مجموعه مقالات هفتمین کنفرانس سوخت و احتراق ایران
۲۵ و ۲۴آبان ۱۳۹۶، ایران، تهران، دانشگاه صنعتی شریف
FCCI-2018-1034

مدل‌سازی الکتروشیمیایی و تحلیل پارامتریک یک پیل‌سوختی غشا پلیمری

سید مصطفی نظری
کارشناسی ارشد، هوافضا، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران
electricalnazari@gmail.com

جاماسب پیرکندی
استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران
jamasb_p@yahoo.com

محمد رضا علیزاده پهلوانی
دانشیار، مهندسی برق، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران
mr_alizadehp@mut.ac.ir

چکیده

فیزیک دقیق مبتنی بر مدل‌های پیل‌سوختی، جهت پیش بینی و ارزیابی پاسخ‌های پایدار و دینامیکی در برنامه‌های مختلفی مانند وسایل نقلیه و سیستم‌های تولید انرژی پیل‌سوختی مستقل و متصل به شبکه مورد استفاده قرار می‌گیرد. مدل‌های دینامیکی و الکتروشیمیایی پیل‌سوختی نیز برای پیش بینی و ارزیابی عملکرد پیل‌سوختی در شرایط مختلف حالت گذرا مانند افت‌های الکتریکی در پایانه‌ها، شروع به کار، تسریع و توقف پیل‌سوختی مورد استفاده قرار می‌گیرند. تحت شرایط فوق، ولتاژ و توان خروجی یک پیل‌سوختی متاثر از خواص الکتروشیمیایی و فیزیکی همانند انتشار جرم، ویژگی‌های ترمودینامیکی و افت ولتاژ درون پیل‌سوختی خواهد بود. بر این اساس، در این مقاله یک مدل الکتروشیمیایی از یک پیل‌سوختی غشا پلیمری مورد مطالعه قرار گرفته شده است. با توجه به اینکه دما به عنوان یک پارامتر حائز اهمیت در عملکرد یک پیل‌سوختی محسوب می‌گردد، لذا سعی شده است تا تاثیر دما بر روی عملکرد پیل سوختی پلیمری و افت ولتاژهای درون آن، در دو رنج دمایی ۳۳۳ و ۳۴۸ کلوین، مورد ارزیابی قرار گیرد. شبیه‌سازی‌ها توسط برنامه مطلب انجام شده است. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که افزایش دما به اندازه ۱۵ کلوین، در عملکرد پیل‌سوختی حائز اهمیت بوده و افت ولتاژ ترمودینامیکی را به اندازه ۲ درصد کاهش داده است.

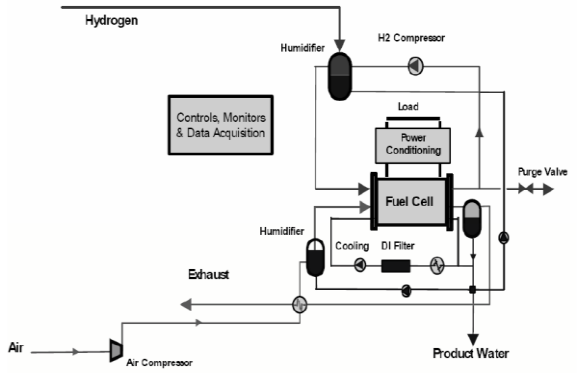
کلید واژگان: پیل‌سوختی پلیمری، مدل‌سازی، شبیه‌سازی، دما

۱- مقدمه

پیل‌های سوختی نوعی منبع تامین انرژی الکتریکی هستند که انرژی شیمیایی موجود در سوخت را مستقیماً به الکتریسیته تبدیل می‌کنند. پیل‌سوختی غشا پلیمری نوعی از پیل‌های سوختی است که به دلیل ویژگی‌های بارزی نظیر دمای عملکرد پایین و چگالی توان بالا، بسیار مورد توجه قرار گرفته است. این پیل می‌تواند جایگزین مناسبی برای موتورهای احتراق داخلی باشد. بازده بالا، زمان راه‌اندازی کم، تولید آلایندگی بسیار ناچیز، نداشتن قطعه متحرک و نیاز به تعمیر بسیار کم از ویژگی‌های این پیل است.

پیل‌سوختی غشا پلیمری برای اولین بار توسط ناسا در سال ۱۹۶۰ به عنوان بخشی از برنامه‌های فضایی جمینی استفاده شد. در این نوع از پیل های سوختی از اکسیژن و هیدروژن خالص به عنوان گازهای واکنش‌دهنده در مقیاس کوچک و گران‌قیمت استفاده شد. برای تحلیل الکتروشیمیایی سیستم پیل‌سوختی غشا پلیمری و محاسبه ولتاژ و توان تولیدی آن، پیش از این مدل‌های مختلفی ارائه شده است. یکی از بهترین مدل‌های ارائه شده، مدل نیمه تجربی GSSEM[1] است که مان و همکاران آن را ارائه داده‌اند [۱]. مهمترین مزیت این مدل نسبت به مدل‌های دیگر این است که این مدل تقریباً تمام پدیده‌های موجود در پیل را در نظر گرفته و همچنین برای پیل با مشخصات خاص ارائه نشده است. از این نوع مدل می‌توان برای مطالعه‌ی تمام پیل‌های غشا پلیمری استفاده کرد. با این حال، اختلاف اندکی در نتایج این مدل نسبت به نتایج آزمایشگاهی وجود دارد که به دلیل تغییر خواص گازهای ورودی نظیر دما و رطوبت نسبی، در نتیجه‌ی افت‌های گرمایی است. فولر و همکاران [۲] با ایجاد تغییراتی در این نوع مدل و وارد کردن میزان کاهش ولتاژ در اثر کارکرد پیل (پارامتر طول عمر) آن را کامل‌تر کردند. آمفلت و همکاران [۳] مطالعه‌ای تجربی را بر روی میزان افت ولتاژهای فعال‌سازی و افت‌های اهمی انجام داده و ضرایب آزمایشگاهی را ارائه داده‌اند.

یک سیستم توان پیل‌سوختی ساده، عمدتاً شامل یک واحد فرآوری سوخت، توده پیل‌سوختی و واحد تهویه قدرت می‌باشد. در این صورت ولتاژ و جریان مستقیم، به عنوان خروجی توده پیل‌سوختی خواهد بود. یک نمونه از طرح ساده از پیل‌سوختی در شکل (۱) نشان داده شده است.



شکل ۱- شماتیکی از سیستم پیل سوختی [۶]

در این مقاله، مطالعه‌ای بر روی مدل الکتروشیمیایی پیل‌سوختی غشا پلیمری انجام شده است. براین اساس، در این مقاله سعی بر آن گردیده تا ضمن مدل‌سازی الکتروشیمیایی پیل‌سوختی پلیمری، اثر تغییرات دما نیز در عملکرد پیل‌سوختی غشا پلیمری و افت ولتاژهای درون آن، در دو رنج دمایی ۳۳۳ و ۳۴۸ مورد بررسی قرار گیرد. در همین راستا روابطی تحلیلی برای محاسبه مقدار پتانسیل استاندارد جهت بررسی تاثیر دما بر روی عملکرد پیل سوختی مورد نظر ارائه شده است که در نوع خود روابط جدیدی هستند که به منظور گسترش مدل به مدل های قبلی افزوده شده اند.

۲- مدل‌سازی الکتروشیمیایی پیل‌سوختی

محاسبه‌ی توان در پیل غشا پلیمری با تکمیل مدل GSSEM، ارائه شده در مرجع [۱]، انجام شده است. این مدل برای تمام پیل‌های غشا پلیمری

[1] Generalized Steady State Electrochemical Model

با غشای نافیون قابل کاربرد است. طبق این مدل ولتاژ هر تک پیل از رابطه (۱) محاسبه می شود.

$$V_{cell} = E_{nernst} - \eta_{act} - \eta_{ohmic} - \eta_{concentration} \quad (۱)$$

در این معادله، E_{nernst} مقدار پتانسیل استاندارد می‌باشد که در شرایط ایده‌ال از واکنش‌های درون پیل‌سوختی حاصل می‌گردد. η_{act} میزان افت ولتاژ فعال‌سازی است که عموماً ناشی از محدودیت‌هایی نظیر فعالیت‌های کاتالیست و میزان کارایی آن در سمت آند و کاتد می‌باشد. η_{ohmic} میزان افت ولتاژ پیل است که در رابطه با محدودیت هدایت پروتون غشاء پلیمر و همچنین مقاومت الکترونی درونی مجموعه پیل‌سوختی است. همچنین $\eta_{concentration}$ نشان‌دهنده افت‌های انتقال جرم می‌باشد.

۲-۱- پتانسیل استاندارد (E_{nernst})

معادله‌ی نرنست بیانگر پتانسیل استاندارد فرایندهای شیمیایی برای پیل سوختی هیدروژن/ اکسیژن است، که به کمک مقادیر اختلاف انتروپی حالت استاندارد به شکل رابطه (۲) نوشته می‌شود [۱].

$$E_{nernst} = 1.229 - (8\times10^{-4})\,(T - 298.15) + (4.3085\times10^{-5})\,T\ln(P^*_{H_2}\cdot P^{*\,0.5}_{O_2}) \quad (۲)$$

در این رابطه T دمای پیل، $p^*_{O_2}$ فشار جزئی اکسیژن در سطح مشترک گاز در کاتالیست کاتد و $p^*_{H_2}$ فشار جزئی هیدروژن در سطح مشترک کاتالیست آند می‌باشد. [۴]

$$P^*_{O_2} = P[1 - x^{sat}_{H_2O} - x^{channel}_{other\ gasses}\cdot\exp(\frac{0.291j}{T^{0.832}})] \quad (۳)$$

$$P^*_{H_2} = 0.5P^{sat}_{H_2O} \times\left[[1/(\exp\left(\frac{1.653j}{T^{1.334}}\right)x^{sat}_{H_2O})]-1\right] \quad (۴)$$

که در روابط فوق $X^{sat}_{H_2O}$ کسر مولی آب موجود در گاز به صورت اشباع در دمای داده شده، $X^{channel}_{other\ gasses}$ کسر مولی گازهای دیگر(به جز اکسیژن) در جریان هوا که عموماً نیتروژن است و $p^{sat}_{H_2O}$ فشار اشباع بخار آب در دمای داده شده می‌باشد. $X^{sat}_{H_2O}$ در روابط بالا، به شکل رابطه (۵) تعریف می‌شود.

$$x^{sat}_{H_2O} = \frac{P^{sat}_{H_2O}}{p} \quad (۵)$$

P فشار عملکرد پیل (معمولا بین ۱/۲ تا ۵/۵ اتمسفر در نظر گرفته می شود) و $p^{sat}_{H_2O}$ فشار بخار آب در دمای داده شده است [۴].

$$\ln\left(P^{sat}_{H_2O}\right) = 70.4346 - \frac{7362.6981}{T} + 6.9521\times10^{-3}(T) - 9.0000\ln\left(T\right) \quad (۶)$$

$X^{channel}_{other\ gasses}$ با میانگین‌گیری لگاریتمی در سطح پیل و در طول جریان گاز درون کانال‌ها به دست می‌آید [۴].

$$x^{channel}_{other\ gasses} = \frac{x^{in,hum}_{other\ gasses} - x^{out,hum}_{other\ gasses}}{\ln(\frac{x^{in,hum}_{other\ gasses}}{x^{out,hum}_{other\ gasses}})} \quad (۷)$$

$X^{in,hum}_{other\ gasses}$ و $X^{out,hum}_{other\ gasses}$ به ترتیب کسر مولی نیتروژن در جریان هوای مرطوب ورودی و کسر مولی نیتروژن در جریان هوای مرطوب خروجی هستند و با استفاده از روابط (۸) و (۹) محاسبه می‌شوند.

$$x^{in,hum}_{other\ gasses} = 0.78\,(1 - x^{sat}_{H_2O}) \quad (۸)$$

$$x^{out,hum}_{other\ gasses} = \frac{1 - x^{sat}_{H_2O}}{1 + [1 - (1/s_{air})](0.21/0.79)} \quad (۹)$$

پارامتر S_{air} در معادله اخیر، استوکیومتری هوا نامیده می‌شود. مقدار این پارامتر معمولاً بین ۱,۲ تا ۲ انتخاب می‌گردد[۵].

۲-۲- افت ولتاژ فعال‌سازی[2]

رابطه نیمه تجربی ارائه شده در مرجع [۱] برای افت‌های فعال‌سازی به شکل رابطه (۱۰) است.

$$\eta_{act} = \psi_1 + \psi_2\ T + \psi_3\ T\ \ln\left(C^*_{O_2}\right) + \psi_4\ T\ \ln\left(i\right) \quad (۱۰)$$

$C^*_{O_2}$ غلظت اکسیژن در سطح مشترک گاز در کاتالیست کاتد است که رابطه‌ی (۱۱) برای آن ارائه شده است [۶].

$$C^*_{O_2} = 1.97\times10^{-7}\ \exp\left(\frac{498}{T}\right)P^*_{O_2} \quad (۱۱)$$

ضرایب ψ برای افت ولتاژ فعال‌سازی در زیر مدل توان با توجه به داده‌های مرجع [۱] به شکل $\psi_1 = -0.948$، $\psi_2 = 3.8\times10^{-3}$، $\psi_3 = 7.6\times10^{-5}$ و $\psi_4 = -1.92\times10^{-4}$ انتخاب شده است. در این مرجع مقادیر این ضرایب برای انواع خاصی از غشاهای پلیمری به دست آمده‌اند؛ اما در عمل نشان داده شده است که این ضرایب برای هر پیل‌سوختی غشا پلیمری با دقت خوبی قابل استفاده هستند.

۲-۳- افت ولتاژ اهمی[3]

با فرض ناچیـــز بودن مقـاومت الکترونی در صفحات جمـع کننده‌ی گرافیتی و الکترودهای گرافیتی در برابر مقاومت پروتونی غشا و طبق قانون اهم، افت ولتاژ اهمی از رابطه (۱۲) به دست می‌آید.

$$\eta_{ohmic} = -i.R^{proton} \quad (۱۲)$$

R^{proton} مقاومت در برابر جریان پروتون در غشا است. یک بیان عمومی برای مقاومت که بتواند تمام پارامترهای مهم غشا را در خود داشته باشد به شکل رابطه‌ی (۱۳) است.

$$R^{proton} = r_m\frac{l_m}{A} \quad (۱۳)$$

r_m مقاومت ویژه غشا برای جریان پروتون و l_m ضخامت غشا پلیمر است. یک رابطه‌ی تجربی برای مقاومت ویژه غشا نافیون در مرجع [۷] به شکل معادله‌ی (۱۴) گزارش شده است.

$$r_m = \frac{181.6[1 + 0.03j + 0.062(\frac{T}{303})^2 j^{2.5}]}{(\lambda_{age} - 0.634 - 3j)\exp[4.18(\frac{T-303}{T})]} \quad (۱۴)$$

در این تعریف λ_{age} یک پارامتر قابل تنظیم معمولاً بین ۱۰ تا ۲۰ است که متاثر از روند تولید غشا است [۷]. اطلاعات کامل‌تری در مورد این پارامتر در مرجع [۸] وجود دارد.

[2] Activation Overvoltages
[3] Ohmic Overvoltages

۲-۳- افت‌های انتقال جرم[4]

این افت در اثر محدودیت‌های نفوذ واکنش دهنده‌ها در لایه‌ی پخش گاز و کاتالیست ایجاد می‌شوند. معادله‌ی ارائه شده برای این افت در مرجع [۹] به‌شکل روابط (۱۵) و (۱۶) ارائه شده است.

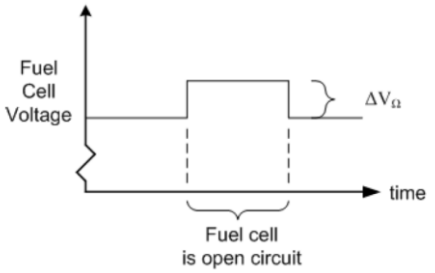
$$\eta_{concentration} = m\ \exp\left(n \cdot i\right) \qquad (۱۵)$$

$$m = 3.3\times10^{-3} - 8.2\times10^{-5}\left(T - 273.15\right) \quad T \le 312.15\ \mathrm{k} \qquad (۱۶\text{-الف})$$

$$m = 1.1\times10^{-4} - 1.2\times10^{-6}\left(T - 273.15\right) \quad T \ge 312.15\ \mathrm{k} \qquad (۱۶\text{-ب})$$

n در این معادلات یک مقدار ثابت است که مرجع [۱۰] مقدار ۰/۰۰۸ را برای آن پیشنهاد کرده است.

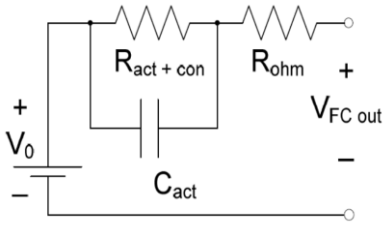
این سه مورد از تلفات ولتاژ می‌توانند مانند مقاومت‌هایی در مدار معادل یک پیل‌سوختی مدل شوند. با توجه به اینکه زمان پاسخ دینامیکی یک پیل‌سوختی در توان متوسط، آرام است؛ ولتاژ پیل‌سوختی نیز پاسخ دینامیکی آرامی دارد. همچنین ولتاژ پیل‌سوختی تا حد زیادی تابع واکنش‌های شیمیایی و تابع تلفات اهمی در الکترودها است. یعنی برای رسیدن واکنش به حالت تعادل، مدت زمانی مورد نیاز است و مثل این است که وقفه‌ای در جریان ایجاد گردد. بنابراین اگر جریان قطع گردد، بلافاصله افت ولتاژ در تلفات اهمی تغییر می‌کند. این افت ولتاژ ناشی از فعال‌شدن و تلفات غلظت واکنش، سبب می‌گردد تا پاسخ به تغییرات جریان چند ثانیه‌ای طول بکشد. شکل (۲) چگونگی پاسخ‌دهی ولتاژ یک پیل‌سوختی در یک جریان ناپیوسته را نشان می‌دهد.



شکل ۲- وقفه جریان پیل‌سوختی [۷]

۳- مدار معادل الکتریکی پیل‌سوختی

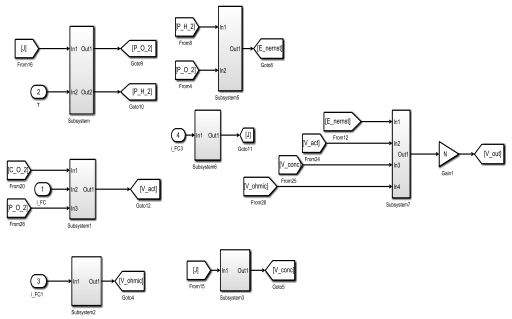
شکل (۳) نشان‌دهنده مدار معادل الکتریکی پیل‌سوختی می‌باشد. تلفات فعال‌شدن و تلفات غلظت را می‌توان توسط ترکیبی از یک مقاومت مدل نمود. همچنین تلفات اهمی در الکترودها را نیز می‌توان توسط یک تک مقاومت مدل‌سازی کرد. از آنجا که فعال‌شدن و افت ولتاژ غلظت، زمان پاسخ‌دهی چند ثانیه‌ای دارد، این مدت زمان تاخیر را می‌توان توسط خازن مدل نمود.



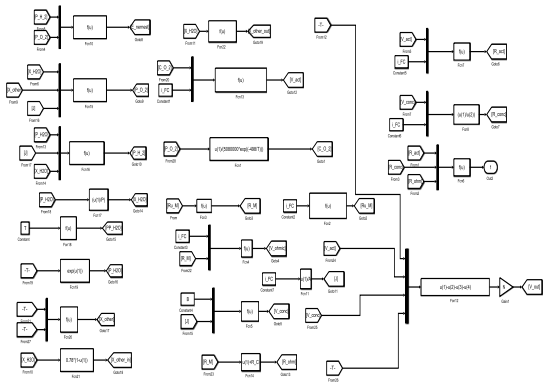
شکل ۳- مدار معادل پیل‌سوختی [۱۱]

۴- شبیه‌سازی پیل‌سوختی پلیمری

در شکل (۴) فقط یک تفسیر و نسخه از مدار معادل پیل‌سوختی نشان داده شده است. این مدار در حقیقت یک مدل شبیه‌سازی شده پیلسوختی از شکل (۵) می‌باشد. همچنین شکل (۵) زیر سیستم و مدل دقیق‌تری از پیل سوختی را بیان می‌کند.



شکل ۴- مدل سیمولینک پیل‌سوختی



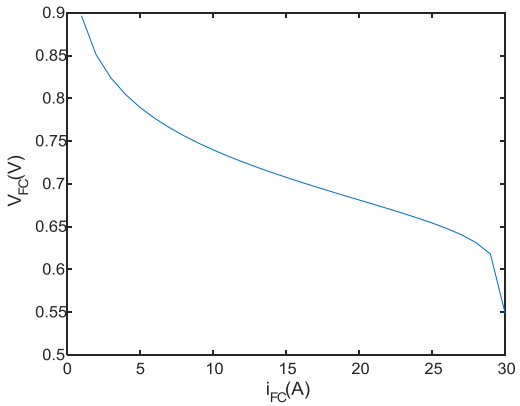
شکل ۵- مدل دقیق و زیر سیستم پیل‌سوختی

۵- نتایج شبیه‌سازی

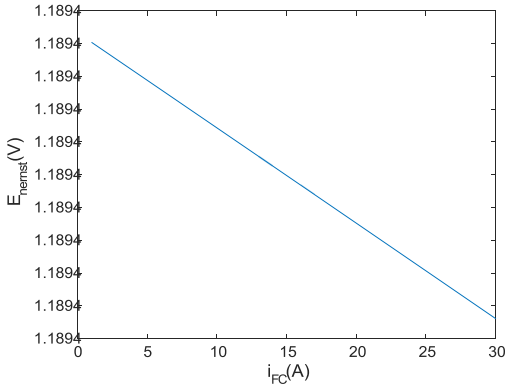
نمودارهای نشان داده شده در شکل‌های (۶) تا (۹)، بیانگر ولتاژ پیل سوختی و افت‌های مربوط به آن بر حسب جریان می‌باشد که به صورت مجزا نمایش داده شده است. در این نمودارها، رفتارهای ولتاژ پیل‌سوختی و افت‌های حاصل از آن در محدوده جریان ۱ تا ۳۰ آمپر و دمای عملکردی ۳۳۳ کلوین مورد بررسی قرار گرفته شده است. در ضمن شکل (۱۰) تجمیعی از نمودارهای (۶) تا (۹) را به صورت همزمان ارائه می‌دهد. لازم به ذکر است که نتایج مورد نظر قابل اعتماد بوده و دقیقاً منطبق بر رفتار

[4] Concentration overvoltage

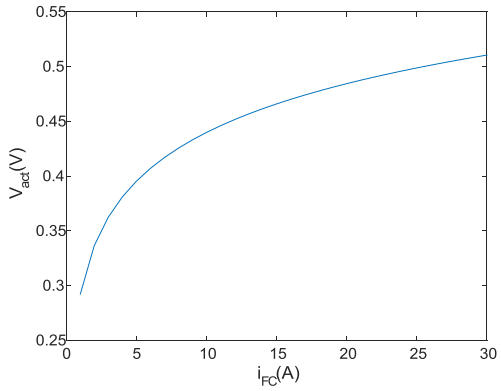
پیل‌سوختی می‌باشد که این خود دلیلی بر اعتبارسنجی انجام شده در مورد نتایج شبیه‌سازی می‌باشد.



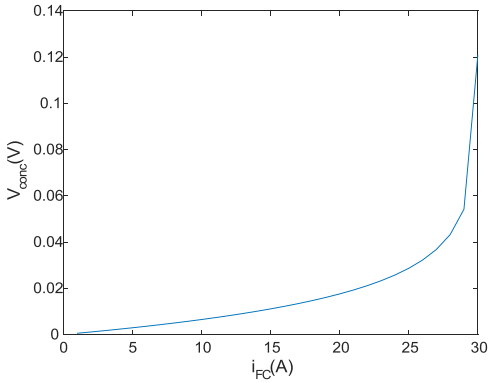
شکل ۶- منحنی ولتاژ پیل‌سوختی بر حسب جریان



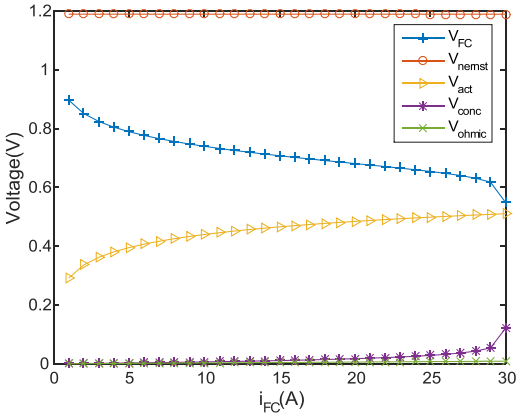
شکل ۷- منحنی ولتاژ نرنست بر حسب جریان



شکل ۸- منحنی افت ولتاژ فعال‌سازی بر حسب جریان

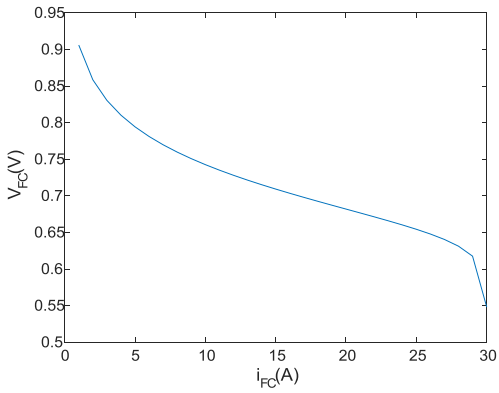


شکل ۹- منحنی افت‌های انتقال جرم بر حسب جریان

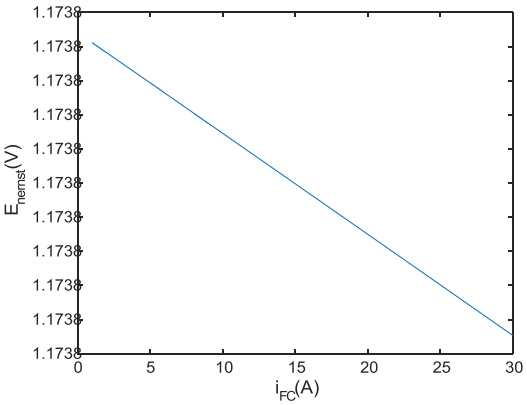


شکل ۱۰- منحنی‌های پلاریزاسیون پیل‌سوختی

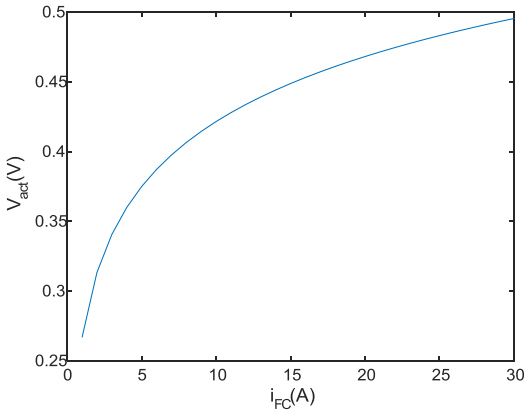
نمودارهای نشان داده شده در شکل‌های(۱۱) تا (۱۴)، بیانگر ولتاژ پیل سوختی و افت‌های مربوط به آن بر حسب جریان می‌باشد که به صورت مجزا نمایش داده شده است. در این نمودارها، رفتارهای ولتاژ پیل‌سوختی و افت های حاصل از آن در محدوده جریان ۱ تا ۳۰ آمپر و دمای عملکردی ۳۴۸ کلوین مورد بررسی قرار گرفته شده است. در ضمن شکل (۱۵) تجمیعی از نمودارهای (۱۱) تا (۱۴) را به صورت همزمان ارائه می‌دهد. لازم به ذکر است که نتایج مورد نظر قابل اعتماد بوده و دقیقاً منطبق بر رفتار پیل‌سوختی مورد نظر می‌باشد که این خود دلیلی بر اعتبارسنجی انجام شده در مورد نتایج شبیه‌سازی محسوب می‌گردد.



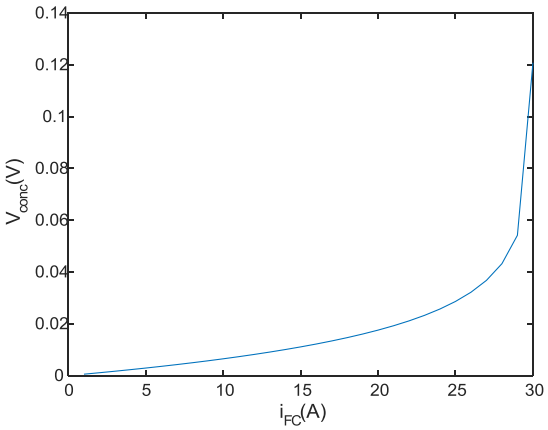
شکل ۱۱- منحنی ولتاژ پیل‌سوختی بر حسب جریان



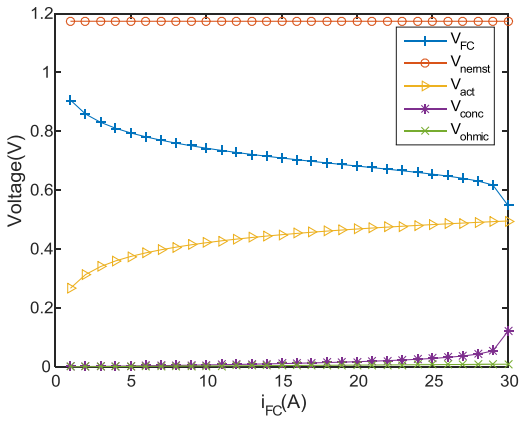
شکل ۱۲- منحنی ولتاژ نرنست بر حسب جریان



شکل ۱۳- منحنی افت ولتاژ فعال‌سازی بر حسب جریان



شکل ۱۴- منحنی افت‌های انتقال جرم بر حسب جریان



شکل ۱۵- منحنی‌های پلاریزاسیون پیل‌سوختی

۵- نتیجه‌گیری

با توجه به افزایش دمای عملکردی به اندازه ۱۵ درجه، مشاهده گردید که میزان افت پتانسیل استاندارد فرایندهای شیمیایی پیل‌سوختی مورد مطالعه بر حسب جریان رو به کاهش بوده و این مقدار برابر با ۲ درصد می باشد. به عبارت دیگر با افزایش دمای عملکردی پیل‌سوختی مورد نظر، سرعت روند کاهش افت ولتاژ، بیشتر شده است. افت ولتاژهای انتقال جرم نیز در اثر افزایش دما تغییر محسوسی نداشته و تقریباً ثابت مانده است. با توجه به اینکه افت ولتاژهای فعال‌سازی، وابستگی بیشتری به تغییرات دما دارد؛ درنتیجه می‌توان این‌گونه بیان نمود که افت ولتاژهای فعال‌سازی بیشترین تاثیر را از میان افت‌های پلاریزاسیون، بر روی پیل‌سوختی پلیمری در اثر تغییرات دما ایفا می‌کند.

۶- فهرست علائم

i	جریان تولیدی پیل (آمپر)
j	چگالی جریان (آمپر بر سانتی متر مربع)
T	دما (K)
l	ضخامت غشا (mm)
P	فشار
r	مقاومت ویژه الکتریکی
R	مقاومت الکتریکی
A	مساحت سطح پیل (m^2)

فهرست علائم یونانی

ψ	ضریب آیزنتروپیک جریان

۷- مراجع

[1] R. F. Mann, J.C. Amphlett, M. A. I. Hooper, H. M. Jensen, B. A. Peppley, P. R. Roberge, Development and application of a generalized steady state electrochemical model for a PEM fuel cell, J. Power Sources, Vol. 86, pp. 173-180, 2000.

[2] M. W. Fowler, RF. Mann, J.C. Amphlett, B. A. Peppley, P. R. Roberge, Incorporation of voltage degradation into a generalized steady state electrochemical model for a PEM fuel cell, J. Power Sources, Vol. 106, pp. 274-283,

2002.

[3] J. C. Amphlett, R. M. Baumert, T. J. Harris, R. F. Mann, B. A. Peppley, P. R. Roberge, Performance mideling of the Ballared Mark IV solid polymer electrolyte fuel cell: 1 mechanistic model development, J. Electrochem. Soc, Vol. 142, pp. 1-8, 1996.

[4] J.C. Amphlett, R.M. Baumert, T.J. Harris, R.F. Mann, B.A. Peppley, P.R. Roberge, Performance modeling of the Ballard Mark IV solid polymer electrolyte fuel cell: 1 mechanistic model development, J. Electrochem. Soc, Vol. 142, pp. 1-8,1995.

[5] G. N. Hatsopoulos and J. H. Keenan, Principles of General Thermodynamics. New York: Wiley, 1965.

[6] J. A. Smith, M. H. Nehrir, V. Gerez, and S. R. Shaw, “A broad look at the workings, types, and applications of fuel cells,” in Proc. IEEE Power Eng. Soc. Summer Meeting, vol. 1, Chicago, IL, Jul. 2002, pp. 70–75.

[7] J. C. Amphlett, R. M. Baumert, R. F. Mann, B. A. Peppley, and P. R. Roberge, “Performance modeling of the Ballard Mark IV solid polymer electrolyte fuelcell, I. Mechanistic model development,” J. Electrochem. Soc., vol. 142, no. 1, pp. 1–8, Jan. 1995.

[8] A. Rowe and X. Li, “Mathematical modeling of proton exchange membrane fuel cells,” J. Power Sources, vol. 102, no. 1–2, pp. 82–96, Dec. 2001.

[9] G. Kortum, Treatise on Electrochemistry(2ndEdition). NewYork: Elsevier, 1965.

[10] R. Chahine, F. Laurencelle, J. Hamelin, K. Agbossou, M. Fournier, T. K. Bose, A. Laperriere, Characterization of a Ballard MK5E proton exchange membrane fuel cell stack, J. Fuel Cells, Vol. 1, pp. 66-71, 2001.

[11] M.T. Iqbal, “Simulation of asmall wind fuelcell hybrid energy system,” Renew. Energy, vol. 28, no. 4, pp. 511–522, Apr. 2003.