

!" #%\$'

## مطالعه عددی در مورد تنش های حرارتی از یک سلول سوختی اکسید جامد مسطح

### چکیده

مدل المان محدود سه بعدی (D3) متشکل از الکتروود منفی-الکتروولیت-الکتروود مثبت (PEN) و مونتاژ اتصال فلزی (MIC) با استفاده از نرم افزار تجاری المان محدود ABAQUS ساخته می شود. با مشخصات دمایی شبیه سازی شده در سلول سوختی اکسید جامد مسطح (SOFC)، روش المان محدود، برای محاسبه توزیع تنش حرارتی در SOFC مسطح استفاده می شود. اثرات مشخصات دمایی، الکتروودها و ضخامت الکتروولیت و ضرایب عدم تطابق انبساط حرارتی (CTE) بین مولفه ها مشخص می شوند. مقدار و توزیع تنش حرارتی، تابعی از مواد اعمال شده CTE، مشخصات درجه حرارت اعمال شده و ضخامت آند و الکتروولیت می باشد. نتایج محاسبه شده را می توان به عنوان راهنمایی برای انتخاب مواد SOFC و طراحی ساختار SOFC استفاده نمود. آند تحت تنش های کششی زیادی قرار می گیرد و در مدت اولین خنک کنندگی از دمای پخت، الکتروولیت تحت تنش فشاری بزرگی قرار می گیرد. کاهش شیمیایی NIO به نیکل در آند متخلخل، تا ۲۰٪ باعث کاهش سطح تنش مطلق در ساختار PEN می شود. تنش های کششی زیادی در آند و تنش های فشاری بزرگ در الکتروولیت، زمانی که SOFC در درجه حرارت بالا عمل می کند، تا حدی آرام می شود. زمانی که ساختار PEN پس از پخت در حال خنک شدن در دمای اتاق است، ترک ها احتمالاً می تواند در ساختار آند ظاهر شوند.

**کلید واژه ها:** سلول سوختی اکسید جامد، شبیه سازی عددی، تنش حرارتی

### ۱. مقدمه

سلول های سوخت، کارآمدترین دستگاه برای تبدیل الکتروشیمیایی انرژی شیمیایی هیدروژن به برق هستند و توجه فزاینده ای را در سال های اخیر برای سازگاری با محیط زیست بدون انتشار سمی یا انتشار سمی کم و تولید برق توزیع شده کارآمد به خود معطوف کرده اند. در سلول های سوختی موجود، سلول سوختی اکسید جامد

(SOFC) با هندسه یکپارچه، مسطح و لوله ای به عنوان یک سلول سوختی با دمای بالا، باعث عملکرد خوبی در تولید انرژی می شود و همچنان به عنوان یک منبع انرژی آینده، نویدبخش است. در طرح های پشته SOFC، به تازگی طراحی نوع مسطح جلب توجه کرده است، به دلیل اینکه ساخت ساده تر نسبت به اشکال مختلف از طرح های نوع دیگر دارد. علاوه بر این، SOFC نوع مسطح، به دلیل مقاومت الکتریکی پایین به عنوان یک نتیجه از مسیر جریان کوتاه تر، چگالی انرژی بالاتری را نسبت به نوع SOFC لوله ای ارائه می دهد. درجه حرارت معمولی از یک سلول سوختی اکسید جامد ۶۰۰ تا ۱۰۰۰ درجه است که منجر به تنش های شدید حرارتی و تاب برداشتن بر روی ساختارهای الکتروود منفی-الکتروولیت-الکتروود مثبت (PEN) از SOFCs می شود که ناشی از عدم تطابق ضرایب انبساط حرارتی (CTE) از لایه های مختلف در ساختار PEN از SOFCs با توجه به تغییرات دما در طول فرآیند تولید PEN و چرخه حرارتی است. و اینها ممکن است به ترک و نابود شدن ساختار SOFC منجر شود.

مطالعات عددی توسط بسیاری از محققان در مورد عملکرد الکتریکی SOFC با استفاده از مدل های الکتروشیمیایی ساده انجام شده است [۱۳e]، به عنوان مثال معادله Tafel، که نوعی خطی از معادله Volmer - Butler است، به طور گسترده ای برای محاسبه قطبش فعال سازی استفاده می شود. برای مدل قطبش غلظت، نفوذ Knudsen برای نفوذ گاز از طریق الکتروودهای متخلخل نادیده گرفته شده است [۳،۲]. Ferguson و همکاران [۴] یک مدل عددی را با حل معادلات جریان و معادله پتانسیل برای هندسه های مختلف از SOFCs معرفی نموده اند. تجزیه و تحلیل سیال-حرارتی SOFC مسطح با استفاده از ابزار محاسباتی دینامیک سیالات STARCD توسط Yakabe و همکاران انجام شد. [۵]. از آنجا که SOFCs در دمای بالا کار می کند و مقیاس سلول کوچک است، مطالعات تجربی در مورد تنش های حرارتی دشوار است. استفاده از توموگرافی رایانه ای اشعه X، ارزیابی حداکثر اندازه نقص های Malzbender و همکاران را میسر ساخت. [۶]. تنش پسماند در الکتروودها توسط اندازه گیری انحنای توسط Selcuk و همکاران برآورد شد. [۷]. روش پراش اشعه X برای اندازه گیری تنش پسماند در الکتروولیت از سلول پشتیبانی شده توسط آند توسط Yakabe و همکاران [۸] و Fischer و همکاران [۹] مورد استفاده قرار گرفت. پیشرفته ترین تحقیقات در مورد تنش های حرارتی SOFC با ایجاد مدل های کامپیوتری و شبیه سازی

عددی صورت گرفته است. مطالعات عددی برای تنش های حرارتی SOFC توسط محققان مختلف انجام شد. یک مدل دو بعدی، بر اساس روش حجم محدود، در FORTRAN برای شبیه سازی یک الکترولیت مسطح SOFC پشتیبانی شده توسط Selimovic و همکاران تهیه شده است. [ ۱۰ ] . یک مدل ریاضی دوبعدی به منظور برآورد تنش های حرارتی و برای پیش بینی طول عمر سلول [ ۱۱ ] توسعه داده شد و نظریه Weibull برای پیش بینی خطر تخریب سلول بر اساس محاسبه دوبعدی تنش مورد استفاده قرار گرفت [۱۲]. یک چارچوب مدل سازی پشته ای که ترکیبی از مدل های حرارتی الکتروشیمیایی، از جمله تخریب و با مدل المان محدود تماس حرارتی مکانیکی بر اساس SOFC پشتیبانی شده توسط آند است برای مطالعه قابلیت اطمینان مکانیکی و دوام SOFC پشته ای توسط Nakajo و همکاران مورد استفاده قرار گرفت. [۱۳،۱۴]. نرم افزار ANSYS برای انجام تجزیه تحلیل های المان محدود سه بعدی ( D۳ ) طرح های مهر و موم SOFC پیوند خورده سازگار توسط Weil و همکاران [۱۵] و Jiang و همکاران [۱۶] مورد استفاده قرار گرفت.

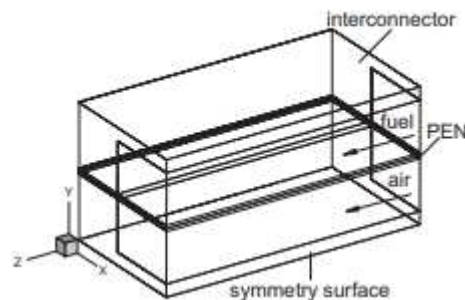
هدف از این کار کنونی، مطالعه بررسی تنش های حرارتی در اجزای SOFC با استفاده از یک مدل شبیه سازی سه بعدی (D۳) است. به منظور به دست آوردن این تنش ها، یک مدل عددی سه بعدی از SOFCs برای هندسه های مختلف با قطبش کامل در این مطالعه استفاده شده است، از جمله اصلاح متان و تغییر آب و گاز. این مدل با معادلات حاکم از طریق واسطه تابع تعریف شده کاربر ( UDF ) که توسط نرم افزار دینامیک تجاری سیالات محاسباتی (CFD)، Fluent، ارائه شده است، مرتبط است. معادلات حمل و نقل برای جرم، تکانه، گونه ها، انرژی و پتانسیل الکتریکی با استفاده از نرم افزار، Fluent حل شده است. ویژگی های الکتریکی اجزای رسانا و ویژگی های مشخصه درجه حرارت برای SOFC پیکربندی شده مسطح مورد بررسی قرار گرفته است. مدل تنش های حرارتی سه بعدی المان محدود شامل PEN و مونتاژ اتصالات با استفاده از نرم افزار تجزیه و تحلیل المان محدود تجاری ABAQUS (FEA) بر اساس مشخصات دما در SOFC مسطح محاسبه شده توسط مدل الکتروشیمیایی ساخته می شود. اثرات مشخصات دما، الکترودها و ضخامت های الکترولیت و عدم تطابق های CTE بین مولفه ها مشخص می

شود. نتایج محاسبه شده را می توان به عنوان راهنمایی برای انتخاب مواد SOFC و طراحی ساختار SOFC به منظور بهبود عملکرد ساختار SOFC و اعتبار آن استفاده نمود.

## ۲. مدل ریاضی

### ۲.۱. مدل هندسی

یکی از تمرین های مدل سازی پشته سلول سوختی، توسط آژانس بین المللی انرژی (IEA) انجام شد که شامل هفت کشور اروپایی و ژاپن در سال ۱۹۹۵ می شد. دو مورد عملیات پشته SOFC، شبیه سازی شد: (۱) یک پشته سلول عامل با سوخت هیدروژن مرطوب و تغذیه هوا (۲) یک پشته سلول عامل با بخار مستقیم داخلی اصلاح کننده متان و هوا. این دو مورد " تست معیار ۱ " و " تست معیار ۲ " در پایگاه داده IEA نامیده می شدند.



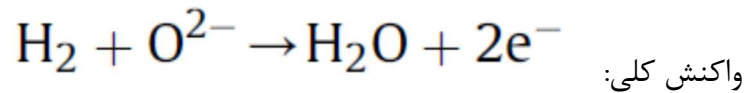
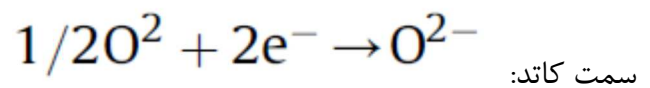
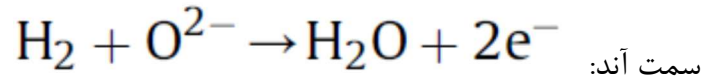
شکل ۱. هندسه نیم سلول واحد تک برای SOFC مسطح

در این کار، یک مدل سلول واحد ساده با کانال دو قطبی مورد بررسی قرار گرفته است. علاوه بر این، از آنجا که هندسه این واحد متقارن است، تنها نیمی از واحد تکرار شونده شبیه سازی شده است. پیکربندی نیم سلول واحد در شکل ۱ نشان داده شده است. هر دو SOFC هم جریانی و ضد جریانی مسطح در این کار مدلسازی شده اند. پارامترهای هندسی سلول تک برای انجام محاسبات به شرح زیر ارائه می شود: مساحت واکنش کانال ۳ میلی متر در ۱۰۰ میلی متر، ارتفاع کانال ۱ میلی متر، زیر منطقه واکنش MIC ۲,۴۲ میلی متر در ۱۰۰ میلی متر، عرض دنده MIC ۲,۴۲ میلی متر، ضخامت الکترولیت ۱۵۰ میلی متر، ضخامت آند ۵۰ میلی متر، ضخامت کاتد ۵۰ میلی متر و صفحه دو قطبی با ضخامت ۲,۵ میلی متر. همانطور که نیمه سلول واحد در شکل ۱ نشان داده شده است، منطقه

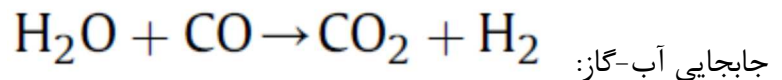
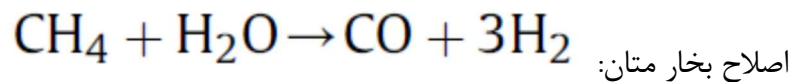
فعال در محاسبات عددی شامل منطقه واکنش نیم کانال و نیم منطقه واکنش زیر MIC، که برابر با ۲,۷۱ میلی متر در ۱۰۰ میلی متر است. نفوذ پذیری الکتروود متخلخل ۱ برابر  $1 \times 10^{-8}/m$  و تخلخل ۰,۲ است.

## ۲,۲ مدل الکتروشیمیایی

واکنش های الکتروشیمیایی در نظر گرفته شده در SOFC عبارتند از/ک



برای اصلاح بخار داخلی SOFC، واکنش اصلاح کننده و واکنش جابجایی گاز-آب درون اند اضافه می شوند:



فرض شد که واکنش های الکتروشیمیایی در واسط بین الکتروود و الکتروولیت رخ می دهند. واکنش جابجایی به اندازه

کافی سریع است و در این مدل فرض می کنیم که واکنش دنده در تعادل شیمیایی در آند صورت می گیرد

به عنوان یک سیستم حفاظت از انرژی، ولتاژ تولید شده توسط SOFC را می توان با ترکیب حفاظت انرژی و تعادل

آنتروپی واکنش الکتروشیمیایی برای SOFC [17] محاسبه نمود. مدل قطبش به طور کامل در این مقاله [۱۸]

استفاده شده است. ولتاژ تولید شده توسط SOFC به صورت زیر مدلسازی می شود

$$E_v = -\frac{1}{z_e F} \left[ \sum_i (\lambda_i g_i)_p - \sum_i (\lambda_i g_i)_r \right] - (\eta_{act} + \eta_{conc} + \eta_{ohm}) \quad (1)$$

که در آن

$$\begin{aligned}
 g_i(T, p_i) &= h_i(T) - T s_i(T, p_i) \\
 &= \int_{T_0}^T c_{pi}(T) dT - T \int_{T_0}^T \frac{c_{pi}(T)}{T} dT - RT \ln \frac{P_0}{p_i}
 \end{aligned} \quad (2)$$

در SOFC، افت ولتاژ شامل  $\eta_{act}$  قطبش فعال سازی،  $\eta_{conc}$  قطبش غلظت و  $\eta_{ohm}$  می شود. قطبش فعال سازی، مانع انرژی موجود بین رساناهای الکترونیک و یونی در واکنش الکتروشیمیایی است. قطبش فعال سازی در هر دو الکتروود در تمام محدوده چگالی جریان رخ می دهد. این مقدار توسط معادله Butler-Volmer محاسبه می شود. ضریب انتقال  $\beta$  در ۰,۵ فرض می شود، قطبش فعال سازی را می توان با معادله زیر محاسب نمود:

$$\eta_{act} = \frac{2RT}{neF} \sinh^{-1} \left( \frac{i}{2i_0} \right) \quad (3)$$

که در آن  $i_0$  چگالی جریان تبدلی بستگی به فشار جزئی ترکیبات گاز واکنش و درجه حرارت دارد. معادلات (۴) و (۵) در مدل با توجه به مرجع [۱۹] اعمال می شوند.

در سمت آند

$$i_{0,a} = \gamma_a \left( \frac{p_{H_2}}{p_{ref}} \right) \left( \frac{p_{H_2O}}{p_{ref}} \right) \exp \left( -\frac{E_a}{RT} \right) \quad (4)$$

در سمت کاتد،

$$i_{0,c} = \gamma_c \left( \frac{p_{O_2}}{p_{ref}} \right)^{0.25} \exp \left( -\frac{E_c}{RT} \right) \quad (5)$$

واکنش های الکتروشیمیایی در واسطه الکتروولیت-الکتروود رخ می دهد. فشارهای جزئی گاز واکنش زمانی که گونه ها از طریق مواد متخلخل از کانال های گاز به سایت های واکنش پخش می شوند، تغییر می یابند. فرایندهای انتشار آن

توسط نفوذ عادی و انتشار Knudsen توصیف می شوند. افت ولتاژ به علت مقاومت در برابر نفوذ گونه ها، قطبش غلظت نامیده می شود که در هر دو الکتروود مدل به شرح زیر [۱۸] رخ می دهد:

$$\eta_{\text{conc},a} = -\frac{RT}{2F} \left[ \ln\left(\frac{p_{\text{H}_2}}{p_{\text{H}_2}^e}\right) - \ln\left(\frac{p_{\text{H}_2\text{O}}}{p_{\text{H}_2\text{O}}^e}\right) \right]$$

$$\eta_{\text{conc},c} = -\frac{RT}{4F} \ln\left(\frac{p_{\text{O}_2}}{p_{\text{O}_2}^e}\right) \quad (6)$$

تلفات اهمی، که از مقاومت به هدایت بار الکتریکی از طریق اجزای سلولی بوجود می آید، به صورت خطی به جریان بستگی دارد. هدایت اجزای الکتریکی، تابعی از دما است و می توان آن را از رابطه زیر محاسبه نمود:

$$\sigma = \frac{A_0}{T} \exp\left(-\frac{E_0}{kT}\right) \quad (7)$$

بنابراین، تلفات اهمی به صورت زیر نوشته می شود:

$$\eta_{\text{ohm}} = \left| \vec{i} \cdot \vec{n} \right| r = \left| \vec{i} \cdot \vec{n} \right| l_{el} / \sigma \quad (8)$$

با توجه به درجه حرارت بالای SOFC، متان و بخار آب در سوخت گاز به آند جذب می شوند و برای تولید هیدروژن ترکیب می شوند. سرعت واکنش اصلاح متان مورد استفاده در مدل حاضر در معادله زیر [۳،۲۰] نشان داده شده است.

$$\dot{r}_R = k_0 p_{\text{CH}_4} f_e \exp\left(\frac{-\Delta E}{RT}\right) \quad (9)$$

که در آن عامل تعادل  $f_e$  به اندازه ۱ تخمین زده می شود. ثابت تعادل برای واکنش جابجایی به صورت زیر بیان می شود

$$K_{\text{shift}} = \exp\left(\frac{-\Delta G_{\text{wgs}}}{RT}\right) \quad (10)$$



که در آن تغییر انرژی آزاد Gibbs ( $\Delta G_{wgs}$ ) توسط معادله (۲) تخمین زده می شود.

### ۲.۳. مدل سیال-حرارتی

تجزیه و تحلیل سیال-حرارتی با استفاده از نرم افزار CFD، Fluent انجام می شود. معادلات ترمودینامیکی برای واکنش های الکتروشیمیایی و معادلات حاکم بر حفاظت جرم، تکانه، و انرژی ساخته می شود و توسط UDF حل می شوند. ۳ مدل استاندارد  $k-\varepsilon$  و الگوریتم SIMPLEC استفاده می شود.

معادلات حاکم بر جریان سیال ثابت را می توان به صورت زیر نوشت:

$$\operatorname{div}(\rho \vec{V} \phi) = \operatorname{div}(\Gamma_{\phi} \operatorname{grad} \phi) + S_{\phi} \quad (11)$$

که در آن  $\Gamma$  ضریب انتشار و  $S_{\phi}$  عبارت منبع برای متغیر عمومی  $\phi$  است. آنها در مرجع [۲۱] برای همه معادلات بقا به جز معادله انتقال گونه ها و معادله پتانسیل الکتریکی داده شده اند. برای معادله پیوستگی،  $\phi = 1$ ، برای معادلات بقای دیگر،  $\phi$  برابر با کسر جرم  $Y_i$  برای هر گونه معادلات حمل و نقل،  $V$  سرعت در هر مسیر برای معادلات حرکت،  $T$  درجه حرارت برای معادله انرژی و  $U$  پتانسیل الکتریکی برای معادله شارژ است. در مدل حاضر، فرض می شود سیال هیچ تاثیری روی هدایت جریان الکتریکی ندارد. بنابراین، برای معادله پتانسیل الکتریکی،

$$\operatorname{div}(\rho \vec{V} \phi) = 0 \quad (12)$$

برای معادلات حمل و نقل گونه ها، تخمین رقیق کردن در جریان آرام اعمال می شود.

$$\Gamma_i = \rho D_i \quad (13)$$

که در آن  $D_i$ ، ضریب نفوذ برای گونه های  $i$  در ترکیب است. معادله پتانسیل الکتریکی به صورت زیر نشان داده می

شود

$$\Gamma_{\phi} = \sigma \quad (14)$$

حرارت غلظت و گونه ها، با توجه به واکنش های الکتروشیمیایی تغییر می کند، و تغییرات برحسب معادلات حاکم به منبع آورده می شوند.

واژه منبع حرارتی حجمی،  $Sq$ ، مجموع منبع حرارت اهمی، حرارت واکنش شیمیایی و تبادل گرمای تابشی است.

$$Sq = Q_{ohm} + Q_{chem} + Q_{grad} \quad (15)$$

که در آن منبع حرارتی اهمی به صورت زیر است:

$$Q_{ohm} = \sigma grad\Phi grad\Phi \quad (16)$$

منبع حرارتی شیمیایی برای عنصر کنترل حجم در حوزه درون لایه ای سمت آند به صورت زیر است:

$$Q_{chem,a} = (\dot{r}_f - \dot{r}_b)\Delta H_s + \dot{r}_R\Delta H_R + \frac{|\vec{i} \cdot \vec{n}|}{2F} A_{CV}\Delta H_E \quad (17)$$

که در آن در دیگر حوزه ها،  $Q_{chem} = 0$ .

مدل تابش هماهنگ گسسته (DTRM) برای محاسبه انتقال حرارت تابشی اعمال می شود [۲۲]. معادله برای تغییر

شدت تابشی،  $dI$ ، در امتداد یک مسیر،  $ds$ ، می تواند به صورت زیر نوشته شود

$$\frac{dI}{ds} + aI = \frac{a\sigma T^4}{\pi} \quad (18)$$

که در آن  $a$  برای ضریب جذب گازی،  $T$ ، دمای محلی گاز و  $\sigma$  ثابت بولتزمن-Stefan ( $m^2 K^4$ ).  $(5.672 \times 10^{-8} W/$  است.

محیط متخلخل با عبارت منبع حرکت در معادلات جریان سیال استاندارد مدل سازی می شود. عبارت منبع شامل

عبارت افت چسبناک و عبارت افت اینرسی را می توان از رابطه محاسبه نمود:

$$S_j = - \left( \sum_{k=1}^3 D_{j,k} \mu V_k + \sum_{k=1}^3 \zeta_{j,k} \frac{1}{2} \rho \left| \vec{V} \right| V_k \right) \quad (19)$$

در مدل حاضر، الکترودهای متخلخل به سادگی به صورت همگن در نظر گرفته می شوند و  $\zeta$  عامل مقاومت اینرسی را می توان صفر در نظر گرفت. مدل الکترودهای متخلخل را می توان با قانون Darcey توصیف مود

$$S_j = - \frac{\mu}{\alpha} V_j \quad (20)$$

که در آن  $\alpha$ ، نفوذپذیری ماده متخلخل است.

پتانسیل در سراسر میدان های الکتریکی به جز واسطه های الکتrolیتی که در آن واکنش های شیمیایی رخ می دهد پیوسته است. همانطور که در شکل ۲ نشان داده شده است، چگالی جریان یونی از طریق الکتrolیت را می توان از رابطه زیر به دست آورد

$$\vec{i} \cdot \vec{n} = \frac{E_n - (\Phi_{P'} - \Phi_P)}{R_n} \quad (21)$$

که در آن  $R_n$ ، منطقه فشرده مقاومت الکتریکی خاص محلی برای مجموع قطبش است.

شار حرارتی و شار جریان الکتریکی در مرز خارجی، صفر می باشند. پتانسیل یکنواخت در ورودی جریان و خروجی به صورت مقدار فرض شده داده شده است. این فشار در رسانه های گازی داده شده است. درجه حرارت، کسر جرم گونه ها و شار جرم در ورودی گاز تحمیل می شوند.

## ۲.۴ مدل تنش حرارتی

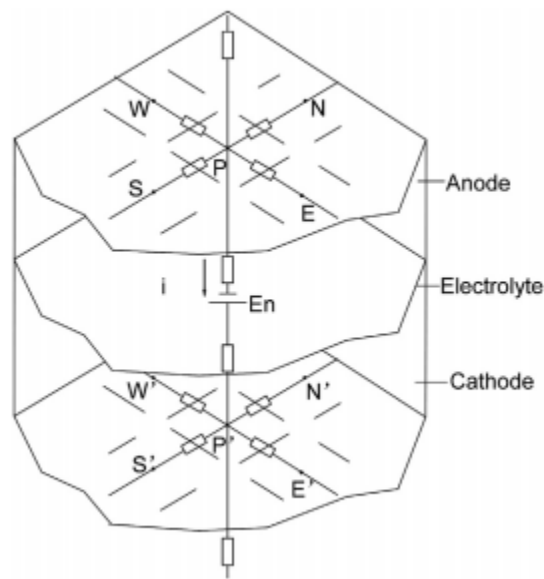
در تئوری کلاسیک ترموالاستیسیته خطی (قانون Neumann - Duhamel)، مولفه های تانسور کرنش  $\epsilon_{ij}$ ، توابع خطی از مولفه های تانسور تنش و مولفه های تانسور کرنش ناشی از تغییر درجه حرارت می باشند. داریم

[۲۳]:

$$\varepsilon_{ij} = \varepsilon_{ij}^e + \varepsilon_{ij}^T \quad (22)$$

که در آن  $\varepsilon_{ij}^e$  نشان دهنده فشار الاستیک و  $\varepsilon_{ij}^T$  مخفف کرنش حرارتی است. وقتی که تغییرات درجه حرارت از  $T_0$  به  $T$  است، کرنش حرارتی این عنصر به علت تغییر درجه حرارت برابرست با

$$\varepsilon_{ij}^T = \alpha(T - T_0)\delta_{ij} \quad (23)$$



شکل ۲. طرح شبکه ای برای محاسبه چگالی جریان در واسطه های الکتروود/الکترولیت

که در آن  $\alpha$ ، ضریب بسط حرارتی خطی و  $\delta_{ij}$  دلتای Korncker است. تاسور کرنش الاستیک به طور خطی متناسب با تانسور استرس است

$$\varepsilon_{ij}^e = \frac{1}{2G} \left( \sigma_{ij} - \frac{\nu}{1 + \nu} \sigma_{kk} \delta_{ij} \right) \quad (24)$$

که در آن  $G$ ، پیمانانه برسی و  $\nu$  نسبت Poisson است و کل تاسور کرنش برابرست با

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2G} \left( \sigma_{ij} - \frac{\nu}{1+\nu} \sigma_{kk} \delta_{ij} \right) + \alpha(T - T_0) \delta_{ij} \quad (25)$$

معادله (25)، قانون ترموالاستیسیته خطی است. با حل برای تاسور تنش  $\sigma_{ij}$  داریم

$$\sigma_{ij} = 2G \left[ \varepsilon_{ij} + \frac{\nu}{1-2\nu} \left( \varepsilon_{kk} - \frac{1+\nu}{\nu} \alpha(T - T_0) \right) \delta_{ij} \right] \quad (26)$$

روابط کرنش-تنش برحسب پیمانۀ Young و نسبت Poisson غالباً استفاده می شوند و عبارتند از:

$$\begin{aligned} \varepsilon_{xx} &= \frac{1}{E} [\sigma_{xx} - \nu(\sigma_{yy} + \sigma_{zz})] + \alpha(T - T_0) \\ \varepsilon_{yy} &= \frac{1}{E} [\sigma_{yy} - \nu(\sigma_{zz} + \sigma_{xx})] + \alpha(T - T_0) \\ \varepsilon_{zz} &= \frac{1}{E} [\sigma_{zz} - \nu(\sigma_{xx} + \sigma_{yy})] + \alpha(T - T_0) \end{aligned} \quad (27)$$

$$\varepsilon_{xy} = \frac{\sigma_{xy}}{2G}$$

$$\varepsilon_{yz} = \frac{\sigma_{yz}}{2G}$$

$$\varepsilon_{zx} = \frac{\sigma_{zx}}{2G}$$

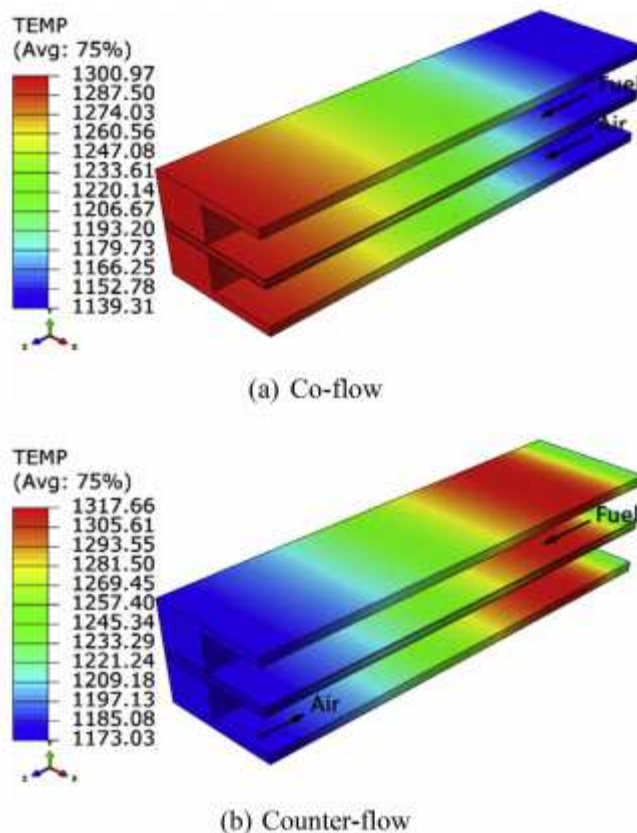
در مواد ایزوتروپیک بدون بارهای مکانیکی و توزیع درجه حرارت، هر یک از عناصر به طور یکنواخت در هر بعد گسترش می یابد. در SOFC، گسترش اجزای، با توجه به عدم تطابق CTE بین اجزای سلول، متفاوت می باشند. بر اساس محدودیت های رابط، تنش های حرارتی برای حفظ استمرار اندازه و رابط تولید می شود.

مشخصات تنش های حرارتی در ساختار SOFC PEN از توزیع دمای شبیه سازی شده در SOFC با استفاده از مدل المان محدود تنش های حرارتی SOFC توسعه یافته توسط نرم افزار تجاری المان محدود ABAQUS محاسبه می شود. در محاسبه تنش، C3D8R نوع المان ( المان های سه بعدی از آجر خطی هشت گره اس) برای ایجاد شبکه برای مدل تنش حرارتی SOFC به کار گرفته می شود. توزیع دمای محاسبه شده توسط مدل سیال-حرارتی SOFC در ABAQUS به صورت میدان دمایی از پیش تعریف شده خوانده می شود. در محاسبه تنش، فرض شده است که

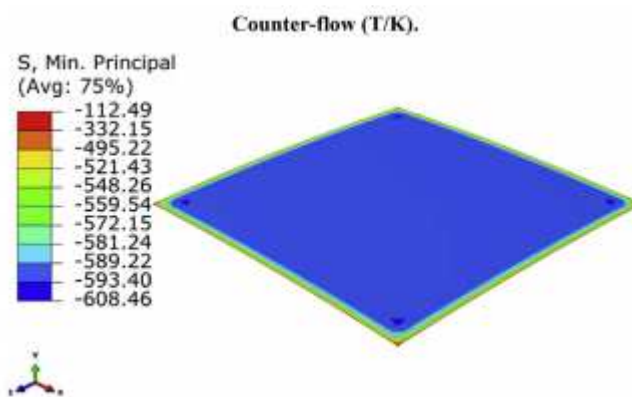
هیچ بار مکانیکی بر روی اجزای سلول سوختی قرار داده نمی شود و اجزای سازنده می تواند آزادانه و کج و معوج باشند. داده های در دسترس در مورد خواص مکانیکی برای مواد پشته SOFC، کمیاب هستند. رفتار الاستیک خطی برای همه اجزای سرامیکی فرض می شود. شکل پذیری با سخت شدن ایزوتروپیک و معیار عملکرد von Mises برای MIC استفاده می شود. پارامترهای فیزیکی پایه برای مواد از اجزای SOFC استفاده شده در این مدل در جدول ۱ فهرست شده اند [ ۱۳،۱۴،۲۴،۲۵ ] .

	T/K	E/GPa	$\nu$	CTE/ $10^{-6} \text{ k}^{-1}$	$\sigma_{yt}$ /MPa
Cathode (LSM)	RT	41.3	0.28	12.16	-
	1073	48.3	0.28		
Electrolyte (YSZ)	RT	196.3	0.32	10.21	-
	1073	148.6	0.32		
Anode (NiO-YSZ)	RT	124.9	0.39	12.37	-
	1073	119.9	0.39		
Anode (Ni-YSZ)	RT	72.5	0.39	12.41	-
	1073	58.1	0.39		
MIC (Crofer22APU)	RT	216	0.3	11.80	248
	1073	65.9	0.3		35

جدول ۱ - پارامترهای فیزیکی اساسی مواد SOFC [۱۳،۱۴،۲۴،۲۵].



شکل ۳. مشخصات محاسبه شده دما در این سلول (a) جریان همزمان (b) ضد جریان



شکل ۴ - توزیع استرس شبیه سازی شده در الکترولیت در دمای اتاق.

## ۳. نتایج و بررسی

### ۳.۱. تجزیه و تحلیل سیال-حرارتی

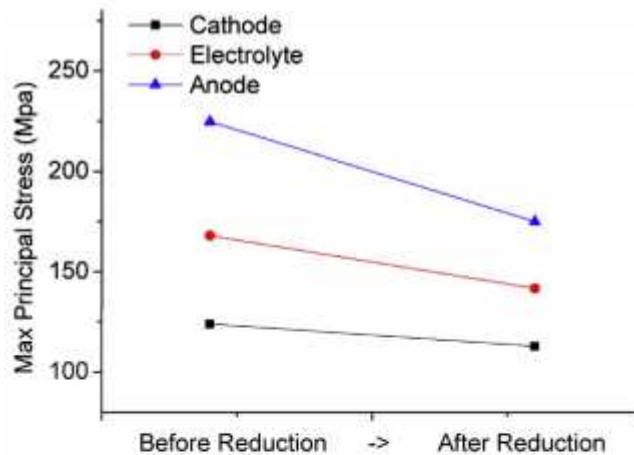
نیمی از یک مدل متقارن سلول واحد با کانال های دو قطبی عمل کننده با بخار مستقیم داخلی اصلاح کننده متان و هوا در یک SOFC مسطح در این کار مدل سازی شده است. شبیه سازی های عددی با هر دو جریان همزمان و ضد جریان انجام شده است.

در کار سابق [۱۷،۲۶]، مشخصات پروفایل برای درجه حرارت، پتانسیل الکتریکی و چگالی جریان محاسبه شده توسط مدل مشابه با معیار از آژانس بین المللی انرژی (IEA) مقایسه شد و در توافق خوبی با پایگاه داده آژانس بین المللی انرژی بود [۲۷]. و مقایسات نشان می دهد که مدل های الکتروشیمیایی استفاده شده در پیش بینی رفتار SOFC با هندسه های مختلف دقیق هستند.

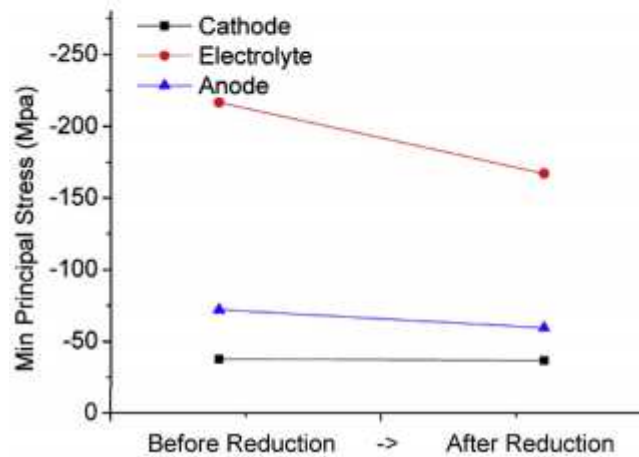
شرایط عملیاتی مورد به شرح زیر است: فشار سیستم: ۱ بار، نسبت هوا: ۷، کاربرد سوخت: ۰.۸۵٪، میانگین چگالی جریان: ۳۰۰۰ A/m<sup>2</sup>، ولتاژ سلول: همکاری جریان ۰.۶۵V، ضد جریان ۰.۶۹V.

مشخصات پروفایل برای درجه حرارت در شکل ۳ (a) و (b) نشان داده شده است. در مورد جریان همزمان، مشاهده می شود که درجه حرارت در یک فاصله کوتاه از گاز ورودی به دلیل بخار گرماگیر داخلی واکنش رفرمینگ متان کاهش می یابد. و پس از آن دما به سمت خروجی گاز زمانی که واکنش اصلاح کننده جریان کامل است، افزایش می یابد. در مورد ضد جریان، درجه حرارت در ورودی سوخت به دلیل واکنش الکتروشیمیایی گرمازا و هوای گرم از

طریق کانال هوا به سرعت در حال افزایش است. در پایین دست سوخت، دمای سلول در امتداد جریان سوخت کاهش می یابد، زیرا تولید حرارت کم است و سوخت گرم بوسیله هوای ورودی سرد می شود.



(a) Maximum principle stress



(b) Minimum principle stress

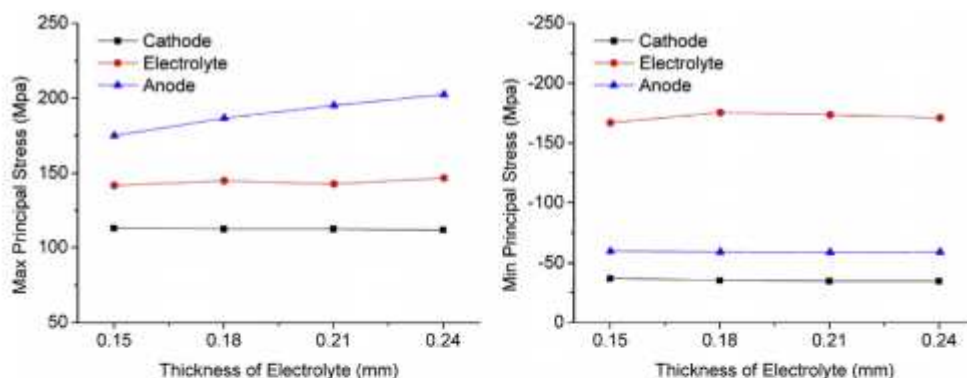
شکل ۵ - تنشهای باقیمانده در ساختار PEN قبل و بعد از کاهش آند (۲۹۸ ¼ T).

### ۳.۲. محاسبه تنش حرارتی

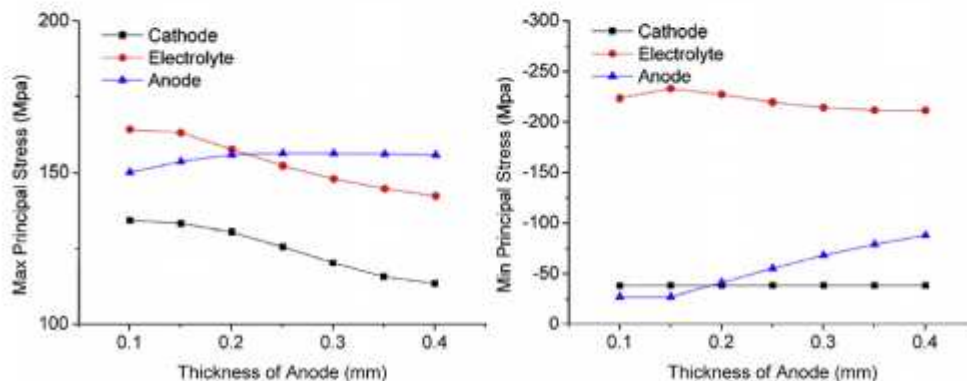
یک مدل D FEA<sup>۳</sup> شامل الکترود منفی-الکترولیت-الکترود مثبت (PEN) و مونتاژ اتصالات با استفاده از نرم افزار عناصر محدود تجاری ABAQUS ساخته شده است. تنش حرارتی در SOFC ها در شرایط مختلف محاسبه می شود. نمایش درجه حرارت شبیه سازی شده برای هر دو جریان همزمان و ضد جریان در SOFC مسطح در این مدل استفاده شده است. مشخصات پروفیل تنش در ساختار PEN ها به طور خاص به عنوان مواد ساختار PEN به طور



معمولاً سرامیک شکننده مورد بررسی قرار گرفته است. تنش های حرارتی بزرگ به درستی به ترک ها و یا آسیب در ساختار PEN از SOFC منجر خواهد شد. با این حال که یک رفتار الاستیک خطی برای ساختار PEN فرض می شود و رفتار پلاستیک برای MIC استفاده می شود، ممکن است به انحنای سلول بالاتر و تغییر شکل های مختلف از SOFC منجر شود.



(a) Thickness of electrolyte



(b) Thickness of anode

شکل ۶. رابطه بین تنش های باقیمانده و ضخامت های اجزای مختلف PEN ( $T = 298 \text{ K}$ )

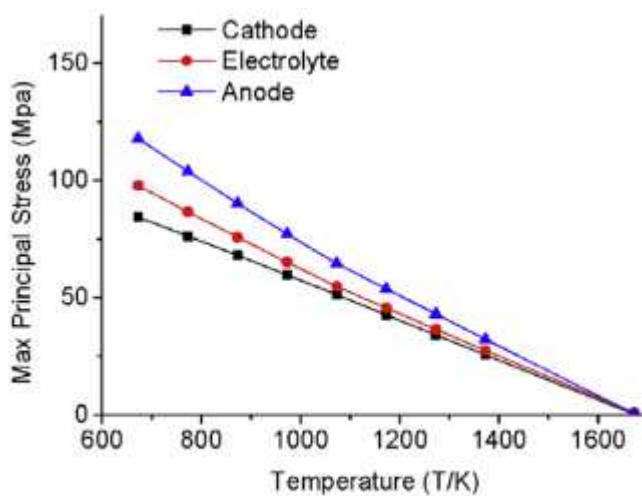
به منظور توجیه دقت مدل FEA، مدل SOFC به همان روش با توجه به نمونه آزمایش در مرجع [۸] ساخته شد. همانطور که در شکل ۴ نشان داده شده است، توزیع تنش شبیه سازی شده در الکترولیت در دمای اتاق محاسبه می شود. تنش های فشاری، مقادیر تقریباً همگن از  $-۵۶۰$  مگاپاسکال تا  $-۶۱۰$  مگاپاسکال بر روی صفحه الکترولیت به جز قسمت لبه می باشند. حداکثر مقدار تنش  $۶۱۰$  مگاپاسکال است که حدود ۸ درصد کوچکتر از تنش (حدود  $۶۷۰$

مگاپاسکال) گزارش شده در مرجع است. نزدیک قسمت گوشه، تنش کمی بزرگتر از تنش در بخش مرکزی است که از لحاظ کیفی با نتیجه اندازه گیری تنش اشعه X-در مرجع نیز سازگار است.

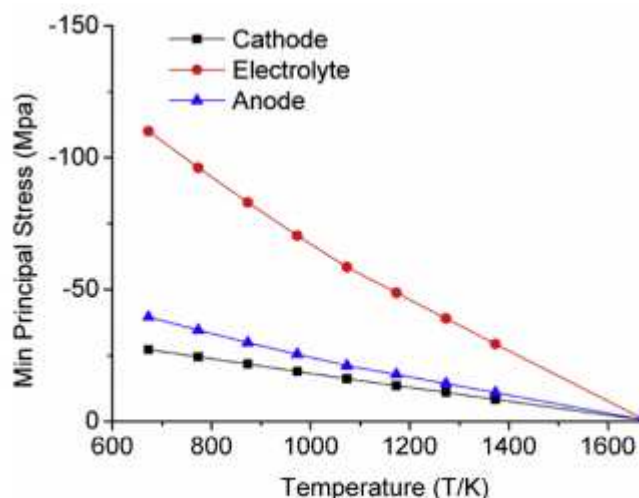
درجه حرارت پخت ساختار PEN معمولاً در ۱۶۷۳ است [ 8 ] NIO. در آند متخلخل به واسطه هیدروژن مرطوب با دمای ۱۰۷۳ K در چند ساعت کاهش می یابد. همانطور که در شکل نشان ۵ (a) و ۵ (b) داده شده است، تنش پسماند در ۲۹۸ K در ساختار PEN ناشی از تولید قبل از کاهش و پس از کاهش برای آند محاسبه می شود. این را می توان از شکل ۵ (a) دید که تنش های کششی باقی مانده در آند بسیار بیشتر از تنش ها در کاتد و الکترولیت است. تنش کششی حداکثر در آند ۲۲۴,۶۷ مگاپاسکال قبل از کاهش آند است و به ۱۷۴,۹۴ مگاپاسکال پس از کاهش افت می کند. آند طول اولین خنک کنندگی از دمای پخت ( ۱۶۷۳ K ) تحت تنش کششی زیادی قرار می گیرد. ترک ها احتمالاً می تواند در ساختار آند ظاهر شوند، زمانی که ساختار PEN در دمای اتاق پس از پخت سرد می شود. همانطور که در شکل ۵ (b) نشان داده شده است، تنش های فشاری باقی مانده در الکترولیت ها بسیار بیشتر از تنش در آند و کاتد است. حداکثر تنش فشاری در پس از کاهش آند الکترولیت از ۲۱۶,۶۷ مگاپاسکال تا ۱۶۷,۰۵ مگاپاسکال تغییر می کند. الکترولیت در طول سرد شدن از درجه حرارت پخت برای تعادل تنش کششی زیاد در الکترودها، تحت تنش فشاری بزرگی قرار می گیرد. تنش های فشاری در الکترولیت بسیار پایین تر از استحکام YSZ است. کاهش شیمیایی NIO به نیکل در تخلخل آند، سطح تنش مطلق در ساختار PEN را تا 20 درصد کاهش می دهد و در زمان متوسط قدرت آند نیز پایین می آید.

ارتباط بین تنش های پسماند و ضخامت اجزای مختلف PEN در ۲۹۸ K به منظور بررسی تاثیر ضخامت اجزای PEN مختلف در تنش های باقی مانده محاسبه می شود. همانطور که در شکل ۶ (a) نشان داده شده است، تنش کششی حداکثر در آند با افزایش ضخامت الکترولیت افزایش می یابد، در حالی که حداکثر تنش فشاری در الکترولیت کمی افزایش می یابد و پس از آن تقریباً ثابت می ماند. تنش کششی حداکثر در الکترولیت کمی در حدود ۱۴۵ مگاپاسکال نوسان می کند و تنش در کاتد تقریباً در ۱۱۲ مگاپاسکال ثابت می ماند. حداکثر تنش فشاری در الکترودها بسیار پایین تر از الکترولیت می باشد. تنش کششی حداکثر در PEN ساختار از ۱۷۴,۹۴ مگاپاسکال به

۲۰۲,۴۲ مگاپاسکال زمانی که ضخامت الکترولیت از ۰,۱۵ میلی متر تا ۰,۲۴ میلی متر افزایش می یابد، زیاد می شود. همانطور که در شکل ۶ (B) نشان داده شده است، تنش های کششی باقی مانده در الکترولیت و کاتد با افزایش ضخامت آند، کاهش می یابد. تنش های کششی باقی مانده در آند ابتدا افزایش می یابد اما پس از آن با افزایش ضخامت آند کمی کاهش می یابد. تنش فشاری باقی مانده در الکترولیت ها بسیار بیشتر از تنش ها در الکترودها است که با افزایش ضخامت آند، کمی به ۲۳۲,۹۶ مگاپاسکال افزایش می یابد و پس از آن به ۲۱۱,۷۳ مگاپاسکال کاهش می یابد. تنش کششی حداکثر در ساختار PEN از ۱۶۴,۲۱ مگاپاسکال تا ۱۵۵,۸۱ مگاپاسکال با افزایش ضخامت آند از ۰,۱ میلی متر تا ۰,۴ میلی متر، کاهش می یابد. این را می توان از شکل ۶ (a) و (b) دید که الکترولیت های نازک تر و ضخیم تر آند منجر به کاهش تنش پسماند در ساختار PEN می شود. این نشان می دهد که الکترولیت های نازک تر و ضخیم تر آند برای عملکرد ساختاری SOFC الکترولیت، مناسب و قابلیت اطمینان می باشند.



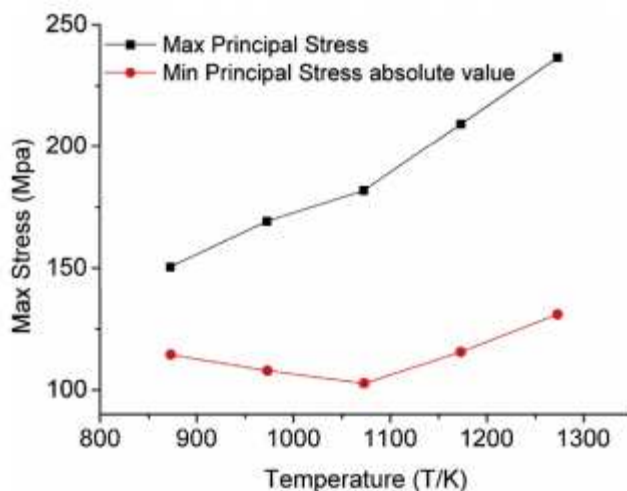
(a) Tensile stresses



(b) Compressive stresses

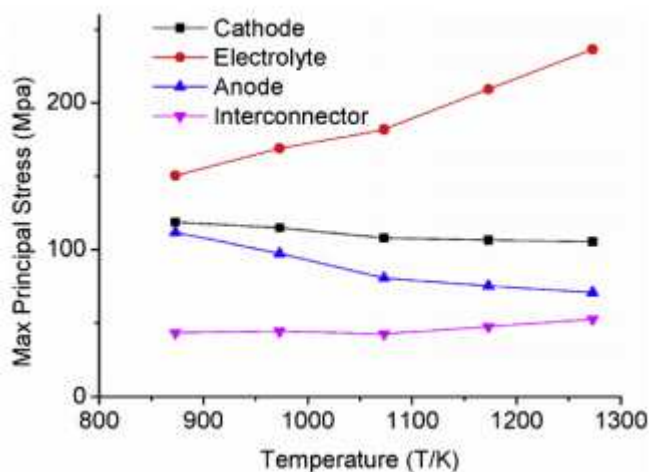
شکل ۷. رابطه بین تنش های باقیمانده و دما در ساختار PEN قبل از مونتاژ MICها.

توزیع حداکثر تنش اصلی و حداقل تنش اصلی در ساختار PEN قبل از مونتاژ MICها در توزیع های مختلف درجه حرارت محاسبه می شود. همانطور که در شکل ۷ نشان داده شده است، هر دو تنش های کششی و تنش فشاری تقریباً به صورت خطی با افزایش دما از ۶۷۳ K تا ۱۳۷۳ K کاهش می یابند. تنش های کششی در آند بزرگتر از تنش های در الکترولیت و کاتد است در حالی که الکترولیت تحت تنش فشاری کمتری نسبت به سایر اجزاء قرار می گیرد. هر دو تنش های کششی و تنش فشاری در ساختار PEN با افزایش درجه حرارت به درجه حرارت پخت از ساختار PEN در ۱،۶۷۳ K تقریباً به صفر می رسند.



شکل ۸. رابطه بین تنش های ماکزیمم و درجه حرارت

پس از مونتاژ MICها در دمای اتاق، توزیعات حداکثر تنش های اصلی و حداقل تنش های اصلی در SOFC ها در توزیع های مختلف درجه حرارت محاسبه می شود. همانطور که در شکل ۸ نشان داده شده است، حداکثر تنش های کششی با افزایش دما از ۸۷۳ K تا ۱۲۷۳ K زیاد می شود. حداکثر تنش فشاری که الکترولیت در معرض آن قرار می گیرد، ۱۶۷,۰۵ مگاپاسکال در دمای اتاق است.. با افزایش دما از دمای اتاق تا ۱۰۷۳ K این مقدار به ۱۰۲,۷۴ مگاپاسکال کاهش می یابد. سپس با افزایش دما به ۱۲۷۳ K، به ۱۳۱,۰۴ مگاپاسکال می رسد. شکل ۹ نشان دهنده حداکثر تنش اصلی محاسبه شده در دماهای مختلف برای هر جزء است. تنش های حرارتی در الکترولیت ها بزرگ تر تنش های حرارتی در دیگر مولفه ها در توزیع دمای یکنواخت است. زمانی که افزایش دما از ۸۷۳ K تا ۱۲۷۳ K رخ می دهد، حداکثر تنش اصلی در الکترولیت از ۱۵۰,۴۳ مگاپاسکال به ۲۳۶,۵۳ Mpa افزایش می یابد، در حالی که حداکثر تنش اصلی در MIC کمی در اطراف ۴۶ مگاپاسکال نوسان می کند.

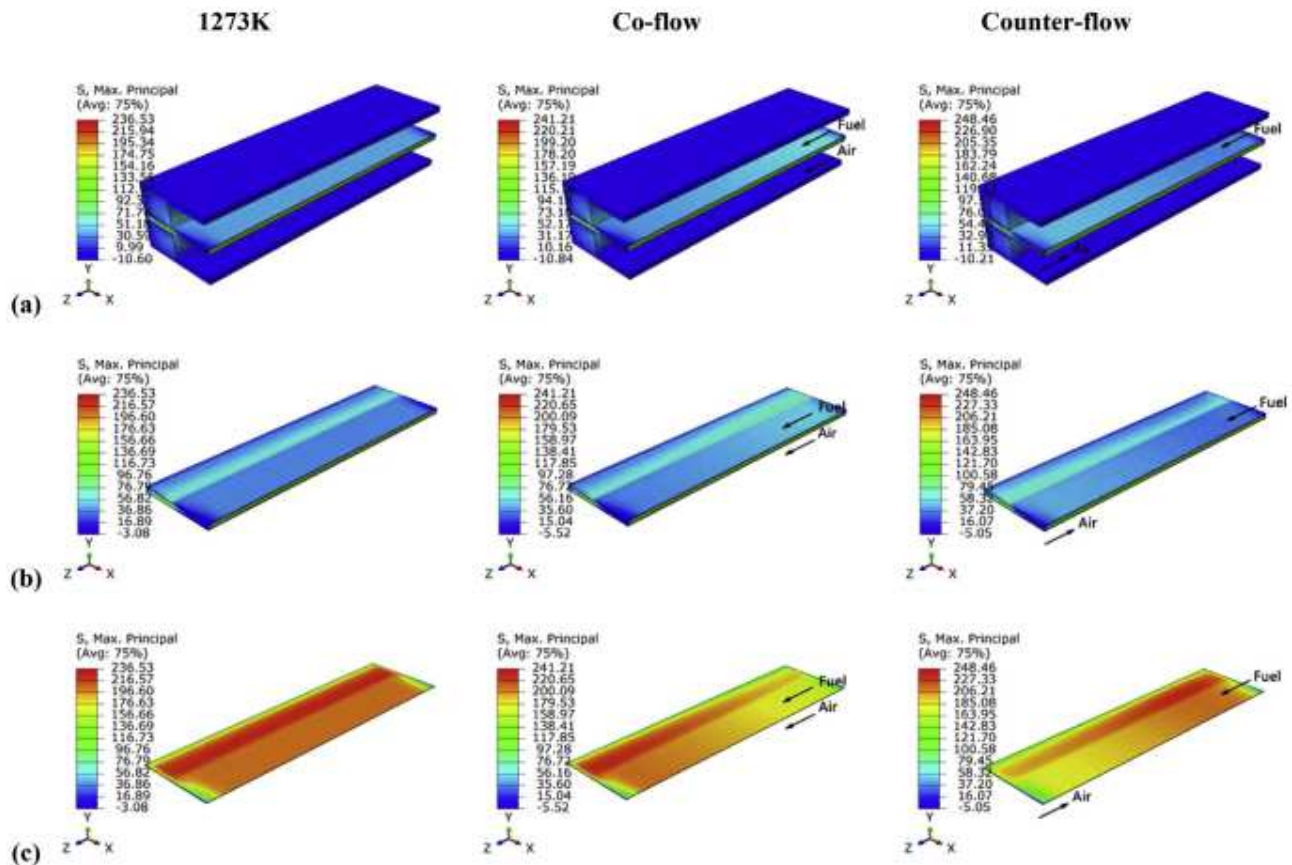


شکل ۹. رابطه بین تنش های اصلی ماکزیمم و درجه حرارت در ساختار SOFC

این به این دلیل است که عدم تطابق ضریب انبساط حرارتی (CTE) بین الکترولیت و الکترودها نسبتاً بزرگ است. با افزایش دما، عدم تطابق CTE منجر به افزایش تغییر شکل با اجزا می شود که نتیجه آن تنش های بزرگتر است. همچنین می توان دید که حداکثر تنش اصلی در آند از ۱۱۱,۵ مگاپاسکال تا ۷۰ مگاپاسکال و تنش ها در کاتد از ۱۱۸,۵۲ مگاپاسکال به ۱۰۵,۲۱ مگاپاسکال با افزایش دما از ۸۷۳ K تا ۱۲۷۳ K کاهش می یابد. نتایج نشان می

دهد که تنش فشاری در الکترولیت ها و تنش های کششی را در آند تا حدی آرام می شوند در حالی که تنش های کششی در الکترولیت در درجه حرارت بالاتر در SOFC، بزرگتر است.

مشخصات دمای شبیه سازی در SOFC مسطح را می توان به تنش های حرارتی مدل المان محدود وارد نمود. مشخصات تنش های حرارتی در ساختار PEN و MICها برای موارد مشترک جریان، ضد جریان و میدان درجه حرارت یکنواخت در ۱۰۲۷۳ K محاسبه شده اند. توزیع حداکثر تنش اصلی SOFC، ساختار PEN و الکترولیت ها در شکل ۱۰ ارائه شده است. این را می توان از شکل ۱۰ (a) و (b) دید که حداکثر تنش اصلی در PEN از MICها بزرگتر است. تنش در الکترولیت ها برای همه موارد بسیار بیشتر از نقاط دیگر است. حداکثر تنش اصلی در ضد جریان از جریان همزمان بالاتر است. تنش در ۱۲۷۳ K کمتر از جریان همزمان و ضد جریان می باشد. در تمام موارد فوق، مقدار حداکثر تنش کششی ۲۴۸،۴۶ مگاپاسکال است که در الکترولیت های ضد جریان، این مقدار کوچکتر از تنش شکست الکترولیت (۳۴۳ مگاپاسکال) است [۷].



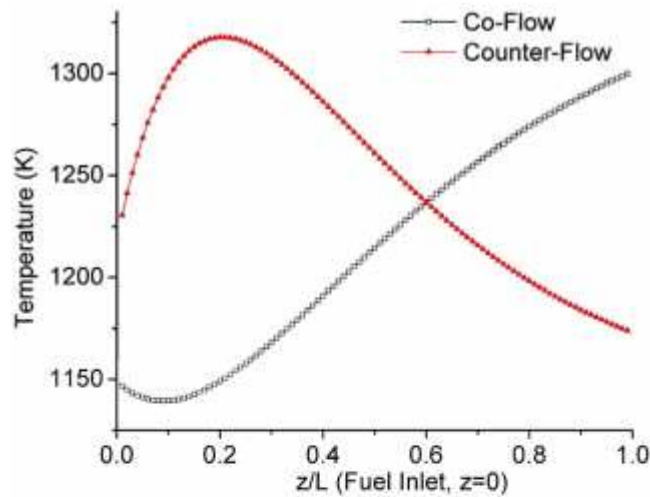
شکل ۱۰ - حداکثر تنشهای اصلی در (الف) SOFC ها ، (ب) ساختارهای PEN و الکترولیت های (ج) برای موارد

مصرف همزمان جریان K۱۲۷۳ و جریان ضد جریان.

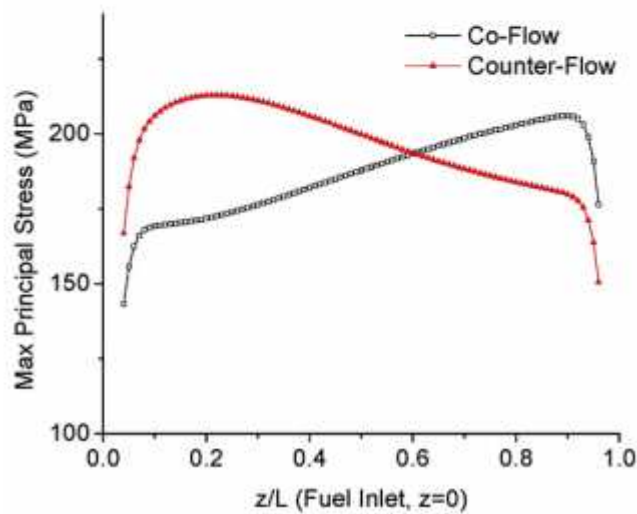
در مورد جریان همزمان SOFC ، همانطور که در شکل ۱۰ (c) نشان داده شده است، یک غلظت تنش کششی در الکترولیت نزدیک به خروجی گاز وجود دارد، زیرا دما در طول جریان گاز به دلیل واکنش الکتروشیمیایی حرارت زا، افزایش می یابد. حداکثر تنش اصلی، در الکترولیت در نزدیکی خروجی سوخت به مقدار ماکزیمم می رسد. دلیل آن این است که تنش کششی در حالی که درجه حرارت در خروجی سوخت SOFC در مورد جریان، به حداکثر مقدار می رسد، با افزایش دما افزایش می یابد. عدم تطابق CTE بین الکترولیت و الکترودها نسبتاً بزرگتر است.

این از شکل ۱۰ (c) متوجه می شویم که غلظت تنش کششی نزدیک به ورودی سوخت در مورد ضد جریان قرار دارد. دلیل آن این است که گرادیان دما در ورودی سوخت به حداکثر می رسد. عدم تطابق CTE بین الکترولیت و الکترودها نسبت به دیگران بزرگتر است. علاوه بر این، تنش با افزایش دما افزایش می یابد. بنابراین، حداکثر مقدار تنش اصلی در الکترولیت در محل حداکثر درجه حرارت به نظر می رسد.

شکل ۱۱ (a) نشان دهنده توزیعات دما در مرکز الکترولیت در امتداد جهت جریان سوخت برای هر دو مورد جریان همزمان و ضد جریان است. در مورد ضد جریان ، درجه حرارت به سرعت در نزدیکی ورودی سوخت افزایش می یابد. گرادیان دمای بزرگتر حدود ۱۰ K میلی متر ۱ در این منطقه یافت می شود. حداکثر تنش اصلی در امتداد جهت جریان سوخت در شکل ۱۱ (b) نشان داده شده است. در مورد جریان همزمان، حداکثر تنش اصلی افزایش می یابد زیرا دما در امتداد جهت جریان سوخت افزایش می یابد. تنش در نزدیکی خروجی سوخت به حداکثر می رسد. در مورد ضد جریان، حداکثر تنش در نزدیکی ورودی سوخت به سرعت در حال افزایش است، زیرا گرادیان درجه حرارت بالا در این حوزه به نظر می رسد. حداکثر تنش اصلی در جلوی این موقعیت که در آن بالاترین درجه حرارت به نظر می رسد، به حداکثر می رسد. نشان داده شده است که درجه حرارت بالاتر و گرادیان بزرگتر دما منجر به تنش های کششی بزرگتر می شود. این به این معنی است که درجه حرارت عملیاتی و تغییرات دما باید در SOFCs برای کاهش تنش حرارتی، کاهش یابد.



(a) Temperature



(b) Max Principal thermal stresses

شکل ۱۱. تنش های اصلی ماکزیمم و دما در مرکز الکترولیت در امتداد جهت جریان سوخت.

#### ۴. نتایج

مدل الکتروشیمیایی قطبش کامل سه بعدی و مدل المان محدود تنش حرارتی سه بعدی برای SOFC مسطح در این مقاله استفاده شده است. واکنش اصلاح داخلی و واکنش جابجایی آب-گاز در شبیه سازی ها برای جریان همزمان و ضد جریان در نظر گرفته می شود. با مشخصات دمایی شبیه سازی شده در SOFC مسطح، تجزیه و تحلیل المان محدود برای محاسبه توزیع تنش حرارتی در SOFC مسطح به کار گرفته شده است. اثرات دما، آند و ضخامت الکترولیت و ضریب عدم تطابق انبساط حرارتی بین مولفه ها مشخص و مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است.



نتایج شبیه سازی سیال-حرارتی نشان داد که گرادیان دما در نزدیکی ورودی سوخت برای الگوی ضد جریان بسیار بزرگتر از الگوی جریان همزمان است. تنش حرارتی به طور عمده از عدم تطابق CTE بین مواد مختلف نشات می گیرد. آند تحت تنش کششی زیادی قرار می گیرد و الکترولیت در مدت اولین خنک کنندگی از دمای پخت تحت تنش فشاری بزرگی قرار می گیرد. زمانی که ساختار PEN به دمای اتاق پس از پخت سرد می شود، ترک ها احتمالا می تواند در ساختار آند ظاهر شود. کاهش شیمیایی از NIO به نیکل در آند متخلخل باعث کاهش سطح تنش مطلق در ساختار PEN به اندازه 20 درصد می شود در حالی که در زمان میانگین، این استحکام آند پایین تر نیز می آید. هنگامی که SOFC در دمای بالاتر کار می کند، تنش های کششی در آند و تنش های فشاری در الکترولیت تا حدودی آرام می شود.

الکترولیت ضخیم تر منجر به تنش های کششی باقی مانده بزرگتری در آند می شود. تنش های فشاری باقی مانده در الکترولیت ها در میان اجزای ساختار PEN حداکثر است. تنش کششی حداکثر در ابتدا در ساختار PEN کاهش می یابد اما پس از آن با افزایش ضخامت آند پایدار می ماند. هر دوی تنش های کششی و تنش فشاری با افزایش درجه حرارت قبل از مونتاژ MICها آرام می شوند. پس از مونتاژ MICها، تنش های فشاری در الکترولیت ها و تنش های کششی را در آند تا حدی آرام می شود در حالی که تنش های کششی در الکترولیت در درجه حرارت بالاتر در SOFC افزایش می یابد. درجه حرارت عملیاتی و گرادیان دما، از عوامل اصلی هستند که باعث تمرکز تنش کششی در الکترولیت می شوند. زمانی که تنش کششی بزرگتر منجر به ترک در آند می شود، گرادیان درجه حرارت پایین تر، مواد نزدیک CTE و الکترولیت نازک تر برای دستیابی به عملکرد بهتر و قابلیت اطمینان بالاتر برای SOFCs توصیه می شوند.

## تشکر و قدردانی

این کار توسط بنیاد علوم طبیعی ملی چین ( گرانت شماره ۵۱۲۷۶۱۴۵ ) پشتیبانی شده است.

## فهرست اصطلاحات و واژه ها

A0 ضریب هدایت

CP ظرفیت گرمایی ویژه  $\text{J mol}^{-1} \text{K}$

D ضریب انتشار  $\text{m}^2 \text{s}^{-1}$

E انرژی فعال سازی  $\text{J mol}^{-1}$

EV ولتاژ، V

En پتانسیل Nernst، V

E مدول یانگ، Pa

F ثابت فارادی،  $\text{mol}^{-1}$  ۹۶۴۸۵

G انرژی آزاد گیبس مولی  $\text{J mol}^{-1}$

G مدول برشی، Pa

H آنتالپی مولی  $\text{J mol}^{-1}$

i چگالی جریان  $\text{A m}^{-2}$

i0 چگالی جریان تبدلی  $\text{A m}^{-2}$

K ثابت تعادل

L فاصله M

L طول سلول، m

$\vec{n}$  بردار واحد نرمال برای واسطه واکنش

فشار P، Pa

P0 فشار استاندارد، Pa

P مقدار ارزیابی فشار، Pa

$W m^{-3}$  Q منبع حرارت

$\Omega m^{-2}$  R مقاومت خاص - منطقه

$s^{-1} m^{-3}$  r. نرخ واکنش حجمی

$J mol^{-1} K^{-1}$  R ثابت گاز جهانی، ۸,۳۱۴

$\Omega$  Rn مقاومت اهمی،

$J mol^{-1} K^{-1}$ ) S آنتروپی مولی

S جزء منبع

T دما، K

$m s^{-1}$  V سرعت

ze الکترون یافته در هر واکنش

حروف یونانی

$K^{-1}$   $\alpha$  ضریب انبساط حرارتی خطی

$\beta$  ضریب انتقال جریان

$\eta$  قطبیت، V

$kg m^{-3}$   $\rho$  چگالی سیال،

$S m^{-1}$   $\sigma$  رسانایی،

$\varphi$  پتانسیل الکتریکی، V

$\zeta$  عامل مقاومت داخلی

$\lambda$  ضریب واکنش استوکیومتری

$\Upsilon$  ضریب ها در معادله. (۳) و (۴)

$\mu$  ویسکوزیته سیال، Pa s

$\epsilon_{ij}$  تانسور کرنش

$\sigma_{ij}$  تانسور تنش، Pa

$\sigma_y$  حد سیستم، Pa

$\nu$  نسبت پواسون

زیر نویس ها

a یک آند

act فعالسازی

b عقب

c کاتد

conc غلظت

el الکترولیت

f رو به جلو

i گونه های شیمیایی

z جهت هماهنگی

ohm اهم

P محصول

r واکنش دهنده

rad تابشی

## References

- [1] U. Pasaogullari, C.Y. Wang, Computational fluid dynamics modeling of solid oxide fuel cells, in: Proc. Electrochem. Soc. (Solid Oxide Fuels Cells VIII, Paris), 7, 2003, p. 1403.
- [2] P.W. Li, K. Suzuki, Numerical modeling and performance study of a tubular SOFC, J. Electrochem. Soc. 151 (2004) A548.
- [3] R.J. Braun, Optimal Design and Operation of Solid Oxide Fuel Cell Systems for Small-scale Stationary Applications, University of Wisconsin, Madison, 2002.
- [4] J.R. Ferguson, J.M. Fiard, R. Herbin, Three-dimensional numerical simulation for various geometries of solid oxide fuel cells, J. Power Sources 58 (1996) 109–122.
- [5] H. Yakabe, T. Ogiwara, M. Hishinuma, I. Yasuda, 3-D model calculation for planar SOFC, J. Power Sources 102 (2001) 144–154.
- [6] J. Malzbender, R.W. Steinbrech, Advanced measurement techniques to characterize thermo-mechanical aspects of solid oxide fuel cells, J. Power Sources 173 (2007) 60–67.
- [7] A. Selcuk, G. Merere, A. Atkinson, The influence of electrodes on the strength of planar zirconia solid oxide fuel cells, J. Mater. Sci. 36 (2001) 1173–1182.
- [8] H. Yakabe, Y. Baba, T. Sakurai, Y. Yoshitaka, Evaluation of the residual stress for anode-supported SOFCs, J. Power Sources 135 (2004) 9–16.
- [9] W. Fischer, J. Malzbender, G. Blass, R. Steinbrech, Residual stresses in planar solid oxide fuel cells, J. Power Sources 150 (2005) 73–77.
- [10] A. Selimovic, M. Kemm, T. Torisson, M. Assadi, Steady state and transient thermal stress analysis in planar solid oxide fuel cells, J. Power Sources 145 (2005) 463–469.
- [11] L. Liu, G.-Y. Kim, A. Chandra, Modeling of thermal stresses and lifetime prediction of planar solid oxide fuel cell under thermal cycling conditions, J. Power Sources 195 (2010) 2310–2318.
- [12] J. Laurencin, G. Delette, F. Lefebvre-Joud, M. Dupeux, A numerical tool to estimate SOFC mechanical degradation: case of the planar cell configuration, J. Eur. Ceram. Soc. 28 (2008) 1857–1869.
- [13] A. Nakajo, F. Mueller, J. Brouwer, D. Favrat, Mechanical reliability and durability of SOFC stacks. Part I: modelling of the effect of operating conditions and design alternatives on the reliability, Int. J. Hydrogen Energy 37 (2012) 9249–9268.
- [14] A. Nakajo, F. Mueller, J. Brouwer, D. Favrat, Mechanical reliability and durability of SOFC stacks. Part II: modelling of mechanical failures during ageing and cycling, Int. J. Hydrogen Energy 37 (2012) 9269–9286.
- [15] K.S. Weil, B.J. Koepfel, Thermal stress analysis of the planar SOFC bonded compliant seal design, Int. J. Hydrogen Energy 33 (2008) 3976–3990.
- [16] T.L. Jiang, M.-H. Chen, Thermal-stress analyses of an operating planar solid oxide fuel cell with the bonded compliant seal design, Int. J. Hydrogen Energy 34 (2009) 8223–8234.
- [17] X. Zhang, G. Li, J. Li, Z. Feng, Numerical study on electric characteristics of solid oxide fuel cells, Energy Convers. Manage. 48 (2007) 977–989.
- [18] S.H. Chan, K.A. Khor, Z.T. Xia, A complete polarization model of a solid oxide fuel cell and its sensitivity to the change of cell component thickness, J. Power Sources 93 (2001) 130–140.
- [19] P. Costamagna, K. Honegger, Modeling at solid oxide heat exchanger integrated stacks and simulation at high fuel utilization, J. Electrochem. Soc. 145 (1998) 3995–4007.
- [20] E. Achenbach, E. Riensche, Methane/steam reforming kinetics for solid oxide fuel cells, J. Power Sources 52 (1994) 283–288.
- [21] W. Tao, Numerical Heat Transfer, Xi'an Jiaotong University Press, Xi'an, 2001, pp. 311–313.
- [22] F. Fluent, 6.3 User's Guide, Fluent Inc, 2006.
- [23] R.B. Hetnarski, M.R. Eslami, Thermal Stresses – Advanced Theory and Applications, Springer London, Limited, 2008.
- [24] L. Petruzzi, S. Cocchi, F. Fineschi, A global thermo-electrochemical model for SOFC systems design and engineering, J. Power Sources 118 (2003) 96–107.
- [25] A. Nakajo, J. Kuebler, A. Faes, U.F. Vogt, H.J. Schindler, L.-K. Chiang, S. Modena, T. Hocker, Compilation of mechanical properties for the structural analysis of solid oxide fuel cell stacks. Constitutive materials of anode-supported cells, Ceram. Int. 38 (2012) 3907–3927.
- [26] X. Zhang, J. Li, G. Li, Z. Feng, Numerical study on the thermal characteristics in a tubular solid oxide fuel cell with indirect internal reformer, Int. J. Therm. Sci. 48 (2009) 805–814.
- [27] E. Achenbach, SOFC Stack Modeling, in: Final Report of Activity A2, Annex II: Modelling and Evaluation of Advanced Solid Oxide Fuel Cells, in., Juelich, Germany, March, 1996.



این مقاله، از سری مقالات ترجمه شده رایگان سایت ترجمه فا میباشد که با فرمت PDF در اختیار شما عزیزان قرار گرفته است. در صورت تمایل میتوانید با کلیک بر روی دکمه های زیر از سایر مقالات نیز استفاده نمایید:

لیست مقالات ترجمه شده ✓

لیست مقالات ترجمه شده رایگان ✓

لیست جدیدترین مقالات انگلیسی ISI ✓

سایت ترجمه فا ؛ مرجع جدیدترین مقالات ترجمه شده از نشریات معتبر خارجی