



بررسی عددی بروز نشتی جریان در یک پیل سوختی اکسید جامد تمام متخلخل صفحه‌ای یکسو با سوخت هیدروژن

مجید کام‌ور^{۱*}

۱- استادیار، گروه مهندسی مکانیک، واحد پرند، دانشگاه آزاد اسلامی، پرند، ایران
* پرند، ۳۷۶۱۳۹۶۳۶۱، mkamvar@pia.ac.ir

چکیده

پیل سوختی اکسید جامد تمام متخلخل که در آن لایه الکترولیت متخلخل می‌باشد طراحی است که پیل سوختی اکسید جامد دو محفظه‌ای و تک محفظه‌ای را به هم پیوند می‌دهد و مزایای هر دو را با هم ترکیب می‌کند. پیل سوختی اکسید جامد تمام متخلخل به هیچ نوع درزگیر و آب‌بند نیازی ندارد و ایجاد ترک در الکترولیت آن عملکرد پیل را متوقف نمی‌کند. در مطالعه حاضر عملکرد یک پیل سوختی اکسید جامد صفحه‌ای تمام متخلخل یکسو با سوخت هیدروژن تحت شرایط پایا با هندسه دو بعدی برای اولین بار بصورت عددی بررسی می‌شود. معادلات حاکم شامل گونه شیمیایی، جرم، اندازه حرکت، بار و انرژی می‌باشد که بصورت کاملاً کوپل شده با معادلات الکتروشیمیایی حل می‌شوند. از آنجا که هیچ مرجعی از عملکرد پیل سوختی اکسید جامد تمام متخلخل با سوخت هیدروژن در دسترس نمی‌باشد، جهت صحت‌گذاری ابتدا مدلسازی عملکرد یک پیل سوختی اکسید جامد معمولی با سوخت هیدروژن صورت می‌گیرد و نتایج آن با نتایج تجربی مورد مقایسه قرار می‌گیرد سپس تغییرات در مدل جهت اعمال تخلخل لایه الکترولیت لحاظ می‌گردد. نتایج کاهش ۲۹ درصدی در ماکزیمم چگالی توان تولیدی توسط پیل سوختی اکسید جامد تمام متخلخل را در مقایسه با نوع متداول آن تحت شرایط ورودی یکسان نشان می‌دهد. دلیل اصلی این کاهش عملکرد نشت جریان اکسیژن عمدتاً از سمت ابتدای کانال هوا به سمت کانال سوخت می‌باشد که این نشتی باعث می‌شود محل وقوع دمای ماکزیمم پیل تغییر کند. **کلیدواژه‌گان:** پیل سوختی اکسید جامد، تمام متخلخل، هیدروژن، نشتی، حالت پایا

Numerical Investigation of Leakage Flow Occurring in a Hydrogen-Fuelled Co Flow Planar All-Porous Solid Oxide Fuel

Majid Kamvar^{1*}

1- Assistant Professor, Department of Mechanical Engineering, Parand Branch, Islamic Azad University, Parand, Iran
* P.O.B. 3761396361 Parand, Iran, , mkamvar@pia.ac.ir

Received: 23 March 2021 Accepted: 23 May 2021

Abstract

The All Porous Solid Oxide Fuel Cell (AP-SOFC) is a concept that links the dual and single chamber Solid Oxide Fuel Cell (SOFC), combining advantages of both. The AP-SOFC does not need any sealant and crack generation in its electrolyte component does not terminate cell operation. In this study, the performance of a hydrogen-fuelled co flow planar AP-SOFC is investigated numerically for the first time. Governing equations include species, mass, momentum, charge and energy solved fully-couple with electrochemical equations. Due to lack of study on hydrogen-fuelled AP-SOFC, first the performance of a conventional hydrogen-fuelled SOFC is modeled and the results are compared with experimental results for the validation purpose, then changes in the model are made to apply the electrolyte porosity. Results show a 29% decline in maximum power density produced by the AP-SOFC compared to its conventional scheme with the same inputs. The main reason for this reduction in the cell performance is mostly the flow leakage of oxygen from the near air channel inlet to the fuel channel side. This leakage leads to displace the maximum cell temperature point.

Keywords: Solid Oxide Fuel Cell, All-porous, Hydrogen, Leakage, Steady state



۱- مقدمه

پیل های سوختی یک فناوری کارآمد برای تولید برق از طریق تبدیل مستقیم الکتروشیمیایی یک سوخت و یک اکسنده بدون تبادل حرارت است [۱]. پیل های سوختی اکسید جامد به دلیل کارایی بالا و انعطاف پذیری در نوع سوخت توجه قابل توجهی پیدا کرده اند [۲-۶]. پیل های سوختی اکسید جامد در محدوده دمای بالا بین ۵۰۰ تا ۹۵۰ درجه سانتیگراد کار می کنند [۷]. این دمای کاری بالا دارای مزایا و معایبی نیز می باشد. از یک طرف، دمای بالای ۶۵۰ درجه سانتیگراد امکان اصلاح مستقیم هیدروکربن های ساده درون آند و همچنین انعطاف پذیری در انتخاب نوع سوخت همانند هیدروژن، مونوکسید کربن و سوخت های ساده هیدروکربنی را در یک دستگاه واحد فراهم می کنند، از طرف دیگر می توانند منجر به تنش های حرارتی، به ویژه هنگام سیکل های حرارتی، که ممکن است منجر به تشکیل ترک در اجزای پیل شود [۸]. دمای کاری بالای پیل همچنین باعث افزایش تخریب مواد اجزاء پیل می شود [۹-۱۲]. در پیل های سوختی اکسید جامد دو محفظه ای، جداسازی دقیق سوخت و اکسنده یک نیاز اساسی است [۱۳]. با این هدف که آب بندی مطمئن بین محفظه های الکتروود برقرار گردد [۱۴]. یک روش عملی برای ساده سازی ساختار پیل استفاده از یک محفظه به جای دو محفظه کاملاً جدا شده و عبور دادن مخلوط سوخت و اکسنده بر روی هر دو آند و کاتد به طور همزمان از روی پیل می باشد. این طرح ساده با عنوان پیل سوختی اکسید جامد تک محفظه ای نام گذاری شده است و توسط هیبینو و همکارانش برای اولین بار در سال ۱۹۹۳ ارائه شد [۱۵].

پیل های سوختی اکسید جامد تک محفظه ای در مقایسه با پیل های سوختی اکسید جامد معمولی، مزایایی از جمله وزن کمتر و حجم کمتر (مخصوصاً در نوع هم صفحه ای) به همراه دارند و همچنین نیاز به آب بندی های پیچیده را برطرف می کنند. بنابراین روند تولید به طور بالقوه مقرون به صرفه تر است. با این حال، حضور گونه های تماشگر در هر دو سمت لایه های کاتالیستی (به عنوان مثال وجود هیدروژن در لایه کاتالیستی کاتد) بدون هیچ گونه فعل و انفعال شیمیایی منجر به عملکرد بسیار کم در مقایسه با پیل های سوختی اکسید جامد معمولی به دلیل رقیق تر شدن واکنش دهنده ها می شود [۱۶]. تعدادی از مطالعات عددی در مورد پیل های سوختی اکسید جامد تک محفظه ای انجام شده است [۲، ۹، ۱۲-۲۷] که تمامی این مطالعات با هدف افزایش عملکرد پایین پیل انجام شده است. مقادیر عملکردهای گزارش شده پیل های سوختی اکسید جامد تک محفظه ای نشان می دهد که چگالی توان بالا و بازده بالای سوخت را نمی توان همزمان در یک پیل سوختی اکسید جامد تک محفظه ای بدست آورد. این به دلیل اشتعال پذیری و الگوی جریان است. در میان این مطالعات، کامور و همکاران [۲] یک مطالعه مقایسه ای بین پیکربندی های مختلف آند و کاتد در پیل سوختی اکسید جامد تک محفظه ای انجام دادند. نتایج آنها نشان داد که تلفات اهمی نقش اساسی در بهبود عملکرد پیل دارد. کامور و همکاران در مطالعه دیگری در کار اخیر خود [۱۶] به طور عددی تأثیر انواع مختلف لایه پشتیبان را بر عملکرد پیل بررسی کرده است. نتایج آنها نشان داد که طرح پایه آند بهترین عملکرد را در مقایسه با دو نوع طرح دیگر نشان می دهد. آنها همچنین نشان دادند که کمبود اکسیژن در سمت الکتروود کاتد پیل در طرح پایه کاتد مانعی است که عملکرد پیل را در اطراف شرایط کاری ولتاژ مدار باز محدود می کند.

مطالعات عددی ارزشمندی نیز در حوزه پیل سوختی اکسید جامد دو محفظه ای منتشر شده است. کنگ و همکاران [۲۸] طرح اتصال جدیدی به نام اتصال نوع ضربدری را درون کانال های گازی بررسی کرد. نتایج عددی آنها

نشان داد که پیل با این طرح جدید عملکرد بهتری در مقایسه با پیل با کانال های معمول ارائه می دهد. شلوکتر و همکاران [۲۹] تأثیر الگوهای مختلف ممکن برای جریان و موقعیت های اتصال الکتریکی را بر توزیع دما درون پیل مطالعه کردند. آنها ادعا کردند که با تغییر موقعیت اتصال الکتریکی امکان انتقال محل وقوع حداکثر دمای پیل به مرکز آن امکان پذیر نیست. مورنو-بلانکو و همکاران [۳۰] به صورت عددی اثر سطح مشترک بین کانال و الکتروود بر عملکرد پیل سوختی اکسید جامد صفحه ای را مطالعه کردند. آنها دریافتند که اندازه (عرض) و تعداد کانال ها در یک آرایش جریان هم سو تأثیر مستقیمی بر عملکرد پیل دارند.

از میان تمامی این مطالعات صورت گرفته، گو و همکاران [۳۱] با موفقیت یک مدل جدیدی از توسعه پیل سوختی اکسید جامد دو محفظه ای با الکتروولیت متخلخل به نام پیل سوختی اکسید جامد تمام متخلخل طراحی کردند که آمیخته ای از پیل سوختی اکسید جامد دو محفظه ای و تک محفظه ای می باشد. پیل آنها بدون هیچ گونه اصلاح خارجی یا وارد کردن بخار از سوخت متان استفاده می کرد. ساختار متخلخل الکتروولیت باعث انتقال گونه های گازی از طریق الکتروولیت می شود. بنابراین وجود ترک در الکتروولیت یا خرابی آب بند در پیل های سوختی اکسید جامد تمام متخلخل نگران کننده نیست و مدیریت میزان غلظت سوخت و اکسیژن به راحتی انجام می شود تا سیستم را از خطر انفجار دور نگه دارد.

اخیراً ژو و همکاران [۳۲] مطالعه تجربی گو و همکاران را برای پیل های سوختی اکسید جامد تمام متخلخل دکمه ای با سوخت متان با کمک روش های عددی توسعه داده اند. نتایج آنها بر روی بهینه سازی میزان تخلخل الکتروولیت برای کنترل انتقال اکسیژن به آند برای جلوگیری از خطر وقوع احتراق و انفجار و همچنین تبدیل متان به کک و رسوب کربن در سمت آند متمرکز بود که به طور قابل توجهی عملکرد پیل را کاهش می دهد.

ژو و همکاران در مطالعه ای دیگر [۳۳] اثرات حرارتی را در یک پیل سوختی اکسید جامد تمام متخلخل با سوخت متان بررسی کرده اند. آنها برای بهینه سازی عملکرد پیل، مطالعات پارامتری را برای متغیرهای مختلف مانند ولتاژ، دمای گاز ورودی و ساختارهای مختلف پیل انجام دادند.

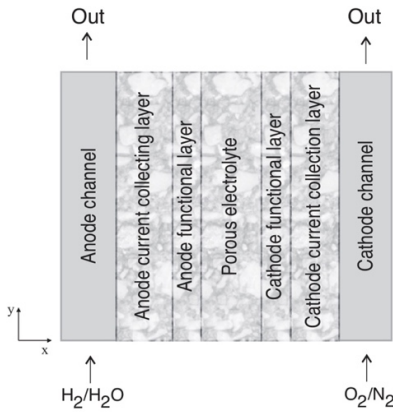
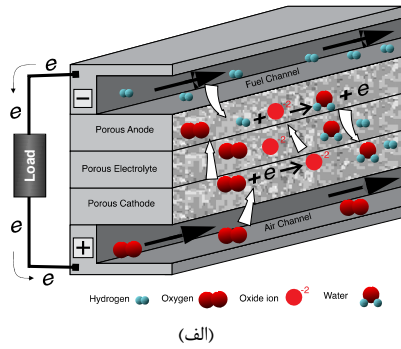
هدف از این مطالعه ارائه یک مدل عددی دوبعدی از عملکرد یک پیل سوختی اکسید جامد تمام متخلخل صفحه ای با سوخت هیدروژن برای اولین بار است تا با استفاده از آن بتوان جزئیات کاملی از نحوه عملکرد پیل سوختی اکسید جامد تمام متخلخل پیش بینی گردد. در تمامی مطالعات ارائه شده توسط ژو و همکاران از متان به عنوان سوخت استفاده شده است. استفاده از هیدروژن به جای متان به عنوان سوخت مزایایی را به همراه دارد از جمله: (۱) مشکلات تبدیل متان به کک در آن وجود ندارد و (۲) استفاده از آن در پیل سوختی هیچ گونه آلاینده ای ندارد در صورتیکه استفاده از متان موجب تولید گازهای مونوکسید کربن و دی اکسید کربن می شود که برای محیط زیست مضر است. اما در پیل سوختی اکسید جامد تمام متخلخل استفاده از سوخت هیدروژن به دلیل اشتعال پذیری بالای آن در هوا مطالعه تجربی آن را خطرناک می کند. به همین دلیل ارائه یک مدل عددی از عملکرد یک پیل سوختی اکسید جامد تمام متخلخل با سوخت هیدروژن می تواند بسیار حائز اهمیت باشد تا با کمک آن بتوان عوامل مؤثر بر عملکرد پیل را گزارش کرد. تمرکز اصلی مطالعه حاضر بر تحلیل جریان مخلوط گازی درون لایه های مختلف پیل می باشد تا با تحلیل آن منشأ نشتی جریان و تأثیر آن بر عملکرد پیل پیدا گردد.

۲- تعریف مسئله



فصلنامه علمی انرژی های تجدیدپذیر و نو

فصلنامه علمی انرژی های تجدیدپذیر و نو - سال نهم، شماره اول، بهار و تابستان ۱۴۰۱



شکل ۱ (الف) نمای شماتیکی از یک پیل سوختی اکسید جامد تمام متخلخل صفحه‌ای (ب) سطح مقطعی از پیل که بیانگر ناحیه محاسباتی مدل حاضر است.

جدول ۱ داده‌های هندسی

عنوان	علامت	مقدار (mm)
طول پیل	L_{cell}	۱۰
عرض محفظه گازی آند و کاتد	W_{ch}	۰/۵
ضخامت الکتروود آند	t_a	۰/۰۵
ضخامت لایه کاتالیستی آند	t_{arz}	۰/۰۲
ضخامت الکتروولیت	t_e	۰/۰۵
ضخامت لایه کاتالیستی کاتد	t_{crz}	۰/۰۲
ضخامت الکتروود کاتد	t_c	۰/۰۵

۲-۱- بقای جرم و اندازه حرکت

از آنجا که در کانال گازی و الکتروودهای متخلخل جریان گونه‌های گازی وجود دارد. معادله بقای جرم یا همان پیوستگی در معادله (۳) نوشته شده است [۳۵]:

$$\nabla \cdot (\rho \vec{u}) = 0 \quad (3)$$

که در آن چگالی مخلوط، \vec{u} بردار سرعت می‌باشد. معادله حرکت حاکم بر الکتروودها و الکتروولیت متخلخل براساس قانون داریسی در معادله (۴) بیان می‌شود [۳۵ و ۳۶]:

$$\rho \vec{u} \cdot \nabla \vec{u} = \nabla \cdot \left(-p \mathbf{I} + \frac{\mu}{\varepsilon} (\nabla \vec{u} + (\nabla \vec{u})^T) - \frac{2\mu}{\varepsilon} (\nabla \cdot \vec{u}) \mathbf{I} \right) + \rho \vec{g} - \left(\frac{\mu}{\kappa} \right) \vec{u} + \vec{B} \quad (4)$$

برای پیش بینی عملکرد یک پیل سوختی اکسید جامد تمام متخلخل صفحه‌ای از یک مدل عددی دو بعدی تحت شرایط پایا استفاده می‌شود. در طرح صفحه‌ای، الکتروولیت متخلخل بین دو الکتروود متخلخل قرار می‌گیرد. همانطور که در شکل ۱ نشان داده شده است، از دو محفظه کاملاً مجزا برای تغذیه سوخت و اکسند استفاده می‌شود و ساختار متخلخل الکتروولیت اجازه انتقال گونه‌های گازی از آند به کاتد و بالعکس را می‌دهد. پیل از پنج لایه تشکیل شده است. یک لایه جمع‌آوری کننده جریان آند از جنس نیکل (Ni)، یک لایه کاتالیستی آند ساخته شده از کامپوزیت نیکل و زیرکونیا تثبیت شده با ایتریا ($YSZ / 50\% - Ni / 50\%$)، یک الکتروولیت متخلخل از جنس YSZ ، یک لایه کاتالیستی کاتد ساخته شده از کامپوزیت YSZ و LSM ($LSM / 50\% - YSZ / 50\%$) و یک لایه جمع‌آوری کننده جریان کاتدی از جنس LSM خالص تشکیل شده است. برای ارائه پیش‌بینی واقع‌بینانه‌تر از عملکرد پیل، تمام پارامترهای هندسی و ترموفیزیکی مطالعه حاضر از مطالعه تجربی گزارش شده توسط تیمورکوتلوک و همکاران [۳۴] استخراج شده است. داده‌های هندسی مدل در نظر گرفته شده در این مطالعه در جدول ۱ آورده شده است. مقدار تخلخل ۰/۳ برای لایه الکتروولیت طرح تمام متخلخل پیل سوختی اکسید جامد در تمامی مراحل ارائه نتایج در نظر گرفته می‌شود.

معادلات حاکم شامل انتقال گونه‌های گازی، انرژی، اندازه حرکت و تعادل بار بصورت کوپل شده با معادلات سینتیک شیمیایی، که واکنش‌های الکتروشیمیایی را توصیف می‌کند در ادامه آورده می‌شود. فرضیات ساده کننده زیر در مطالعه حاضر در نظر گرفته شده است:

- شرایط کاری پایا در نظر گرفته می‌شود.
- الکتروودها ایده‌آل در نظر گرفته می‌شوند. این به آن معنی است که واکنش‌های زیر به ترتیب در دو سمت الکتروود اتفاق می‌افتند: واکنش اکسایش هیدروژن در الکتروود آند:



واکنش کاهش اکسیژن در الکتروود کاتد:



- جریان دو بعدی، تراکم‌پذیر و آرام در نظر گرفته می‌شود.
- همه گونه‌های گازی رفتار یک گاز ایده‌آل را دارند.
- عبارت اینرسی در معادله جریان ناحیه متخلخل نادیده گرفته می‌شود (فرض استوکس-برینکمن).

- از نفوذ اجزاء گازی به واسطه اختلاف دما نادیده گرفته می‌شود. - از آنجا که هدایت رسانایی الکتریکی الکتروودها در مقایسه با رسانایی یونی آنها به طور قابل توجهی بیشتر است، از مقاومت اهمی به دلیل انتقال الکترون صرف‌نظر می‌شود. - تعادل حرارتی بین فازهای جامد و سیال در الکتروودهای متخلخل و الکتروولیت برقرار است. با این فرضیات معادلات حاکم به طور جداگانه در ادامه شرح داده می‌شود.

با اعمال قانون اهم، معادلات بقای بار الکترونی و یونی به ترتیب در معادلات (۱۱) و (۱۲) نوشته می‌شود [۳۵]:

$$-\nabla \cdot (\sigma_{el} \nabla \phi_{el}) = j_{el} \quad (11)$$

$$-\nabla \cdot (\sigma_{io} \nabla \phi_{io}) = j_{io} \quad (12)$$

که در آن $\sigma_{el(i)}$ و $\phi_{el(i)}$ به ترتیب رسانایی الکتریکی (یونی) و پتانسیل الکتریکی (یونی) می‌باشد. j_{el} و j_{io} چشمه یا چاه مربوط به تولید یا مصرف به ترتیب الکترون و یون می‌باشد. مطابق واکنش‌های الکتروشیمیایی (۱) و (۲) تولید و یا مصرف بارهای الکترونی و یونی در لایه‌های کاتالیستی آند و کاتد اتفاق می‌افتد که مقادیر آن‌ها با استفاده از معادله باتلر-ولمر^۵ به ترتیب در معادلات (۱۳) و (۱۴) فرمول‌بندی می‌شوند [۳۵]:

$$j_{io,a} = -j_{el,a} = A_{v,a} J_{0,ref}^{H_2} \left(\frac{C_{H_2}}{C_{H_2,ref}} \right)^{\gamma_{H_2}} \times \left[\exp \left(\frac{n\alpha F \eta_{act,a}}{RT} \right) - \exp \left(\frac{-n(1-\alpha)F \eta_{act,a}}{RT} \right) \right] \quad (13)$$

$$j_{io,c} = -j_{el,c} = A_{v,c} J_{0,ref}^{O_2} \left(\frac{C_{O_2}}{C_{O_2,ref}} \right)^{\gamma_{O_2}} \times \left[\exp \left(\frac{n\alpha F \eta_{act,c}}{RT} \right) - \exp \left(\frac{-n(1-\alpha)F \eta_{act,c}}{RT} \right) \right] \quad (14)$$

که در آن A_v مساحت سطح مؤثر الکتروشیمیایی بر واحد حجم الکتروود، $J_{0,ref}^{O_2}$ و $J_{0,ref}^{H_2}$ به ترتیب چگالی جریان‌های انتقالی مرجع برای الکتروودهای آند و کاتد می‌باشد. γ_{O_2} و γ_{H_2} به ترتیب مرتبه واکنش برای اکسایش هیدروژن و کاهش اکسیژن در غلظت‌های مرجع $C_{H_2,ref}$ و $C_{O_2,ref}$ می‌باشد. α ضریب انتقال بار می‌باشد که مقدار آن بین صفر تا یک می‌باشد و F ثابت فارادی می‌باشد که برابر 96487 C/mol است. زیرنویس‌های a و c به ترتیب اشاره به الکتروودهای آند و کاتد دارد. η_{act} اضافه ولتاژ فعالسازی می‌باشد که مقدار آن در سمت الکتروودهای آند و کاتد به ترتیب با استفاده از معادلات (۱۵) و (۱۶) محاسبه می‌شوند:

$$\eta_{act,a} = \phi_{el} - \phi_{io} \quad (15)$$

$$\eta_{act,c} = \phi_{el} - \phi_{io} - V_{oc} \quad (16)$$

که در آن V_{oc} ولتاژ مدار باز پیل می‌باشد که به شدت تابع دمای کاری پیل می‌باشد و مقدار آن با استفاده از معادله (۱۷) بدست می‌آید [۱]:

$$V_{oc} = 1.317 - 2.769 \times 10^{-4} T + \frac{RT}{2F} \ln \left(\frac{P_{H_2} \cdot P_{O_2}^{1/2}}{P_{H_2O} \cdot P_{ref}^{1/2}} \right) \quad (17)$$

۴-۲- بقای انرژی

معادله بقای انرژی حاکم بر کل ناحیه بصورت معادله (۱۸) نوشته می‌شود [۱۱] و [۳۹]:

که در آن p فشار، μ لزجت دینامیکی، \mathcal{E} تخلخل، \vec{g} بردار شتاب، K نفوذپذیری، و \vec{B} بردار نیروهای خارجی وارد بر حجم واحد سیال می‌باشد. با اعمال فرض استوکس-برینکمن، سمت چپ معادله (ترم اینرسی) برای محیط متخلخل حذف می‌شود. در مورد جریان در محفظه گازی آند و کاتد که یک محیط آزاد می‌باشد در رابطه (۴) کافی است تخلخل را برابر مقدار واحد و نفوذپذیری را برابر بینهایت قرار دهیم در این صورت معادله اندازه حرکت حاکم در محفظه گازی بصورت معادله (۵) بازنویسی می‌شود [۳۷]:

$$\rho \vec{u} \cdot \nabla \vec{u} = \nabla \cdot (-pI + \mu(\nabla \vec{u} + (\nabla \vec{u})^T) - 2\mu(\nabla \cdot \vec{u})I) + \rho \vec{g} + \vec{B} \quad (5)$$

۲-۲- بقای گونه‌های گازی

در محفظه‌های گازی و الکتروودهای متخلخل جریان جرمی گونه‌های مختلف گازی اتفاق می‌افتد. معادله بقاء برای یک جزء گازی مانند i بصورت معادله (۶) نوشته می‌شود [۳۵ و ۳۸]:

$$\nabla \cdot \vec{j}_i + \rho(\vec{u} \cdot \nabla) \omega_i = R_i \quad (6)$$

که در آن \vec{j}_i بردار شار جرمی نسبی، ω_i کسر جرمی و R_i عبارت چشمه یا چاه مربوط به تولید یا مصرف جزء i می‌باشد. با استفاده از روابط استغنا ماکسول^۱ برای سیستم‌های چندجزئی، عبارت بردار شار جرمی بصورت معادله (۷) می‌تواند نوشته شود [۳۸]:

$$\vec{j}_i = -\rho \omega_i \sum_k D_{ik} \vec{a}_k \quad (7)$$

که در آن \vec{a}_k نیروی محرک برای نفوذ جزء k در یک مخلوط ایده‌آل می‌باشد و D_{ik} ضریب نفوذ فیک^۲ در سیستم چند جزئی می‌باشد و مقدار آن با استفاده از معادله (۸) تعیین می‌شود [۳۸]:

$$D_{ik} = 1.883 \times 10^{-2} T^{1.5} \times \frac{\left(\frac{1}{M_i} + \frac{1}{M_k} \right)^{0.5}}{(p \sigma_{ik}^2 \Omega)} \quad (8)$$

که در آن T دما، M جرم مولکولی گاز، σ و Ω به ترتیب مشخصه طولی^۳ برحسب آنگسترم و انتگرال برخورد نفوذی^۴ می‌باشد که نحوه محاسبه آن‌ها در مرجع [۳۸] تشریح شده است. جهت به حساب آوردن مقاومت انتقال جرم در الکتروودهای متخلخل و همچنین تأثیر برخورد مولکول‌ها به جداره دیواره‌ها ضریب نفوذ فیک با معادله (۹) اصلاح می‌شود [۳۸]:

$$D_{DGM,ik}^{eff} = \frac{\varepsilon}{\tau} \frac{D_{ik} \times D_{KN,ik}}{(D_{ik} + D_{KN,ik})} \quad (9)$$

که در آن $D_{DGM,ij}^{eff}$ ضریب نفوذ مؤثر مدل گاز-داستی^۵، τ میزان انحنا و $D_{KN,ik}$ ضریب نفوذ نادسن^۶ می‌باشد. از رابطه تنوری سنتیک گازها برای محاسبه ضریب نفوذ نادسن در معادله (۱۰) استفاده می‌شود [۳۸]:

$$D_{KN,ik} = \frac{d_p}{3} \sqrt{\frac{8RT}{\pi(M_i + M_k)}} \quad (10)$$

که در آن d_p قطر موثر روزنه در محیط متخلخل و R ثابت جهانی گازها می‌باشد.

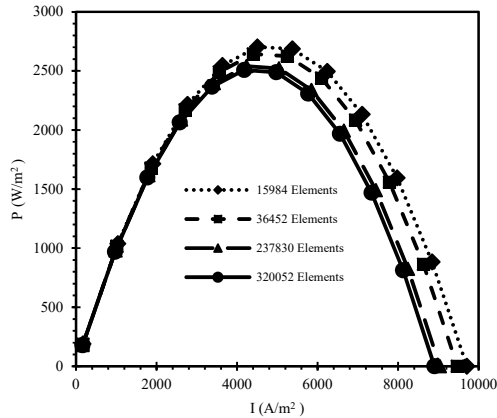
۳-۲- بقای بار

5. Dusty Gas Model (DGM)
6. Knudsen diffusivity
7. Butler-Volmer equation

1. Maxwell-Stefan
2. Fick's diffusivity
3. Characteristic length
4. Collision diffusion integral



می‌گردد به این ترتیب که ابتدا معادلات بقاء بار سپس معادلات بقاء گونه‌های گازی همراه با معادلات حرکت سیال و در نهایت تمامی معادلات حاکم بصورت کاملاً کوپل شده حل می‌شوند. نتایج حاصل از هر گام ذخیره شده و بصورت شرایط اولیه برای گام بعدی لحاظ می‌گردد. میزان خطای نسبی برای حل برابر 10^{-6} در نظر گرفته می‌شود. مدت زمان حل مسئله برای اسکن تمامی ولتاژها از مقدار $1/1$ ولت تا صفر ولت با گام 0.1 - ولت با استفاده از لپ تاپ با مشخصات سی پی یو core i7 و رم ۱۶ گیگابایت برابر ۱۷ دقیقه ۴۱ ثانیه می‌باشد.



شکل ۲ تاثیر تعداد المان‌های در نظر گرفته شده در مش بندی بر روی دقت نتایج خروجی.

۴- نتایج و تفسیر آن‌ها

۴-۱- اعتبارسنجی مدل

جهت نشان دادن صحت نتایج حاصل از مدل فرایند اعتبارسنجی انجام می‌شود. برای این منظور نتایج حاضر با نتایج تیمورکوتلوک و همکاران [۳۴] مقایسه می‌شود. نکته اینکه تمامی پارامترهای هندسی و فیزیکی یکسان با مقاله تیمورکوتلوک و همکارانش در نظر گرفته می‌شود. جدول ۲ داده‌های ترموفیزیکی ورودی را برای استخراج نتایج نشان می‌دهد.

شکل ۳ مقایسه‌ای را بین نتایج حاصل از مدل حاضر و نتایج تیمورکوتلوک و همکارانش را نشان می‌دهد. جهت نشان دادن میزان تطابق بین نتایج حاصل از مدل حاضر با نتایج آزمایشگاهی تیمورکوتلوک و همکارانش از پارامتر ریشه متوسط مربعات خطا استفاده می‌گردد که هر چقدر مقدار آن به عدد واحد نزدیکتر باشد نشان می‌دهد همپوشانی نتایج بیشتر است. مقدار این پارامتر برای مطالعه حاضر برابر 0.99884 بدست آمد که نشان می‌دهد تطابق بسیار خوبی بین نتایج حاصل از مدل و نتایج تیمورکوتلوک و همکارانش وجود دارد. نکته آنکه برای اعتبارسنجی نتایج حاصل از مدل، از پارامترهای تطابق استفاده گردید و در نهایت نتایج حاصل با مقادیر $A_a = 1/93 \times 10^7 \text{ m}^2/\text{m}^3$ ، $A_c = 1/93 \times 10^7 \text{ m}^2/\text{m}^3$ و $\alpha_c = 0.1875$ تطابق حاضر بدست آمد.

$$\nabla \cdot (\rho C_p u T - k \nabla T) = Q \quad (18)$$

که در آن C_p گرمای ویژه، k ضریب هدایت حرارتی و Q عبارت چشمه انرژی می‌باشد که درون پیل ایجاد می‌شود. جهت نحوه فرمول‌بندی عبارت چشمه انرژی خواننده به مراجع [۸، ۱۱، ۱۸، ۱۹] ارجاع داده می‌شوند. به منظور لحاظ کردن اثر انتقال حرارت درون الکترودهای متخلخل از روابط اصلاحی (۱۹) و (۲۰) به ترتیب برای محاسبه ظرفیت گرمایی ویژه موثر در واحد حجم الکترودها $(\rho C_p)_{eff}$ و ضریب رسانش حرارتی مؤثر (k_{eff}) استفاده می‌شود [۱۸ و ۳۹]:

$$(\rho C_p)_{eff} = \varepsilon (\rho C_p)_f + (1 - \varepsilon) (\rho C_p)_s \quad (19)$$

$$k_{eff} = \varepsilon k_f + (1 - \varepsilon) k_s \quad (20)$$

که در آن‌ها اندیس‌های f و s به ترتیب اشاره بر فاز سیال و جامد دارد.

۵-۲- شرایط مرزی

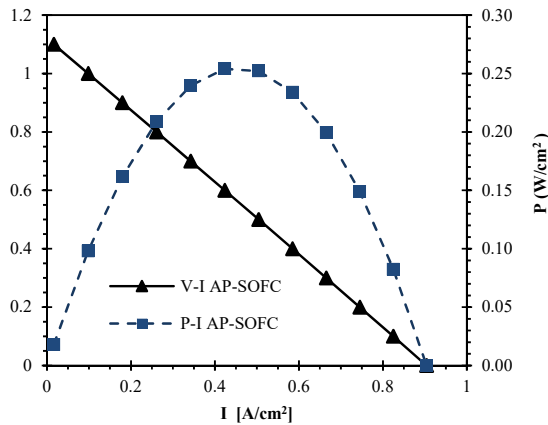
در ورودی‌های محفظه سرعت، فشار، دما و همچنین کسر مولی گونه‌های گازی معلوم می‌باشد. روی دیواره‌های محفظه‌ها شرط مرزی عدم لغزش حاکم بوده و شرط مرزی عایق روی این مرز برای فیزیک انرژی فرض می‌شود. از آنجا که امکان نفوذ گونه‌های گازی در دیواره محفظه وجود ندارد شرط مرزی عایق برای فیزیک انتقال جرم اعمال می‌شود. همانطور که فرض شد الکترولیت در برابر انتقال الکترون عایق می‌باشد لذا شرط مرزی عایق برای فیزیک انتقال الکترون روی تمامی مرزهای الکترولیت و روی مرزهای سطح مشترک الکترولیت و الکترودها حاکم می‌باشد. جهت ایجاد جریان الکترون از سمت الکترودها به سمت الکتروکاتد، مقدار ولتاژ کاری پیل روی مرز مشترک الکتروکاتد با محفظه خود و مقدار ولتاژ صفر روی مرز مشترک الکتروکاتد با محفظه خود اعمال می‌شود. شرط مرزی پیوستگی برای مابقی مرزها حاکم است.

۳- فرایند حل عددی

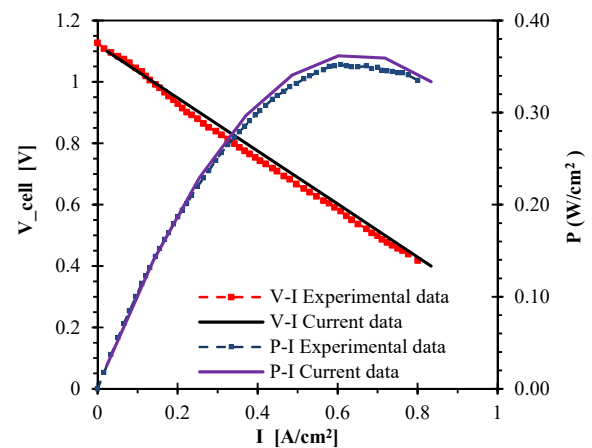
تمامی معادلات حاکم غیرخطی شامل معادلات بقاء جرم، اندازه حرکت، گونه‌های شیمیایی، انرژی و بارهای الکترونی و یونی در محیط نرم‌افزار کامسول ۵/۲ فرمول‌بندی می‌شود که یک نرم‌افزار تجزیه می‌باشد که از روش المان محدود برای حل معادلات مولتی فیزیک کاملاً کوپل شده با یکدیگر مورد استفاده قرار می‌گیرد. نوع مش بندی به صورت مثلثی انتخاب می‌شود به طوری که توزیع مش به نحوی می‌باشد که در لایه‌های کاتالیستی که بیشترین حجم محاسبات در آن وجود دارد تعداد المان‌های بیشتری در این نواحی وجود داشته باشد. در این مطالعه جهت انتخاب تعداد مش بهینه بطوریکه هم در زمان حل صرفه‌جویی گردد و هم دقت حل حفظ شود استقلال مش مورد بررسی قرار می‌گیرد. ۴ نوع مش بندی در نظر گرفته شد که به ترتیب تعداد المان‌های آن برابر 15984 ، 36452 ، 237830 و 320052 می‌باشد. شکل ۲ مقایسه نتایج حاصل از این ۴ نوع مش بندی را نشان می‌دهد. همانطور که مشخص است نتایج حاصل از تعداد المان‌های 237830 و 320052 تقریباً همپوشانی دارند که برای صرفه‌جویی در زمان حل تعداد المان 237830 جهت ارائه نتایج انتخاب می‌شود. از المان‌های خطی برای حل تمامی معادلات استفاده شده است. برای مهار ناپایداری در حل، روند حل معادلات در سه گام حل

1. Root Mean Square





شکل ۴ نمودار پلاریزاسیون برای یک پیل سوختی اکسید جامد صفحه‌ای تمام متخلخل با سوخت هیدروژن



شکل ۳ دقت مدل حاضر در مقایسه با داده‌های تیمور کوتلوک و همکاران [۳۴]

۲-۴- تحلیل عملکرد پایای پیل

در این بخش تحلیل جامعی از عملکرد پایای پیل سوختی اکسید جامد صفحه‌ای تمام متخلخل با سوخت هیدروژن برای اولین بار مورد بررسی قرار می‌گیرد. برای آنکه عملکرد پیل به شرایط واقعی نزدیک باشد تمام پارامترهای ورودی استفاده شده در قسمت اعتبارسنجی (جدول ۲) در این قسمت یکسان در نظر گرفته می‌شود مگر آنکه در متن خلاف آن بیان شود.

شکل ۴ نمودار پلاریزاسیون پیل سوختی اکسید جامد صفحه‌ای تمام متخلخل با سوخت هیدروژن را نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود ماکزیمم چگالی توان الکتریکی پیل برابر 0.254 W/cm^2 بدست آمد که در مقایسه با نمودار پلاریزاسیون پیل سوختی اکسید جامد معمولی با شرایط ورودی یکسان (شکل ۳) ۲۹٪ کاهش را در میزان ماکزیمم چگالی توان الکتریکی پیل نشان می‌دهد. ماکزیمم چگالی توان الکتریکی پیل سوختی اکسید جامد معمولی برابر 0.3596 W/cm^2 بدست آمده بود. این میزان کاهش در ماکزیمم چگالی توان پیل را می‌توان به دو عامل مهم نسبت داد. اول اینکه ساختار متخلخل الکترولیت پیل سوختی اکسید جامد تمام متخلخل باعث می‌شود میزان رسانایی یونی الکترولیت در مقایسه با الکترولیت غیرمتخلخل کمتر باشد زیرا یون‌های اکسید (O^{2-}) فقط قادر هستند از بخش جامد الکترولیت عبور کنند. علت دوم به نفوذ اجزاء گازی غیرفعال از طریق لایه الکترولیت متخلخل برمی‌گردد که باعث می‌شود غلظت اجزاء گازی مورد نیاز برای واکنش‌های الکتروشیمیایی (هیدروژن در سمت آند و اکسیژن در سمت کاتد) با کاهش مواجه شود.

جدول ۲ پارامترهای ورودی

عنوان	علامت	مقدار	واحد
سرعت ورودی	u_{in}	۵	ms^{-1}
دمای ورودی	T_{in}	۱۰۲۳	K
فشار کاری	P_0	۱	atm
کسر مولی ورودی هیدروژن	X_{0,H_2}	۰/۹۷	۱
کسر مولی ورودی اکسیژن	X_{0,O_2}	۰/۲۱	۱
نفوذپذیری	κ	10^{-1}	m^2
ثابت جهانی گازها	R	۸/۳۱۴	$\text{Jmol}^{-1}\text{K}^{-1}$
ولتاژ کاری پیل	V_{cell}	۰/۷	V
ضریب رسانش حرارتی آند	k_a	۳	$\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$
ضریب رسانش حرارتی کاتد	k_c	۳	$\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$
ضریب رسانش حرارتی الکترولیت	k_e	۲	$\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$
ضریب رسانش الکتریکی آند	σ_a	۷۱۴۲۸/۵۷	Sm^{-1}
ضریب رسانش الکتریکی کاتد	σ_c	۵۳۷۶/۳۴	$\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$
ضریب رسانش یونی الکترولیت	σ_e	۰/۶۴	$\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$
چگالی آند	ρ_a	۶۸۷۰	kgm^{-3}
چگالی کاتد	ρ_c	۶۵۷۰	kgm^{-3}
چگالی الکترولیت	ρ_e	۵۹۰۰	kgm^{-3}
ظرفیت گرمایی ویژه آند	Cp_a	۵۹۵	$\text{Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}$
ظرفیت گرمایی ویژه کاتد	Cp_c	۵۷۳	$\text{Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}$
ظرفیت گرمایی ویژه الکترولیت	Cp_e	۶۰۶	$\text{Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}$
تخلخل الکترودها	ϵ	۰/۴	۱
تخلخل الکترولیت	ϵ_e	۰/۳	۱
انحناء	τ	۲/۷۵	۱
قطر روزنه	d_p	$1/5 \times 10^{-6}$	m



جزء گاز اکسیژن از سمت کاتد به سمت آند دانست. بعلاوه، دلیل جهش مقدار سرعت مخلوط در ابتدای ورودی هر دو کانال‌های آند و کاتد را می‌توان به رشد لایه مرزی از سمت دیواره کانال دانست که باعث می‌شود ناحیه‌ای از جریان در نزدیکی دیواره تحت تأثیر ویسکوزیته و اصطکاک دیواره با کاهش سرعت چشمگیری روبرو شود از طرف دیگر بنا بر قانون بقا جرم می‌بایست مقدار دبی جریان در تمامی مقاطع کانال یکسان باقی بماند لذا سرعت مخلوط در وسط کانال برای جبران این کاهش دبی جرمی در نزدیکی دیواره با جهش همراه است. انتظار داشتیم پس از یک طول مشخصی از ورودی کانال مقدار سرعت مخلوط ثابت گردد و به اصطلاح جریان کاملاً توسعه یافته گردد اما بدلیل نشتی جریان این حالت هرگز رخ نداده است.

شکل ۷ توزیع مؤلفه γ سرعت را روی محور به موازات x گذرنده از وسط پیل در ولتاژ کاری $0.7V$ و دمای کاری $750^\circ C$ نشان می‌دهد. همانطور که مشخص است به دلیل اعمال شرط عدم لغزش سرعت مخلوط گازی در روی دیواره‌های کانال برابر صفر می‌باشد و در مرکز کانال سرعت ماکزیمم در هریک از کانال‌ها اتفاق افتاده است همانند آنچه که در جریان سیال درون یک لوله یا کانال مشاهده می‌گردد. سرعت مخلوط درون محیط متخلخل ناچیز است تا جایی که درون لایه الکترولیت متخلخل تقریباً به صفر می‌رسد این امر به دلیل مقدار نفوذ پذیری بسیار پایین ($K = 10^{-10}$) محیط متخلخل می‌باشد که باعث می‌شود افت فشار دارسی ($\frac{\mu}{K} \nabla p$) که با عکس نفوذپذیری رابطه مستقیم دارد مقدار زیادی را داشته باشد. همچنین مشاهده می‌گردد مقدار ماکزیمم سرعت مخلوط گازی در کانال آند بیشتر از کانال کاتد می‌باشد. مقدار سرعت ماکزیمم در سمت کانال آند برابر $7/8 \text{ m/s}$ که به میزان $11/4\%$ از مقدار سرعت ماکزیمم در سمت کانال کاتد (7 m/s) بیشتر است. برای پی بردن این اختلاف رژیم جریان در دو سمت کانال‌های آند و کاتد، توزیع مؤلفه x سرعت را روی محور به موازات x گذرنده از موقعیت‌های γ برابر $h_{\text{cell}}/4$ ، $h_{\text{cell}}/2$ ، $h_{\text{cell}}/4$ در ولتاژ کاری $0.7V$ و دمای کاری $750^\circ C$ در شکل ۸ نشان داده می‌شود. همانگونه که مشاهده می‌شود مقادیر مؤلفه x سرعت روی هر سه خط منفی می‌باشد که نشان می‌دهد جهت جریان مخلوط گازی خلاف جهت محور x یعنی از سمت الکتروکاتد به سمت الکتروآند می‌باشد. از طرفی مقادیر اندازه مؤلفه x سرعت در نزدیکی ورودی پیل بیشتر بوده و هرچه به سمت خروجی می‌رویم اندازه سرعت کاهش می‌یابد که این امر نشان از این دارد که نشتی جریان در لبه ورودی پیل از سمت الکتروکاتد به سمت الکتروآند بیشتر می‌باشد. به همین دلیل است که اختلاف سرعت مخلوط گازی در دو سمت کانال‌های آند و کاتد مطابق شکل ۶ در نزدیکی خروجی کمتر می‌باشد. نکته دیگر آنکه بیشترین اندازه مؤلفه x سرعت در سطح مشترک بین الکتروکاتد و کانال گازی اتفاق می‌افتد و این به دلیل ورود از محیط متخلخل به محیط آزاد می‌باشد که باعث می‌شود افت فشار دارسی از معادله جریان حذف شود و سرعت سیال افزایش یابد.

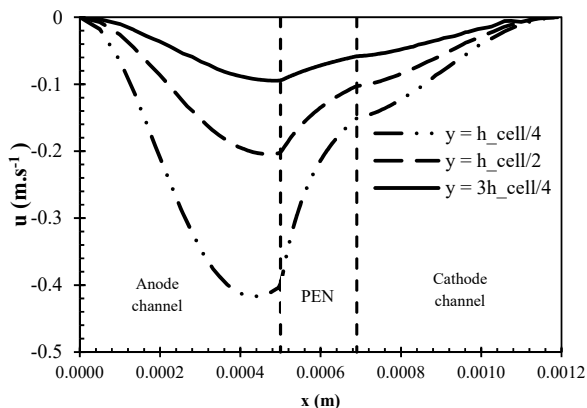
Pa.s	6.162×10^{-6} $+ 1.145 \times 10^{-8}T$	μ_{H_2}	ویسکوزیته دینامیکی هیدروژن
Pa.s	1.668×10^{-5} $+ 3.168 \times 10^{-8}T$	μ_{O_2}	ویسکوزیته دینامیکی اکسیژن
Pa.s	4.567×10^{-6} $+ 2.209 \times 10^{-8}T$	μ_{H_2O}	ویسکوزیته دینامیکی آب
Pa.s	1.435×10^{-5} $+ 2.642 \times 10^{-8}T$	μ_{N_2}	ویسکوزیته دینامیکی نیتروژن
W/m.K	0.08525 $+ 2.964 \times 10^{-4}T$	k_{H_2}	ضریب رسانش حرارتی هیدروژن
W/m.K	0.01569 $+ 5.69 \times 10^{-5}T$	k_{O_2}	ضریب رسانش حرارتی اکسیژن
W/m.K	0.01258 $+ 5.444 \times 10^{-5}T$	k_{N_2}	ضریب رسانش حرارتی نیتروژن
W/m.K	-0.0143 $+ 9.782 \times 10^{-5}T$	k_{H_2O}	ضریب رسانش حرارتی آب

برای درک بهتر از اینکه چه میزان از جزء گازی غیرفعال به سمت هریک از الکترودهای آند و کاتد وارد می‌شود توزیع مؤلفه x شار کلی اجزاء گازی هیدروژن و آب را روی خط گذرنده از سطح مشترک الکترولیت و الکتروکاتد و توزیع مؤلفه x شار کلی جزء گازی اکسیژن را روی خط گذرنده از سطح مشترک الکترولیت و الکتروکاتد در ولتاژ کاری $0.7V$ و دمای کاری $750^\circ C$ در شکل ۵ نشان داده می‌شود. نکته اینکه مقادیر شار کلی جزء گازی اکسیژن منفی بدست آمده که نشان می‌دهد جزء گازی اکسیژن در خلاف جهت x (به سمت الکتروکاتد) نفوذ می‌کند اما برای مقایسه بهتر تمامی مقادیر شار کلی جزء گازی اکسیژن در یک مقدار منفی ضرب شده است. همانطور که از شکل ۶ مشخص است مقدار شار عبوری آب در مقایسه با دو جزء گازی دیگر بسیار کمتر و نزدیک به صفر است. همچنین مقدار شار عبوری گاز اکسیژن در نزدیکی ورودی با یک جهش روبرو می‌شود و تا مقدار تقریبی $0.28 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s}$ افزایش می‌یابد و پس از آن تا جایی کاهش می‌یابد که در نزدیکی خروجی مقدار آن منفی می‌گردد که نشان می‌دهد جریان اکسیژن برمی‌گردد و مقدار اندکی اکسیژن از سمت الکتروکاتد به سمت الکتروکاتد در نزدیکی خروجی انتقال می‌یابد. اما شار کلی هیدروژن تنها در نزدیکی ورودی پیل مقدار قابل ملاحظه‌ای دارد اما پس از آن مقدار شار به عدد صفر نزدیک می‌شود. نتیجه آنکه در پیل سوختی اکسید جامد تمام متخلخل صفحه‌ای با سوخت هیدروژن مقدار نفوذ اکسیژن درون الکترولیت متخلخل نسبت به اجزاء گازی دیگر بیشتر بوده که این عامل می‌تواند علت اصلی در پایین‌تر بودن میزان عملکرد این نوع از پیل در مقایسه با نوع معمولی آن باشد.

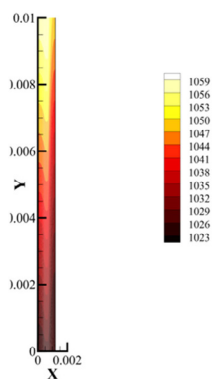
شکل ۶ توزیع مؤلفه γ سرعت را روی محور به موازات γ گذرنده از وسط هریک از کانال‌های سوخت (آند) و هوا (کاتد) در ولتاژ کاری $0.7V$ و دمای کاری $750^\circ C$ را نشان می‌دهد. با مقایسه توزیع سرعت مخلوط گازی درون هریک از کانال‌ها مشاهده می‌شود که سرعت مخلوط گازی درون کانال آند بطور چشمگیری بیشتر می‌باشد تا جایی که در اواسط کانال سرعت مخلوط گازی از 5 m/s در ورودی کانال به مقدار $7/77 \text{ m/s}$ در نزدیکی وسط کانال ($y=6/44 \text{ mm}$) می‌رسد در حالیکه سرعت اجزاء گازی در این مقطع از کانال کاتد برابر 7 m/s است. این افزایش سرعت اجزاء گازی درون کانال آند نسبت به کاتد در تمامی مقاطع به جز در نزدیکی خروجی مشاهده می‌گردد. سرعت اجزاء گازی در خروجی کانال آند برابر $7/35 \text{ m/s}$ می‌باشد در حالیکه این مقدار در خروج کانال کاتد برابر $7/57 \text{ m/s}$ است. دلیل این اتفاق را می‌توان به نشت



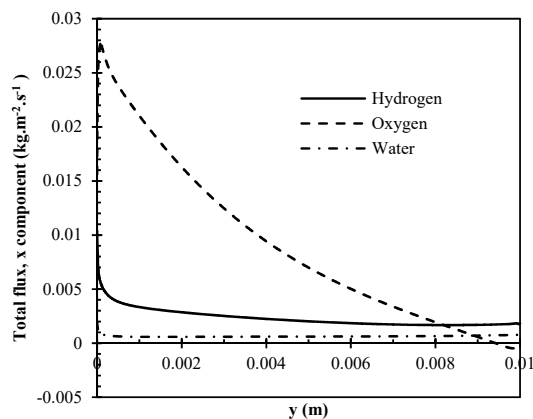
متخلخل که برابر $10.32/5$ K است به میزان $2/5\%$ بیشتر است. همچنین با تحقیق بر محل وقوع دمای ماکزیمم این نکته دریافت می‌شود که دمای ماکزیمم پیل سوختی اکسید جامد معمولی در موقعیت $y=6/44$ mm و $x=6/44$ mm اتفاق می‌افتد در حالی که دمای ماکزیمم پیل سوختی اکسید جامد تمام متخلخل در مرکز پیل و روی لبه خروجی اتفاق می‌افتد که این نتیجه گرفته می‌شود که دمای ماکزیمم پیل سوختی اکسید جامد معمولی در وسط لایه الکترولیت و منطبق بر خروجی اتفاق می‌افتد در حالی که با متخلخل شدن لایه الکترولیت این دمای ماکزیمم به محل وسط پیل نزدیک می‌گردد که نشان می‌دهد در پیل سوختی اکسید جامد تمام متخلخل توزیع دما همگن‌تر می‌باشد.



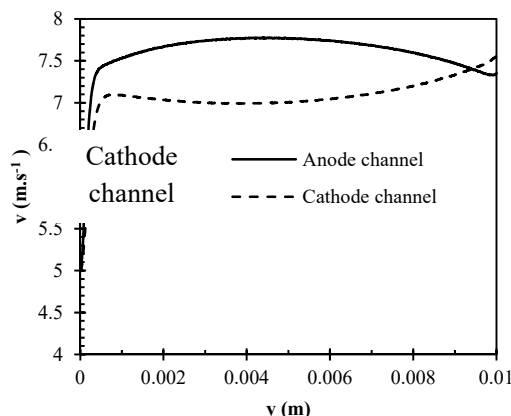
شکل ۸ نمودار توزیع مولفه X سرعت مخلوط گازی روی محور گذرنده به موازات X در موقعیت‌های y مختلف در ولتاژ ۰/۷۷ و دمای کاری ۷۵۰°C



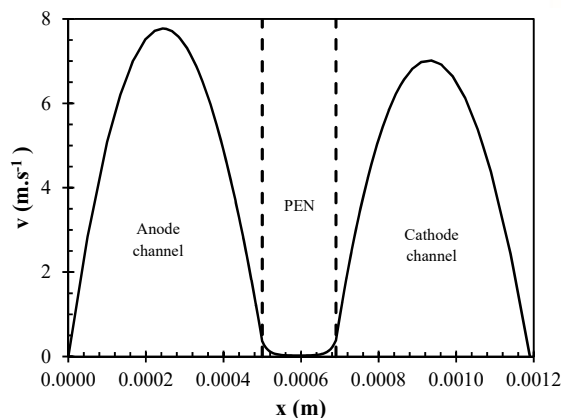
(الف)



شکل ۵ نمودار توزیع مولفه X شار کلی اجزاء گازی در سطح مشترک الکترود-الکترولیت در ولتاژ ۰/۷۷ و دمای کاری ۷۵۰°C



شکل ۶ نمودار توزیع مولفه Y سرعت مخلوط گازی روی محور به موازات Y گذرنده از وسط هریک از کانال‌های آند و در ولتاژ ۰/۷۷ و دمای کاری ۷۵۰°C

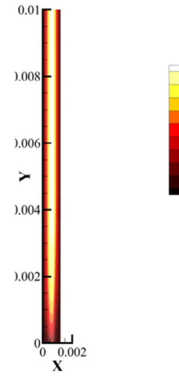


شکل ۷ نمودار توزیع مولفه Y سرعت مخلوط گازی روی محور X گذرنده از وسط پیل در ولتاژ ۰/۷۷ و دمای کاری ۷۵۰°C

شکل ۹ کانتور دما را برای هر دو پیل سوختی اکسید جامد معمولی و تمام متخلخل نشان می‌دهد. با مقایسه تغییرات دمایی درون هر دو پیل مشاهده می‌شود که دمای ماکزیمم در پیل سوختی اکسید جامد معمولی برابر $10.58/4K$ می‌باشد که از مقدار دمای ماکزیمم پیل سوختی اکسید جامد تمام



- channels-electrode interface area on SOFCs performance, *Int. J. Hydrogen Energy*, Vol. 44, pp. 446-456, 2019.
- [6] A. Amiri, S. Tang and R. Steinberger-Wilckens, M.O. Tadé: Evaluation of Fuel Diversity in Solid Oxide Fuel Cell Systems, *Int. J. Hydrogen Energy*, Vol. 43, pp. 23475-23487, 2018.
- [7] R. Bove and S. Ubertini, *Modeling Solid Oxide Fuel Cells, Methods, Procedures and Technologies*, First Edition, Springer, 2008.
- [8] Y. Wang, W. Jiang, Y. Luo, Y. Zhang and Sh. Tu, Evolution of thermal stress and failure probability during reduction and re-oxidation of solid oxide fuel cell, *J. Power Sources*, Vol. 371, pp. 65-76, 2017.
- [9] Y. Hao, Z. Shao, J. Mederos, W. Lai, D. G. Goodwin and S. M. Haile, Recent advances in single-chamber fuel cells: Experiment and modeling, *Solid State Ionics*, Vol. 177, pp. 2013-2021, 2006.
- [10] S. Ahn, Y. Kim, J. Moon, J. Lee and J. Kim, Influence of patterned electrode geometry on performance of co-planar, single-chamber, solid oxide fuel cell, *J. Power Sources*, Vol. 171, pp. 511-516, 2007.
- [11] M. Yano, A. Tomita, M. Sano and T. Hibino, Recent advances in single-chamber solid oxide fuel cells: A review, *Solid State Ionics*, Vol. 177, pp. 3351-3359, 2007.
- [12] N. Akhtar, *Single-Chamber Solid Oxide Fuel Cells: Modeling and Experiments*, PhD thesis, Department of Chemical Engineering, University of Birmingham, Birmingham, UK, 2010.
- [13] M. Yano, A. Tomita, M. Sano and T. Hibino, Recent advances in single-chamber solid oxide fuel cells: A review, *Solid State Ionics* Vol. 177, pp. 3351-3359, 2007.
- [14] N. Akhtar, S. P. Decent and K. Kendall, Numerical modelling of methane-powered micro-tubular, single-chamber solid oxide fuel cell, *J. Power Sources*, Vol. 195, pp. 7796-7807, 2010.
- [15] T. Hibino and H. Iwahara, Simplification of solid oxide fuel cell system using partial oxidation of methane, *Chemistry Letters*, Vol. 22, pp. 1131-1134, 1993.
- [16] M. Kamvar, M. Ghassemi and R. Steinberger-Wilckens, The numerical investigation of a planar single chamber solid oxide fuel cell performance with a focus on the support types, *Int. J. Hydrogen Energy*, Vol. 45, pp. 7077-7087, 2020.
- [17] Ch. Y. Chung and Y. Ch. Chung, Performance characteristics of micro single-chamber solid oxide fuel cell: Computational analysis, *J. Power Sources*, Vol. 154, pp. 35-41, 2006.
- [18] M. Liu, Zh. Lu, B. Wei, X. Huang, Y. Zhang and W. Su, Numerical modeling of methane-powered micro-tubular, single-chamber solid oxide fuel cel, *J. Power Sources*, Vol. 195, pp. 7796-7807, 2010.
- [19] N. Akhtar, S. P. Decent, D. Loghini and K. Kendall, A three dimensional numerical model of a single-chamber solid oxide fuel cell, *Int. J. Hydrogen Energy*, Vol. 34, pp. 8645-8663, 2009.
- [20] N. Akhtar, S. P. Decent and K. Kendall, A parametric analysis of a micro-tubular, single-chamber solid oxide fuel cell (MT-SC-SOFC), *Int. J. Hydrogen Energy*, Vol. 36, pp. 765-772, 2011.
- [21] X. Jacques-Bedrad, T.W. Napporn, R. Roberge and M. Meunier, Performance and ageing of an anode-supported SOFC operated in single-chamber conditions, *J. Power Sources*, Vol. 153, pp. 108-113, 2006.
- [22] B. Morel, R. Roberge, S. Savoie, T. W. Napporn and M. Meunier, Temperature and performance variations along single chamber solid oxide fuel cells, *J. Power Sources*, Vol. 186, pp. 89-95, 2009.
- [23] Y. Hao and D. G. Goodwin, Numerical Modeling of Single-Chamber SOFCs with Hydrocarbon Fuels, *J. Electrochem. Soc.*, Vol. 154, pp. B207-B217, 2007.
- [24] N. Akhtar and K. Kendall, Micro-tubular, solid oxide fuel cell stack operated under single-chamber conditions, *Int. J. Hydrogen Energy*, Vol. 36, pp. 13083-13088, 2011.
- [25] N. Akhtar, Micro-tubular, single-chamber solid oxide fuel cell (MT-SC-SOFC) stacks: Model development, *Chemical Engineering Research and Design*, Vol. 90, pp. 814-824, 2012.
- [26] N. Akhtar, Modeling of novel porous inserted micro-tubular, single-chamber solid oxide fuel cells (MT-SC-SOFC), *Chemical Engineering Journal*, Vol. 179, 2012, pp. 277-284.
- [27] Y. Hao and D.G. Goodwin, Efficiency and fuel utilization of methane-powered single-chamber solid oxide fuel cells, *J. Power Sources*, Vol. 183, pp. 157-163, 2008.
- [28] W. Kong, Zh. Han, S. Lu, X. Gao and X. Wang, A novel interconnector design of SOFC, *Int. J. Hydrogen Energy*, Vol. 45, pp. 20329-20338, 2020.
- [29] C. Schluckner, V. Subotic, S. Preibl and C. Hochenauer, Numerical analysis of flow configurations and electrical contact positions in



(ب)

شکل ۹ کانتورهای دما (الف) پیل سوختی اکسید جامد معمولی (ب) پیل سوختی اکسید جامد تمام متخلخل صفحه‌ای

۵- نتیجه‌گیری

تحلیل عملکرد یک پیل سوختی اکسید جامد تمام متخلخل با سوخت هیدروژن با استفاده از یک مدل دو بعدی عددی بر پایه روش المان محدود و با تمرکز بر مطالعه جریان درون لایه‌های پیل انجام شد. نتایج نشان داد ماکزیمم چگالی توان الکتریکی پیل تمام متخلخل برابر 2540 W/m^2 بود که در مقایسه با نمودار پلاریزاسیون پیل سوختی اکسید جامد معمولی با شرایط ورودی یکسان ۲۹٪ کاهش را در میزان ماکزیمم چگالی توان الکتریکی پیل نشان داد. با مقایسه توزیع مولفه x شار کلی اجزاء گازی مختلف بر روی سطح مشترک الکترولیت و الکتروود آند مشاهده شد که جزء گازی اکسیژن نفوذ بیشتری را در مقایسه با دو جزء گازی دیگر داشت که این مقدار نفوذ در نزدیکی ورودی پیل بیشتر بوده و همچنین جهت آن از سمت الکتروود کاتد به سمت الکتروود آند بود. توزیع سرعت درون کانال‌های آند و کاتد نشان داد که در هیچ کدام از این کانال‌های جریان سیال به حالت کاملاً توسعه‌یافته نمی‌رسد و سرعت سیال در سمت کانال آند در مقایسه با کانال کاتد به میزان ۱۱/۴٪ بیشتر بود که این به دلیل نشستی گاز (مخصوصاً در نزدیکی ورودی پیل) از سمت الکتروود کاتد به سمت الکتروود آند می‌باشد. مقایسه کانتور دما بین پیل‌های سوختی اکسید جامد معمولی و تمام متخلخل نشان داد که در طرح تمام متخلخل توزیع دما همگن‌تر بوده به گونه‌ای که باعث می‌شود در شرایط یکسان محل وقوع دمای ماکزیمم را که در طرح معمولی در وسط لایه الکترولیت و منطبق بر خروجی است حوالی مرکز پیل تمام متخلخل اتفاق بیافتد.

۶- مراجع

- [1] EG and G Technical Services, Inc. Science Applications International Corporation, *Fuel Cell Handbook*, sixth edition, US Department of Energy, 2002.
- [2] M. Kamvar, M. Ghassemi and M. Rezaei, Effect of catalyst layer configuration on single chamber solid oxide fuel cell performance, *Journal of Applied Thermal Engineering*, Vol. 100, pp.98-104, 2016.
- [3] J. Kupecki, K. Motylinski, A. Zurawska, M. Kosiorek and L. Ajdys, Numerical analysis of an SOFC stack under loss of oxidant related fault conditions using a dynamic non-adiabatic model, *Int. J. Hydrogen Energy*, Vol. 44, pp. 21148-21161, 2019.
- [4] E.A. El-Hay, M.A. El-Hameed and A.A. El-Fergany, Optimized Parameters of SOFC for steady state and transient simulations using interior search algorithm, *J. Energy*, Vol. 166, pp.451-461, 2018.
- [5] J. Moreno-Blanco, F. Elizalde-Blancas, J.M. Riesco-Avila, J.M. Belman-Flores and A. Gallego-Munoz, On the effect of gas



- SOFC single cell and their impact on local effects, *Int. J. Hydrogen Energy*, Vol. 44, pp. 1877-1895, 2019.
- [30] J. Moreno-Blanco, F. Elizalde-Blancas, J.M. Riesco-Avila, J.M. Belman-Flores and A. Gallegos-Munoz, On the effect of gas channels-electrode interface area on SOFCs performance, *Int. J. Hydrogen Energy*, Vol. 44, pp. 446-456, 2019.
- [31] Y. Guo, M. Bessaa, S. Aquado, M. Cesar Steil, D. Rembelski, M. Rieu, J. Viricelle, N. Benameur, Ch. Guizard, C. Tardivat, Ph. Vernoux and D. Farrusseng, An all porous solid oxide fuel cell (SOFC): a bridging technology between dual and single chamber SOFCs, *Energy Environ. Sci.*, Vol. 6, pp. 2119-2123, 2013.
- [32] H. Xu, B. Chen, P. Tan, J. Xuan, M. Mercedes Maroto-Valer, D. Farrusseng, Q. Sun and M. Ni, Modelling of all-porous solid oxide fuel cells with a focus on the electrolyte porosity design, *Applied Energy*, Vol. 235, pp. 602-611, 2019.
- [33] H. Xu, B. Chen, P. Tan, Y. Zhang, Q. He, Zh. Wu and M. Ni, The thermal effects of all-porous solid oxide fuel cells, *J. Power Sources*, Vol. 440, Article 227102, 2019.
- [34] B. Timurkutluk, S. Celik, C. Timurkutluk, M.D. Mat and Y. Kaplan, Novel electrolytes for solid oxide fuel cells with improved mechanical properties, *Int. J. Hydrogen Energy*, Vol. 37, pp. 13499-13509, 2012.
- [35] M. Ghassemi, M. Kamvar and R. Steinberger-wilckens, *Fundamentals of heat and fluid flow in high temperature fuel cells*, First Edition, Elsevier, 2020.
- [36] D.A. Nield and A. Bejan, *Convection in Porous Media*, Third Edition, Springer, 2006.
- [37] G.K. Batchelor, *An Introduction To Fluid Dynamics*, Cambridge University Press, 2000.
- [38] R. Taylor and R. Krishna, *Multicomponent mass transfer*, First Edition, John Wiley & Sons, Inc. 1993.
- [39] M. Kaviany, *Principles of heat transfer in porous media*, Second Edition, Springer, 1995.

