



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

* اصفهان، صندوق پستی ۷۳۴۴۱-۸۱۷۴۶ eng.ui.ac.ir e.afshari@

چکیده

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

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 کارتزین 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 موانع 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 موانع بهبود می‌یابد.

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)

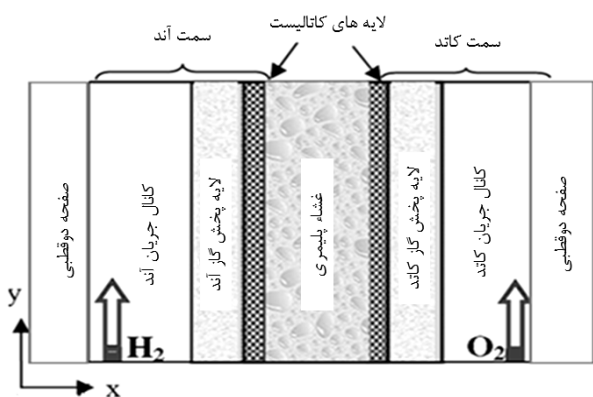
برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

بررسی انتقال جرم اکسیژن در طرف کاتد 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 کاتد و یا فقط همه نواحی سمت کاتد 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 می شود 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 می یابد. برای درک صحیح دینامیک سیال و فرآیندهای الکتروشیمیایی پیل سوختی، در این مطالعه یک حل عددی کامل از معادلات پیوستگی، مومنتوم، بقای گونه های 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 پدیده های انتقالی در داخل پیل و بر عملکرد پیل مورد بررسی قرار گرفته است.

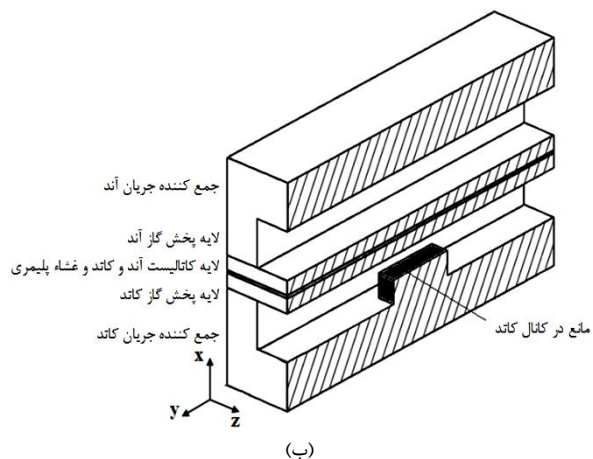
۲- مدل پیل سوختی غشا پلیمری

۲-۱- توصیف پیل

شکل ۱ نمایی دو و سه بعدی از یک تک سل پیل سوختی غشا پلیمری با اجزای مرتبط به آن را نشان می دهد. پیل شامل کانال جریان آند، لایه پخش گاز آند، لایه کاتالیست آند، غشا، لایه کاتالیست کاتد، لایه پخش گاز کاتد و کانال جریان کاتد است. براساس شکل ۱ مانع مسدود کننده در داخل کانال کاتد قرار می گیرد. 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 کاتد

گاز و آب خروجی پیل از کنترل خارج شود، انتقال اکسیژن به لایه کاتالیست کاهش قابل توجهی می یابد 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 می شود. از این رو طراحی موثر کانال های جریان برای اطمینان از توزیع یکنواخت گازهای واکنش گر در پیل سوختی بسیار مهم و اساسی است. طراحی الگوی میدان جریان پیل سوختی از چالش های 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 کانال های مارپیچی ارائه نمودند و پدیده های اساسی انتقال را در پیل بررسی کردند. محاسبات سه بعدی انتقال سوخت در پیل سوختی غشا پلیمری با کانال های 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 واکنش گر و عملکرد پیل سوختی غشا پلیمری بررسی شده است. گرو و همکاران [۷] با ارائه یک مدل عددی، انتقال اجزا واکنش گر را در یک نیم پیل بررسی و تأثیرات ضریب تخلخل و انحناء لایه پخش گاز و لایه کاتالیست بر انتقال اجزا واکنش گر را مشخص کردند. کیو و همکاران [۸] با ارائه یک مدل عددی سه بعدی به بررسی عملکرد پیل سوختی غشا پلیمری با کانال های موجی پرداختند و توزیع دما و منحنی عملکرد پیل را به دست آوردند. نتایج آن ها نشان می دهد که کانال های موجی تأثیر انتقال حرارت جابه جایی را بهبود بخشیده و سرعت جریان گاز در محیط متخلخل را افزایش می دهند. لیو و همکاران [۹] اثر کانال های مسدود شده بر انتقال واکنش گر ها و عملکرد پیل با استفاده از میدان جریان موازی مرسوم را بررسی کردند. نتایج آن ها نشان می دهد که عملکرد پیل سوختی به دلیل افزایش توزیع واکنش دهنده ها در لایه پخش گاز و کمک به واکنش های شیمیایی، افزایش می یابد. سونگ و همکاران [۱۰] یک ساختار کانال جدید را با قرار دادن موانعی در کانال میدان جریان مرسوم بررسی کردند. آن ها دریافتند که عملکرد پیل با کاهش اندازه گپ یا افزایش تعداد موانع در طول کانال با در نظر گرفتن تلفات افت فشار افزایش می یابد. وانگ و همکاران [۱۱] اثرات موانع در میدان جریان مارپیچی برای بهبود عملکرد پیل سوختی غشا پلیمری را مورد مطالعه قرار دادند. آن ها نشان داده اند که میدان جریان جدید مارپیچی مسدود شده از طرفی سبب اختلاف فشار بالا می شود و از سوی دیگر به انتقال واکنش دهنده ها به لایه پخش گاز کمک نموده و سبب بهبود چگالی جریان و عملکرد بهینه پیل می شود. افشاری و بهارلو [۱۲] با مدل سازی دو بعدی کاتد پیل سوختی غشا پلیمری به بررسی مسدودسازی کانال کاتد و تأثیر آن بر انتقال اکسیژن پرداختند. در کار آن ها صرفاً تحلیل پدیده انتقال جرم بررسی شده و مدل الکتروشیمیایی پیل در نظر گرفته نشده است. از این رو در کار آن ها عملکرد نهایی پیل در قالب منحنی دانسیته جریان-ولتاژ پیل قابل بررسی نیست.

این مطالعات نشان می دهند که عملکرد پیل سوختی با اضافه کردن موانع مسدودساز در کانال های جریان که سبب افزایش جابه جایی واکنش دهنده ها به لایه پخش گاز می شود، بهبود می یابد. واضح است که ترم های افت فشار به دلیل مقاومت جریان بالا در بیشتر میدان های جریان با کانال مسدود شده زیاد می شود و نیاز است که کاهش یابد. اضافه ولتاژ پیل در طرف آند پیل سوختی غشا پلیمری در مقایسه با اضافه ولتاژ طرف کاتد 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)	مومنوم	$\frac{1}{\varepsilon} \left[\frac{\partial(\rho\vec{u})}{\partial t} + \frac{1}{\varepsilon} \nabla \cdot (\rho\vec{u}\vec{u}) \right] = \nabla P + \nabla \cdot (\mu^{\text{eff}} \nabla \vec{u}) + \vec{S}_u$
(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 ترم های چشمه و چاه [۱۳]		
معادله	لایه پخش گاز	لایه کاتالیست
مومنوم	$\frac{\mu}{K_p} \varepsilon^2 \vec{u}$	$\frac{\mu}{K_p} \varepsilon_m \varepsilon_{mc} \vec{u}$
گونه های جرمی	$\frac{j_a}{2FC_{tot,a}} (H_2)$ $\frac{j_c}{4FC_{tot,c}} (O_2)$ $\frac{j_e}{2FC_{tot,c}} (H_2O)$	$\frac{K_\phi}{K_p} Z_f C_f F \nabla \phi_e$ 0 j
پتانسیل جامد	0	j
پتانسیل غشا	0	j

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

در معادلات (۵-۱)، μ ، ρ ، ε ، ρ ، u ، X_k ، ϕ_e ، ϕ_s ، μ ، بردار سرعت، چگالی سیال، ضریب تخلخل، فشار، کسر مولی جز kام، پتانسیل الکتریکی در غشا، پتانسیل فاز جامد و ویسکوزیته است. ترم های 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 می آیند [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 می آید [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 می شود. هیدروژن از میان لایه پخش آند به طرف کاتالیست انتقال می یابد و به دو یون هیدروژن (پروتون) و دو الکترون تبدیل می شود. پروتون ها از میان غشا به طرف لایه کاتالیست کاتد حرکت می کنند؛ اما غشا رسانای الکترون نیست و از این رو الکترون مجبور است مدار خارجی را طی کند و یک جریان الکتریکی خارجی به وجود می آید که سبب تولید کار الکتریکی می شود. در کاتد، اکسیژن از میان لایه پخش گاز حرکت می کند و در سطح لایه کاتالیست با پروتون ها و الکترون ها واکنش داده و تشکیل آب می دهد. واکنش آندی کمی گرماگیر و واکنش کاتدی به شدت گرمازا است؛ بنابراین در مجموع علاوه بر تولید آب، در پیل گرما تولید می شود.

۲-۲- معادلات حاکم

در توسعه مدل، فرضیات پیش رو در نظر گرفته می شود:

- مخلوط گاز، گاز کامل در نظر گرفته می شود.
- جریان با توجه با کوچک بودن عدد رینولدز (حداکثر ۱۹۱) در همه جا آرام در نظر گرفته می شود.
- با توجه به مقادیر سرعت و دما در کانال ها (۱۰۰ متر بر ثانیه و ۳۵۳ درجه کلوین) مخلوط جریان های گاز، تراکم پذیر در نظر گرفته می شود.
- مدل پایا در نظر گرفته می شود.
- الکترودها، لایه های کاتالیست و غشا همگن در نظر گرفته می شوند.
- پیل آدیاباتیک در نظر گرفته می شود.

برای مدل سازی عددی پیل سوختی، می توان از روش تک ناحیه ای و یا روش چند ناحیه ای استفاده کرد. در مدل چند ناحیه ای، دامنه محاسباتی به چند زیر دامنه تقسیم می شود و در هر زیر دامنه مجموعه معادلات حاکم بر آن ناحیه حل می شود. برای حل این معادلات و ارتباط آن ها با یکدیگر، به شرایط مرزی بین نواحی مختلف پیل نیاز است؛ اما بسیاری از این شرایط مرزی به طور واضح مشخص نیستند و از این رو پاسخ های به دست آمده از حل معادلات نیز دقیق نیست. همچنین، چون در هر ناحیه یک سری معادله مربوط به همان ناحیه نوشته می شود و این معادلات با شرایط مرزی به یکدیگر مربوط می شوند، مسئله بسیار پیچیده می شود. در روش تک ناحیه ای، فقط یک سری معادلات بقا در تمام نواحی پیل سوختی به کار می رود 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 می افزاید و حل معادلات را آسان تر می نماید؛ هر چند که زمان محاسبات را طولانی می کند. با به کار بردن روش تک ناحیه ای ممکن است یک معادله در ناحیه ای خاص از پیل برقرار نباشد؛ ولی برای اجتناب از اعمال معادلات متفاوت در هر ناحیه، می توان 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 پاره ای همبسته شده غیرخطی شامل بقای جرم، مومنوم، بقای اجزا و بار الکتریکی با واکنش های الکتروشیمیایی است. با محاسبه ترم های چشمه (چاه) واکنش های الکتروشیمیایی، ابتدا معادلات گونه های جرمی برای مرحله اول مصرف و تولید اجزا و در مرحله بعد معادله بار الکتریکی به کار می رود. معادلات حاکم در جدول ۱ خلاصه شده اند.

فعالیت آب طبق رابطه (۱۱) تعریف می شود.

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

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

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

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

$$D_{H_2} = 1.1 \times 10^{-4} \left(\frac{T}{353}\right)^{3/2} \left(\frac{1}{P}\right) \quad (13)$$

$$D_{O_2} = 3.2 \times 10^{-5} \left(\frac{T}{353}\right)^{3/2} \left(\frac{1}{P}\right) \quad (14)$$

$$D_{H_2O} = 7.35 \times 10^{-5} \left(\frac{T}{353}\right)^{3/2} \left(\frac{1}{P}\right) \quad (15)$$

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

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

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

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

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

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

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

j ، α ، η و ϕ 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 می دهند. برای حل این معادلات نیاز به مشخص شدن شرایط مرزی مناسب است؛ زیرا در این مقاله از روش تک ناحیه ای استفاده شده است، فقط شرایط مرزی بیرونی باید مشخص شود و نیازی به شرایط مرزی بین لایه های مختلف پیل سوختی نیست.

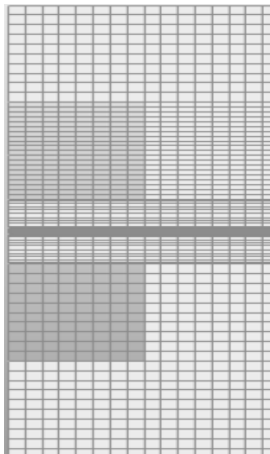
شرط مرزی شار صفر، در مرزهای بیرونی به استثنا ورودی و خروجی کانال های جریان به کار می رود. در ورودی کانال کاتد و آند، غلظت اجزا با شرایط فشار و نسبت رطوبت ورودی مشخص می شود. فشار جزئی بخار آب در ورودی، برابر فشار اشباع در دمای مرطوب سازی واکنش گرای ورودی است. سرعت ورودی آند و کاتد نیز می تواند با استفاده از نسبت جریان استوکیومتری تعیین شود. این نسبت به صورت نسبت مقدار واکنش گرهای تأمین شده به واکنش گرهای مورد نیاز برای واکنش الکتروشیمیایی که دانسته جریان مرجع را تولید کند، براساس روابط (۲۱) و (۲۲) تعریف می شود [۱۵].

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

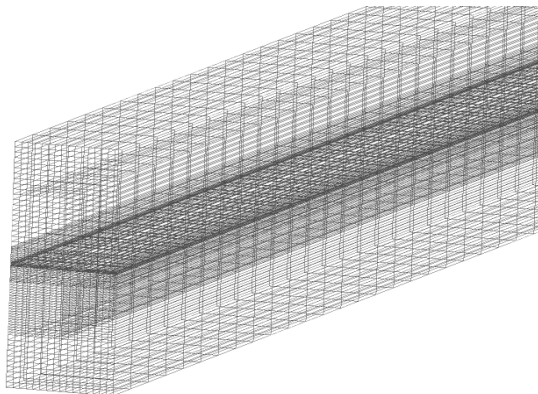
$$u_{c, \text{in}} = \zeta_c \frac{I_{\text{ref}}}{4FC_{O_2, \text{in}}} \frac{A_{\text{react}}}{A_{c, \text{in}}} \quad \text{در کاتد} \quad (22)$$

شرایط مرزی سرعت ها و اجزا خروجی به صورت کاملاً توسعه یافته در نظر گرفته می شود. 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، $\phi_e = V_{\text{cell}}$ در نظر گرفته می شود و در $y=H$ و $y=0$ و $\partial \phi_e / \partial y = 0$ است.

تعداد گرهای شبکه بندی برای عدم وابستگی جواب ها 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، شبکه بندی ریزتر شده است. این شبکه بندی در شکل ۲ نشان داده شده است. معادلات حاکم همراه با شرایط مرزی مشخص شده، با استفاده از نرم افزار فلوئنت نسخه ۱۴ حل شده اند. نرم افزار فلوئنت با استفاده از یک ماژول مخصوص حل پیل سوختی غشا پلیمری، توانایی حل معادلات مخصوص پیل را به کاربر می دهد. در این ماژول، معادلات پتانسیل، روابط الکتروشیمیایی و انتقال آب در غشا، به کمک زیر برنامه هایی به نرم افزار اضافه شده است که پیش بینی منحنی قطبش و سایر پدیده های انتقال در پیل را آسان می کند. در این مدل، میدان های سرعت و فشار با استفاده از الگوریتم سیمپل به دست آمده اند. 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 گام های حل نمایش داده شده است. جدول ۳ نیز پارامترهای فیزیکی و خصوصیات پیل را نشان می دهد.



(الف)

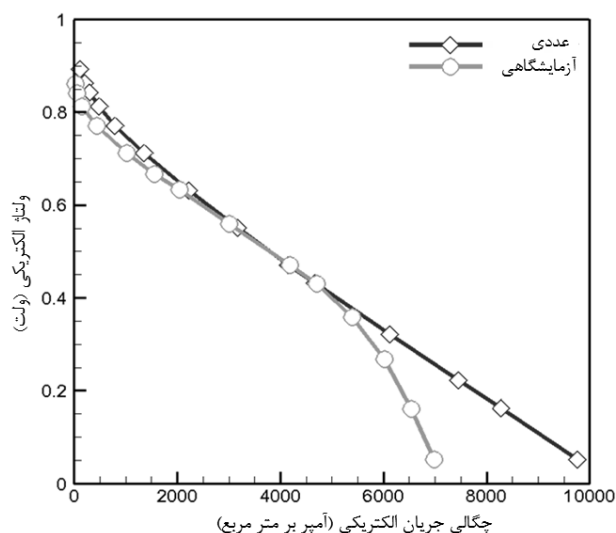


(ب)

شکل ۲ شبکه بندی 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 شکل های ۵ و ۶ به ترتیب سرعت جریان در طول کانال در فصل مشترک

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

۳- نتایج و بحث

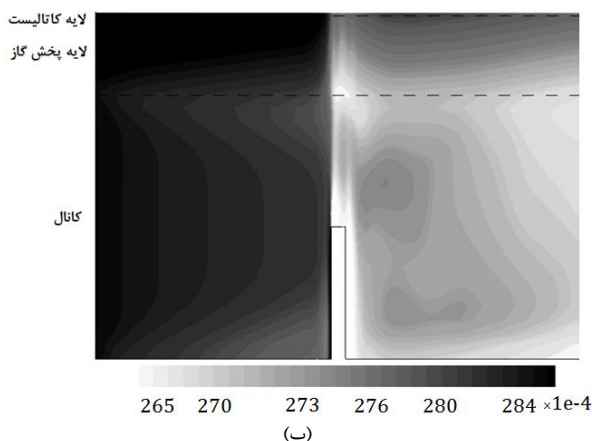
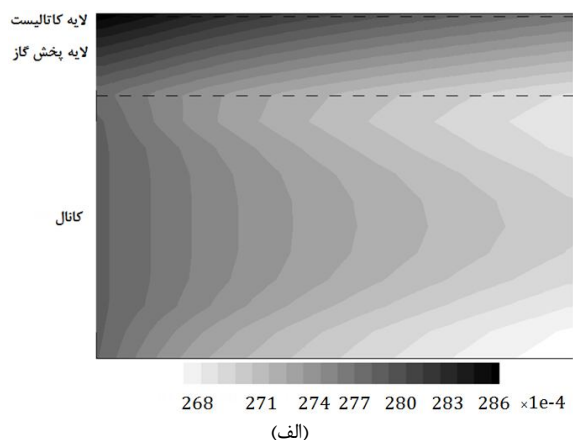
به منظور صحت گذاری نتایج، منحنی قطبش در شکل ۴ برای یک کانال ساده مستقیم (بدون مانع) با اطلاعات تجربی تیکنالی [۱۶] مقایسه شده که توافق بسیار خوبی با نتایج تجربی دارد. بیشترین اختلاف مدل حاضر با نتایج تجربی مربوط به دانسیته جریان های بالا است. در دانسیته جریان های بالا، آب مایع سبب شناوری لایه پخش گاز شده و انتقال گازهای واکنشگر به لایه کاتالیست را مختل می کند. در اثر پدیده شناوری عملکرد پیل به شدت افت می یابد. 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 می ماند. این فرض در دانسیته جریان های 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 می یابد و سبب می شود 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 می کند.

در شکل های ۷ الف و ۷ ب توزیع های 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 می تواند از میان لایه پخش گاز انتقال یابد و به لایه کاتالیست کاتد برسد. این امر می تواند 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 می شود^۱ و غلظت اکسیژن در این لایه ها به طور محسوسی در راستای طول کانال افزایش می یابد. واکنش در سطح کاتالیست نیز به تبع تأمین بیشتر اکسیژن با نرخ بالاتری صورت می گیرد. همان طور که مشاهده می شود، غلظت اکسیژن در لایه های 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 می شود.

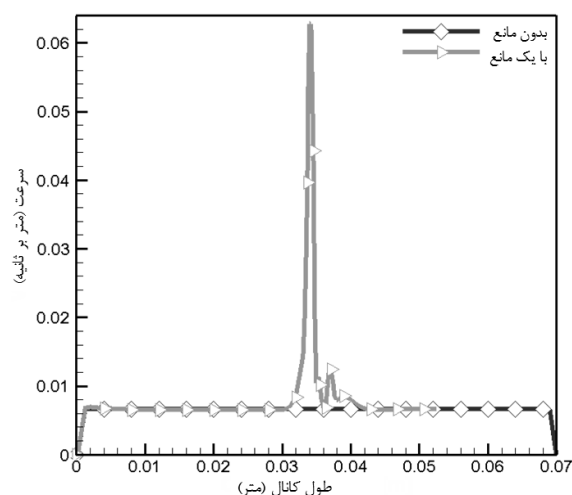
در شکل های ۸ الف و ۸ ب توزیع سرعت و خطوط جریان در کانال کاتد، لایه پخش گاز و لایه کاتالیست در حضور مانع مشاهده می شود. در صفحه پشت و جلویی مانع دو گردابه به علت تشکیل ناحیه کم فشار ایجاد می شود که این مطلب در کانال کاتد موجب تلفات انتقال جرم می شود و تا حد امکان باید این نواحی کم فشار را با ایجاد موانعی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



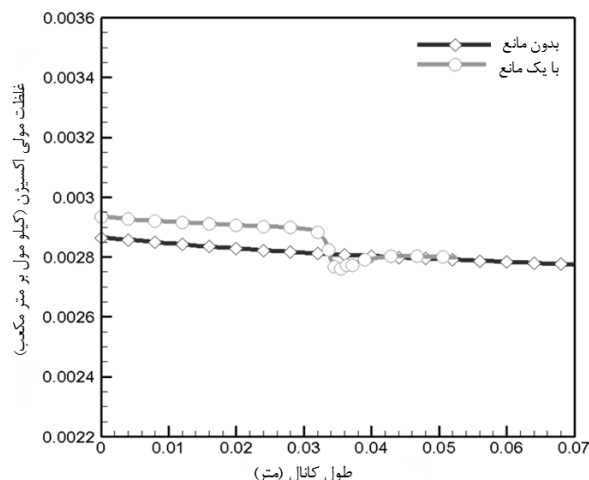
شکل ۷ غلظت اکسیژن در الکتروکاتد در حالت: الف) بدون مانع و ب) با مانع

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

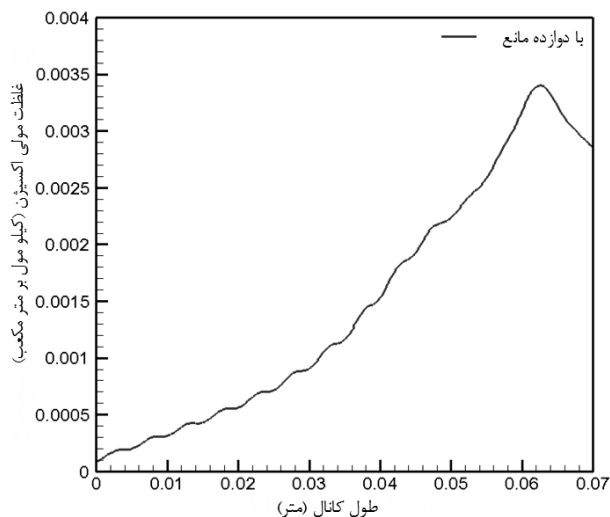
ملاحظه می شود زمانی که در کانال کاتد از مانع استفاده می شود، سرعت گاز در ناحیه زیر مانع افزایش می یابد. افزایش قابل توجه سرعت گازهای واکنش گر به انتقال گازها به سمت لایه پخش گاز کمک کرده و به تبع آن افزایش غلظت اکسیژن همراه است. پس از قله سرعت، نوسان های کوچک سرعت مشاهده می شود که ناشی از تشکیل گردابه پشت مانع است. پس از این ناحیه، اندازه سرعت مشابه پیش از مانع است. به دلیل این که اکسیژن در لایه کاتالیست مصرف می شود، در جهت طول کانال غلظت اکسیژن کاهش می یابد. کاهش اکسیژن سبب کاهش نرخ واکنش کاتدی می شود 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 چشم گیر است و روند کاهش غلظت اکسیژن به دلیل مصرف تا انتهای کانال ادامه می یابد. 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 می شود.



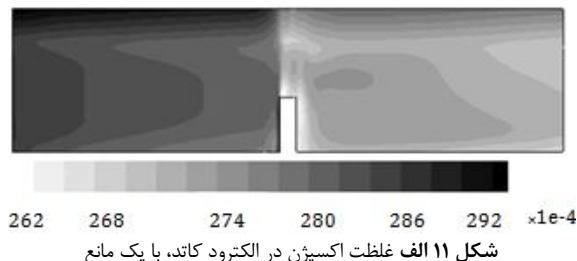
شکل ۵ تغییرات سرعت در فصل مشترک لایه پخش گاز / لایه کاتالیست در حالت با مانع و بدون مانع در وسط کانال کاتد



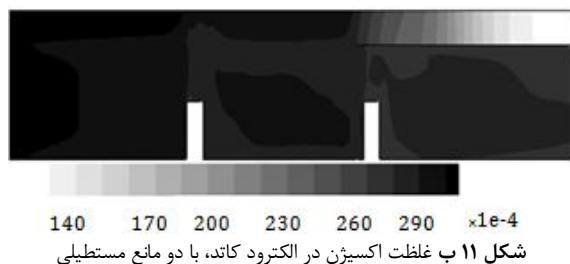
شکل ۶ تغییرات غلظت اکسیژن در فصل مشترک لایه پخش گاز / لایه کاتالیست، در حالت با مانع و بدون مانع در وسط کانال کاتد



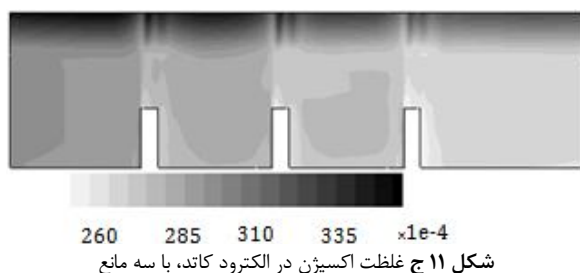
شکل ۱۰ تأثیر ۱۲ مانع در کانال (تعداد زیاد مانع) کاتد بر غلظت اکسیژن موجود در فصل مشترک لایه پخش گاز / لایه کاتالیست



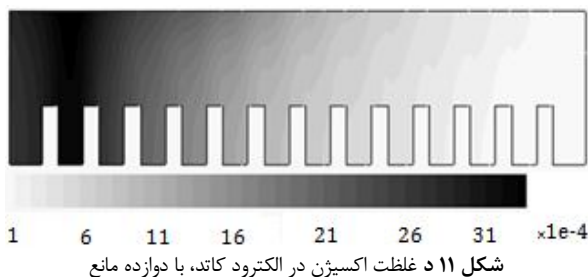
شکل ۱۱ الف غلظت اکسیژن در الکتروکاتد، با یک مانع



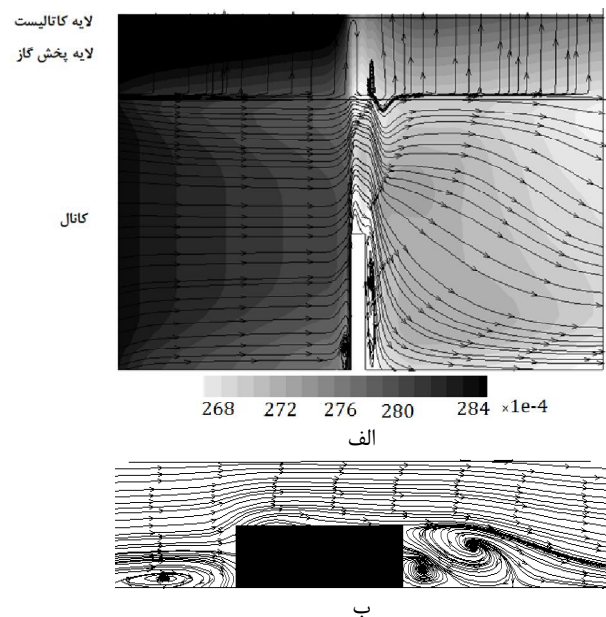
شکل ۱۱ ب غلظت اکسیژن در الکتروکاتد، با دو مانع مستطیلی



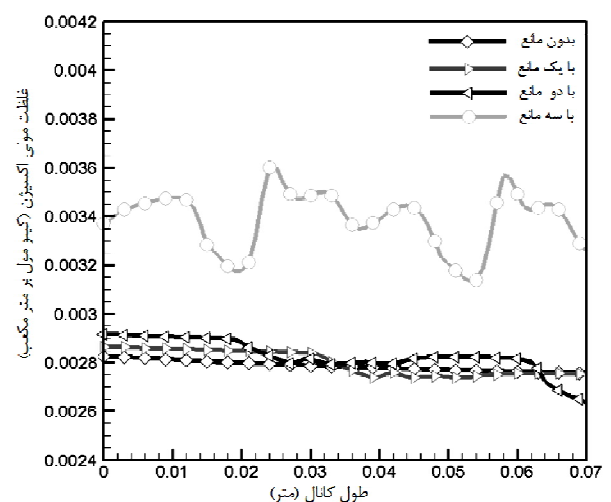
شکل ۱۱ ج غلظت اکسیژن در الکتروکاتد، با سه مانع



شکل ۱۱ د غلظت اکسیژن در الکتروکاتد، 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

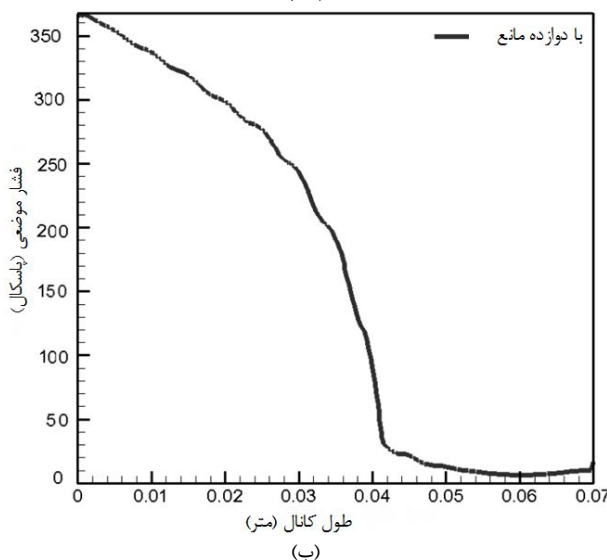
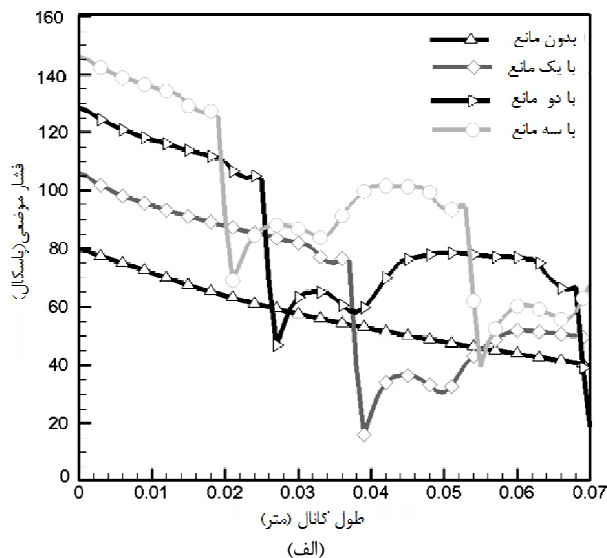


شکل ۹ تأثیر تعداد موانع در کانال کاتد بر غلظت اکسیژن موجود در فصل مشترک لایه پخش گاز / لایه کاتالیست

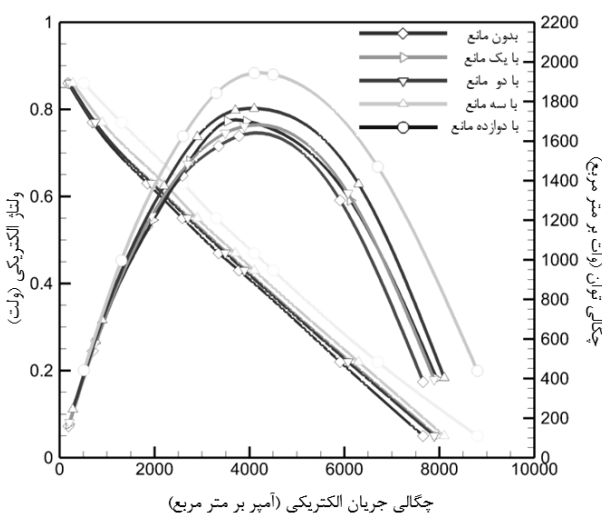
۳-۲- تأثیر تعداد موانع کانال کاتد

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 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 گردابه ها به دلیل ناحیه کم فشار در کانال است و با افزودن مانع در این نواحی این گردابه ها کوچک و در مواردی از بین می رود.



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 یکنواخت تر اکسیژن منجر به توزیع یکنواخت تر دانسیته جریان می شود.

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

افزایش تعداد موانع طرح کانال های موجی را طرح می کند که برای بالا بردن و یکنواخت کردن غلظت اکسیژن در لایه پخش گاز و در لایه کاتالیست در طراحی و ساخت پیل های سوختی مورد استفاده قرار می گیرد؛ اما افت فشار در کانال های موجی (تعداد موانع بالا و به طور منظم در کانال تعبیه شده اند) نسبت به کانال های 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 می یابد. 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 می شود دبی اکسیژن در انتهای کانال به شدت افت کند و تغییرات فشار در انتهای کانال بسیار اندک باشد. این موضوع در نسبت استوکیومتری پایین تر (جدول ۳) محسوس تر است.

در شکل ۱۳ تأثیر تعداد موانع بر منحنی عملکرد پیل سوختی مشاهده می شود. با افزایش تعداد موانع به ویژه در چگالی های جریان بالا، عملکرد پیل سوختی بهتر می شود. در چگالی جریان بالا، عمده افت های داخل پیل ناشی از افت های انتقال جرم بوده که مانع به انتقال بهتر اکسیژن کمک می کند. همچنین محدوده چگالی جریان یعنی بیشینه چگالی توان قابل دسترس برای مواردی با مانع بیشتر، افزایش می یابد که دلیل آن را باید در توزیع مناسب تر گاز واکنش گر کاند در سطح لایه کاتالیست و افزایش تعداد واکنش های موثر در سطح لایه کاتالیست جستجو کرد.

تأثیر تعداد موانع بر منحنی چگالی توان پیل سوختی مشاهده می شود. 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 پیش بینی 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 می توان به این مطلب اشاره کرد که با افزایش تعداد موانع در کانال از طرفی افت فشار بالا می رود و توان اتلافی در کانال زیاد می شود؛ اما از سوی دیگر سرعت نفوذ به لایه پخش گاز تقویت می شود. مطلب قابل توجه 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. Djalili, 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, *Modares 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 می یابد؛ که این مطلب سبب می شود 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 می یابد.
- افزایش تعداد موانع در کانال کاتد منجر به افزایش غلظت اکسیژن در لایه پخش گاز و لایه کاتالیست و توزیع یکنواخت تر گاز در این نواحی می شود. به عبارتی افزایش تعداد موانع موجب توزیع بسیار یکنواخت اکسیژن در لایه کاتالیست می شود؛ اگر چه افت فشار کانال با مانع زیاد نیز بالا است.
- تعداد زیاد موانع که ایده کانال های موجی را در پیل مطرح می کند، به دو دلیل توزیع یکنواخت تر اکسیژن و نفوذ بالاتر اکسیژن به لایه پخش گاز و لایه کاتالیست، سبب بهبود عملکرد پیل می شود.

۵- علائم و نشانه ها

علائم انگلیسی

R	ثابت عمومی گازها ($8.314 \text{ J kg}^{-1} \text{ mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$)
F	ثابت فارادی (C mol^{-1})
S	جمله چشمه در معادلات انتقال
I	چگالی جریان الکتریکی (A m^{-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 (kg m^{-3})
ζ	ضریب استوکیومتری
ε	ضریب تخلخل
μ	لزجت (Pa.s)

۶- تشکر و قدردانی

نویسندگان از کمک ها و حمایت های سازمان انرژی های نو ایران تشکر و قدردانی می کنند.