



## تحلیل عملکرد پایا یک پیل سوختی اکسید جامد دو محفظه‌ای صفحه‌ای یکسو با سوخت هیدروژن

مجید کامور<sup>1</sup>

1 - استادیار، گروه مهندسی مکانیک، واحد پرند، دانشگاه آزاد اسلامی، پرند، ایران  
\* پرنده، صندوق پستی 3761396361، [mkamvar@mail.kntu.ac.ir](mailto:mkamvar@mail.kntu.ac.ir)

### چکیده

در مطالعه حاضر عملکرد یک پیل سوختی اکسید جامد دو محفظه‌ای صفحه‌ای یکسو با سوخت هیدروژن تحت شرایط پایا با استفاده از روش دینامیک سیالات محاسباتی بصورت عددی بررسی می‌شود. ناحیه محاسباتی از محفظه‌های گازی آند و کاتد، الکتروود آند، الکتروود کاتد و الکتروولیت تشکیل می‌شود. سوخت هیدروژن با کسر مولی 0.97 در محفظه گازی آند وارد می‌شود و در سوی دیگر هوای خشک با کسر مولی 0.21 اکسیژن و 0.79 نیتروژن وارد محفظه گازی کاتد می‌گردد. همچنین لایه‌های کاتالیست به صورت یک ناحیه در نظر گرفته می‌شوند که واکنش‌های الکتروشیمیایی در آنجا اتفاق می‌افتد. معادلات غیرخطی کاملاً کوپل شده حاکم شامل معادلات بقاء جرم، اندازه حرکت، گونه شیمیایی، انرژی و بار الکتریکی و یونی می‌باشد که در یک نرم‌افزار تجارتي فرمول‌بندی شده و با استفاده از روش المان محدود حل می‌شوند. جهت نشان دادن صحت مدل، نتایج حاصل از مدل با نتایج یک مدل تجربی مشابه مقایسه می‌گردد. در پایان تحلیل عملکرد پیل شامل توزیع سرعت، دما و غلظت تمامی گونه‌های گازی مورد بحث قرار می‌گیرد. نتایج نشان می‌دهد که ماکزیمم دما در سمت الکتروود آند اتفاق می‌افتد که دلیل آن بیشتر بودن مقدار گرمایش اهمی در این بخش از پیل می‌باشد. بعلاوه، نشان داده می‌شود که در ولتاژ کاری 0.7 ولت مقدار 15.6 درصد از هیدروژن درون پیل مصرف شده است و همچنین و بخش اعظمی از هیدروژن بصورت مصرف نشده از پیل خارج می‌گردد در حالی که میزان کاهش اکسیژن موجود در هوا هنگام خروج از کانال برابر 9.6 درصد می‌باشد.

کلیدواژگان

پیل سوختی اکسید جامد، دو محفظه‌ای، هیدروژن، روش المان محدود، پایا

## Steady state performance analysis of a co-flow planar dual chamber solid oxide fuel cell with hydrogen fuel

Majid Kamvar<sup>1</sup>

1- Department of Mechanical Engineering, Parand Branch, Islamic Azad University, Parand, Iran.  
\* P.O.B. 3761396361 Parand, Iran, [mkamvar@mail.kntu.ac.ir](mailto:mkamvar@mail.kntu.ac.ir)

### Abstract

In this study, performance of a co-flow dual chamber solid oxide fuel cell with hydrogen fuel under steady state conditions using computational fluid dynamics method is numerically investigated. The cell geometry is considered two dimensional and the computational domain consists of anode and cathode gas chamber, anode electrode, cathode electrode and electrolyte. Hydrogen fuel is fed into the anode gas chamber with initial mole fraction of 0.97 and on the other side dry air with 21% O<sub>2</sub> and 79% N<sub>2</sub> is inserted to the cathode gas chamber. The fully coupled nonlinear governing equations including mass, momentum, energy, species and charge conservation equations are formulated in a commercial software and solved using finite elements method. To show the model accuracy, the current model results are compared with a similar experimental model. Finally, the cell performance analysis including velocity, temperature and concentration of all species is discussed. The results show that the maximum temperature is occurred at anode side. This is due to higher amount of ohm heating at this portion of cell. Furthermore, it is shown that 15.6% of hydrogen is consumed in the cell at 0.7V and large amount of hydrogen leaves the cell without any use. However, the reduction amount of oxygen at the cathode channel outlet is 9.6%.

### Keywords

Solid Oxide Fuel Cell, Dual Chamber, Hydrogen, Finite Element Method, Steady State

### ۱- مقدمه

ترک در آن را ندارد [10,11]. اما این نوع طرح از پیل به دلیل آنکه اکسند و سوخت با هم وارد پیل می‌شوند از نظر ایمنی خطرناک بوده و همچنین توان تولیدی از پیل هم به شدت افت پیدا می‌کند.

اخیراً در سال 2019، ایلباس و کوموک<sup>1</sup> یک پیل سوختی اکسید جامد را به طور عددی بررسی کرد [12]. آن‌ها نشان دادند که با افزایش مقدار دمای کاری، عملکرد پیل افزایش می‌یابد. مطالعات آنها نشان داد با افزایش فشار از 1 اتمسفر به 5 اتمسفر چگالی جریان 20 درصد و توان متوسط پیل 22 درصد افزایش یافت. همچنین زمانی که دمای کاری از 600 درجه‌ی سلسیوس به 1000 درجه رسید، چگالی جریان 53 درصد و متوسط توان پیل 56 درصد افزایش یافت.

در مطالعه دیگری در سال 2019 تیکیز و همکارانش<sup>2</sup> یک مدل سه بعدی را به صورت عددی و آزمایشگاهی بررسی کردند [13]. در تحلیل آزمایشگاهی، مقادیر دبی حجمی واکنش دهنده‌ها از 0.12 لیتر بر دقیقه تا 2 لیتر بر دقیقه و دمای پیل از 700 تا 800 درجه‌ی سلسیوس متغیر بود. در این آزمایش، بیشترین راندمان در 800 درجه‌ی سلسیوس حاصل شد که نشان می‌دهد با افزایش دمای کاری، عملکرد پیل نیز بهتر می‌شود. آن‌ها همچنین اثبات کردند که با افزایش فشار، به علت افزایش فشار جزئی و ضریب نفوذ واکنش دهنده‌های

پیل‌های سوختی، فناوری جدیدی برای تولید انرژی هستند که بدون ایجاد آلودگی‌های زیست محیطی و صوتی، از ترکیب مستقیم بین سوخت و اکسیدکننده، انرژی الکتریکی با بازدهی بالا تولید می‌کنند [1]. از میان انواع پیل‌های سوختی موجود، پیل‌های سوختی اکسید جامد به دلیل بازدهی بالای آن‌ها و تنوع در انتخاب سوخت توجه بیشتری را به خود جلب کرده است [2-9]. همانطور که می‌دانیم، پیل‌های سوختی اکسید جامد در محدوده دمای بالا (500-1000°C) کار می‌کنند که این محدوده دمایی بالا مشکلاتی از جمله فرسایش مواد و نشتی گاز را به دنبال دارد. نشتی گاز مانع اصلی پیل‌های سوختی اکسید جامد برای تجارتي کردن آن‌ها می‌باشد [2,4,5]. لذا در این حوزه نیاز به مطالعات بیشتری می‌باشد تا مدیریت انتقال انرژی به نحو بهتری صورت پذیرد.

هدف بسیاری از تحقیقات انجام شده در حوزه پیل‌های سوختی اکسید جامد بهبود عملکرد آن می‌باشد. یک راه عملی برای غلبه بر مشکل بالا بودن دمای کاری آن ارائه طرح تک محفظه‌ای پیل سوختی اکسید جامد می‌باشد که در آن مخلوط سوخت و اکسند به یکباره از طریق یک محفظه گازی به سمت پیل تغذیه می‌شود که دیگر مشکلات آب‌بندی و توقف عملکرد پیل در اثر بروز

<sup>2</sup> Ismet Tikiz et al

<sup>1</sup> Ilbas and Kumuk



جدول ۱ داده‌های هندسی

Table 1 Geometrical data

عنوان	علامت	مقدار (mm)
طول پیل	$L_{cell}$	10
عرض محفظه گازی آند و کاتد	$W_{ch}$	0.5
ضخامت الکتروود آند	$t_a$	1
ضخامت لایه کاتالیستی آند	$t_{arz}$	0.02
ضخامت الکتروولیت	$t_e$	0.01
ضخامت لایه کاتالیستی کاتد	$t_{crz}$	0.45
ضخامت الکتروود کاتد	$t_c$	0.02



واکنش کاهش اکسیژن در الکتروود کاتد:



در ادامه فرمول‌بندی ریاضی معادلات حاکم به تفکیک به همراه شرایط مرزی آورده می‌شود.

## ۲-۱- بقای جرم و اندازه حرکت خطی

از آنجا که در کانال گازی و الکترودهای متخلخل جریان گونه‌های گازی وجود دارد. معادله بقای جرم یا همان پیوستگی در معادله (3) نوشته شده است:

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

که در آن  $\rho$  چگالی مخلوط،  $u$  بردار سرعت می‌باشد. معادله اندازه حرکت خطی حاکم بر الکترودهای متخلخل براساس قانون دارسی در معادله (4) بیان می‌شود [11]:

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

که در آن  $p$  فشار،  $\mu$  لزجت دینامیکی،  $\varepsilon$  تخلخل،  $g$  بردار شتاب،  $\kappa$  نفوذپذیری، و  $B$  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 (4) کافی است تخلخل را برابر مقدار واحد و نفوذپذیری را برابر بینهایت قرار دهیم در این صورت معادله اندازه حرکت خطی حاکم در محفظه گازی بصورت معادله (5) بازنویسی می‌شود [11]:

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

## 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 (6) نوشته می‌شود [16]:

گازی، راندمان نیز افزایش یافته و مقاومت انتقال جرم کاهش می‌یابد. همچنین مشاهده کردند که افزایش دبی حجمی اکسیژن و نیتروژن، تاثیر چشمگیری روی عملکرد پیل ندارد و موثرترین پارامترها، دمای پیل و دبی حجمی هیدروژن در نظر گرفته می‌شود. هدف از مطالعه حاضر این است که ابتدا مقایسه نتایج خروجی از پیل با نتایج تجربی راجرز و همکارانش [14] انجام می‌گیرد و سپس تحلیل جامعی از عملکرد پیل شامل نحوه توزیع گونه‌های مختلف گازی، مقدار دمای ماکزیمم پیل و محل وقوع آن، نحوه آرایش جریان سیال در داخل محفظه‌ها و بحث و نتیجه‌گیری کامل صورت می‌پذیرد.

## ۲- تعریف مسئله

شکل 1 نمای شماتیکی از مسئله را نشان می‌دهد. مطابق شکل سوخت هیدروژن به همراه بخار آب از طریق محفظه گازی آند و در سمت دیگر هوای خشک بصورت ترکیبی از 21 درصد اکسیژن و 79 درصد نیتروژن از طریق محفظه گازی کاتد به درون پیل تغذیه می‌گردد. در بین این دو محفظه گازی لایه‌های الکتروود آند، الکتروولیت و الکتروود کاتد قرار گرفته است. به دلیل وجود لایه غیرقابل نفوذ الکتروولیت اجازه اختلاط جریان سوخت و هوا داده نمی‌شود.

در مطالعات قبلی نشان داده شده است که احتمال وجود واکنشهای الکتروشیمیایی از عمق ده میکرون تا عمق پنجاه میکرون از سطح مشترک الکتروود و الکتروولیت وجود دارد که لایه کاتالیستی نام دارد [15]. از آنجا که در مطالعه حاضر ضخامت الکتروودها بیشتر از 50 میکرون می‌باشد هر لایه الکتروود 2 لایه در نظر گرفته می‌شود که 20 میکرون آن را لایه کاتالیستی تشکیل می‌دهد. لذا پیل مورد نظر از 7 لایه تشکیل شده است: محفظه گازی آند، الکتروود آند از جنس اکسید نیکل، لایه کاتالیستی الکتروود آند از جنس اکسید نیکل-زیرکونیای پایدار شده با ایتریا<sup>2</sup>، الکتروولیت از جنس زیرکونیای پایدار شده با ایتریا - لایه کاتالیستی الکتروود کاتد از جنس لانتانیم استرانسیم منگنیت<sup>3</sup>-زیرکونیای پایدار شده با ایتریا، الکتروود کاتد از جنس لانتانیم استرانسیم منگنیت و در نهایت محفظه گازی کاتد می‌باشد.

جدول 1 پارامترهای هندسی مسئله را نشان می‌دهد. فرض می‌شود تمامی گونه‌های گازی رفتار گاز ایده‌آل دارند و جریان پایا، دو بعدی، تراکم‌پذیر و آرام می‌باشد. تمامی خواص سیال تابع دما در نظر گرفته شده و الکتروولیت به عنوان یک جسم کاملاً جامد غیرقابل نفوذ در برابر اجزاء گازی فرض می‌شود که تنها هدایت یونی دارد و عایق در برابر جریان الکترون می‌باشد.

واکنش‌های شیمیایی موجود در الکتروودها به تفکیک در معادلات (1) و (2) آورده می‌شود:

واکنش اکسایش هیدروژن در الکتروود آند:

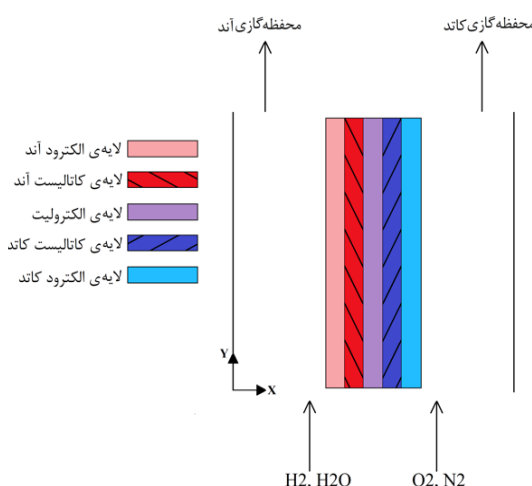


Fig. 1 The schematic view of the problem

شکل 1 نمای شماتیکی از مسئله

<sup>3</sup> LSM

<sup>1</sup> Catalyst layer

<sup>2</sup> YSZ



$$j_{io,c} = -j_{el,c} = A_{v,c} J_{0,ref}^{O_2} \left( \frac{C_{O_2}}{C_{O_2,ref}} \right)^{\gamma_{O_2}} \quad (14)$$

که در آن  $A_v$  مساحت سطح مؤثر الکتروشیمیایی بر واحد حجم الکتروشیمیایی،  $J_{0,ref}^{O_2}$  و  $J_{0,ref}^{H_2}$  به ترتیب چگالی جریانهای انتقالی مرجع برای الکترودهای آند و کاتد می باشد.  $\gamma_{O_2}$  و  $\gamma_{H_2}$  به ترتیب مرتبه واکنش برای اکسایش هیدروژن و کاهش اکسیژن در غلظت های مرجع  $C_{O_2,ref}$  و  $C_{H_2,ref}$  می باشد.  $\alpha$  ضریب انتقال بار می باشد که مقدار آن بین صفر تا یک می باشد که عموماً برابر 0.5 در نظر گرفته می شود و  $F$  ثابت فارادی می باشد که برابر 96487 C/mol است. زیرنویس های  $a$  و  $c$  به ترتیب اشاره به الکترودهای آند و کاتد دارد.  $\eta_{act}$  اضافه ولتاژ فعال سازی می باشد که مقدار آن در سمت الکترودهای آند و کاتد به ترتیب با استفاده از رابطه های (15) و (16) محاسبه می شود:

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

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

که در آن  $V_{oc}$  ولتاژ مدار باز پیل می باشد که به شدت تابع دمای کاری پیل می باشد و مقدار آن با استفاده از رابطه (17) بدست می آید [17]:

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

#### ۴-۲- بقای انرژی

معادله بقای انرژی حاکم بر کل ناحیه بصورت معادله (18) نوشته می شود [11]:

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

که در آن  $C_p$  گرمای ویژه،  $k$  ضریب هدایت حرارتی و  $Q$  عبارت چشمه انرژی می باشد که درون پیل ایجاد می شود. جهت نحوه فرمول بندی عبارت چشمه انرژی خواننده به مراجع [8, 11, 18, 19] ارجاع داده می شوند. به منظور لحاظ کردن اثر انتقال حرارت درون الکترودهای متخلخل از روابط اصلاحی (19) و (20) به ترتیب برای محاسبه ظرفیت گرمایی ویژه مؤثر در واحد حجم الکتروشیمیایی  $(\rho C_p)_{eff}$  و ضریب رسانش مؤثر  $(k_{eff})$  استفاده می شود [18]:

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

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

که در آن  $f$  و  $s$  به ترتیب اشاره به فاز سیال و جامد دارد.

#### ۵-۲- شرایط مرزی

در ورودی های محفظه سرعت، فشار، دما و همچنین کسر مولی گونه های گازی معلوم می باشد. روی دیواره های محفظه ها شرط مرزی عدم لغزش حاکم بوده و شرط مرزی عایق روی این مرز برای فیزیک انرژی فرض می شود. از آنجا که امکان نفوذ گونه های گازی در دیواره محفظه وجود ندارد شرط مرزی عایق برای فیزیک انتقال جرم اعمال می شود. همانطور که فرض شد الکترولیت یک ماده جامد غیر قابل نفوذ می باشد که در برابر انتقال الکترون عایق می باشد لذا شرط مرزی عایق برای فیزیک های انتقال جرم و الکترون به ترتیب روی تمامی مرزهای الکترولیت و روی مرزهای سطح مشترک الکترولیت و الکترودها حاکم

$$\nabla \cdot j_i + \rho(u \cdot \nabla) \omega_i = R_i \quad (6)$$

که در آن  $j_i$  بردار شار جرمی نسبی،  $\omega_i$  کسر جرمی و  $R_i$  عبارت چشمه یا چاه مربوط به تولید یا مصرف جزء  $i$ ام می باشد. با استفاده از روابط استفان ماکسول<sup>۱</sup> برای سیستم های چند جزئی، عبارت بردار شار جرمی بصورت معادله (7) می تواند نوشته شود [16]:

$$j_i = -\rho \omega_i \sum_k D_{ik} \nabla c_k \quad (7)$$

که در آن  $d_k$  نیروی محرک برای نفوذ جزء  $i$ ام در یک مخلوط ایده آل می باشد و  $D_{ik}$  ضریب نفوذ فیک<sup>۲</sup> در سیستم چند جزئی می باشد و مقدار آن با استفاده از رابطه (8) تعیین می شود [16]:

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

که در آن  $T$  دما،  $M$  جرم مولکولی گاز،  $\sigma$  و  $\Omega$  به ترتیب مشخصه طولی<sup>۳</sup> بر حسب انگستروم و انتگرال برخورد نفوذی<sup>۴</sup> می باشد که نحوه محاسبه آن ها در مرجع [16] تشریح شده است. جهت به حساب آوردن مقاومت انتقال جرم در الکترودهای متخلخل و همچنین تأثیر برخورد مولکول ها به جداره دیواره ها ضریب نفوذ فیک با رابطه (9) اصلاح می شود [11]:

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

که در آن  $D_{DGM,ik}^{eff}$  ضریب نفوذ مؤثر مدل گاز-داسی<sup>۵</sup>،  $\tau$  میزان انحنا و  $D_{KN,ik}$  ضریب نفوذ نادسن<sup>۶</sup> می باشد. از رابطه تئوری سنتیک گازها برای محاسبه ضریب نفوذ نادسن در معادله (10) استفاده می شود [11]:

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

که در آن  $d_p$  قطر مؤثر روزنه در محیط متخلخل و  $R$  ثابت جهانی گازها می باشد.

#### ۳-۲- بقای بار

با اعمال قانون اهم، معادلات بقای بار الکترونی و یونی به ترتیب در معادلات (11) و (12) نوشته می شود [11]:

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

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

که در آن  $\sigma_{el(i)}$  و  $\phi_{el(i)}$  به ترتیب رسانایی الکتریکی (یونی) و پتانسیل الکتریکی (یونی) می باشد.  $j_{el}$  و  $j_{io}$  چشمه یا چاه مربوط به تولید یا مصرف به ترتیب الکترون و یون می باشد. مطابق واکنشهای الکتروشیمیایی (1) و (2) تولید و یا مصرف بارهای الکترونی و یونی در لایه های کاتالیستی آند و کاتد اتفاق می افتد که مقادیر آن ها با استفاده از معادله باتلر-ولمر<sup>۷</sup> به ترتیب در معادلات (13) و (14) فرمول بندی می شوند:

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

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

<sup>6</sup> Knudsen diffusivity

<sup>7</sup> Butler-Volmer equation

<sup>1</sup> Maxwell-Stefan

<sup>2</sup> Fick's diffusivity

<sup>3</sup> Characteristic length

<sup>4</sup> Collision diffusion integral

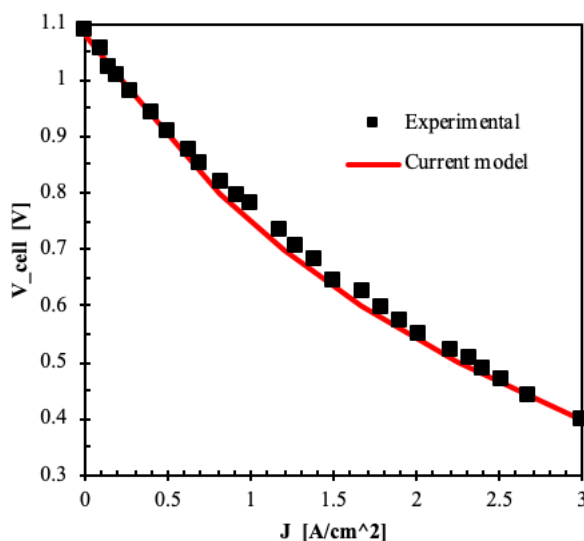


Fig. 3 The current model accuracy compared to Rogers' data [14]  
شکل ۳ دقت مدل حاضر در مقایسه با داده‌های راجرز [14]

## ۲-۲- تحلیل عملکرد پیل

در این قسمت عملکرد یک پیل سوختی اکسید جامد دو محفظه‌ای صفحه‌ای یکسو مورد بررسی قرار می‌گیرد. در ورودی محفظه گازی آند کسرهای مولی هیدر و اکسیژن به ترتیب برابر 0.14 و 0.07 می‌باشد و مقدار دمای ورودی برابر 1073 K ثابت می‌باشد. پارامترهای ورودی مسئله در جدول 2 فهرست شده است. رابطه وابسته به دما تمامی خواص فیزیکی گونه‌های گازی از مرجع [20] استخراج شده است.

یکی از مهمترین نمودارهای عملکردی پیل نمودار چگالی توان الکتریکی تولیدی توسط پیل بر حسب چگالی جریان خارج شده از آن می‌باشد که در شکل 4 نشان داده شده است. یکی از داده‌های مهمی که از این نمودار استخراج می‌شود استخراج مقدار ماکزیمم توان الکتریکی تولیدی توسط پیل می‌باشد. همانطور که از نمودار مشخص است مقدار ماکزیمم توان الکتریکی در مطالعه حاضر برابر 1.14015W/cm<sup>2</sup> می‌باشد که در چگالی جریان 2.2803A/cm<sup>2</sup> حاصل شده است.

شکل‌های 5 و 6 به ترتیب توزیع سرعت و چگالی سیال را در راستای محور گذرنده از مرکز کانال آند در ولتاژهای کاری 0.8 V، 0.7 و 0.6 نشان می‌دهند. مشاهده می‌شود که در ابتدای کانال سرعت سیال ناگهان از مقدار 5m/s تا مقدار تقریباً 7.1m/s افزایش پیدا می‌کند که این موضوع به دلیل رشد لایه مرزی از دو سمت کانال می‌باشد و برای آنکه شرط عدم لغزش در دیواره کانال حفظ شود و قانون پایستگی جرم برقرار بماند سرعت سیال در مرکز کانال با افزایش ابتدایی روبرو می‌شود پس از آنکه لایه‌های مرزی به یکدیگر رسیدند و ناحیه جریان کاملاً توسعه یافته گردید انتظار می‌رفت سرعت سیال ثابت بماند اما مشاهده می‌گردد از موقعیت x=0.6mm به بعد سرعت سیال تا مقدار 6.6m/s در خروجی کانال کاهش می‌یابد. این موضوع به دلیل کاهش چگالی سیال می‌باشد که باعث می‌شود عبارت نیروی اینرسی در معادله ناوراستوکس افزایش یافته و سرعت سیال کاهش یابد. نکته قابل تأمل تأثیر ولتاژ کاری پیل بر روی پروفیل سرعت است که مشاهده می‌شود که میزان این تأثیر در نزدیکی خروجی کانال و در ولتاژ کاری 0.8V بیشتر از دو ولتاژ کاری دیگر است به نحوی که باعث شده است سرعت سیال در ولتاژ کاری 0.8V به میزان تقریباً 0.1m/s سرعت سیال بیشتر از دو ولتاژ کاری دیگر باشد. این به دلیل میزان مصرف جزء گازی هیدروژن در سمت الکترود آند می‌باشد که باعث می‌شود چگالی سیال در خروجی در ولتاژ کاری 0.8V به میزان قابل توجهی نسبت به دو مقدار ولتاژ کاری دیگر کمتر باشد.

می‌باشد. همانند دیواره‌های محفظه، در مرزهای الکترولیت نیز شرط مرزی عدم لغزش صادق است. جهت ایجاد جریان الکترود از سمت الکترود کاتد به سمت الکترود آند، مقدار ولتاژ کاری پیل روی مرز مشترک الکترود کاتد با محفظه خود و مقدار ولتاژ صفر روی مرز مشترک الکترود آند با محفظه خود اعمال می‌شود. شرط مرزی پیوستگی برای مابقی مرزها حاکم است.

## ۲-۶- فرایند حل عددی

تمامی معادلات حاکم غیرخطی شامل معادلات بقای جرم، اندازه حرکت خطی، گونه‌های شیمیایی، انرژی و بارهای الکتریکی و یونی در محیط نرم‌افزار کامسول 5.2 فرمول‌بندی می‌شود که یک نرم‌افزار تجارتمی‌باشد که از روش المان محدود برای حل معادلات مولتی فیزیک کاملاً 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 المان‌های بیشتری در این نواحی وجود داشته باشد. تعداد کل المان‌های مثلثی برابر 32917 می‌باشد که در شکل 2 نشان داده شده است. از المان‌های خطی برای تمامی معادلات استفاده شده است. میزان خطای نصبی برای حل برابر 10<sup>-6</sup> در نظر گرفته می‌شود. مدت زمان حل مسئله برای اسکن تمامی ولتاژها از مقدار 1.1 ولت تا 0.4 ولت با گام 0.1- ولت با استفاده از لپ تاپ با مشخصات سی پی یو corei7 و رم 16 گیگابایت برابر 14 دقیقه 47 ثانیه می‌باشد.

## ۳- نتایج و بحث

### ۱-۱- اعتبارسنجی مدل

جهت نشان دادن صحت نتایج حاصل از مدل فرایند اعتبارسنجی انجام می‌شود. برای این منظور نتایج حاضر با نتایج راجرز<sup>۱</sup> و همکارانش [14] مقایسه می‌شود. نکته اینکه تمامی پارامترهای هندسی و فیزیکی یکسان با مقاله راجرز و همکارانش در نظر گرفته می‌شود.

شکل 3 مقایسه‌ای را بین نتایج حاصل از مدل حاضر و نتایج راجرز و همکارانش را نشان می‌دهد. در شکل 3 محور عمودی بیانگر ولتاژ کاری پیل و محور افقی چگالی جریان الکتریکی می‌باشد. جهت نشان دادن میزان تطابق بین نتایج حاصل از مدل حاضر با نتایج آزمایشگاهی راجرز و همکارانش از پارامتر ریشه متوسط مربعات خطا<sup>۲</sup> 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 0.99356 بدست آمد که نشان می‌دهد تطابق بسیار خوبی بین نتایج حاصل از مدل و نتایج راجرز و همکارانش وجود دارد. نکته آنکه برای اعتبارسنجی نتایج حاصل از مدل، یک پارامتر تطابقی در معادله (4) وارد شد که در نهایت در مقدار برابر 25 به تطابق حاضر رسیده شد.

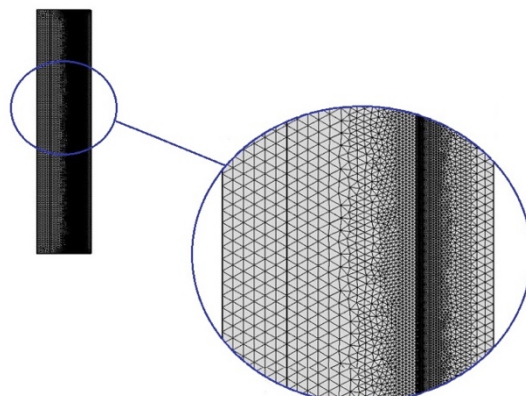


Fig. 2 The mesh structure

شکل ۲ ساختار مش

<sup>2</sup> Root Mean Square

<sup>1</sup> Rogers

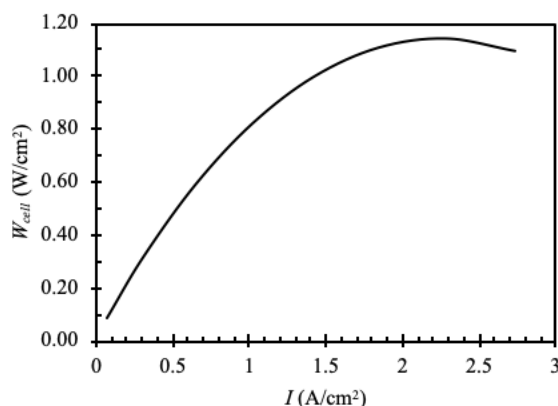


Fig. 4 The cell performance plot

شکل ۴ نمودار عملکردی پیل

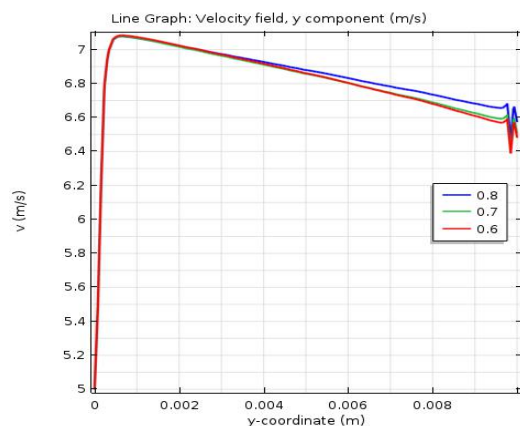


Fig. 5 Velocity distribution along with an axis passing through the center of the anode channel at three working voltages: 0.6, 0.7 and 0.8V.  
شکل ۵ توزیع سرعت در راستای محور گذرنده از مرکز کانال آند در سه مقدار ولتاژ 0.6, 0.7, 0.8V کاری

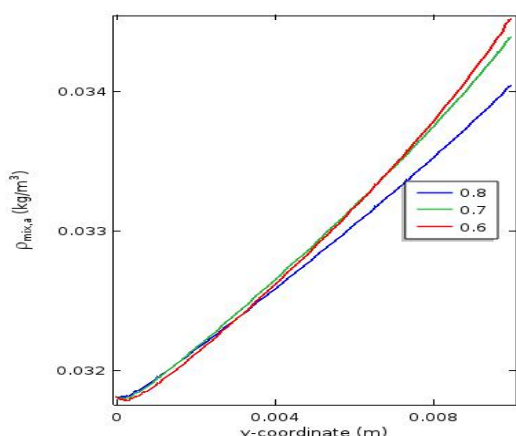


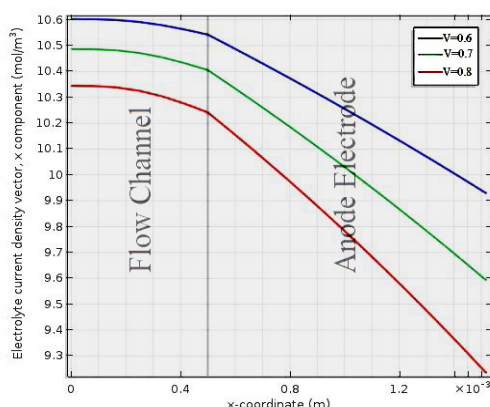
Fig. 6 Fluid density distribution along with an axis passing through the center of the anode channel at three working voltages: 0.6, 0.7 and 0.8V.  
شکل ۶ توزیع چگالی سیال در راستای محور گذرنده از مرکز کانال آند در سه مقدار ولتاژ کاری 0.6, 0.7, 0.8V

شکل های 7 و 8 به ترتیب توزیع سرعت و چگالی سیال را در راستای محور گذرنده از مرکز کانال را در ولتاژهای کاری 0.6, 0.7 و 0.8 V نشان می دهند. در ابتدای ورودی کانال تا موقعیت  $x=0.6\text{mm}$  رفتار توزیع سرعت سیال مشابه با سمت آند می باشد که سرعت سیال با افزایش همراه است هرچند این مقدار افزایش سرعت کمی بیشتر از سمت آند تا مقدار  $7.3\text{m/s}$  اتفاق افتاده است اما پس از آن برخلاف سمت آند سرعت سیال مجدداً افزایش پیدا می کند ولی نحوه تغییرات آن نسبت به سمت کاتود آند با شیب ملایمتری می باشد تا جایی که سرعت سیال در خروجی کانال در ولتاژ کاری  $0.6\text{V}$  به مقدار  $7.6\text{m/s}$  رسیده است. این رفتار متفاوت در توزیع چگالی سیال نیز مشاهده می گردد. چگالی سیال هر چه به سمت خروجی کانال نزدیک می شویم کاهش می یابد که باعث می شود مقدار نیروی اینرسی در معادله ناویراستوکس کمتر شده در نتیجه سرعت سیال افزایش می یابد. تاثیر ولتاژ کاری بر پروفیل سرعت و چگالی سیال در سمت کانال کاتد نیز کاملاً متفاوت از سمت کانال آند می باشد به نحوی که با کاهش ولتاژ کاری میزان کاهش چگالی سیال در طول کانال با شیب بیشتری بوده و باعث می شود سرعت سیال نیز با شیب بیشتری کاهش یابد.

Table 2 Input parameters

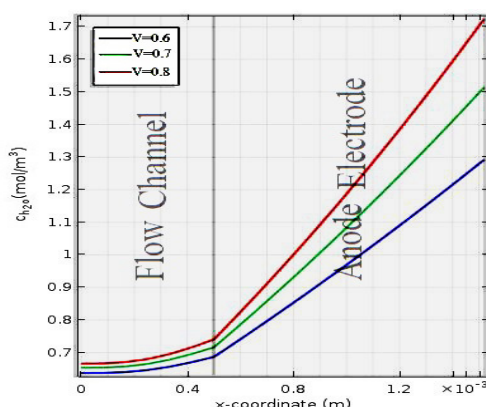
جدول ۲ پارامترهای ورودی			
عنوان	علامت	مقدار	واحد
سرعت ورودی	$u_{in}$	5	$\text{ms}^{-1}$
فشار کاری	$P_0$	1	atm
نفوذپذیری	$\kappa$	$10^{-13}$	$\text{m}^2$
ثابت جهانی گازها	$R$	8.314	$\text{Jmol}^{-1}\text{K}^{-1}$
ولتاژ کاری پیل	$V_{cell}$	0.7	V
ضریب رسانش حرارتی آند	$k_a$	3	$\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$
ضریب رسانش حرارتی کاتد	$k_c$	3	$\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$
ضریب رسانش حرارتی الکترولیت	$k_e$	2	$\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$
ضریب رسانش الکتریکی آند	$\sigma_a$	71428.57	$\text{Sm}^{-1}$
ضریب رسانش الکتریکی کاتد	$\sigma_c$	5376.34	$\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$
ضریب رسانش یونی الکترولیت	$\sigma_e$	0.64	$\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$
چگالی آند	$\rho_a$	6870	$\text{kgm}^{-3}$
چگالی کاتد	$\rho_c$	6570	$\text{kgm}^{-3}$
چگالی الکترولیت	$\rho_e$	5900	$\text{kgm}^{-3}$
ظرفیت گرمایی ویژه آند	$Cp_a$	595	$\text{Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}$
ظرفیت گرمایی ویژه کاتد	$Cp_c$	573	$\text{Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}$
ظرفیت گرمایی ویژه الکترولیت	$Cp_e$	606	$\text{Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}$
تخلخل	$\varepsilon$	0.375	-
انحناء	$\tau$	2.75	-
قطر روزنه	$d_p$	$1.5 \times 10^{-6}$	m
مساحت سطح مخصوص موثر	$A_v$	$4.0312 \times 10^5$	$\text{m}^2\text{m}^{-3}$





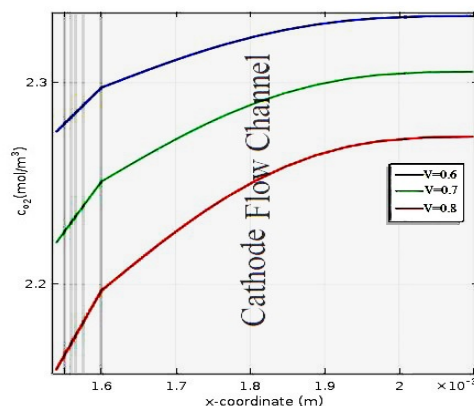
**Fig. 9** Hydrogen molar concentration distribution within the cell at three working voltages: 0.6, 0.7 and 0.8V.

شکل ۹ توزیع غلظت مولی هیدروژن درون پیل در سه مقدار ولتاژ کاری 0.6, 0.7, 0.8V



**Fig. 10** Water molar concentration distribution within the cell at three working voltages: 0.6, 0.7 and 0.8V.

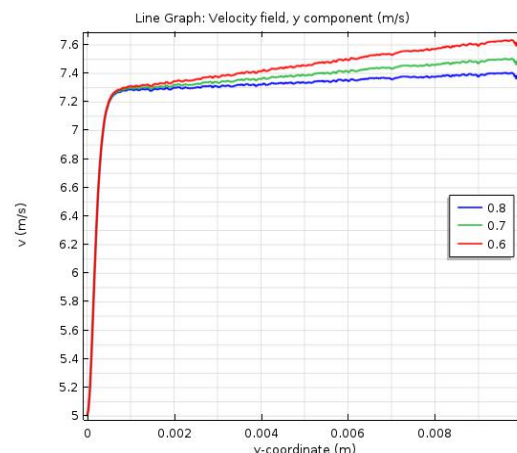
شکل ۱۰ توزیع غلظت مولی آب درون پیل در سه مقدار ولتاژ کاری 0.6, 0.7, 0.8V



**Fig. 11** Oxygen molar concentration distribution within the cell at three working voltages: 0.6, 0.7 and 0.8V.

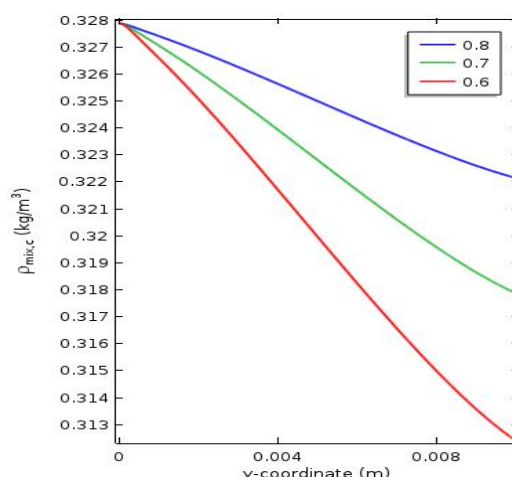
شکل ۱۱ توزیع غلظت مولی اکسیژن در سه مقدار ولتاژ کاری 0.6, 0.7, 0.8V

شکل‌های ۱۲ و ۱۳ به ترتیب مقدار متوسط کسر مولی هیدروژن و اکسیژن را در خروجی از کانال‌های آند و کاتد نشان می‌دهند. اطلاع از مقدار گونه‌های



**Fig. 7** Velocity distribution along with an axis passing through the center of the cathode channel at three working voltages: 0.6, 0.7 and 0.8V.

شکل ۷ توزیع سرعت در راستای محور گذرنده از مرکز کانال کاتد در سه مقدار ولتاژ کاری 0.6, 0.7, 0.8V



**Fig. 8** Fluid density distribution along with an axis passing through the center of the cathode channel at three working voltages: 0.6, 0.7 and 0.8V.

شکل ۸ توزیع سیال در راستای محور گذرنده از مرکز کانال کاتد در سه مقدار ولتاژ کاری 0.6, 0.7, 0.8V

شکل‌های ۹-۱۱ توزیع غلظت گونه‌های گازی به ترتیب هیدروژن و آب در سمت آند و اکسیژن در سمت الکترود کاتد را در راستای محور موازی با جهت  $x$  گذرنده از مرکز پیل نشان می‌دهند. همانطور که انتظار می‌رفت به دلیل واکنش‌های الکتروشیمیایی (۱) و (۲) می‌بایست غلظت هیدروژن در سمت الکترود آند و اکسیژن در سمت الکترود کاتد کاهش یابد اما غلظت آب در سمت الکترود آند به دلیل تولید آب بواسطه واکنش (۱) افزایش یابد. اما نکته حائز اهمیت روند تغییرات غلظت این می‌باشد که هرچه به سمت ناحیه کاتالیستی نزدیک می‌شویم روند تغییرات غلظت گونه‌های شیمیایی شیب بیشتری می‌گیرد. در سمت الکترود آند مشاهده می‌گردد که در ولتاژ کاری 0.7V غلظت مولی هیدروژن از مقدار حدودی  $10.5 \text{ mol/m}^3$  در محل دیواره کانال آند تا مقدار  $9.6 \text{ mol/m}^3$  در محل سطح مشترک الکترود آند و الکترولیت کاهش پیدا کرده است در حالیکه غلظت آب در لبه دیواره کانال آند برابر تقریباً  $0.65 \text{ mol/m}^3$  است  $1.61 \text{ mol/m}^3$  در مرز مشترک الکترود آند و الکترولیت افزایش پیدا می‌کند. در سمت الکترود آند رفتار اکسیژن همانند هیدروژن در سمت آند می‌باشد بطوریکه غلظت مولی اکسیژن در همین ولتاژ کاری از مقدار  $2.22 \text{ mol/m}^3$  تا مقدار  $2.305 \text{ mol/m}^3$  در مرز الکترود کاتد و الکترولیت کاهش می‌یابد.

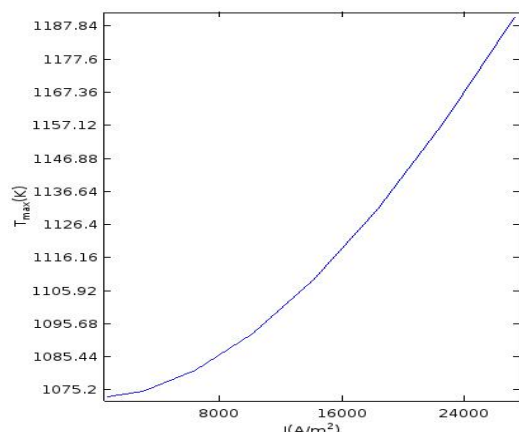


Fig. 14 Maximum cell temperature distribution vs. the cell current density

شکل ۱۴ توزیع دمای ماکزیمم پیل بر حسب چگالی جریان پیل

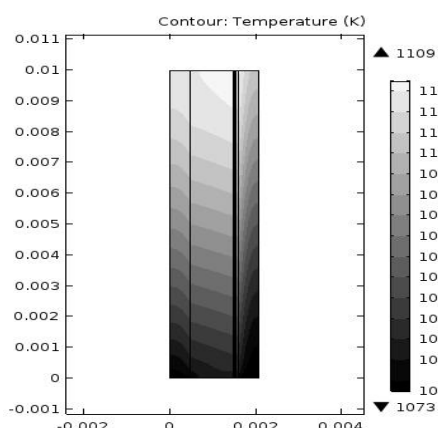


Fig. 15 Cell temperature contour at working voltage 0.7V

شکل ۱۵ کانتور دمای پیل در ولتاژ کاری 0.7V

#### ۴- جمع بندی و نتیجه گیری

تحلیل عملکرد یک پیل سوختی اکسید جامد دو محفظه‌ای با استفاده از یک مدل دو بعدی عددی بر پایه روش المان محدود انجام شد. نتایج شامل توزیع سرعت، دما و غلظت گونه‌های مختلف گازی بود. ماکزیمم چگالی توان الکتریکی برابر  $1.14015 \text{ W/cm}^2$  در چگالی جریان  $2.2803 \text{ A/cm}^2$  بدست آمد. همچنین نتایج نشان داد سرعت سیال در ورودی کانال‌های آند و کاتد ابتدا افزایش پیدا کرد اما پس از آن رفتار سرعت سیال در دو سمت کانال‌های آند و کاتد متفاوت بود به نحوی که در سمت کانال آند سرعت سیال تا مقدار  $6.6 \text{ m/s}$  در خروجی کانال کاهش پیدا کرد در حالی که در سمت الکتروکاتد سرعت سیال تا مقدار  $7.6 \text{ m/s}$  در خروجی کانال افزایش یافت. همچنین نتایج مقدار مصرف سوخت هیدروژن را برابر  $15.6$  درصد نشان داد در حالی که میزان کاهش اکسیژن موجود در هوا هنگام خروج از کانال برابر  $9.6$  درصد بود. بعلاوه نتایج نشان داد که در حین عملکرد پایای پیل دمای آن تا مقدار ماکزیمم  $1191 \text{ K}$  بالا می‌رود که محل وقوع آن در نزدیکی خروجی پیل و در سمت الکتروکاتد بود.

#### ۵- فهرست علائم

$A_v$	سطح مؤثر الکتروشیمیایی بر واحد حجم ( $\text{m}^2 \cdot \text{m}^{-3}$ )
$B$	نیروی خارجی بر واحد حجم ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-2}$ )
$C$	غلظت مولی ( $\text{mol} \cdot \text{m}^{-3}$ )
$C_p$	گرمای ویژه در فشار ثابت ( $\text{kg}^2 \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ )

گازی هیدروژن و اکسیژن در خروجی از کانال در هنگام استک کردن پیل حائز اهمیت است. همینطور معیاری است از میزان مصرف سوخت پیل که نشان می‌دهد پیل سوختی مورد نظر تا چه میزان در جذب سوخت و تبدیل آن به جریان الکتریسیته موفق بوده است. همانطور که مشاهده می‌شود کسر مولی هیدروژن از مقدار  $0.95$  در ورودی تا میزان  $0.80159$  در چگالی جریان الکتریکی  $27328 \text{ A/m}^2$  رسیده است که نشان می‌دهد مقدار  $15.6$  درصد مقدار سوخت هیدروژن مصرف شده است. در سمت کانال کاتد کسر مولی اکسیژن از مقدار  $0.21$  در ورودی تا مقدار  $0.18977$  در خروجی از کانال در چگالی جریان الکتریکی کاهش یافته است که نشان می‌دهد مقدار  $9.6$  درصد از اکسیژن هوا کاسته شده است که در مقایسه با سمت آند کمتر است.

شکل ۱۴ مقدار دمای ماکزیمم پیل را بر حسب چگالی جریان الکتریکی نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که با افزایش چگالی جریان الکتریکی مقدار دمای ماکزیمم پیل نیز افزایش می‌یابد و این به دلیل افزایش میزان گرمای اهمی است که در پیل اتفاق می‌افتد. یکی از معایب دمای بالای پیل‌های سوختی اکسید جامد علی‌الخصوص در نوع صفحه‌ای ایجاد ترک در اجزاء پیل در اثر بروز تنش‌های حرارتی می‌باشد لذا اطلاع از مقدار دمای ماکزیمم پیل کمک بسیار در ساخت اجزاء پیل می‌کند. در مطالعه حاضر مشاهده می‌شود تحت شرایط کاری مقدار دمای ماکزیمم پیل برابر  $1191 \text{ K}$  می‌باشد. برای اطلاع از محل وقوع دمای ماکزیمم نمودار کانتور دما در ولتاژ کاری  $0.7 \text{ V}$  در شکل ۱۵ نشان داده می‌شود. مشاهده می‌شود که بیشترین دما در سمت خروجی پیل بیشتر در سمت الکتروکاتد اتفاق افتاده است و این به دلیل انتقال حرارت جابجایی می‌باشد که باعث می‌شود تجمع گونه‌های گازی با دمای بالا در این ناحیه وجود داشته باشد.

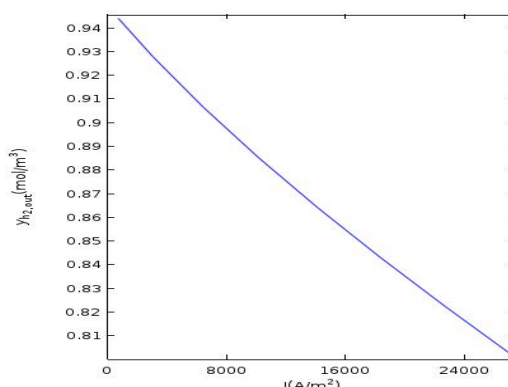


Fig. 12 Average hydrogen mole fraction distribution in outlet vs. the cell current density

شکل ۱۲ توزیع کسر مولی متوسط هیدروژن در خروجی از کانال آند بر حسب چگالی جریان پیل

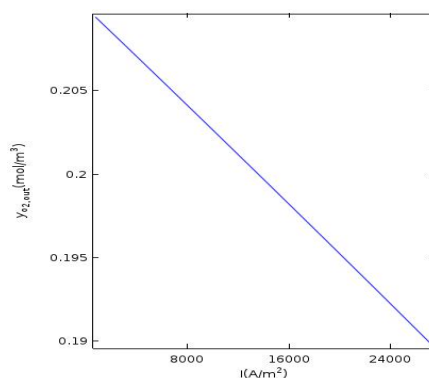


Fig. 13 Average oxygen mole fraction distribution in outlet vs. the cell current density

شکل ۱۳ توزیع کسر مولی متوسط اکسیژن در خروجی از کانال کاتد بر حسب چگالی جریان پیل



- [5] 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.
- [6] N. Akhtar, S. P. Decent, D. Loghin and K. Kendall, Mixed-reactant, micro-tubular solid oxide fuel cells: An experimental study, *Journal of Power Sources*, Vol. 193, pp. 39-48, 2009.
- [7] M. Liu, X. Qi, Zh. Lu and Q. Meng, Effect of flow geometry on anode-supported single chamber SOFCs arrayed as V-shape, *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 38, pp. 1976-1982, 2013.
- [8] M. Andersson, J. Yuan and B. Sundén, SOFC modeling considering hydrogen and carbon monoxide as electrochemical reactants, *Journal of Power Sources*, Vol. 232, pp. 42-54, 2013.
- [9] K. Wang, D. Hissel, M.C. Pera, N. Steiner, D. Marra, M. Sorrentino, C. Pianese, M. Monteverde, P. Cardone and J. Saarinen, A Review on solid oxide fuel cell models, *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 36, pp. 7212-7228, 2011.
- [10] M. Kamvar, M. Ghassemi, Performance analysis of coplanar single chamber solid oxide fuel cell with oxygen-methane-nitrogen mixture under steady state conditions, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 17, No. 1, pp. 31-38, 2017 (in Persian).
- [11] 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.
- [12] M. Ilbas, B. Kumuk, Numerical modelling of a cathode-supported solid oxide fuel cell (SOFC) in comparison with an electrolyte-supported model, *Journal of the Energy Institute*, Vol. 92, pp. 682-692, 2019.
- [13] I. Tikiz, I. Taymaz and H. Pehlivan, CFD modeling and experimental validation of cell performance in a 3-D planar SOFC, *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 44, pp. 15441-15445, 2019.
- [14] W.A. Rogers, R.S. Gemmen, C. Johnson, M. Prinkey, M. Shahnam, *Validation and application of a CFD-based model for solid oxide fuel cells and stacks*, Fuel Cell Science Engineering Technology ASME, pp. 517-520, 2003.
- [15] N. Akhtar and K. Kendall, Micro-tubular, solid oxide fuel cell stack operated under single-chamber conditions, *International journal of Hydrogen Energy*, Vol. 36, pp. 13083-13088, 2011.
- [16] J.H. Cha, Y.C.H. Chung, H.R. Kim, J.W. Son, J.H. Lee and H.W. Lee, Computer modeling of single-chamber SOFCs with hydrocarbon fuel, *Journal of Ceramic Processing Research*, Vol. 8, No. 3, pp. 224-228, 2007.
- [17] R. Taylor and R. Krishna, *Multicomponent mass transfer*, 1th ed., John Wiley & Sons, 1993.
- [18] J. Milewski, K. Swirski, M. Santarelli and P. Leone, *Advanced methods of solid oxide fuel cell modeling*, Springer, 2011.
- [19] N. Akhtar, *Single-Chamber Solid Oxide Fuel Cells: Modeling and Experiments*, PhD thesis, Department of Chemical Engineering, University of Birmingham, Birmingham, 2010.
- [20] B. Todd and J.B. Young, Thermodynamic and transport properties of gases for use in solid oxide fuel cell modeling, *Journal of Power Sources*, Vol. 110, pp. 186-200, 2002.

$D_{ij}$	ضریب نفوذ دوتایی ( $\text{m}^2\text{s}^{-1}$ )
$d_p$	قطر روزنه (m)
F	ثابت فارادی ( $\text{Cmol}^{-1}$ )
g	شتاب جاذبه ( $\text{ms}^{-2}$ )
J	چگالی جریان ( $\text{Am}^2$ )
k	ضریب رسانش حرارتی ( $\text{kgms}^{-3}\text{K}^{-1}$ )
M	جرم مولکولی ( $\text{kgmol}^{-1}$ )
n	تعداد الکترون
P	فشار ( $\text{kgm}^{-1}\text{s}^{-2}$ )
Q	ترم چشمه معادله انرژی ( $\text{kgm}^{-1}\text{s}^{-3}$ )
R	ثابت جهانی گازها ( $\text{kgm}^2\text{s}^{-2}\text{mol}^{-1}\text{K}^{-1}$ )
T	دما (K)
u	سرعت ( $\text{ms}^{-1}$ )
$V_{oc}$	ولتاژ مدار باز (V)
علائم یونانی	
$\alpha$	ضریب انتقال بار
$\gamma$	مرتبه واکنش
$\varepsilon$	تخلخل
$\eta$	اضافه ولتاژ (V)
$\kappa$	نفوذپذیری ( $\text{m}^2$ )
$\mu$	لزجت دینامیکی ( $\text{kgm}^{-1}\text{s}^{-1}$ )
$\rho$	چگالی ( $\text{kgm}^{-3}$ )
$\sigma$	ضریب رسانش بار ( $\text{Sm}^{-1}$ )
$\tau$	انحنای
$\phi$	پتانسیل بار (V)
$\omega$	کسر جرمی
بالانویس ها	
$H_2$	هیدروژن
$O_2$	اکسیژن
زیرنویس ها	
a	آند
act	فعالسازی
c	کاتد
DGM	مدل داستی گاز
e	الکترولیت
eff	موثر
el	الکترونی
f	سیال
$H_2$	هیدروژن
$H_2O$	آب
io	یونی
KN	نادسن
$O_2$	اکسیژن
ref	مرجع
s	جامد

## ۶- مراجع

- [1] EG and G Technical Services, Inc. Science Applications International Corporation, *Fuel Cell Handbook*, sixth edition, US Department of Energy, 2002.
- [2] 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.
- [3] Ch. Y. Chung and Y. Ch. Chung, Performance characteristics of micro single-chamber solid oxide fuel cell: Computational analysis, *Journal of Power Sources*, Vol. 154, pp. 35-41, 2006.
- [4] 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, *Journal of Power Sources*, Vol. 171, pp. 511-516, (2007).