



## مدل سازی الکتروشیمیایی عملکرد SOFC صفحه‌ای (Flat Plate SOFC)

سید احسان مجتبی‌وی<sup>۱</sup>، مرتضی بقالها<sup>۲</sup>

دانشگاه صنعتی شریف-دانشکده مهندسی شیمی و نفت  
[ehsanmojtavavi@yahoo.com](mailto:ehsanmojtavavi@yahoo.com)

### چکیده

پیل‌های سوختی امروزه به عنوان یکی از گزینه‌های تولید انرژی الکتریکی در مقیاس نیروگاهی مطرح شده‌اند. SOFC یکی از انواع پیل‌های سوختی با دمای بالاست که امروزه بسیار مورد توجه قرار گرفته است. این مقاله مدل سازی الکتروشیمیایی SOFC صفحه‌ای را به وسیله کد کامپیوتری نرم افزار MATLAB برای تعیین ولتاژ عملیاتی سلول انجام داده است. مهمترین بخش در مدل سازی الکتروشیمیایی SOFC محاسبه تلفات ولتاژ در سلول است. تلفات اهمی، تلفات اکتیواسیون و تلفات نفوذ سه عامل افت ولتاژ سلول هستند. در مقادیر پایین دانسیته جریان مهمترین منبع اتلاف ولتاژ در سلول تلفات اکتیواسیون است. تلفات اهمی و نفوذ با افزایش دانسیته جریان افزایش می‌یابند. با افزایش دانسیته جریان به بیش از  $2600 \text{ (A/m}^2\text{)}$  تلفات اهمی بالاترین تلفات ولتاژ را در سلول را به خود اختصاص می‌دهد. تلفات نفوذ نیز در مقادیر بالای دانسیته جریان قابل ملاحظه خواهد شد. از طرف دیگر کاهش تخلخل و قطر منافذ الکترودها سبب افزایش تلفات نفوذ در سلول می‌شود.

واژه‌های کلیدی: Flat Plate SOFC - مدل سازی الکتروشیمیایی - افت ولتاژ در سلول

### ۱. مقدمه

پیل سوختی یک راکتور الکتروشیمیایی است که انرژی شیمیایی را به صورت الکتروشیمیایی به انرژی الکتریکی تبدیل می‌کند. در ساده‌ترین حالت ساختمان پیل سوختی از دو الکتروده (کاتد و آنود) تشکیل شده است که توسط یک الکترولیت به هم متصل شده‌اند.

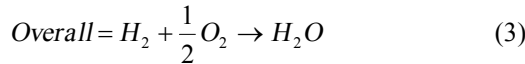
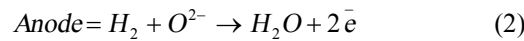
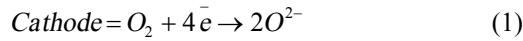
پیل‌های سوختی دما بالا (High Temperature Fuel Cells) که در دماهای عملیاتی بالا مورد بهره برداری قرار می‌گیرند. معمولاً برای مصارف Co-generation یا تولید همزمان انرژی الکتریکی و حرارت بکار می‌روند. SOFC یکی از انواع این پیل‌های سوختی است.

در SOFC اکسیژن یا هوا به عنوان گاز اکسید کننده در کاتد تزریق می‌شود. گاز اکسیژن الکترون‌ها را از مدار خارجی گرفته و تبدیل به یونهای اکسیژن می‌گردد. یونهای اکسیژن از طریق الکترولیت به طرف آنود هدایت می‌شوند. در آنود یونهای اکسیژن با هیدروژن ترکیب شده و تشکیل آب داده و منجر به آزاد شدن الکترون می‌شوند. الکترونهای آزاد شده در آنود از طریق مدار خارجی به طرف کاتد حرکت می‌کنند و آب تشکیل شده به شکل بخار به همراه اکسیژن اضافی و سوخت مصرف نشده محفظه سلول را ترک می‌کنند.

واکنشهای الکتروشیمیایی که در آنود و کاتد انجام می‌شود و واکنش کلی سلول به شکل زیر هستند:

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک- سیستمهای انرژی

۲- استادیار دانشکده مهندسی شیمی و نفت- دانشگاه صنعتی شریف



همانطور که در واکنشهای فوق دیده می شود، به ازای تولید هر ملکول آب و مصرف هر ملکول هیدروژن، دو الکترون یا  $2N_A$  الکترون (که  $N_A$  عدد آووگادرو می باشد) از طریق مدار خارجی منتقل می شوند. اگر  $e$  برابر بار یک الکترون باشد، میزان بار الکتریکی منتقل شده برابر خواهد بود با:

$$-2N_A e = -2F \quad (4)$$

در رابطه فوق  $F$  ثابت فارادی یا بار یک مول الکترون است. اگر  $E$  برابر ولتاژ سلول باشد، کار الکتریکی انجام شده در انتقال الکترونها از آند به کاتد برابر خواهد بود با:

$$W_{el} = \text{charge} \times \text{voltage} = -2FE \quad (5)$$

اگر سیستم را بازگشت پذیر تصور کنیم، کار الکتریکی انجام شده با انرژی آزاد گیبس آزاد شده برابر خواهد بود. لذا خواهیم داشت:

$$\Delta G = -2FE \quad (6)$$

$$E = \frac{-\Delta G}{2F} \quad (7)$$

معادله فوق نیروی محرکه الکتریکی استاندارد یا EMF (Electromotive force) را که اغلب به آن پتانسیل برگشت پذیری استاندارد اطلاق می شود را برای یک سلول نشان می دهد. برای واکنش کلی سلول در دماها و فشارهای مختلف، انرژی آزاد گیبس تشکیل واکنش را می توان به صورت زیر بیان کرد.

$$\Delta G = \Delta G^0 - RT \ln\left(\frac{PH_2 PO_2^{1/2}}{PH_2 O}\right) \quad (8)$$

که در این رابطه  $\Delta G^0$  نمایانگر تغییر انرژی آزاد گیبس واکنش کلی در شرایط استاندارد است. همچنین در رابطه فوق  $p$  فشار جزئی واکنش دهنده ها و محصولات را نشان می دهد. بنابراین ولتاژ سلول مدار- باز برگشت پذیر را می توان به صورت زیر نوشت:

$$E = \frac{-\Delta G^0}{nF} + \frac{RT}{nF} \ln\left(\frac{PH_2 PO_2^{1/2}}{PH_2 O}\right) \quad (9)$$

در سلولهای SOFC ولتاژ برگشت پذیر سلول به دلیل افتهای ولتاژ اهمی، اکتیواسیون و نفوذ تا ولتاژ عملیاتی کاهش پیدا می کند.

## ۲- مدل سازی الکتروشیمیایی SOFC صفحه ای

مدل سازی الکتروشیمیایی و حرارتی دو نوع مدل سازی هستند که تا به حال در مورد SOFC انجام شده اند. مدل سازی الکتروشیمیایی، مقدار انرژی الکتریکی تولید شده در سلول را مورد بررسی قرار می دهد و مدل سازی حرارتی نحوه انتقال حرارت، توزیع دما و تغییرات دما را در سلول مورد بررسی قرار می دهد.



در مدل سازی الکترو شیمیایی، هر سلول به تعداد زیادی المان حجمی تقسیم می‌شود که هر المان متشکل از کاتد، آند و الکترولیت به همراه کانال عبور هوا و سوخت می‌باشد. این المانها هر یک راکتور الکتروشیمیایی هستند که انرژی الکتریکی توسط واکنشهای الکتروشیمیایی در آنها تولید می‌شود. حل معادلات الکتروشیمیایی در مورد هر یک از این راکتورها جریان و ولتاژ عملیاتی آنها را تعیین می‌کند. در نهایت به وسیله انتگرالیون تمامی این المانهای حجمی، ولتاژ و جریان عملیاتی سلول مشخص می‌شود.

مهمترین بخش در مدل سازی الکتروشیمیایی SOFC محاسبه تلفات ولتاژ در سلول است که در این مقاله هر یک از تلفات به صورت مجزا مورد بررسی قرار می‌گیرد.

## ۱-۲- افت ولتاژ در سلول

نتایج عملی نشان می‌دهد که ولتاژ جریان الکتریکی تولید شده، هنگام گذر کردن از سلولها کاهش می‌یابد. افت ولتاژ در سلولهای SOFC به سه دسته تقسیم می‌شود. نفوذ اکسیژن و هیدروژن از داخل جریان اکسید کننده و سوخت گازی به منافذ الکترودهای کاتد و آند و نفوذ از این منافذ به مکانهای انجام واکنش (Triple Phase Boundary) TPB منجر به اتلاف ولتاژ نفوذ در سلول می‌شود. در مقابل حرکت الکترونها در بستر فلزی نیز مقاومت اهمی وجود دارد که منجر به تلفات اهمی می‌شود. سومین عامل افت ولتاژ در سلول تلفات ولتاژ اکتیواسیون است. انرژی فعال سازی مورد نیاز برای انجام واکنشهای الکتروشیمیایی به دلیل بازگشت ناپذیری موجب کاهش ولتاژ سلول می‌شود. بنابراین این تلفات موجب کاهش ولتاژ ایده‌آل سلول تا ولتاژ واقعی یا عملیاتی خواهد شد.

$$U = E - V_{pol} \quad (10)$$

در رابطه فوق  $V_{pol}$  تلفات پولاریزاسیون را نشان می‌دهد که شامل تلفات اهمی، اکتیواسیون و نفوذ می‌باشد.

$$V_{pol} = \eta_{ohm} + \eta_{act} + \eta_{diff} \quad (11)$$

## ۱-۱-۲- تلفات اهمی

محاسبه تلفات اهمی در SOFC صفحه‌ای به شکل هندسی سلول و جنس الکترودها، الکترولیت و اتصال دهنده‌های درونی وابسته است. تلفات اهمی در سلول به دو بخش تقسیم می‌شود. بخش اول تلفات در ساختار AEC (Anode/Electrolyte/Cathode) است که  $V_{AEC}$  نامیده می‌شود و بخش دوم مربوط به تلفات در اتصال دهنده‌های درونی ( $V_{IC}$  Interconnect) است.

$$\eta_{ohm} = V_{AEC} + V_{IC} = I \times \sum_{k=1}^3 R_k + I \times R_{IC} \quad (12)$$

که در رابطه فوق  $I$  نشان دهنده جریان سلول و  $R_k$  نشان دهنده مقاومت آند، الکترولیت و کاتد است. که می‌توان مقادیرشان را از قانون اهم محاسبه کرد:

$$R_k = \frac{\rho_k \times \delta_k}{A_k} \quad (13)$$

در رابطه بالا  $A_k$  نشان دهنده سطح موثر  $k$  امین جزء در لایه AEC و  $\delta_k$  ضخامت آن جزء می‌باشد.  $\rho_k$  نیز مقاومت ویژه هر یک از اجزاء را نشان می‌دهد که با توجه به جنس هر یک تعیین می‌شود.



ولی محاسبه مقاومت مربوط به اتصال دهنده‌های درونی به دلیل شکل هندسی آنها از محاسبه مقاومت در ساختار AEC پیچیده تر است. برای محاسبه مقاومت در اتصال دهنده‌های درونی روشی توسط Solheim توسعه داده شده است. [۱] در این روش اتصال دهنده‌های درونی L شکل به سه مستطیل تقسیم می‌شود. مقاومت هر یک از قسمت‌ها با توجه به هندسه و مقاومت ویژه فلز اتصال دهنده درونی قابل محاسبه است و در نهایت با محاسبه مقاومت هر سه قسمت مقاومت اتصال دهنده درونی محاسبه می‌شود.

## ۲-۱-۲- تلفات اکتیواسیون

محاسبه تلفات اکتیواسیون آندیک و کاتدیک از طریق معادله چگالی جریان-پتانسیل (Current density-overpotential) که به نام معادله Butler-Volmer شناخته می‌شود مقدور است.

$$i = i_0 \left\{ \exp\left(\beta \frac{nF\eta_{act}}{RT}\right) - \exp\left[-(1-\beta) \frac{nF\eta_{act}}{RT}\right] \right\} \quad (14)$$

که  $\beta$  در این رابطه ضریب انتقال (Transfer coefficient) و  $i_0$  چگالی جریان تبدالی (Exchange current density) نامیده می‌شود. پارامتر ضریب انتقال به عنوان ضریبی از تغییرات پولاریزاسیون در نظر گرفته می‌شود که در نهایت منجر به تغییر ثابت سرعت واکنش خواهد شد. مقدار این متغیر برای پیل سوختی معمولاً برابر ۰/۵ در نظر گرفته می‌شود. [۲،۳] چگالی جریان تبدالی در حقیقت سرعت رفت و برگشت واکنش الکترودی در پتانسیل تعادلی است. چگالی جریان تبدالی بالا به معنی سرعت بالای واکنش الکتروشیمیایی است که در این حالت کارایی عملکرد بالایی برای پیل سوختی مورد انتظار است. [۴] معادله (۱۴) را می‌توان به صورت کاربردی‌تر در دو حالت بازنویسی کرد. اگر پولاریزاسیون اکتیواسیون دارای مقدار بالایی باشد. مقدار اولین ترم نمایشی بسیار بزرگتر از ترم دوم خواهد بود. لذا می‌توان از ترم دوم در مقابل ترم اول صرفنظر کرد. لذا معادله (۱۴) به صورت زیر خلاصه می‌شود.

$$\eta_{act} = -\left(\frac{RT}{\beta nF}\right) \ln(i_0) + \left(\frac{RT}{\beta nF}\right) \ln(i) = a + b \times \log(i) \quad (15)$$

در حالت دوم پولاریزاسیون اکتیواسیون پایین بررسی می‌شود. در این حالت عبارت نمایشی در معادله (۱۱) را می‌توان به صورت سری باز کرد. از ترمهای بزرگتر از ترمهای خطی می‌توان صرفنظر کرد. [۳] در این شرایط رابطه پتانسیل-جریان به صورت زیر خواهد بود: [۵]

$$\eta_{act} = \frac{RT}{nFi_0} i \quad (16)$$

بنابراین نمودار  $i$  برحسب  $\eta$  در ناحیه تلفات پایین به صورت خطی خواهد بود. بهترین ملاک تشخیص بالا یا پایین بودن تلفات اکتیواسیون، بررسی عبارت شرطی روبرو در هر بار تکرار محاسبات است.

$$\frac{F\eta_{act}}{n_e RT} < 1.0 \quad (17)$$



### ۳-۱-۲- تلفات نفوذ

سرعت انتقال جرم در نواحی انجام واکنش که در محیط متخلخل الکترودها در SOFC واقع شده‌اند را می‌توان توسط تئوری نفوذ گاز در محیطهای متخلخل تشریح کرد. واکنش کننده‌ها باید از منافذ محیط متخلخل الکترودها نفوذ کرده و به محل انجام واکنش برسند. به همین ترتیب محصولات واکنش نیز در جهت مخالف یعنی از داخل محیط متخلخل به داخل گاز نفوذ می‌کنند. در این زمان پولاریزاسیون غلظت حائز اهمیت است. هنگامی که در سلول جریان تولید می‌شود، فشار جزئی در مکانهای انجام واکنش کمتر از فشار جریان بالک گاز می‌باشد. پولاریزاسیون غلظت نرمال هنگامی به اتلاف ولتاژ زیاد نزدیک می‌شود که جریان به جریان محدود کننده (Limiting current) نزدیک شود. جریان محدود کننده هنگامی برقرار می‌شود که مهمترین مکانیزم اتلاف ولتاژ در الکترودها به صورت نفوذ باشد که این حالت در غلظتهای پایین واکنش دهنده و یا درصد تبدیل ۱۰٪ واکنش رخ می‌دهد.

فرض می‌کنیم فشار جزئی واکنش دهنده‌ها و محصولات در جریان بالک با اندیس "0" و فشار جزئی آنها در مکانهای انجام واکنش را با اندیس "\*" نشان داده شود. در این حالت پتانسیل سلول هنگامی که جریان برابر صفر و هنگامی که جریان برابر  $I$  می‌باشد را می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$E_{i=0} = E_0 + \frac{RT}{nF} \ln\left(\frac{P_{H_2}^0 P_{O_2}^{01/2}}{P_{H_2O}^0}\right) \quad (18)$$

$$E_{i=i} = E_0 + \frac{RT}{nF} \ln\left(\frac{P_{H_2}^* P_{O_2}^{*1/2}}{P_{H_2O}^*}\right) \quad (19)$$

بنابراین تلفات نفوذ  $\eta_{diff}$  به صورت زیر محاسبه خواهد شد:

$$\eta_{diff} = E_{i=i} - E_{i=0} = \frac{RT}{nF} \ln\left(\frac{P_{H_2}^* P_{H_2O}^0}{P_{H_2}^0 P_{H_2O}^*}\right) + \frac{RT}{2nF} \ln\left(\frac{P_{O_2}^*}{P_{O_2}^0}\right) \quad (20)$$

اولین ترم در طرف راست معادله بالا تلفات نفوذ آندی و دومین ترم تلفات نفوذ کاتدی را نشان می‌دهد. در طرف کاتد، نفوذ اکسیژن را می‌توان یک بعدی فرض کرد. ولی به دلیل اینکه نیتروژن در واکنش شرکت نمی‌کند، فلاکس کلی جرمی نفوذ نیتروژن به مکانهای انجام واکنش و نفوذ از این مکانها برابر صفر است. برای محاسبه پولاریزاسیون نفوذ در کاتد، رابطه  $Y_{O_2}^*$  و  $Y_{O_2}^0$  در معادله (۲۰) مشخص شده است. [۶]

$$y_{O_2}^* = 1 + (y_{O_2}^0 - 1) \times \exp\left(\frac{iRTt_{ca}}{4FD_{eff,ca}P}\right) \quad (21)$$

از معادلات (۲۰) و (۲۱) می‌توان افت ولتاژ ناشی از نفوذ در کاتد را برحسب تابعی از جزء مولی اکسیژن در بالک محاسبه نمود.

$$\eta_{diff,ca} = \frac{RT}{2nF} \ln\left[\frac{1}{y_{O_2}^0} - \left(\frac{1}{y_{O_2}^0} - 1\right) \exp\left(\frac{iRTt_{ca}}{4FD_{eff,ca}P}\right)\right] \quad (22)$$

در طرف آند، واکنش شیمیایی در انتهای مسیر نفوذ و در ناحیه مشترک میان آند و الکترولیت انجام می‌شود. مسیر نفوذ در واقع تمامی ضخامت آند  $t_a$  است. همانند کاتد، محاسبه پولاریزاسیون نفوذ از طریق معادله (۲۰) نیازمند مشخص بودن جزء



مولی واکنش دهنده‌ها و محصولات در انتهای مسیر نفوذ است. این بدان معناست که ابتدا باید مقادیر اجزاء مولی در بالک یعنی  $Y_{H_2O}^*$  و  $Y_{H_2}^*$  را تعیین نمود. [۶]

$$y_{H_2}^* = y_{H_2}^0 - \frac{iRT_{an}}{2FD_{eff,an}P} \quad (23)$$

$$y_{H_2O}^* = y_{H_2O}^0 + \frac{iRT_{an}}{2FD_{eff,an}P} \quad (24)$$

با جایگزینی معادلات (۲۳) و (۲۴) در معادله (۲۰) می‌توان پولاریزاسیون نفوذ را در آند به صورت زیر محاسبه کرد:

$$\eta_{diff,an} = \frac{RT}{nF} \ln \left( \frac{1 - \frac{iRT_{an}}{2FD_{eff,an}y_{H_2}^0P}}{1 + \frac{iRT_{an}}{2FD_{eff,an}y_{H_2O}^0P}} \right) \quad (25)$$

## ۲-۲- ضریب نفوذ موثر

ضریب نفوذ موثر را می‌توان با استفاده از فرمول Bosanquet محاسبه کرد. [۷]

$$\frac{1}{D_{eff}} = \frac{1}{D_{12}} + \frac{1}{D_{1K}} \quad (26)$$

که ضریب نفوذ برای سیستم‌های دو جزئی  $D_{12}$  را می‌توان از معادله پیشنهاد شده توسط Spatz و Bird، Hirschfelder محاسبه نمود. [۷]

$$D_{12} = 1.858 \times 10^{-7} \times \frac{T^{3/2} \times \left( \frac{1}{M_1} + \frac{1}{M_2} \right)^{1/2}}{P \times \sigma_{12}^2 \times \Omega_D} \quad (27)$$

مقادیر  $\Omega_D$  و  $\sigma_{12}$  که پارامترهای Lennard-Jones نامیده می‌شوند را می‌توان در کتابهای مرجع یافت. ضریب نفوذ Knudsen برای جزء اول (هیدروژن یا اکسیژن) از تئوری جریان ملکولی قابل محاسبه است.

$$D_{1K} = \frac{3}{3} \times r_e \times v_1 \quad (28)$$

که در این فرمول  $r_e$  شعاع موثر و  $v_1$  سرعت ملکولی میانگین برای جزء اول است.

$$v_1 = \left( \frac{8RT}{\pi M_1} \right)^{1/2} \quad (29)$$

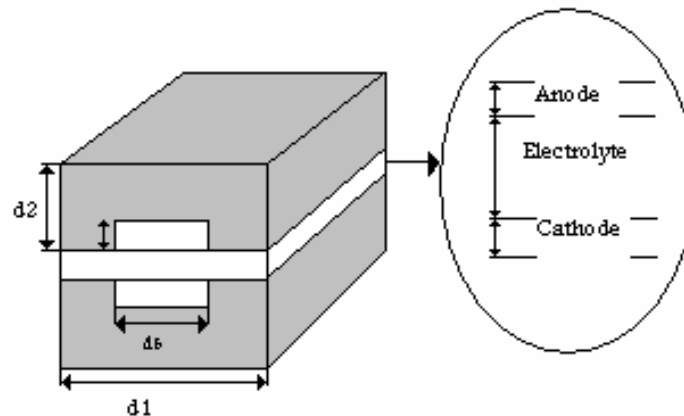


در مورد مواد متخلخل، معادلات (۲۷) و (۲۸) به وسیله  $\theta$  که بیانگر تخلخل الکترودهاست بازنویسی می‌شود که جهت محاسبه کاهش سطح مقطع عرضی استفاده می‌شود. معادلات همچنین بر  $\tau$  تقسیم می‌شوند که پارامتر پیچ و خم (Tortuosity factor) منافذ است. این فاکتور جهت محاسبه افزایش طول نفوذ ناشی از پیچ و خم در منافذ حقیقی و تأثیرات تنگی انتهای منافذ استفاده می‌شود. در نهایت از معادله (۲۶) خواهیم داشت:

$$D_{eff} = \frac{D_{12} \times D_{1K} \times \theta}{(D_{12} + D_{1K}) \times \tau} \quad (30)$$

#### ۴- نتایج مدل سازی

مدل سازی برای SOFC صفحه‌ای با سلول مربع شکل هم دما به ابعاد  $10cm \times 10cm$  انجام شده و کد کامپیوتری توسط نرم افزار MATLAB نوشته شده است. هر سلول به  $324$  المان مربع شکل تقسیم شده است که مساحت سطح هر المان برابر  $31/36$  میلیمتر مربع است. جریان سوخت و هوا به صورت هم جهت فرض شده و معادلات برای حالت یکنواخت نوشته شده است. (شکل ۱) علاوه بر این فرض شده است که توزیع گازها در داخل کانالها یکنواخت باشد.



شکل ۱: شکل المان حجمی و جانمایی آند، کاتد، الکترولیت و اتصال دهنده درونی

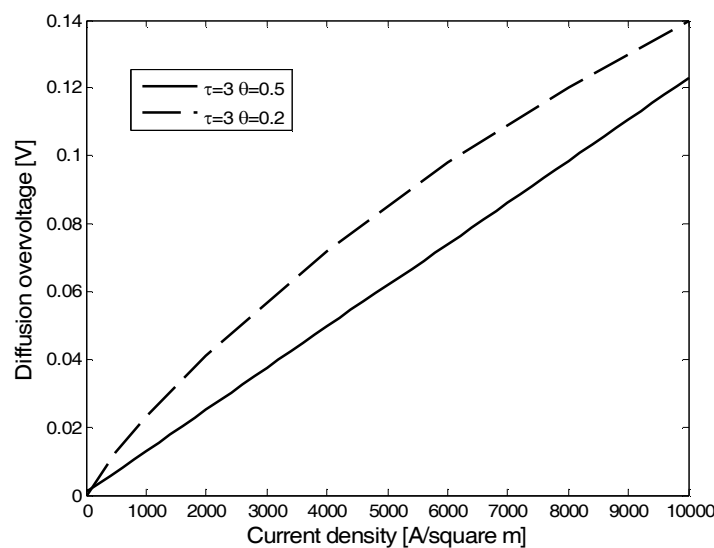
شکل هندسی سلول و المان حجمی در محاسبه تلفات ولتاژ اهمی و اکتیواسیون تأثیر گذار است. جدول (۱) ابعاد قسمتهای مختلف المان را نشان داده است.

جدول ۱: ابعاد قسمتهای مختلف المان حجمی

$0.0056(m)$	d1	طول المان
$0.0056(m)$	d1	عرض المان
$0.00005(m)$	$\delta_c$	ضخامت کاتد
$0.00015(m)$	$\delta_e$	ضخامت الکترولیت
$0.00005(m)$	$\delta_a$	ضخامت آند
$0.0025(m)$	d2	ارتفاع اتصال دهنده درونی
$0.001(m)$	d4	ارتفاع کانال عبور سوخت و هوا
$0.003(m)$	d3	عرض کانال عبور سوخت و هوا



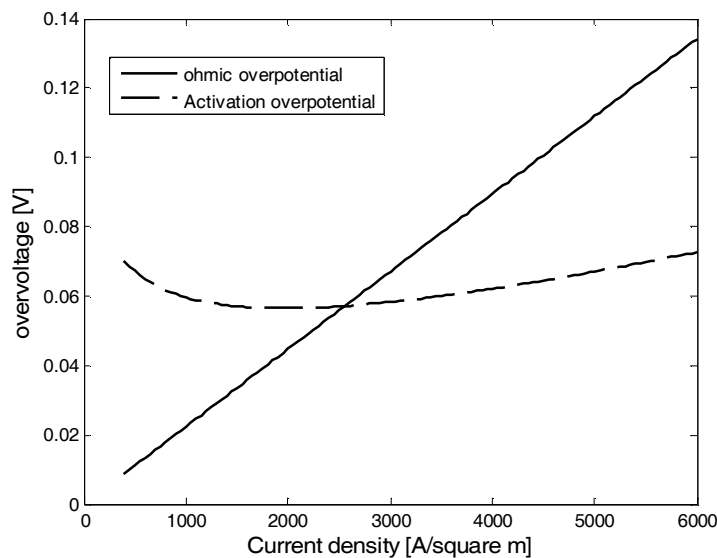
تخلخل الکترودها، قطر و پارامتر پیچ و خم منافذ از جمله ثوابتی هستند که مقدار آنها به جنس الکترودها بستگی دارد و به عنوان متغیرهای تأثیر گذار روی مدل پولاریزاسیون نفوذ به شمار می‌روند. نمودار (۱) تأثیر تغییرات تخلخل را روی تلفات نفوذ نشان می‌دهد. محدوده نرمال مقدار پارامتر پیچ و خم منافذ برای مواد متخلخل  $2 \leq \tau \leq 6$  است که برای مواد بکار رفته در SOFC نیز در مقالات مختلف گزارش شده است. [۹] تخلخل نیز معمولاً بالاتر از  $0.2$  می‌باشد. [۹] تخلخل کمتر مواد و قطر کوچکتر منافذ عبور تلفات بیشتر نفوذ را به دنبال دارد. (تأثیر مربوط قطر منافذ در شکل نشان داده نشده است). با افزایش دانسیته جریان مقدار تلفات نفوذ افزایش می‌یابد. (نمودار ۱) به طوریکه در مقادیر بالای دانسیته جریان تلفات نفوذ قابل ملاحظه خواهد شد. افزایش یا کاهش دانسیته جریان وابسته به ضخامت الکترودها است. با افزایش ضخامت الکترودها دانسیته جریان نیز افزایش می‌یابد. ولی افزایش ضخامت الکترودها میزان نفوذ واکنش دهنده‌ها را به مکانهای انجام واکنش در سطح مشترک الکترودها و الکترولیت کاهش می‌دهد و همین موضوع منجر به بالاتر رفتن تلفات نفوذ در سلول می‌شود.



شکل ۱: تأثیر تغییرات تخلخل روی تلفات نفوذ در سلول

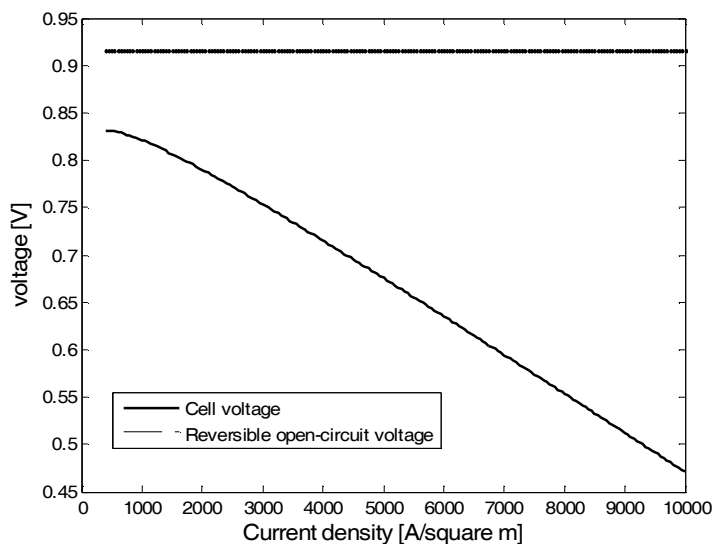
با افزایش دانسیته جریان، تلفات اهمی نیز تقریباً به صورت خطی افزایش می‌یابند. (نمودار ۲) در مقادیر پایین دانسیته جریان مهمترین منبع تلفات ولتاژ در سلول تلفات اکتیواسیون است. ولی با افزایش دانسیته جریان تلفات اهمی و بعد از آن تلفات نفوذ مهمترین منبع تلفات ولتاژ در سلول هستند.





شکل ۲: تغییرات افت ولتاژ اکتیواسیون و اهمی با دانسیته جریان

تغییرات تلفات اهمی، اکتیواسیون و نفوذ در سلول با تغییرات دانسیته جریان در نهایت منجر به تغییرات ولتاژ نهایی سلول با دانسیته جریان خواهد شد. همانطور که در نمودار (۳) نشان داده شده است. ولتاژ سلول با افزایش دانسیته جریان کاهش می‌یابد. با رسم این نمودار برای هر سلول می‌توان دانسیته جریان و ولتاژ عملیاتی بهینه سلول را برای دستیابی به حداکثر توان مشخص نمود.



شکل ۳: تغییرات ولتاژ عملیاتی سلول با دانسیته جریان

## ۵- نتیجه گیری

مدل سازی الکترو شیمیایی SOFC صفحه‌ای مقدار تلفات اهمی، اکتیواسیون و نفوذ را با توجه به مشخصات فیزیکی الکترودها و دانسیته جریان در سلول تعیین می‌کند. ولتاژ ایده‌آل سلول به دلیل تلفات ذکر شده تا ولتاژ عملیاتی کاهش می‌یابد. با افزایش دانسیته جریان تلفات اهمی و نفوذ در سلول افزایش می‌یابد. تلفات اکتیواسیون نسبت به دانسیته جریان دارای یک



مقدار کمینه است. با افزایش دانسیته جریان در ابتدا تلفات اکتیواسیون و پس از آن تلفات اهمی و نفوذ مهمترین منبع تلفات در سلول هستند. کاهش تخلخل الکترودها سبب افزایش تلفات نفوذ در سلول می شود. ولتاژ عملیاتی سلول نیز با افزایش دانسیته جریان کاهش می یابد.

## ۶- منابع

1. A.Solheim and K. Nisancioglu, Resistance and Current distribution in fuel Cell Elements, Second International Symposium on SOFC, Athens,Greece, July 1991.
2. J.M. Bockris and S. Srinivasan, Fuel Cells: Their Electrochemistry, McGraw-Hill, New York, USA, 1969.
3. P.Costamagna, Modeling of Solid Oxide Heat Exchanger Integrated Stacks and Simulation at high Fuel Cell Utilisation, Electrochemical Society Proceedings, Vol. 145, No. 11, pp. 3995-4007,1998.
4. T.Takahashi and N.Q. Minh, Science and Technology of Ceramic Fuel Cell, Elsevier Science, B.V. Amsterdam, The Netherlands, 1995.
5. M. Lemanski, J. Badur, Parametrical analysis of a tubular pressurized SOFC, The Szewalski institute of fluid-flow machinery, Polish academy of sciences, archives of thermodynamics, No. 153-72, 2004
6. A. Selimovic, Solid Oxide Fuel Cell Modeling for SOFC/Gas Turbine Combined Cycle Simulations, Technical report, ISRN LUTMDN/TMVK-7039-SE, Lund University, Department of Heat and Power Engineering, 2000.
7. A.F. Mills, Basic Heat and Mass Transfer, IRWIN, Irwin heat transfer series, Boston, USA, 1995
8. R.B. Bird, W.E. Stewart and E.N. Ligthfoot, Transfer Phenomena, John Willey & Sons, New York, USA 1960.
9. U.G. Bossel, Facts and Figures, Final report on SOFC data, International Energy Agency report, Operating task II, Swiss Federal Office of Energy, 1992.



# Electro-chemical modeling of the operation of flat plate SOFC

**Seyed Ehsan Mojtavavi, Morteza Baghalha**  
*Sharif University of technology, chemical engineering Department*  
[ehsanmojtavavi@yahoo.com](mailto:ehsanmojtavavi@yahoo.com)

## Abstract

Nowadays, fuel cell is considered as an important option in the production of electrical energy in the power plant scale. SOFC is one of the high temperature fuel cells which have recently gained significance. This paper is to apply the electro-chemical modeling of the flat plate SOFC by means of MATLAB computer software code to demonstrate the performance voltage of the cell. The most integral part in the SOFC electro-chemical modeling is demonstrating the losses of voltage in cell. The ohmic, activation and diffusion overvoltage are 3 factors in the loss of voltage in cell. In low current density the most important cause of the voltage subsidence is considered to be the overvoltage in the activation process. Ohmic and diffusion overvoltage increase along with the increase in the current density. By the increase in the current density to higher than  $2600(A/m^2)$  the ohmic overvoltage will devote the highest overvoltage in the cell to itself. In high current density the diffusion overvoltage will also become significant. On the other hand decrease in porosity and the diameter of the electrode's pores will cause an increase in the diffusion overvoltage of the cell.

**Keywords:** Flat plate SOFC, Electro-chemical modeling – loss of voltage in cell