http://mechanics.journals.modares.ac.ir

مجله علمی پژوهشی

مهندسی مکانیک مدرس

دوره ۱۲ شماره ۵ دی ۱۳۹۱ ص ص ۴۳-۵۸

تاریخچه مقاله:
دریافت ۹۱/۱/۱۹
پذیرش ۹۱/۴/۸
ارائه در سایت ۹۱/۸/۳۰

بررسی انتقال اکسیژن و افت فشار در الکترود کاتد پیل سوختی غشا پلیمری با مسدود سازی کانال جریان

ابراهیم افشاری[۱*]، ناصر بهارلو هوره[۲]

۱- استادیار گروه مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه اصفهان، اصفهان
۲-دانشجوی کارشناسی ارشد گروه مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه اصفهان، اصفهان
* اصفهان، صندوق پستی ۸۱۷۴۶-۷۳۴۴۱، e.afshari@eng.ui.ac.ir

چکیده- در این مطالعه با قرار دادن یک یا چند مانع مسدود کننده در کانال کاتد پیل سوختی غشا پلیمری، تأثیر شکل صفحه مسدود کننده (مستطیلی، مثلثی، ذوزنقه‌ای و خمیده)، ضخامت و ارتفاع صفحه، تعداد صفحات و ضریب تخلخل لایه پخش گاز بر انتقال اکسیژن به داخل لایه پخش گاز و لایه کاتالیست و همچنین افت فشار سمت کاتد بررسی شده است. بدین منظور، معادلات پیوستگی، ممنتم و بقای اجزای شیمیایی در سمت کاتد پیل به صورت مدل تک ناحیه‌ای تدوین و به روش عددی حل شده‌اند. نتایج نشان می‌دهد که با قرار دادن یک مانع مستطیلی بزرگ، بیشترین افزایش سرعت در لایه پخش گاز (در زیر مانع حدود ۱۳ برابر سرعت در مقایسه با حالت بدون مانع) و در نتیجه بیشترین غلظت اکسیژن در فصل مشترک لایه پخش گاز/لایه کاتالیست با وجود بیشترین افت فشار (حدود ۱/۳ برابر افت فشار کانال بدون مانع)، اتفاق می‌افتد. با افزایش تخلخل لایه پخش گاز، افزایش تعداد صفحات تیغه‌ای و ضخامت آنها و کاهش فاصله بین مانع و لایه پخش گاز، غلظت اکسیژن در این لایه افزایش می‌یابد؛ هر چند که حساسیت تغییرات غلظت به این پارامترها متفاوت است. بیشترین حساسیت به تخلخل لایه پخش گاز، تعداد صفحات و کاهش فاصله بین مانع و لایه پخش گاز است و کمترین حساسیت به افزایش ضخامت صفحه مسدود کننده می‌باشد.

کلیدواژگان: پیل سوختی غشا پلیمری، مانع مسدود سازی، انتقال اکسیژن، افت فشار.

Analysis of oxygen transport and pressure drop in a PEM fuel cell cathode with partially blocked flow channel

E. Afshari[1*], N. Baharloo Hooreh[2]

1- Assist. Prof., Dept. of Mech. Eng., Faculty of Eng., Isfahan Univ., Isfahan, Iran
2- MSc Student, Dept. of Mech. Eng., Faculty of Eng., Isfahan Univ., Isfahan, Iran
* P.O. B. 81746-73441, Isfahan, Iran. e.afshari@eng.ui.ac.ir

Abstract- In this study, the geometrical changes at cathode electrode in proton exchange membrane (PEM) fuel cell has been considered by inserting baffle plates across the channel. The effects of the blockage with various gap ratios, shape, thickness and numbers of the baffle plates, and the porosity of the diffusion layer on the oxygen transport and the pressure drop across the channel length are explored. It is revealed that partially blocked oxygen channel with rectangular baffle has the most velocity and oxygen concentration in the gas diffusion layer/catalyst layer interface than that of the other shape of plates; however results in a penalty of high pressure-loss. Increasing the porosity of gas diffusion layer (GDL), baffle plate thickness and baffle number and/or reducing the gap size in order to enhance the reactant gas transport result in pressure loss. Here, among the parameters considered, the porosity of GDL, gap ratio and plate number have the most remarkable impact on the oxygen transport to GDL and variation in pressure drop.

Keywords: PEM Fuel Cell, Blocked Channel, Oxygen Transport, Pressure Drop.

۱- مقدمه

طراحی بهینه کانال جریان یک فاکتور مهم در عملکرد پیل سوختی غشا پلیمری است. از آنجا که دیواره کانال با لایه پخش گاز مشترک است، شکل و الگوی کانال جریان بر انتقال گازهای واکنشگر از لایه پخش گاز به سمت لایه کاتالیست، مدیریت آب و عملکرد پیل به شدت تأثیرگذار است [۱]. به دلیل کوچک‌تر بودن ضریب انتشار اکسیژن نسبت به هیدروژن، غلظت کمتر اکسیژن ورودی به دلیل مخلوط بودن با نیتروژن، بالاتر بودن پتانسیل فعال‌سازی نیم‌واکنش سمت کاتد در مقایسه با آند و همچنین امکان انسداد مجاری در سمت کاتد بر اثر آب مایع، طراحی کانال در سمت کاتد اهمیت بیشتری دارد. اگر مقدار اکسیژن و آب انتقال یافته از کانال به لایه کاتالیست کاهش یابد، نرخ واکنش‌های شیمیایی و به تبع آن چگالی جریان پیل کاهش یافته و سبب خشک شدن غشا می‌شود. این وضعیت نامطلوب، باعث افزایش مقاومت درونی پیل سوختی و در نتیجه سبب افت عملکرد آن می‌شود [۲]. برعکس، طراحی مناسب کانال‌های جریان به خصوص در سمت کاتد، در انتقال گازهای واکنشگر و مدیریت آب می‌تواند بسیار سودمند باشد و باید در طراحی و ساخت پیل به آن توجه ویژه شود. یافتن روش‌هایی برای افزایش نفوذ گازهای واکنشگر از داخل کانال-های جریان به داخل لایه پخش گاز همواره مورد توجه محققان بوده است. مسدودسازی بخشی از کانال‌های جریان به کمک مانع(ها) روشی مناسب برای افزایش پخش گاز از سمت کانال به لایه کاتالیست است.

در سال‌های اخیر در زمینه طراحی و انتخاب کانال‌های جریان پیل سوختی غشا پلیمری کوشش‌های زیادی شده است. آرایش کانال‌های جریان می‌تواند مارپیچی[1] یا مستقیم[2] باشد. کانال‌های مارپیچی شامل انواع کانال‌های مارپیچی ساده، موازی و حلزونی[3] است و کانال‌های مستقیم نیز شامل انواع کانال‌های مستقیم موازی و U شکل هستند. هو و همکارانش [۳] به مقایسه جریان در این دو هندسه پرداخته و نتیجه گرفته‌اند که مکانیسم انتقال جابجایی اجباری در طراحی میدان نوع اول و انتقال پخش در طراحی نوع دوم غالب است. آنها همچنین نشان داده‌اند که عملکرد و افت فشار دو طرح با یکدیگر بسیار متفاوت است. نگون و همکارانش [۱] یک مدل محاسباتی پیل سوختی غشا پلیمری با کانال‌های مارپیچی ارائه داده‌اند و پدیده‌های اصلی انتقال را در پیل بررسی کرده‌اند. محاسبات سه‌بعدی انتقال سوخت در پیلسوختی پلیمری با کانال‌های مارپیچی توسط دوتا و همکارانش [۴] انجام شده است. کی و همکارانش [۵] یک مدل محاسباتی عمومی برای انتقال جرم و ممنتم در شبکه کانال نوع مسطح در توده پیل سوختی ارائه کرده‌اند. در مطالعه عددی انجام شده توسط یان و همکارانش [۶] اثرات عرض کانال جریان و تخلخل لایه پخش گاز بر انتقال گازهای واکنشگر و عملکرد پیل سوختی غشا پلیمری بررسی شده است. گورا و همکارانش [۷] با ارائه یک مدل عددی، انتقال اجزا واکنشگر را در یک نیم پیل بررسی و اثرات تخلخل و انحنا لایه پخش گاز و لایه کاتالیست بر انتقال اجزا واکنشگر را مشخص کرده‌اند. کوا و همکارانش [۸] با استفاده از یک مدل عددی سه‌بعدی عملکرد پیل سوختی غشا پلیمری با کانال‌های موجی را مطالعه کرده‌اند و توزیع دما و منحنی عملکرد پیل را به دست آورده‌اند. آنها نشان داده‌اند که با کانال‌های موجی سرعت جریان گاز در محیط متخلخل افزایش می‌یابد. لیو و همکارانش [۹] با مدل‌سازی دوبعدی پیل، تأثیر قرار گرفتن صفحه تیغه‌ای در مسیر گاز بر چگالی جریان تولیدی در ولتاژهای پایین و بالا را بررسی کرده‌اند. آنها نشان داده‌اند که با افزایش تعداد مانع، چگالی جریان به صورت یکنواخت‌تری افزایش می‌یابد. همچنین در ولتاژهای پایین، تشکیل آب مایع بر عملکرد پیل تأثیرگذار است. پرنگ وهمکارانش [۱۰] کانال گاز کاتد را با مانع مستطیلی برای نسبت‌های مختلف فاصله مانع و لایه پخش گاز و نسبت‌های مختلف عرض به ارتفاع کانال، مدل‌سازی کرده‌اند. آنها نشان داده‌اند که بهترین عملکرد پیل در نسبت عرض به ارتفاع مانع ۱/۶۶ اتفاق می‌افتد. سونگ و همکارانش [۱۱] به بررسی تأثیرات مسدود شدن کانال کاتد پیل سوختی غشا پلیمری صرفاً با در نظر گرفتن یک و چند صفحه مستطیلی پرداخته‌اند. در این مطالعات به بررسی تأثیر شکل، اندازه و تعداد صفحات مسدود سازی بر انتقال اکسیژن به داخل لایه پخش گاز و همچنین انتقال آنها به ناحیه فعال کاتالیست کمتر پرداخته شده است. همچنین در مطالعات پیشین به تأثیر شکل، اندازه و تعداد صفحات مسدودسازی بر افت فشار پیل نیز کمتر پرداخته شده است. بررسی همزمان انتقال اکسیژن و افت فشار داخل پیل به طراحی پیل از نظر

1. Serpentine Gas Channel
2. Parallel Gas Channel
3. Spiral

بهبود شرایط عملکرد و کاهش توان مصرفی برای راه‌اندازی پمپ کمک می‌کند.

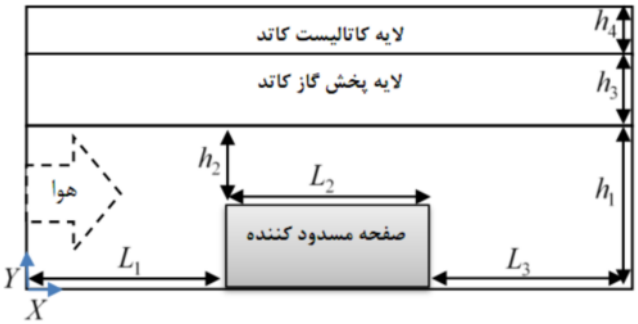
در این مقاله، ابتدا آرایشی مناسب برای کانال کاتد پیل سوختی غشا پلیمری که بخشی از آن با یک یا چند صفحه مسدود شده است، ارائه شده و سپس با مدل‌سازی عددی، تأثیر شکل صفحه مسدود کننده (شامل: اشکال مستطیلی، مثلثی، ذوزنقه‌ای و خمیده)، بر انتقال اکسیژن درلایه پخش گاز و همچنین افت فشار در طول کانال کاتد مطالعه شده است. برای هر شکل صفحه مسدود کننده، تأثیر تعداد صفحات، ضخامت صفحات، فاصله بین مانع مسدود کننده و لایه پخش گاز (ارتفاع مانع) و اندازه تخلخل لایه پخش گاز بر پارامترهای فوق بررسی شده است. این مدل به صورت تک ناحیه‌ای بوده و نیازی به مشخص کردن شرایط مرزی در فصل مشترک نواحی مختلف پیل (مانند فصل مشترک لایه پخش گاز/کانال جریان و یا فصل مشترک لایه پخش گاز/لایه کاتالیست) نمی‌باشد.

۲- مدل فیزیکی و عددی

ساختمان و دامنه مدل محاسباتی پیل سوختی غشا پلیمری در شکل ۱ نشان داده شده است. کاتد پیل سوختی به صورت دوبعدی، با سه ناحیه کانال گاز، لایه پخش گاز و لایه کاتالیست، همراه با صفحه یا صفحات مسدود کننده مدل‌سازی شده است. طول کانال $L = L_1 + L_2 + L_3$ است که L_2 ضخامت صفحه تیغه‌ای و L_1 و L_3 طول‌های بالادست و پایین‌دست کانال است. پارامترهای h_1، h_2، $h_1 - h_2$ و h_3 عرض کانال، اندازه فاصله بین صفحه مسدود کننده و لایه پخش گاز، ارتفاع صفحه مسدود کننده و عرض لایه پخش گاز است. برای مشخص کردن تأثیر مسدود سازی کانال، یک پارامتر بدون بعد که نسبت فاصله نامیده می‌شود، $Gap\ Ratio = h_2 / h_1$، تعریف شده است. مقادیر $Gap\ Ratio = 0$ و $Gap\ Ratio = 1$ نشان دهنده کانال کاملاً بسته شده و کاملاً باز است و مقادیر $0 < Gap\ Ratio < 1$ نسبت مسدود بودن است.

۲-۱- فرضیات

به منظور ساده کردن حل معادلات حاکم، یک مدل دو بعدی برای تحلیل کانال، لایه پخش گاز و لایه کاتالیست در نظر گرفته شده است و با دیگر فرضیات مناسب زیر، مسئله ساده‌سازی شده است.



شکل ۱ ساختمان و دامنه مدل محاسباتی پیل غشا پلیمری

- مخلوط گازهای واکنشگر گاز کامل هستند.
- جریان داخل کانال دائم، آرام و تراکم‌ناپذیر است.
- لایه پخش گاز و لایه کاتالیست یکنواخت و همگن است.
- از تأثیر گرانش صرف‌نظر می‌شود.
- از مقاومت تماسی بین لایه‌ها صرف‌نظر می‌شود.
- دمای پیل ثابت است.
- دمای کارکرد پیل سوختی ۸۰ درجه سلسیوس در نظر گرفته شده است.
- مدل انتقال آب به صورت تک فاز می‌باشد.

معادلات حاکم بر مدل شامل معادلات بقای جرم، ممنتم و اجزای شیمیایی می‌باشد که با فرضیات بالا و در نظر گرفتن یک مدل تک ناحیه‌ای[1] حل شده‌اند. برای مدل‌سازی عددی پیل 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، مجموعه‌ای از معادلات بقا، شامل معادلات پیوستگی، ممنتم و بقای اجزا حل می‌شود. برای حل این معادلات و ارتباط آنها با یکدیگر، به شرایط مرزی بین نواحی مختلف پیل سوختی نیاز می‌باشد. اما بسیاری از این شرایط مرزی به طور واضح مشخص نیستند و بنابراین جواب‌های به‌دست آمده از حل معادلات نیز دقیق نمی‌باشد. 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. در این روش نیازی به مشخص کردن شرایط مرزی در فصل مشترک بین نواحی نمی‌باشد و شرایط مرزی فقط در سطح بیرونی پیل مورد نیاز است. با به کار بردن

1. Single-Domain

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 تمام معادلات را به طور یکسان در تمام نواحی به‌کار برد. عدم اعمال شرایط مرزی در فصل مشترک نواحی به دقت حل مسئله می‌افزاید و حل معادلات را آسان‌تر می‌نماید؛ اما زمان محاسبات کامپیوتری طولانی‌تر می‌شود [۱۲].

۲-۲ معادلات حاکم

معادله پیوستگی:

$$\nabla.(\varepsilon\rho\vec{u}) = 0 \qquad (۱)$$

در معادله بالا، u بردار سرعت،ρ چگالی مخلوط گاز و ε ضریب تخلخل می‌باشد. ضریب تخلخل در کانال‌های جریان برابر ۱ است.

معادله بقا ممنتم:

$$\frac{1}{\varepsilon^2}\nabla.(\rho\vec{u}\vec{u}) = -\nabla p + \nabla.(\mu\nabla\vec{u}) + S_u \qquad (۲)$$

در معادله بالا، p و μ به ترتیب فشار ولزجت مخلوط گاز می‌باشد. در نواحی متخلخل برای برقراری پیوستگی شار جرم در فصل مشترک بین نواحی متخلخل و نواحی بدون تخلخل از سرعت‌های ظاهری استفاده می‌شود و خواص انتقالی اصلی در نواحی متخلخل با خواص انتقالی موثر اصلاح می‌شود. از این‌رو در معادلات ممنتم در نواحی متخلخل جمله چشمه قرار می‌گیرد تا قانون دارسی[1] را در جایی که سرعت بسیار کم است، اعمال کند. جمله چشمه در کانال‌ها صفر است.

$$S_u = -\frac{\mu}{K}\vec{u} \qquad (۳)$$

در این رابطه، K نفوذپذیری[2] محیط متخلخل می‌باشد. نفوذپذیری محیط متخلخل نشان دهنده توانایی این محیط برای هدایت جریان مایع از میان تخلخل‌ها می‌باشد.

معادله بقا اجزا:

$$\nabla.(\vec{u}C^i) = \nabla.(D^{i,eff}\nabla C^i) + S_k = 0 \qquad (۴)$$

در این معادله C^i غلظت جزء i و $D^{i,eff}$ ضریب پخش مؤثر جزء i در مخلوط گاز می‌باشد.

ضریب پخش جرم جزء iام در کانال تابعی از دما و فشار است. در نواحی متخلخل، ضریب پخش با استفاده از ضریب تخلخل اصلاح می‌شود [۱۳]. ضریب پخش در کانال‌های جریان و در نواحی متخلخل به ترتیب از معادلات (۵) و (۶) به دست می‌آیند.

$$D_i = D_0\left(\frac{T}{T_0}\right)^{3/2}\left(\frac{p_0}{p}\right) \qquad (۵)$$

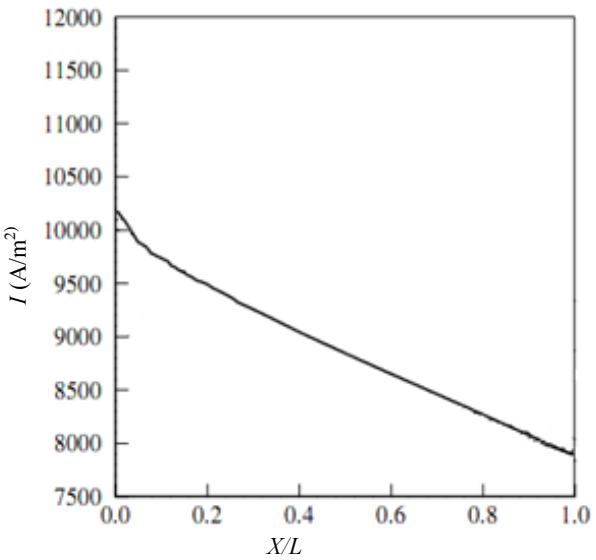
$$D_g^{i,eff} = \varepsilon^{eff} D_g^i \qquad (۶)$$

جمله چشمه در معادلات بقا اجزا، ناشی از واکنش الکتروشیمیایی در لایه کاتالیست کاتد است. این جمله برای اکسیژن و آب به ترتیب از معادلات (۷) و (۸) به دست می‌آید.

$$S_k = -\frac{I}{4F} \qquad (۷)$$

$$S_k = \frac{I}{2F} \qquad (۸)$$

در معادلات بالا، I چگالی جریان و F ثابت فارادی است. جمله چشمه نشان دهنده شار مولی تولیدی آب و شار مولی مصرفی اکسیژن است. جمله چشمه فقط در لایه کاتالیست اعمال می‌شود. چگالی جریان پیل بر اساس آزمایش یا تحلیل کامل پیل به دست می‌آید که در این مدل مطابق شکل ۲، از نمودار چگالی جریان بر حسب فاصله از ورودی کاتد (I - X) پیل سوختی آزمایش شده به وسیله وانگ [۱۴]، برای استخراج چگالی جریان استفاده شده است.



شکل ۲ منحنی چگالی جریان بر حسب فاصله از ورودی کانال کاتد پیل سوختی بر اساس نتایج وانگ [۱۴]

1. Darcy Law
2. Permeability

۲-۳- شرایط مرزی

روابط (۱)، (۲) و (۴)، یک دستگاه معادلات حاکم را برای حل ۴ مجهول u، v، p و C^i تشکیل می‌دهند (C^i غلظت اکسیژن، آب و نیتروژن می‌باشد). برای حل این معادلات نیاز به مشخص کردن شرایط مرزی مناسب می‌باشد.

سرعت ورودی کاتد با استفاده از نسبت استوکیومتریک تعیین می‌شود. نسبت استوکیومتریک به صورت نسبت مقدار واکنشگرهای تامین شده برای پیل به واکنشگرهای مورد نیاز برای واکنش الکتروشیمیایی که چگالی جریان مبنا را تولید کند، تعریف می‌شود. در اینجا سرعت ورودی یک متر بر ثانیه در نظر گرفته شده است. فشار جزئی بخار آب در ورودی برابر با فشار اشباع در دمای مرطوب‌سازی واکنشگرها می‌باشد.

جریان در مرزهای خروجی به صورت توسعه یافته یا شار صفر با فشار برگشتی در نظر گرفته شده است.

$$\frac{\partial \vec{u}}{\partial n}=0; \qquad \frac{\partial C^i}{\partial n}=0 \tag{۹}$$

روی دیوارها و دیواره‌های موانع، شرط عدم لغزش برای سرعت و شار صفر برای دیگر متغیرها به‌کار می‌رود.

$$\vec{u}=0; \qquad \frac{\partial P}{\partial n}=0; \qquad \frac{\partial C^i}{\partial n}=0 \tag{۱۰}$$

۲-۴- روش حل عددی

معادلات حاکم بر نواحی کاتد همراه با شرایط مرزی فوق با روش حجم محدود گسسته شده و به روش عددی حل شده‌اند. در این مدل، میدان‌های سرعت و فشار با استفاده از الگوریتم سیمپل به دست آمده‌اند. برای حل معادلات از یک روند تکراری استفاده شده است و حل تا رسیدن به همگرایی با دقت $۱۰^{-۶}$ ادامه پیدا کرده است. علت انتخاب روند تکرار برای حل معادلات، کوپل بودن آنها می‌باشد. برای شبکه‌بندی مدل، از یک شبکه مستطیلی با ۲۰۰ گره در راستای x و تعداد ۵۰، ۴۰ و۱۰ گره در هر کدام از نواحی کانال، لایه پخش گاز، لایه کاتالیست استفاده شده است. تعداد گره‌ها طوری تنظیم شده است که نتایج مدل عددی مستقل از تعداد شبکه باشد. شبکه مذکور در راستای طولی یکنواخت ولی در راستای ضخامت به دلیل ضخامت بسیار کم کاتالیست و لایه پخش گاز، غیر یکنواخت است [۱۵].

۳- نتایج و بحث

۳-۱- صحه‌گذاری نتایج

پارامترهای هندسی و فیزیکی پیل سوختی مدل شده در جدول ۱ ارائه شده است [۱۶]. برای اطمینان از صحت مدل‌سازی، در شکل ۳، منحنی توزیع سرعت در مقطعی از کانال و در زیر مانع مسدود سازی با نتایج تحلیلی مقایسه شده است که تطابق بسیار خوبی دارند. برای به دست آوردن توزیع تحلیلی سرعت، فاصله بین مانع مسدود سازی و لایه پخش گاز به صورت دو صفحه تخت موازی در نظر گرفته شده است و توزیع سرعت در لایه پخش گاز و لایه کاتالیست توسط رابطه ساده دارسی در محیط متخلخل به دست آمده است. همچنین به منظور صحه‌گذاری میدان فشار، افت فشار به دست آمده از نتایج عددی با افت فشار تحلیلی برای جریان آرام داخل کانال مربعی (رینولدز حدود ۲۷) مقایسه می‌شود.

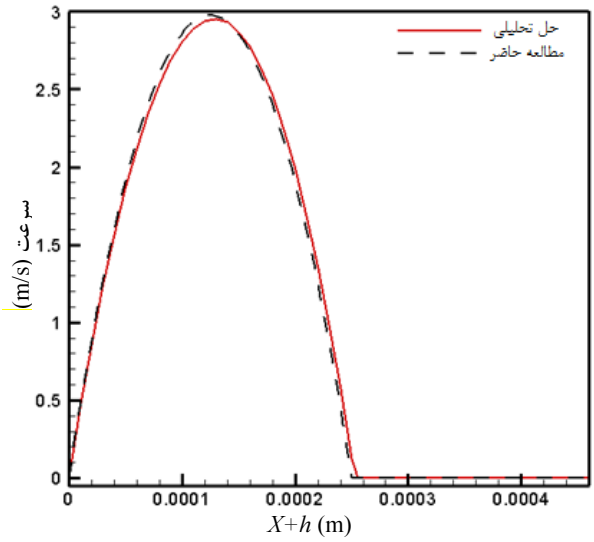
$$\Delta P = f\,\frac{l}{D_H}\frac{V^2}{2} \tag{۱۱}$$

$$\mathrm{Re}.f = 56 \tag{۱۲}$$

در رابطه‌های بالا، f ضریب اصطکاک، l طول کانال و D_H قطر هیدرولیکی و V سرعت متوسط در کانال می‌باشد.

جدول ۱ پارامترها و خواص مواد پیل سوختی [۱۶]

پارامتر	واحد	مقدار
ضخامت کانال	میلی‌متر	۱
ضخامت لایه پخش گاز	میلی‌متر	۰/۳
ضخامت لایه کاتالیست	میکرو متر	۱۰
طول پیل	میلی‌متر	۷۰
طول مانع	میلی‌متر	۱
ارتفاع مانع	میلی‌متر	۰/۵
دمای عملکرد پیل	کلوین	۳۵۳/۱۵
فشار کاتد	اتمسفر	۱/۰
استوکیومتری کاتد		۱/۱
لزجت گاز کاتد	پاسکال.ثانیه	$۱/۸۸\times۱۰^{-۵}$
ضریب پخش اکسیژن در هوا	متر مربع بر ثانیه	$۱/۸۱\times۱۰^{-۵}$
ضریب پخش آب در هوا	متر مربع بر ثانیه	$۲/۲۳\times۱۰^{-۵}$
تخلخل لایه کاتالیست		۰/۴
نفوذپذیری لایه پخش گاز	متر مربع	$۱۰^{-۱۲}$



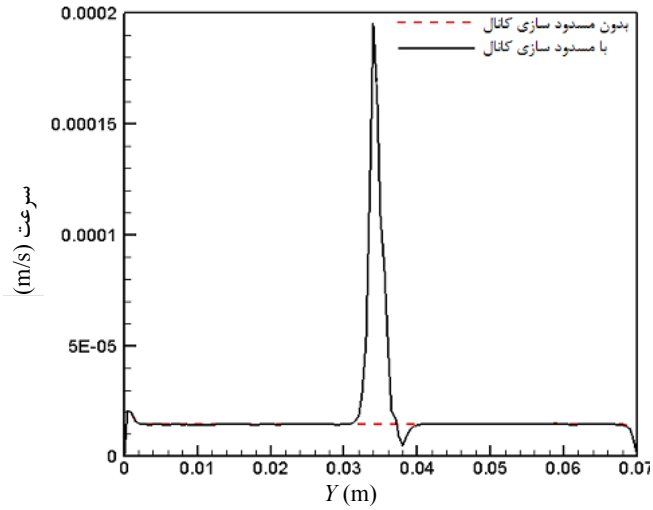
شکل ۳ توزیع سرعت در مقطعی از کانال درزیر مانع

افت فشار به دست آمده از نتایج (۲۲/۶ پاسکال)، با افت فشار محاسبه شده بر اساس رابطه تحلیلی برای حالت بدون مانع (۲۰ پاسکال)، تطابق دارد. علت اختلاف ناشی از دو بعدی بودن مدل، استفاده از سرعت ورودی به عنوان سرعت متوسط در دو رابطه اخیر و فرضیات ساده کننده‌ای است که بر روابط تحلیلی قرار داده شده است.

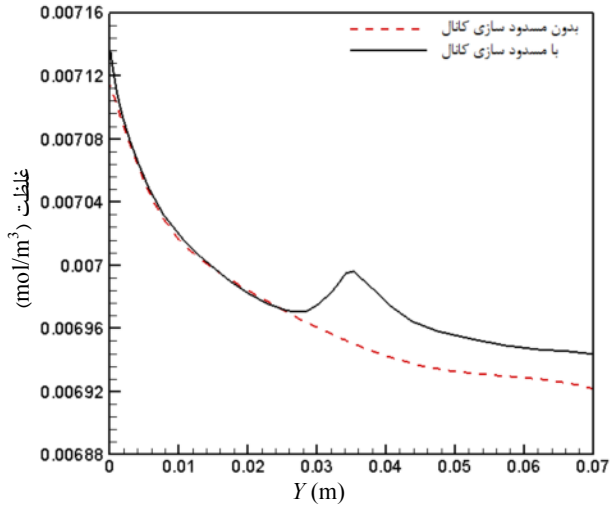
۳-۲- تأثیر قرار دادن صفحه مسدود کننده

با قرار دادن مانع مسدود سازی، سرعت جریان در فاصله بین مانع و لایه پخش گاز افزایش می‌یابد که این امر سبب می‌شود گاز بیشتری به لایه پخش گاز نفوذ کند و غلظت اکسیژن و به تبع آن نرخ واکنش در کاتالیست افزایش یابد. البته باید افزایش افت فشار را نیز در نظر گرفت. بدیهی است که وقتی مانعی در کانال وجود ندارد، 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 ۴، ۵ و ۶ به ترتیب سرعت جریان در طول کانال در فصل مشترک لایه پخش گاز/لایه کاتالیست، غلظت اکسیژن در این مرز و افت فشار در طول کانال، در حالتی که مانع وجود ندارد و حالتی که یک مانع مستطیلی در کانال قرار دارد مقایسه شده‌اند. مانع مستطیلی با ضخامت $L_2 = 2\text{mm}$ و ارتفاع $h_1 - h_2 = 0.5$، در وسط کانال $(L_1 = L_3 = 34\text{mm})$ قرار دارد.



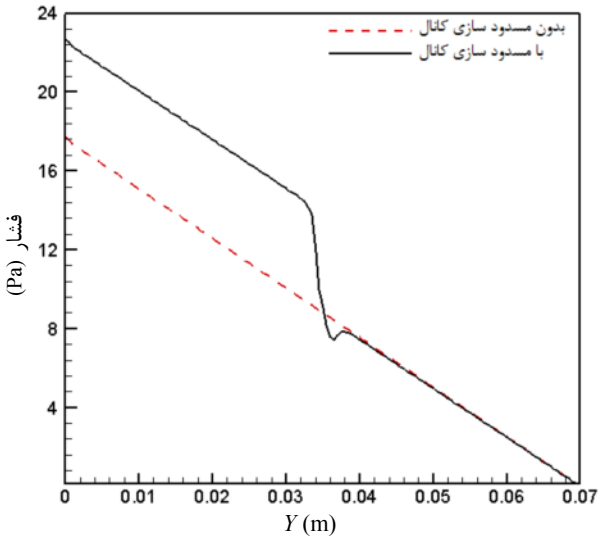
شکل ۴ تغییرات سرعت در فصل مشترک لایه پخش گاز/لایه کاتالیست، با و بدون مسدودسازی در وسط کانال



شکل ۵ تغییرات غلظت اکسیژن در فصل مشترک لایه پخش گاز/لایه کاتالیست، با و بدون مسدود سازی در وسط کانال

ملاحظه می‌شود زمانی که مانع مسدود سازی استفاده می‌شود، سرعت گاز در ناحیه زیر مانع به شدت افزایش می‌یابد و با افزایش قابل توجهی در سرعت گازهای واکنشگر به سمت لایه پخش گاز و به تبع آن افزایش غلظت اکسیژن روبرو هستیم.

به دلیل این که اکسیژن در لایه کاتالیست مصرف می‌شود، در جهت طول کانال غلظت اکسیژن کاهش می‌یابد. کاهش اکسیژن باعث می‌شود نرخ واکنش کاتدی کاهش یابد و در نتیجه جریان تولیدی کاهش یابد. مسدود سازی باعث شده است که از نقطه Y=0.034mm تا انتهای کانال، غلظت اکسیژن نسبت به کانال بدون مسدود سازی افزایش یابد.

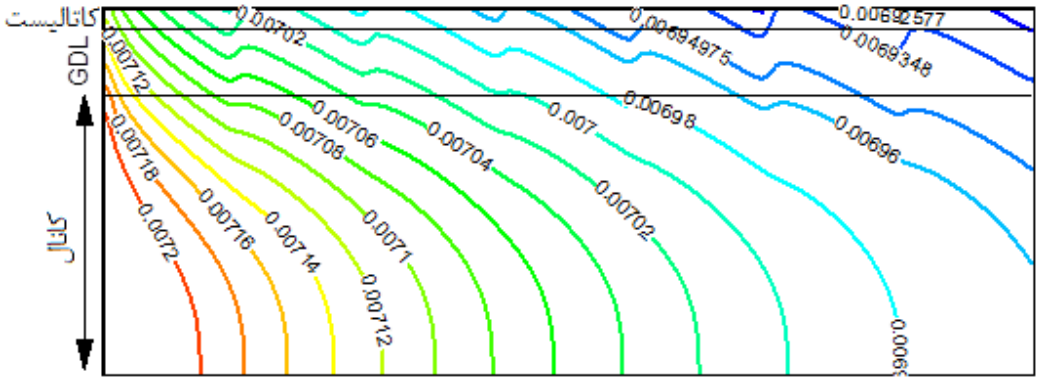


شکل ۶ تغییرات فشار در طول کانال،با و بدون مسدود سازی در وسط کانال

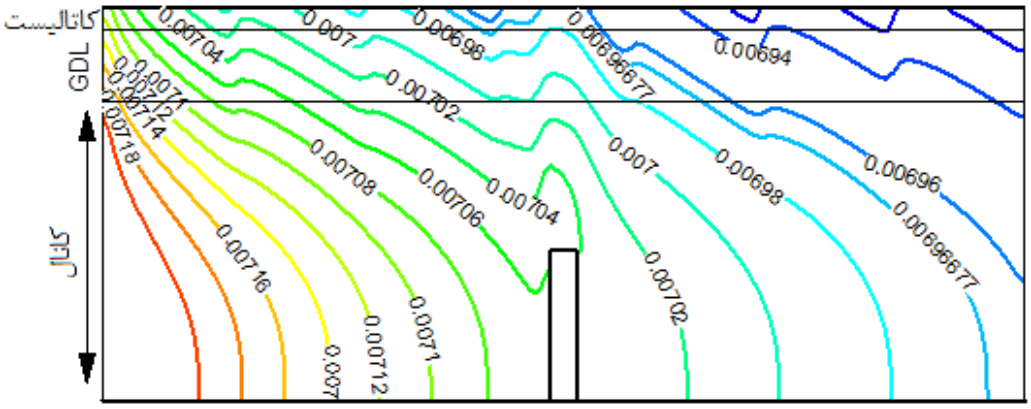
افزایش غلظت اکسیژن در ناحیه زیر مانع چشمگیر است و روند کاهش غلظت اکسیژن بـه دلیـل مصـرف آن تـا انتهـای کانـال ادامه می‌یابد.

همچنین به دلیل تغییر الگوی جریان، افت فشار در پیل با مسدود کردن بخشی از کانال، افزایش می‌یابد. افت فشار از ۱۷/۶ به ۲۲/۶ پاسکال می‌رسد. هر چند که افزایش افت فشار ناچیز است ولی وقتی تعداد سل‌هایی که باید به صورت سری به هم متصل شوند زیاد باشد، افت فشار با اهمیت می‌شود.

در شکل ۷ کانتورهای غلظت اکسیژن در کانال جریان، لایه پخش گاز و لایه کاتالیست کاتد در حالتی که مانع وجود ندارد و حالتی که یک مانع مستطیلی در کانال قرار دارد،نشان داده شده است. غلظت اکسیژن در لایه‌های پخش گاز و کاتالیست در ناحیه زیر مانع به طور محسوس افزایش یافته است.



شکل ۷ الف- غلظت اکسیژن در الکترود کاتد، بدون مسدود سازی کانال



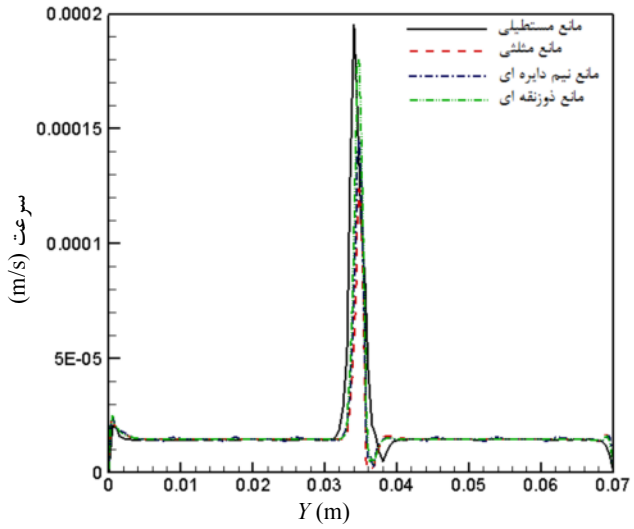
شکل ۷ ب- غلظتاکسیژن در الکترود کاتد، مسدود سازی با مانع مستطیلی

۳-۳- تأثیر شکل صفحه مسدود کننده

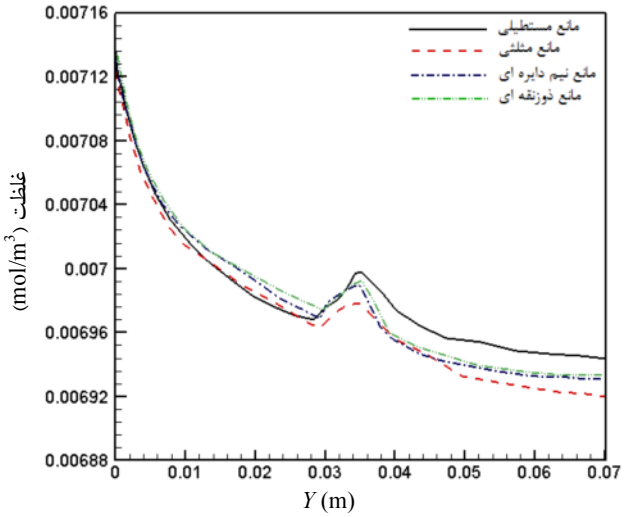
شکل صفحهٔ مسدود کننده بر سرعت و انتقال اکسیژن به لایه پخش گاز و در نتیجه غلظت اکسیژن در لایه کاتالیست به خصوص در ناحیه زیر صفحه مسدود کننده تأثیرگذار است. هر چه اندازه سطح بین صفحه مسدود کننده و لایه پخش گاز بیشتر باشد، میزان نفوذ گاز از کانال به لایه پخش گاز بالاتر است. طبیعی است که الگوی جریان و در نتیجه افت فشار داخل کانال به شدت وابسته به شکل صفحه مسدود کننده است. به منظور بررسی اثرات نوع شکل صفحه مسدود کننده، چهار شکل مستطیلی، مثلثی، ذوزنقه‌ای و خمیده در نظر گرفته شده است. برای همه موارد، محل قرارگیری مانع در وسط کانال، ضخامت پایه مانع ۲ میلی‌متر و ارتفاع مانع به اندازه نصف ارتفاع کانال (۰/۵ میلی‌متر) است. قاعده کوچک ذوزنقه ۱ میلی‌متر و مثلث متساوی الساقین است.

شکل‌های ۸ تا ۱۰ به ترتیب، توزیع سرعت، تغییرات غلظت اکسیژن در فصل مشترک لایه پخش گاز/لایه کاتالیست و افت فشار در طول کانال کاتد را نشان می‌دهند. با قرار دادن مانع مسدود سازی، بخشی از سیال اجازه می‌یابد تا از طریق فاصله بین مانع و لایه پخش گاز به پایین‌دست کانال حرکت کند و باقیمانده جریان مجبور می‌شود وارد لایه پخش گاز شود. سرعت در فاصله بین صفحه مسدود کننده و لایه پخش گاز، از $۱/۵\times۱۰^{-۵}$ تا حدود ۲×۱۰^{-۴} متر بر ثانیه افزایش می‌یابد (۱۳ برابر). لازم به ذکر است که این تغییرات سرعت (شار جرمی)، در نواحی بالادست و پایین‌دست صفحه مسدود کننده، متعادل می‌شود. سرعت بالاتر گاز باعث می‌شود اکسیژن بیشتری به لایه پخش گاز انتقال یابد. سرعت در ناحیه زیر مانع، با مانع مستطیلی بیشترین مقدار و با مانع مثلثی کمترین مقدار را دارد. عملکرد مانع ذوزنقه‌ای و نیم‌دایره‌ای تقریباً مشابه است.

به تبع افزایش سرعت گاز در زیر مانع، مطابق شکل ۹، نرخ انتقال اکسیژن به لایه پخش گاز و لایه کاتالیست بهبود می‌یابد و نرخ واکنش در لایه کاتالیست بالا می‌رود. به دلیل اینکه با مانع مستطیلی، بیشترین سطح مسدود سازی به وجود می‌آید، بالاترین افزایش غلظت اکسیژن را با این نوع مانع داریم. همچنین افزایش غلظت اکسیژن در پایین‌دست این نوع کانال نسبت به کانال‌های مسدود شده با بقیه موانع، زیادتر می‌باشد.

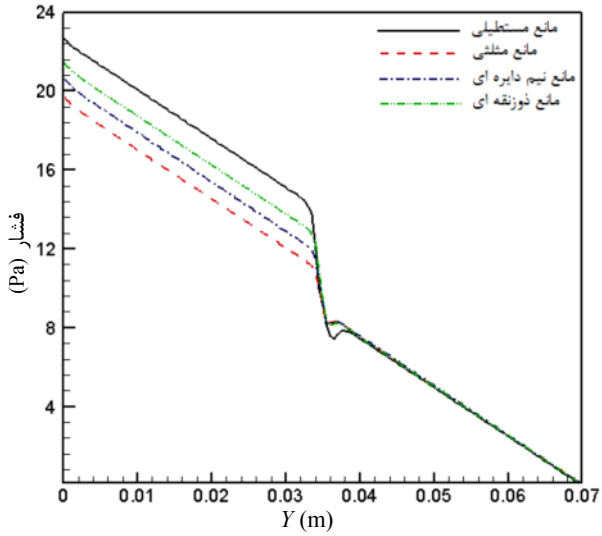


شکل ۸ تأثیر شکل مانع مسدود سازی بر سرعت در فصل مشترک لایه پخش گاز/لایه کاتالیست



شکل ۹ تأثیر شکل مانع مسدود سازی بر غلظت اکسیژن در فصل مشترک لایه پخش گاز/لایه کاتالیست

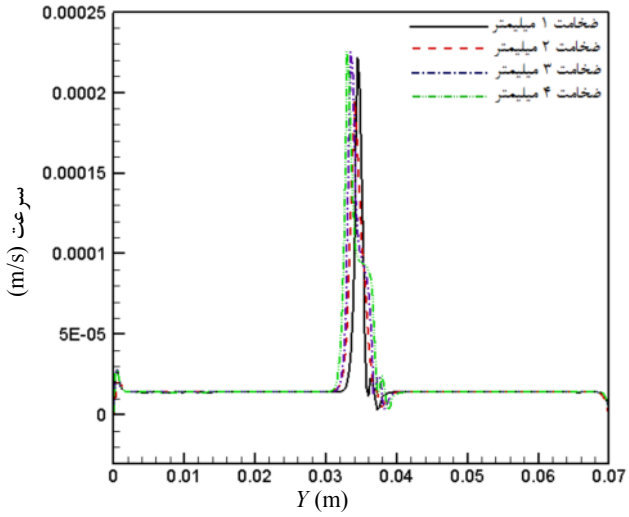
مسدود سازی کانال سبب افت فشار بیشتر می‌شود و نیاز به توان بالاتر برای پمپ کردن گازهای واکنشگر دارد. شکل ۱۰ تأثیر نوع شکل مانع بر روی افت فشار در طول کانال سوخت را نشان می‌دهد. بیشترین افت فشار (۲۲/۵ پاسکال) با مانع مستطیلی و کمترین افت فشار (۱۹/۷ پاسکال) با مانع مثلثی به وجود می‌آید. هر چند که افت فشار در طول کانال با مانع مستطیلی بالاتر از بقیه کانال‌ها است ولی افزایش دبی جرمی (یا سرعت) و غلظت اکسیژن در فصل مشترک لایه پخش گاز /لایه کاتالیست در این نوع کانال آنقدر بالاتر است که استفاده از کانال با مانع مسدود سازی مستطیلی را مناسب می‌سازد.



شکل ۱۰ تأثیر شکل مانع مسدود سازی بر افت فشار در طول کانال کاتد

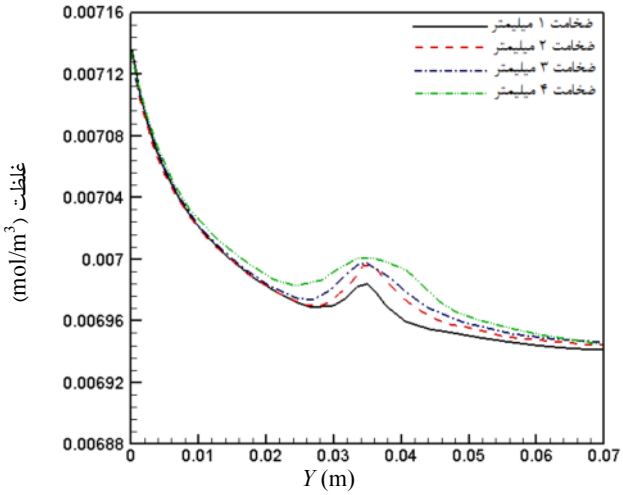
۳-۴- تأثیر ضخامت صفحه مسدود کننده

با افزایش ضخامت مانع، سطح مسدود شده افزایش می‌یابد و سبب می‌شود اکسیژن بیشتری به لایه پخش گاز نفوذ کند. شکل ۱۱ منحنی سرعت در فصل مشترک لایه پخش گاز/کاتالیست را برای وضعیت‌های مسدود سازی با ضخامت‌های مانع ۱، ۲، ۳ و ۴ میلی‌متر نشان می‌دهد. در تمام وضعیت‌ها، مانع مستطیلی در وسط کانال و با فاصله یکسان از بالادست و پایین‌دست کانال قرار دارد. ارتفاع مانع ۱ میلی‌متر است.

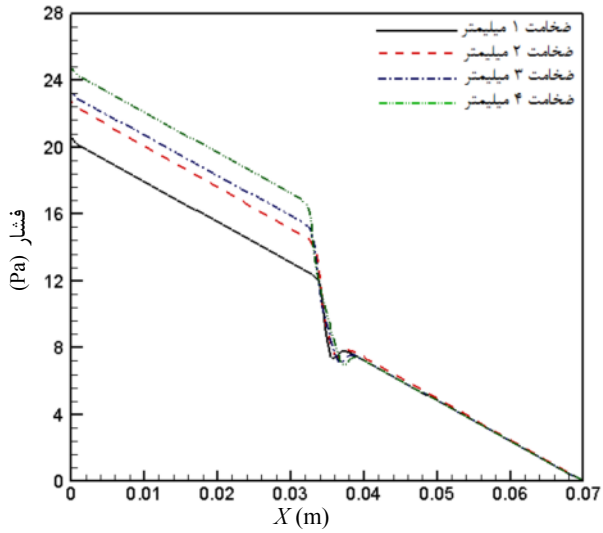


شکل ۱۱ تأثیر ضخامت مانع مسدود سازی بر سرعت در فصل مشترک لایه پخش گاز/لایه کاتالیست

ماکزیمم سرعت برای هر چهار وضعیت تقریباً برابر است؛ اما به دلیل اینکه سطح زیر مانع مسدود سازی و لایه پخش گاز با افزایش ضخامت مانع افزایش می‌یابد، سطحی که در آن افزایش سرعت به وجود می‌آید با افزایش ضخامت مانع، افزایش می‌یابد. شکل ۱۲ نشان می‌دهد که تغییرات غلظت نیز با تغییر ضخامت مانع، افزایش چشمگیری نداشته است. همچنین باید توجه داشت که با افزایش ضخامت مانع، افت فشار زیاد می‌شود (شکل ۱۳). از نظر افزایش نفوذ اکسیژن به لایه پخش گاز و لایه کاتالیست حساسیت پیل به تغییر ضخامت مانع مسدود سازی کم است.



شکل ۱۲ تأثیر ضخامت مانع مسدود سازی بر غلظت اکسیژن در فصل مشترک لایه پخش گاز/لایه کاتالیست

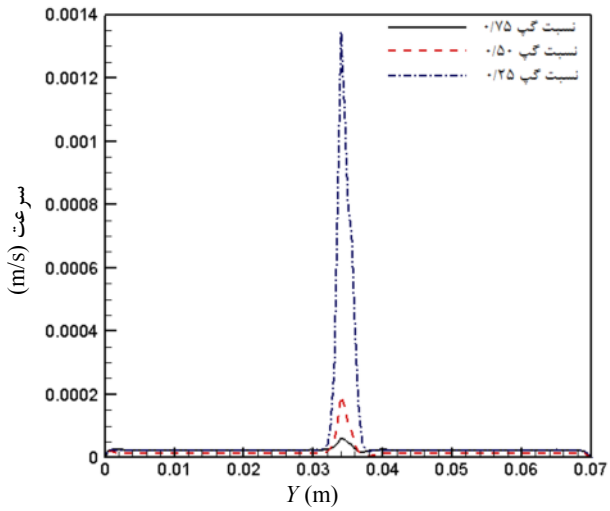


شکل ۱۳ تأثیر ضخامت مانع مسدود سازی بر افت فشار در طول کانال کاتد

۳-۵- تأثیر اندازه فاصله بین مانع و لایه پخش گاز

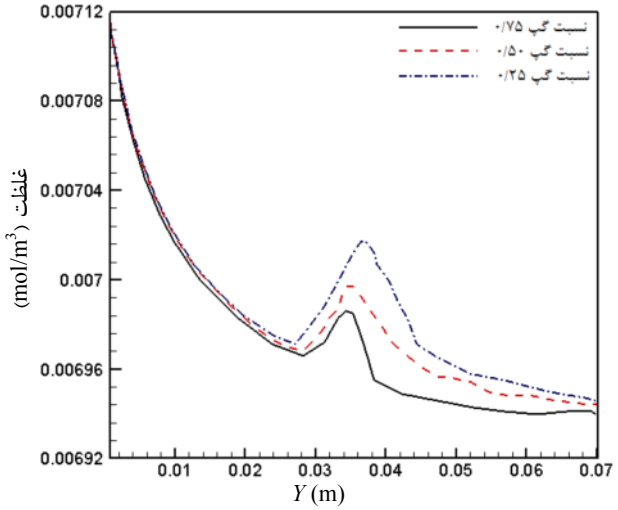
می‌توان انتظار داشت که تغییر سطح جریان کانال کاتد، تأثیر قابل توجهی روی انتقال جرم در کانال جریان و لایه پخش گاز داشته باشد. برای بررسی تأثیر ارتفاع مانع مسدود سازی یا اندازه فاصله بین صفحه مسدود کننده و لایه پخش گاز، از عدد بدون بعد نسبت فاصله استفاده می‌شود. نسبت‌های فاصله ۰/۲۵، ۰/۵ و ۰/۷۵ انتخاب شده و تغییرات سرعت و غلظت اکسیژن در فصل مشترک لایه پخش گاز/لایه کاتالیست و افت فشار در طول کانال کاتد رسم شده است. شکل۱۴، تأثیر نسبت فاصله بر توزیع سرعت در فصل مشترک لایه پخش گاز/لایه کاتالیست را نشان می‌دهد. زمانی که قسمتی از کانال جریان بسته باشد $(0 < Gap\ Ratio < 1)$، بخشی از سیال اجازه می‌یابد تا از طریق فاصله بین صفحه مسدود کننده و لایه پخش گازبه پایین‌دست کانال حرکت کند و باقیمانده جریان مجبور می‌شود وارد لایه پخش گاز شود.

با کاهش نسبت فاصله یا افزایش ارتفاع مانع، سرعت جریان از میان فاصله بین صفحه مسدود کننده و لایه پخش گاز افزایش می‌یابد و شار جرمی (یا سرعت) ورودی به لایه پخش گاز افزایش می‌یابد. افزایش سرعت ناشی از تغییر نسبت فاصله از ۰/۵ به ۰/۲۵ بسیار چشمگیر بوده و سرعت جریان گاز در لایه پخش گاز حتی به ۰/۰۰۱۳ متر بر ثانیه می‌رسد. باید توجه داشت در حالتی که کانال جریان گاز مسدود نیست، سرعت گاز در نواحی متخلخل پیل از مرتبه 10^{-5} است.

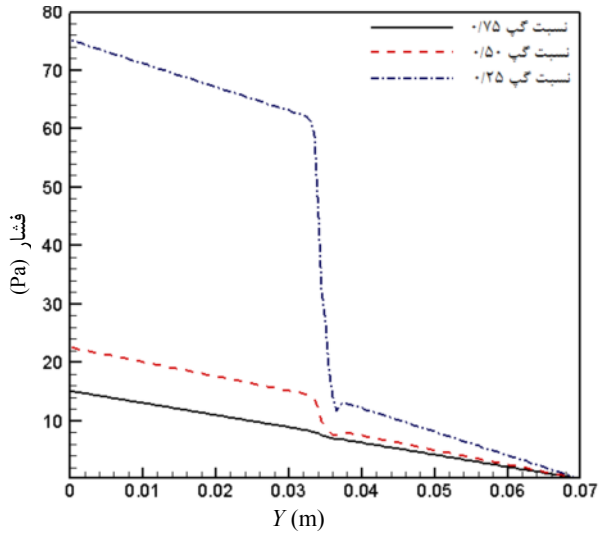


شکل ۱۴ تأثیر نسبت فاصله بر سرعت در فصل مشترک لایه پخش گاز/لایه کاتالیست

با افزایش سرعت گاز در فاصله بین مانع و لایه پخش گاز، نفوذ گاز به این لایه زیاد می‌شود، به طوری که در نسبت‌های فاصله پایین غلظت اکسیژن در زیر مانع و همچنین پایین‌دست مانع، افزایش زیادی دارد (شکل ۱۵). هر چند افزایش غلظت اکسیژن زیاد است؛ اما افزایش افت فشار نیز بالا بوده (شکل ۱۶) و در وضعیت‌هایی که با محدودیت افت فشار مواجه نیستیم، افزایش ارتفاع مانع روشی مناسب برای افزایش نفوذ گاز به سمت لایه پخش گاز می‌باشد.



شکل ۱۵ تأثیر نسبت فاصله بر غلظت اکسیژن در فصل مشترک لایه پخش گاز/لایه کاتالیست



شکل ۱۶ تأثیر نسبت فاصله بر افت فشار در طول کانال کاتد

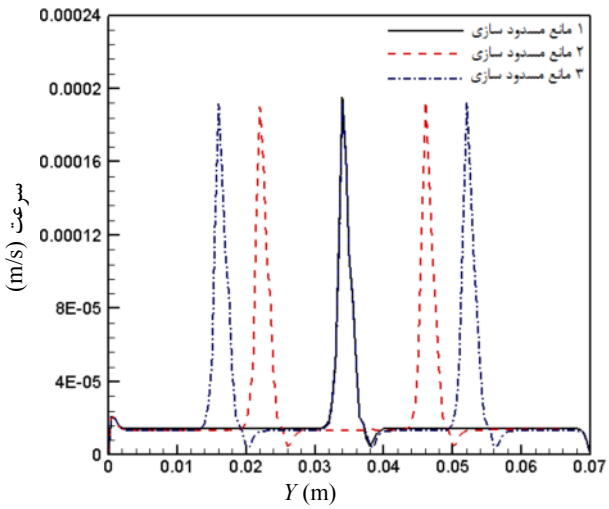
در نسبت‌های فاصله پایین، افزایش افت فشار بسیار زیاد بوده و به حدود ۸۰ پاسکال می‌رسد. افزایش افت فشار مستلزم استفاده از پمپ با توان بالاتر است و باعث می‌شود توان پارازیتی سیستم افزایش یابد. توان پارازیتی بخشی از توان تولیدی پیل است که توسط سیستم‌های جانبی پیل مصرف می‌شود.

۳-۶- تأثیر تعداد صفحه مسدود کننده

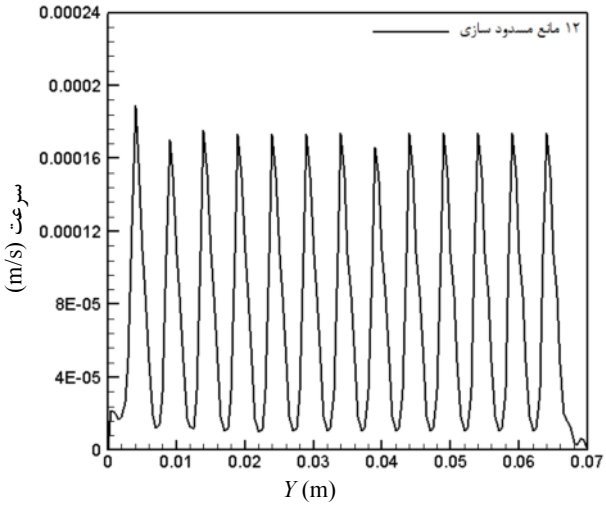
افزایش زیاد سرعت جریان گاز در زیر صفحه مسدود کننده، ایدهٔ افزایش تعداد صفحات مسدود کننده را مطرح می‌کند. شکل ۱۷ تأثیر تعداد موانع بر سرعت گاز در فصل مشترک لایه پخش گاز/لایه کاتالیست را نشان می‌دهد. با افزایش تعداد موانع، تعداد قله‌های ماکزیمم سرعت افزایش می‌یابد و به ازای هر مانع، یک افزایش سرعت در لایه پخش گاز به وجود می‌آید.

این قضیه در شکل ۱۸ که ۱۲ مانع در طول کانال استفاده شده است، بهتر نشان داده شده است، هر چند که با افزایش تعداد موانع، مطابق شکل ۱۹ افت فشار نیز افزایش می‌یابد.

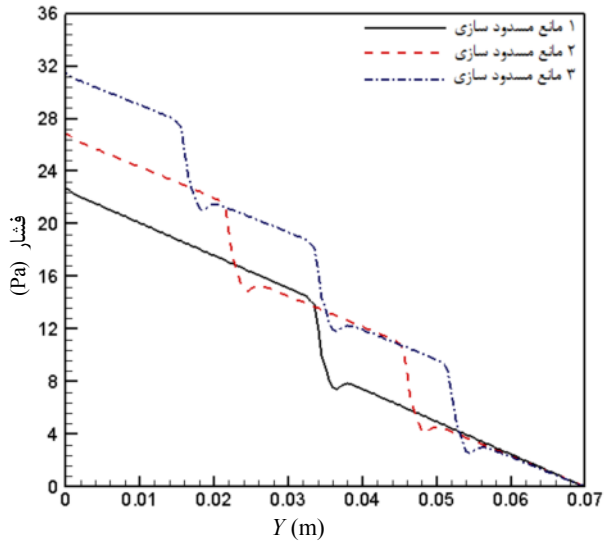
در شکل ۲۰، تأثیر تعداد موانع بر غلظت اکسیژن در لایه‌های پخش گاز و کاتالیست نشان داده شده است. با افزایش تعداد موانع غلظت اکسیژن در لایه کاتالیست به شدت افزایش می‌یابد، به طوری که در نواحی که در زیر مانع قرار ندارند نیز غلظت اکسیژن افزایش یافته است. زیاد شدن تعداد صفحات مسدودکننده، افت فشار در طول کانال را افزایش می‌دهد.



شکل ۱۷ تأثیر تعداد مانع مسدود کننده بر سرعت در فصل مشترک لایه پخش گاز/لایه کاتالیست



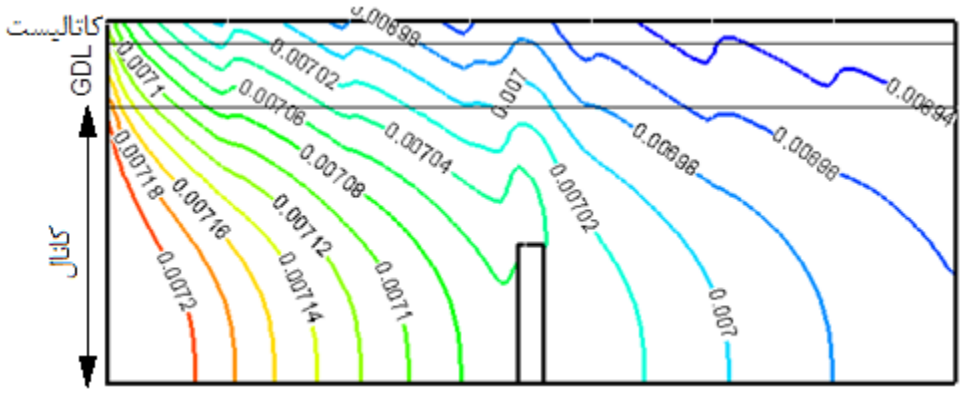
شکل ۱۸ تأثیر تعداد زیاد مانع مسدود کننده بر سرعت در فصل مشترک لایه پخش گاز/لایه کاتالیست



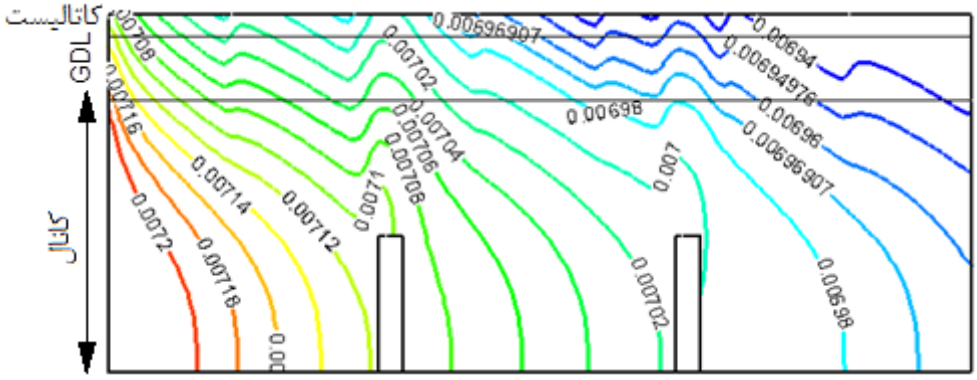
شکل ۱۹ تأثیر تعداد مانع مسدود کننده بر افت فشار در طول کانال کاتد

همچنین به کار بردن تعداد محدود صفحه مسدود کننده باعث می‌شود که توزیع اکسیژن در لایه کاتالیست غیر یکنواخت شود. در زیر صفحات مسدود کننده غلظت اکسیژن بالا بوده و در دیگر نواحی غلظت پایین است. توزیع غیر یکنواخت غلظت اکسیژن منجر به توزیع غیر یکنواخت چگالی جریان یا جریان الکتریکی پیل می‌شود. ولی مطابق شکل ۲۰، با افزایش تعداد صفحات، علاوه بر نواحی زیر موانع، غلظت اکسیژن در دیگر نواحی نیز بالا می‌رود؛ به طوری که با به کار بردن سه صفحه مسدود کننده نسبت به یک صفحه، توزیع اکسیژن در لایه پخش گاز و لایه کاتالیست بسیار یکنواخت‌تر

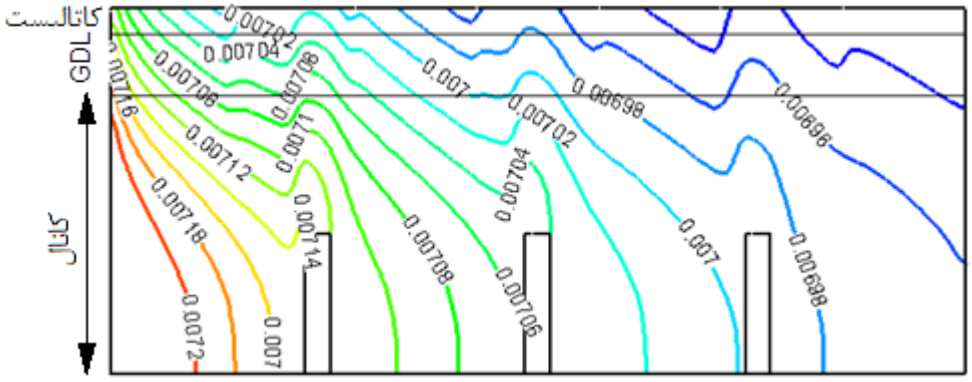
است. این قضیه وقتی محسوس‌تر می‌شود که تعداد صفحات مسدود کننده را افزایش دهیم. مطابق شکل ۲۱ که ۱۲ مانع مستطیلی در طول کانال قرار گرفته است غلظت اکسیژن در لایه پخش گاز یکنواخت‌تر شده است. افزایش تعداد موانع ایدهٔ کانال‌های موجی را مطرح ساخته است که برای بالا بردن و یکنواخت کردن غلظت اکسیژن در لایه پخش گاز و در لایه کاتالیست، در طراحی و ساخت پیل‌های سوختی مورد استفاده قرار می‌گیرد. اما افت فشار در کانال‌های موجی (تعداد صفحات مسدود کننده بالا و به طور منظم در کانال تعبیه شوند) نسبت به کانال‌های ساده بسیار بیشتر است. مطابق شکل ۲۲ افت فشار حدود ۸۰ پاسکال است که حدود ۷ برابر افت فشار در کانال ساده است.



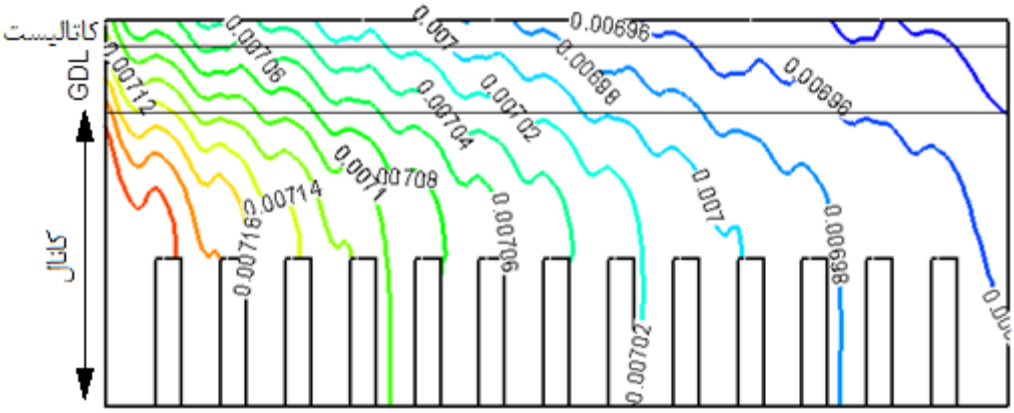
شکل ۲۰ الف- غلظت اکسیژن در الکترود کاتد با مسدود سازی کانال با یک مانع مستطیلی



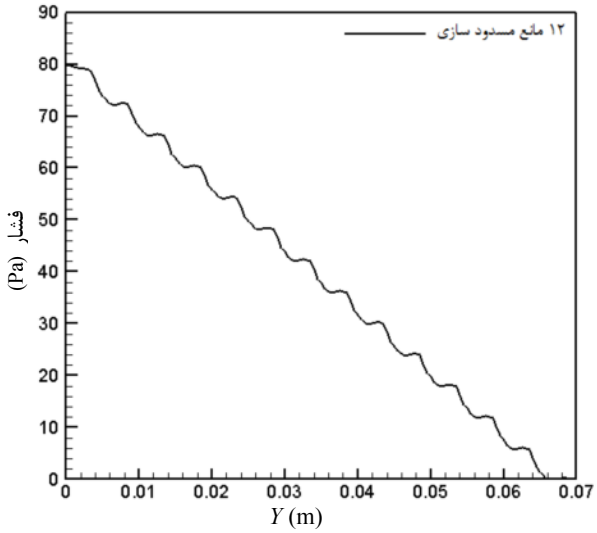
شکل ۲۰ ب- غلظت اکسیژن در الکترود کاتد با مسدود سازی کانال با دو مانع مستطیلی



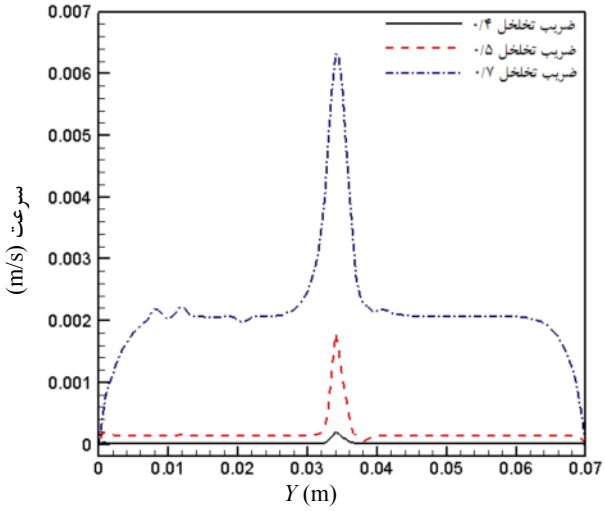
شکل ۲۰ ج- غلظت اکسیژن در الکترود کاتد با مسدود سازی کانال با سه مانع مستطیلی



شکل ۲۱ غلظت اکسیژن در الکترود کاتد با مسدود سازی کانال با ۱۲ مانع مستطیلی (کانال موجی)



شکل ۲۲ افت فشار در طول کانال کاتد، مسدود سازی با ۱۲ مانع مستطیلی



شکل ۲۳ تأثیر تخلخل لایه پخش گاز بر سرعت در فصل مشترک لایه پخش گاز/لایه کاتالیستبا مسدود سازی کانال

۳-۷- تأثیر تخلخل لایه پخش گاز

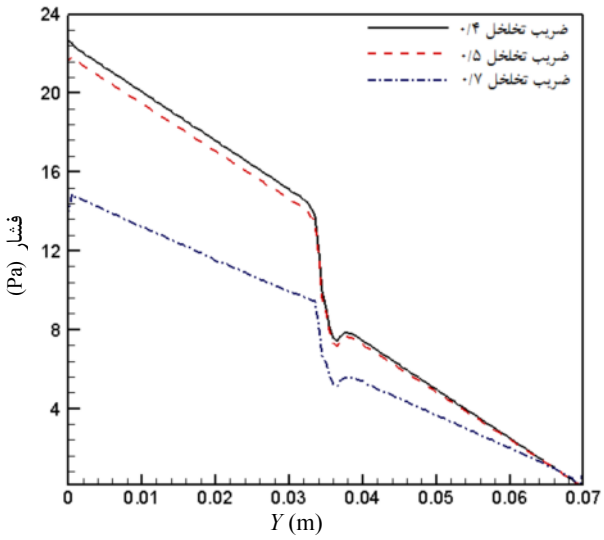
به منظور بررسی اثرات ضریب تخلخل لایه پخش گاز، مقادیر ضریب تخلخل ۰/۴، ۰/۵ و ۰/۷ در نظر گرفته شده است. برای همه موارد، یک صفحه مسدود کننده مستطیلی با ضخامت ۲ میلی‌متر و ارتفاع ۰/۵ میلی‌متر در داخل کانال کاتد (در وسط کانال به فاصله یکسان از بالادست و پایین‌دست مانع) قرار می‌گیرد. در شکل ۲۳، تغییرات سرعت در فصل مشترک لایه پخش گاز/لایه کاتالیست کاتد نشان داده شده است.

در تخلخل بالا، سرعت در لایه پخش گاز در ناحیه زیر صفحه افزایش می‌یابد و باعث می‌شود نرخ جریان جرم به داخل لایه پخش گاز نیز افزایش یابد. در تخلخل پایین، عمده گاز با سرعت بالا از میان فاصله بین صفحه و لایه پخش گاز به سمت پایین‌دست کانال جریان حرکت می‌کند و در نتیجه یک حرکت دورانی پشت صفحه مسدود کننده آشکار می‌شود.

اندازه این حرکت گردابی با افزایش اندازه تخلخل لایه پخش گاز کاهش می‌یابد.

در تخلخل‌های بالا، سرعت در لایه پخش گاز بسیار بالا (حدود ۰/۰۰۲۵) است، در حالی که در تخلخل‌های پایین، سرعت در این لایه از مرتبه 10^{-5} است. به تبعیت از میدان سرعت، موقعی که ضریب تخلخل پایین است اکسیژن بیشتری در کانال کاتد ظاهر می‌شود و اکسیژن کمتری می‌تواند از طریق لایه پخش گاز انتقال یابد و به لایه کاتالیست برسد. این امر باعث می‌شود نرخ واکنش کاتدی کاهش یافته و در نتیجه عملکرد پیل سوختی افت پیدا کند. با افزایش تخلخل، اکسیژن بیشتری وارد لایه پخش گاز می‌شود و غلظت اکسیژن در طول کانال جریان کاهش می‌یابد و با تأمین اکسید کننده بالاتر، واکنش در سطح لایه کاتالیست افزایش می‌یابد. آب، محصول

واکنش در سطح لایه کاتالیست است و به تبعیت از غلظت اکسیژن، ماکزیمم غلظت بخار آب در فصل مشترک لایه پخش گاز و لایه کاتالیست، در جایی است که بیشترین اکسیژن مصرف می‌شود. غلظت‌های اکسیژن و بخار آب تقریباً متمم یکدیگر هستند. غلظت آب بالاتر در مکانی که غلظت اکسیژن کمتر است، اتفاق می‌افتد و بالعکس. به علت ضریب پخش بالای هیدروژن در مقایسه با اکسیژن، نیازی به بالا بردن سرعت در لایه پخش گاز آند نیست. بر خلاف مسدود سازی در یک تخلخل مشخص لایه پخش گاز، که افت فشار نسبت به حالت بدون مسدود سازی افزایش می‌یابد، مزیت دیگر افزایش تخلخل، کاهش افت فشار در سمت کاتد است. کاهش افت فشار ناشی از افزایش ضریب تخلخل لایه پخش گاز در شکل ۲۴ نشان داده شده است. کاهش افت فشار ناشی از افزایش تخلخل از ۰/۵ به ۰/۷ محسوس است. خلاصه نتایج و تأثیر پارامترهای بررسی شده بر غلظت اکسیژن و افت فشار در جدول ۲ ارائه شده است.



شکل ۲۴ تأثیر تخلخل لایه پخش گاز برافت فشار در طول کانال کاتد با مسدود سازی کانال

۴- نتیجه‌گیری

در این مطالعه، یک الگوی عددی دوبعدی برای الکترود کاتد پیل سوختی غشا پلیمری با کانالی که قسمتی از آن مسدود شده است، ارائه شده و تأثیر شکل (مستطیلی، ذوزنقه‌ای، مثلثی و خمیده)، ضخامت، ارتفاع و تعداد صفحات مسدودکننده بر انتقال اکسیژن به داخل لایه پخش گاز کاتد بررسی شده است.

جدول ۲ تأثیر پارامترهای بررسی شده بر افزایش غلظت اکسیژن در زیر مانع (نسبت به کانال بدون مانع) و افت فشار سمت کاتد

پارامتر بررسی شده	افزایش غلظت اکسیژن ($\times 10^{5}$)	افت فشار در سمت کاتد (پاسکال)
کانال بدون مانع مسدودسازی	-	۱۷/۶
شکل صفحه مسدود کننده:		
کانال مستطیلی	۴/۷	۲۲/۶
کانال مثلثی	۲/۷	۱۹/۷
کانال ذوزنقه‌ای	۳/۶	۲۰/۶
کانال خمیده	۴/۱	۲۱/۴
ضخامت صفحه مستطیلی مسدود کننده:		
ضخامت ۱ میلی‌متر	۳/۳	۲۰/۴
ضخامت ۲ میلی‌متر	۴/۵	۲۲/۶
ضخامت ۳ میلی‌متر	۴/۷	۲۳/۲
ضخامت ۴ میلی‌متر	۵/۰	۲۴/۵
اندازه فاصله بین مانع و لایه پخش گاز:		
فاصله ۰/۷۵ میلی‌متر	۳/۴	۱۵/۰
فاصله ۰/۵ میلی‌متر	۴/۶	۲۲/۶
فاصله ۰/۲۵ میلی‌متر	۶/۶	۷۵/۱۵
تعداد صفحات مسدود کننده:		
۱ صفحه مستطیلی	۴/۷	۲۲/۶
۲ صفحه مستطیلی	۱۵/۴	۲۶/۷
۳ صفحه مستطیلی	۱۷/۸	۳۱/۴
۱۲ صفحه مستطیلی (کانال موجی)	۲۵/۴	۸۰/۰
ضریب تخلخل لایه پخش گاز:		
ضریب تخلخل ۰/۴	۴/۷	۲۲/۶
ضریب تخلخل ۰/۵	۱۸/۱	۲۲/۶
ضریب تخلخل ۰/۷	۳۴/۳	۱۴/۲

دستاوردهای مطالعه عبارتند از:

۱- با قرار دادن مانع مسدودسازی، سرعت جریان در فاصله بین مانع و لایه پخش گاز افزایش می‌یابد که این امر سبب می‌شود که 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 که افت فشار سمت کاتد نیز با افزودن مانع مسدود سازی افزایش می‌یابد.

۲- با بررسی شکل مانع مسدود سازی، بهترین وضعیت مسدود سازی قرار دادن مانع مستطیلی است که بالاترین افزایش غلظت اکسیژن در لایه پخش گاز و کاتالیست را نتیجه می‌دهد. هر چند که افت فشار ایجاد شده با این مانع بالا بوده،

ولی افزایش غلظت اکسیژن در این نواحی نیز بالا است.

۳- اندازه مانع مسدود سازی بر غلظت اکسیژن در لایه پخش گاز و لایه کاتالیست تأثیرگذار است. افزایش ضخامت و ارتفاع مانع، باعث افزایش سرعت جریان گاز و غلظت اکسیژن در فصل مشترک لایه پخش گاز و لایه کاتالیست، به خصوص در ناحیه زیر مانع و افزایش افت فشار در الکترود کاتد می‌شود؛ اما حساسیت مدل به افزایش ارتفاع مانع (کاهش فاصله بین صفحه مسدود کننده و لایه پخش گاز) نسبت به افزایش ضخامت مانع بیشتر است.

۴- افزایش تعداد موانع مسدود سازی باعث می‌شود غلظت اکسیژن در لایه پخش گاز و لایه کاتالیست بالاتر رود و یکنواخت‌تر شود، به طوری که تعداد زیاد موانع یا به عبارت دیگر کانال موجی، توزیع بسیار یکنواخت اکسیژن در نواحی قید شده را ایجاد می‌کند؛ هر چند که افت فشار کانال‌های موجی بالا می‌باشد.

۵- افزایش تخلخل لایه پخش گاز علاوه بر این که باعث می‌شود پخش اکسیژن به لایه پخش گاز بهبود یابد، افت فشار در الکترود کاتد نیز کاهش می‌یابد. بنابراین افزایش تخلخل لایه پخش گاز همراه با استفاده از مانع مستطیلی با ابعاد مناسب، در افزایش غلظت اکسیژن در لایه پخش گاز و لایه کاتالیست، بسیار تأثیرگذار است.

۵- تشکر و قدردانی

نویسندگان از کمک‌ها و حمایت‌های معاونت تحقیقات و فناوری دانشگاه اصفهان در قالب انجام طرح‌های پژوهشی با شماره طرح ۹۰۱۱۱۳ تشکر و قدردانی می‌کنند.

۶- فهرست علایم

C^i	غلظت جزء i (mol/m^3)
D^i	ضریب پخش جزء i (m^2/s)
D_H	قطر هیدرولیکی (m)
F	ثابت فارادی (C/mol)
f	ضریب اصطکاک
h	ارتفاع (m)
I	چگالی جریان (A/m^2)
K	نفوذپذیری (m^2)
L	طول (m)
P	فشار (Pa)
R	ثابت عمومی گاز (8.314 J/mol K)
Re	عدد رینولدز
S	جمله چشمه در معادله انتقال
T	دما (K)
u	سرعت (m/s)

علایم یونانی:

ε	ضریب تخلخل
μ	لزجت (Pas)
η	اضافه پتانسیل (V)
ρ	چگالی (kg/m^3)

۷- مراجع

[1] Nguyen P.T., Berning T., Djilali N.,"Computational Model of a PEM Fuel Cell with Serpentine Gas Flow", *Journal of Power Sources*, Vol. 130, 2004, pp. 149–157.

[2] Hwang J.J., "A Complete Two-Phase Model of a Porous Cathode of a PEM Fuel Cell", *Journal of Power Sources*, Vol. 164, 2007, pp. 174–181.

[3] Hu G., Chen F.S., Liu Y., Cen K., "Three-Dimensional Numerical Analysis of Proton Exchange Membrane Fuel Cells (Pemfcs) with Conventional and Interdigitated Flow Fields", *Journal of Power Source*s, Vol. 136, 2004, pp. 1–9.

[4] Dutta S., Shimpalee S., Van J.W., "Numerical Prediction of Mass Exchange Between Cathode and Anode Channels in a PEM Fuel Cell", *International Journal Heat Mass Transfer*, Vol. 44, 2001, pp. 2029-2038.

[5] Kee R.J., Korada P., Walters K., Pavol M., "A Generalized Model of the Flow Distribution in Channel Networks of Planar Fuel Cells", *Journal of Power Sources*, Vol. 109, 2002, pp. 148-154.

[6] Yan W.M., Soong C.Y., Chen F., Chu H.S., "Effect of Flow Distributor Geometry and Diffusion Layer Porosity on Reactant Gas Transportand Performance of Proton Exchange Membrane Fuel Cells", *Journal of Power Sources*, Vol. 125, 2004, pp. 27-36.

[7] Gurau V., Barbir F., Liu H., "An Analytical Solution of a Half Cell Model for PEM Fuel Cells", *Journal Electrochemical Society*, Vol. 47, 2000, pp. 2468-2477.

[8] Kuoa J.K., Yen T.H., Chen C.K., "Three-Dimensional Numerical Analysis of PEMFCs with Straight and Wave-Like Gas Flow Fields

Channels", *Journal of Power Sources*, Vol. 177, 2008, pp. 96-103.

[9] Liu, H.Ch., Yan W.M., Soong Ch.Y., Chen F., "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, 2005, pp. 125–133.

[10] Perng S.W., Wub H.W., Jue T., Cheng K. C., "Numerical Predictions of a PEM Fuel Cell Performance Enhancement by a Rectangular Cylinder Installed Transversely in the Flow Channel", *Applied Energy*, Vol. 86, 2009, pp. 1541–1554.

[11] Soong C.Y., Yan W.M., Tseng C.Y., Liu H.C., "Analysis of Reactant Gas Transport in a PEM Fuel Cell with Partially Blocked Fuel Flow Channels", *Journal of Power Sources*, Vol. 143, 2005, pp. 36–47.

[12] Kumar A., Reddy R.G., "Modeling of Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell with Metal Foam in the Flow Field of the Bipolar/End Plates", *Journal of Power Sources*, Vol. 114, 2003, pp. 54–62.

[13] Biloe S., Mauran S., "Gas Flow through Highly Porous Graphite Matrices Carbon", *Journal Carbon*, Vol. 41, 2003, pp. 525-537.

[14] Wang Y., "A Single-Phase, Non-Isothermal Model for PEM Fuel Cells", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 48, 2005, pp. 1303-1315.

[15] Wang Y., Wang C. Y., A Non-Isothermal, Two-Phase Model for Polymer Electrolyte Fuel Cells, *Journal Electrochemical Society*, Vol. 153, 2006, pp. A1193-1200.

[16] Afshari E., Jazayeri S.A. "Analyses of Heat and Water Transport Interactions in a Proton Exchange Membrane Fuel Cell", *Journal of Power Sources*, Vol. 194, 2009, pp. 423–432