

## شبیه‌سازی رفتار دینامیکی پیل سوختی اکسید جامد لوله‌ای در تغییر پله‌ای بار الکتریکی خارجی

یاسر ملایی برزی، مجید قاسمی و محمد حسین حامدی

**چکیده:** هدف از این مطالعه بررسی رفتار گذرای یک پیل سوختی اکسید جامد لوله‌ای با تغییر ناگهانی بار الکتریکی خارجی، با استفاده از مدلسازی عددی پیل می‌باشد. مدل ارائه شده برای شبیه‌سازی رفتار گذرای پیل معادلات گذرای جریان، انرژی، بقای اجزای شیمیایی و همچنین معادلات الکتریکی را در یک تک سلول پیل اکسید جامد لوله‌ای حل کرده و پاسخ زمانی پارامترهای خروجی پیل را با تغییر بار الکتریکی به صورت تغییر پله‌ای جریان الکتریکی محاسبه می‌کند. برای شبیه‌سازی رفتار گذرای پیل ابتدا یک شرایط عملکرد دائم به عنوان شرط اولیه در نظر گرفته شده و سپس با تغییر بار الکتریکی، تغییر زمانی پارامترهای خروجی تا رسیدن به حالت دائم جدید بررسی می‌شود. نتایج حاصل به طور کلی نشان می‌دهد که افزایش پله‌ای جریان الکتریکی باعث کاهش ولتاژ پیل در طول زمان حدود ۷۰۰ ثانیه برای رسیدن به حالت دائم جدید خواهد شد.

**واژه‌های کلیدی:** پیل سوختی اکسید جامد لوله‌ای، SOFC، انتقال جرم، انتقال حرارت، شبیه‌سازی عددی گذرا، پتانسیل مدار باز.

### ۱. مقدمه

در سالهای اخیر پیل‌های سوختی به عنوان یکی از تکنولوژی‌های تولید توان با آلاینده‌گی پایین و بازدهی بالا مورد توجه قرار گرفته‌اند. در بین انواع پیل‌های سوختی پیل‌های اکسید جامد برای کاربردهای متنوع، بخصوص برای تولید توان به صورت ثابت همراه با سیکل‌های توربین‌های گاز از اهمیت ویژه‌ای برخوردار می‌باشند [۱]. هم‌اکنون حجم وسیعی از تحقیقات برای سوق دادن این تکنولوژی به سمت صنعتی شدن در حال انجام می‌باشد. یکی از مشکلات این نوع پیل‌ها پاسخ نسبتاً کند آن به تغییر زمانی پارامترهای ورودی می‌باشد. علاوه بر این راه‌اندازی سریع این نوع

این مقاله در تاریخ ۸۵/۱۱/۱۰ دریافت و در تاریخ ۸۷/۴/۴ به تصویب نهایی رسیده است.

یاسر ملایی برزی، دانشجوی دکتری مهندسی مکانیک دانشگاه صنعتی خواجه نصیر  
y\_mollayi@dena.kntu.ac.ir  
دکتر مجید قاسمی، دانشیار دانشکده مکانیک دانشگاه صنعتی خواجه نصیر  
ghasemi@kntu.ac.ir  
دکتر محمد حسین حامدی، استاد دانشکده مکانیک دانشگاه صنعتی خواجه نصیر  
hamed@kntu.ac.ir

پیل به خاطر دمای بالای عملکرد آن امکان پذیر نمی‌باشد. بنابراین تحلیل عملکرد گذرای این نوع پیل جهت پیش‌بینی رفتار و عملکرد دینامیکی آن و پی‌بردن به پارامترهای موثر مفید خواهد بود.

در سال ۱۹۹۴ Achenbach [۲] رفتار دینامیکی یک پیل سوختی اکسید جامد صفحه‌ای را برای اولین بار مورد بررسی قرار داد. او تغییرات ولتاژ گذرای سلول را با تغییر دما و جریان با فرض یکنواختی توزیع دما و اجزای شیمیایی در سراسر پیل، محاسبه کرد. Hall و همکارانش (۱۹۹۹) [۳] یک مدل ترمودینامیکی برای پیش‌بینی عملکرد گذرای پیل سوختی اکسید جامد ارائه کرد. همچنین Sedghisigarchi و Feliachi [۴] جهت تهیه یک مدل دینامیکی جدید از پیل معادلات ساده شده بقای اجزا و انتقال حرارت را به صورت همزمان با فرض غیر ویسکوز و یک بعدی بودن جریان حل کردند. Xue و همکارانش [۵] یک مدل گذرای یک بعدی برای انتقال جرم و حرارت یک پیل اکسید جامد لوله‌ای در نظر گرفتند که در آن یک مدار معادل الکتریکی شامل مقاومت‌های اهمی در جهت شعاعی و مجموعه‌ای از خازن‌ها برای حالت عملکرد ذخیره انرژی برای شبیه‌سازی الکتریکی پیل استفاده شد.

جزئیات مشخصات هندسی پیل در جدول ۱ [۸] مشخص شده است.

### جدول ۱. مشخصات هندسی پیل مورد بررسی [۸]

Supporting tube	1500
cathode	1000
electrolyte	50
anode	150
قطر (mm)	
Inner side of air-inducing tube	8.0
Outer side of air-inducing tube	9.0
Inner side of supporting tube	13.8
Outer side of anode	19.2
Outer diameter of fuel channel	29.2
Length of cell (mm)	500

### ۲-۱. معادلات جریان، انتقال جرم و انرژی در پیل

معادلات گذرای مومنتوم، انتقال حرارت و جرم در مختصات استوانه‌ای به صورت یکپارچه به شرح زیر به کار برده شده و در نواحی جامد سرعت سیال صفر قرار داده می‌شود.

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho uu)}{\partial x} + \frac{1}{r} \frac{\partial(r \rho v u)}{\partial r} = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \mu \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \quad (1)$$

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \mu \frac{\partial u}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left( \mu \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \mu \frac{\partial v}{\partial x} \right) + \frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho v u)}{\partial x} + \frac{1}{r} \frac{\partial(r \rho v v)}{\partial r} = -\frac{\partial p}{\partial r} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \mu \frac{\partial v}{\partial x} \right) + \quad (2)$$

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \mu \frac{\partial v}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left( \mu \frac{\partial v}{\partial x} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \mu \frac{\partial v}{\partial r} \right) - \frac{2\mu v}{r^2} + \frac{\partial(\rho C_p T)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho C_p u T)}{\partial x} + \frac{1}{r} \frac{\partial(r \rho C_p v T)}{\partial r} = \quad (3)$$

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \lambda \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \dot{q} + \frac{\partial(\rho Y_j)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u Y_j)}{\partial x} + \frac{1}{r} \frac{\partial(r \rho v Y_j)}{\partial r} = \quad (4)$$

منابع گرمی و حرارتی در معادلات بالا در هر گره در شبکه بندی انجام شده به ترتیب زیر محاسبه می‌شوند [۸]. منبع حرارتی حاصل از مقاومت اهمی در آند (گرمای ژول) در گره p از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$\dot{Q}_{Ohmic}^a = I^2 \cdot R_p^a, \quad R_p^a = \left( \delta^a \rho_p^a / \Delta A \right) \quad (5)$$

برای محاسبه گرمای ژول در کاتد و الکتروود نیز رابطه بالا با تغییر ضخامت و ضریب هدایت ویژه برای مواد مختلف به کار می‌رود. گرما حجمی ناشی از پلاریزاسیون فعال سازی در آند و کاتد به صورت زیر می‌باشد:

$$\dot{Q}_{Act}^a = I \cdot \eta_{Act}^a / (\Delta V^a) \quad (6)$$

$$\dot{Q}_{Act}^c = I \cdot \eta_{Act}^c / (\Delta V^c)$$

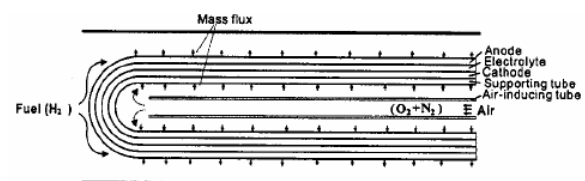
Qi و همکارانش [۶] یک مدل عددی نیمه دوبعدی از یک پیل سوختی اکسید جامد با فرض تغییرات پارامترها تنها در جهت حرکت سیال با استفاده از روش حجم کنترل ارائه کردند. در مدل آنها طول سلول به چندین بخش به صورت سری تقسیم شده و هر بخش به پنج ناحیه شامل لوله هوا، کانال هوا (رفت و برگشت)، بدنه سلول (آند، کاتد، و الکتروولیت) و کانال سوخت تقسیم می‌شود. در نهایت آنها یک دستگاه معادلات دیفرانسیل غیر خطی از مجموعه معادلات انتقال جرم و حرارت همچنین متغیرهای الکتریکی و الکتروشیمیایی بدست آورده و با حل همزمان این معادلات پاسخ زمانی پیل به تغییرات بار الکتریکی را محاسبه کردند. در هیچ یک از مدل‌های توسعه داده شده تاثیرات بعد دوم پیل (جهت شعاعی) روی عملکرد دینامیکی پیل اکسید جامد لوله ای (TSOFC) در نظر گرفته نشده است. در این مقاله یک مدل دوبعدی و گذرا از انتقال جرم و حرارت و همچنین جریان الکتریکی برای پیش بینی رفتار دینامیکی پیل ارائه می‌شود.

### ۲. هندسه و معادلات حاکم

در این مطالعه یک پیل سوختی اکسید جامد لوله ای از نوع anode supported نشان داده شده در شکل ۱ در نظر گرفته شده است [۸]. فضای محاسباتی شامل کانالهای سوخت و هوا، لوله ورودی هوا و مجموعه لایه‌های آند، کاتد و الکتروولیت و لوله نگهدارنده (supporting tube) می‌باشد.

فرضیات برای شبیه‌سازی پیل به شرح زیر در نظر گرفته شده‌اند:

- با توجه به تقارن محوری (axisymmetric)، جریان در پیل به صورت دو بعدی و گذرا فرض شده و نصف پیل به عنوان مدل هندسی در نظر گرفته می‌شود.
- از یک شبکه مقاومت‌های معادل الکتریکی برای شبیه سازی مقاومت داخلی پیل و محاسبه توزیع جریان در آن استفاده می‌شود.
- جریان سوخت و هوا به دلیل سرعت پایین آرام هستند.
- از انتقال حرارت تشعشع داخل پیل به دلیل اختلاف دمای نسبتاً کم بین سطوح صرف نظر می‌شود.
- مخلوط هیدروژن و بخار آب به عنوان سوخت، و هوا به عنوان اکسید کننده در نظر گرفته می‌شود.



شکل ۱. نمای دوبعدی از اجزاء و نحوه عملکرد تک سلول پیل سوختی اکسید جامد لوله ای [۸]

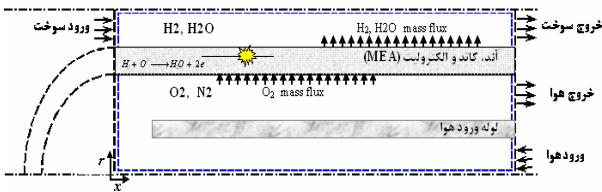
گره  $P$  روی آند و گره  $P'$  روی کاتد در نظر گرفته شده و مقاومت الکتریکی بین گره مرد نظر و گره های همسایه آن روی شکل مشخص شده است. بین گره  $P$  و  $P'$  منبع ولتاژ موضعی نرنست به صورت یک منبع توان در نظر گرفته شده و مقاومت های اهمی الکترولیت و مقاومت اکتیواسیون آند و کاتد با  $RE_{pp'}$  مشخص شده است. ولتاژ بین دو گره  $P$  و  $P'$  از رابطه زیر محاسبه می شود.

$$V_{pp'} = E_p - \eta_{p,a}^{act} - \eta_{p,c}^{act} - R_{p,e}^{ohm} I_p \quad (11)$$

برای محاسبه توزیع جریان و ولتاژ در پیل، دستگاه معادلات حاصل از اعمال قانون کیرشهف در هر گره در شبکه الکتریکی حل شده و ولتاژ در هر گره و جریان در هر شاخه از مدار محاسبه می شود.

### ۳. شرایط مرزی

مدل هندسی مورد نظر برای شبیه سازی عملکرد پیل در شکل ۳ نشان داده شده است. بر اساس این هندسه شرایط مرزی برای معادلات مومنتوم، بقای انرژی و جرم به صورت زیر هستند:



شکل ۳. مدل هندسی در نظر گرفته شده برای پیل

۱- در محور متقارن، یا در  $r = 0$ ،  $v = 0$  و  $\frac{\partial \phi}{\partial r} = 0$  که  $\phi$

متغیر عمومی به جز  $v$  می باشد.

۲- در دورترین مرز  $r = r_0$  (که مرز جدایش دو سلول مجاور می باشد) شرایط عایق گرمایی، نفوذ ناپذیری گونه ها و عدم واکنش شیمیایی فرض می شود و نهایتاً در این مرز:  $v = 0$  و  $\frac{\partial \phi}{\partial r} = 0$  که  $\phi$  به متغیرهای عمومی به جز  $v$  بر می گردد.

محدوده حل به دلیل تقارن از محور استوانه پیل ( $r = 0$ ) تا مرز جدایش دو سلول مجاور ( $r = r_0$ ) در نظر گرفته می شود.

۳- در  $x = 0$  ورودی سوخت، کسر جرمی گونه ها، دما و سرعت یکنواخت و برابر با شرایط ورودی در نظر گرفته می شود. در قسمت جامد  $u = 0$ ،  $v = 0$  و  $\frac{\partial T}{\partial x} = 0$  و برای سوخت،

$$u = U_{fuel,in}, v = 0, \frac{\partial Y_j}{\partial x} = 0 \text{ و } \frac{\partial T}{\partial x} = 0 \text{ می باشد.}$$

۴- در  $x = l$  ورودی هوا، کسر جرمی گونه ها، دما و سرعت، یکنواخت و برابر با شرایط ورودی هوا در نظر گرفته

می شود:  $v = 0$  و  $\frac{\partial Y_j}{\partial x} = 0$  و در خروجی گاز  $\frac{\partial u}{\partial x} = 0$ ،  $v = 0$

تولید گرمای ترمودینامیکی ناشی از واکنش الکتروشیمیایی، که در وجه مشترک آنود/کاتد در روی محیط استوانه اتفاق می افتد به صورت زیر می باشد:

$$\dot{Q}_p^R = (\Delta H - \Delta G) \cdot I_p / (2F) \quad (7)$$

همچنین منابع جرمی در آند و کاتد که در سطح تماس آنها با سوخت و هوا به صورت شرط مرزی ورود جریان از دیواره اعمال می شود از رابطه ۸ محاسبه می شود.

$$\dot{m}_{fuel} = \frac{I}{n_e^{fuel} F}, \quad \dot{m}_{o_2} = \frac{I}{n_e^{o_2} F}, \quad \dot{m}_{H_2O} = \frac{I}{n_e^{H_2O} F} \quad (8)$$

### ۲-۲. معادلات الکتریکی و الکتروشیمیایی

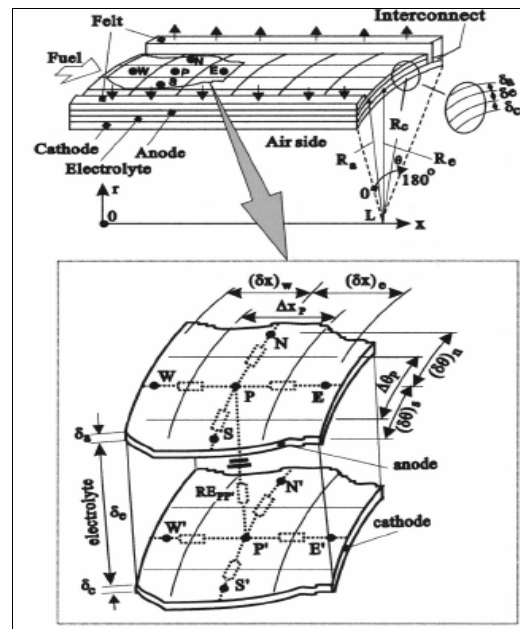
نیروی الکتروموتوری ایدال پیل و افت های اکتیواسیون در آند و کاتد از معادلات ۹ و ۱۰ محاسبه می شوند [۱].

$$E = \frac{-\Delta G}{n_e F} = \frac{-\Delta G^0}{2F} + \frac{RT}{2F} \ln \frac{(P_{O_2}/P^0)^{0.5} (P_{H_2}/P^0)}{(P_{H_2O}/P^0)} \quad (9)$$

$$\eta_c = \frac{I_p}{A_p \left( \frac{4F}{RT} k_c \left( \frac{P_{O_2}}{p} \right)^{0.25} \exp\left(-\frac{U_c}{RT}\right) \right)} \quad (10)$$

$$\eta_a = \frac{I_p}{A_p \left( \frac{4F}{RT} k_a \left( \frac{P_{H_2}}{p} \right)^{0.25} \exp\left(-\frac{U_a}{RT}\right) \right)}$$

برای محاسبه توزیع ولتاژ و جریان و همچنین جریان کل خروجی ناشی از یک ولتاژ بار خارجی مشخص در پیل یک شبکه الکتریکی در نظر گرفته می شود که شامل مجموعه ای از مقاومت های الکتریکی موضعی و منابع توان می باشد. این شبکه الکتریکی به صورت سه بعدی در شکل ۲ نشان داده شده است.



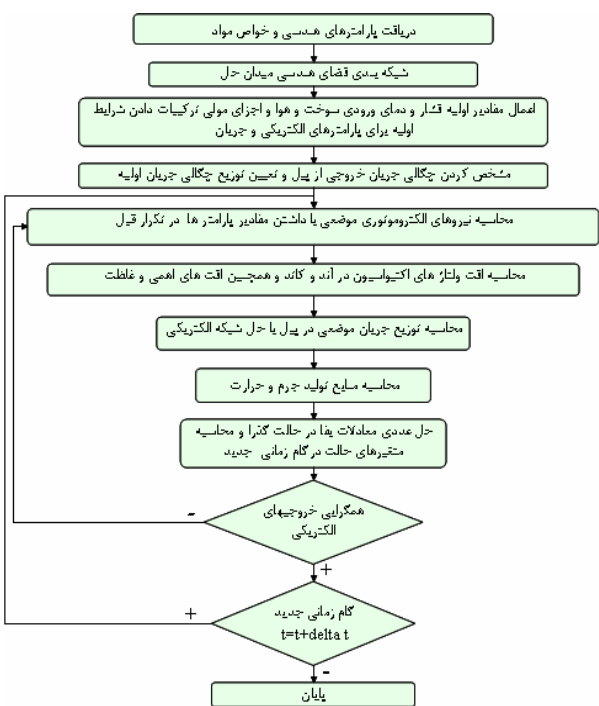
شکل ۲. نمای سه بعدی از مدار معادل الکتریکی

پیل در گره  $p$

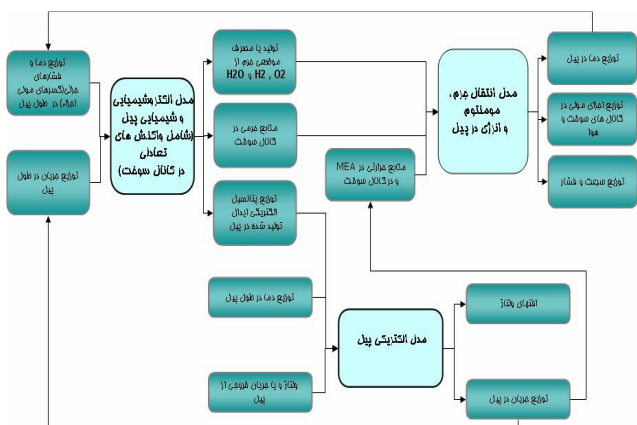
۴. روش شبیه سازی عملکرد گذرای پیل

فلوچارت روند حل معادلات در شکل ۴ و جریان داده ها بین سه بخش اصلی مدل (مدل الکتریکی، مدل الکتروشیمیایی و مدل جریان و انتقال حرارت) در کد کامپیوتری، در شکل ۵ نشان داده شده است.

قابل ذکر است که در حالتی که مدل غیر دائم برای تغییرات از یک حالت کارکرد معین اولیه، به کار برده شود باید ابتدا حالت اولیه در یک مدل دائم حل شده سپس این نتایج به عنوان شرایط اولیه در مدل گذرا به کار برده شود.



شکل ۴. فلوچارت روند حل معادلات با زمان



شکل ۵. جریان داده‌ها بین سه مدل اصلی در شبیه سازی (مدل الکتریکی، مدل الکتروشیمیایی و مدل جریان و انتقال حرارت) در کد کامپیوتری

می باشد. در قسمت جامد ابتدا و انتهای لوله  $\frac{\partial Y_j}{\partial x} = 0, \frac{\partial T}{\partial x} = 0$

شرط عدم لغزش  $\frac{\partial T}{\partial x} = 0, v=0, u=0$  می باشد.

سرعت‌های ورودی سوخت و هوا از روابط زیر به دست می آید [۷]:

$$u_{fuel} = \left( \frac{A_{cell} i_{cell}}{2FU_{H_2} X_{H_2} A_{fuel}} \right) \frac{RT_f}{P_f} \quad (12)$$

$$u_{air} = \left( \frac{A_{cell} i_{cell}}{4FU_{O_2} X_{O_2} A_{air}} \right) \frac{RT_{air}}{P_{air}} \quad (13)$$

که در آن،  $i$  چگالی جریان پیل و  $A$  مساحت سطح خارجی پیل می باشد.  $A_{air}$  و  $A_{fuel}$  مساحت های سطح مقطع عبور سوخت و هوا هستند و  $T_{air}, T_{fuel}, P_{air}, P_{fuel}$  به ترتیب فشار و دمای ورودی جریان های سوخت و هوا می باشند.  $X_{O_2}$  و  $X_{H_2}$  به ترتیب کسرهای مولی هیدروژن سوخت و اکسیژن هوا بوده و  $U_{H_2}$  و  $U_{O_2}$  ضرایب مصرف هیدروژن و اکسیژن می باشند. ضریب مصرف در کانال سوخت به معنای نسبت دبی جرمی هیدروژن مصرفی در پیل (که به ازای یک چگالی جریان مشخص از معادله فارادی محاسبه می شود) به دبی جرمی کل سوخت ورودی، و برای کانال هوا نسبت اکسیژن مصرفی به کل هوای ورودی می باشد.

۵- در سطح تماس کاتد/ هوا  $r = r_{air}$  و آند/ سوخت  $r = r_f$  شرط عدم لغزش یا  $u=0$  در نظر گرفته می شود. در مسیر جریان سوخت، مقدار جریان جرمی، به خاطر انتقال یافتن یون های اکسیژن افزایش می یابد و به طور مشابه، مقدار جریان هوا در مسیر جریان هوا به خاطر یونیزه کردن اکسیژن و انتقال یون های اکسید به طرف سوخت کاهش می یابد. بنابراین، سرعت های شعاعی  $r = r_f$  به صورت زیر هستند:

$$v_f = \frac{\sum \dot{m}_x^{fuel, species}}{\rho_x^{fuel}} \Big|_{r=r_f} \quad (14)$$

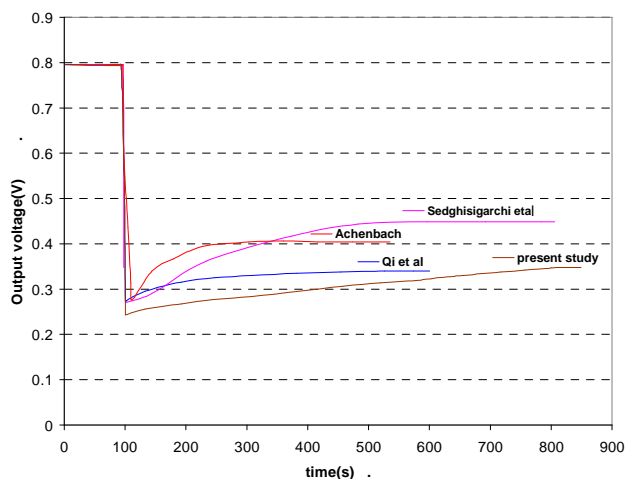
$$v_{air} = \frac{\sum \dot{m}_x^{air, species}}{\rho_x^{air}} \Big|_{r=r_{air}} \quad (15)$$

که  $\dot{m} (kg/m^2s)$  شار جرمی سوخت و هوا می باشد، که از واکنش الکتروشیمیایی در پیل سوختی ناشی می شود. کسرهای جرمی تمام اجزای شیمیایی شرکت کننده، در مرزهای  $r = r_f$  با لحاظ کردن اثرات جابجایی و نفوذ جرم از روی سطح با شرایط مرزی زیر محاسبه می شوند:

$$m_x^{j, air} = -D_{j, air} \rho_x^{air} \frac{\partial Y_j}{\partial r} + \rho_x^{air} Y_j v_{air} \quad (16)$$

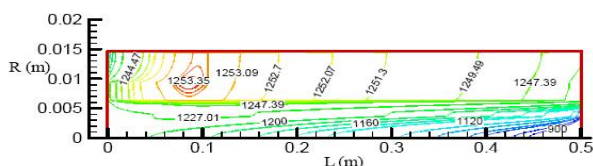
$$m_x^{j, fuel} = -D_{j, fuel} \rho_x^{fuel} \frac{\partial Y_j}{\partial r} + \rho_x^{fuel} Y_j v_f \quad (17)$$

سازی انجام شده در این مطالعه با مطالعات قبلی مطابقت دارد. همچنین ولتاژ عملکرد دائم پیل در دو حالت اولیه و ثانویه با آخرین مطالعه انجام شده توسط Qi [۶] تقریباً یکسان می باشد. اگر چه در این مطالعه زمان رسیدن به حالت دائم بیشتر می باشد (حدود ۷۰۰ ثانیه). این اختلاف به خاطر گرادیان شعاعی متغیرهای حالت (مانند دما و کسر مولی اجزای شیمیایی) و زمانی که برای نفوذ تغییرات آنها در کل ناحیه نیاز است می باشد که در تحلیل های ترمودینامیکی یا یک بعدی قابل محاسبه نخواهد بود.

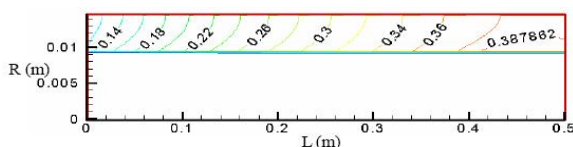


شکل ۷. تغییرات زمانی ولتاژ پیل در یک تغییر پله ای بار الکتریکی

شکل های ۸ تا ۱۰ نیز به ترتیب کانتورهای دما و کسر جرمی بخار آب و اکسیژن را در پیل در چگالی جریان  $3000 \text{ A/m}^2$  نشان می دهند. در این حالت ولتاژ خروجی پیل حدود  $0.7 \text{ V}$  و ولت محاسبه می شود. کانتورهای دمای بدست آمده گرادیان نسبتاً شدید دما در جهت شعاعی و طولی و ماکزیمم دمای حدود  $980$  درجه سانتیگراد را نشان می دهد. همچنین کانتورهای کسر جرمی افزایش کسر جرمی بخار و کاهش کسر جرمی اکسیژن را در طول پیل نشان می دهد که بدلیل واکنش الکتروشیمیایی اکسیژن با هیدروژن و تولید بخار آب می باشد.



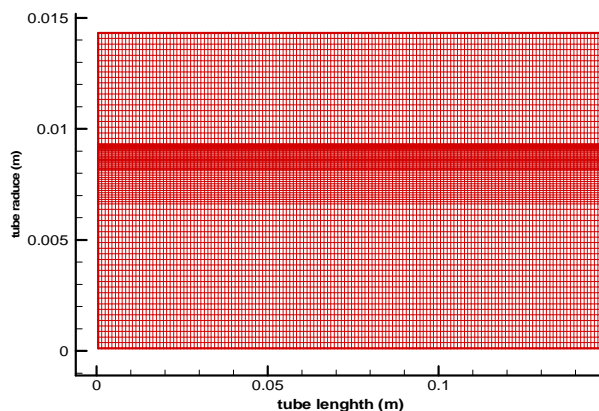
شکل ۸. توزیع دما در پیل سوختی اکسید جامد (K)



شکل ۹. کانتورهای کسر جرمی بخار آب در پیل سوختی اکسید جامد

## ۵. روش عددی حل معادلات بقا در حالت گذرا

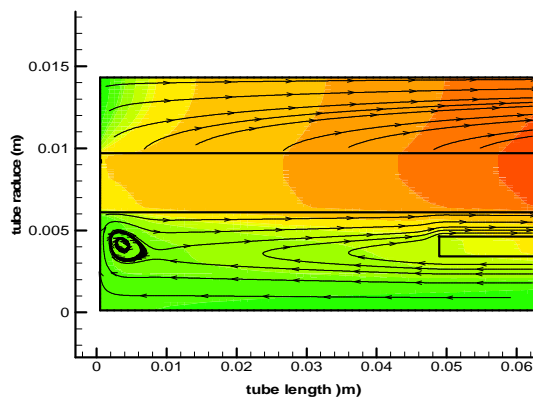
در این تحقیق برای حل معادلات مومنتوم (در جهت های  $x$  و  $y$ ) و معادلات بقای اجزای شیمیایی (شامل سه جزء اکسیژن، هیدروژن و بخار آب) و همچنین معادله انرژی، از الگوریتم سیمپل و با روش حجم محدود استفاده شده است. جزئیات این روش در مرجع [۹] موجود می باشد. با توجه به اینکه شبیه سازی پیل شامل نواحی مختلف از جمله جریان هوا و سوخت همچنین نواحی جامد شامل لوله هوا و لوله مربوط به الکترولیت، آند و کاتد می باشد برای حل معادلات از یک معادله واحد برای همه نواحی استفاده شده ولی مقدار سرعت در نواحی جامد صفر و خواص مواد مختلف در نواحی مختلف اعمال می شود. برای شبکه بندی مدل مورد نظر از یک شبکه مستطیلی با تعداد شبکه  $640 \times 220$  در راستای به ترتیب طول لوله و شعاعی آن استفاده شده است. این تعداد شبکه طوری تنظیم شده که نتایج مدل عددی مستقل از تعداد شبکه شود. شبکه مذکور در راستای طولی یکنواخت ولی در راستای شعاعی به دلیل ضخامت بسیار کم لایه های الکترولیت و آند غیر یکنواخت می باشد. به طوری که در نواحی کانال سوخت و هوا برای کاهش حجم محاسبات شبکه درشت تر ولی در ناحیه جامد مربوط به الکترولیت، آند و کاتد برای پوشش دادن ضخامت کم آنها ریز تر در نظر گرفته شده است. شکل ۶ ابعاد و شبکه بندی انجام شده در قسمتی از مدل (ابتدای سمت چپ) را نشان می دهد. همانطور که مشاهده می شود در ناحیه کاتد شبکه ریز تر شده و در ناحیه الکترولیت شبکه ها کمترین ضخامت را دارند.



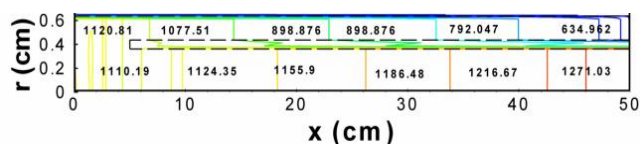
شکل ۶. شبکه بندی انجام شده در قسمتی از مدل (ابتدای سمت چپ پیل)

## ۶. نتایج و بحث

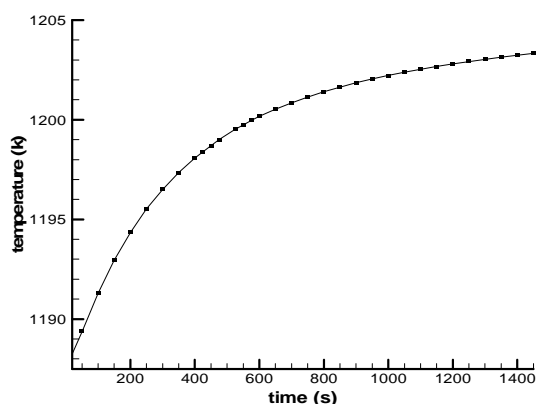
جهت ارزیابی نتایج بدست آمده از مطالعه حاضر تغییرات زمانی ولتاژ پیل در شبیه سازی انجام شده در یک تغییر پله ای بار با نتایج ارائه شده در حالت مشابه توسط محققین دیگر مقایسه شده است (شکل ۷). همانطور که مشاهده می شود روند تغییرات ولتاژ در شبیه



شکل ۱۲. خطوط جریان در کانال های سوخت و هوا در انتهای بسته پیل



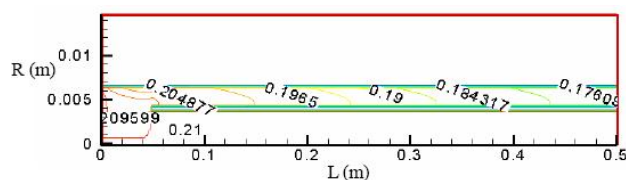
شکل ۱۳. کانتورهای فشار در کانال های سوخت و هوا



شکل ۱۴. تغییرات زمانی دما در الکترولیت در موقعیت حدود ۰/۱ متر از ابتدای پیل در کاهش پله ای جریان بار به اندازه  $500 \text{ A/m}^2$

همان طور که در شکل ۱۵ مشاهده می شود در نیمه اول پیل دما با زمان افزایش یافته ولی در نیمه دوم دما کاهش می یابد. همچنین ماکزیمم دمای الکترولیت با زمان با کاهش بار الکتریکی کاهش می یابد. این امر می تواند به دلیل کاهش دبی هوا کاهش تاثیر خنک کنندگی آن و از طرفی کاهش منابع حرارتی الکتریکی ناشی از کاهش جریان باشد. ضمناً در ابتدا ماکزیمم دما در حدود ۳۰ سانتیمتری از پیل واقع شده ولی سپس با گذشت زمان محل ماکزیمم دما به سمت ابتدای پیل پیش می رود.

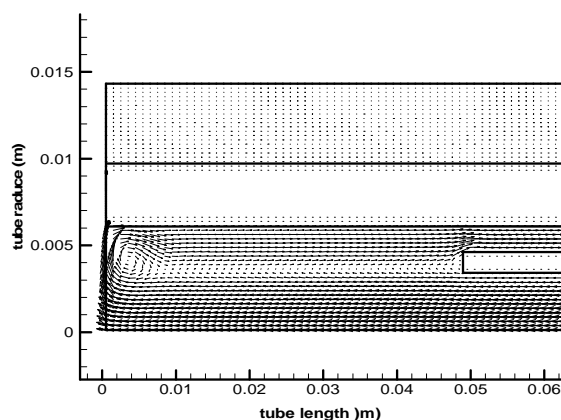
نهایتاً کسر جرمی اکسیژن در خروجی هوا حدود ۰/۱۷ و کسر جرمی بخار آب در خروجی سوخت به حدود ۰/۳۸ می رسد.



شکل ۱۵. کانتورهای کسر جرمی اکسیژن در پیل سوختی اکسید جامد

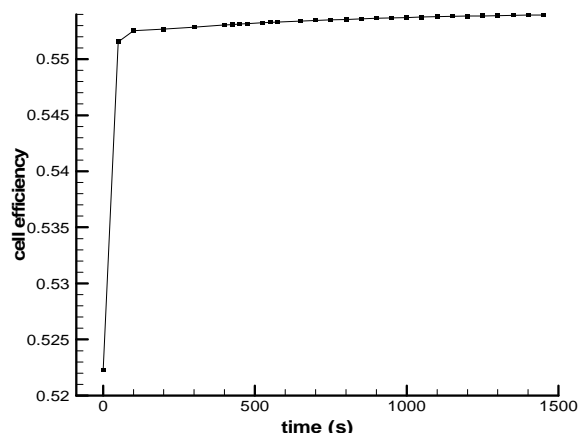
شکل های ۱۱ و ۱۲ بردارهای سرعت و خطوط جریان را در انتهای کانال هوا و در ورودی کانال سوخت نشان می دهد. همانطور که از جهت خطوط جریان در کانال سوخت مشاهده می شود بخار آب حاصل از واکنش الکتروشیمیایی هیدروژن و اکسیژن از دیواره آند وارد کانال سوخت شده و با جریان سوخت مخلوط می شود. همچنین از سمت کاتد اکسیژن مکش می شود.

شکل ۱۳ تغییرات فشار را در کانال هوا نشان می دهد. همانطور که مشاهده می شود هوا با فشار آتمسفریک وارد و افت فشار در کانل هوا از ورودی تا خروجی حدود ۶۴۰ پاسکال محاسبه شده است. این تغییرات در کانال سوخت با توجه به دبی بسیار کمتر آن و مسیر مستقیم جریان بسیار پایین تر می باشد.



شکل ۱۱. بردارهای سرعت در کانال های سوخت و هوا در انتهای بسته پیل

شکل ۱۴ تغییرات زمانی دما در الکترولیت در موقعیت حدود ۰/۱ متر از ابتدای پیل در کاهش پله ای جریان بار از  $3500 \text{ A/m}^2$  تا  $3000 \text{ A/m}^2$  را نشان می دهد. همانطور که مشاهده می شود دما در ابتدا از حدود ۱۱۹۰ کلوین حدود ۱۴۰۰ ثانیه به حالت دائم ثانویه در دمای حدود ۱۲۰۴ کلوین می رسد. شکل ۱۵ تغییرات دمای الکترولیت با طول پیل در گام های زمانی مختلف را نشان می دهد. فلش های رسم شده جهت افزایش دما با زمان را مشخص می کند.

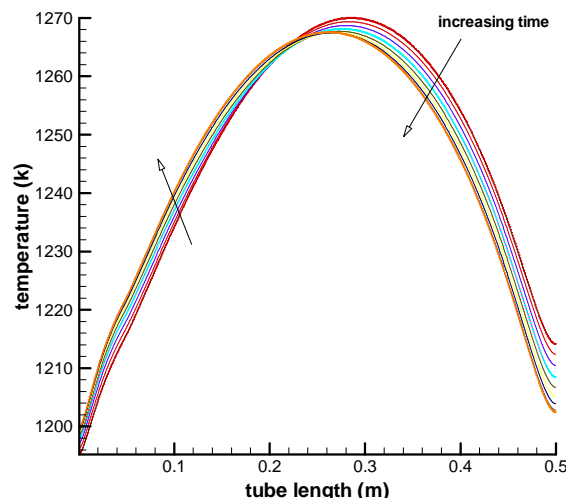


شکل ۱۷. تغییرات زمانی بازده پیل در الکترولیت در کاهش پله ای دانسیته جریان بار از  $3500 \text{ A/m}^2$  تا  $3000 \text{ A/m}^2$

### ۷. جمع بندی و نتیجه گیری

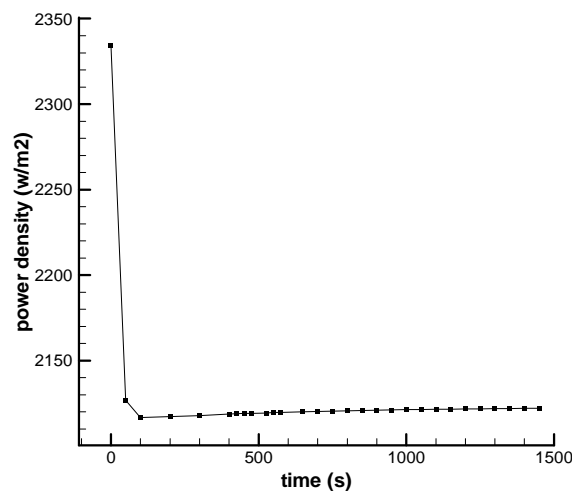
از شبیه سازی انجام شده به طور کلی نتایج زیر قابل برداشت می باشد.

- افزایش پله ای جریان الکتریکی باعث کاهش ولتاژ پیل در طول زمان حدود ۷۰۰ ثانیه برای رسیدن به حالت دائم جدید خواهد شد. به خاطر گرادیان شعاعی متغیرهای حالت (مانند دما و کسر مولی اجزای شیمیایی)، زمانی که برای نفوذ تغییرات این متغیرها در کل ناحیه نیاز است در تحلیل های ترمودینامیکی یا یک بعدی قابل محاسبه نخواهد بود که در این مطالعه تاثیر آنها لحاظ شده است.
- کانتورهای دمای بدست آمده گرادیان نسبتاً شدید دما در جهت شعاعی و طولی و ماکزیمم دمای حدود ۹۸۰ درجه سانتیگراد را نشان می دهد.
- کانتورهای کسر جرمی افزایش کسر جرمی بخار و کاهش کسر جرمی اکسیژن را در طول پیل نشان می دهد که بدلیل واکنش الکتروشیمیایی اکسیژن با هیدروژن و تولید بخار آب می باشد.
- با کاهش پله ای بار الکتریکی در نیمه اول پیل دما با زمان افزایش یافته ولی در نیمه دوم دما کاهش می یابد. همچنین ماکزیمم دمای الکترولیت با زمان با کاهش بار الکتریکی کاهش می یابد. این امر می تواند به دلیل کاهش دبی هوا کاهش تاثیر خنک کنندگی آن و از طرفی کاهش منابع حرارتی الکتریکی ناشی از کاهش جریان باشد.
- مشخصات الکتریکی پیل نسبت به پارامترهای حالت خیلی زودتر (زمان کمتر) با شرایط جدید اعمالی بر پیل سازگار می شوند و به حالت دائم می رسد.
- بازده پیل با کاهش جریان بار الکتریکی افزایش می یابد.



شکل ۱۵. تغییرات دمای الکترولیت با طول پیل در گام های زمانی مختلف

شکل ۱۶ تغییرات زمانی دانسیته توان پیل در کاهش پله ای دانسیته جریان بار از  $3500 \text{ A/m}^2$  تا  $3000 \text{ A/m}^2$  را نشان می دهد. همانطور که نشان داده شده است زمان رسیدن دانسیته توان پیل به حالت دائم ثانویه بسیار کمتر از زمان تغییرات دما می باشد. این زمان برای تغییر بار الکتریکی ذکر شده حدود ۸۰ ثانیه می باشد. بنابراین مشخصات الکتریکی پیل نسبت به پارامترهای حالت خیلی زودتر با شرایط جدید اعمالی بر پیل سازگار می شوند و به حالت دائم می رسد.



شکل ۱۶. تغییرات زمانی دانسیته توان پیل در الکترولیت در کاهش پله ای دانسیته جریان بار از  $3500 \text{ A/m}^2$  تا  $3000 \text{ A/m}^2$

شکل ۱۷ تغییرات زمانی بازده پیل در کاهش پله ای دانسیته جریان بار از  $3500 \text{ A/m}^2$  تا  $3000 \text{ A/m}^2$  را نشان می دهد. همانطور که مشاهده می شود با کاهش جریان بار الکتریکی بازده پیل افزایش می یابد و این افزایش نسبت به بقیه پارامترها سریع تر اتفاق می افتد.

### مراجع

- [1] Mollayi Barzi, Y., Ghassemi, M., Hamed, M.H., Afshari, E., "Numerical Analysis of Output Characteristics of a Tubular SOFC with Different Fuel Compositions and Mass Flow Rates", The Electrochemical Society Trans., Vol. 7, 2007, PP. 1119-1125.
- [2] Achenbach, E., , "Three-Dimensional and Time-Dependent Simulation of a Planar solid Oxide Fuel cell Stack", J. Power Sources, Vol. 49, 1994, PP. 333-348.
- [3] Hall, D.J., Colclaser, R.G., "Transient Modeling and Simulation of a Tubular Solid Oxide Fuel Cell", IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 14, 1999, PP. 749-753.
- [4] Sedghisigarchi, K., Feliachi, A., "Dynamic and Transient Analysis of Power Distribution Systems with Fuel Cells—Part I.", IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 19 (2), 2004, PP. 423-428.
- [5] X. Xue, J. Tang, N. Sammes, Y. Du, "Dynamic Modeling of Single Tubular SOFC Combining Heat/mass Transfer and Electrochemical Reaction Effects", J. Power Sources, Vol. 142, 2005, PP. 211-222.
- [6] Qi, Y., Huang, Luo B., "Dynamic Modeling of a Finite Volume of Solid Oxide Fuel Cell: The Effect of Transport Dynamics", J. Power Sources, Vol. 61, 2006, PP. 6057-6076.
- [7] Mollayi Barzi, Y., Ghassemi, M., "Sensitivity Analyses of the Tubular SOFC Performance with the Material Properties and Geometrical Parameters", European Fuel Cell Technology & Applications, December 11-14, 2007, Rome, Italy.
- [8] Transport Phenomena in Fuel Cells, B. Sunden, M. Faghri, WITPRESS, 2005.
- [9] Numerical heat transfer and fluid flow, S.V. Patankar, McGraw Hill, 1980.