



شبیه‌سازی پیل سوختی اکسید جامد (SOFC) تک کاناله و بررسی پارامترهای عملیاتی

ایمان محمدابراهیمی*^۱، محمدحسن ایکانی^۲

۱- گروه مهندسی شیمی، واحد تهران جنوب، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران st_i_mohammadebrahimi@azad.ac.ir

۲- سازمان پژوهش‌های علمی و صنعتی ایران، پژوهشکده فناوری‌های شیمیایی، ایران Mheikani@gmail.com

چکیده

این تکنولوژی که هر روز جایگاهی برجسته‌تر و اهمیتی بیشتر را به خود اختصاص می‌دهد، دارای راندمانی بالا با حداقل ممکن آلودگی است. چنانچه از هیدروژن به عنوان سوخت استفاده گردد، محصولات آن تنها آب و گرما خواهد بود که هیچگونه آلودگی برای محیط زیست ندارند. بازدهی این پیل‌ها به بیش از سه برابر موتورهای احتراق داخلی می‌رسد، بدون صدا بوده و امکان انتقال آن از یک خودرو به خودرو دیگر وجود دارد. در این مقاله با استفاده از نرم افزار COMSOL Multiphysics 5.2 که بر اساس روش المان محدود کار می‌کند شبیه‌سازی انجام شد. اعتبار نتایج عددی با مقایسه آن با داده‌های تجربی نشان داده شد. همچنین در این پروژه ارتقاء عملکرد پیل سوختی اکسید جامد صفحه‌ای براساس بهینه‌سازی پارامترهای عملکردی آن مورد تحقیق و بررسی قرار گرفت. دمای کارکرد به واسطه تأثیر زیادی که بر افت فعال سازی و اهمی دارد از مهم‌ترین و تأثیرگذارترین پارامترها بر عملکرد پیل‌های سوختی اکسید جامد صفحه‌ای به شمار می‌رود و هر پارامتری که بتواند بر دمای پیل سوختی تأثیر بگذارد، خود پارامتری تأثیرگذار بر عملکرد پیل سوختی اکسید جامد صفحه‌ای است.

واژه‌های کلیدی: پیل سوختی اکسید جامد، طراحی صفحه‌ای، مدل سازی، انتقال حرارت تشعشعی، شبیه‌سازی

^۱ کارشناسی ارشد مهندسی شیمی، واحد تهران جنوب، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

^۲ دانشیار سازمان پژوهش‌های علمی و صنعتی ایران، پژوهشکده فناوری‌های شیمیایی، ایران



۱- مقدمه

سوخت‌های فسیلی منابع انرژی رو به زوالی هستند که جامعه رو به توسعه انسانی را در آینده نه چندان دور دچار کمبود سوخت می‌سازد. با رشد سریع جمعیت و رسیدن آن به مرز ۱۰ میلیارد تا ۵۰ سال آینده نیاز به منابع پایان‌ناپذیر سوخت افزایش خواهد یافت. از طرفی وسعت آلودگی ناشی از سوخت‌های فسیلی زندگی در کره خاکی را دچار مشکل ساخته است. در این ارتباط شاهد وضع قوانین سخت زیست محیطی و تخصیص اعتبارهایی برای تحقیق در زمینه انرژی‌های نو بوده ایم. [1]

بحران انرژی و گرم شدن زمین دانشمندان را بر آن داشته تا راهی برای جایگزین کردن سوخت‌های فسیلی و همچنین تحول تکنولوژیک در زمینه نوع مصرف سوخت در ماشین‌ها و نیروگاه‌ها انجام دهند. در راستای این فعالیت پیل سوختی اکسید جامد (SOFC) به دلیل انعطاف‌پذیری در نوع سوخت و راندمان بالای آن یکی از گزینه‌های اصلی برای برون رفت از این بحران جهانی است که نسل بشر را تحدید می‌کند. در این پایان‌نامه مدلسازی سه بعدی پیل سوختی اکسید جامد صفحه‌ای به منظور بهینه‌سازی عملکرد آن پرداخته شده است. شبیه‌سازی شامل جریان موازی و مخالف و بررسی شرایط عملیاتی مختلف و مقایسه مزایا و معایب هر یک می‌باشد. این مقایسه بخشی از بهینه‌سازی است که مصرف‌کننده را در جهت یافتن بهینه کاربرد مورد نظر خود هدایت می‌کند. [2,3]

۲- مدل سازی

۲-۱ مدل سازی پیل‌های سوختی اکسید جامد

امروزه شرکت‌های سازنده پیل سوختی بصورت گسترده‌ای به مدل سازی پیل به عنوان یک فاکتور کلیدی جهت شتاب بخشیدن به ارتقا اجزا و سیستم پیل سوختی و مدیریت ریسک آن می‌نگرند. مدلسازی، موجب افزایش توانایی در انجام تصمیمات اساسی در مورد صحت داده‌های عددی، کمک به کاهش تکیه بر تست‌های فیزیکی، تسریع مشاهده تاثیر تغییرات طراحی، کاهش ریسک و اعمال دقیق تر نظرات مهندسی می‌گردد. [5-7]

۲-۲ فرضیات مسئله

۱. واکنش دهنده‌ها در آند، هیدروژن و بخار آب هستند.
۲. واکنش دهنده‌ها در کاتد، اکسیژن و نیتروژن (هوا) هستند.
۳. جریان در کانال‌ها، آرام، کاملاً توسعه یافته، تراکم‌ناپذیر است.
۴. تمامی سطوح، مات، خاکستری و دیفیوز هستند.
۵. از تأثیر گرادیان دما بر نفوذ صرف نظر شده است.
۶. از ترم اینرسی در معادله بقای مومنتوم برای محیط‌های متخلخل صرف نظر شده است.

۲-۳-۱- معادله پیوستگی: [8]

$$\rho \nabla \cdot u = 0 \quad (1)$$

در این معادله، ρ چگالی سیال و u میدان سرعت آن است.



۲-۳-۲- معادله ناویر-استوکس (برای سیال تراکم ناپذیر) :

$$\rho(u \cdot \nabla)u = \nabla \cdot [\mu(\nabla u + (\nabla u)^T)] - \nabla P \quad (۲)$$

۳-۳-۲- معادله برینکمن (برای سیال تراکم ناپذیر):

$$\frac{\mu}{\kappa} u = \nabla \cdot \left[\frac{1}{\varepsilon} (\mu(\nabla u + (\nabla u)^T)) \right] - \nabla P \quad (۳)$$

κ نفوذپذیری محیط‌های متخلخل نسبت به سیال و ∇P نشان دهنده ی گرادیان فشار سیال است. از ترم اینرسی در معادله برینکمن صرف نظر شده است.

۴-۳-۲- معادله ماکسول-استفان [9-11]

$$\nabla \left[-\rho w_i \sum D_{ij}^{\text{eff}} \left(\nabla x_j + (x_j - w_j) \frac{\nabla P}{P} \right) + \rho w_i u \right] = S_i \quad (۴)$$

در این معادله w کسر جرمی و x کسر مولی جزء i ام و یا z ام است.

ضریب پخش مؤثر جزء i ام در z ام (D_{ij}^{eff}) نیز با استفاده از رابطه *Knudsen* به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$D_{ij}^{\text{eff}} = \frac{\varepsilon}{\tau} \left(\frac{1}{D_{ij}} \times \frac{1}{D_{ik}} \right)^{-1} \quad (۵)$$

$$D_{ij} = 3.16 \times 10^{-8} \frac{T^{1.75}}{P \left(v_i^{1/3} + v_j^{1/3} \right)^2} \left(\frac{1}{M_i} - \frac{1}{M_j} \right)^{1/2} \quad (۶)$$

$$D_{ik} = \frac{97}{2} d_{pore} \sqrt{\frac{T}{M_i}} \quad (۷)$$

$$d_{pore} = \frac{2}{3} \frac{\varepsilon}{1-\varepsilon} d_p \quad (۸)$$

در معادله ی ۵، ε تخلخل و τ tortuosity (پیچش) و در معادله ی ۶، v حجم پخش بر واحد مول و M جرم مولی جزء i ام و یا z ام را نشان می‌دهد. و جمله‌های چشمه (S) برای هر جزء در معادله ماکسول-استفان (معادله ۴) به صورت زیر تعریف می‌شوند: [12]

$$S_{O_2} = \frac{-J_c M_{O_2}}{4F} \quad S_{H_2} = \frac{-J_a M_{H_2}}{2F} \quad S_{H_2O} = \frac{J_a M_{H_2O}}{2F} \quad (۹ و ۱۱)$$

F ثابت فارادی است که مقدار آن برابر با $۹۶۴۸۵/۳$ کولن بر مول و J نیز جریان الکتریکی در واحد حجم می‌باشد.



۲-۳-۵- معادلات قانون اهم^۱

برای بیان اصل بقای بارهای الکتریکی و یونی از معادلات قانون اهم استفاده می‌شود که به صورت زیر تعریف می‌شوند: [13]

$$-\sigma_{el} \nabla^2 \varphi_{el} = S_{el} \quad (12)$$

$$-\sigma_{io} \nabla^2 \varphi_{io} = S_{io} \quad (13)$$

در معادلات ۱۲ و ۱۳، σ رسانایی و φ پتانسیل الکتریکی و یا یونی را نشان می‌دهند و S_{el} و S_{io} جملات چشمه هستند که مقادیر آنها در قسمت‌های مختلف متفاوت است.

۲-۳-۶- معادلات باتلر-ولمر^۲

برای بیان سینتیک الکتروشیمیایی واکنش‌ها در آند و کاتد از معادلات باتلر-ولمر به صورت زیر استفاده شده است: [14,15]

$$j_a = A_{val} j_{0,ref}^{H_2} \left(\frac{C_{H_2}}{C_{H_2,ref}} \right)^{Y_{H_2}} \times \left\{ \exp \left(\eta_a \frac{n\alpha_a F}{RT} \right) - \exp \left(-\eta_a \frac{n(1-\alpha_a)F}{RT} \right) \right\} \quad (14)$$

$$j_c = -A_{vc} j_{0,ref}^{O_2} \left(\frac{C_{O_2}}{C_{O_2,ref}} \right)^{Y_{O_2}} \times \left\{ \exp \left(\eta_c \frac{n\alpha_c F}{RT} \right) - \exp \left(-\eta_c \frac{n(1-\alpha_c)F}{RT} \right) \right\} \quad (15)$$

در معادله ۱۷ و ۱۸ نشان دهنده‌ی دانسیته‌ی جریان الکتریکی مرجع برای هیدروژن و اکسیژن هستند که مقادیر آنها به ترتیب برابر با ۱۳۲۰ و ۴۰۰ آمپر بر متر مربع است. $C_{O_2,ref}$ و $C_{H_2,ref}$ نیز غلظت‌های مرجع هستند که مقادیر آنها به ترتیب برابر با ۱۰/۷۸ و ۲/۳۸ مول بر متر مکعب می‌باشد. α ضریب انتقال بار الکتریکی و n تعداد الکترون شرکت کننده در واکنش الکتروشیمیایی به ازای هر مول واکنش دهنده می‌باشد.

η نیز در معادلات ۱۷ و ۱۸، بیانگر افت اکتیواسیون در آند و کاتد است، این افت به واسطه‌ی انرژی مورد نیاز برای شروع واکنش شیمیایی به وجود می‌آید که به صورت زیر تعریف می‌شوند: [14]

$$\eta_a = \varphi_{el,a} - \varphi_{io,a} - E_{a,eq} \quad (16)$$

$$\eta_c = \varphi_{el,c} - \varphi_{io,c} - E_{c,eq} \quad (17)$$

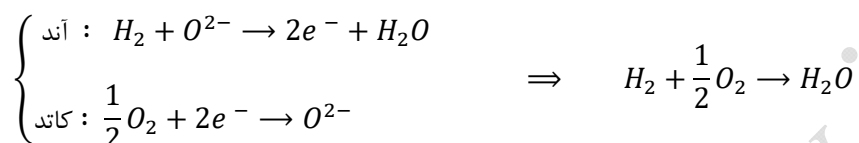
در معادلات بالا φ_{el} و φ_{io} به ترتیب پتانسیل یونی و الکتریکی هستند. $E_{c,eq}$ و $E_{a,eq}$ پتانسیل‌های تعادلی آند و کاتد در حالت بازگشت پذیر می‌باشند، پتانسیل تعادلی کل ($\Delta E_{eq} = E_{c,eq} - E_{a,eq}$) به روش زیر بدست می‌آوریم، که معادله نرنست^۱ نامیده می‌شود: [15]

¹. Ohm's law
². Butler-Volmer



$$\Delta E_{eq} = E_r - \frac{RT}{nF} \ln \left[\prod_i \left(\frac{p_i}{p_0} \right)^{v_i} \right] \quad (18)$$

اگر پیل به صورت بازگشت پذیر عمل کند، کل انرژی آزاد گیبس به انرژی الکتریکی تبدیل خواهد شد، انرژی الکتریکی کار لازم برای حرکت الکترون‌ها در مدار خارجی را مهیا می‌کند. [3]



اگر بازگشت پذیر باشد برای واکنش بالا داریم: ($\Delta G = -237.3 \text{ KJ/mol}$ در دمای 25°C)

$$\Delta G = -nFE_r^0 \rightarrow E_r^0 = -\frac{\Delta G}{nF} \rightarrow E_r^0 = \frac{-237.3}{2 \times 96485} = 1.229 \text{ V} \quad (19)$$

E_r^0 ، ولتاژ بازگشت پذیر در حالت استاندارد می‌باشد، ΔG ، تغییرات انرژی آزاد گیبس در حالت استاندارد می‌باشد، n ، تعداد مولهای الکترون‌های انتقال یافته به ازای یک مول سوخت مصرف شده می‌باشد و F ، ثابت فارادی که برابر با 96485 کولن بر مول است. [13]

$$\Delta E_r = E_r - E_r^0 = \frac{\Delta S}{nF} (T - 298.15) \Rightarrow E_r = E_r^0 + \frac{\Delta S}{nF} (T - 298.15) \quad (20)$$

در نتیجه داریم:

$$\Delta E_{eq} = E_r^0 + \frac{\Delta S}{nF} (T - 298.15) - \frac{RT}{nF} \ln \left(\frac{p_{H_2O}}{p_{O_2}^{1/2} \cdot p_{H_2}} \right) \quad (21)$$

تفاوت ولتاژ واقعی و ولتاژ برگشت‌پذیر به واسطه ی بازگشت ناپذیری‌ها می‌باشد. به دلیل این بازگشت ناپذیری‌ها (افت‌های ولتاژ بازگشت ناپذیر) در طی فرایندها، کار واقعی در پیل سوختی، کمتر از ماکزیمم کار مفید است. ولتاژ واقعی پیل سوختی به این صورت است:

$$E_{cell} = \Delta E_{eq} - \Delta E_{eq,irrev} = \Delta E_{eq} - (\Delta E_{ohmic} + \Delta E_{act}) \quad (23)$$

ΔE_{act} ، افت اکتیواسیون کلی می‌باشد و ΔE_{ohmic} ، افت اهمیک می‌باشد که با قانون اهم تعریف می‌شود:

$$\Delta E_{ohmic} = IR_{ohmic} = iA_{cell} \left(\frac{\delta_{thick}}{\sigma A_{cell}} \right) = i \frac{\delta_{thick}}{\sigma} \quad (24)$$

در این معادله، i چگالی جریان که واحد آن آمپر بر متر مربع می‌باشد. δ_{thick} و σ نیز به ترتیب بیانگر ضخامت لایه الکترولیت و رسانایی این لایه هستند. [14]

¹. Nernst



۲-۳-۷- معادلات انرژی (هدایت^۱، جابجایی^۲ و تشعشع^۳)

معادله انرژی برای مدل به صورت زیر است. این معادله برای تمامی نواحی کاربرد دارد، البته با این فرض که ترم جابجایی فقط برای کانال‌ها در نظر گرفته شده و در محیط‌های متخلخل از آن صرف نظر شده است. [15]

$$\nabla \cdot (-\lambda \nabla T) = S_q - \rho C_p u \cdot \nabla T \quad (25)$$

برای محیط‌های متخلخل از رسانایی حرارتی معادل به صورت زیر استفاده می‌شود:

$$\lambda = (1 - \varepsilon)\lambda_{porous} + \varepsilon\lambda_{fluid} \quad (26)$$

جمله‌ی چشمه در معادله‌ی ۲۷، برای هر قسمت به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$S_q = \sigma_{el} \nabla \varphi_{el} \cdot \nabla \varphi_{el} \quad (27) \quad \Leftarrow \text{برای لایه کلکتور جریان، لایه پخش‌آند و لایه پخش کاتد}$$

$$S_q = \sigma_{io} \nabla \varphi_{io} \cdot \nabla \varphi_{io} \quad (28) \quad \Leftarrow \text{برای لایه الکترولیت}$$

$$S_q = \sigma_{el} \nabla \varphi_{el} \cdot \nabla \varphi_{el} + \sigma_{io} \nabla \varphi_{io} \cdot \nabla \varphi_{io} + \frac{J_a}{nF} T \Delta S + J_a \eta_a \quad (29) \quad \Leftarrow \text{برای لایه واکنشی آند}$$

$$S_q = \sigma_{el} \nabla \varphi_{el} \cdot \nabla \varphi_{el} + \sigma_{io} \nabla \varphi_{io} \cdot \nabla \varphi_{io} + \frac{J_c}{nF} T \Delta S + J_c \eta_c \quad (30) \quad \Leftarrow \text{و برای لایه واکنشی کاتد}$$

معادله انرژی برای دیواره‌های کانال‌های آند و کاتد، شار خالص تشعشعی^۴ (q_r) را شامل می‌شود که به صورت زیر است:

$$n \cdot (-\lambda \nabla T) = h(T_w - T_f) + q_r \quad (31)$$

ضریب انتقال حرارت جابجایی در کانال‌ها (h) با استفاده از عدد Nu که برابر است با $3/0.9$ ، از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$h = \frac{Nu \lambda_{gas}}{D_h} \quad (32)$$

قطر هیدرولیکی برای کانال‌ها نیز به این صورت تعریف می‌شود:

$$D_h = \frac{2W_{CH}H_{CH}}{W_{CH}+H_{CH}} \quad (33)$$

¹. Conduction

². Convection

³. Radiation

⁴. Net radiation heat flux

مجموعه مقالات دهمین همایش ملی انرژی‌های تجدیدپذیر، پاک و کارآمد

دوم دی ماه ۱۳۹۵، تهران، مرکز همایش‌های صدا و سیما

۰۹۱۹۷۵۵۶۴۲۴ - (۰۲۱) ۸۸۶۷۱۶۷۶

مجریان: انجمن علمی مهندسی حرارتی و برودتی ایران و هم‌اندیشان انرژی‌های شیمیایی

ثبت شده در پایگاه استنادی جهان اسلام ISC

www.Renewenergy.ir



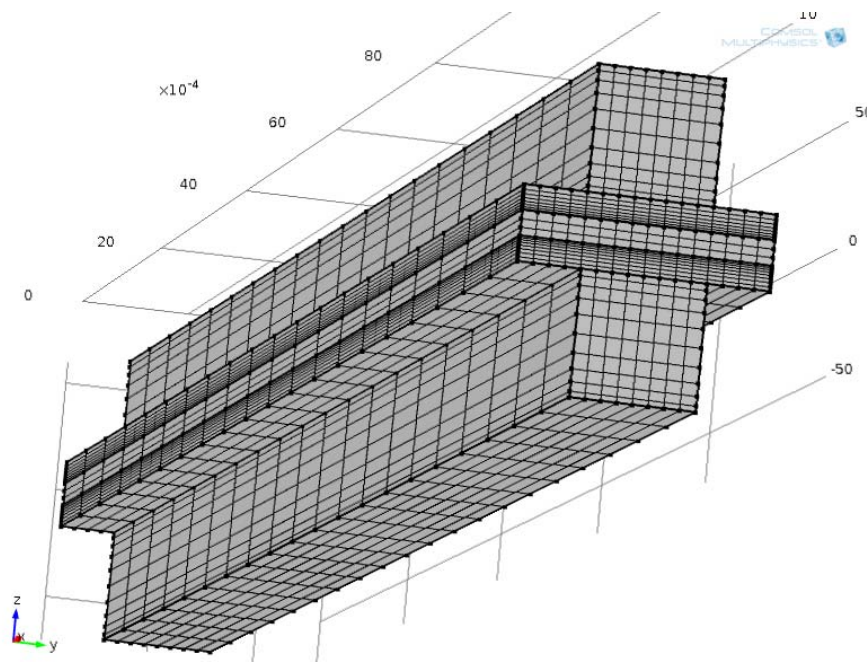
۳-۱- الگوریتم حل با COMSOL

نرم‌افزار COMSOL Multiphysics یک مجموعه کامل شبیه‌سازی است قادر است معادلات دیفرانسیل سیستم‌های غیر خطی را توسط مشتق‌های جزئی به روش المان محدود (FEM) در فضاهای یک، دو و سه بعدی حل نماید. در حالت کلی روند حل بدین صورت است که معادلات ناویر-استوکس و انتقال جهت بدست آوردن جریان جرم، غلظت گونه‌ها و دما حل می‌گردد. سپس ماژول الکتروشیمیایی توزیع جریان محلی را براساس ولتاژ اعمالی و شرایط محلی محاسبه می‌کند. سپس از جریان استفاده می‌گردد تا نرخ احتراق محلی هیدروژن محاسبه گردد. سرعت واکنش شیفیت طوری تنظیم می‌شود تا مطابق فرض شرایط تعادل در هر نقطه از پیل ارضا گردد. بر اساس سرعت واکنش شیفیت و احتراق محلی هیدروژن، سرعت تولید گرما و گونه‌ها برای نرم‌افزار بدست می‌آید. در این حالت غلظت گونه‌ها و توزیع دما بدست می‌آید. در شکل ۲ الگوریتم حل معادلات توسط نرم‌افزار نشان داده شده است. [15,16]

در طراحی یک پیل سوختی اکسید جامد با استفاده از سه فیزیک شبیه‌سازی شده است. فیزیک جریان واکنشی در محیط متخلخل (Reacting Flow in Porous Media) برای محاسبه میدان سرعت و فشار سیال و همچنین غلظت اجزاء شیمیایی، فیزیک توزیع جریان ثانویه (Secondary current distribution) برای محاسبه پتانسیل الکتریکی و یونی و فیزیک انتقال حرارت در سیال (Heat Transfer in Fluids) استفاده شد. [16,20]

۳-۲- مش بندی

با استفاده از شبکه بندی سازمان یافته، تعداد المان‌های شبکه بندی مدل برابر ۷۹۰۴۰ شد. نمایی از نحوه مش بندی طراحی صفحه ای تک کاناله SOFC در شکل ۳ مشاهده می‌شود.



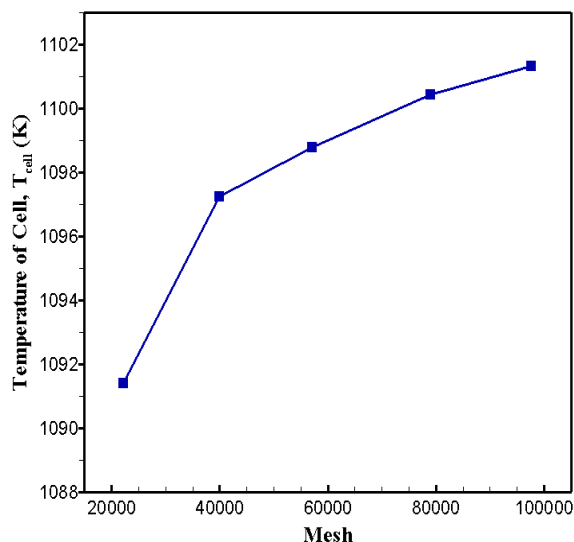
شکل ۳: مش بندی SOFC توسط نرم افزار COMSOL

۴- نتیجه‌گیری و بحث

۴-۱- اعتبار سازی برای مدل

از آنجایی که مدل ریاضی ارائه شده در فصل قبل مبتنی بر یک سری فرضیات بدست آمده است، ضروری است جهت صحت مدل، نتایج بدست آمده با نتایج تجربی مقایسه شود. بدین منظور مدل تجربی راجرز و همکارانش به عنوان مرجع در نظر گرفته شد. [17]

همچنین باید بررسی استقلال مش انجام پذیرد. باید ثابت شود که حل به تعداد مش‌ها وابسته نیست یعنی با افزایش آنها تغییر قابل توجهی در مقادیر بدست آمده حاصل نمی‌گردد. طبق شکل ۴ همان گونه که مشاهده می‌شود دما با تعداد مش‌ها تغییرات زیادی ندارد و به ازای هر ۲۰۰۰۰ مش ۲ k تغییر دما داریم.



شکل ۴: بررسی استقلال مش؛ نمودار دما بر حسب تعداد مش

۴-۱-۱- منحنی پلاریزاسیون:

پلاریزاسیون وضعیتی است که در آن پتانسیل سطح الکتروود از مقدار تعادلی خودش شیف‌ت نموده و منجر به واکنش الکتروشیمیایی می‌گردد. منحنی پلاریزاسیون تغییرات ولتاژ را با دانسیته ی جریان ثبت می‌نماید.

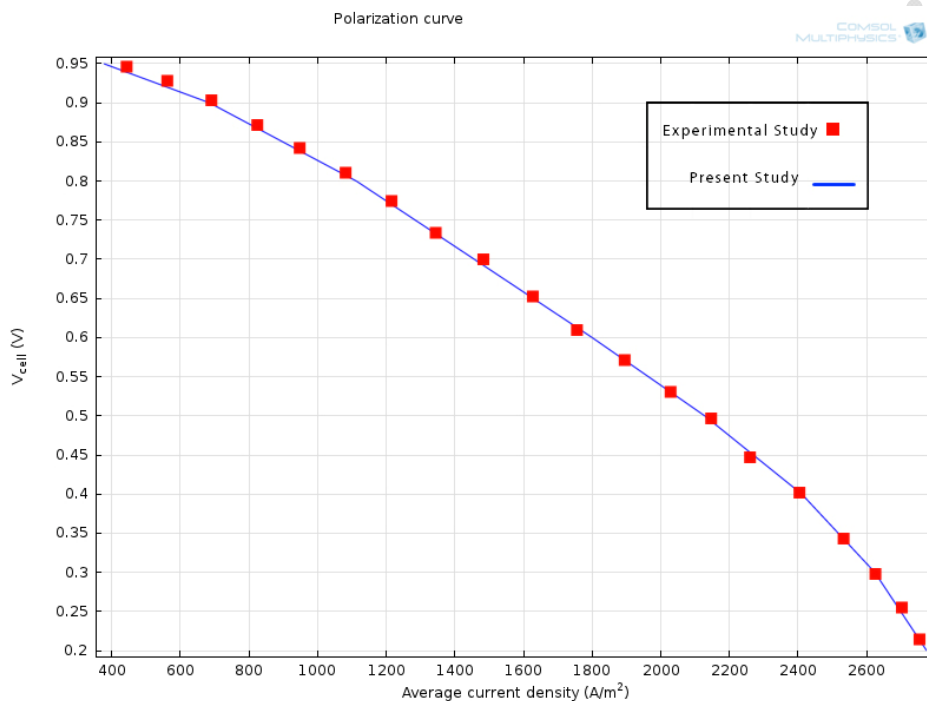
که این داده‌ها برای ارزیابی کارایی پیل‌های سوختی بسیار مهم می‌باشند. [21,22]

یک پیل سوختی با عملکرد خوب می‌بایستی یک منحنی پلاریزاسیون با دانسیته جریان بالا در ولتاژهای بالای سل نشان دهد که بیان‌گر توان خروجی بالاتر می‌باشد. در شکل زیر منحنی پلاریزاسیون بدست آمده از شبیه‌سازی و همچنین منحنی نقطه‌ای حاصل از نتایج آزمایشگاهی رسم شده است و نشان‌دهنده انطباق این دو منحنی دارد. واکنش الکتروشیمیایی در بخش کاتد رخ می‌دهد و در ابتدا در این بخش میزان سوخت مصرفی کم است لذا چگالی جریان پایین است و کم‌کم با مصرف بیشتر سوخت بر میزان چگالی جریان افزوده می‌شود. [19]

همان‌گونه که در شکل ۵ مشاهده می‌شود مدل انتخابی تطبیق بسیار خوبی با نتایج تجربی دارد و این امر می‌تواند سایر نتایج را تایید نماید. نخستین افت در نمودار جریان ولتاژ مربوط به افت فعال‌سازی است. در این ناحیه، بعد از گرفتن جریان و عبور از ولتاژ مدار باز به یکباره ولتاژ افت می‌کند که علت آن ساختار الکتروودها و بخصوص انرژی فعال‌سازی اجزا می‌باشد. دومین افت رخ داده در نمودار جریان ولتاژ مربوط به افت اهمی است. این ناحیه از افت مربوط به تمام مقاومت‌هایی است که بر سر راه عبور یون‌ها وجود دارد. این عوامل عبارتند از مقاومتی که الکتروولیت در برابر عبور یون‌های اکسیژن و آند و کاتد در برابر عبور الکترون ایجاد می‌کنند. همچنین افت اهمی به اتصالات بکار رفته در مجموعه تست نیز وابسته است. این مقاومت به الکتروولیت، الکتروودها، لایه بین الکتروود و الکتروولیت و بین الکتروودها و جمع‌کننده‌های جریان (مقاومت اتصال) بستگی دارد. [23,24]



قسمت پایانی نمودار مربوط به افت غلظتی می باشد. برای انجام واکنش در سطح مشترک آند-کاترولیت، هیدروژن (سوخت) باید از نواحی متخلخل آند عبور کرده و به سطح مشترک آند-کاترولیت برسد، سپس با یون های اکسیژن که از سطح الکترولیت گذشته اند، واکنش داده و آب تشکیل شود. سپس الکترون های حاصل از این واکنش ها از مدار خارجی عبور کرده و به سطح کاتد برسند. بنابراین عبور مولکول های بخار آب و سوخت از آند و اکسیژن از کاتد، با مقاومت هایی روبرو است و همواره باید حالت تعادلی برقرار باشد تا واکنش و انتقال یون در تعادل باشد. [20,25]



شکل ۵: نمودار پلاریزاسیون، مقایسه بین نتایج شبیه سازی عددی و نتایج آزمایشگاهی (تغییرات ولتاژ بر حسب چگالی جریان) [۸۰]

۴-۲- توزیع دانسیته

شکل ۶ توزیع دانسیته ی جریان را روی سطح الکترولیت نشان می دهد. با توجه به دانسیته ی جریان متوسط پیل که $8000 A/m^2$ تعیین شده است دانسیته جریان در ابتدای پیل و در قسمت میانی (ورودی هوا و خروجی سوخت) ماکزیمم و برابر $9504 A/m^2$ می باشد که به تدریج در انتهای پیل (خروجی هوا و ورودی سوخت) تا حدود $7800 A/m^2$ کاهش می یابد. کمترین دانسیته جریان حدود $6970 A/m^2$ در ناحیه کناره های الکتروود مشاهده می شود که به نظر می رسد به دلیل محدود شدن سطح واکنش می باشد. ماکزیمم بودن دانسیته ی جریان در ابتدای پیل به دلیل ورود هیدروژن با غلظت بالا در این ناحیه و پتانسیل الکتروشیمیایی بالاتر (ولتاژ نرنست) می باشد.

مجموعه مقالات دهمین همایش ملی انرژی‌های تجدیدپذیر، پاک و کارآمد

دوم دی ماه ۱۳۹۵، تهران، مرکز همایش‌های صدا و سیما

۰۹۱۹۷۵۵۶۴۲۴ - (۰۲۱) ۸۸۶۷۱۶۷۶

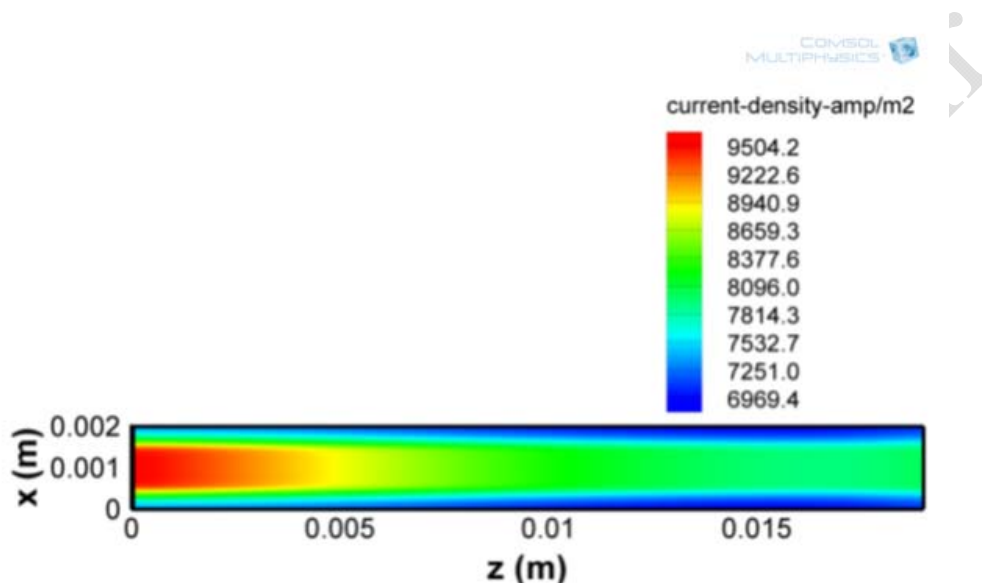
مجریان: انجمن علمی مهندسی حرارتی و برودتی ایران و هم‌اندیشان انرژی‌های نو

ثبت شده در پایگاه استنادی جهان اسلام ISC

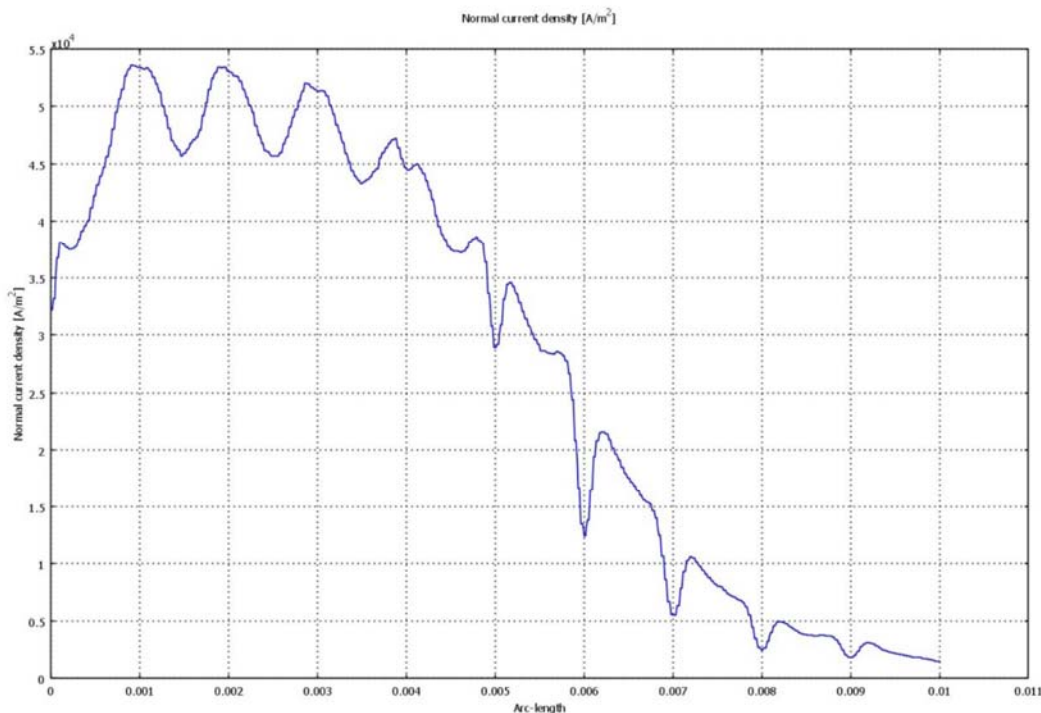
www.Renewenergy.ir



شکل ۷ نمودار چگالی جریان نرمال شده برای ولتاژ ۰/۹۵ V سل در سطح بالایی کاتد را نشان می‌دهد. بر این اساس همان‌طور که در شکل نیز پیداست، ماکزیمم چگالی جریان در بخش ورودی سل و مکانی که غلظت اکسیژن ماکزیمم است، رخ می‌دهد. (مکان‌هایی که شبکه مش زده شده با آند در تماس اند)



شکل ۶: توزیع دانسیته جریان پیل روی سطح الکترود

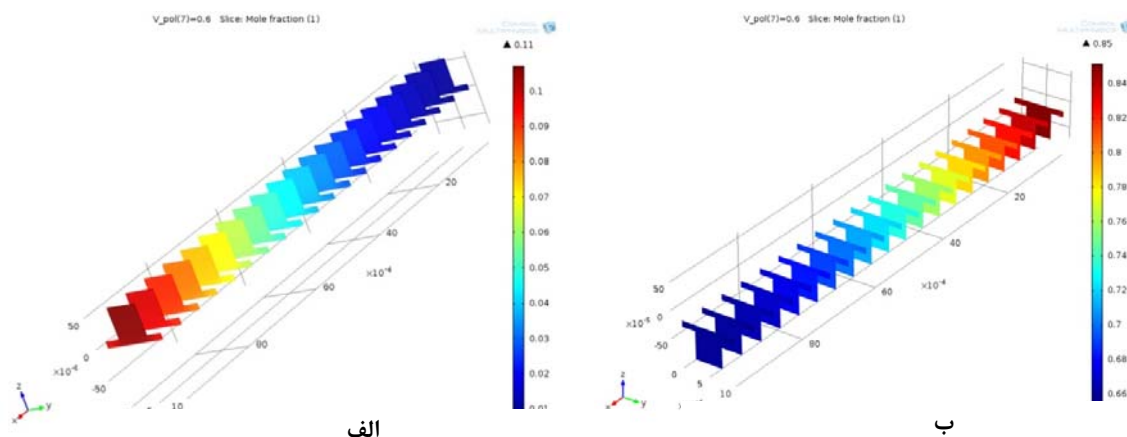


شکل ۷: نمودار چگالی جریان در ولتاژهای مختلف (۰/۸ V - ۰/۵۰ V)

۴-۳- توزیع کسر مولی اکسیژن و هیدروژن

در شکل (۸ الف) در ولتاژ ۰/۶ ولت، کسر مولی اکسیژن کاهش قابل توجهی داشته است. که نشان دهنده مصرف اکسیژن برای انجام واکنش در کاتد می باشد. حداکثر میزان کسر مولی در وردی (قرمز پررنگ) و حداقل در خروجی (آبی پررنگ) می باشد. وظیفه کاتد جدا کردن اکسیژن از هوا و تبدیل اکسیژن به یون O^{2-} برای انتقال در طول الکترولیت می باشد. به همین سبب شاهد کاهش کسر مولی اکسیژن هستیم.

در شکل (۸ ب) بیان گرفت غلظت هیدروژن در طول کانال و لایه واکنشی (در راستای X) می باشد. بر اثر واکنش‌های الکتروشیمیایی که در طول کانال رخ می دهد، هیدروژن مصرف شده و آب حاصل از اکسیداسیون هیدروژن به کانال منتقل شده و از طریق کانال سوخت به خارج منتقل می گردد. از این رو در طول کانال غلظت هیدروژن کاهش یافته و درصد مولی آب در مخلوط گاز کانال سوخت افزایش می یابد.



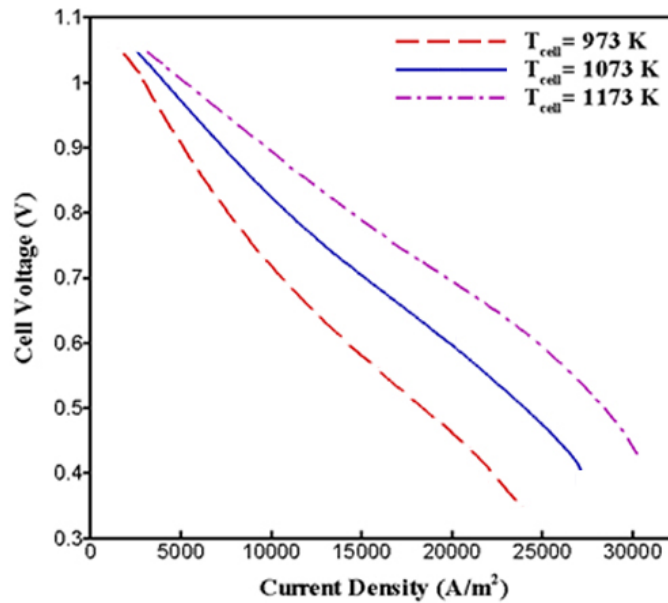
شکل ۸: الف) کسر مولی اکسیژن در کانال هوا و لایه نفوذ کاتد در شرایط عملیاتی ۰/۶ ولت
 ب) کسر مولی هیدروژن در کانال سوخت و لایه نفوذ آنود در شرایط عملیاتی ۰/۶ ولت

۴-۵- تاثیر دما

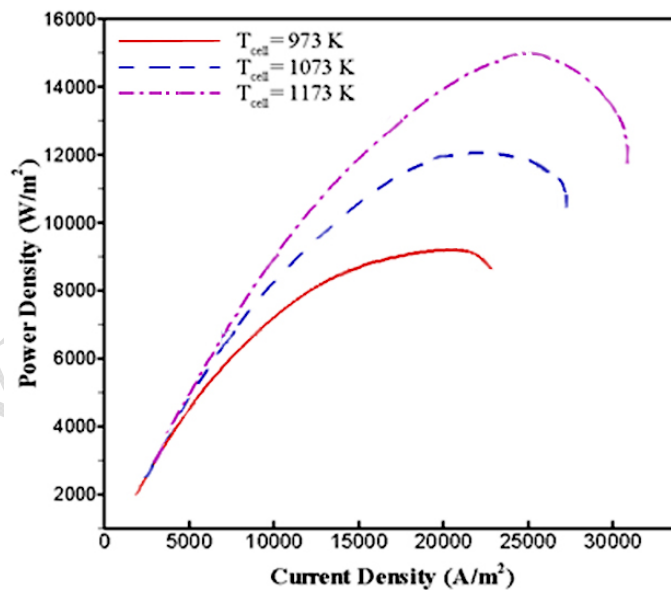
همان گونه که در شکل ۹ مشاهده می‌شود در سه دمای عملیاتی نمودار ولتاژ پیل بر حسب چگالی جریان رسم شده است. در یک ولتاژ ثابت با افزایش دما شاهد افزایش چشم‌گیر چگالی جریان هستیم.

نمودار ۱۰ مربوط به دانسیته توان بر حسب چگالی جریان می‌باشد. و همان گونه که مشاهده می‌شود در یک چگالی جریان ثابت با افزایش دما دانسیته توان پیل به شدت افزایش پیدا می‌کند و لذا افزایش دما در افزایش توان پیل نقش مثبتی دارد.

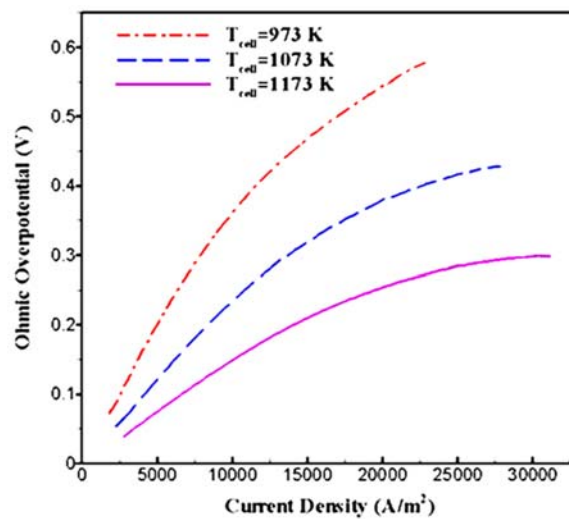
همچنین در نمودار ۱۱ مشاهده می‌شود که افت اهمی با افزایش دما در چگالی ثابت جریان کاهش می‌یابد و این به معنی کاهش یک مقاومت مهم می‌باشد. و در حقیقت عامل اصلی در افزایش کارایی پیل و توان خروجی همین کاهش افت اهمی و فعال سازی می‌باشد. و لذا دمای کارکرد به واسطه تأثیر زیادی که بر افت فعال سازی و اهمی دارد از مهم‌ترین و تأثیرگذارترین پارامترها بر عملکرد پیل‌های سوختی اکسید جامد صفحه‌ای به شمار می‌رود و هر پارامتری که بتواند بر دمای پیل سوختی تأثیر بگذارد، خود پارامتری تأثیرگذار بر عملکرد پیل سوختی اکسید جامد صفحه‌ای است.



شکل ۹: نمودار ولتاژ سل بر حسب چگالی جریان در سه دمای مختلف



شکل ۱۰: نمودار دانسیته توان بر حسب چگالی جریان در سه دمای مختلف



شکل ۱۱: نمودار افت ولتاژ اهمی بر حسب چگالی جریان در سه دمای مختلف

۴-۵- منحنی توان:

منحنی توان میزان واتنی را که می‌توان از این پیل را بدست آورد را نشان می‌دهد. توان با این فرمول $P=V.I$ در واقع از منحنی پلاریزاسیون حاصل می‌شود و با ضرب ولتاژ در جریان حاصل می‌شود. این منحنی در شکل ۹ نمایش داده شده است. بیشترین توان تولیدی این پیل در ولتاژ ۰٫۷ ولت و شرایط عملیاتی مشخص برابر 1040 W/M^2 است.

مجموعه مقالات دهمین همایش ملی انرژی‌های تجدیدپذیر، پاک و کارآمد

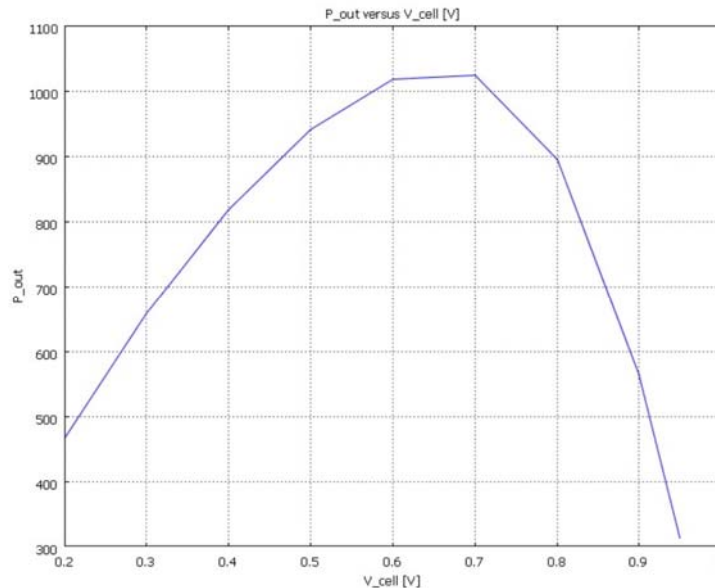
دوم دی ماه ۱۳۹۵، تهران، مرکز همایش‌های صدا و سیما

۰۹۱۹۷۵۵۶۴۲۴ - (۰۲۱) ۸۸۶۷۱۶۷۶

مجریان: انجمن علمی مهندسی حرارتی و برودتی ایران و هم‌اندیشان انرژی کیمیا

ثبت شده در پایگاه استنادی جهان اسلام ISC

www.Renewenergy.ir



شکل ۱۲: منحنی توان خروجی پیل در ولتاژ متوسط

مراجع

- [1] Bove R., Ubertini S., Modeling Solid Oxide Fuel Cells, Springer, Cleveland, 2008.
- [2] Mollayi Y., Ghassemi M., Numerical Analysis of Output Characteristics of a Tubular SOFC with Different fuel Compositions and Mass Flow Rates, Electrochemical Society Trans., 7 (2007), 1119-1125.
- [3] B. Sunden, M. Faghri, Transport Phenomena in Fuel Cells, WITPRESS, 2005.
- [4] Recknagle, K.P., Williford, R.E., Chick, L.A., Rector, D.R., Khaleel, M.A., "Three dimensional thermo-fluid electrochemical modeling of planar SOFC stacks," Journal of Power Sources, No. 113, pp. 109-114, 2003.
- [5] M. M. Hussain, X. Li, I. Dincer, Journal of Power Sources, 189(2009), 916-28.
- [6] Y. Ji, K. Yuan, J.N. Chung, Y.C. Chen, Journal of Power Sources, 161(2006), 380-91.
- [7] J. H. Myung, H. J. Ko, J. J. Lee, S. H. Hyun, International Journal of Electrochemical Science, 6 (2011), 1617-1629.
- [8] COMSOL Multiphysics tutorial guide. Current density distribution in Solid Oxide Fuel Cell; 2012.
- [9] B. Todd, J. B. Young, Journal of Power Sources, 110(2002), 186-200.
- [10] J. H. Nam, D. H. Jeon, Electrochim Acta, 51(2006), 3446-60.
- [11] E. Fuller, P. Schettler, J. Giddings, Industrial & Engineering Chemistry, 58(1966), 18-27.
- [12] Ni M, Leung MKH, Leung DYC. Parametric study of solid fuel cell performance. Energy Convers Manage 2007;48(5):1525-35.
- [13] Huangfu Y, Gao F, Abbas-Turki A, Bouquain D, Miraoui A. Transient dynamic and modeling parameter sensitivity analysis of 1D solid oxide fuel cell model. Energy Convers Manage 2013;71:172-85.
- [14] B. Sunden, M. Faghri, Transport Phenomena in Fuel Cells, WITPRESS, 2005.

مجموعه مقالات دهمین همایش ملی انرژی‌های تجدیدپذیر، پاک و کارآمد

دوم دی ماه ۱۳۹۵، تهران، مرکز همایش‌های صدا و سیما

۰۹۱۹۷۵۵۶۴۲۴ - (۰۲۱) ۸۸۶۷۱۶۷۶

مجریان: انجمن علمی مهندسی حرارتی و برودتی ایران و هم‌اندیشان انرژی‌های نو

تبت شده در پایگاه استنادی جهان اسلام ISC

www.Renewenergy.ir



- [15] H. Y. Zhu, R. J. Kee, *Journal of the Electrochemical Society*, 155(2008), B715-B29.
- [16] Yakabe H, Ogiwara T, Hishinuma M, Yasuda I. 3-D model calculation for planar SOFC. *J Power Sources* 2001;102:144-54.
- [17] Abhishek R, Tariq S , Numerical investigation of the effect of operating parameters on a planar solid oxide fuel cell, *Energy Conversion and Management* 90 (2015) 138-145.
- [18] Lee YD, Ahn KY, Morosuk T, Tsatsaronis G. Environmental impact assessment of a solid-oxide fuel-cell-based combined-heat-and-power-generation system. *Energy* 2015;79(0):455e66.
- [19] Aguiar P, Adjiman CS, Brandon NP. Anode-supported intermediate temperature direct internal reforming solid oxide fuel cell. I: model-based steady-state performance. *J Power Sour* 2004;138(1e2):120e36.
- [20] COMSOL. *Chemical engineering module users guide*. 2013.
- [21] Autissier N, Larrain D, Van Herle J, Favrat D. CFD simulation tool for solid oxide fuel cells. *J Power Sources* 2004;131:313e9.
- [22] Andersson M, Yuan J, Sunde'n B. SOFC modeling considering electrochemical reactions at the active three phase boundaries. *Int J Heat Mass Transfer* 2012;55:773e88.
- [23] Andersson KMJ. *Solid oxide fuel cell modeling at the cell scale*. PhD thesis. Lund University; 2011.
- [24] Andreassi L., Toro C., Ubertini S., 2007. Modeling carbon monoxide direct oxidation in solid oxide fuel cells. In *Proceedings ASME European Fuel Cell Technology and Applications Conference, EFC2007-39057*.
- [25] Subhash C Singhal and Kevin Kendall, *High-temperature Solid Oxide Fuel Cells: Fundamentals, Design and Applications*, Elsevier Science; 1st edition, 2003.