

بررسی اثرات چگالی جریان، دما و فشار بر عملکرد پیل سوختی با غشای تبادل پروتون با استفاده از مدل مدار الکتریکی معادل

حدیث محمدی^۱ مجید سنایی پور^۲ حمیدرضا سنایی پور^۳

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد- گروه مهندسی شیمی- دانشکده فنی و مهندسی- دانشگاه اراک- اراک- ایران

hadis.mohammadi1378@gmail.com

۲- استادیار- گروه مهندسی برق- دانشکده فنی و مهندسی- دانشگاه اراک- اراک- ایران

m-sanaeepur@araku.ac.ir

۳- استادیار- گروه مهندسی شیمی- دانشکده فنی و مهندسی- دانشگاه اراک- اراک- ایران

h-sanaeepur@araku.ac.ir

چکیده: پیل سوختی با غشای تبادل پروتون (PEMFC) به دلیل بازده و چگالی توان بالا، دمای عملکرد پایین و عدم نیاز به تعمیر و نگهداری، به عنوان یک فناوری جایگزین برای سوخت‌های فسیلی از اهمیت بالایی برخوردار است. در این پژوهش، ابتدا با استفاده از معادله نرنست و معادلات حاکم بر پیل سوختی، وابستگی عملکرد پیل به چگالی جریان خروجی بررسی می‌شود. سپس، یک مدل مدار الکتریکی معادل با در نظر گرفتن اثرات تلفات اهمی، فعال‌سازی و غلظتی برای پیل ارائه می‌شود. در نهایت به کمک مدل ارائه شده، اثر چگالی جریان خروجی، دما و فشار بر عملکرد پیل سوختی مورد بررسی و مطالعه قرار می‌گیرد. برای حل معادلات حاکم بر پیل از نرم‌افزار متلب استفاده شده است. نتایج به دست آمده از مدل با داده‌های تجربی مقایسه شده و نشان داده شد که عملکرد مدل در چگالی‌های جریان کم، انطباق بسیار خوبی با نتایج تجربی (با خطای کمتر از ۳/۶۲٪) دارد. همچنین مدل ارائه شده، در کل گستره چگالی جریان شبیه سازی شده (از ۰ تا ۰/۶ A/cm²) تخمین قابل قبولی (با خطای حدود ۱۷/۶۶٪) از عملکرد پیل دارد. علاوه بر این، با در نظر گرفتن اثر دمای عملیاتی و فشارهای آند و کاتد در پیل سوختی، نشان داده شد که ولتاژ پیل با افزایش این دو پارامتر افزایش می‌یابد.

واژه‌های کلیدی: پیل سوختی، مدل سازی، مدار الکتریکی معادل، چگالی جریان، دما و فشار

نوع مقاله: پژوهشی

DOI: 10.52547/jiaeee.19.2.121

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۹/۱۱/۲۰

تاریخ پذیرش مشروط مقاله: ۱۴۰۰/۰۳/۲۹

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۰/۰۴/۲۱

نام نویسنده‌ی مسئول: دکتر مجید سنایی پور

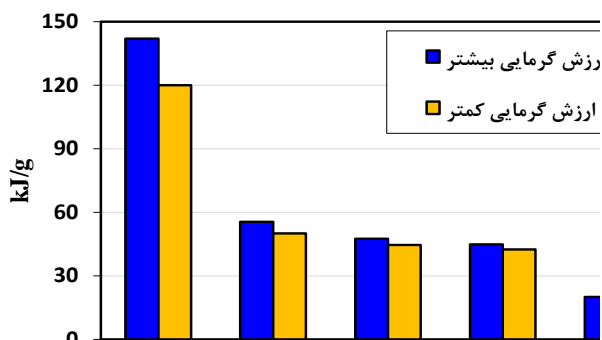
نشانی نویسنده‌ی مسئول: ایران - اراک - میدان بسیج (سردهشت) - ابتدای جاده ملایر- دانشگاه اراک- دانشکده فنی و مهندسی- گروه مهندسی برق

۱- مقدمه

در سال‌های اخیر به دلیل نگرانی‌های روز افزون برای کاهش سوخت-های فسیلی و تغییرات آب و هوایی، فناوری پیل سوختی بیش از پیش مورد توجه قرار گرفته است. استفاده از انرژی‌های نو باعث کاهش وابستگی به منابع فسیلی، کاهش انتشار گازهای آلاینده از بخش‌های تولید و مصرف منابع انرژی و همچنین باعث کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای که تاثیر قابل توجهی بر گرمایش جهانی دارند، می‌شود [۱-۴].

پیل سوختی یک وسیله الکتروشیمیایی است که پتانسیل شیمیایی سوخت را به انرژی الکتریکی مفید تبدیل می‌کند. هر پیل سوختی دارای دو الکترود (آند و کاتد) و یک الکترولیت بین این دو الکترود می‌باشد. گاز هیدروژن به دلیل تمایل زیاد به واکنش‌دهندگی به همراه چگالی انرژی بالا به عنوان سوخت ایده‌آل در پیل سوختی به کار می‌رود. محصول جانبی این واکنش آب و حرارت می‌باشد و در نتیجه آلودگی زیست محیطی نخواهد داشت [۵]. برخی از پیل‌های سوختی که در دمای بالا کار می‌کنند می‌توانند از مونوکسیدکربن نیز به عنوان سوخت استفاده کنند. با این حال، مطمئناً برای پیل‌های سوختی که از پلاتین به عنوان کاتالیزور استفاده می‌کنند این امکان وجود ندارد. حتی مقدار بسیار کمی از مونوکسیدکربن تأثیر بسیار زیادی بر بخش آند دارد و به دلیل میل ترکیبی زیاد با پلاتین، کاتالیزور را می‌پوشاند. در نتیجه می‌توان گفت نوع گاز ورودی با توجه به نوع پیل سوختی تعیین می‌گردد. با این حال، برای پیل‌های سوختی با غشای تبادل پروتون (PEMFC)، تنها سوخت ایده‌آل گاز هیدروژن می‌باشد [۶]. به طور کلی یکی از دلایل توجه بیشتر محققان حوزه انرژی به پیل سوختی پلیمری، ارزش گرمایی هیدروژن نسبت به سوخت‌های دیگر می‌باشد. در تعریف ارزش گرمایی سوخت دو معیار ارزش گرمایی کم و زیاد وجود دارد. ارزش گرمایی کم سوخت، که به عنوان کالری خالص نیز شناخته می‌شود، مقدار گرمای آزاد شده در اثر احتراق مقدار مشخصی از سوخت بدون در نظر گرفتن گرمای نهان تبخیر آب می‌باشد. در ارزش گرمایی زیاد سوخت که به عنوان مقدار کالری ناخالص یا انرژی ناخالص شناخته شده است، مقدار گرمای نهان تبخیر آب در نظر گرفته می‌شود. در شکل شماره ۱ مقدار ارزش گرمایی زیاد و کم برای سوخت‌های معمول نشان داده شده است. همان طور که مشخص است، ارزش گرمایی هیدروژن نسبت به سایر سوخت‌ها بیشتر است [۷].

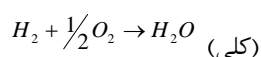
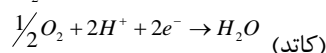
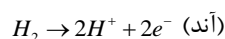
فناوری پیل‌های سوختی، توانایی کاهش مصرف انرژی و وابستگی به سوخت‌های معمول مانند سوخت‌های فسیلی را دارد. در این بین، پیل‌های سوختی با غشای تبادل پروتون دارای ویژگی‌های منحصر به فرد بسیاری از جمله دمای عملیاتی نسبتاً کم (حدود ۶۰-۹۰ °C) و چگالی توان زیاد در مقایسه با پیل‌های سوختی دیگر می‌باشد.

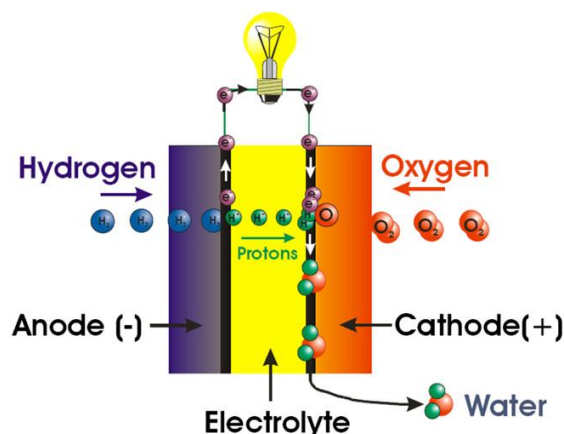


شکل (۱): نمودار مقایسه مقدار ارزش گرمایی برای سوخت‌های مختلف [۷]

دمای عملیاتی کم باعث می‌شود که شروع به کار پیل با سرعت مناسب باشد و باعث فرسودگی کمتری در اجزای سیستم شده و در نتیجه پیل دوام بهتری خواهد داشت. همچنین می‌توان آنها را برای کاربردهای مختلف، به ویژه برای تلفن همراه و تولید برق در مقیاس کوچک طراحی کرد [۸]. مشکل سرعت کم واکنش در آنها را می‌توان به کمک کاتالیزور پلاتین رفع کرد. به این صورت که پلاتین در آند محل‌هایی فراهم می‌آورد که باعث سهولت تجزیه گاز هیدروژن به یون H^+ (پروتون) می‌شود. علاوه بر این، محل‌های ایجاد شده توسط پلاتین در کاتد به مقدار قابل توجهی اتصال H_2 و $1/2 O_2$ را سرعت می‌بخشد. تحولات سال‌های اخیر باعث استفاده از مقادیر اندکی از پلاتین شده و به همین دلیل هزینه تامین پلاتین، بخش کوچکی از قیمت کل PEMFC را به خود اختصاص می‌دهد [۶]. الکترولیت این نوع پیل سوختی، یک جامد پلیمری هادی یون H^+ است. همان طور که در شکل ۲ مشاهده می‌شود، تحت فشار خاص، هیدروژن (H_2) به یک الکترود رسانای متخلخل (آند) عرضه شده و با قرار گرفتن در مجاورت کاتالیزور به یون‌های H^+ و الکترون تفکیک می‌شود.

پروتون‌ها از طریق الکترولیت جریان می‌یابند و الکترون‌ها از طریق یک مدار الکتریکی خارجی عبور کرده و انرژی الکتریکی تولید می‌کند. در کاتد نیز اکسیژن (O_2) وارد شده و بر لایه کاتالیزوری با پروتون‌ها و الکترون‌ها تشکیل آب می‌دهد و گرما تولید می‌کند. واکنش‌های انجام شده در الکترودها عبارتند از [۹]:





شکل (۲): طرح‌واره‌ای از پیل سوختی تبادل پروتونی [۹]

ممکن است پیچیده باشند و بار محاسباتی سنگینی را تحمیل کنند. وانگ^۵ و همکارانش [۲۱] نیز یک مدل سه بعدی پارامتری ارائه کردند که اثرات دما، فشار و رطوبت را در نظر می‌گرفت. آنها نتیجه گرفتند که اگر گازهای ورودی کاملاً مرطوب باشد، با افزایش دما، عملکرد پیل سوختی افزایش می‌یابد و اگر گازها مرطوب نباشد، خشک‌شدگی غشا باعث کاهش قابلیت هدایت پروتونی آن می‌شود و در نتیجه عملکرد پیل کاهش می‌یابد. همچنین آنها دریافتند که در چگالی جریان‌های کم، مرطوب کردن گازهای ورودی سمت آند نیاز است ولی در چگالی جریان‌های زیاد این الزام وجود ندارد. همچنین افزایش فشار گازهای ورودی باعث بهبود عملکرد پیل خواهد شد.

هدف از پژوهش حاضر، بررسی و مدل‌سازی عملکرد یک PEMFC با استفاده از یک مدار الکتریکی معادل و با در نظر گرفتن اثر چگالی جریان بر فشار H_2 ، H_2O و در نهایت بر ولتاژ مدار الکتریکی می‌باشد. از این مدل می‌توان برای پیش‌بینی رفتار جریان-ولتاژ پیل (V-I) در طول زمان استفاده کرد. از آنجا که باتری‌ها و پیل سوختی دارای مشخصه خروجی مشابه هستند، با اصلاح مدل مدار الکتریکی معادل برای یک باتری، می‌توان آن را برای مدل‌سازی رفتار دینامیکی PEMFC استفاده کرد [۲۲]. در این مدل، از یک مدار الکتریکی برای مدل‌سازی عملکرد یک باتری استفاده شده است و تمام اجزای مدار الکتریکی معادل به عنوان تابعی از وضعیت شارژ باتری^۶ (SOC) فرض شده است. برای پیل سوختی تبادل پروتونی، فشار هیدروژن نرمال شده متناظر با SOC در باتری در نظر گرفته شده است [۲۳]. در ادامه ابتدا به بررسی معادلات اصلی PEMFC پرداخته می‌شود. سپس مدل پیشنهادی با در نظر گرفتن جریان متغیر، بررسی شده و با نتایج تجربی مقایسه خواهد شد. در انتها، اثر دمای عملیاتی و فشار جریان سیال در آند و کاتد بر عملکرد پیل به کمک مدل مدار الکتریکی فوق بررسی خواهد شد.

۲- معادلات اصلی

در پیل سوختی تبادل پروتونی، ولتاژ مدار باز برگشت‌پذیر از طریق رابطه زیر محاسبه می‌شود [۶]:

$$E^0 = -\frac{\Delta G}{zF} \quad (1)$$

در این رابطه E^0 ولتاژ برگشت‌پذیر در حالت استاندارد، ΔG تغییر انرژی آزاد گیبس استاندارد برای واکنش کلی تشکیل آب (در اینجا، شرایط استاندارد دمای $25^\circ C$ و فشار ۱ اتمسفر در نظر گرفته شده است)، F ثابت فارادی (مقدار آن برابر با $96485 C/mol$ است)، z تعداد الکترون‌های منتقل شده به ازای هر ملکول سوخت می‌باشد (که در اینجا از سوخت هیدروژن استفاده شده و به ازای هر ملکول ۲ الکترون منتقل می‌شود).

برای شرایط غیراستاندارد، ولتاژ برگشت‌پذیر پیل سوختی را می‌توان از موازنه انرژی بین واکنش‌دهنده‌ها و محصولات محاسبه کرد. به این

همان طور که بیان شد، عملکرد PEMFC توسط پارامترهای بسیاری مانند دما، فشار، غلظت H_2 و O_2 و رطوبت نسبی تحت تاثیر قرار می‌گیرد [۱۰]. امروزه با افزایش قدرت محاسباتی و حجم ذخیره اطلاعات در سیستم‌های کامپیوتری، شبیه‌سازی عملکرد سیستم‌های مختلف به دلیل کاهش هزینه‌های طراحی و آزمایش‌های عملی از اهمیت بالایی در علوم و مهندسی برخوردار است [۱۱-۱۴]. مدل‌سازی و شبیه‌سازی در طراحی، ارزیابی عملکرد، مدیریت و بهینه‌سازی یک PEMFC نقش قابل توجهی دارد [۱۵-۱۷]. برای مدل‌سازی دقیق اثرات تغییر در سوخت‌رسانی، بار الکتریکی یا تغییرات شرایط داخلی به یک مدل دینامیکی دقیق نیاز است. حتی در یک مدل‌سازی استاتیکی، مدل دینامیکی می‌تواند برای تحلیل آغاز و پایان سیکل کاری استفاده شود. مدل‌های PEMFC لزوماً نباید مقادیر دقیق برای هر مقدار محاسبه شده را از دامنه محاسبات ارائه دهند، بلکه باید روندهایی را در طیف گسترده‌ای از شرایط عملیاتی ارائه دهند. در ادامه به تعدادی از مدل‌های دینامیکی که تاکنون ارائه شده‌اند، اشاره می‌شود.

سالوا^۲ و همکارانش [۱۸] یک مدل تحلیلی یک بعدی برای بهینه‌سازی شرایط عملیاتی یک پیل سوختی ارائه کردند. شرایط عملیاتی به دست آمده در مدل در پیل واقعی آزمایش شد و توافق خوبی بین نتایج تجربی و مدل را نشان داد. آملفت^۳ و همکارانش [۱۹] یک مدل پارامتری با استفاده از ترکیبی از روش‌های مدل‌سازی مکانیکی و تجربی برای پیش‌بینی عملکرد یک PEMFC ارائه کردند. در این مدل، تلفات فعال‌سازی و اهمی در نظر گرفته شد. فشار بخار و غلظت هیدروژن و اکسیژن به صورت تجربی به عنوان تابعی از دما، چگالی جریان و کسرهای مولی در کانال گاز تعیین شد. تطابق مدل فوق با داده‌های تجربی خوب بود. پیسانی^۴ و همکارانش [۲۰] یک رابطه نیمه تجربی برای توصیف منحنی عملکرد PEMFC ارائه کردند. رابطه ارائه شده آنها بر این اساس بود که کاهش ولتاژ برای پیل‌هایی که خوراک آنها هیدروژن و هواست، به ناحیه واکنشی کاتد مربوط می‌شود. تنها جمله تجربی در معادلات عملکرد پیل در این مدل، اضافه ولتاژ اهمی بود که به صورت تابعی خطی از دانسیته جریان در نظر گرفته شد. از آنجا که این مدل‌ها با روابط تجربی یا نیمه تجربی توصیف می‌شود

$$V = E - A \ln\left(\frac{i}{i_0}\right) - ir - m \exp(ni) \quad (8)$$

در این معادلات، E ولتاژ مدار باز برگشت پذیر^{۱۱}، A ثابت معادله تافل^{۱۲}، i چگالی جریان (mA/cm^2)، i_0 چگالی جریان تبدیلی^{۱۳} (mA/cm^2)، m و n ثابت‌هایی برای معادله تجربی انتقال جرم و r مقاومت اهمی جریان یون‌ها از طریق اجزای پیل سوختی بر حسب $\text{k}\Omega \cdot \text{cm}^2$ است که نحوه محاسبه آنها در جدول ۱ ذکر شده است. از آنجایی که در جمله دوم معادله (یعنی تلفات فعال سازی)، مقدار i_0 ثابت می‌باشد و متناسب با نوع کاتالیزور تعیین می‌شود (در این مطالعه از پلاتین به عنوان کاتالیزور استفاده شده است)، می‌توان با فرض یک ولتاژ مدار باز واقعی معادله را به صورت زیر در آورد [۶]:

$$\Delta V_{act} = A \ln\left(\frac{i}{i_0}\right) = A \ln(i) - A \ln(i_0) \quad (9)$$

$$E_{OC} = E + A \ln(i_0) \quad (10)$$

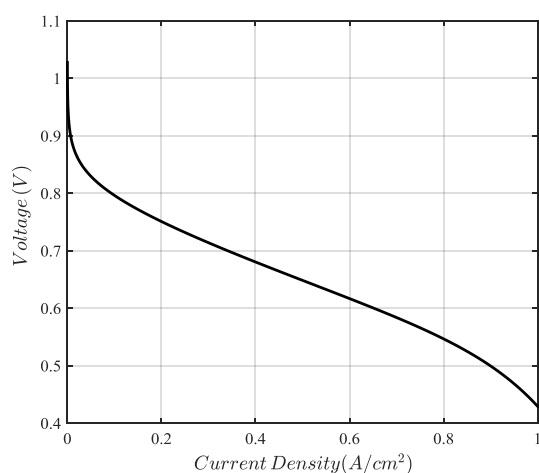
با در نظر گرفتن این مورد، معادله (۸) به صورت زیر در می‌آید:

$$V = E_{OC} - A \ln(i) - ir - m \exp(ni) \quad (11)$$

در کار حاضر با اعمال دمای 70°C و فشار ۱ اتمسفر در معادلات ذکر شده، ولتاژ یک پیل سوختی را می‌توان بررسی کرد که با در نظر گرفتن تلفات ذکر شده، منحنی حاصل به صورت شکل ۳ به دست می‌آید.

جدول (۱): ضرایب معادله ۱۱ برای یک پیل سوختی تبادل پروتونی [۲۵]

ضرایب	مقادیر
$R_{oh} (\text{k}\Omega \cdot \text{cm}^2)$	$4.77 \times 10^{-4} - (3.32 \times 10^{-6} \times T_C)$
$A(V)$	$4.01 \times 10^{-2} - (1.4 \times 10^{-4} \times T_C)$
$m(V)$	$1.1 \times 10^{-4} - (1.2 \times 10^{-6} \times T_C)$
$n(\text{cm}^2 \cdot \text{mA}^{-1})$	8×10^{-3}



شکل (۳): منحنی ولتاژ بر حسب چگالی جریان برای پیل سوختی

منظور، E برای یک واکنش الکتروشیمیایی توسط معادله نرنست^{۱۴} به صورت زیر محاسبه می‌شود [۶]:

$$E = E^0 + \frac{RT}{2F} \ln\left(\frac{P_{H_2} P_{O_2}^{\frac{1}{2}}}{P_{H_2O}}\right) \quad (2)$$

که در این رابطه R ثابت جهانی گازها (برابر با 8.314 J/K.mol) و T دمای عملیاتی سلول بر حسب کلونین (K) است. همچنین P_{O_2} ، P_{H_2} و P_{H_2O} به ترتیب فشار جزئی اعمال شده توسط گاز هیدروژن، اکسیژن و بخار آب موجود بر حسب اتمسفر می‌باشد. معادله فوق پس از ساده سازی به صورت زیر در آمده است [۱۹]:

$$E = 1.229 - (8.5 \times 10^{-4})(T - 298.15) + 4.308 \times 10^{-5} T (\ln(P_{H_2}) + \frac{1}{2} \ln(P_{O_2})) \quad (3)$$

برای محاسبه فشار موجود در معادلات یک PEMFC، با استفاده از فرضیات زیر، فشار اشباع آب توسط معادله (۴) محاسبه می‌شود [۵]:

۱. توزیع گاز ایده‌آل و یکنواخت

۲. رفتار یک بعدی

۳. ثابت بودن فشار در کانال جریان گاز پیل سوختی

۴. هیدروژن و اکسیژن ورودی مرطوب شده باشند

اثر فشار بخار آب آند 50% فشار بخار اشباع است، در حالی که اثر فشار آب کاتد 100% است.

$$\log_{10} P_{H_2O} = -2.1794 + 0.02953 T_c - 9.1837 \times 10^{-5} T_c^2 + 1.4454 \times 10^{-7} T_c^3 \quad (4)$$

در این رابطه، T_c دمای عملیاتی سلول بر حسب $^\circ\text{C}$ می‌باشد. فشار جزئی هیدروژن و اکسیژن نیز از معادلات (۵) و (۶) محاسبه می‌شود [۲۴]:

$$P_{H_2} = 0.5 * \left[\frac{P_a}{\exp\left(\frac{1.653 \times i}{T^{1.334}}\right)} \right] - P_{H_2O} \quad (5)$$

$$P_{O_2} = \left[\frac{P_c}{\exp\left(\frac{4.192 \times i}{T^{1.334}}\right)} \right] - P_{H_2O} \quad (6)$$

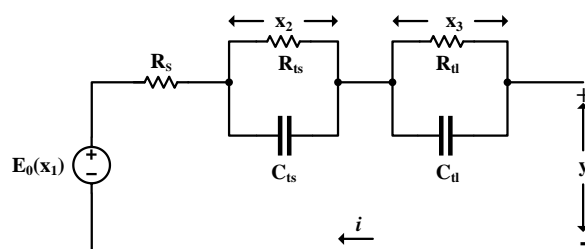
در این معادلات P_{H_2O} فشار استاندارد هیدروژن بر حسب اتمسفر، T دمای مطلق بر حسب کلونین (K) و P_a و P_c به ترتیب فشار جزئی کاتد و آند بر حسب اتمسفر می‌باشند. هنگامی که یک پیل سوختی واقعی ساخته شده و مورد استفاده قرار بگیرد، معمولاً ولتاژ آن کمتر از مقدار تخمین زده شده است که اغلب تفاوت این مقدار، قابل توجه می‌باشد [۵]. به همین دلیل کار واقعی در پیل سوختی به دلیل برگشت ناپذیری‌های دیگر در فرآیند، کمتر از حداکثر کار مفید است. این برگشت ناپذیری‌ها (تلفات ولتاژ برگشت ناپذیر) عبارتند از: تلفات فعال سازی^{۱۵} (V_{act})، تلفات اهمی^{۱۶} (V_{ohmic}) و تلفات غلظتی^{۱۷} (V_{conc}) که با در نظر گرفتن آنها ولتاژ پیل به صورت زیر محاسبه می‌شود [۶]:

$$V = E - \Delta V_{act} - \Delta V_{ohmic} - \Delta V_{conc} \quad (7)$$

۳- مدل پیشنهادی

چن و مورا^{۱۴} [۲۲] برای تشریح وضعیت باتری، یک مدار الکتریکی شامل سه مقاومت و دو خازن در نظر گرفتند. معادلات حاصل با استفاده از مدار تابع متغیر SOC یا میزان شارژ باتری و چگالی جریان در نظر گرفته شد. علی و همکارانش [۲۶] به دنبال این کار مدل الکتریکی قبل را بررسی کرده و نتایج حاصل را برای تخمین پارامترهای مدل باتری یون لیتیومی به منظور تعیین دقیق وضعیت شارژ باتری (SOC) به کار بردند. طیب^{۱۵} و همکارانش [۲۷] نیز مدل مداری فوق را برای یک PEMFC در نظر گرفتند. اما مطالعات آنها بر اساس ثابت بودن چگالی جریان، دما و فشار بوده و اثر پارامترهای فوق در نظر گرفته نشد. همچنین اثر کاتالیزور استفاده شده را در نظر نگرفتند.

در پژوهش حاضر با بهره‌گیری از معادلات مدار الکتریکی ذکر شده در بالا، این مدل را برای یک PEMFC تعمیم داده و معادلات حاصل به صورت تابعی از فشار نرمال شده هیدروژن (x_1) در پیل سوختی در نظر گرفته شد. معادله نرنست نیز به معادله ۱۹ ساده شده تا تنها تابعی از فشار هیدروژن باشد. شکل ۴ مدل مدار الکتریکی معادل در نظر گرفته شده برای PEMFC را نشان می‌دهد.



شکل (۴): مدار الکتریکی معادل برای پیل سوختی غشای تبادل پروتونی (PEMFC) [۲۱]

در مدار الکتریکی فوق، \dot{x}_2 و \dot{x}_3 به ترتیب ولتاژهای $R_{ts}||C_{ts}$ و $R_{tl}||C_{tl}$ (اعداد حقیقی غیرمنفی) هستند. ترکیب موازی $R_{ts}||C_{ts}$ و $R_{tl}||C_{tl}$ به ترتیب دینامیک ولتاژ ترمینال کوتاه مدت و بلند مدت را مدل‌سازی می‌کنند و معادل تلفات غلظتی و فعال‌سازی هستند، در حالی که مقاومت سری R_s تلفات اهمی را نشان می‌دهد. با در نظر گرفتن معادلات حاصل برای هر یک از اجزای مدار می‌توان ولتاژ ترمینال خروجی (V) مدار الکتریکی را محاسبه کرد. در این معادلات $i(t)$ جریان تخلیه^{۱۶} بر حسب آمپر (A) می‌باشد که با در نظر گرفتن سطح مقطع 1 cm^2 معادل چگالی جریان در قسمت قبل می‌باشد.

$$\dot{x}_2(t) = -\frac{x_2(t)}{R_{ts}(x_1)C_{ts}(x_1)} + \frac{i(t)}{C_{ts}(x_1)} \quad (۱۲)$$

$$\dot{x}_3(t) = -\frac{x_3(t)}{R_{tl}(x_1)C_{tl}(x_1)} + \frac{i(t)}{C_{tl}(x_1)} \quad (۱۳)$$

$$R_{ts}(x_1) = 0.3208e^{-29.14x_1} + 0.04669 \quad (۱۴)$$

$$R_{tl}(x_1) = 6.603e^{-155.2x_1} + 0.04984 \quad (۱۵)$$

$$C_{ts}(x_1) = -752.9e^{-13.51x_1} + 703.6 \quad (۱۶)$$

$$C_{tl}(x_1) = -6056e^{-27.12x_1} + 4475 \quad (۱۷)$$

$$R_s(x_1) = 4.923 \times 10^{-6} e^{-6.34 \times 10^{-4} x_1} + 1.567 \quad (۱۸)$$

$$E(x_1) = 1.229 - (8.5 \times 10^{-4})(T - 298.15) \quad (۱۹)$$

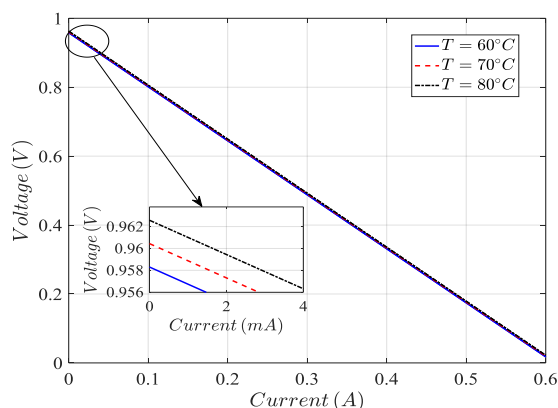
$$+ 4.308 \times 10^{-5} T \log(x_1)$$

$$V = E_{OC}(x_1) - i(t)R_s(x_1) - x_2(t) - x_3(t) \quad (۲۰)$$

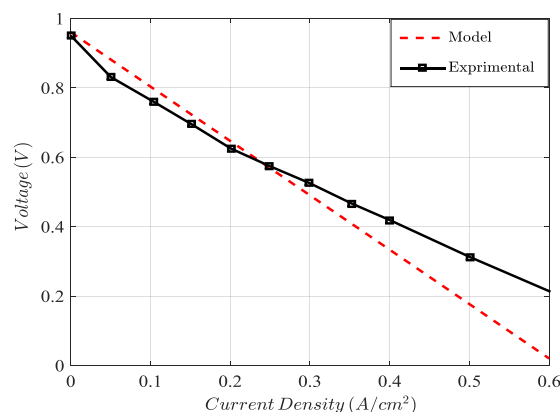
برای حل معادلات نوشته شده برای مدار الکتریکی (معادلات ۱۸-۱۲ [۲۶, ۲۲]) و معادله نهایی مربوط به مدل مدار الکتریکی معادل، از نرم‌افزار متلب^{۱۷} استفاده شده است. در ادامه به بررسی نتایج حاصل از مدل سازی پیل سوختی و مقایسه آن با نتایج تجربی پرداخته می‌شود.

۴- نتایج و بحث

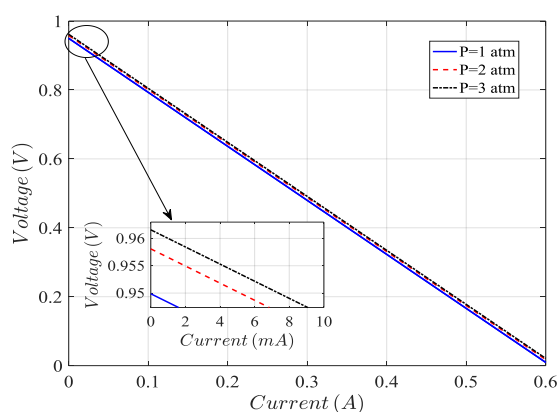
بر اساس نتایج با اعمال جریان پله‌ای 0.1 A در بازه (چگالی جریان) 0.06 A/cm^2 در دمای ثابت 70°C و فشار 1 اتمسفر، منحنی عملکرد پیل به صورت شکل ۵ در آمده است. همان طور که مشاهده می‌شود در این شکل با افزایش جریان، مقدار ولتاژ کاهش یافته است. عملکرد مدل ارائه شده، در چگالی‌های جریان کم (کوچک‌تر از $0.3/62 \text{ A/cm}^2$) انطباق بسیار خوبی با نتایج تجربی (با خطای کمتر از $0.3/62$) دارد. همچنین مدل ارائه شده، در کل گستره چگالی جریان شبیه سازی شده (از 0 تا 0.06 A/cm^2) نیز تخمین قابل قبولی (با خطای حدود $0.17/66$) از عملکرد پیل دارد. نتایج تجربی حاصل از کار امیری‌نژاد و همکارانش [۲۷]، رفتار مدل ارائه شده را تایید می‌کند. علت خطی بودن نمودار حاصل از مدل مدار الکتریکی، غلبه تلفات اهمی بر دو نوع دیگر (غلظتی و فعال‌سازی) می‌باشد که در شکل ۶ این تفاوت به طور واضح‌تری نشان داده شده است. شکل ۶ به مقایسه اثر هر یک از تلفات در مدل مدار الکتریکی پرداخته است. بر اساس شکل، همان‌طور که گفته شد مقدار تلفات اهمی نسبت به سایر تلفات بیشتر بوده، لذا تاثیر دو جمله دیگر بر منحنی پلازاسیون پیل ناچیز می‌باشد.



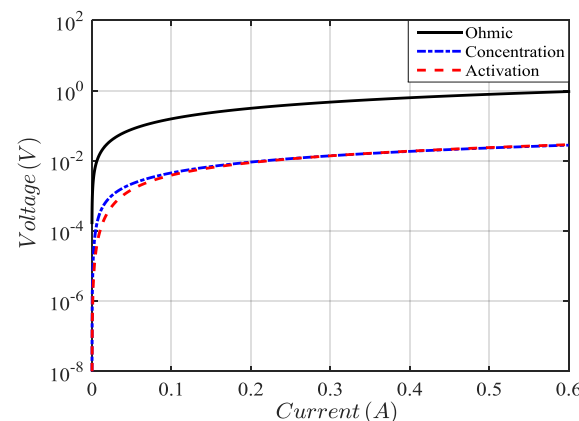
شکل (۷): اثر دما بر عملکرد پیل سوختی در مدل مدار الکتریکی حاضر (فشار آند و کاتد ۱ اتمسفر می باشد)



شکل (۸): مقایسه منحنی عملکرد پیل سوختی حاصل از نتایج تجربی مرجع [۲۷] با مدل مدار الکتریکی حاضر (دما ۷۰ °C و فشار آند و کاتد ۱ اتمسفر می باشد)



شکل (۹): اثر فشار بر عملکرد پیل سوختی در مدل مدار الکتریکی حاضر (دما ۷۰ °C می باشد)



شکل (۱۰): منحنی لگاریتمی میزان اثر تلفات اهمی، غلظتی و فعال - سازی بر ولتاژ بر حسب جریان (دما ۷۰ °C و فشار آند و کاتد ۱ اتمسفر می باشد)

۵- نتیجه گیری

در این تحقیق یک مدل مدار الکتریکی معادل با در نظر گرفتن اثر سه نوع تلفات اهمی، غلظتی و فعال سازی، برای مدل سازی یک پیل سوختی با غشای تبادل پروتون ارائه شد. سپس با استفاده از مدل ارائه شده، اثرات چگالی جریان، فشار و دما بر عملکرد پیل مورد بررسی و مطالعه قرار گرفت. نتایج حاصل از مدل مدار الکتریکی معادل نشان می دهد با افزایش چگالی جریان خروجی، ولتاژ خروجی پیل کاهش می یابد. همچنین میزان تاثیر هر یک از انواع تلفات بر عملکرد پیل سوختی بررسی گردیده و نشان داده شد که تلفات اهمی بر سایر تلفات غلبه دارد. با بررسی اثرات دما و فشار بر عملکرد پیل نیز مشخص شد که افزایش دمای عملیاتی پیل و همچنین افزایش فشار آند و کاتد موجب بهبود عملکرد و اثر مثبت بر ولتاژ خروجی آن خواهد شد. از مقایسه نتایج مدل مدار الکتریکی با داده های تجربی مشخص شد که این مدل در چگالی های جریان کمتر از 0.3 A/m^2 از دقت بسیار خوبی برخوردار است (با خطای کمتر از 3.4%). در صورت منظور کردن چگالی های جریان بیشتر (تا 0.6 A/m^2) نیز، مدل ارائه شده یک تخمین قابل قبول از عملکرد پیل (با خطای حدود 17.6%) به

در شکل ۷ به بررسی تاثیر دما بر عملکرد پیل سوختی پرداخته شده است. همان طور که دیده می شود با افزایش دما، مقدار ولتاژ خروجی پیل سوختی افزایش یافته است. بنابراین می توان گفت افزایش دما اثر مثبتی بر ولتاژ خروجی پیل سوختی دارد. در شکل ۸ نیز اثر فشار بر ولتاژ پیل سوختی بررسی شده است. از آنجا که در مدل مدار الکتریکی فوق، در معادله نرنست، فشار هیدروژن به صورت نرمال شده در نظر گرفته شده است، لذا برای نشان دادن اثر فشار لازم است که فشار هیدروژن در معادله قرار گرفته تا اثر آن مشخص شود. همان طور که مشخص است، با افزایش فشار نیز میزان ولتاژ خروجی پیل افزایش یافته است. بنابراین می توان گفت افزایش فشار نیز اثر مثبت بر عملکرد پیل سوختی خواهد داشت.

دست می‌دهد. مقایسه نتایج حاصل از مدل مداری ارائه شده با نتایج تجربی تطابق خوبی را نشان می‌دهد.

مراجع

- Amirkabir Journal of Mechanical Engineering, vol. 51, no. 2, pp. 77-79, 2019.
- [16] Ö. Atlam and G. Dündar, "A practical equivalent electrical circuit model for proton exchange membrane fuel cell (PEMFC) systems," International Journal of Hydrogen Energy, vol. 46, no. 24, pp. 13230-13239, 2021.
- [17] R. Pan, D. Yang, Y. Wang, and Z. Chen, "Health degradation assessment of proton exchange membrane fuel cell based on an analytical equivalent circuit model," Energy, vol. 207, p. 118185, 2020.
- [18] J.A. Salva, A. Iranzo, F. Rosa, E. Tapia, E. Lopez, and F. Isorna, "Optimization of a PEM fuel cell operating conditions: Obtaining the maximum performance polarization curve," International Journal of Hydrogen Energy, vol. 41, no. 43, pp. 19713-19723, 2016.
- [19] J.C. Amphlett, R.M. Baumert, R.F. Mann, B.A. Peppley, P.R. Roberge, and T.J. Harris, "Performance modeling of the Ballard Mark IV solid polymer electrolyte fuel cell: I. Mechanistic model development," Journal of the Electrochemical Society, vol. 142, no. 1, p. 1, 1995.
- [20] L. Pisani, G. Murgia, M. Valentini, and B. D'Aguanno, "A new semi-empirical approach to performance curves of polymer electrolyte fuel cells," Journal of Power Sources, vol. 108, no. 1-2, pp. 192-203, 2002.
- [21] C. Wang, W. Gu, and B. Liaw, "Micro-Macroscopic Coupled Modeling of Batteries and Fuel Cells: I. Model Development," Journal of the Electrochemical Society, vol. 145, no. 10, p. 3407, 1998.
- [22] M. Chen and G. A. Rincon-Mora, "Accurate electrical battery model capable of predicting runtime and IV performance," IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 21, no. 2, pp. 504-511, 2006.
- [23] A. Taieb, S. Mukhopadhyay, and A. Al-Othman, "Dynamic model of a proton-exchange membrane fuel cell using equivalent electrical circuit," in 2019 Advances in Science and Engineering Technology International Conferences (ASET), 2019: IEEE, pp. 1-4.
- [24] A. Mohiuddin, N. Basran, and A. Khan, "Modelling and validation of Proton exchange membrane fuel cell (PEMFC)," IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, vol. 290, 2018.
- [25] J. Kim, S.M. Lee, S. Srinivasan, and C.E. Chamberlin, "Modeling of proton exchange membrane fuel cell performance with an empirical equation," Journal of the Electrochemical Society, vol. 142, no. 8, p. 2670, 1995.
- [26] D. Ali, S. Mukhopadhyay, H. Rehman, and A. Khurram, "UAS based Li-ion battery model parameters estimation," Control Engineering Practice, vol. 66, pp. 126-145, 2017.
- [27] M. Amirinejad, S. Rowshanzamir, and M.H. Eikani, "Effects of operating parameters on performance of a proton exchange membrane fuel cell," Journal of Power Sources, vol. 161, no. 2, pp. 872-875, 2006.
- [1] S. Satyapal, US Department of Energy Hydrogen and Fuel Cells Program: 2019 Annual Merit Review and Peer Evaluation Report; 2019, Arlington, Virginia (No. NREL/BK-6A20-74379; DOE/GO-102019-5199). National Renewable Energy Lab. (NREL), Golden, CO (United States).
- [2] A. Torabi Ardakani and M.B. Ghofrani, "Economic Competitiveness of nuclear power plants in iran," Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers. vol. 7, no. 1, pp. 25-33, 2010.
- [3] M. Parvizimosaed, F. Farmani, A. Anvari-Moghaddam, A. Rahimi-kian, and H. Monsef, "A multi-objective algorithm for siting and sizing of renewable resources in distribution network considering load model," Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers, vol. 12, no. 1, pp. 59-68, 2015.
- [4] A. Khanahmadi and R. Ghaffarpour, "Optimal design and practical implementation of hybrid renewable energy systems in remote areas: case study," Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers, vol. 18, no. 2, pp. 139-151, 2021.
- [5] C. Spiegel, Designing and Building Fuel Cells, 1st ed., McGraw-Hill Professional Publishing, New York, 2007.
- [6] J. Larminie, A. Dicks, Fuel Cell Systems Explained, 2nd ed., John Wiley & Sons, Ltd., Chichester, UK, 2003.
- [7] B. Abderezzak, Introduction to transfer phenomena in PEM fuel cells, 1st ed., Elsevier, Amsterdam, Netherlands, 2018.
- [8] K. Kordesch and G.R. Simader, Fuel cells and their applications, 1st ed., Wiley-VCH, Weinheim, 1996.
- [9] S.J. Peighambari, S. Rowshanzamir, and M. Amjadi, "Review of the proton exchange membranes for fuel cell applications," International Journal of Hydrogen Energy, vol. 35, no. 17, pp. 9349-9384, 2010.
- [10] E.U. Ubong, Z. Shi, and X. Wang, "Three-dimensional modeling and experimental study of a high temperature PBI-based PEM fuel cell," Journal of the Electrochemical Society, vol. 156, 2009.
- [11] M. Sanaeepur, A.Y. Goharrizi, and M.J. Sharifi, "Numerical investigation of the effect of substrate surface roughness on the performance of zigzag graphene nanoribbon field effect transistors symmetrically doped with BN," Beilstein Journal of Nanotechnology, vol. 5, no. 1, pp. 1569-1574, 2014.
- [12] M. Sanaeepur, "Dielectric surface roughness scattering limited performance of MLG NR interconnects," IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, vol. 61, no. 2, pp. 532-537, 2018.
- [13] M. Sanaeepur, "On the resistivity of multi-layer graphene nanoribbon interconnects," in 2019 27th Iranian Conference on Electrical Engineering (ICEE), 2019: IEEE, pp. 50-53.
- [14] M. Sanaeepour, A. Abedi, and M. J. Sharifi, "Performance analysis of nanoscale single layer graphene pressure sensors," IEEE Transactions on Electron Devices, vol. 64, no. 3 pp. 1300-1304, 2017.
- [15] K. Mohammadzadeh and H. Khaleghi, "Numerical investigation of water management in the cathode and anode sides of proton exchange membrane fuel cell,"

¹ Proton Exchange Membrane Fuel Cell

² Salva

³ Amphlett

⁴ Pisani

⁵ Wang

⁶ State of Charge (SOC)

⁷ Nernst

⁸ Activation Losses

-
- ⁹ Ohmic Losses
¹⁰ Concentration Losses
¹¹ Open Circuit Voltage
¹² Tafel Equation
¹³ Exchange Current Density
¹⁴ Chen & Mora
¹⁵ Taieb
¹⁶ Discharge
¹⁷ MATLAB

