مقاله پژوهشی تاریخ دریافت: ۰۰/۰۱/۰۳

فصلنامه علمی ا نرژیهای تجدیدپذیر و نو

jrenew.ir





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

مجيد كامور \*\*

۱- استادیار، گروه مهندسی مکانیک، واحد پرند، دانشگاه آزاد اسلامی، پرند، ایران \* پرند، m<u>kamvar@piau.ac.ir</u> ،۳۷۶۱۳۹۶۳۶۱

## چکیدہ

پیل سوختی اکسید جامد تمام متخلخل که در آن لایه الکترولیت متخلخل میباشد طرحی 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 کاملا کوپل شده با معادلات الکتروشیمیایی حل میشوند. از أنجا که هیچ مرجعی از عملکرد پیل سوختی اکسید جامد تمام متخلخل با سوخت هیدروژن بورت کاملا کوپل شده با معادلات الکتروشیمیایی حل میشوند. از أنجا که هیچ مرجعی از عملکرد پیل سوختی اکسید جامد تمام متخلخل با سوخت هیدروژن در دسترس نمیباشد، جهت صحهگذاری 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 می گردد. نتایج کاهش ۲۹ در مان یوانی بان تایج 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 عمدتا از سمت ابتدای کانال هوا به سمت کانال سوخت میباشد که این نشتی باعث میشود محل وقوع دمای ماکزیمم پیل تغییر کند. **کلیدواژگان:** 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<sup>1\*</sup>

 1- Assistant Professor, Department of Mechanical Engineering, Parand Branch, Islamic Azad University, Parand, Iran \* P.O.B. 3761396361 Parand, Iran, , mkamvar@piau.ac.ir
 Received: 23 March 2021 Accepted: 23 May 2021

#### Abstract

فصلنامه علمي انرژي هاي تجديدپذير و نو- سال نهم ، شماره اول، بهار و تابستان ١٤٠١

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 الكتروشيميايي يك سوخت و يك اكسنده بدون تبادل حرارت است [۱]. پیلهای سوختی اکسید جامد به دلیل کارایی بالا و انعطافپذیری در نوع سوخت توجه قابل توجهي پيدا كردهاند [٦-8]. پيلهاي سوختي اكسيد جامد در محدوده دمای بالا بین ۵۰۰ تا ۹۵۰ درجه سانتیگراد کار می کنند [۷]. این دمای کاری بالا دارای مزایا و معایبی نیز میباشد. از یک طرف، دمای بالای ۶۵۰ درجه سانتیگراد امکان اصلاح مستقیم هیدروکربنهای ساده درون آند و همچنین انعطاف پذیری در انتخاب نوع سوخت همانند هیدروژن، مونوکسید کربن و سوختهای ساده هیدروکربنی را در یک دستگاه واحد فراهم میکنند، از طرف دیگر میتوانند منجر به تنشهای حرارتی، به ویژه هنگام سیکلهای حرارتی، که ممکن است منجر به تشکیل ترک در اجزای پیل شود [۸]. دمای کاری بالای پیل همچنین باعث افزایش تخریب مواد اجزاء پیل میشود [۹-۱۲]. در پیلهای سوختی اکسید جامد دو محفظهای، جداسازی دقیق سوخت و اکسنده یک نیاز اساسی است [۱۳]، با این هدف که آببندی مطمئن بین محفظههای الکترود برقرار گردد [۱۴]. یک روش عملی برای سادهسازی 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 میباشد. این طرح ساده با عنوان پیل سوختی اکسید جامد تک محفظهای نام گذاری شده است و توسط هیبینو و همکارانش برای اولین بار در سال ۱۹۹۳ ارائه شد [۱۵].

پیلهای سوختی اکسید جامد تکمحفظهای در مقایسه با پیلهای سوختی اکسید جامد معمولی، مزایایی از جمله وزن کمتر و حجم کمتر (مخصوصاً در نوع همصفحهای) به همراه دارند و همچنین نیاز به آببندیهای پیچیده را برطرف میکنند. بنابراین روند تولید به طور بالقوه مقرون به صرفهتر است. با این حال، حضور گونههای تماشاگر در هر دو سمت لایههای 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 پیلهای سوختی اكسيد جامد معمولي به دليل رقيقتر شدن واكنشدهندها مي شود [١۶]. تعدادی از مطالعات عددی در مورد پیلهای سوختی اکسید جامد تک محفظهای انجام شده است [۲, ۹, ۱۲–۲۷] که تمامی این مطالعات با هدف افزایش عملکرد پایین پیل انجام شده است. مقادیر عملکردهای گزارش شده پیلهای سوختی اکسید جامد تک محفظهای نشان میدهد که چگالی توان بالا و بازده بالای سوخت را نمی توان همزمان در یک پیل سوختی اکسید جامد تک محفظهای بدست آورد. این به دلیل اشتعال پذیری و الگوی جریان است. در میان این مطالعات، کامور و همکاران [۲] یک مطالعه مقایسهای بین پیکربندی های مختلف آند و کاتد در پیل سوختی اکسید جامد تک محفظهای 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 میدهد. آنها همچنین نشان دادند که کمبود اکسیژن در سمت الکترود کاتد پیل در طرح پایه کاتد مانعی است که عملکرد پیل را در اطراف شرايط كارى ولتاژ مدار باز محدود مىكند.

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

نشان داد که پیل با این طرح جدید عملکرد بهتری در مقایسه با پیل با کانالهای معمول ارائه می دهد. شلوکنر و همکاران [۲۹] تأثیر الگوهای مختلف ممکن برای جریان و موقعیتهای 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 الکترود بر عملکرد پیل سوختی اکسید جامد صفحهای را مطالعه کردند. آنها دریافتند که اندازه (عرض) و تعداد کانالها 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 محفظهای با الکترولیت متخلخل به نام پیل سوختی اکسید جامد تمام متخلخل طراحی کردند که آمیختهای از پیل سوختی اکسید جامد دو محفظهای و تک محفظهای میباشد. پیل آنها بدون هیچ گونه اصلاح خارجی یا وارد کردن بخار از سوخت متان استفاده می کرد. ساختار متخلخل الکترولیت باعث انتقال گونههای گازی از طریق الکترولیت می شود. بنابراین وجود ترک در الکترولیت یا خرابی آببند در پیلهای 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 پیلهای سوختی اکسید جامد تمام متخلخل دکمهای با سوخت متان با کمک روشهای عددی توسعه دادهاند. نتایج آنها بر روی بهینه سازی میزان تخلخل الکترولیت 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 میدهد.

ژو و همکاران در مطالعهای دیگر [۳۳] اثرات حرارتی را در یک پیل سوختی اکسید جامد تمام متخلخل با سوخت متان بررسی کردهاند. 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 صفحهای با سوخت هیدروژن برای اولین بار است تا با استفاده از آن بتوان جزئیات کاملی از نحوه عملکرد پیل سوختی اکسید جامد تمام متخلخل پیشبینی 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 هیچگونه آلایندگی 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 میتواند 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 تآثیر آن بر عملکرد پیل پیدا گردد.

۲- تعريف مسئله



فصلنامه علمى

برای پیش بینی عملکرد یک پیل سوختی اکسید جامد تمام متخلخل صفحهای از یک مدل عددی دو بعدی تحت شرایط پایا استفاده می شود. در طرح صفحهای، الکترولیت متخلخل بین دو الکترود متخلخل قرار می گیرد. همانطور که در شکل ۱ نشان داده شده است، از دو محفظه کاملا مجزا برای تغذیه سوخت و اكسنده استفاده مى شود و ساختار متخلخل الكتروليت اجازه انتقال گونههای گازی از آند به کاتد و بالعکس را میدهد. پیل از پنج لایه تشکیل شده است. یک لایه جمع آوری کننده جریان آند از جنس نیکل (Ni)، یک لایه كاتالیستی آند ساخته شده از كامپوزیت نیكل و زیركونیا تثبیت شده با ایتریا (۵۰٪ Ni ، ۵۰ – ۷SZ) ، یک الکترولیت متخلخل از جنس YSZ، یک لایه کاتالیستی کاتد ساخته شده از کامپوزیت YSZ و LSM (۵۰٪ YSZ – ۵۰٪ LSM) و یک لایه جمع آوری کننده جریان کاتدی از جنس LSM خالص تشکیل شده است. برای ارائه پیش بینی واقع بینانهتر از عملکرد پیل، تمام پارامترهای هندسی و ترموفیزیکی مطالعه حاضر از مطالعه تجربی گزارش شده توسط تیمور کوتلوک 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 الکترولیت طرح تمام متخلخل پیل سوختی اکسید جامد در تمامی مراحل ارائه نتایج در نظر گرفته میشود.

معادلات حاکم شامل انتقال گونه های گازی، انرژی، اندازه حرکت و تعادل بار بصورت کوپل شده با معادلات سینتیک شیمیایی، که واکنشهای الکتروشیمیایی را توصیف می کند در ادامه آورده می شود.

فرضیات ساده کننده زیر در مطالعه حاضر در نظر گرفته شده است: - شرایط کاری پایا در نظر گرفته میشود.

- الکترودها ایدهآل در نظر گرفته میشوند. این به آن معنی است که واکنشهای زیر به ترتیب در دو سمت الکترود اتفاق میافتند:

واكنش اكسايش هيدروژن در الكترود آند:

$$0^{-2} \rightarrow H_2 0 + 2e^-$$

 $H_{2} +$ 

واكنش كاهش اكسيژن در الكترود كاتد:

(1)

$$0_2 + 4e^- \to 20^{-2}$$
 (Y

- 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 الکترودها 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 الکترودهای متخلخل و الکترولیت برقرار است.

با این فرضیات معادلات حاکم به طور جداگانه در ادامه شرح داده می شود.



**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.

<b>جدول ۱</b> دادههای هندسی				
مقدار (mm)	علامت	عنوان		
۱.	L <sub>cell</sub>	طول پیل		
• / ۵	W <sub>ch</sub>	عرض محفظه گازی آند و کاتد		
۰/۰۵	ta	ضخامت الكترود آند		
•/•٢	t <sub>arz</sub>	ضخامت لايه كاتاليستي آند		
•/•۵	te	ضخامت الكتروليت		
•/•٢	$t_{\rm crz}$	ضخامت لايه كاتاليستي كاتد		
•/•۵	tc	ضخامت الكترود كاتد		

#### ۲-۱- بقای جرم و اندازه حرکت

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

$$\nabla \cdot (\rho \vec{u}) = 0 \tag{(7)}$$

که در آن ho چگالی مخلوط،  $ec{u}$  بردار سرعت میباشد.

معادله حرکت حاکم بر الکترودها و الکترولیت متخلخل براساس قانون دارسی در معادله (۴) بیان میشود[۳۵ و ۳۶]:

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

فصلنامه علمي

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

 $\kappa$  ،در آن p فشار،  $\mu$  لزجت دینامیکی،  $\varepsilon$  تخلخل،  $\vec{g}$  بردار شتاب نفوذپذیری، و  $ec{B}$  ردار نیروهای خارجی وارد بر حجم واحد سیال میباشد. با اعمال فرض استوكس-برينكمن، سمت چپ معادله (ترم اينرسي) براي محيط متخلخل حذف می شود. 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 می شود [۳۷]:

$$\begin{split} \rho \vec{u} \cdot \nabla \vec{u} = \nabla \cdot (-p\mathbf{I} + \mu (\nabla \vec{u} + (\nabla \vec{u})^T) - 2\mu (\nabla \cdot \vec{u})\mathbf{I}) \\ &+ \rho \vec{g} + \vec{B} \end{split}$$

#### ۲-۲- بقای گونههای گازی

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

$$\nabla \cdot \vec{j_i} + \rho(\vec{u} \cdot \nabla)\omega_i = R_i \tag{9}$$

که در آن  $ec{J_i}$  بردار شار جرمی نسبی،  $\omega_i$  کسر جرمی و  $ec{R_i}$  عبارت چشمه یا  $ec{J_i}$ چاه مربوط به تولید یا مصرف جزء نام میباشد. با استفاده از روابط استفان ماکسول ابرای سیستمهای چندجزئی، عبارت بردار شار جرمی بصورت معادله (۷) می تواند نوشته شود [۳۸]:

$$\vec{P}_{i} = -\rho\omega_{i}\sum_{k}D_{ik}\vec{d}_{k}$$
(Y)

که در آن  $\overrightarrow{d_k}$  نیروی محرک برای نفوذ جزء iام در یک مخلوط ایدهآل میباشد و D<sub>ik</sub> ضریب نفوذ فیک<sup>۲</sup> در سیستم چند جزئی میباشد و مقدار آن با استفاده از معادله (۸) تعیین می شود [۳۸]:

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

 $^{
m v}$ که در آن T دما، M جرم مولکولی گاز،  $\sigma$  و  $\Omega$  به ترتیب مشخصه طولی برحسب آنگسترم و انتگرال برخورد نفوذی میباشد که نحوه محاسبه آنها در مرجع [۳۸] تشريح شده است. جهت به حساب آوردن مقاومت انتقال جرم در الكترودهاى متخلخل و همچنين تأثير برخورد مولكولها به جداره ديوارهها ضریب نفوذ فیک با معادله (۹) اصلاح می شود [۳۸]:

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

که در آن  $D^{eff}_{DGM,ij}$  ضریب نفوذ مؤثر مدل گاز-داستی $^{\circ}$ ، au میزان انحناء و D<sub>KN,ik</sub> ضریب نفوذ نادسن<sup>6</sup> میباشد. از رابطه تئوری سنتیک گازها برای محاسبه ضریب نفوذ نادسن در معادله (۱۰) استفاده می شود [۳۸]:

$$D_{KN,ik} = \frac{d_p}{3} \sqrt{8RT \frac{(M_i + M_k)}{(\pi M_i M_k)}} \tag{(1.)}$$

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

#### ۲–۳– بقای بار

(λ)

1. Maxwell-Stefan

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

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

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

$$-\nabla \cdot (\sigma_{io} \nabla \phi_{io}) = j_{io} \tag{11}$$

که در آن  $\sigma_{el(io)}$  و  $\phi_{el(io)}$  به ترتیب رسانایی الکتریکی (یونی) و پتانسیل الکتریکی (یونی) میباشد. *jei* و *jio* چشمه یا چاه مربوط به تولید یا مصرف به ترتيب الكترون و يون مىباشد. مطابق واكنش هاى الكتروشيميايي (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<sup>۷</sup> به ترتیب در معادلات (۱۳) و (۱۴) فرمول بندی می شوند [۳۵]:

$$\begin{split} j_{io,a} &= -j_{el,a} = A_{\nu,a} J_{0,ref}^{H_2} \left( \frac{C_{H_2}}{C_{H_2,ref}} \right)^{\gamma_{H_2}} \\ & \times \left[ \exp\left(\frac{n\alpha F \eta_{act,a}}{RT}\right) \\ & - \exp\left(\frac{-n(1-\alpha)F \eta_{act,a}}{RT}\right) \right] \end{split} \tag{17}$$

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

که در آن Av مساحت سطح مؤثر الکتروشیمیایی بر واحد حجم الکترود، ابد  $J_{0,ref}^{O_2}$  و  $J_{0,ref}^{O_2}$  به ترتیب چگالی جریانهای انتقالی مرجع برای الکترودهای آند  $J_{0,ref}^{H_2}$ و کاتد میباشد.  $\gamma_{H_2}$  و  $\gamma_{0_2}$  به ترتیب مرتبه واکنش برای اکسایش هیدروژن و کاهش اکسیژن در غلظتهای مرجع  $c_{H_2,ref}$  و  $c_{0_2,ref}$  میباشد. lpha ضریب انتقال بار میباشد که مقدار آن بین صفر تا یک میباشد و F ثابت فارادی میباشد که برابر ۹۶۴۸۷ C/mol است. زیرنویسهای a و c به ترتیب اشاره به الکترودهای آند و کاتد دارد. η<sub>act</sub> اضافه ولتاژ فعالسازی میباشد که مقدار آن در سمت الكترودهاي آند و كاتد به ترتيب با استفاده از معادلات (۱۵) و (۱۶) محاسبه می شوند:

$$\eta_{act,a} = \phi_{el} - \phi_{io} \tag{12}$$

$$\eta_{act,c} = \phi_{el} - \phi_{io} - V_{oc} \tag{19}$$

که در آن *Voc* ولتاژ مدار باز پیل میباشد که به شدت تابع دمای کاری پیل می باشد و مقدار آن با استفاده از معادله (۱۷) بدست می آید [۱]:

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

#### ۲-۴- بقای انرژی

معادله بقاء انرژی حاکم بر کل ناحیه بصورت معادله (۱۸) نوشته می شود [۱۱ ، ۳۹]:

<sup>5.</sup> Dusty Gas Model (DGM)

<sup>6.</sup> Knudsen diffusivity 7. Butler-Volmer equation

$$\nabla . \left(\rho C_p \mathbf{u} T - k \nabla T\right) = Q \tag{11}$$

که در آن 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 و ۱۹] ارجاع داده میشوند. به منظور لحاظ کردن اثر انتقال حرارت درون الکترودهای متخلتخل از روابط اصلاحی (۱۹) و (۲۰) به ترتیب برای محاسبه ظرفیت گرمایی ویژه موثر در واحد حجم الکترود  $(\rho C_p)_{eff}$  و ضریب رسانش حرارتی مؤثر ( $k_{eff}$ ) استفاده میشود [۱۸ و ۲۹]:

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

$$k_{eff} = \varepsilon k_f + (1 - \varepsilon) k_s \tag{(7.)}$$

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

# ۲-۵- شرایط مرزی

در ورودی های 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 الکترون روی تمامی مرزهای الکترولیت و روی مرزهای سطح مشترک الکترون روی تمامی مرزهای الکترولیت و روی مرزهای سطح مشترک الکترون از سمت الکترود آند به سمت الکترود کاتد، مقدار ولتاژ کاری پیل روی مرز مشترک الکترود کاتد با محفظه خود و مقدار ولتاژ صغر روی مرز مشترک الکترود آند با محفظه خود اعمال میشود. شرط مرزی پیوستگی برای مابقی مرزها حاکم است.

#### ۳- فرایند حل عددی

تمامی معادلات حاکم غیرخطی شامل معادلات بقای جرم، اندازه حرکت، گونههای شیمیایی، انرژی و بارهای الکترونی و یونی در محیط نرمافزار کامسول ۵/۲ فرمول بندی می شود که یک نرم افزار تجارتی می باشد که از روش المان محدود برای حل معادلات مولتی فیزیک کاملا کوپل شده با یکدیگر مورد استفاده قرار میگیرد. نوع مشبندی به صورت مثلثی انتخاب میشود به طوریکه توزیع مش به نحوی میباشد که در لایههای کاتالیستی که بیشترین حجم محاسبات در آن وجود دارد تعداد المانهاي بيشتري در اين نواحي 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 می گیرد. ۴ نوع مشبندی در نظر گرفته شد که به ترتیب تعداد المانهاي آن برابر ۱۵۹۸۴، ۳۶۴۲۴، ۳۳۷۸۳۰ و ۳۲۰۰۵۳ ميباشد. شکل ۲ مقایسه نتایج حاصل از این ۴ نوع مش بندی را نشان میدهد. همانطور که مشخص است نتایج حاصل از تعداد المان های ۲۳۷۸۳۰ و ۳۲۰۰۵۲ تقریبا هم پوشانی دارند که برای صرفه جویی در زمان حل تعداد المان ۲۳۷۸۳۰ جهت ارائه نتایج انتخاب می شود. از المان های خطی برای حل تمامی معادلات استفاده شده است. برای مهار ناپایداری در حل، روند حل معادلات در سه گام حل

1. Root Mean Square

می گردد 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 کاملا کوپل شده حل می شوند. نتایج حاصل از هر گام ذخیره شده و بصورت شرایط اولیه برای گام بعدی لحاظ می گردد. میزان خطای نسبی برای حل برابر ۱۰<sup>-۶</sup> در نظر گرفته می شود. مدت زمان حل مسئله برای اسکن تمامی ولتاژها از مقدار ۱/۱ ولت تا صفر ولت با گام ۲۰۱۱ ولت با استفاده از لپ تاپ با مشخصات سی پی یو corei7 و رم ۱۶ گیگابایت برابر ۱۷ دقیقه ۴۱ ثانیه می باشد.



**شکل ۲** تاثیر تعداد المانهای درنظر گرفته شده در مشیندی بر روی دقت نتایج خروجی.

# ۴- نتایج و تفسیر آنها ۱-۴- اعتبارسنجی مدل

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

شکل ۳ مقایسهای را بین نتایج حاصل از مدل حاضر و نتایج تیمور کوتلوک و همکارانش را نشان می دهد. جهت نشان دادن میزان تطابق بین نتایج حاصل از مدل حاضر با نتایج آزمایشگاهی تیمور کوتلوک و همکارانش از پارامتر ریشه متوسط مربعات خطا<sup>۱</sup> استفاده می گردد که هر چقدر مقدار آن به عدد واحد نزدیکتر باشد نشان می دهد همپوشانی نتایج بیشتر است. مقدار این پارامتر برای مطالعه حاضر برابر ۱۹۸۸۴ بدست آمد که نشان می دهد تطابق بسیار خوبی بین نتایج حاصل از مدل و نتایج تیمور کوتلوک و همکارانش وجود دارد. نکته آنکه برای اعتبارسنجی نتایج حاصل از مدل، از پارامترهای تطابقی استفاده گردید و در نهایت نتایج حاصل با مقادیر ۲۰<sup>۲</sup>۳۵/۱۰ «۱۰<sup>۲</sup>۳۵/۱۰ متوابق بدست آمد.





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

### ۴-۲- تحلیل عملکرد پایای پیل

در این بخش تحلیل جامعی از عمکرد 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 می دهد. همانطور که مشاهده می شود ماکزیمم چگالی توان الکتریکی پیل برابر ۲۹۲ /۲۵۴ ۷۰ 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 می دهد. ماکزیمم چگالی توان الکتریکی پیل سوختی در ماکزیمم چگالی توان ییل را میتوان به دو عامل مهم نسبت داد. اول اینکه ساختار متخلخل الکترولیت پیل سوختی اکسید جامد تمام متخلخل باعث می شود میزان رسانایی یونی الکترولیت در مقایسه با الکترولیت غیرمتخلخل می مود میزان رسانایی یونی الکترولیت در مقایسه با الکترولیت غیرمتخلخل می مود میزان رسانایی یونی الکترولیت در مقایسه با الکترولیت غیرمتخلخل می مود میزان رسانایی یونی الکترولیت در مقایسه با الکترولیت نیرمتخلخل می مود میزان رسانایی یونی الکترولیت در مقایسه با الکترولیت نیرمتخلخل میتود کند. علت دوم به نفوذ اجزاء گازی غیرفعال از طریق لایه الکترولیت متخلخل برمی گردد که باعث می شود غلظت اجزاء گازی مورد نیاز برای واکنشهای الکتروشیمیایی (هیدروژن در سمت آند و اکسیژن در سمت کاتد) با کاهش مواجه شود.



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

<b>جدول ۲</b> پارامترهای ورودی						
واحد	مقدار	علامت	عنوان			
ms-1	۵	u <sub>in</sub>	سرعت ورودى			
К	1.77	$\mathbf{T}_{in}$	دمای ورودی			
atm	١	P <sub>0</sub>	فشار کاری			
1	•/۹۲	$x_{0,H_2}$	كسر مولى ورودى هيدروژن			
1	•/٢١	$x_{0,O_2}$	کسر مولی ورودی اکسیژن			
m <sup>2</sup>	11.	κ	نفوذپذیری			
Jmol <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup>	۸/۳۱۴	R	ثابت جهانی گازها			
v	• /Y	$V_{\text{cell}}$	ولتاژ کاری پیل			
Wm-1K-1	٣	ka	ضریب رسانش حرارتی آند			
Wm-1K-1	٣	kc	ضريب رسانش حرارتي كاتد			
Wm-1K-1	٢	k <sub>e</sub>	ضريب رسانش حرارتي الكتروليت			
Sm-1	V147X/DV	σa	ضريب رسانش الكتريكي آند			
Wm-1K-1	5478/24	$\sigma_{c}$	ضريب رسانش الكتريكي كاتد			
Wm-1K-1	•/۶۴	$\sigma_{e}$	ضريب رسانش يوني الكتروليت			
kgm-3	۶۸۷.	$ ho_{\rm a}$	چگالی آند			
kgm-3	۶۵۷.	$\rho_{c}$	چگالی کاتد			
kgm-3	۵۹۰۰	$\rho_{e}$	چگالی الکترولیت			
Jkg <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup>	۵۹۵	Cpa	ظرفیت گرمایی ویژه آند			
Jkg <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup>	۵۷۳	Cpc	ظرفیت گرمایی ویژه کاتد			
Jkg <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup>	8.8	Cpe	ظرفيت گرمايي ويژه الكتروليت			
1	•/۴	ε	تخلخل الكترودها			
1	۰/٣	٤e	تخلخل الكتروليت			
1	۲/۷۵	τ	انحناء			
m	۱/۵×۱۰ <sup>-۶</sup>	$d_p$	قطر روزنه			

٧

Pa.s	$6.162 \times 10^{-6}$ + 1.145 × 10 <sup>-8</sup> T	$\mu_{H_2}$	ويسكوزيته ديناميكي هيدروژن
Pa.s	$1.668 \times 10^{-5}$ + 3.168 × 10 <sup>-8</sup> T	$\mu_{O_2}$	ويسكوزيته ديناميكي اكسيژن
Pa.s	$4.567 \times 10^{-6}$ + 2.209 × 10 <sup>-8</sup> T	$\mu_{H_2O}$	ويسكوزيته ديناميكي أب
Pa.s	$1.435 \times 10^{-5}$ + 2.642 × 10 <sup>-8</sup> T	$\mu_{N_2}$	ويسكوزيته ديناميكي نيتروژن
W/m.K	$\begin{array}{l} 0.08525 \\ + \ 2.964 \times 10^{-4} T \end{array}$	$k_{H_2}$	ضریب رسانش حرارتی هیدروژن
W/m.K	$0.01569 + 5.69 \times 10^{-5}T$	$k_{O_2}$	ضريب رسانش حرارتي اكسيژن
W/m.K	$0.01258 + 5.444 \times 10^{-5}T$	$k_{N_2}$	ضريب رسانش حرارتي نيتروژن
W/m.K	-0.0143 + 9.782 × 10 <sup>-5</sup> 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 می شود توزیع مولفه x شار کلی اجزاء گازی هیدروژن و آب را روی خط گذرنده از سطح مشترک الکترولیت و الکترود کاتد و توزیع مولفه x شار کلی جزء گازی اکسیژن را روی خط گذرنده از سطح مشترک الکترولیت و الکترود آند در ولتاژ کاری ۷ √/۰ و دمای کاری ℃۷۵۰ در شکل ۵ نشان داده می شود. نکته اینکه مقادیر شار کلی جزء گازی اکسیژن منفی بدست آمده که نشان میدهد جزء گازی اکسیژن در خلاف جهت x (به سمت الكترود أند) نفوذ مىكند اما براى مقايسه بهتر تمامى مقادير شار كلى 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 می شود و تا مقدار تقریبی ۰/۰۲۸ kg/m².s افزایش مییابد و پس از آن تا جایی کاهش مییابد که در نزدیکی خروجی مقدار آن منفی می گردد که نشان میدهد جریان اکسیژن برمی گردد و مقدار اندکی اکسیژن از سمت الکترود آند به سمت الکترود کاتد 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 می شود. نتیجه آنکه در پیل سوختی اکسید جامد تمام متخلخل صفحهای با سوخت هیدروژن مقدار نفوذ اكسيژن درون الكتروليت متخلخل نسبت به اجزاء گازي ديگر بيشتر بوده که این عامل می تواند علت اصلی در پایین تر بودن میزان عملکرد این نوع از پیل در مقایسه با نوع معمولی آن باشد.

شکل ۶ توزیع مؤلفه ۷ سرعت را روی محور به موازات ۷ گذرنده از وسط هریک از کانالهای سوخت (آند) و هوا (کاتد) در ولتاژ کاری ۷ //۰ و دمای کاری ۵۲ ۲۵ 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 ۸۳ ۵ در ورودی کانال به مقدار ۷۳/۷ ۳/ در نزدیکی وسط کانال ( کازی از ۶/۴۴mm میرسد در حالیکه سرعت اجزاء گازی در این مقطع از کانال کاتد برابر ۷۳/۶ است. این افزایش سرعت اجزاء گازی درون کانال آند نسبت به کاتد در تمامی مقاطع به جز در نزدیکی خروجی مشاهده می گردد. سرعت اجزاء گازی در خروجی کانل آند برابر ۷/۳۵m/۶ است. دلیل این اتفاق را میتوان به نشت در خروج کانال کاتد برابر ۷/۵۷m/۶ است. دلیل این اتفاق را میتوان به نشت

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 بقاء جرم میبایست مقدار دبی حریان 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 y سرعت را روی محور به موازات x گذرنده از وسط پیل در ولتاژ کاری ۷ ۷/۷ و دمای کاری ℃ ۷۵۰ 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 كانال مشاهده مى گردد. سرعت مخلوط درون محيط متخلخل ناچيز است تا جايي كه درون لايه الكتروليت متخلخل تقريبا به صفر ميرسد اين امر به دليل مقدار نفوذ پذیری بسیار پایین (۲۰-۱۰ – K) محیط متخلخل میباشد که باعث می شود افت فشار دارسی ( $p = \frac{\mu}{\kappa} \nabla p$ ) که با عکس نفوذپذیری رابطه مستقیم دارد مقدار زیادی را داشته باشد. همچنین مشاهده می گردد مقدار ماکزیمم سرعت مخلوط گازی در کانال آند بیشتر از کانال کاتد می باشد. مقدار سرعت ماکزیمم در سمت کانال آند برابر ۷/۸m/s که به میزان ۱۱/۴٪ از مقدار سرعت ماکزیمم در سمت کانال کاتد (Ym/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 y برابر hcell/۴ ،hcell/۴ ،hcell در ولتاژ کاری ۷ ۷/۷ و دمای کاری C۰ ۷۵۰ در شکل ۸ نشان داده می شود. همانگونه که مشاهده میشود مقادیر مولفه x سرعت روی هر سه خط منفی میباشد که نشان میدهد جهت جریان مخلوط گازی خلاف جهت محور x یعنی از سمت الكترود كاتد به سمت الكترود آند مىباشد. از طرفى مقادير اندازه مولفه x سرعت در نزدیکی ورودی پیل بیشتر بوده و هرچه به سمت خروجی میرویم اندازه سرعت کاهش می یابد که این امر نشان از این دارد که نشتی جریان در لبه ورودی پیل از سمت الکترود کاتد به سمت الکترود آند 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 مولفه x سرعت در سطح مشترک بین الکترود آند و کانال گازی اتفاق میافتد و این به دلیل ورود از محیط متخلخل به محیط آزاد میباشد که باعث می شود افت فشار دارسی از معادله جریان حذف شود و سرعت سیال افزایش یابد.



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 ۱۰۵۵۸/۴K میباشد که از مقدار دمای ماکزیمم پیل سوختی اکسید جامد تمام

متخلخل که برابر K ۱۰۳۲/۵ است به میزان ٪۲/۵ 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=۶/۴۴mm 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 می افتد در حالی که با متخلخل شدن لایه الکترولیت این دمای ماکزیمم به محل وسط پیل نزدیک می گردد که نشان میدهد در پیل سوختی اکسید جامد میراخر در همگنتر میباشد.



**شکل ۸** نمودار توزیع مولفه x سرعت مخلوط گازی روی محور گذرنده به موازات x در موقعیتهای y مختلف در ولتاژ ۷۷/۰ و دمای کاری ℃۷۵۰۷





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

انرژی ه

فصلنامه علمى

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 reoxidation 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. Loghin 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, singlechamber 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



**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 ۲۵۴۰ W/m<sup>2</sup> 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 الکترود آند مشاهده شد که جزء گازی اکسیژن نفوذ بیشتری را در مقایسه با دو جزء گازی دیگر داشت که این مقدار نفوذ در نزدیکی ورودي پيل بيشتر بوده و همچنين جهت آن از سمت الكترود كاتد به سمت الکترود 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 نشتی گاز (مخصوصا در نزدیکی ورودی پیل) از سمت الكترود كاتد به سمت الكترود آند مىباشد. مقايسه كانتور دما بين پیلهای سوختی اکسید جامد معمولی و تمام متخلخل نشان داد که در طرح تمام متخلخل توزیع دما همگنتر بوده به گونهای که باعث می شود در شرایط یکسان محل وقوع دمای ماکزیمم را که در طرح معمولی در وسط لایه الكتروليت و منطبق بر خروجي است حوالي مركز پيل تمام متخلخل اتفاق بيافتد.

### 8- مراجع

- 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

فصلنامه

علمي

انرژی

هاي

، تجدیدپذیر و نو- سال نهم ، شماره اول، بهار و تابستان ۱۴۰۱

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 ocide 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 Willey & Sons, Inc. 1993.
- [39]M. Kaviany, Principles of heat transfer in porous media, Second Edition, Springer, 1995.

