بررسی اثر شرایط کارکردی سمت کاتد بر عملکرد پیل‌سوختی پلیمری

سید مهدی مهنما[۱]، حامد جنت امانی[۲]

تاریخ دریافت مقاله: ۹۵/۰۶/۲۳

تاریخ پذیرش مقاله: ۹۵/۱۱/۱۰

چکیده:

این مقاله به بررسی تأثیر شرایط کارکردی سمت کاتد یک پیل سوختی پلیمری بر روی عملکرد آن می‌پردازد. برای این منظور، شبیه سازی دوبعدی و دوفازی یک واحد پیل سوختی انجام شده است. معادلات حاکم بر جریان پیل سوختی با استفاده از مدل چند فازی میکسچر و با لحاظ نمودن مدل تک ناحیه ای با استفاده از کد نویسی حل شده و غلظت اجزای واکنش‌گر و در نتیجه، منحنی قطبیت پیل به دست آمده اند. همچنین اثر تغییر ولتاژ، فشار، دما، سرعت و رطوبت نسبی سمت کاتد بر میزان غلظت اکسیژن و آب و نیز عملکرد پیل مورد مطالعه و ارزیابی قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهد با افزایش میزان دمای کارکرد پیل، عملکرد پیل سوختی بهبود می‌یابد. همچنین با افزایش سرعت، فشار و رطوبت نسبی جریان گاز ورودی، راندمان پیل افزایش می‌یابد. به منظور صحه‌گذاری مدل، نتایج حاصل از شبیه‌سازی با نتایج آزمایشگاهی مقایسه گردیده و تطابق خوبی مشاهده شده است.

کلمات کلیدی:

پیل سوختی پلیمری، شبیه سازی دوفازی، ،منحنی عملکرد پیل

۱) مربی- دانشگاه آزاد اسلامی ـ واحد رامسر (نویسنده مسئول) m.mahnama@srbiau.ac.ir

۲) کارشناس مکانیک-دانشگاه آزاد اسلامی ـ واحد رامسر jannatamani.hamed@gmail.com

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-10-27]

مقدمه

پیل‌های سوختی مبدل‌های انرژی هستند که انرژی ذخیره شده در سوختها و اکسیدکننده ها را از طریق واکنش‌های الکتروشیمیایی به الکتریسیته تبدیل می‌کنند و از آنها به عنوان منابع انرژی در آینده یاد می‌شود. در میان انواع مختلف پیل سوختی، پیل‌های سوختی غشاء تبادل یونی (پلیمری)[1] به دلیل چگالی توان بالا و دمای عملکردی پایین، بسیار مورد توجه بوده و به عنوان یکی از گزینه‌های جایگزینی منبع تولید توان در خودروها و نیز کاربری ذخیره سازی انرژی در آینده به شمار می‌روند. مطالعات آزمایشگاهی زیادی تاکنون به منظور مشاهده پدیده‌های مختلف در پیل‌های سوختی پلیمری انجام شده است، اما به دلیل مشکلات موجود در روش‌های آزمایشگاهی، استفاده از روش‌های دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) به منظور تحلیل و بررسی پدیده های انتقال حرارت و جرم در قسمت‌های مختلف پیل سوختی، تحلیل غلظت ترکیبات و در نهایت، بررسی راندمان عملکردی پیل به عنوان جایگزین انجام آزمایش‌های متعدد، معمول گشته است. روش‌های معمول مدل‌سازی دوفازی جریان در پیل سوختی که بر پایه حل معادلات بقاء می‌باشند، مدل مولتی فلوید[2] و روش میکسچر[3] می‌باشند. در مدل مولتی فلوید که اولین بار توسط کارنز و جیلالی [۲] برای مدل‌سازی پیل سوختی پلیمری استفاده گردید، هر فاز توسط یک دسته از معادلات بقاء معرفی می‌گردند و این دو فاز با حالت اشباع کوپل می‌گردند. این مدل از کمترین فرضیات استفاده نموده است، اما به متغیرهای وابسته زیادی نیاز دارد و کوپل نمودن فازها ممکن است منجر به ناپایداری حل عددی گردد. مدل میکسچر برای اولین بار توسط ونگ و همکارانش [۱۴] در مدل‌سازی پیل‌های سوختی پلیمری استفاده گردید و در فعالیت‌های بعدی ونگ و همکارانش [۷،۸،۱۳] و نیز توسط لیو و یو [۱۱،۱۲] توسعه یافت. مدل چند فازی میکسچر معادلات بقاء را برای مخلوط دو فازی (مخلوط آب مایع و گاز) حل می‌نماید که اصولاً بر پایه ویژگی‌های متوسط جرمی مخلوط دو فازی می‌باشد.

تشریح کامل تأثیر شرایط کارکردی بر روی عملکرد پیل با استفاده از مدل‌های واقعی‌تر همچنان از اهمیت فراوانی برخوردار است. مطالعات گسترده‌ای در رابطه با پیل سوختی و تأثیر پارامترهای مختلف در نحوه عملکرد پیل به صورت آزمایشگاهی و عددی صورت گرفته که به تعدادی از آنها اشاره می‌شود. هی و همکارانش [۳] یک پیل سوختی PEM دوبعدی، هم‌دما و دو فازی را به صورتی که فقط شامل سمت کاتد پیل باشد، شبیه‌سازی کردند، به گونه‌ای که لایه کاتالیستی را به صورت یک لایه بسیار نازک در نظر گرفتند و به این ترتیب، جریان در داخل پیل را مورد بررسی قرار دادند. نتایج بدست آمده نشان داد که اختلاف فشار بین ورود و خروج کانال گاز عملکرد الکترود را بهبود می‌بخشد. ساکی و همکارانش [۹] تأثیر هندسه را در مدل تک سلولی خود که دارای دو کانال در سمت کاتد و دو کانال آند بود، مورد توجه

1) PEM Fuel Cell
2) Multi-Fluid
3) Mixture

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-10-27]

قرار دادند. آنها انتهای کانال را از سمت کاتد مسدود کردند تا تأثیر آن را مطالعه کنند و نشان دادند که جریان اجباری بوجود آمده در داخل پیل به دلیل مسدود بودن انتهای آن، انتقال اکسیژن به طرف لایه کاتالیستی را افزایش داده و در نهایت منجر به افزایش دانسیته جریان در داخل پیل می‌شود. جئون و همکاران [۴] یک مدل CFD به منظور مشخص کردن میزان دانسیته جریان در کانال‌های مارپیچ با طراحی‌های مختلف ارائه نمودند. او تلاش خود را روی مشخص کردن توزیع جریان در کانال و قسمت انحنای بین راه‌های مارپیچ متمرکز کرد و نشان داد که میزان دانسیته جریان در ناحیه انحنا کمتر از پیچ می‌باشد. در این مواقع، حالت بهینه عریض بودن کانال‌ها و باریک بودن انحنا می‌باشد. افشاری و جزایری [۱] از یک مدل دو فازی غیر همدما که بر پایه مدل‌سازی چند فازی میکسچر می‌باشد، برای بررسی تأثیر وجود آب و انتقال حرارت بر روی عملکرد پیل استفاده کرده‌اند. منگ [۶] یک مدل دو فازی برای پیل سوختی را توسعه داده است که قادر به مدل‌سازی انتقال آب مایع در جنس‌های مختلف ناحیه متخلخل می‌باشد و توزیع و انتقال آب مایع در سمت کاتد پیل به صورت پارامتری مطالعه گردیده است. برای این منظور، یک پیل سوختی پلیمری تحت شرایط عملکردی مختلف آزمایش شده و نتایج آن گزارش شده است.

در تحقیق حاضر، به شبیه سازی دینامیک سیالات محاسباتی دو بعدی جریان دوفازی در حالت پایا در سرتاسر یک واحد پیل سوختی پرداخته می‌شود. معادلات حاکم بر پیل سوختی حل می شوند و میدان‌های سرعت، فشار و غلظت هر یک از اجزای واکنش شیمیایی در سرتاسر پیل به دست می‌آیند. تمرکز اصلی در این شبیه سازی، بررسی اثر تغییر ولتاژ، فشار، دما، سرعت و رطوبت نسبی در سمت کاتد بر روی اشباع آب مایع و راندمان کلی پیل سوختی می‌باشد. لذا با استفاده از یک تحلیل حساسیت، میزان اثرگذاری هر یک از این پارامترها بر روی غلظت اکسیژن و ایجاد آب مایع در پیل و در نتیجه، تأثیر آن بر راندمان پیل سوختی پلیمری بررسی گردیده است. برای این منظور، با استفاده از برنامه نویسی به زبان فرترن و با بکارگیری الگوریتم سیمپل برای حل معادلات بقای جرم و ممنتوم، مدل چند فازی میکسچر برای شبیه سازی جریان دوفاز در پیل سوختی پلیمری به کار گرفته شده است.

مدل‌سازی ریاضی

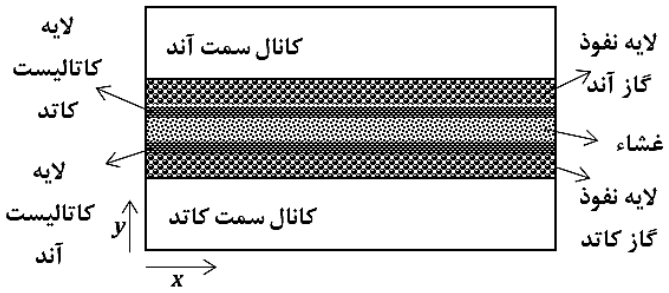
در این تحقیق، یک مدل دو بعدی در راستای کانال برای انجام شبیه سازی پیل سوختی به کار گرفته شده است. در این مدل‌سازی، تمام لایه های مختلف پیل سوختی شامل کانال‌های انتقال دهنده گونه ها، لایه های نفوذ گاز، لایه های کاتالیزوری متخلخل در سمت آند و کاتد و غشاء پلیمری لحاظ شده است. شکل (۱) فضای محاسباتی پیل را جهت انجام شبیه‌سازی نشان می‌دهد.

برای انجام این مدل‌سازی، فرضیات زیر لحاظ گردیده است:

- پیل سوختی در شرایط پایا عمل می‌کند.

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-10-27]

•با توجه به سرعت پایین جریان سیال درون پیل سوختی، جریان آرام در نظر گرفته شده است.



شکل ۱) ناحیه های مختلف پیل سوختی پلیمری جهت مدل‌سازی

•شرایط هم‌دما فرض گردیده است.

•قانون گاز ایده آل برای مخلوط گازی استفاده شده است.

•خواص فیزیکی لایه های مختلف پیل، به صورت یکنواخت و همگن در نظر گرفته می‌شود.

معادلات حاکم بر جریان سیال در لایه های مختلف پیل، معادلات بقای جرم، ممنتوم و انرژی، معادلات انتقال اجزا و سایر معادلات کمکی می‌باشند که در ادامه به آنها پرداخته شده است. از آنجایی که در این مدل‌سازی از رویکرد یکپارچه استفاده شده است، شرایط مرزی فقط در ورودی‌ها، خروجی‌ها و روی دیواره‌ها اعمال شده است و در بین لایه‌های مختلف نیازی به اعمال شرایط مرزی نیست. معادلات بقاء برای کل ناحیه‌های پیل سوختی تعریف می‌شوند و در هر ناحیه، اختلافات تنها در خصوصیات مواد و عبارت‌های چشمه و چاه می‌باشد.

معادلات پیوستگی و ممنتوم خطی بر اساس معادلات ناویر- استوکس، در معادلات (۱) و (۲) آورده شده است [۱۳]:

$$\nabla.(\rho u) = 0 \tag{۱}$$

$$\frac{1}{\varepsilon^2}\nabla.(\rho uu) = -\nabla p + \nabla.(\mu \nabla u) + \mathrm{S}_u \tag{۲}$$

در معادله (۲)، S_u ترم چشمه معادله ممنتوم می‌باشد. برای بقای اجزای مخلوط نیز معادله (۳) استفاده می‌گردد [۱۳]:

$$\nabla\cdot\left(\beta\rho u x_i\right) = \nabla\cdot\left(D_{i-g}^{eff}\nabla x_{i-g}\right) + S_i \tag{۳}$$

در معادله (۳)، S_i ترم چشمه بوده و i معرف هیدروژن، اکسیژن یا آب (آب بخار و مایع با همدیگر لحاظ می‌گردند) می‌باشد. پتانسیل الکترونی و الکترونی با استفاده از معادلات (۴) و (۵) به دست می‌آیند [۵]:

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-10-27]

$$\nabla\cdot\left(\sigma_{ele}^{eff}\nabla\varphi_{ele}\right)+S_{ele}=0 \quad (۴)$$

$$\nabla\cdot\left(\sigma_{ion}^{eff}\nabla\varphi_{ion}\right)+S_{ion}=0 \quad (۵)$$

در معادلات بالا، S_{ele} و S_{ion} ترم‌های چشمه معادلات پتانسیل می‌باشند. ترم‌های چشمه معادلات (۱) تا (۵) در جدول (۱) به طور خلاصه آورده شده است. برای مخلوط دوفازی، چگالی مخلوط آب مایع و گاز بر اساس خصوصیات و نسبت حجمی آب مایع و مخلوط گازها توسط معادله (۶) به دست می‌آید [۸،۱۱]:

$$\rho=\rho_{lq}s_{lq}+\rho_g\left(1-s_{lq}\right) \quad (۶)$$

کسر حجمی آب مایع نیز از رابطه (۷) به دست می‌آید [۵]:

$$s_{lq}=\frac{c_{H_2O}-c_{sat}}{\left(\rho_{lq}/M_{H_2O}\right)-c_{sat}} \quad (۷)$$

صرف‌نظر از اثر جاذبه زمین، شار آب مایع حاصل از مویینگی و فشار مویینگی از روابط (۸) تا (۱۰) محاسبه می‌گردند [۵]:

$$J_{cap,lq}=\frac{\gamma_g\gamma_{lq}}{\mu}\rho K_0\nabla p_c \quad (۸)$$

$$p_c=\sigma_{lq}\cos\theta\left(\frac{\varepsilon}{K_0}\right)^{0.5}\times f\left(s_{lq}\right) \quad (۹)$$

$$f\left(s_{lq}\right)=\begin{cases}1.42\left(1-s_{lq}\right)-2.12\left(1-s_{lq}\right)^2+1.26\left(1-s_{lq}\right)^3 & if\ \theta<90^o\\ 1.42s_{lq}-2.12{s_{lq}}^2+1.26{s_{lq}}^3 & if\ \theta>90^o\end{cases} \quad (۱۰)$$

سایر خواص فیزیکی و انتقالی سیال در جدول (۲) آورده شده است. معادله باتلر- ولمر جهت به دست آوردن چگالی جریان در پیل به صورت معادلات (۱۱) و (۱۲) می‌باشد [۵]:

$$j_a=\left(1-s_{lq}\right)Aj_{0,a}^{ref}\left(\frac{C_{H_2}}{C_{H_2}^{ref}}\right)^{0.5}\left(e^{\alpha_aF\eta_{act}^a/RT}-e^{-\alpha_cF\eta_{act}^a/RT}\right) \quad (۱۱)$$

$$j_c=\left(1-s_{lq}\right)Aj_{0,c}^{ref}\left(\frac{C_{O_2}}{C_{O_2}^{ref}}\right)\left(-e^{\alpha_cF\eta_{act}^c/RT}-e^{-\alpha_cF\eta_{act}^a/RT}\right) \quad (۱۲)$$

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-10-27]

چگالی جریان متوسط پیل با انتگرال‌گیری از چگالی موضعی بر روی سطح کاتالیست، از معادله (۱۳) به دست می‌آید:

جدول ۱) ترم چشمه معادلات حاکم بر جریان سیال درون پیل سوختی [۵]

S_{ion}	S_{ele}	S_i	S_u	محدوده
0	0	0	0	کانال های گاز
0	0	$S_{H_2} = \nabla\cdot\left(X_{H_2} J_{cap,lq}\right)$ $S_{H_2O} = \nabla\cdot\left(\left(X_{vp} - X_{lq}\right) J_{cap,lq}\right)$	$-\frac{\mu}{K_0}\vec{u}$	لایه نفوذ گاز سمت آند
0	0	$S_{O_2} = \nabla\cdot\left(X_{O_2} J_{cap,lq}\right)$ $S_{H_2O} = \nabla\cdot\left(\left(X_{vp} - X_{lq}\right) J_{cap,lq}\right)$	$-\frac{\mu}{K_0}\vec{u}$	لایه نفوذ گاز سمت کاتد
j_a	$-j_a$	$S_{H_2} = -\frac{j_a}{2F} M_{H_2} + \nabla\cdot\left(X_{H_2} J_{cap,lq}\right)$ $S_{H_2O} = \nabla\cdot\left(\frac{\eta_d}{F}\sigma_{ion}^{eff}\nabla\varnothing_{ion}\right) M_{H_2O} + \nabla\cdot\left(\left(X_{vp} - X_{lq}\right) J_{cap,lq}\right)$	$-\frac{\mu}{K_0}\vec{u}$	کاتالیست سمت آند
$-j_c$	j_c	$S_{O_2} = -\frac{j_c}{4F} M_{O_2} + \nabla\cdot\left(X_{O_2} J_{cap,lq}\right)$ $S_{H_2O} = \frac{j_c}{2F} M_{H_2O} + \nabla\cdot\left(\frac{\eta_d}{F}\sigma_{ion}^{eff}\nabla\varnothing_{ion}\right) M_{H_2O}$ $+\nabla\cdot\left(\left(X_{vp} - X_{lq}\right) J_{cap,lq}\right)$	$-\frac{\mu}{K_0}\vec{u}$	کاتالیست سمت کاتد
0	0	0	0	غشاء پلیمری

جدول ۲) معادلات کمکی جهت به دست آوردن پارامترهای فیزیکی، انتقالی و عملکردی پیل

معادله	نام پارامتر
$\rho_g = \frac{pM_g}{\overline{R}T}$	چگالی مخلوط گاز
$\sigma_{ion} = \left(0.005193\lambda - 0.00326\right) exp\left[1268\left(\frac{1}{303} - \frac{1}{T}\right)\right]$	رسانایی یونی غشاء
$p_{sat} = -2.1794 + 0.02953\left(T - 273.2\right) - 9.1837\times10^{-5}\left(T - 273.2\right)^2 + 1.4454\times10^{-7}\left(T - 273.2\right)^3$	فشار اشباع آب
$\lambda = \begin{cases} 0.043 + 17.81a - 39.85a^2 + 36.0a^3 & if\ 0 \le a \le 1 \\ 14.0 + 1.4\left(a - 1\right) & if\ \ 1 \le a \le 3 \end{cases}$	مقدار آب در پلیمر
$n_d = 2.5\frac{\lambda}{22}$	ضریب کشش الکترو اسمزی

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-10-27]

$$j_{cell} = \frac{1}{A}\int j dA \tag{۱۳}$$

چگالی توان پیل نیز از حاصل ضرب چگالی جریان در مقدار ولتاژ پیل طبق رابطه (۱۴) حاصل می‌گردد:

$$P_{cell} = V_{cell} \times j_{cell} \tag{۱۴}$$

با حل همزمان معادلات (۱) تا (۵) میدان‌های سرعت، فشار، غلظت گونه‌ها، دما، پتانسیل یونی و الکترونی در سرتاسر پیل به دست می‌آید و با کمک معادلات باتلر- ولمر، منحنی قطبیت پیل به دست خواهد آمد. برای اعمال شرایط مرزی می‌بایست بیان نمود که با توجه به اینکه از روش تک ناحیه ای برای انجام شبیه سازی استفاده شده است و معادلات حاکم بر جریان سیال در سرتاسر پیل به طور همزمان حل می‌شوند، نیاز به اعمال هیچ شرط مرزی میانی نمی‌باشد و فقط شرایط مرزی در ورودی ها و خروجی ها و نیز بر روی دیواره ها مشخص می‌شود. بر این اساس، سرعت جریان ورودی در سمت آند و کاتد از رابطه های (۱۵) و (۱۶) به دست می‌آیند:

$$\xi_a = c_{in}^{H_2} u_{a,in} \frac{2F}{j_{ref}} \frac{A_{a,in}}{A} \tag{۱۵}$$

$$\xi_c = c_{in}^{O_2} u_{c,in} \frac{4F}{j_{ref}} \frac{A_{c,in}}{A} \tag{۱۶}$$

سایر پارامترهای ورودی شامل فشار ورودی سیال و غلظت‌های اکسیژن، هیدروژن و آب ثابت می‌باشند. برای محاسبه غلظت ورودی جریان از روابط (۱۷) و (۱۸) استفاده می‌شود:

$$y_{c,in}^{H_2O} = RH_c \frac{p_{sat}}{p_c} \quad , \quad y_{in}^{O_2} = \left(1 - y_{c,in}^{H_2O}\right) \Big/ 4.76 \quad , \quad y_{in}^{N_2} = 1 - y_{in}^{O_2} - y_{c,in}^{H_2O} \tag{۱۷}$$

$$y_{a,in}^{H_2O} = RH_a \frac{p_{sat}}{p_a} \quad , \quad y_{in}^{H_2} = 1 - y_{a,in}^{H_2O} \tag{۱۸}$$

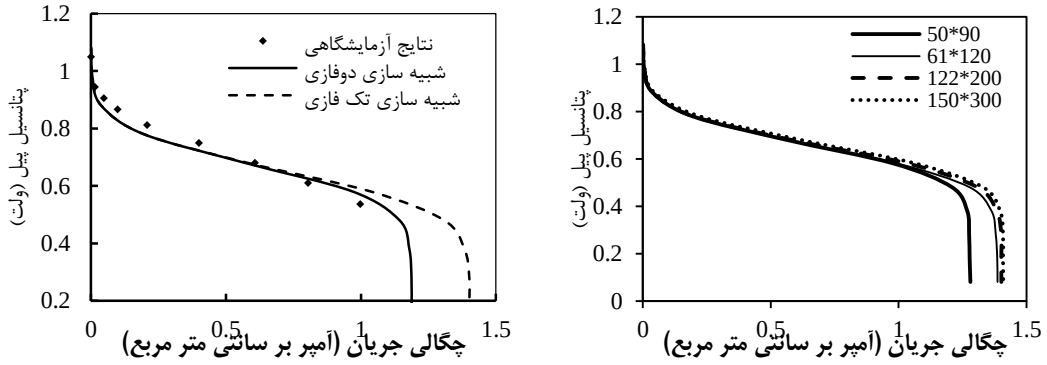
در مرزهای خروجی جریان، برای سرعت، شرط توسعه یافتگی اعمال می‌شود و برای سایر پارامترها، گرادیان آن در جهت جریان برابر صفر در نظر گرفته می‌شود. برای دیواره های صلب نیز شرط عدم لغزش برای سرعت و شرط گرادیان صفر در جهت عمود بر دیوار برای سایر پارامترها اعمال می‌گردد.

ارزیابی نتایج

در این مدل‌سازی، برای شبکه بندی فضای محاسباتی از شبکه های مستطیلی با اندازه‌های غیریکنواخت استفاده شده است. به منظور بررسی عدم وابستگی نتایج به اندازه شبکه، ابتدا مدل‌سازی با شبکه بندی‌های مختلف انجام شده است که نتایج آن در شکل (۲ـ الف) ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهد انتخاب شبکه شامل تعداد ۲۰۰×۱۲۲ حجم کنترل

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-10-27]

می‌تواند انتخاب بهینه ای باشد و ریزتر کردن اندازه شبکه تأثیر چندانی بر روی نتایج ندارد. جدول (۳) پارامترهای هندسی و عملکردی پیل را جهت انجام مدل‌سازی نشان می‌دهد. به منظور صحه گذاری مدل ارائه شده در این تحقیق، منحنی قطبیت حاصل از شبیه سازی در دو حالت تک فازی و دوفازی، با نتایج آزمایشگاهی ارائه شده در [۱۰] مقایسه گردیده است. بر این اساس، همان گونه که در شکل (۲ـ ب) آورده شده است، تطابق خوبی بین نتایج حاصل از شبیه سازی و نتایج آزمایشگاهی مشاهده می‌گردد. همچنین مقایسه منحنی قطبیت بین دو حالت تک‌فازی و دوفازی بخوبی نشان می‌دهد در چگالی جریان‌های بالا مدل دوفازی چگالی جریان کمتری را پیش بینی می‌کند. این موضوع به دلیل تولید آب مایع در چگالی جریان‌های بالا می‌باشد که باعث گرفتگی بخشی از روزنه های محیط متخلخل لایه نفوذ گاز می‌شود و مانع از دسترسی کامل گازهای واکنش‌گر به سطح واکنش می‌گردد. در چگالی جریان‌های پایین به دلیل اینکه فشار جزئی آب کمتر از فشار اشباع می‌باشد، آب در سرتاسر پیل به صورت بخار ظاهر می‌گردد و در نتیجه، منحنی قطبیت حاصل از مدل تک فازی و دوفازی بر هم منطبق شده‌اند.



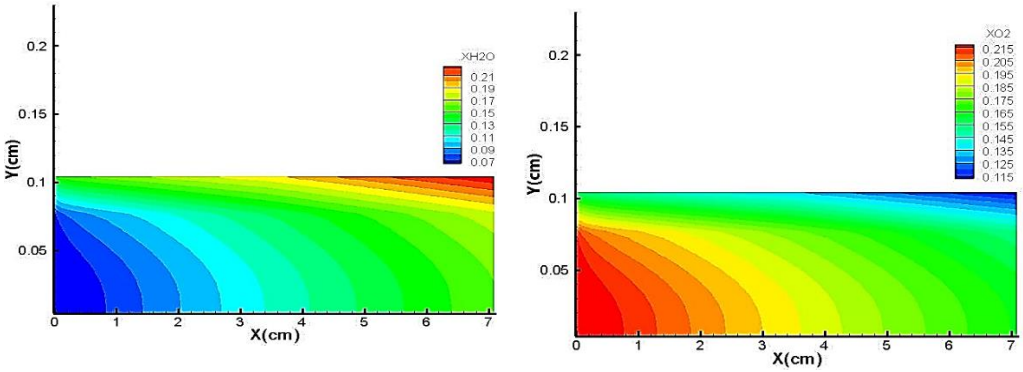
شکل ۲) الف. منحنی قطبیت پیل برای شبکه‌بندی‌های مختلف ، ب. مقایسه منحنی عملکردی شبیه سازی تک فازی و دو فازی پیل سوختی با نتایج آزمایشگاهی

جدول ۳) پارامترهای هندسی و عملکردی پیل سوختی مدل پایه

دمای پیل	۳۵۳	کلوین	فشار آند/ کاتد	۳	اتمسفر
ضریب استوکیومتری ورودی آند / کاتد	۲/۸ ، ۳/۰	–	تخلخل غشاء پلیمری	۰/۲۸	–
رطوبت نسبی ورودی آند/ کاتد	٪۱۰۰	–	طول پیل	۷۱/۱۲	میلیمتر
ضخامت کانال سمت آند و کاتد	۰/۷۶۲	میلیمتر	ضریب پخش آب	۰/۲۲۳۶	سانتیمتر مربع بر ثانیه
ضخامت لایه نفوذ گاز سمت کاتد و آند	۰/۲۵۴	میلیمتر	ضریب پخش هیدروژن	۰/۵۴۵۷	سانتیمتر مربع بر ثانیه
ضخامت لایه کاتالیست سمت کاتد و آند	۰/۰۱	میلیمتر	ضریب پخش اکسیژن	۰/۱۸۰۶	سانتیمتر مربع بر ثانیه
ضخامت غشاء پلیمری	۰/۰۵	میلیمتر	تخلخل GDL کاتد و آند	۰/۴	–
تخلخل لایه کاتالیست سمت کاتد و آند	۰/۴	–	زاویه تماس ناحیه متخلخل	۱۱۰	درجه

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-10-27]

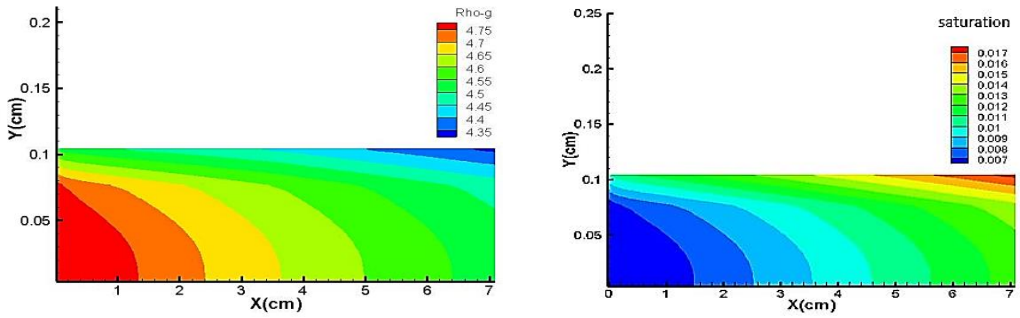
شکل‌های (۳ـ الف) و (۳ـ ب) تغییرات غلظت آب و اکسیژن را در سمت کاتد پیل سوختی برای شرایطی که پتانسیل پیل برابر ۰/۶ ولت باشد نشان می‌دهند. واکنش شیمیایی در لایه کاتالیست سمت کاتد انجام شده و با مصرف اکسیژن در این ناحیه، آب تولید می‌شود. لذا غلظت مولکول‌های آب در سطح تماس لایه نفوذ گاز و کاتالیست بیشتر است. آب تولید شده به همراه بخار آب ورودی جریان، از سمت دیگر کانال خارج می‌شود.



شکل۳) الف.کانتور کسر جرمی اکسیژن سمت کاتد در پتانسیل ۰/۶ ولت ، ب. کانتور کسر جرمی آب سمت کاتد در پتانسیل ۰/۶ ولت

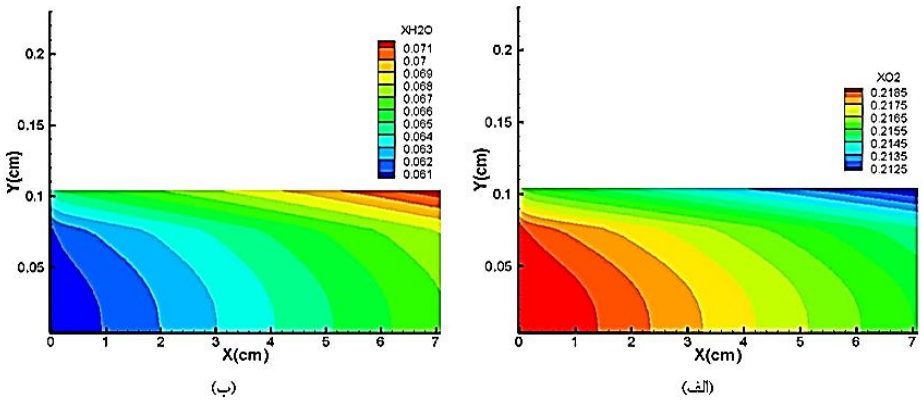
در شکل (۴ـ الف) کانتور تغییرات چگالی فاز گازی سمت کاتد پیل نشان داده شده است. همان گونه که مشخص است، در سمت ورودی جریان که غلظت اکسیژن بیشینه است، چگالی گاز بیشترین مقدار خود را دارد. این موضوع به دلیل آن است که جرم مولکولی اکسیژن بیشتر از آب بوده و با افـزایش غلظت آب در خروجی و کاهش غلظت اکسیژن به دلیل مصـرف آن، جرم مولکولی مخلوط گازی نیز کاهش می‌یابد. لذا طبق قانون گاز ایده آل، مقدار چگالی گاز نیز در خروجی کانال کمتر است. در (شکل۴ـ ب) کانتور اشباع آب مایع نشان داده شده است. مطابق شکل، با افزایش کسر جرمی بخار آب موجود در مخلوط گازی، فشار جزئی بخار آب نیز افزایش می‌یابد. در نتیجه، در صورتی که فشار جزئی بخار آب موجود در مخلوط به فشار اشباع آب برسد، آب مایع به وجود می‌آید. میزان آب تولیدی در سمت خروجی کانال افزایش می‌یابد. در چگالی جریان‌های بالا در صورتی که مقدار آب مایع تولیدی زیاد باشد، باعث گرفتگی بخشی از روزنه‌های محیط متخلخل لایه نفوذ گاز شده و این امر باعث ایجاد مانع در ارسال گاز اکسیژن به سطح واکنش می‌شود.

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-10-27]



شکل۴) الف. کانتور تغییرات چگالی گاز سمت کاتد در پتانسیل ۰/۶ ولت ، ب. کانتور تغییرات اشباع آب مایع سمت کاتد در پتانسیل ۰/۶ ولت

شکل (۵) تغییرات غلظت اکسیژن و آب را در سمت کاتد پیل سوختی برای شرایطی که ولتاژ پیل برابر ۰/۸ ولت باشد، نشان می‌دهد. با افزایش ولتاژ، میزان چگالی جریان کاهش می‌یابد، در نتیجه، نرخ واکنش به صورت کلی کاهش‌یافته و در سمت کاتد میزان مصرف اکسیژن کمتر شده و به تدریج لایه کاتالسیت از اکسیژن اشباع می‌شود و میزان تولید آب هم کاهش می‌یابد.

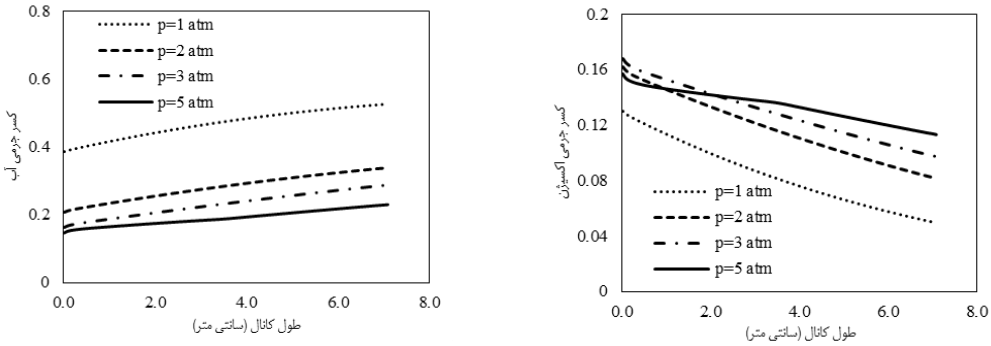


شکل ۵) الف. کانتور کسر جرمی گاز سمت کاتد در ولتاژ۰/۸ ولت، ب. کانتور کسر جرمی آب سمت کاتد در ولتاژ ۰/۸ ولت

شکل (۶ـالف) اثر فشار سمت کاتد بر میزان غلظت اکسیژن مرز لایه کاتالیست و غشاء را نشان می‌دهد. با توجه به معادله حالت گازها، افزایش فشار ورودی سمت کاتد، چگالی افزایش یافته وغلظت جرمی و مولی اکسیژن مرز لایه کاتالیست و غشاء نیز افزایش می‌یابد. افزایش چگالی اکسیژن، باعث اشباع شدن لایه نفوذ و کاتالسیت وکاهش غلظت اکسیژن در اوایل مرز لایه کاتالیست و غشاء می‌شود. لذا با مصرف اکسیژن در واکنش، در طول این مرز میزان غلظت اکسیژن نسبت به فشارهای پایین‌تر از خود افزایش پیدا می‌کند. همچنین شکل (۶ ـ ب) اثر فشار سمت کاتد بر میزان

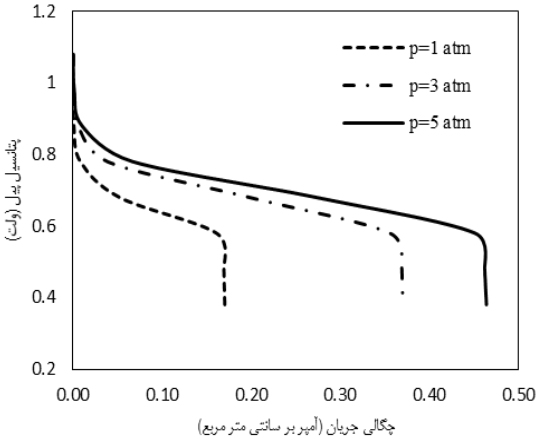
[Downloaded from necjournals.ir on 2026-10-27]

غلظت آب تولیدی مرز لایه کاتالیست و غشاء را نشان می‌دهد. با افزایش فشار، افزایش غلظت و چگالی اکسیژن را خواهیم داشت. این غلظت زیاد اکسیژن در مرز لایه کاتالیست و غشاء باعث کاهش غلظت و چگالی آب تولیدی می‌شود.



شکل ۶) الف. اثر فشار سمت کاتد بر غلظت اکسیژن مرز لایه کاتالیست و غشاء، ب. اثر فشار سمت کاتد بر غلظت آب تولیدی مرز لایه کاتالیست و غشاء

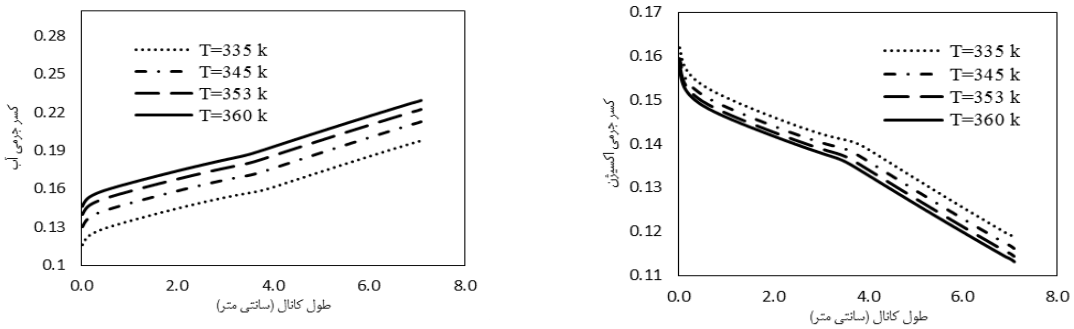
شکل(۷) اثر فشار سمت کاتد بر منحنی قطبیت پیل را نشان می دهد. افزایش فشار باعث افزایش چگالی اکسیژن شده و افزایش چگالی باعث افزایش غلظت اکسیژن در محل واکنش شده و نرخ واکنش را افزایش می‌دهد. از طرف دیگر، ثابت بودن رطوبت (۱۰۰ درصد) افزایش فشار باعث افزایش فشار اشباع شده و گرادیان فشار مویینگی می‌شود. لذا سرعت خروج آب و سرعت توده گاز ونرخ واکنش افزایش می‌یابد. با افزایش فشار، دانسیته جریان افزایش می‌یابد، با افزایش فشار، دانسیته جریان تبادلی بیشتر می‌شود و موجب افزایش نرخ واکنش الکتروشیمیایی می‌گردد و در نتیجه، ولتاژ به ازای یک دانسیته جریان مشخص افزایش خواهد یافت. همچنین با افزایش فشار در گازها، نفوذپذیری آنها کاهش می‌یابد، اما تأثیر آن در برابر اثر فشار در واکنش الکتروشیمیایی کمتر است و در نتیجه، با افزایش فشار دانسیته جریان در یک ولتاژ معین افزایش می‌یابد و لذا، راندمان پیل افزایش می‌یابد.



شکل۷) اثر فشار سمت کاتد بر منحنی قطبیت پیل

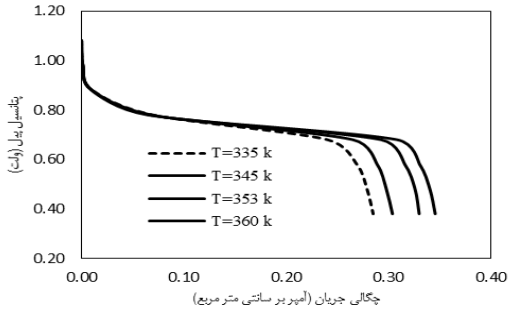
[Downloaded from necjournals.ir on 2026-10-27]

شکل (۸ـالف) اثر دما سمت کاتد بر میزان غلظت اکسیژن مرز لایه کاتالیست و غشاء را نشان می دهد. با افزایش دما بر اساس معادله حالت گازها، چگالی وغلظت اکسیژن کاهش می‌یابد. افزایش دما باعث افزایش نرخ واکنش و افزایش میزان مصرف اکسیژن می‌شود. همچنین شکل (۸ـ ب) اثر دما سمت کاتد بر میزان غلظت آب تولیدی مرز لایه کاتالیست و غشاء را نشان می دهد. با افزایش دما، میزان غلظت و چگالی اکسیژن کاهش می‌یابد. لذا غلظت و چگالی محصول نهایی (آب) در این مرز افزایش می یابد.



شکل ۸) الف.اثر دما سمت کاتد بر میزان غلظت اکسیژن مرز لایه کاتالیست و غشاء، ب. اثر دما سمت کاتد بر میزان غلظت آب تولیدی مرز لایه کاتالیست و غشاء

شکل (۹) اثر دما سمت کاتد بر منحنی قطبیت پیل را نشان می دهد. با افزایش دما، ولتاژ در یک دانسیته جریان مشخص افزایش می‌یابد و نرخ واکنش الکتروشیمیایی بیشتر می‌شود و در نتیجه، دانسیته جریان نیز افزایش می‌یابد. با افزایش دما، ضریب نفوذ گازها نیز افزایش می‌یابد و قابلیت نفوذ آنها در محیط متخلخل افزایش می‌یابد. بنابراین، نرخ واکنش الکتروشیمیایی بیشتر می‌گردد و در نتیجه، میزان تولید محصول نهایی (آب) را افزایش می‌دهد و با افزایش نرخ تولید آب، میزان آب داخل غشاء نیز افزایش می‌یابد. هرچه قدر غشاء آب بیشتری جذب کند می‌تواند بهتر یون مثبت هیدروژن را از خود عبور دهد و ورود الکترون جلوگیری کند، لذا راندمان پیل سوختی را افزایش می‌دهد.



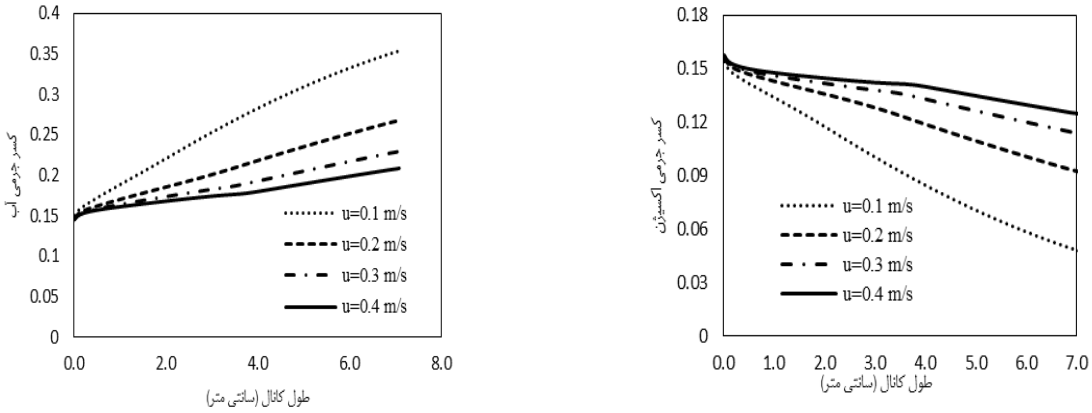
شکل ۹) اثر دما سمت کاتد بر منحنی قطبیت پیل

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-10-27]

شکل (۱۰ـالف) اثر سرعت سمت کاتد بر میزان غلظت اکسیژن مرز لایه کاتالیست و غشاء را نشان می‌دهد. افـزایش سرعت باعث افزایش ورود اکسیژن(دبی اکسیژن) به پیل سوختی می‌شود. با افزایش سرعت، اکسـیژن بیشـتری وارد لایـه کاتالیست و غشاء می شود. همچنین شکل (۱۰ـب) اثر سرعت سمت کاتد بر میزان غلظت آب تولیدی مرز لایه کاتالیسـت و غشاء را نشان می دهد. با افزایش سرعت، حضور اکسیژن افزایش می یابد و در نتیجه، میزان حضور آب تولیـدی در مـرز لایه کاتالیست و غشاء کاهش می‌یابد.

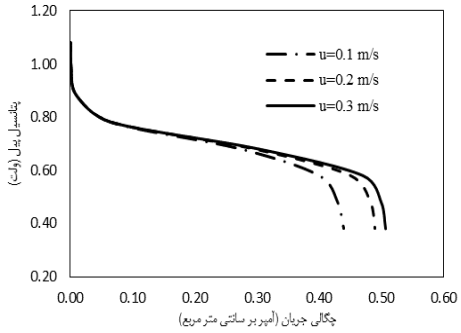
شکل (۱۱) اثر سرعت سمت کاتد بر منحنی قطبیت پیل را نشان می دهد. با افزایش سرعت ورودی، دبـی اکسـیژن بیشتر شده و مقادیر بیشتری از اکسیژن به نواحی واکنش می‌رسند و در نتیجه، نرخ واکنش الکتروشیمیایی افزایش می‌یابد. علاوه بر این، دبی بیشتر ورودی اکسیژن به خارج شدن آب از پیل سوختی کمک مـی‌کنـد، لـذا رانـدمان پیـل را افـزایش می‌دهد.

شکل (۱۲ـالف) اثر رطوبت نسبی سمت کاتد بر میزان غلظت اکسیژن مرز لایه کاتالیست و غشاء را نشان می دهـد. با افزایش رطوبت، میزان بخار آب موجود در گاز وجرم و چگالی آن افزایش و از میزان غلظـت اکسـیژن کاسـته مـی‌شـود. همچنین شکل (۱۲ـ ب) اثر رطوبت نسبی سمت کاتد بر میزان غلظت آب تولیدی مـرز لایـه کاتالیسـت و غشـاء را نشـان می‌دهد. با افزایش رطوبت نسبی، با افزایش میزان سرعت توده گاز و میزان بخار آب که از نتایج قبـل حاصـل شـد، شـاهد افزایش غلظت محصول نهایی (آب) هستیم.

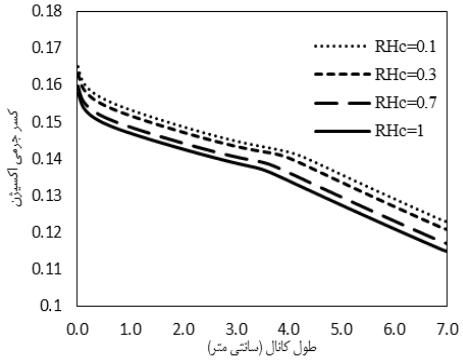


شکل ۱۰) الف. اثر سرعت سمت کاتد بر غلظت اکسیژن مرز لایه کاتالیست و غشاء، ب. اثر سرعت سمت کاتد بر غلظت آب تولیدی مرز لایه کاتالیست و غشاء

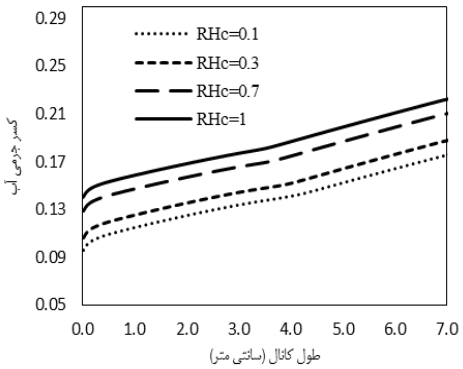
[Downloaded from necjournals.ir on 2026-10-27]



شکل۱۱) اثر سرعت سمت کاتد بر منحنی قطبیت پیل



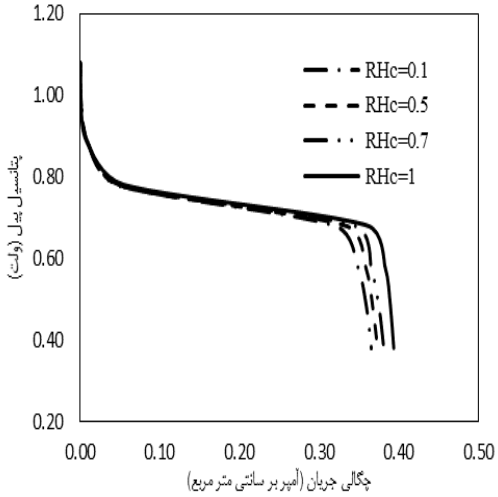
شکل ۱۲) الف. اثر رطوبت نسبی سمت کاتد بر میزان غلظت اکسیژن مرز لایه کاتالیست و غشاء،



ب. اثر رطوبت نسبی سمت کاتد بر میزان غلظت آب تولیدی مرز لایه کاتالیست و غشاء

شکل (۱۳) اثر رطوبت نسبی سمت کاتد بر منحنی قطبیت پیل را نشان مـی دهـد. یکـی از پارامترهـایی کـه تـأثیر بسزایی بر عملکرد پیل سوختی پلیمری دارد، رطوبت نسبی جریان ورودی است، زیرا جریان با رطوبت نسبی بـالا باعـث می‌شود غشاء پلیمری همواره رطوبت کافی برای انتقال یون‌های هیدروژن داشته باشد و این مسأله بـه طـور مسـتقیم بـر روی رسانش آن اثر می‌گذارد .هرچه رطوبت جریان ورودی به پیل سوختی بیشتر باشد، رسانش یونی نیز بیشتر می‌شـود. با افزایش رطوبت نسبی، بیشینه دانسیته جریان در ولتاژ کاری افزایش می‌یابد. با افزایش رطوبت نسبی، نرخ تبخیر و سهم بخار در تخلیه لایه نفوذ گاز کاهش می‌یابد، لذا هم فشار اشباع و گرادیان فشار مویینگی وسرعت توده گاز اکسـیژن و هـم سرعت خروج آب بیشتر می‌شود. لذا با افزایش سرعت ورودی، دبی اکسیژن بیشتر شده و مقادیر بیشـتری از اکسـیژن بـه نواحی واکنش می‌رسند و در نتیجه، نرخ واکنش الکتروشیمیایی افزایش می‌یابد.

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-10-27]



شکل۱۳) اثر رطوبت نسبی سمت کاتد بر منحنی قطبیت پیل

نتیجه گیری

در این مقاله، شبیه سازی دوبعدی و دوفازی یک پیل سوختی پلیمری به روش چند فازی میکسچر انجام شده است. معادلات حاکم بر جریان سیال برای لایه های مختلف پیل شامل کانال‌های گاز، لایه های نفوذ گاز و کاتالیست سمت کاتد و آند و نیز ناحیه غشاء با در نظر گرفتن یک مدل تک ناحیه ای و بدون اعمال شرایط مرزی میانی با استفاده از کدنویسی حل شده اند. تأثیر پارامتر ولتاژ، فشار، دما، سرعت و رطوبت نسبی سمت کاتد پیل سوختی بر میزان غلظت اکسیژن و آب و نیز عملکرد پیل مورد مطالعه و ارزیابی قرار گرفته است. مشاهده می‌گردد با افزایش ولتاژ میزان عملکرد پیل کاهش می یابد در حالی که با افزایش میزان دما، سرعت، فشار و رطوبت نسبی، عملکرد پیل سوختی بهبود می‌یابد. همچنین اثر این پارامترها بر میزان غلظت اکسیژن و آب مایع در یک ولتاژ معین نیز مورد بررسی قرار گرفته شده است. بر این اساس، با افزایش فشار و سرعت میزان غلظت اکسیژن افزایش و غلظت آب کاهش یافته و با افزایش غلظت اکسیژن نرخ واکنش افزایش می یابد. با افزایش دما و رطوبت نسبی، غلظت اکسیژن کاهش و غلظت آب افزایش پیدا می‌کند در حالی که این دو پارامتر خود باعث افزایش نرخ واکنش و افزایش دبی اکسیژن می‌شود.

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-10-27]

منابع

[1] Afshari E., Jazayeri S.A., (2010). “Effects of the cell thermal behaviour and water phase change on a proton exchange membrane fuel cell performance”, *J Energy Conversion and Management*, Vol. 51, pp. 655–662.

[2] A Carnes B., Djilali N., (2005). “Systematic parameter estimation for PEM fuel cell models", *J Power Sources*, Vol. 144, pp. 83–93.

[3] He, W., Yi, J.S., Nguyen, T.V., (2000). “Two-phase flow model of the cathode of PEM fuel cells using interdigitated flow fields”, *J AIChE*. Vol. 46, pp. 2053-2064.

[4] Jeon, S., Greenway, S., Shimpalee, and Van Zee, J.W., (2008). “The effect of serpentine flow-field designs on PEM fuel cell”, *Int J Hydrogen energy*, Vol. 33, pp. 1052-1066.

[5] Jiao K., Li X., (2011). “Water transport in polymer electrolyte membrane fuel cells”, *Progress in Energy and Combustion Science*, Vol. 37 ,pp. 221-291.

[6] Meng H., (2010). “Numerical studies of liquid water behaviours in PEM fuel cell cathode considering transport across different porous layers”, *J Hydrogen Energy*, Vol. 35, pp. 5569-79.

[7] Meng H., Wang C.Y., (2005). “Model of two-phase flow and flooding dynamics in polymer electrolyte fuel cells”, *J Electrochemical Society*, Vol. 152, pp. A1733-41.

[8] Pasaogullari U., Wang C.Y., (2005). “Two-phase modeling and flooding prediction of polymer electrolyte fuel cells”, *Journal of Electrochemical Society*, Vol. 152, pp. A380-90.

[9] Sukkee, U.m., and Wang, C.Y., (2004). “A three-dimensional analysis and transport and electrochemical reaction in polymer electrolyte fuel cell”, *J Power Source*. Vol. 125, pp. 40-51.

[10] Ticianelli, E.A., Berry J.G. and Srinivasan S., (1991). “Dependence of performance of solid polymer electrolyte fuel cells with low platinum loading on morphologic characteristics of the electrodes”. *Journal of Applied Electrochemistry*, Vol. 21, pp. 597-605.

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-10-27]

[11] You L., Liu H., (2002). "A two-phase flow and transport model for the cathode of PEM fuel cells", *J Heat and Mass Transfer*, Vol. 45, pp. 2277–87.

[12] You L., Liu H., (2006). "A two-phase flow and transport model for PEM fuel cells", *J Power Sources*, Vol. 155, pp. 219–30.

[13] Wang Y., Wang C.Y., (2006). "A non-isothermal, two-phase model for polymer electrolyte fuel cells", *J Electrochemical Society*, Vol. 153, pp. A1193-11200.

[14] Wang Z.H., Wang C.Y., Chen K.S., (2001). "Two-phase flow and transport in the air cathode of proton exchange membrane fuel cells", *J Power Sources*, Vol. 94, pp. 40–50.

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-10-27]

فهرست علائم

A	فعالیت آب	σ	رسانندگی یونی و الکتریکی (S/m)
A	مساحت (m^2)	ε	تخلخل
C	غلظت مولی (mol/m^3)	γ	جابجایی نسبی
D	ضرب پخش (m^2/s)	β	ضریب تصحیح
F	ثابت فارادی (96487 Col/mol)	θ	زاویه تماس (^{o})
H	ضخامت لایه نفوذ گاز (mm)	σ_{lq}	کشش سطحی (N/m)
J	چگالی جریان (A/cm^2)	ξ	ضریب استوکیومتری
J	شار مویینگی آب ($kgm^{-2}s^{-1}$)	**بالانویس‌ها**	
K	ضریب نفوذ پذیری (m^2)	Eff	ضریب موثر
M	جرم مولکولی (kg/mol)	**زیرنویس‌ها**	
N	ضریب کشش الکترواسمزی	A	آند
P	فشار ($kgm^{-1}s^{-2}$)	act	فعال‌سازی
P	چگالی توان (W/cm^2)	C	کاتد
$\bar{R}$	ثابت جهانی گازها ($8.314\ jmol^{-1}K^{-1}$)	cap	مویینگی
S	اشباع آب	cell	پیل
S	ترم چشمه	ele	الکترونی
T	دما (K)	G	گاز
U	سرعت (ms^{-1})	H_2O	آب
V	ولتاژ (V)	I	جزء i ام
X	کسر جرمی	In	ورودی
Y	کسر مولی	Ion	یونی
	علایم یونانی	J	جزء j ام
ρ	چگالی (kgm^{-3})	Lq	مایع
μ	لزجت دینامیکی ($kgm^{-1}s^{-1}$)	O_2	اکسیژن
N	لزجت سینماتیکی (m^2s^{-1})	Ref	شرایط مرجع
Λ	مقدار آب	Sat	شرایط اشباع

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-10-27]