



اثر مانع در کانال جریان گاز کاتد بر انتقال واکنش دهنده‌ها و عملکرد پیل سوختی غشا پلیمری

سیدعلی اطمیابی^۱، ابراهیم افشاری^{۲*}، محمود عدمی^۳

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مکانیک-تبدیل انرژی، مجتمع مکانیک و هوافضا، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، شاهین شهر اصفهان
 ۲- استادیار گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه اصفهان، اصفهان
 ۳- دانشیار گروه مهندسی مکانیک، مجتمع مکانیک و هوافضا، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، شاهین شهر اصفهان
 * e.afshari@eng.ui.ac.ir، ۷۳۴۴۱-۸۱۷۴۶

چکیده

در این مطالعه، با قرار دادن یک یا چند مانع در کانال کاتد پیل سوختی غشا پلیمری، تأثیرات دینامیک سیالات ناشی از وجود/عدم وجود مانع در کانال و همچنین اثر مانع بر عملکرد پیل سوختی مورد مطالعه قرار گرفته است. بدین منظور با در نظر گرفتن یک مدل سه بعدی پیل سوختی که بخشی از کانال کاتد مسدود شده است، معادلات پیوستگی، مومنتوم، گونه‌های جرمی و بقای بار الکتریکی به صورت حالت پایا در سیستم مختصات کارترزین با استفاده از یک دامنه کلی و روش حجم محدود حل شده است. نتایج نشان می‌دهد که با قرار دادن یک مانع مستطیلی، در مقایسه با حالت بدون مانع، بیشترین افزایش سرعت در لایه پخش گاز (در زیر مانع حدود ۶ برابر سرعت) رخ داده است و گازهای واکنش دهنده بیشتری مجبور به ورود به لایه پخش گاز می‌شود که به واکنش‌های شیمیایی کمک می‌کند و عملکرد پیل سوختی را بهبود می‌بخشد. همچنین افزایش تعداد مانع بر انتقال گازهای واکنش دهنده و توزیع یکنواخت‌تر گازها در لایه پخش گاز و لایه کاتالیست، به ویژه در دانسیته جریان‌های بالا، کمک می‌کند؛ اما افت فشار در کانال کاتد را افزایش می‌دهد. پیش‌بینی‌ها نشان می‌دهد که انتقال موضعی واکنش دهنده، تولید چگالی جریان محلی و عملکرد پیل در حضور مانع بهبود می‌یابد.

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل
 دریافت: ۳۱ فروردین ۱۳۹۲
 پذیرش: ۲۸ مهر ۱۳۹۲
 ارائه در سایت: ۱۷ خرداد ۱۳۹۳
 کلید واژگان:
 پیل سوختی غشا پلیمری
 مانع
 انتقال اکسیژن
 افت فشار

Effects of baffle-blocked flow cathode channel on reactant transport and cell performance of a PEMFC

Seyed Ali Atyabi¹, Ebrahim Afshari^{2*}, Mahmood Adami³

1- Department of Mechanic & Aerospace Engineering, Malek - Ashtar University of Technology, Sahinshar Isfhan, Iran.
 2- Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Isfhan University, Isfhan, Iran
 3- Department of Mechanic & Aerospace Engineering, Malek - Ashtar University of Technology, Sahinshar Isfhan, Iran
 *P.O.B. 81746-73441, Isfhan, Iran. e.afshari@eng.ui.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
 Received 20 April 2013
 Accepted 20 October 2013
 Available Online 07 June 2014

Keywords:
 PEM Fuel Cell
 Baffle
 Oxygen Transport
 Pressure Drop

ABSTRACT

In this study, we propose a configuration of partially blocked oxidant channel with baffle plates transversely inserted in the cathode channel and effects of the fluid dynamics due to the presence or non-presence of the baffles and their effect on the fuel cell performance is investigated. A 3D model with the presence of baffle plates is considered and a set of equations (continuity, momentum, species and charge together with electrochemical kinetics) in the form of single domain is developed and solved numerically. The baffles block the main flow in the cathode channel and force more reactant gases to turn to the GDL. This fact implies an enhancement of the oxygen mass flux at the GDL and catalyst surface, especially at the position beneath the location of the baffle plates. An increase in the number of baffles contribute to the reactant gas transport to GDL with more uniform distribution of gas in the GDL and catalyst layer, especially in high current densities, where it leads to a penalty of high pressure - loss. The predictions indicate that the local transport of the reactant gas would enhance the local current densities and the fuel cell performance in presence of baffle in the channel.

۱- مقدمه

آلودگی، تنوع و زمان راه‌اندازی کوتاه به طور گسترده قابل استفاده بوده و یک منبع تبدیل انرژی مناسب در آینده است. طراحی بهینه کانال‌های جریان یک عامل مهم در عملکرد پیل سوختی غشا پلیمری است. شکل و الگوی کانال جریان بر انتقال گازهای واکنش‌گر، بهره‌گیری از گازهای واکنش‌گر، مدیریت آب و عملکرد پیل تأثیر می‌گذارد [۱]. به دلیل کوچک‌تر بودن ضرایب پخش گازها در الکترود کاتد نسبت به آند، طراحی کانال در سمت کاتد از اهمیت بیشتری برخوردار است. اگر مقدار

پیل‌های سوختی دستگاه‌هایی الکتروشیمیایی هستند که به طور مستقیم انرژی شیمیایی حاصل از واکنش سوخت و اکسید کننده را به الکتریسیته و گرما تبدیل می‌کنند. بر خلاف باتری‌ها که وسایل ذخیره‌کننده انرژی هستند، در پیل‌های سوختی تا زمانی که گازهای واکنش‌گر تأمین شوند، می‌توان انرژی شیمیایی را به انرژی الکتریکی تبدیل کرد. در میان انواع پیل‌های سوختی، پیل سوختی غشا پلیمری به دلیل داشتن راندمان بالا، عدم ایجاد

Please cite this article using:

S.A. Atyabi, E. Afshari, M. Adami, Effects of baffle-blocked flow cathode channel on reactant transport and cell performance of a PEMFC, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 4, pp. 158-166, 2014 (In Persian)

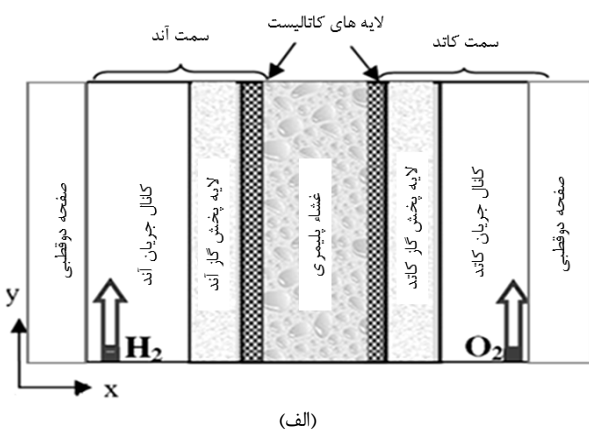
برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

بررسی انتقال جرم اکسیژن در طرف کاند پیل سوختی غشا پلیمری منطقی است. در مطالعاتی که تاکنون بر روی تأثیرات مسدودسازی کانال پیل انجام شده است، تنها نواحی کانال جریان و لایه پخش گاز کاند و یا فقط همه نواحی سمت کاند مدل شده است و سمت آند پیل مدل نشده و تأثیرات مسدودسازی کانال بر روی عملکرد کل پیل مدل نگردیده است. مدل نشدن سمت آند سبب می‌شود که نتوان عملکرد کل پیل را بررسی کرد. همچنین نیاز به شرایط مرزی در مرزهای داخلی پیل بوده و به تبع آن دقت حل معادلات کاهش می‌یابد. برای درک صحیح دینامیک سیال و فرآیندهای الکتروشیمیایی پیل سوختی، در این مطالعه یک حل عددی کامل از معادلات پیوستگی، مومنتوم، بقای گونه‌های جرمی و بقای بار الکتریکی بدون محاسبه اثر جریان دو فاز در تمامی نواحی پیل سوختی ارائه شده است. در این تحلیل برای بررسی کانال جریان شامل مانع، آنالیز سه بعدی صورت گرفته است و اثر کانال با مانع و تعداد موانع بر پدیده‌های انتقالی در داخل پیل و بر عملکرد پیل مورد بررسی قرار گرفته است.

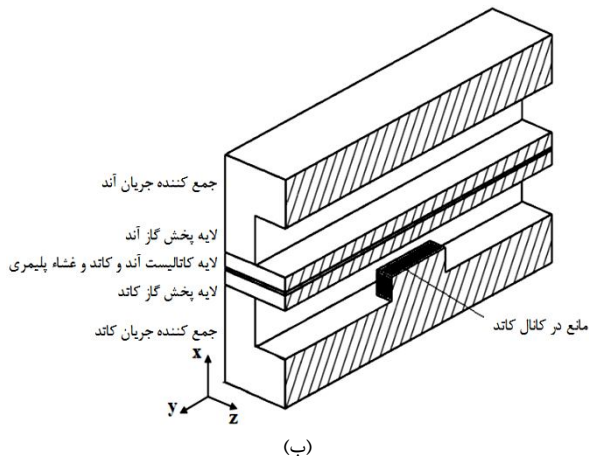
۲- مدل پیل سوختی غشا پلیمری

۲-۱- توصیف پیل

شکل ۱ نماهایی دو و سه بعدی از یک تک سل پیل سوختی غشا پلیمری با اجزای مرتبط به آن را نشان می‌دهد. پیل شامل کانال جریان آند، لایه پخش گاز آند، لایه کاتالیست آند، غشا، لایه کاتالیست کاند، لایه پخش گاز کاند و کانال جریان کاند است. براساس شکل ۱ مانع مسدود کننده در داخل کانال کاند قرار می‌گیرد. طول کانال $h = h_1 + h_2 + h_3$ است که h_1 ، h_2 و h_3 به ترتیب طول مانع داخل کانال، طول بالا دست و پایین دست کانال و L_{baffle} نیز ارتفاع مانع است.



(الف)



(ب)

شکل ۱ نمای دو بعدی (شکل الف) و نمای سه بعدی متقارن (شکل ب) یک پیل سوختی غشا پلیمری به همراه مانع در کانال کاند

گاز و آب خروجی پیل از کنترل خارج شود، انتقال اکسیژن به لایه کاتالیست کاهش قابل توجهی می‌یابد و ممکن است سبب گرم شدن بیش از حد و خشکی غشا شود. این وضعیت نامطلوب، سبب افزایش مقاومت درونی پیل و در نتیجه سبب افت عملکرد آن می‌شود. از این رو طراحی موثر کانال‌های جریان برای اطمینان از توزیع یکنواخت گازهای واکنش‌گر در پیل سوختی بسیار مهم و اساسی است. طراحی الگوی میدان جریان پیل سوختی از چالش‌های فنی بحرانی در طراحی پیل سوختی غشا پلیمری است و تأثیرات عمده آن روی عملکرد و عمر سیستم است [۲].

نگوین و همکاران [۳] یک مدل محاسباتی پیل سوختی غشا پلیمری با کانال‌های مارپیچی ارائه نمودند و پدیده‌های اساسی انتقال را در پیل بررسی کردند. محاسبات سه بعدی انتقال سوخت در پیل سوختی غشا پلیمری با کانال‌های مارپیچی توسط دو تا و همکاران [۴] انجام شد. کی و همکاران [۵] یک مدل محاسباتی عمومی برای انتقال جرم و مومنتوم در شبکه کانال نوع مسطح در توده پیل سوختی ارائه کردند. در مطالعه عددی انجام شده توسط یان و همکاران [۶] اثرات عرض کانال جریان و تخلخل لایه پخش گاز در انتقال گازهای واکنش‌گر و عملکرد پیل سوختی غشا پلیمری بررسی شده است. گرو و همکاران [۷] با ارائه یک مدل عددی، انتقال اجزا واکنش‌گر را در یک نیم‌پیل بررسی و تأثیرات ضریب تخلخل و انحناء لایه پخش گاز و لایه کاتالیست بر انتقال اجزا واکنش‌گر را مشخص کردند. کیو و همکاران [۸] با ارائه یک مدل عددی سه بعدی به بررسی عملکرد پیل سوختی غشا پلیمری با کانال‌های موجی پرداختند و توزیع دما و منحنی عملکرد پیل را به دست آوردند. نتایج آن‌ها نشان می‌دهد که کانال‌های موجی تأثیر انتقال حرارت جابه‌جایی را بهبود بخشیده و سرعت جریان گاز در محیط متخلخل را افزایش می‌دهند. لیو و همکاران [۹] اثر کانال‌های مسدود شده بر انتقال واکنش‌گرها و عملکرد پیل با استفاده از میدان جریان موازی مرسوم را بررسی کردند. نتایج آن‌ها نشان می‌دهد که عملکرد پیل سوختی به دلیل افزایش توزیع واکنش دهنده‌ها در لایه پخش گاز و کمک به واکنش‌های شیمیایی، افزایش می‌یابد. سونگ و همکاران [۱۰] یک ساختار کانال جدید را با قرار دادن موانعی در کانال میدان جریان مرسوم بررسی کردند. آن‌ها دریافته‌اند که عملکرد پیل با کاهش اندازه گپ یا افزایش تعداد موانع در طول کانال با در نظر گرفتن تلفات افت فشار افزایش می‌یابد. وانگ و همکاران [۱۱] اثرات موانع در میدان جریان مارپیچی برای بهبود عملکرد پیل سوختی غشا پلیمری را مورد مطالعه قرار دادند. آن‌ها نشان داده‌اند که میدان جریان جدید مارپیچی مسدود شده از طرفی سبب اختلاف فشار بالا می‌شود و از سوی دیگر به انتقال واکنش دهنده‌ها به لایه پخش گاز کمک نموده و سبب بهبود چگالی جریان و عملکرد بهینه پیل می‌شود. افشاری و بهارلو [۱۲] با مدل‌سازی دو بعدی کاند پیل سوختی غشا پلیمری به بررسی مسدودسازی کانال کاند و تأثیر آن بر انتقال اکسیژن پرداختند. در کار آن‌ها صرفاً تحلیل پدیده انتقال جرم بررسی شده و مدل الکتروشیمیایی پیل در نظر گرفته نشده است. از این رو در کار آن‌ها عملکرد نهایی پیل در قالب منحنی دانسیته جریان-ولتاژ پیل قابل بررسی نیست.

این مطالعات نشان می‌دهند که عملکرد پیل سوختی با اضافه کردن موانع مسدودسازی در کانال‌های جریان که سبب افزایش جابه‌جایی واکنش دهنده‌ها به لایه پخش گاز می‌شود، بهبود می‌یابد. واضح است که ترم‌های افت فشار به دلیل مقاومت جریان بالا در بیشتر میدان‌های جریان با کانال مسدود شده زیاد می‌شود و نیاز است که کاهش یابد. اضافه ولتاژ پیل در طرف آند پیل سوختی غشا پلیمری در مقایسه با اضافه ولتاژ طرف کاند قابل صرف نظر کردن است و بنابراین انتخاب

جدول ۱ معادلات حاکم بر مدل پیل سوختی [۱۳]

شماره	معادله	فرم ریاضی معادله
(۱)	پیوستگی	$\frac{\partial(\varepsilon\rho)}{\partial t} + \nabla \cdot (\varepsilon\rho\vec{u}) = 0$
(۲)	مومنتم	$\frac{1}{\varepsilon} \left[\frac{\partial(\rho\vec{u})}{\partial t} + \frac{1}{\varepsilon} \nabla \cdot (\rho\vec{u}\vec{u}) \right] = \nabla P + \nabla \cdot (\mu^{\text{eff}} \nabla \vec{u}) + \vec{S}_u$
(۳)	بقای اجزا	$\frac{\partial(\varepsilon X_k)}{\partial t} + \nabla \cdot (\varepsilon\vec{u} X_k) = \nabla \cdot (D_k^{\text{eff}} \nabla X_k) + S_k$
(۴)	پتانسیل الکترون	$\nabla \cdot (\sigma_e^{\text{eff}} \nabla \phi_e) + S_{\phi_e} = 0$
(۵)	پتانسیل فاز جامد	$\nabla \cdot (\sigma_s^{\text{eff}} \nabla \phi_s) + S_{\phi_s} = 0$

جدول ۲ ترم‌های چشمه و چاه [۱۳]

معادله	لایه پخش گاز	لایه کاتالیست	غشا
مومنتم	$\frac{\mu}{K_p} \varepsilon^2 \vec{u}$	$\frac{\mu}{K_p} \varepsilon_m \varepsilon_{mc} \vec{u}$	$\frac{\mu}{K_p} \varepsilon_m \varepsilon_{mc} \vec{u}$
گونه‌های جرمی	$\frac{j_a}{2FC_{tot,a}} (H_2)$ $\frac{j_c}{4FC_{tot,c}} (O_2)$ $\frac{j_c}{2FC_{tot,c}} (H_2O)$	$\frac{K_\phi}{K_p} Z_f C_f F \nabla \phi_e$	$\frac{K_\phi}{K_p} Z_f C_f F \nabla \phi_e$
پتانسیل جامد	0	j	0
پتانسیل غشا	0	j	0

* ترم چشمه و یا چاه در نواحی که در این جدول نیامده برابر با صفر است.

در معادلات (۵-۱)، μ ، ρ ، ε ، P ، X_k ، ϕ_e ، ϕ_s ، μ ، بردار سرعت، چگالی سیال، ضریب تخلخل، فشار، کسر مولی جز k ، پتانسیل الکتریکی در غشا، پتانسیل فاز جامد و ویسکوزیته است. ترم‌های چشمه مربوط به این معادلات در جدول ۲ ارائه شده است.

ضریب موثر پخش جز k و ضریب هدایت یونی غشا با استفاده از روابط (۶) و (۷) به دست می‌آیند [۱۳].

$$D_k^{\text{eff}} = \varepsilon 1.5 D_k \quad (۶)$$

$$\sigma_e^{\text{eff}} = \varepsilon 1.5 \sigma_e \quad (۷)$$

ε_m تخلخل غشا است.

ضریب پخش وابسته به دما و فشار است.

$$D(T) = D_0 \left(\frac{T}{T_0} \right)^{\frac{3}{2}} \left(\frac{P_0}{P} \right) \quad (۸)$$

ضریب هدایت پروتونی در فاز غشا نیز تابع دما و رطوبت نسبی غشا است.

$$\sigma_m(T) = 100 \times \exp \left[1268 \left(\frac{1}{303 T} \right) \right] \times (0.005139\lambda - 0.00326) \quad (۹)$$

رطوبت نسبی غشا براساس رابطه تجربی (۱۰) به دست می‌آید [۱۴].

$$\lambda = \begin{cases} 0.043 + 17.18a - 39.85a^2 + 36a^3 & 0 < a \leq 1 \\ 14 + 1.4(a - 1) & 1 \leq a \leq 3 \end{cases} \quad (۱۰)$$

در پیل سوختی غشا پلیمری، هیدروژن مرطوب وارد کانال آند و هوا وارد کانال کاتد می‌شود. هیدروژن از میان لایه پخش آند به طرف کاتالیست انتقال می‌یابد و به دو یون هیدروژن (پروتون) و دو الکترون تبدیل می‌شود. پروتون‌ها از میان غشا به طرف لایه کاتالیست کاتد حرکت می‌کنند؛ اما غشا رسانای الکترون نیست و از این‌رو الکترون مجبور است مدار خارجی را طی کند و یک جریان الکتریکی خارجی به وجود می‌آید که سبب تولید کار الکتریکی می‌شود. در کاتد، اکسیژن از میان لایه پخش گاز حرکت می‌کند و در سطح لایه کاتالیست با پروتون‌ها و الکترون‌ها واکنش داده و تشکیل آب می‌دهد. واکنش آندی کمی گرماگیر و واکنش کاتدی به شدت گرمازا است؛ بنابراین در مجموع علاوه بر تولید آب، در پیل گرما تولید می‌شود.

۲-۲- معادلات حاکم

در توسعه مدل، فرضیات پیش‌رو در نظر گرفته می‌شود:

- (۱) مخلوط گاز، گاز کامل در نظر گرفته می‌شود.
- (۲) جریان با توجه با کوچک بودن عدد رینولدز (حداکثر ۱۹۱) در همه جا آرام در نظر گرفته می‌شود.
- (۳) با توجه به مقادیر سرعت و دما در کانال‌ها (۱۰۰ متر بر ثانیه و ۳۵۳ درجه کلوین) مخلوط جریان‌های گاز، تراکم‌پذیر در نظر گرفته می‌شود.
- (۴) مدل پایا در نظر گرفته می‌شود.
- (۵) الکترودها، لایه‌های کاتالیست و غشا همگن در نظر گرفته می‌شوند.
- (۶) پیل آدیاباتیک در نظر گرفته می‌شود.

برای مدل‌سازی عددی پیل سوختی، می‌توان از روش تک ناحیه‌ای و یا روش چند ناحیه‌ای استفاده کرد. در مدل چند ناحیه‌ای، دامنه محاسباتی به چند زیر دامنه تقسیم می‌شود و در هر زیر دامنه مجموعه معادلات حاکم بر آن ناحیه حل می‌شود. برای حل این معادلات و ارتباط آن‌ها با یکدیگر، به شرایط مرزی بین نواحی مختلف پیل نیاز است؛ اما بسیاری از این شرایط مرزی به طور واضح مشخص نیستند و از این‌رو پاسخ‌های به دست آمده از حل معادلات نیز دقیق نیست. همچنین، چون در هر ناحیه یک سری معادله مربوط به همان ناحیه نوشته می‌شود و این معادلات با شرایط مرزی به یکدیگر مربوط می‌شوند، مسئله بسیار پیچیده می‌شود. در روش تک ناحیه‌ای، فقط یک سری معادلات بقا در تمام نواحی پیل سوختی به کار می‌رود و نیازی به مشخص کردن شرایط مرزی در فصل مشترک بین نواحی نیست و شرایط مرزی فقط در سطح بیرونی پیل مورد نیاز است. اهمیت دیگر این روش آن است که با قرار دادن صفحه مسدودکننده در کانال جریان، نیازی به اعمال شرایط مرزی بر سطوح این صفحه نیست. عدم اعمال این شرایط مرزی به دقت حل مسئله می‌افزاید و حل معادلات را آسان‌تر می‌نماید؛ هر چند که زمان محاسبات را طولانی می‌کند. با به کار بردن روش تک ناحیه‌ای ممکن است یک معادله در ناحیه‌ای خاص از پیل برقرار نباشد؛ ولی برای اجتناب از اعمال معادلات متفاوت در هر ناحیه، می‌توان در روش عددی با اعمال ترم چشمه بزرگ و تعیین خواص فیزیکی مربوط به آن ناحیه، تمام معادلات را به گونه یکسان در تمام نواحی به کار برد. مدل شامل معادلات دیفرانسیل پاره‌ای همبسته شده غیرخطی شامل بقای جرم، مومنتم، بقای اجزا و بار الکتریکی با واکنش‌های الکتروشیمیایی است. با محاسبه ترم‌های چشمه (چاه) واکنش‌های الکتروشیمیایی، ابتدا معادلات گونه‌های جرمی برای مرحله اول مصرف و تولید اجزا و در مرحله بعد معادله بار الکتریکی به کار می‌رود. معادلات حاکم در جدول ۱ خلاصه شده‌اند.

فعالیت آب طبق رابطه (۱۱) تعریف می‌شود.

$$a = \frac{X_{H_2O} P}{P^{sat}} \quad (11)$$

ضریب پخش آب در غشا نیز به صورت رابطه (۱۲) است [۱۵].

$$D_w^m = \begin{cases} 3.1 \times 10^{-7} \times \lambda (e^{0.28\lambda} - 1) e^{-\frac{2346}{T}} & 0 < \lambda < 3 \\ 4.17 \times 10^{-8} \times \lambda (161e^\lambda + 1) e^{-\frac{2346}{T}} & 3 < \lambda \end{cases} \quad (12)$$

ضرایب پخش هیدروژن، اکسیژن و آب در مخلوط گاز طبق روابط (۱۳)، (۱۴) و (۱۵) تابع دما و فشار است.

$$D_{H_2} = 1.1 \times 10^{-4} \left(\frac{T}{353}\right)^{3/2} \left(\frac{P}{P}\right) \quad (13)$$

$$D_{O_2} = 3.2 \times 10^{-5} \left(\frac{T}{353}\right)^{3/2} \left(\frac{P}{P}\right) \quad (14)$$

$$D_{H_2O} = 7.35 \times 10^{-5} \left(\frac{T}{353}\right)^{3/2} \left(\frac{P}{P}\right) \quad (15)$$

چگالی جریان الکتریکی در جهت محوری به صورت روابط (۱۶) و (۱۷) محاسبه می‌شود.

$$I(y) = -\sigma_e^{eff} \frac{\partial \phi_e}{\partial x} \Big|_{x=IF} \quad (16)$$

$$I_{avg} = \frac{1}{L} \int_0^L I(y) dy \quad (17)$$

IF وجه مشترک بین غشا و لایه کاتالیست کاتد است. چگالی جریان الکتریکی نیز به صورت روابط (۱۸) و (۱۹) محاسبه می‌شود [۱۵].

$$j_a = a j_{0,a}^{ref} \left(\frac{X_{H_2}}{X_{H_2,ref}}\right)^{1/2} \left(\frac{\alpha_a + \alpha_c}{RT} \cdot F \cdot \eta\right) \quad (18)$$

$$j_c = -a j_{0,c}^{ref} \left(\frac{X_{O_2}}{X_{O_2,ref}}\right)^{1/2} \exp\left(\frac{-\alpha_c}{RT} \cdot F \cdot \eta\right) \quad (19)$$

$$\eta(x,y) = \phi_s - \phi_e - V_{oc} \quad (20)$$

α ، η ، ϕ و V_{oc} به ترتیب چگالی جریان الکتریکی انتقالی، ضریب انتقال، اضافه ولتاژ، پتانسیل و ولتاژ مدار باز است.

۲-۳- شرایط مرزی و روش حل عددی

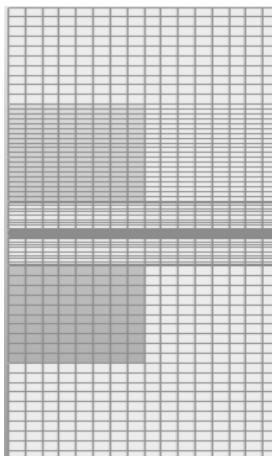
معادلات ۱ تا ۵ یک دستگاه از معادلات حاکم برای حل مجهولات مسئله را تشکیل می‌دهند. برای حل این معادلات نیاز به مشخص شدن شرایط مرزی مناسب است؛ زیرا در این مقاله از روش تک ناحیه‌ای استفاده شده است، فقط شرایط مرزی بیرونی باید مشخص شود و نیازی به شرایط مرزی بین لایه‌های مختلف پیل سوختی نیست.

شرط مرزی شار صفر، در مرزهای بیرونی به استثنا ورودی و خروجی کانال‌های جریان به‌کار می‌رود. در ورودی کانال کاتد و آند، غلظت اجزا با شرایط فشار و نسبت رطوبت ورودی مشخص می‌شود. فشار جزئی بخار آب در ورودی، برابر فشار اشباع در دمای مرطوب‌سازی واکنش‌گرهای ورودی است. سرعت ورودی آند و کاتد نیز می‌تواند با استفاده از نسبت جریان استوکیومتریک تعیین شود. این نسبت به صورت نسبت مقدار واکنش‌گرهای تأمین شده به واکنش‌گرهای مورد نیاز برای واکنش الکتروشیمیایی که دانسته جریان مرجع را تولید کند، براساس روابط (۲۱) و (۲۲) تعریف می‌شود [۱۵].

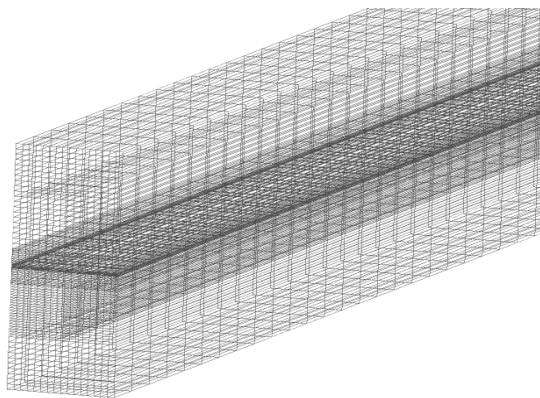
$$u_{a,in} = \zeta_a \frac{I_{ref}}{2FC_{H_2,in}} \frac{A_{react}}{A_{a,in}} \quad \text{در آند} \quad (21)$$

$$u_{c,in} = \zeta_c \frac{I_{ref}}{4FC_{O_2,in}} \frac{A_{react}}{A_{c,in}} \quad \text{در کاتد} \quad (22)$$

شرایط مرزی سرعت‌ها و اجزا خروجی به صورت کاملاً توسعه‌یافته در نظر گرفته می‌شود. پتانسیل الکتریکی ϕ_e در وجه مشترک لایه کاتالیست آند/ لایه پخش گاز آند صفر و در وجه مشترک لایه کاتالیست کاتد/ لایه پخش گاز کاتد، $\phi_e = V_{cell}$ در نظر گرفته می‌شود و در $y=H$ و $y=0$ $\partial \phi_e / \partial y = 0$ است. تعداد گره‌های شبکه‌بندی برای عدم وابستگی جواب‌ها به تعداد شبکه، ۱۱۹۶۸۰ انتخاب شده است. در نواحی ورودی و خروجی لایه پخش گاز و ابتدا و انتهای کانال، همچنین پیش و پس از مانع، شبکه‌بندی ریزتر شده است. این شبکه‌بندی در شکل ۲ نشان داده شده است. معادلات حاکم همراه با شرایط مرزی مشخص شده، با استفاده از نرم‌افزار فلونت نسخه ۱۴ حل شده‌اند. نرم‌افزار فلونت با استفاده از یک ماژول مخصوص حل پیل سوختی غشا پلیمری، توانایی حل معادلات مخصوص پیل را به کاربر می‌دهد. در این ماژول، معادلات پتانسیل، روابط الکتروشیمیایی و انتقال آب در غشا، به کمک زیر برنامه‌هایی به نرم افزار اضافه شده است که پیش‌بینی منحنی قطبش و سایر پدیده‌های انتقال در پیل را آسان می‌کند. در این مدل، میدان‌های سرعت و فشار با استفاده از الگوریتم سیمپل به‌دست آمده‌اند. برای حل معادلات از یک روند تکراری استفاده شده است و حل تا رسیدن به همگرایی با دقت 10^{-6} ادامه پیدا کرده است. نمودار شکل ۳ برای آشنایی با گام‌های حل نمایش داده شده است. جدول ۳ نیز پارامترهای فیزیکی و خصوصیات پیل را نشان می‌دهد.



(الف)

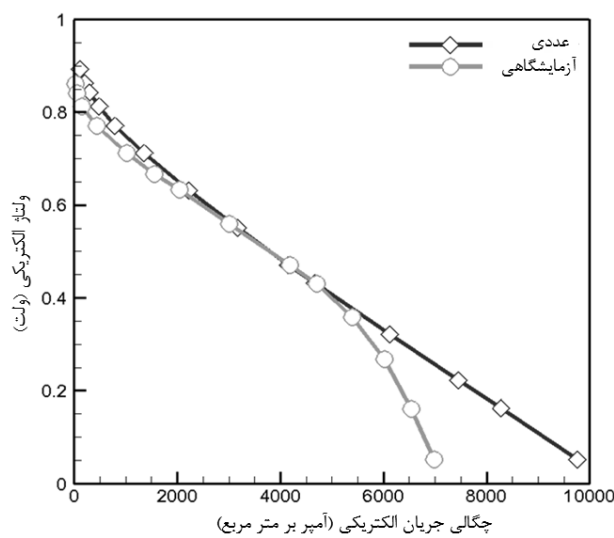


(ب)

شکل ۲ شبکه‌بندی مدل پیل سوختی از: الف) نمای جلو دامنه حل و ب) نمای سه بعدی دامنه حل



شکل ۳ نمودار حل دستگاه معادلات



شکل ۴ مقایسه منحنی قطبش تجربی و حل عددی

در شکل‌های ۵ و ۶ به ترتیب سرعت جریان در طول کانال در فصل مشترک

جدول ۳ خصوصیات و پارامترهای فیزیکی پیل سوختی	
مقادیر	پارامترها
1 mm	ضخامت کانال
300 μm	ضخامت لایه پخش گاز
10 μm	ضخامت لایه کاتالیست
50 μm	ضخامت غشا
70 mm	طول پیل
2 mm	طول مانع مستطیلی
0.5 mm	ارتفاع مانع مستطیلی
1 mm	عرض مانع مستطیلی
96487 Cmol^{-1}	ثابت فارادی
1/1	نرخ استوکیومتری جریان هیدروژن/اکسیژن
$5 \times 10^8 \text{ Am}^{-3}$	چگالی جریان مرجع آند
$1 \times 10^2 \text{ Am}^{-3}$	چگالی جریان مرجع کاتد
353 K	دمای عملکرد پیل سوختی
$66.817/17.808 \text{ mol m}^{-3}$	غلظت کلی آند/ کاتد
10^4 Am^{-2}	جریان الکتریکی مرجع
$1 \times 10^5 \text{ Pa}$	فشار ورودی آند و کاتد
0.8441/0.19	کسر مولی هیدروژن/ اکسیژن ورودی
0.1559	کسر مولی بخار آب ورودی در آند و کاتد
0.28	تخلخل غشا و لایه کاتالیست
0.4	تخلخل لایه پخش گاز
0.01 ms^{-1}	سرعت ورودی کانال آند و کاتد
2/2	ضریب انتقال آند/ کاتد
0.55	کسر مولی مرجع هیدروژن
0.02	کسر مولی مرجع اکسیژن
$1.873 \times 10^{-5} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$	ضریب پخش بخار آب در کانال
$2 \times 10^5 \text{ atmcm}^{-3}$	ثابت هنری برای اکسیژن در غشا
$2.63 \times 10^{-6} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$	ضریب پخش هیدروژن در کانال
$5.2197 \times 10^{-6} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$	ضریب پخش اکسیژن در کانال

۳- نتایج و بحث

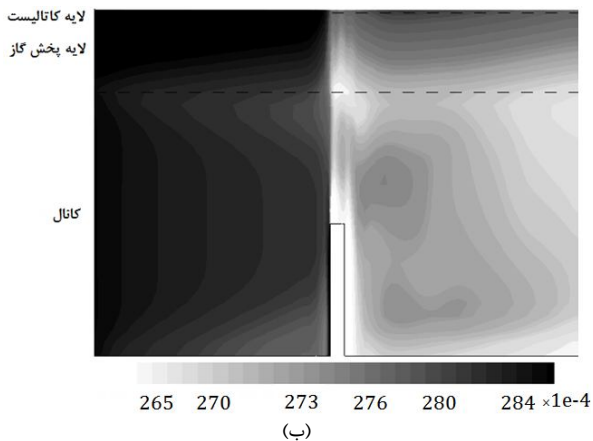
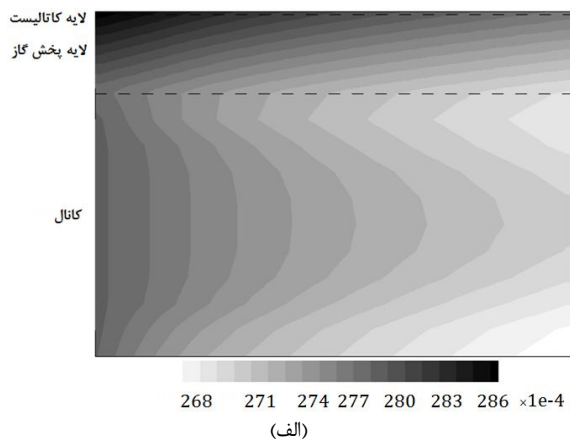
به منظور صحت‌گذاری نتایج، منحنی قطبش در شکل ۴ برای یک کانال ساده مستقیم (بدون مانع) با اطلاعات تجربی تیکنالی [۱۶] مقایسه شده که توافق بسیار خوبی با نتایج تجربی دارد. بیشترین اختلاف مدل حاضر با نتایج تجربی مربوط به دانسیته جریان‌های بالا است. در دانسیته جریان‌های بالا، آب مایع سبب شناوری لایه پخش گاز شده و انتقال گازهای واکنشگر به لایه کاتالیست را مختل می‌کند. در اثر پدیده شناوری عملکرد پیل به شدت افت می‌یابد. باید توجه داشت که به دلیل پیچیدگی زیاد بحث تغییر فاز آب در پیل سوختی، در این مقاله فرض شد که آب تغییر فاز نداده و به صورت بخار باقی می‌ماند. این فرض در دانسیته جریان‌های معمول و با توجه به شرایط عملکرد پیل، فرض مناسب و منطقی است.

۳-۱- تأثیر قرار دادن مانع در کانال کاتد

با قرار دادن مانع در کانال کاتد، سرعت جریان در فاصله بین مانع و لایه پخش گاز افزایش می‌یابد و سبب می‌شود گاز بیشتری به لایه پخش گاز نفوذ کند و غلظت اکسیژن و به تبع آن نرخ واکنش در لایه کاتالیست افزایش یابد. البته باید افزایش افت فشار در کانال را نیز در نظر گرفت. در غیاب مانع در کانال، کمترین افت فشار وجود دارد. افت فشار بیشتر معادل استفاده از پمپی با توان بالاتر است که بخشی از توان پیل سوختی را تلف می‌کند.

در شکل‌های ۷ الف و ۷ ب توزیع‌های غلظت اکسیژن در کانال جریان گاز کاتد، لایه پخش گاز و لایه کاتالیست کاتد در حالت با مانع مستطیلی و بدون مانع مقایسه شده است. در حالت بدون مانع، بیشتر اکسیژن در کانال جریان دارد و فقط کمی اکسیژن می‌تواند از میان لایه پخش گاز انتقال یابد و به لایه کاتالیست کاتد برسد. این امر می‌تواند منجر به نرخ پایین واکنش شده، بنابراین عملکرد پایین سیستم را به همراه دارد. با قرار دادن مانع، اکسیژن بیشتری، به خصوص در زیر مانع و پیش از آن، به سمت لایه پخش گاز و لایه کاتالیست هل داده می‌شود^۱ و غلظت اکسیژن در این لایه‌ها به طور محسوسی در راستای طول کانال افزایش می‌یابد. واکنش در سطح کاتالیست نیز به تبع تأمین بیشتر اکسیژن با نرخ بالاتری صورت می‌گیرد. همان طور که مشاهده می‌شود، غلظت اکسیژن در لایه‌های پخش گاز و کاتالیست در زیر ناحیه مانع و پیش از آن به طور مشخصی افزایش یافته است. افزایش غلظت اکسیژن براساس رابطه (۱۹) سبب افزایش دانسیته جریان کاتدی می‌شود.

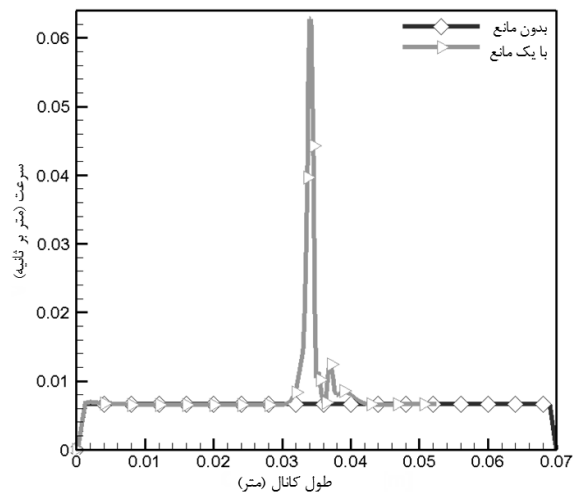
در شکل‌های ۸ الف و ۸ ب توزیع سرعت و خطوط جریان در کانال کاتد، لایه پخش گاز و لایه کاتالیست در حضور مانع مشاهده می‌شود. در صفحه پشت و جلویی مانع دو گردابه به علت تشکیل ناحیه کم فشار ایجاد می‌شود که این مطلب در کانال کاتد موجب تلفات انتقال جرم می‌شود و تا حد امکان باید این نواحی کم فشار را با ایجاد موانعی دیگر، با افزایش فشار استاتیک کم کرد. افزایش ضریب تخلخل لایه پخش گاز نیز می‌تواند به کوچک شدن این گردابه‌ها کمک کند. در واقع اکسیژن بیشتری که به علت وجود مانع به سمت لایه پخش گاز هل داده می‌شود، با افزایش تخلخل لایه پخش گاز، می‌تواند وارد این لایه شده و به سمت لایه کاتالیست کاتد انتقال یابد.



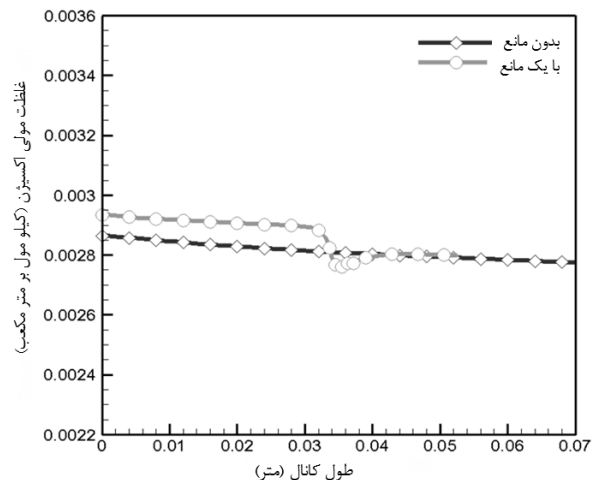
شکل ۷ غلظت اکسیژن در الکتروکاتد در حالت: الف) بدون مانع و ب) با مانع

لایه پخش گاز / لایه کاتالیست و غلظت اکسیژن در این مرز در طول کانال در حضور و عدم حضور مانع مکعب مستطیلی مقایسه شده‌اند. در این وضعیت مانع مکعب مستطیلی در وسط کانال قرار دارد.

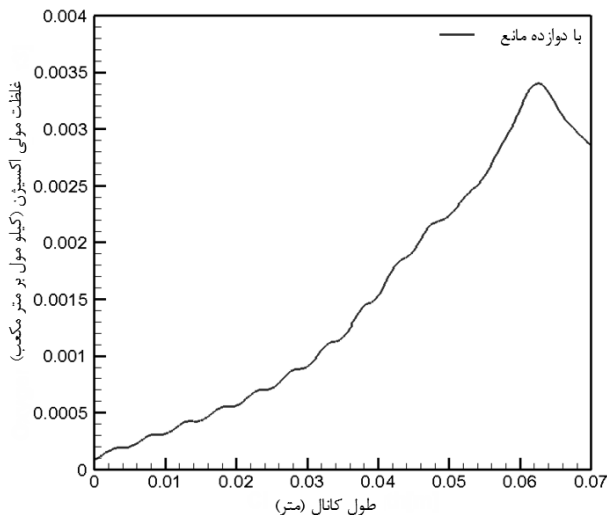
ملاحظه می‌شود زمانی که در کانال کاتد از مانع استفاده می‌شود، سرعت گاز در ناحیه زیر مانع افزایش می‌یابد. افزایش قابل توجه سرعت گازهای واکنش‌گر به انتقال گازها به سمت لایه پخش گاز کمک کرده و به تبع آن افزایش غلظت اکسیژن همراه است. پس از قله سرعت، نوسان‌های کوچک سرعت مشاهده می‌شود که ناشی از تشکیل گردابه پشت مانع است. پس از این ناحیه، اندازه سرعت مشابه پیش از مانع است. به دلیل این که اکسیژن در لایه کاتالیست مصرف می‌شود، در جهت طول کانال غلظت اکسیژن کاهش می‌یابد. کاهش اکسیژن سبب کاهش نرخ واکنش کاتدی می‌شود و در نتیجه جریان تولیدی کاهش یابد. مانع سبب شده تا از ابتدای کانال تا نقطه $y=34\text{mm}$ غلظت اکسیژن نسبت به کانال بدون مانع افزایش یابد. افزایش غلظت اکسیژن در ناحیه زیر مانع و ناحیه ابتدای کانال تا محل مانع چشم‌گیر است و روند کاهش غلظت اکسیژن به دلیل مصرف تا انتهای کانال ادامه می‌یابد. کاهش غلظت اکسیژن بلافاصله پس از مانع، به علت تشکیل گردابه در این ناحیه است. وجود گردابه سبب کشیده شدن جریان به درون کانال شده و مانع نفوذ اکسیژن به داخل لایه پخش گاز می‌شود.



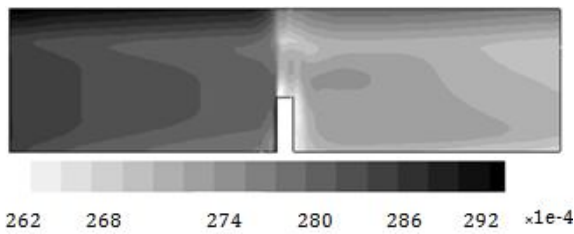
شکل ۵ تغییرات سرعت در فصل مشترک لایه پخش گاز / لایه کاتالیست در حالت با مانع و بدون مانع در وسط کانال کاتد



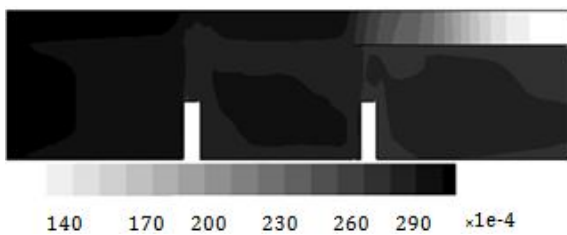
شکل ۶ تغییرات غلظت اکسیژن در فصل مشترک لایه پخش گاز / لایه کاتالیست، در حالت با مانع و بدون مانع در وسط کانال کاتد



شکل ۱۰ تأثیر ۱۲ مانع در کانال (تعداد زیاد مانع) کاتد بر غلظت اکسیژن موجود در فصل مشترک لایه پخش گاز / لایه کاتالیست



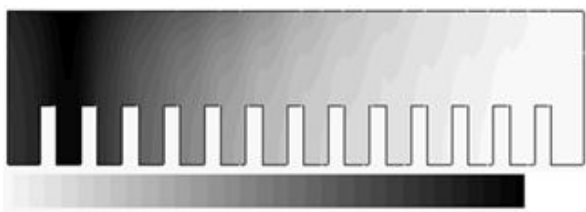
شکل ۱۱ الف غلظت اکسیژن در الکتروود کاتد، با یک مانع



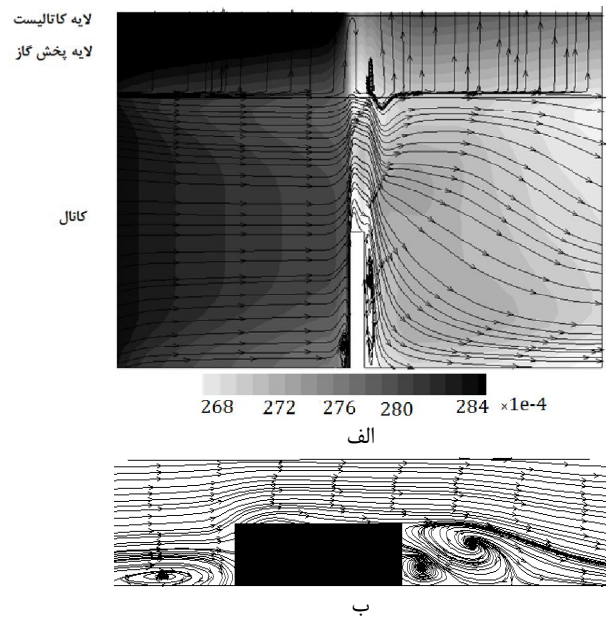
شکل ۱۱ ب غلظت اکسیژن در الکتروود کاتد، با دو مانع مستطیلی



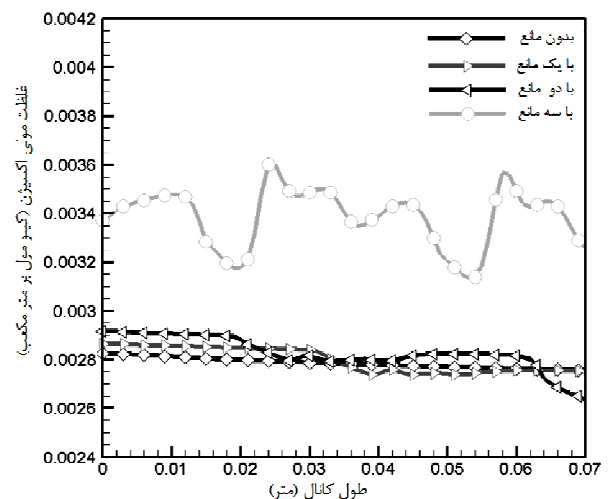
شکل ۱۱ ج غلظت اکسیژن در الکتروود کاتد، با سه مانع



شکل ۱۱ د غلظت اکسیژن در الکتروود کاتد، با دوازده مانع



شکل ۸ الف) توزیع سرعت در حضور مانع به همراه خطوط جریان در نواحی کانال، لایه پخش گاز و لایه کاتالیست کاتد، ب) خطوط جریان در نزدیکی مانع

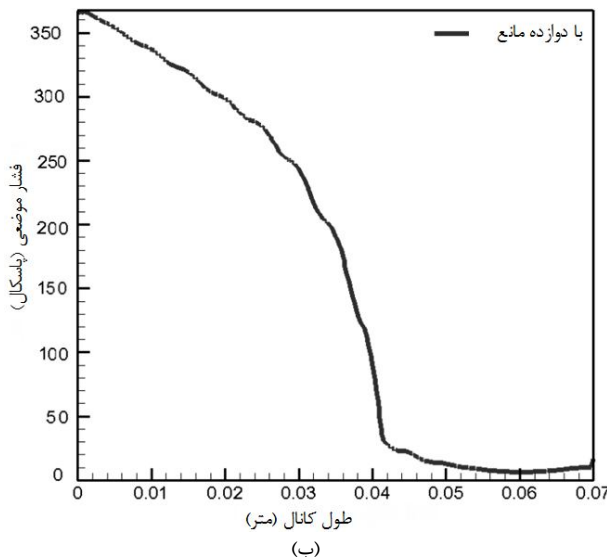
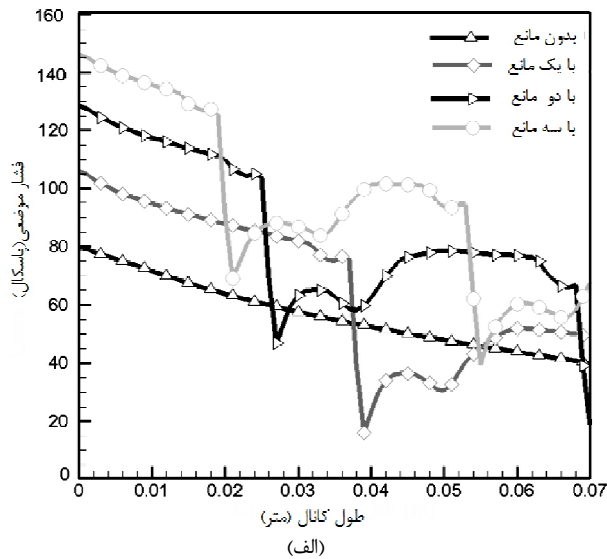


شکل ۹ تأثیر تعداد موانع در کانال کاتد بر غلظت اکسیژن موجود در فصل مشترک لایه پخش گاز / لایه کاتالیست

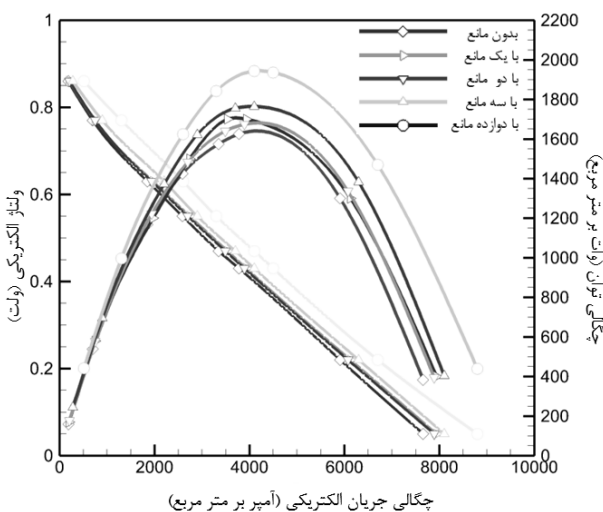
۳-۲- تأثیر تعداد موانع کانال کاتد

افزایش زیاد سرعت جریان گاز در زیر مانع کانال کاتد، طرح استفاده از تعداد بیشتر مانع را در کانال کاتد طرح می‌کند. شکل ۹ تأثیر تعداد موانع بر غلظت گاز اکسیژن در فصل مشترک لایه پخش گاز / لایه کاتالیست را نشان می‌دهد. با افزایش تعداد موانع، تعداد قله‌های بیشینه غلظت اکسیژن نیز افزایش می‌یابد. همچنین، غلظت اکسیژن در فصل مشترک لایه پخش گاز / لایه کاتالیست افزایش می‌یابد؛ هر چند که حرکت اجباری اکسیژن به سمت لایه پخش گاز محدود بوده و افزایش تعداد زیاد مانع نمی‌تواند در بالا بردن غلظت اکسیژن در لایه پخش گاز تأثیر زیادی گذارد. ولی باید به این نکته مهم توجه داشت که اضافه کردن هر مانع در کانال، منجر به توزیع یکنواخت‌تر غلظت اکسیژن در لایه پخش گاز می‌شود. این مطلب در شکل ۱۰ که ۱۲ مانع در طول کانال استفاده شده است، بهتر نمایان شده است. مشاهده می‌شود که نوسانات غلظت ناشی از اضافه شدن تعداد زیاد مانع (۱۲ مانع) نسبت به تعداد کم مانع (۲ یا ۳ مانع) بسیار کمتر است.

که تشکیل این گردابه‌ها به دلیل ناحیه کم‌فشار در کانال است و با افزودن مانع در این نواحی این گردابه‌ها کوچک و در مواردی از بین می‌رود.



شکل ۱۲ افت فشار در طول کانال برای: الف) تعداد موانع مختلف و ب) ۱۲ مانع



شکل ۱۳ تأثیر تعداد موانع بر منحنی عملکرد و چگالی توان پیل سوختی

توزیع یکنواخت‌تر اکسیژن منجر به توزیع یکنواخت‌تر دانسیته جریان می‌شود.

به کار بردن تعداد محدودی مانع موجب توزیع غیر یکنواخت اکسیژن در لایه کاتالیست می‌شود. از ابتدای کانال تا زیر موانع غلظت اکسیژن بالا بوده و در دیگر نواحی غلظت اکسیژن پایین است. توزیع غیریکنواخت غلظت اکسیژن منجر به توزیع غیریکنواخت چگالی جریان الکتریکی پیل می‌شود؛ ولی براساس شکل ۱۱ با افزایش تعداد موانع، علاوه بر نواحی زیر موانع، غلظت اکسیژن در دیگر نواحی نیز بالا می‌رود. به گونه‌ای که با به کار بردن سه مانع نسبت به یک مانع توزیع اکسیژن در لایه پخش گاز و لایه کاتالیست بسیار یکنواخت‌تر می‌شود. وقتی تعداد موانع کانال کاند افزایش یابد (۱۲ مانع مستطیلی در طول کانال) غلظت اکسیژن در لایه پخش گاز یکنواخت‌تر شده است.

افزایش تعداد موانع طرح کانال‌های موجی را طرح می‌کند که برای بالا بردن و یکنواخت کردن غلظت اکسیژن در لایه پخش گاز و در لایه کاتالیست در طراحی و ساخت پیل‌های سوختی مورد استفاده قرار می‌گیرد؛ اما افت فشار در کانال‌های موجی (تعداد موانع بالا و به طور منظم در کانال تعبیه شده‌اند) نسبت به کانال‌های ساده بسیار بالاتر است. براساس شکل ۱۲ و با توجه به تغییرات فشار گاز در طول کانال کاند، افت فشار برای کانال در حضور مانع حدود ۵۰ پاسکال است که این مقدار برای کانال ساده حدود ۴۰ پاسکال است. در شکل ۱۲ مشخص است که با افزایش تعداد موانع در کانال افت فشار نیز افزایش می‌یابد. این مطلب برای تعداد موانع زیاد (۱۲ مانع) بسیار محسوس است. نفوذ بالای اکسیژن در اثر ۱۲ مانع و مصرف بالای اکسیژن در لایه کاتالیست سبب می‌شود دبی اکسیژن در انتهای کانال به شدت افت کند و تغییرات فشار در انتهای کانال بسیار اندک باشد. این موضوع در نسبت استوکیومتری پایین‌تر (جدول ۳) محسوس‌تر است.

در شکل ۱۳ تأثیر تعداد موانع بر منحنی عملکرد پیل سوختی مشاهده می‌شود. با افزایش تعداد موانع به ویژه در چگالی‌های جریان بالا، عملکرد پیل سوختی بهتر می‌شود. در چگالی جریان بالا، عمده افت‌های داخل پیل ناشی از افت‌های انتقال جرم بوده که مانع به انتقال بهتر اکسیژن کمک می‌کند. همچنین محدوده چگالی جریان یعنی بیشینه چگالی توان قابل دسترس برای مواردی با مانع بیشتر، افزایش می‌یابد که دلیل آن را باید در توزیع مناسب‌تر گاز واکنش‌گر کاند در سطح لایه کاتالیست و افزایش تعداد واکنش‌های موثر در سطح لایه کاتالیست جستجو کرد.

تأثیر تعداد موانع بر منحنی چگالی توان پیل سوختی مشاهده می‌شود. در منحنی چگالی توان مشخص است که با افزایش تعداد موانع چگالی توان بالاتری از پیل قابل استخراج است. مطلب دیگری که از این منحنی قابل برداشت است مربوط به بیشینه چگالی توان است که مربوط به چگالی جریان ۴۵۰۰ آمپر بر مترمربع و ولتاژ عملیاتی ۰/۴۷ ولت است.

۴- جمع بندی

در این مطالعه، یک مدل سه بعدی دائم پیل سوختی غشا پلیمری با کانال کاندی شامل مانع، برای پیش‌بینی رفتار کلی پیل سوختی تحت شرایط کارکردی و برای استفاده در طراحی تک پیل ارائه شده و تأثیر مانع و همچنین افزایش موانع در کانال کاند بررسی شده است. در مجموع می‌توان به این مطلب اشاره کرد که با افزایش تعداد موانع در کانال از طرفی افت فشار بالا می‌رود و توان اتلافی در کانال زیاد می‌شود؛ اما از سوی دیگر سرعت نفوذ به لایه پخش گاز تقویت می‌شود. مطلب قابل‌توجه دیگر افزایش سرعت به لایه پخش گاز در حضور موانع و همچنین تشکیل گردابه قبل و بعد از مانع موجود در کانال است. باید دقت کرد

۷- مراجع

- [1] D. M. Bernardi, M. W. Vebrunge, A mathematical model of the solid polymer electrolyte fuel cell, *Journal of The Electrochemical Society*, Vol. 139, No. 9, pp. 2477-2491, 1992.
- [2] L. Peng, X. Lai, D. Liu, P. Hu, J. Ni, Flow channel shape optimum design for hydroformed metal bipolar plate in PEM fuel cell, *Journal of Power Sources*, Vol. 178, pp. 223-230, 2008.
- [3] P. T. Nguyen, T. Berning, N. Djilali, Computational model of a PEM fuel cell with serpentine gas flow channels, *Journal of Power Sources*, Vol. 130, pp. 149-157, 2004.
- [4] S. Dutta, S. Shimpalee, J. W. Van, Numerical prediction of mass exchange between cathode and anode channels in a PEM fuel cell, *Journal Heat Mass Transfer*, Vol. 44, pp. 2029-2038, 2001.
- [5] R. J. Kee, P. Korada, K. Walters, M. Pavol, A generalized model of the flow distribution in channel networks of planar fuel cells, *Journal of Power Sources*, Vol. 109, pp. 148-154, 2002.
- [6] W. M. Yan, C. Y. Soong, F. Chen, H. S. Chu, Effect of flow distributor geometry and diffusion layer porosity on reactant gas transport and performance of proton exchange membrane fuel cells, *Journal of Power Sources*, Vol. 125, pp. 27-36, 2004.
- [7] V. Gurau, F. Barbir, H. Liu, An analytical solution of a half-cell model for PEM fuel cells, *Journal of The Electrochemical Society*, Vol. 47, pp. 2468-2477, 2000.
- [8] J. K. Kuoa, T. H. Yen, C. K. Chen, Three-dimensional numerical analysis of PEMFCs with straight and wave-like gas flow fields channels, *Journal of Power Sources*, Vol. 177, pp. 96-103, 2008.
- [9] H. C. Liu, W. M. Yan, C. Y. Soong, F. Chen, Effects of baffle-blocked flow channel on reactant transport and cell performance of a proton exchange membrane fuel cell, *Journal of Power Sources*, Vol. 142, 125-133, 2005.
- [10] C. Y. Soong, W. M. Yan, C. Y. Tseng, H. C. Liu, F. Chen, H. S. Chu, Analysis of reactant gas transport in a PEM fuel cell with partially blocked fuel flow channels, *Journal of Power Sources*, Vol. 143, 36-47, 2005.
- [11] X. D. Wang, Y. Y. Duan, W. M. Yan, Novel serpentine-baffle flow field design for proton exchange membrane fuel cells, *Journal of Power Sources*, Vol. 173, 210-221, 2007.
- [12] E. Afshari, N. Baharloo Hooreh, Analysis of oxygen transport and pressure drop in a PEM fuel cell cathode with partially blocked flow channel, *Moadres Mechanical Engineering*, Vol. 12, No. 5, pp. 43-58, 2012. (In Persian)
- [13] S. Um, C. Y. Wang, K. S. Chen, Computational fluid dynamics modeling of proton exchange membrane fuel cells, *Journal of The Electrochemical Society*, Vol. 147, No. 12, pp. 4485-4493, 2000.
- [14] T. Springer, T. Zawodzinski, S. Gottesfeld, Electrode materials and process for energy conversion and storage, *Journal of The Electrochemical Society*, Vol. 13, pp. 1-14, 1997.
- [15] E. Afshari, S. A. Jazayeri, Analyses of heat and water transport interactions in a proton exchange membrane fuel cell, *Journal of Power Sources*, Vol. 194, pp. 423-432, 2009.
- [16] E. A. Ticianelli, C. R. Derouin, A. Redondo, S. Srinivasan, Methods to Advance Technology of Proton Exchange Membrane Fuel Cells, *Journal of The Electrochemical Society*, Vol. 135, pp. 2209-2214, 1998.

نتایج حاصل از مطالعه وجود مانع در کانال جریان عبارتند از:

- با قرار دادن مانع در کانال کاتد، سرعت جریان در فاصله بین مانع و لایه پخش گاز افزایش می‌یابد؛ که این مطلب سبب می‌شود تا گاز بیشتری به داخل لایه پخش گاز نفوذ کند و غلظت اکسیژن و به تبع آن نرخ واکنش در لایه کاتالیست افزایش یابد، هر چند افت فشار سمت کاتد نیز با افزایش تعداد موانع افزایش می‌یابد.
- افزایش تعداد موانع در کانال کاتد منجر به افزایش غلظت اکسیژن در لایه پخش گاز و لایه کاتالیست و توزیع یکنواخت‌تر گاز در این نواحی می‌شود. به عبارتی افزایش تعداد موانع موجب توزیع بسیار یکنواخت اکسیژن در لایه کاتالیست می‌شود؛ اگر چه افت فشار کانال با مانع زیاد نیز بالا است.
- تعداد زیاد موانع که ایده کانال‌های موجی را در پیل مطرح می‌کند، به دو دلیل توزیع یکنواخت‌تر اکسیژن و نفوذ بالاتر اکسیژن به لایه پخش گاز و لایه کاتالیست، سبب بهبود عملکرد پیل می‌شود.

۵- علائم و نشانه‌ها

علائم انگلیسی

R	ثابت عمومی گازها $(8.314) \text{Jkg}^{-1} \text{mol}^{-1} \text{K}^{-1}$
F	ثابت فارادی (C mol^{-1})
S	جمله چشمه در معادلات انتقال
I	چگالی جریان الکتریکی (Am^{-2})
T	دما (K)
u	سرعت (ms^{-1})
D_w^m	ضریب پخش آب در غشا $(\text{m}^2 \text{s}^{-1})$
D_k	ضریب پخش جز k $(\text{m}^2 \text{s}^{-1})$
p	فشار (Pa)
a	فعالیت آب
C^i	غلظت جز i (mol m^{-3})
K	نفوذپذیری (m^2)

علائم یونانی

η	اضافه پتانسیل (V)
ϕ	پتانسیل الکتریکی (V)
λ	ثابت فعالیت در غشا
ρ	چگالی (kgm^{-3})
ζ	ضریب استوکیومتری
ε	ضریب تخلخل
μ	لزجت (Pa.s)

۶- تشکر و قدردانی

نویسندگان از کمک‌ها و حمایت‌های سازمان انرژی‌های نو ایران تشکر و قدردانی می‌کنند.