌شود:

- ۱- معادلات الکتروشیمیایی برای توزیع جریان
- ۲- سپس میدان جریان‌های سوخت و هوا در آند و کاتد (معادلات بقای مومنتوم و جرم)
- ۳- معادلات انتقال جرم (استفان- ماکسول) برای توزیع گونه‌ها

۴- معادله انرژی برای توزیع دما با فرض چشمه‌های گرمایی ماژول‌های الکتروشیمیایی و انتقال جرم

همچنین ماژول‌های مومنتوم و انتقال جرم با توجه به واکنش‌های شیمیایی و الکتروشیمیایی و اثر آن بر تغییر چگالی جریان‌ها کوپل شده است. برای دقت حل عددی، معیار هم‌گرایی 10^{-6} در نظر گرفته شده است.

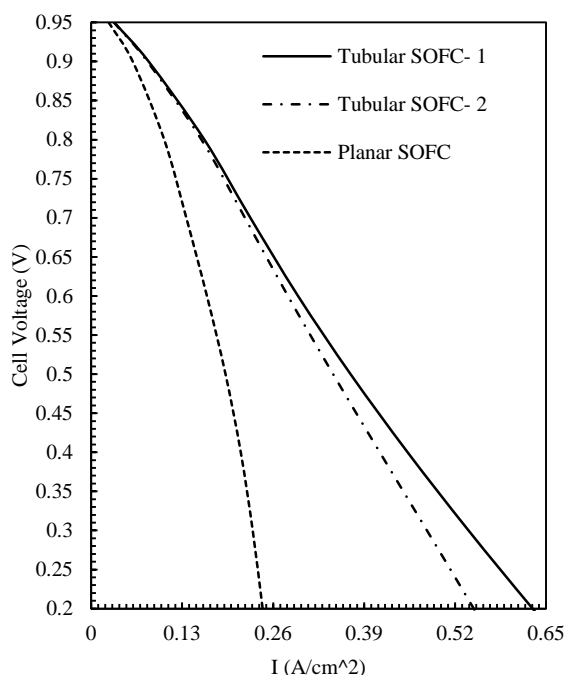
برای شبکه محاسباتی از ماژول مش کنترل‌شده^۲ با قابلیت مش‌زنی خودکار با حساسیت نسبت به ضخامت و هندسه دامنه‌های مختلف پیل سوختی استفاده شده است. از این‌رو، برای بررسی استقلال از شبکه محاسباتی مقدار کسر مولی هیدروژن در راستای کانال آند در ولتاژ ۰/۶ V در چهار حالت مقایسه شده است. با توجه به شکل ۴ مشاهده می‌شود که تقریباً مقدار کسر مولی هیدروژن در دو حالت درشت^۳ و عادی^۴ یکسان است. بنابراین، از حالت

^۱ Step

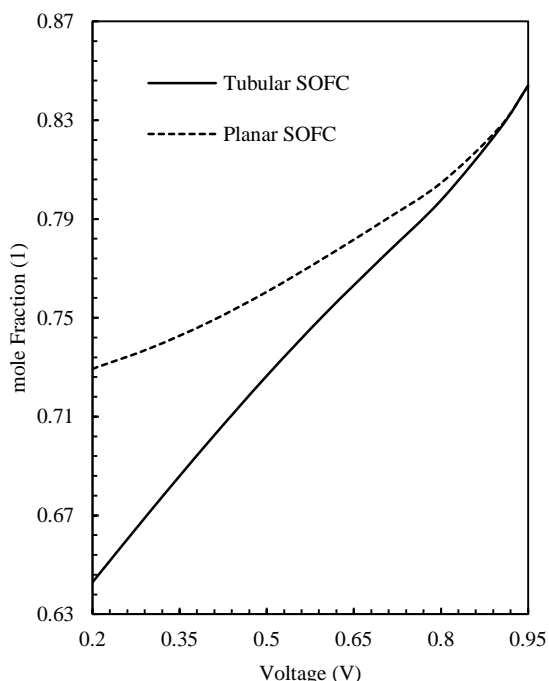
^۲ Controlled Mesh

^۳ Coarse

^۴ Normal



شکل (۵): تغییرات چگالی جریان نسبت به ولتاژ پیل سوختی در دو هندسه صفحه‌ای و لوله‌ای ۱- عدم حل معادله انرژی ۲- حل معادله انرژی



شکل (۶): تغییرات میانگین کسر مولی هیدروژن در محیط آند نسبت به تغییر ولتاژ برای دو هندسه صفحه‌ای و لوله‌ای

همان‌طور که در شکل ۶ نشان داده شده است، کسر مولی هیدروژن موجود در آند با کاهش ولتاژ و افزایش واکنش-های الکتروشیمیایی در هندسه لوله‌ای نسبت به هندسه

میسر می‌گردد. در شکل ۶ میانگین کسر مولی موجود در الکتروود در دو حالت لوله‌ای و صفحه‌ای نشان داده شده است.

جدول (۵): شرایط مرزی مسأله

معادله	شرایط مرزی و مقادیر اولیه	نوع
معادله انرژی	دمای جریان‌های ورودی (°C)	۱۰۰۰-۹۰۰-۸۰۰
	شرط مرزی خروجی کانال‌های آند و کاتد	شار حرارتی جابجایی غالب است
معادله بقای جرم و ممنتوم	شرط مرزی ورودی کانال‌های آند و کاتد	فشار ثابت
	شرط مرزی خروجی کانال‌های آند و کاتد	فشار ثابت
معادله انتقال جرم	دیواره کانال‌ها	عدم لغزش
	شرط مرزی ورودی کانال‌های آند و کاتد	کسر مولی ثابت
	شرط مرزی خروجی کانال‌های آند و کاتد	شار جرمی جابجایی غالب است
	مقدار اولیه گونه‌ها در داخل پیل سوختی	کسر مولی
معادله توزیع جریان	دیواره بیرونی کانال کاتد	عدم شار جرمی
	مقدار اولیه پتانسیل الکتریکی در کاتد	مقدار ولتاژ کاری
	مقدار اولیه پتانسیل الکتریکی در آند و کاتد	مقدار ولتاژ برابر صفر
	شرط مرزی پتانسیل الکتریکی آند	مقدار ولتاژ برابر صفر
	شرط مرزی پتانسیل الکتریکی کاتد	مقدار ولتاژ کاری

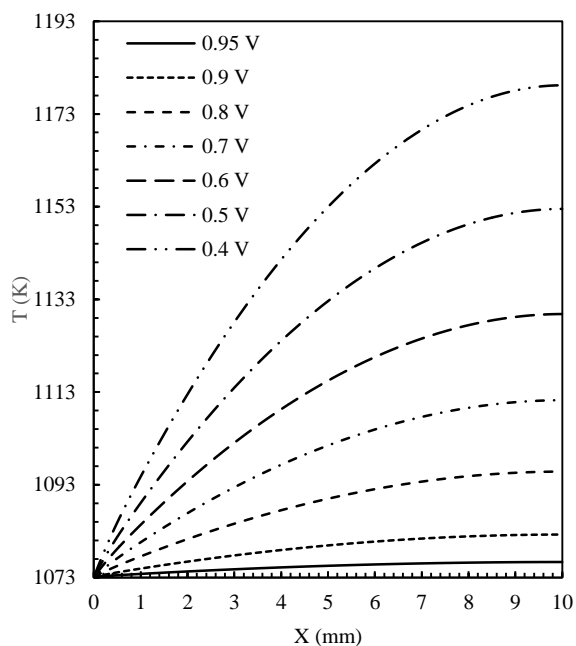
۷- نتایج

نمودار تغییرات ولتاژ-جریان در شکل ۵ نشان داده شده است.

با توجه به شکل ۹ مشاهده می‌گردد که کاهش ولتاژ منجر به افزایش دمای پیل سوختی می‌شود. کاهش ولتاژ مطابق شکل ۵ افزایش چگالی جریان را در پی دارد. نرخ بیشتر انجام واکنش‌های الکتروشیمیایی، چگالی جریان الکتریکی بیشتر، اثر مقاومت‌های اهمی و تلفات بیشتر کاتدی و آندی باعث دمای بیشتر پیل سوختی در ولتاژهای پایین‌تر می‌شود.

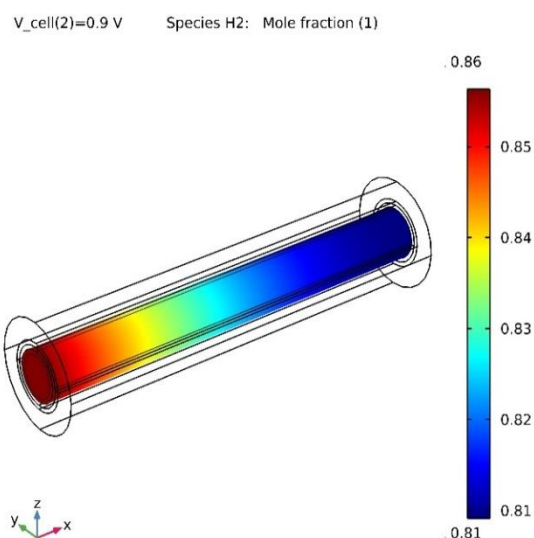
با توجه به الگوی توزیع دمای شعاعی در شکل ۱۰ مشاهده می‌گردد که بیشترین درجه حرارت در ناحیه الکترولیت و کاتد است که مناسب است برای جلوگیری از آسیب ناشی از تنش‌های گرمایی این ناحیه قطورتر طراحی گردد. در ادامه اثر حل معادله انرژی بر جریان و غلظت سوخت در کانال مورد بررسی قرار گرفته است.

در شکل‌های ۱۱ و ۱۲ به ترتیب تغییرات سرعت جریان سوخت و کسر مولی هیدروژن نشان داده شده است. از روند نمودارها مشاهده می‌گردد که حل معادله انرژی و افزایش دما در بخش‌های گوناگون پیل سوختی باعث کاهش سرعت جریان سوخت و در نتیجه نفوذ کمتر هیدروژن به الکترودها می‌شود که با توجه به اثر دما بر مشخصه‌های سیالاتی هیدروژن و بخار آب به‌عنوان سوخت است. در شکل ۱۳ اثر دمای کاری پیل سوختی نشان داده شده است.

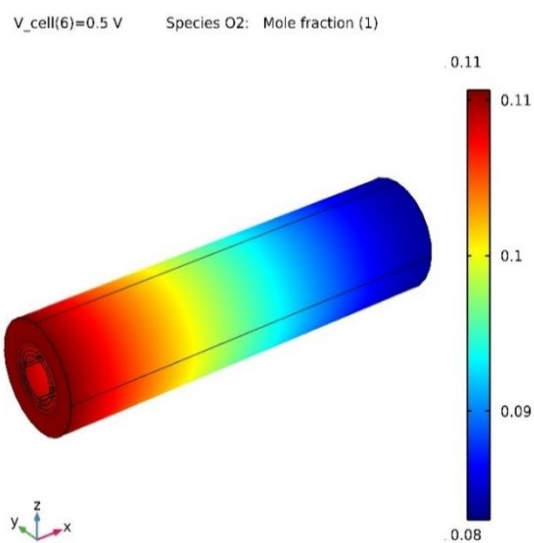


شکل (۹): تغییرات دما در راستای مرکز پیل سوختی لوله-ای

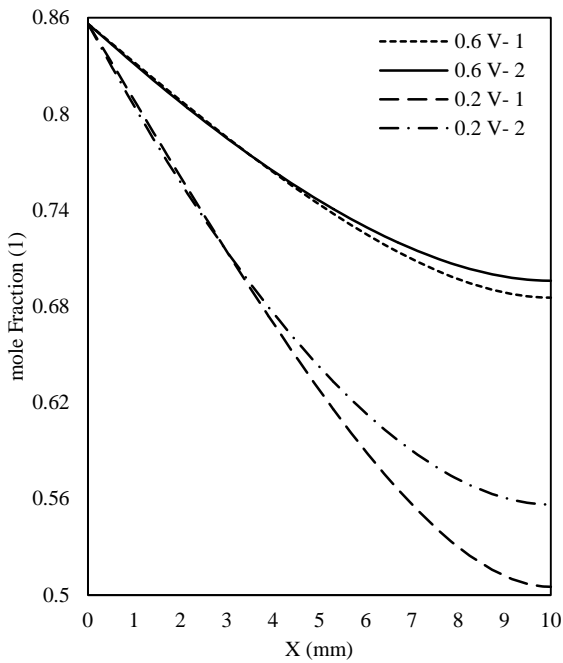
صفحه‌ای روند کاهش قابل ملاحظه‌ای دارد که منجر به عملکرد مناسب پیل سوختی در هندسه لوله‌ای می‌گردد. همچنین در شکل ۷ مشاهده می‌گردد که بیشترین غلظت هیدروژن در اوایل کانال و آند انباشته می‌گردد که با مصرف هیدروژن در ادامه مقدار آن کاهش محسوسی می‌یابد. با توجه به شکل ۸ روند تغییرات غلظت اکسیژن نیز مشابه هیدروژن خواهد بود.



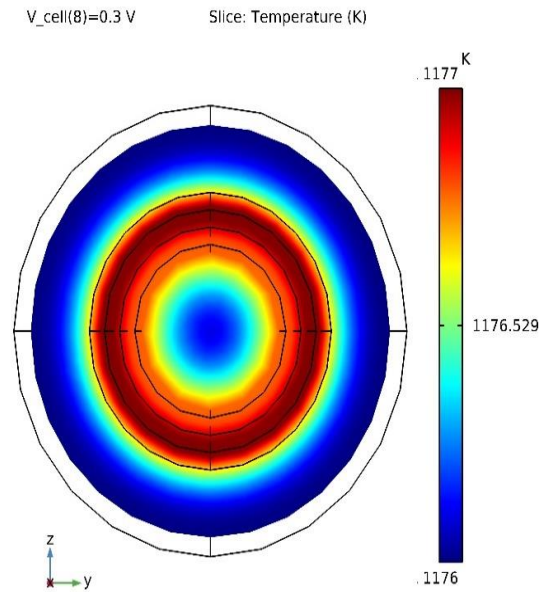
شکل (۷): تغییرات میانگین کسر مولی هیدروژن در محیط کانال سوخت و آند در ولتاژ ۰/۹ V



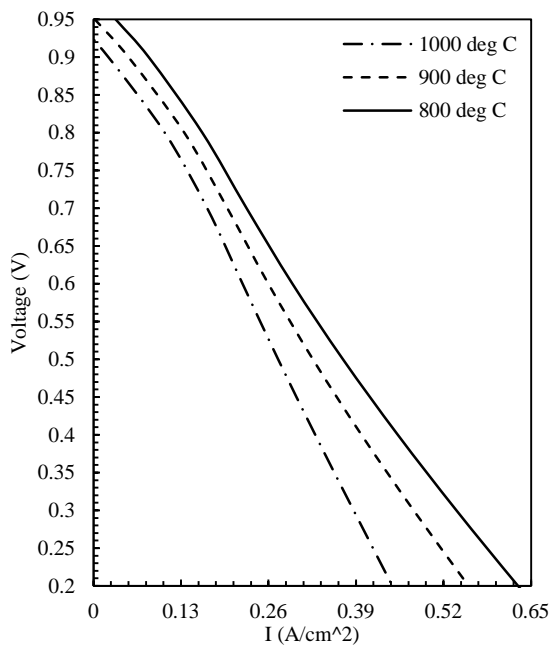
شکل (۸): تغییرات میانگین کسر مولی اکسیژن در محیط کانال هوا و کاتد در ولتاژ ۰/۵ V



شکل (۱۲): تغییرات کسر مولی هیدروژن در راستای مرکز پیل سوختی لوله‌ای در دو ولتاژ متفاوت: ۱- بدون حل معادله انرژی ۲- حل معادله انرژی

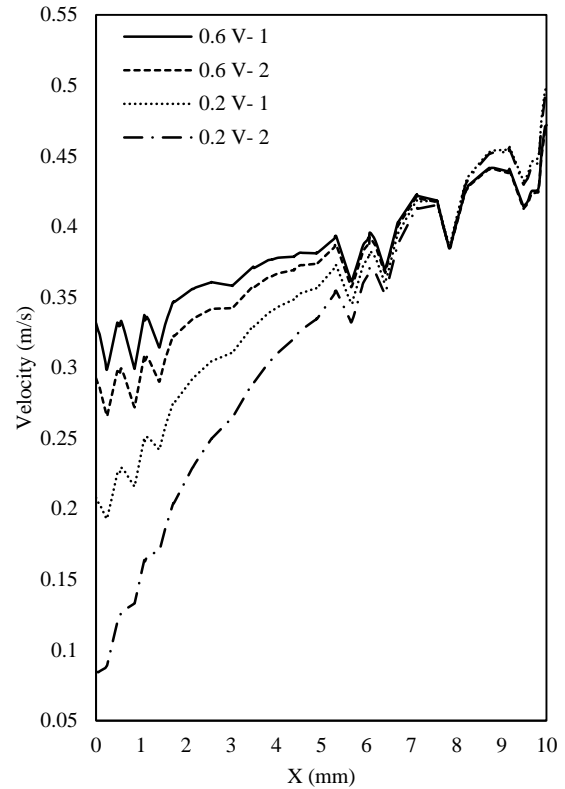


شکل (۱۰): تغییرات دما در راستای شعاعی پیل سوختی لوله‌ای در ولتاژ ۰/۳ V

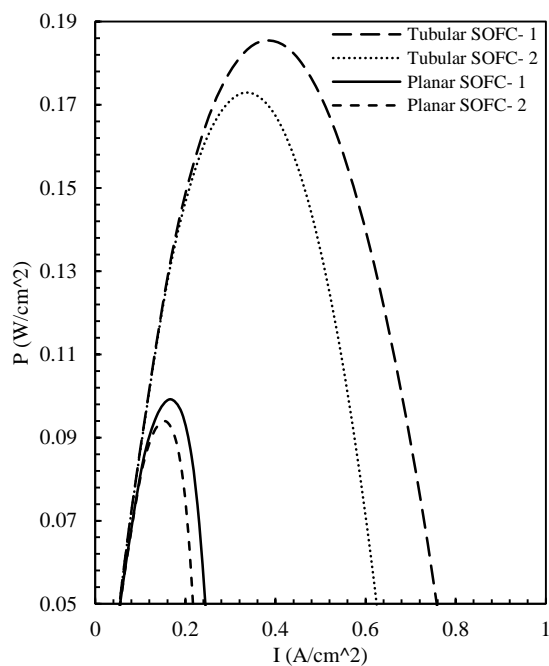


شکل (۱۳): تغییرات چگالی جریان نسبت به ولتاژ در دماهای کاری گوناگون

با توجه به شکل ۱۳، مشاهده می‌شود که افزایش دمای کاری باعث کاهش عملکرد پیل سوختی می‌گردد. کاهش عملکرد با حل معادله انرژی نسبت به عدم حل آن، قابل ملاحظه‌تر است. در پایان نمودار توان- جریان پیل سوختی



شکل (۱۱): تغییرات سرعت جریان در راستای مرکز پیل سوختی لوله‌ای در دو ولتاژ متفاوت: ۱- بدون حل معادله انرژی ۲- حل معادله انرژی



شکل (۱۵): تغییرات چگالی توان نسبت به چگالی جریان در دو هندسه صفحه‌ای و لوله‌ای، ۱- بدون حل معادله انرژی ۲- حل معادله انرژی

در این پژوهش اختلاف فشار در کانال هوا ۶ Pa و اختلاف فشار در کانال سوخت ۲ Pa در نظر گرفته شده است. در ادامه تأثیر اختلاف فشار در کانال‌های آندی و کاتدی مورد بررسی قرار گرفته است. ابتدا با فرض اختلاف فشار ۲ Pa در آند، فشار کانال کاتدی از ۴ Pa تا ۶ Pa تغییر داده می‌شود. نتایج اثر تغییرات فشار در کاتد بر چگالی جریان و توان در شکل‌های ۱۶ و ۱۷ نشان داده شده است.

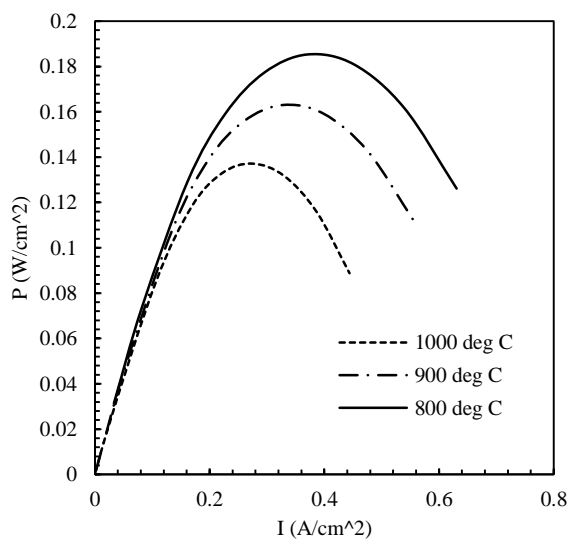
از نمودار شکل ۱۶ مشاهده می‌شود که کاهش فشار در کانال هوا موجب کاهش چگالی جریان در ولتاژهای یکسان می‌گردد. همچنین شکل ۱۶ نشان می‌دهد که کاهش چگالی جریان از ولتاژ ۰/۶ V تا ۰/۲ V محسوس‌تر است. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که افزایش فشار هوا با فرض ثابت بودن سایر پارامترها، می‌تواند باعث بهبود چگالی جریان تولیدی شود. لازم به توضیح است که افزایش چگالی جریان در تغییر فشار از ۴ Pa به ۵ Pa بیش‌تر از تغییر فشار از ۵ Pa به ۶ Pa است که نشان می‌دهد روند تغییرات چگالی جریان نسبت به تغییرات فشار کاهشی است. در ادامه چگالی توان نیز مورد بررسی قرار گرفته است.

در حالت‌های مختلف نمایش داده شده است. در ادامه توان خروجی پیل سوختی مورد ارزیابی قرار گرفته است. با توجه به شکل ۱۳ و ۱۴، چگالی جریان نسبت به چگالی توان در دماهای کاری متفاوت تغییرات کم‌تری دارد. کاهش چگالی توان با افزایش دمای کاری حاکی از کاهش نفوذ سوخت به آند، کاهش سرعت مصرف هیدروژن و واکنش‌های الکتروشیمیایی کندتر است.

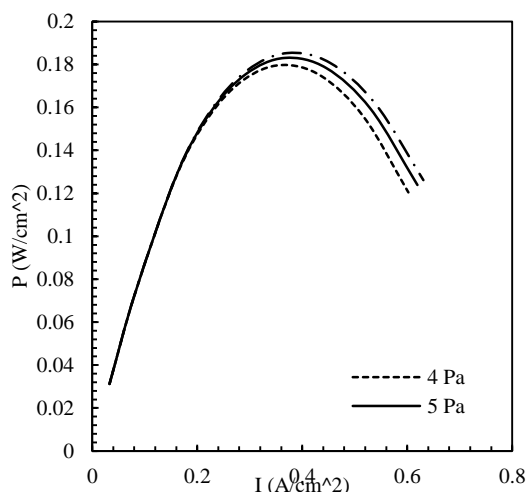
در شکل ۱۴ چگالی توان با تغییر دما از ۸۰۰°C به ۹۰۰°C حدود ۱۷٪ و از ۹۰۰°C به ۱۰۰۰°C حدود ۱۴٪ کاهش می‌یابد. همچنین نمودارهای شکل‌های ۱۳ و ۱۴ نشان می‌دهند که با افزایش دمای کاری در بیشینه چگالی توان و جریان تولیدی پیل سوختی محدودیت ایجاد می‌گردد.

شکل ۱۵ توان و بازدهی بیشتر پیل سوختی در هندسه لوله‌ای نشان می‌دهد.

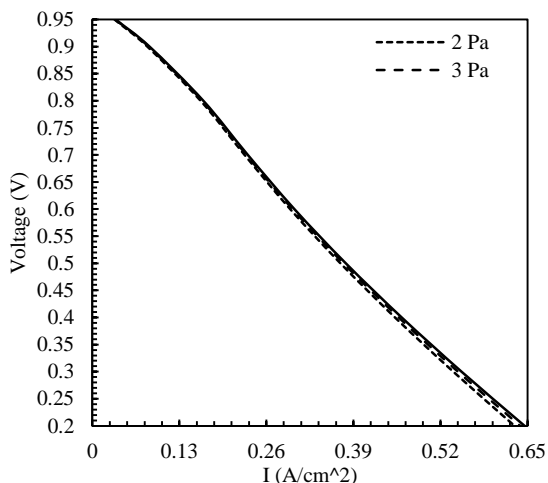
با توجه به شکل ۱۵ مشاهده می‌شود که با حل معادله انرژی و توزیع غیریکنواخت دما، چگالی توان پیل سوختی در دو هندسه صفحه‌ای و لوله‌ای دچار تغییر می‌گردد. از این‌رو، چگالی توان پیل سوختی در دو هندسه لوله‌ای و صفحه‌ای به ترتیب ۷٪ و ۸٪ کاهش می‌یابد. همچنین نمودار شکل ۱۵ نشان می‌دهد که با حل معادله انرژی ولتاژ مربوط به بیشینه چگالی توان در دو هندسه لوله‌ای و صفحه‌ای به ترتیب ۶٪ و ۳٪ افزایش می‌یابد.



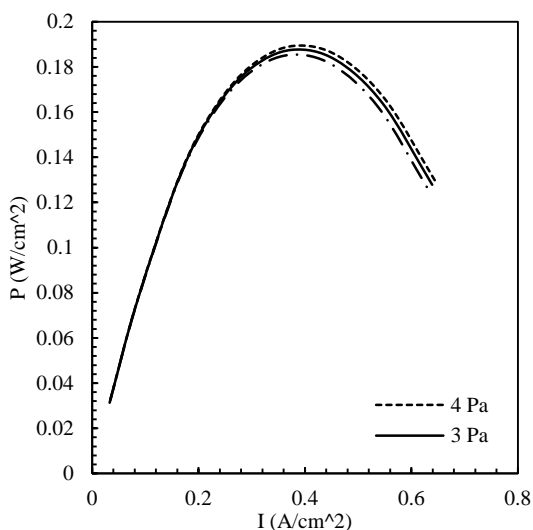
شکل (۱۴): تغییرات چگالی توان نسبت به ولتاژ در دماهای کاری گوناگون



شکل (۱۷): تغییرات چگالی توان نسبت به چگالی جریان در فشارهای گوناگون کاتدی



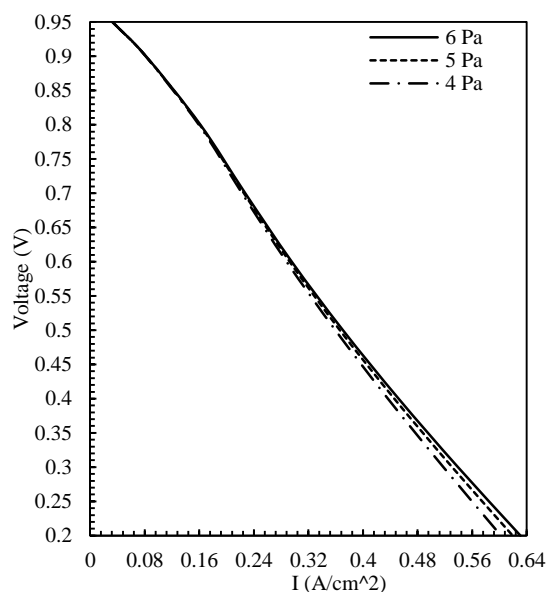
شکل (۱۸): تغییرات چگالی جریان نسبت به ولتاژ در فشارهای گوناگون آنودی



شکل (۱۹): تغییرات چگالی توان نسبت به چگالی جریان در فشارهای گوناگون آنودی

با توجه به شکل‌های ۱۶ و ۱۷ مشاهده می‌شود که چگالی توان با تغییرات فشار رابطه مستقیم دارد. از شکل ۱۷ مشاهده می‌شود که بیشینه مقدار چگالی توان در سه حالت تفاوت چندانی با هم ندارند ولی مقدار توان در فشار بالاتر افت کمتری خواهد داشت. دو شکل ۱۶ و ۱۷ نشان می‌دهند که افزایش فشار تا مقدار معینی می‌تواند موجب بهبودی چگالی جریان و توان پیل سوختی گردد. در ادامه اثر تغییرات فشار در کانال آند جهت مقایسه با تغییرات فشار در کانال کاتدی مورد بررسی قرار گرفته است.

با توجه به شکل‌های ۱۸ و ۱۹ و در مقایسه با تغییرات فشار در کانال هوا مشاهده می‌شود که اثر تغییرات فشار در کانال سوخت نسبت به تغییرات فشار در کانال هوا کم‌تر است. چگالی جریان در بیشینه حالت تغییرات فشار حدود ۱٪ تغییر می‌کند که با توجه به شرایط اقتصادی و آزمایشگاهی پیل سوختی اکسید جامد، این مقدار می‌تواند مقرون به صرفه نباشد. در مقایسه با اثرات تغییرات فشار کاتدی، چگالی توان بهبود کمتری را نشان می‌دهد. بر این اساس حتی می‌تواند در صورت فراهم نبودن شرایط فشار بالاتر از فشارهای کاری کمتر نیز استفاده نمود. در پایان برای جمع‌بندی مناسب از اثر هندسه بر عملکرد پیل سوختی، اثر ضخامت‌های گوناگون قسمت‌های مختلف پیل سوختی بر عملکرد آن مورد ارزیابی قرار گرفته است.



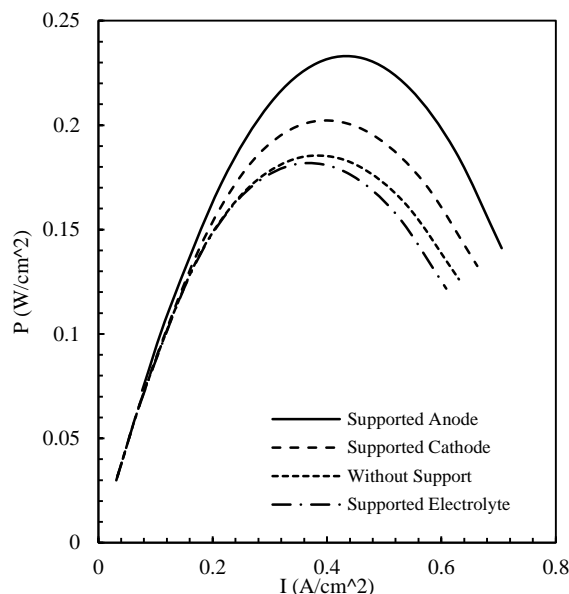
شکل (۱۶): تغییرات چگالی جریان نسبت به ولتاژ در فشارهای گوناگون کاتدی

۸- جمع بندی و نتیجه گیری

در این پژوهش پیل سوختی اکسید جامد با دو هندسه متفاوت و دو حالت حل و عدم حل معادله انرژی شبیه سازی و بررسی شده است. نتایج نشان داد، عملکرد پیل سوختی در هندسه لوله ای بیش تر از صفحه ای است. حل معادله انرژی و توزیع غیریکنواخت دما در پیل سوختی باعث کاهش عملکرد نسبت به حالت دما ثابت می گردد. افزایش دمای کاری پیل سوختی موجب کاهش عملکرد آن می شود. از توزیع دما شعاعی مشاهده شد که بیش ترین دما در ناحیه الکترولیت و کاتد است که می توان با طراحی بهینه این قسمت به جلوگیری از بروز آسیب های ناشی از تنش های گرمایی کمک نمود. در ادامه اثر افزایش دما بر سرعت جریان، نفوذ سوخت به داخل الکترود و نرخ واکنش های الکتروشیمیایی نشان داده شد که حاکی از کاهش مصرف سوخت و به دنبال آن افت عملکرد پیل سوختی بود. در پایان اثر تغییرات فشار در کانال های سوخت و هوا و همچنین ضخامت قسمت های گوناگون پیل سوختی بر عملکرد آن مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان داد افزایش فشار در کاتد و آند عملکرد را افزایش می دهد ولی بهبود عملکرد در کاتد محسوس تر بود. افزایش ضخامت کاتد و آند نیز عملکرد پیل سوختی را افزایش داد که اثر تغییر ضخامت آندی قابل توجه بود. همچنین نشان داده شد ضخامت الکترولیت با عملکرد پیل رابطه عکس دارد.

۹- مراجع

1. Wang, K., Hissel, D., Pera, M. C., Steiner, N., Mara, D., Sorrentino, M., Pianese, C., Monteverde, M., Cardone, P., and Saarinen, J. "A Review on Solid Oxide Fuel Cell Models", International journal of hydrogen Energy, Vol. 36, No. 12, pp. 7212-7228, 2011.
2. Marinha, D., Dessemond, L., and Djurado, E. "Comprehensive Review of Current Developments in IT-SOFCs", Current Inorganic Chemistry (Discontinued), Vol. 3, No. 1, pp. 2-22, 2013.
3. Gebregergis, A., Pillay, P., Bhattacharyya, D., and Rengaswamy, R. "Solid Oxide Fuel Cell Modeling", IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 56, No. 1, pp. 139-148, 2008.
4. Cigolotti, V., Genovese, M., and Fragiaco, P.,



شکل (۲۰): اثر تغییرات ضخامت بر چگالی توان پیل سوختی

همان طور که در شکل ۲۰ نشان داده شده است، عملکرد پیل سوختی در سه حالت افزایش ضخامت های قسمت های گوناگون شامل آند، کاتد و الکترولیت و حالت عدم تغییر ضخامت ها نشان داده شده است. لازم به توضیح است که افزایش ضخامت قسمت های گوناگون ۰/۰۵ mm در نظر گرفته شده است. چند نکته از شکل ۲۰ مشاهده می شود که در ذیل آورده شده است:

- ۱- افزایش ضخامت آند و کاتد عملکرد پیل سوختی را ارتقا می دهند.
- ۲- افزایش ضخامت الکترولیت موجب کاهش عملکرد پیل سوختی می گردد.
- ۳- افزایش ضخامت ۰/۰۵ mm آند موجب افزایش حدود ۱۶٪ بیشینه چگالی توان پیل سوختی می گردد.
- ۴- افزایش ضخامت ۰/۰۵ mm کاتد موجب افزایش حدود ۱۱٪ بیشینه چگالی توان پیل سوختی می گردد.
- ۵- افزایش ضخامت آند و کاتد باعث افزایش کمینه مقدار چگالی توان پیل سوختی می گردد.
- ۶- افزایش ضخامت آند و کاتد باعث افزایش بیشینه مقدار چگالی جریان پیل سوختی می گردد.

9. Chen, Y., Luo, Y., Shi, Y., and Cai, N. "Theoretical Modeling of Methane Production in Pressurized Micro-Tubular R-SOFC", *Energy Procedia*, Vol. 158, pp. 2164-2169, 2019.
10. Sayadian, S., Ghassemi, M., and Robinson, A.J. "Multi-physics Simulation of Transport Phenomena in Planar Proton-Conducting Solid Oxide Fuel Cell", *Journal of Power Sources*, Vol. 481, p. 228997, 2021.
11. Fahs, I. and ghasemi, M. "Analysis of Thermal Stress Distribution Sensitivity in a Planar Solid Oxide Fuel Cell", *Aerospace Mechanics Journal*, Vol. 16, No. 4, pp. 25-37, 2020. (In Persian)
12. Kamvar, M. and Ghassemi, M. "Performance Analysis of Coplanar Single Chamber Solid Oxide Fuel Cell with Oxygen-Methane-Nitrogen Mixture Under Steady State Conditions", *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 17, No. 1, pp. 31-38, 2017. (In Persian)
13. Kamvar, M., Ghassemi, M., and Steinberger-Wilckens, R. "The Numerical Investigation of a Planar Single Chamber Solid Oxide Fuel Cell Performance with a Focus on the Support Types", *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 45, No. 11, pp. 7077-7087, 2020.
14. Fox, R.W., McDonald, A.T., and Mitchell, J.W. "Fox and McDonald's Introduction to Fluid Mechanics", John Wiley & Sons, 2020.
5. Bove, R. and Ubertini, S. "Modeling Solid Oxide Fuel Cells: Methods, Procedures and Techniques", Springer Science & Business Media, 2008.
6. Ranasinghe, S.N. and Middleton, P.H. "Modelling of Single Cell Solid Oxide Fuel Cells Using COMSOL Multiphysics", in 2017 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2017 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC/I&CPS Europe), Milan, Italy, 2017.
7. Bakal, A., Kaya, M., and Matc, M.D. "Numerical Investigation of Amounts of Heat, Power and Temperature Distribution In IT-SOFC", *ECS Transactions*, Vol. 58, No. 3, p. 115, 2013.
8. Park, J.M., Kim, D.Y., Baek, J.D., Yoon, Y.-J., Su, P.-C., and Lee, S.H. "Numerical Study on Electrochemical Performance of Low-Temperature Micro-Solid Oxide Fuel Cells with Submicron Platinum Electrodes", *Energies*, Vol. 11, No. 5, p. 1204, 2018.

