

بررسی عملکرد پیل سوختی غشاپلیمری با میدان شارش پینی لوبیا شکل

ابراهیم افشاری^{۱*}، حامد افشاری^۲، مهدی مشرف دهکردی^۳، سید علی اطمینی^۴، محمود عدمی^۵

^۱ دانشیار گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه اصفهان، ایران

e.afshari@eng.ui.ac.ir

^۲ کارشناس ارشد گروه مهندسی مکانیک، مجتمع مکانیک و هوافضا، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، شاهین شهر اصفهان، ایران

hamed.af1203@gmail.com

^۳ استادیار گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه اصفهان، ایران

m.mosharaf@eng.ui.ac.ir

^۴ دانشجوی دکتری گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه اصفهان، ایران

atyabi84@gmail.com

^۵ دانشیار گروه مهندسی مکانیک، مجتمع مکانیک و هوافضا، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، شاهین شهر اصفهان، ایران

adami@mut-es.ac.ir

چکیده: شکل و هندسه میدان جریان تأثیر مستقیمی بر انتقال واکنشگرها به سمت لایه کاتالیست و متعاقباً عملکرد پیل سوختی غشاپلیمری دارد؛ از این رو ارائه یک میدان جریان مناسب ضروری است. در پژوهش حاضر، یک طرح جدید پیل سوختی غشاپلیمری با میدان جریان پینی لوبیا شکل به منظور کاهش نواحی کم فشار، افزایش میزان نرخ انتقال اکسیژن به لایه کاتالیست، بالا بردن دانسیته جریان و در نهایت، بهبود عملکرد پیل ارائه شده است. برای بررسی عملکرد میدان جریان پیشنهادی، این پیل با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی و دیدگاه تک دامنه‌ای شبیه‌سازی شده و عملکرد آن با یک پیل سوختی ساده با کانال‌های جریان موازی مقایسه شده است. هندسه و شرایط کاری هر دو پیل سوختی یکسان در نظر گرفته شده است. نتایج عددی کار حاضر نشان می‌دهد به واسطه وجود پین‌ها، نرخ انتقال اکسیژن به لایه پخش گاز و لایه کاتالیست کاتد افزایش پیدا می‌کند و باعث افزایش نرخ واکنش‌های الکتروشیمیایی و به تبع آن، دانسیته جریان پیل می‌شود. در مقایسه با پیل کانال‌های ساده، پیل سوختی پیشنهادی به واسطه افزایش دانسیته جریان و به خصوص در دانسیته‌های جریان بالا عملکرد بهتری دارد. با این وجود، در پیل سوختی با میدان جریان پینی افت فشار بالاتر و توزیع نایک‌نواخت‌تر دانسیته جریان مشاهده می‌شود.

واژه‌های کلیدی: پیل سوختی غشاپلیمری، میدان جریان پینی، انتقال اکسیژن، دینامیک سیالات محاسباتی.

۱. مقدمه

از میان انواع پیل‌های سوختی، پیل سوختی غشاپلیمری به دلیل راندمان و دانسیته توان بالا، دمای عملکرد پایین، عدم نیاز به تعمیر و نگهداری همراه با سادگی و تنوع بالا در کاربردهای نظامی، وسایل حمل و نقل و وسایل قابل حمل بسیار مناسب بوده و توسعه زیادی پیدا کرده است. از مشخصه‌های مهم طراحی پیل سوختی، شکل و هندسه کانال جریان، جهت توزیع واکنشگرها و خروج آب تولیدی از داخل پیل است. طراحی میدان جریان، درحقیقت بهینه‌سازی مشخصه‌های تأثیرگذار بر عملکرد پیل سوختی است و باید تعادلی بین قیده‌های وابسته بر عملکرد پیل ایجاد شود. یک میدان جریان ایده‌آل در پیل سوختی باید انتقال جرم مناسب واکنشگرها به لایه کاتالیست را فراهم کند، به طوری که گازهای واکنش‌دهنده به میزان مورد نیاز و همچنین به صورت یکنواخت در لایه کاتالیست در دسترس باشند؛ بدین معنی که هیچ نقطه‌ای از کاتالیست بدون واکنش‌دهنده نباشد و در هیچ نقطه‌ای، تجمع گازهای واکنش‌دهنده بیش از مقدار مورد نیاز مشاهده نشود. خروج محصولات واکنش از کانال و هدایت آن‌ها به خارج از پیل سوختی، مبادله الکترونی مناسب با لایه‌های کاتالیست و درنهایت، ایجاد افت فشار حداقل از دیگر مواردی است که در طراحی میدان جریان باید مد نظر قرار گیرد.

تاکنون طرح‌های مختلفی برای میدان جریان پیل سوختی غشاپلیمری ارائه شده که در هر کدام، تحقیقات بر قسمتی از میدان جریان تمرکز یافته است. کولتا و همکاران [۱] به بررسی عملکرد پیل سوختی برای جهت جریان آند و کاتد به صورت راستا و هم‌جهت، جریان هم‌راستا و غیرهم‌جهت و جریان عمودی پرداختند. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که پیکربندی جریان هم‌راستا و غیرهم‌جهت عملکرد بهتری دارد. طرح کانال جریان موازی توسط پلگری [۲] بررسی شد. در این طرح، کانال‌های جریان به طور موازی و جدا از یکدیگر، کانال توزیع ورودی را به کانال توزیع خروجی متصل می‌کنند. بعد از کارکرد طولانی مدت پیل و به خصوص هنگام استفاده از هوا به عنوان اکسیدکننده، ولتاژ ناپایدار پیل به علت توزیع غیریکنواخت گازهای واکنشگر و عدم دفع مؤثر آب تولیدی مشاهده می‌شود. قطرات آب تمایل دارند که در کانال‌هایی که گاز کمتری از آن‌ها عبور می‌کند جمع شوند؛ بنابراین عملکرد پیل به دلیل توزیع غیریکنواخت گازهای واکنش‌دهنده و عدم دفع مؤثر آب تنزل می‌یابد. جانسون و همکاران [۳] طرح میدان جریان موازی را پیشنهاد دادند که هر کانال آن متناوب به صورت عریض شده و تنگ شده تکرار می‌شود. براساس این طرح، مقاومت در برابر جریان گاز کانال‌های مجاور در

طول کانال تغییر می‌کند و سبب جلوگیری از تجمع آب در انتهای کانال شده که این خود سبب ادامه فعالیت پیل سوختی می‌شود. نتایج مدل ماریپیچی منفرد ارائه شده توسط شی و همکاران [۴] نشان می‌دهد که جریان عبوری در کانال توسط اختلاف فشار بین دو طرف کانال رانده می‌شود و نفوذپذیری لایه پخش گاز از مقدار جریان عبوری تأثیر می‌پذیرد. طرح ماریپیچی، گازهای واکنش‌دهنده را مجبور می‌کند تا کل سطح الکتروود را طی کنند؛ بنابراین هیچ نقطه سکونی در کانال‌ها ایجاد نمی‌شود. از معایب این طرح آن است که اگر مسیر کانال در نقطه‌ای بسته شود، بعد از آن نقطه، هیچ جریانی در کانال وجود نداشته و واکنشی نیز صورت نمی‌گیرد. در قسمتی از کانال که قبل از گرفتگی قرار دارد به علت انجام واکنش، آب تولید می‌شود و به دلیل عدم امکان جابه‌جایی آب، کانال مسدود شده و درنهایت کل پیل از کار خواهد افتاد. علاوه بر این مشکل، افت فشار این طرح نیز بالاست. واتکینز و همکاران [۵] پیشنهاد دادند که چندین کانال ماریپیچی به طور موازی استفاده شود تا افت فشار محدود گردد، دفع مؤثر آب از کانال‌ها تسهیل شود و از وقوع نواحی سکون ناشی از تجمع آب در سطح کاتد جلوگیری شود. با این طرح و در شرایط یکسان آزمایش، نسبت به سایر طرح‌ها، توان خروجی پیل تا ۵۰ درصد افزایش می‌یابد. اگرچه طرح ماریپیچی موازی نسبت به طرح ماریپیچی منفرد، افت فشار کمتری ایجاد می‌کند، به علت طول زیاد کانال‌ها و پیچ‌هایی که گاز هنگام عبور از این کانال‌ها طی می‌کند، افت فشار نسبتاً بالا بوده و از این رو غلظت واکنش‌دهنده‌ها به طور مؤثری از مقطع ورودی به مقطع خروجی تغییر می‌کند. در مطالعه‌ای که هوان و همکاران [۶] بر روی ۳ میدان شارش قراردادی شامل میدان‌های شارش موازی، نوع-Z و ماریپیچی انجام دادند، سرعت، کسر جرمی اکسیژن، چگالی جریان، آب مایع و فشار برای میدان‌های شارش قراردادی مورد تحقیق قرار گرفت. نتایج آن‌ها نشان می‌دهد که میدان شارش ماریپیچی، نسبت به میدان شارش نوع-Z و میدان شارش موازی، بیشترین انتقال اکسیژن به کاتالیست را دارد. روش‌سندل و همکاران [۷] مقایسه‌ای بین طرح یک میدان جریان با الهام از الگوهای موجود زیستی با جریان سیال موازی و ماریپیچی انجام داده‌اند. نتایج نشان می‌دهد که در طرح جدید با الگوی الهام گرفته از طبیعت، توزیع سوخت در سطح کاتالیست یکنواخت‌تر است و چگالی توان به دست آمده از کانال‌های ماریپیچی و موازی جریان در حالت حداکثر توان، به ترتیب تا ۲۶ درصد و ۵۶ درصد بالاتر از حداکثر توان پیل با کانال ساده است. دو مدل میدان جریان پیل سوختی، یکی میدان با آرایش موازی مستقیم و دیگری میدان با آرایش پنجه‌انگشتی توسط

بوده که باعث به وجود آمدن نقاط سکونی در مجاورت یک سری از پین‌ها که در گوشه‌ها قرار گرفته‌اند می‌شود. این امر سبب توزیع غیریکنواخت گازهای واکنشگر و افت عملکرد پیل می‌شود. به منظور بررسی کامل و رفع نواقص اشاره شده در الگوی فوق، در این مقاله، طرح میدان پینی با آرایش لوبیا شکل استفاده شده است. برای درک صحیح دینامیک سیال، انتقال اجزا و فرآیندهای الکتروشیمیایی داخل پیل، یک حل عددی کامل از معادلات پیوستگی، مومنتوم، گونه‌های جرمی، انرژی و بقای بار الکتریکی بدون محاسبه اثر جریان دوفاز در تمامی نواحی پیل سوختی و به صورت سه بعدی ارائه شده است. سپس تأثیر میدان جریان پینی با پین‌های لوبیا شکل بر عملکرد پیل بررسی و با عملکرد پیل با کانال‌های ساده موازی مقایسه شده است.

۲. مدل ریاضی

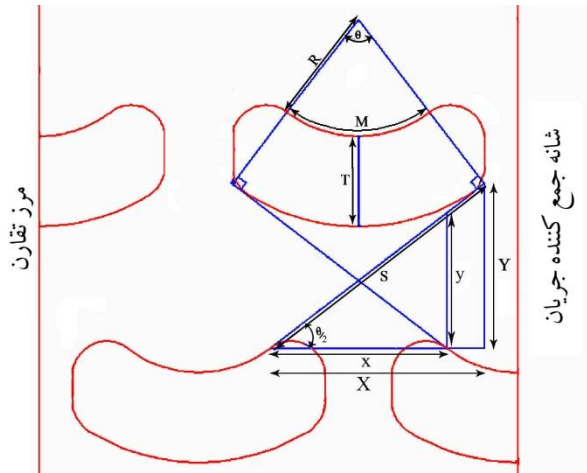
۱.۲. پیل سوختی با میدان جریان پینی با پین لوبیا شکل

اجزای یک مدل پیل سوختی غشاپیلیمی بدون در نظر گرفتن تجهیزات جانبی، شامل اجزای اصلی لایه‌های کاتالیست، لایه‌های پخش گاز، غشای مبادله گر پروتون و صفحات جمع‌کننده جریان است که کانال‌های جریان داخل این صفحات تعبیه می‌شوند. در داخل کانال‌های جریان پین‌های لوبیا شکل تعبیه می‌شود. هیدروژن مرطوب وارد کانال آند شده و از میان لایه پخش گاز 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 با عبور الکترون از یک مدار خارجی، جریان الکتریکی خارجی به وجود می‌آید که باعث تولید کار الکتریکی می‌شود. در کاتد، اکسیژن وارد کانال شده و 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. اجزای پیل سوختی و نمایی از میدان جریان کاتد با آرایش پینی لوبیا شکل که در روی جمع‌کننده جریان ایجاد شده، در شکل (۱) نشان داده شده است.

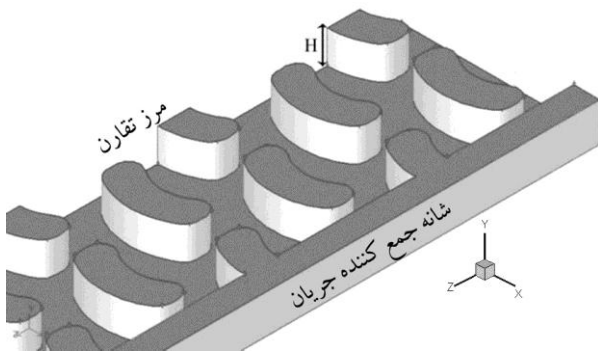
برای توصیف پدیده‌های فیزیکی در پیل با هندسه کانال مستقیم، یک آنالیز دوبعدی کافی به نظر می‌رسد [۱۳] ولی در این کار برای بررسی میدان جریان پینی، آنالیز سه بعدی بر روی میدان جریان لازم است. نفوذپذیری هیدروژن در کانال آند به قدری بالاست که وجود یا عدم وجود پین در کانال آند تأثیر چندانی بر نفوذپذیری هیدروژن ندارد. به همین دلیل و همچنین کاهش هزینه محاسبات و کاهش

هی و یو و همکاران [۸] مورد مقایسه قرار گرفت. نتایج نشان می‌دهد که عملکرد پیل سوختی غشاپیلیمی با میدان شارش پنجه‌انگشتی، هنگامی که هیچ آبی جهت مرطوب‌سازی هوای ورودی کاتد اضافه نشود، ضعیف‌تر است. مطالعه‌ای توسط سونگ [۹] روی انتقال گازهای واکنشگر در یک پیل سوختی غشاپیلیمی با کانال جریانی که به طور جزئی با یک صفحه موج‌گیر مسدود شده بود، صورت گرفت. تأثیرات انسداد موج‌گیر و تخلخل لایه پخش گاز روی جریان گاز سوخت و انتقال جرم مورد آزمون قرار گرفته است. نتایج آن‌ها نشان می‌دهد که بلوک‌های موج‌گیر، جریان اصلی در کانال را با نیروی بیشتری به سمت لایه پخش گاز منحرف می‌کنند. همچنین یک افزایش شار جرمی اکسیژن و غلظت بخار آب در سطح کاتالیست، مخصوصاً در موقعیتی درست در زیر موقعیت صفحات موج‌گیر به وجود می‌آید. میدان جریان مخروطی همراه با مسدودکننده با نسبت‌های مختلف مخروطی توسط پرگ و همکاران [۱۰] مورد بررسی قرار گرفت. آن‌ها نشان دادند که اثر ترکیبی کانال جریان مخروطی و انسداد موج‌گیر، انتقال حرارت همرفت بهتر و سرعت جریان سوخت بالاتر را فراهم می‌کند که به نوبه خود، چگالی جریان موضعی و ویژگی‌های قطبش را در برابر افت فشار بالا بهبود می‌بخشد. خزاعی و همکاران [۱۱] عملکرد پیل سوختی با سطح مقطع حلقوی را بررسی کرده‌اند. نتایج آن‌ها نشان می‌دهد که افزایش سطح تماس بین لایه پخش گاز و صفحات دوقطبی باعث افزایش عملکرد پیل سوختی می‌شود. میدان جریان با آرایش پینی توسط ریزر و همکاران [۱۲] مورد استفاده قرار گرفته است. شبکه توزیع جریان از تعداد زیادی پین با طرحی منظم به صورت مکعبی و دایره‌ای تشکیل شده است که پین‌ها از این صفحات بیرون زده و گازهای واکنش‌دهنده از فضای بین آن‌ها عبور می‌کنند. در حقیقت گازها در شبکه‌ای از مسیرهای موازی و سری جریان می‌یابند. این آرایش افت فشار کمی در جریان ایجاد می‌کند. جریان گاز در این آرایش میل به عبور از مسیرهایی با مقاومت کمتر را دارد و در نتیجه به بعضی از نقاط گاز کافی نرسیده و تبدیل به نقاط سکون می‌شوند. این امر موجب تولید غیریکنواخت جریان الکتریکی، عدم دفع مؤثر آب تولیدی و عملکرد پایین پیل سوختی می‌شود. همچنین ممکن است در پشت هر کدام از پین‌ها نواحی چرخشی ثابتی به وجود بیاید.

آرایش پینی ارائه شده توسط ریزر [۱۲] یک الگو بوده و جنبه‌های مختلف عملکرد آن شامل توزیع کافی و یکنواخت گازهای واکنشگر، توزیع دانسیته جریان، افت فشار و عملکرد پیل سوختی در قالب منحنی قطبش بررسی نشده است. به علاوه، در آن طرح پین‌ها مربعی



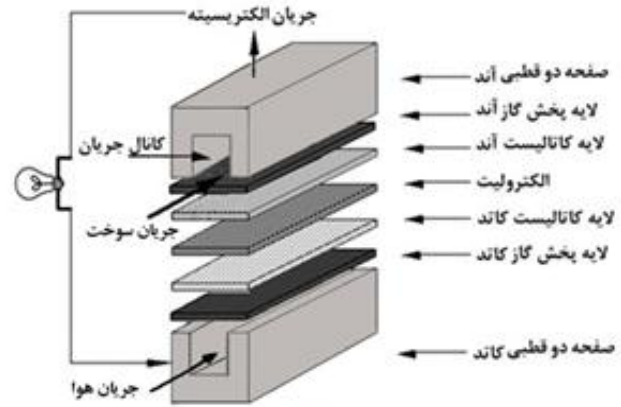
الف



ب

شکل (۲): الف. متغیرهای هندسی مربوط به طراحی میدان جریان پینی؛ ب. ارتفاع پین‌ها، شانه جمع‌کننده جریان و مرز تقارن

هزینه ساخت، از آرایش پینی فقط در کانال کاتد استفاده شده است. به دلیل تقارن موجود، تنها نیمی از کانال شکل (۱-ب) برش داده و مدل گردیده و شرط مرزی تقارن بر روی این صفحه اعمال شده است. مقادیر مربوط به میدان جریان شامل مکان هندسی پین‌ها، ضخامت انحنا، میزان بازشدگی و ارتفاع هر پین است. متغیرهای تعیین‌کننده در بررسی میدان جریان در شکل (۲) نشان داده است. در این شکل‌ها، H ارتفاع پین، شعاع انحنا پین، θ زاویه بازشدگی پین‌ها، S طول خط مماس، M طول انحنا پین‌ها، T ضخامت پین‌ها، x فاصله ابتدای دو خط مماس، y ، X ، Y نیز متغیرهای کمکی می‌باشد. از بین تمام متغیرهای بالا تنها H ، R ، T ، θ و S مستقل بوده و بقیه متغیرهای وابسته‌اند.



الف



ب

شکل (۱): الف. اجزای یک پیل سوختی ساده؛ ب. میدان جریان پینی با آرایش لوبیا شکل

۲.۲. معادلات حاکم

در این تحقیق، یک مدل سه‌بعدی برای تحلیل پیل سوختی با میدان جریان پینی، با شکل لوبیا در نظر گرفته شده است. به منظور سادگی، فرضیاتی به شرح زیر در نظر گرفته شده و اعمال می‌شود:

۱. پیل سوختی در شرایط پایا عمل می‌کند؛
۲. تمام گازها تراکم‌ناپذیر و ایده‌آل هستند؛
۳. جریان داخل کانال‌ها آرام است؛
۴. غشا کاملاً مرطوب فرض شده است، بنابراین هدایت الکتریکی ثابت است و برای جریان آب مایع عبارت‌های پخش در نظر گرفته نمی‌شود؛
۵. غشا برای فاز گاز نشت‌ناپذیر در نظر گرفته می‌شود؛
۶. آب تولیدی در فاز گاز در نظر گرفته می‌شود؛
۷. خنثی بودن الکترونی در داخل غشا برقرار بوده و غلظت پروتون آن ثابت و برابر با غلظت گروه‌های اسید سولفونیک ثابت است.

بر اساس فرضیات بالا، مدل شامل معادلات دیفرانسیل پاره‌ای،

مول، R ثابت جهانی گاز، T دما و η اضافه ولتاژ است. برای کاتد، معادله باتلر - ولمر به صورت زیر اعمال می شود [۱۶]:

$$i_{c,ct} = i_{0,c} X_{O_2} \frac{C_t}{C_{O_2,ref}} \left[\exp\left(\frac{\alpha F \eta}{RT}\right) - \exp\left(\frac{(1-\alpha) F \eta}{RT}\right) \right] \quad (۸)$$

$i_{c,ct}$ چگالی جریان کاتد، $i_{0,c}$ چگالی جریان مبادله شده کاتد، X_{O_2} کسر مولی اکسیژن و $C_{O_2,ref}$ غلظت مرجع اکسیژن است. α ضریب انتقال است که در سمت کاتد با α_c و در سمت آند با α_a نمایش داده می شود.

۲.۲.۲. معادله بقای جرم

معادله بقای جرم با عبارت های چشمه، در نواحی مختلف پیل برقرار است.

$$\nabla \cdot (-\rho_i U_i) = S_{mass} \quad (۹)$$

ρ_i چگالی جزء i ام، U_i بردار سرعت جزء i ام و S_{mass} ترم چشمه است. در کانال های گاز، لایه های پخش گاز و غشا، ترم چشمه صفر تنظیم می شود. در لایه کاتالیست، مصرف هیدروژن و اکسیژن و همچنین تشکیل آب وجود دارد و نرخ های جرمی چاه و چشمه بستگی به نرخ های واکنش الکتروشیمیایی دارد [۱۷].

$$S_{H_2} = -\frac{M_{w,H_2}}{2F} i_{an} \quad (۱۰)$$

$$S_{O_2} = -\frac{M_{w,O_2}}{4F} i_{cat} \quad (۱۱)$$

$$S_{H_2O} = \frac{M_{w,H_2O}}{4F} i_{cat} \quad (۱۲)$$

در اینجا، M_w جرم مولکولی است.

۳.۲.۲. معادله بقا مومنتوم

گازهای واکنشگر به عنوان گاز ایده آل در نظر گرفته می شوند. معادلات حاکم معادله بر حرکت گازها، معادله ناویر - استوکس است که در نواحی متخلخل مانند لایه پخش گاز و غشا، معادله مومنتوم اصلاح شده و با قانون داریسی مدل می شود.

$$\frac{1}{\varepsilon} \nabla \cdot (\rho_i U_i U_i) = -\nabla P_i + \frac{1}{\varepsilon} \nabla \cdot (\mu_i \nabla U_i) + S_m \quad (۱۳)$$

که در آن، ε ضریب تخلخل، μ_i لزجت گاز، P_i فشار و S_m ترم چشمه است و در ناحیه کانال گاز صفر تنظیم می شود. ضریب تخلخل نیز در کانال ها برابر ۱ است. در لایه پخش گاز، لایه کاتالیست و غشا، ترم چشمه براساس نفوذپذیری، K ، این نواحی محاسبه می شود [۱۸].

$$S_m = -\frac{\mu_i U_i}{K} \quad (۱۴)$$

۴.۲.۲. معادله بقای گونه های جرمی

در پیل سوختی غشاپیلیمری برای مدل کردن انتقال گونه های جرمی،

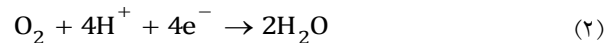
کوئل و غیرخطی شامل بقای جرم، بقای مومنتوم، بقای بار الکتریکی و بقای انرژی با واکنش های الکتروشیمیایی است. با محاسبه ترم های چشمه و چاه واکنش های الکتروشیمیایی، ابتدا معادلات گونه های جرمی برای مصرف هیدروژن و اکسیژن و تولید آب استفاده شده و در مرحله بعد، معادله بار الکتریکی و انرژی به کار می رود.

۱.۲.۲. معادلات الکتروشیمیایی

واکنش های الکتروشیمیایی شامل انتقال بار الکتریکی، انتقال پروتون و تغییرات انرژی آزاد گیبس است. در لایه کاتالیست آند، هیدروژن به پروتون اکسید می شود.



در لایه کاتالیست کاتد، در حضور پروتون های انتقالی از غشا و الکترون های انتقالی از مدار خارجی، اکسیژن به آب کاهش می شود.



و در نهایت واکنش کلی پیل به صورت زیر است.



افزایش سرعت واکنش الکتروشیمیایی، باعث افزایش حرکت الکترون ها می شود که منجر به جریان الکتریکی می شود. جریان در واحد سطح با توجه به قانون فارادی، با مصرف واکنش دهنده ها در واحد سطح متناسب است [۱۴ و ۱۵].

$$i = nFv \quad (۴)$$

در اینجا، v سرعت واکنش الکتروشیمیایی بر حسب مول بر ثانیه، F ثابت فارادی و n تعداد الکترون منتقل شده در واکنش الکتروشیمیایی است. موازنه بار الکتریکی در جمع کننده جریان الکتریکی آند و کاتد به صورت زیر است:

$$\nabla \cdot (-\kappa \nabla \phi_{elec}) = 0 \quad (۵)$$

که در آن κ ضریب هدایت الکتریکی و ϕ_{elec} پتانسیل الکتریکی است. موازنه بار در غشا به صورت زیر است.

$$\nabla \cdot (-\sigma \nabla \phi_{ionic}) = 0 \quad (۶)$$

در رابطه فوق، σ رسانایی یونی غشا و ϕ_{ionic} پتانسیل یونی غشا است. معادله باتلر - ولمر، انتقال بار چگالی جریان الکتریکی را توصیف می کند. در آند هیدروژن به شکل آب کاهش می یابد و معادله سینتیک انتقال بار به کار می رود [۱۶].

$$i_{a,ct} = i_{0,a} X_{H_2} \frac{C_t}{C_{H_2,ref}} \left[\exp\left(\frac{\alpha F \eta}{RT}\right) - \exp\left(\frac{(1-\alpha) F \eta}{RT}\right) \right] \quad (۷)$$

$i_{a,ct}$ چگالی جریان الکتریکی آند، $i_{0,a}$ چگالی جریان مبادله شده آند، X_{H_2} کسر مولی هیدروژن، C_t مجموع غلظت گونه ها و $C_{H_2,ref}$ غلظت مرجع هیدروژن است. F ثابت فارادی برابر ۹۶۵۰۰ کولن بر

۳.۲. شرایط مرزی

معادلات (۵)، (۶)، (۹)، (۱۳)، (۱۵) و (۱۷) مجموعه‌ای کامل از معادلات حاکم را تشکیل می‌دهند که برای مشخص کردن مجهولات شامل پتانسیل جریان الکتریکی، پتانسیل غشا، مؤلفه‌های سرعت، فشار، غلظت‌های هیدروژن، اکسیژن و آب و دما حل می‌شوند. در این مقاله از روش تک‌دامنه‌ای استفاده شده که در آن، فقط به شرایط مرزی مربوط به سطوح خارجی دامنه محاسباتی نیاز است.

شرط شار صفر برای سطوح خارجی، به‌جز برای ورودی‌ها و خروجی‌های کانال‌های گاز آند و کاتد به‌کار می‌رود. سرعت ورودی آند و کاتد را می‌توان با نسبت جریان استوکیومتری مربوط به سمت آند و سمت کاتد محاسبه کرد. نسبت استوکیومتری به‌صورت نسبت مقدار واکنش‌دهنده ورودی به مقدار واکنش‌دهنده مورد نیاز واکنش الکتروشیمیایی برای تولید چگالی جریان مرجع مشخص، I_{ref} تعریف می‌شود. در ورودی آند و کاتد، غلظت گونه‌های ورودی، به کمک فشار ورودی و شرایط رطوبت تعیین می‌شود. برای شرط مرزی حرارتی ورودی‌های گاز آند و کاتد، شرط مرزی درجه‌حرارت ثابت (۳۵۳ کلوین) به‌کار برده می‌شود.

برای خروجی کانال‌ها، شرط مرزی فشار خروجی استفاده می‌شود. در شرط مرزی فشار خروجی، فشار استاتیک به‌صورت نسبی در مرز خروجی وارد می‌شود. جریان در مرزهای خروجی به‌صورت توسعه‌یافته یا شار صفر در نظر گرفته می‌شود [۲۱].

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial n} = 0; \quad \frac{\partial C^i}{\partial n} = 0; \quad \frac{\partial \phi_{elec}}{\partial n} = 0; \quad \frac{\partial T}{\partial n} = 0 \quad (22)$$

برای دیواره‌های کانال و دیواره بین‌های موجود در کانال کاتد، شرط عدم لغزش برای سرعت و شرط شار صفر برای دیگر متغیرها، به استثنای شرط دمایی در مرز کانال‌ها به‌کار می‌رود. دمای دیواره‌های کانال‌ها برابر دمای عملکرد پیل فرض می‌شود.

$$\frac{\partial P}{\partial n} = 0; \quad \frac{\partial C^i}{\partial n} = 0; \quad \frac{\partial \phi_{elec}}{\partial n} = 0; \quad T = 353K \quad (23)$$

برای معادله ولتاژ الکتریکی، ولتاژ در سمت آند به‌طور قراردادی صفر است.

$$\phi_{elec} = 0 \quad (24)$$

و در طرف کاتد، توزیع ولتاژ در وجه مشترک غشا / کاتالیست با رابطه زیر بیان می‌شود:

$$\frac{\partial \phi_{ionic}}{\partial y} = -\frac{1}{\sigma} [i - F c_f v] \quad (25)$$

σ هدایت پروتونی غشا، i چگالی جریان موضعی F ثابت فارادی، c_f غلظت بار ثابت داخل غشا و v سرعت آب است.

معادله استفان - ماکسول برای تجزیه و تحلیل این نوع پدیده‌ها مناسب است.

$$\nabla X_i = -\sum_{j=1}^N \frac{I}{c D_{ij}} (X_j N_i - X_i N_j) \quad (15)$$

در رابطه فوق، C غلظت مولی، N بردار شار مولی، X_i و X_j کسرهای مولی اجزای i و j است. نفوذپذیری، D_{ij} ، تابع دما و فشار است [۱۹].

$$D_{ij} = \varepsilon^{1.5} D_{ij}^0 \left(\frac{P_0}{P} \right) \left(\frac{T}{T_0} \right)^{1.5} \quad (16)$$

نفوذپذیری مرجع، D_{ij}^0 ، خصوصیتی براساس فشار و دمای مرجع ($T_0 = 300 K$ ، $P_0 = 1 atm$) است. در این شبیه‌سازی، لایه پخش گاز و لایه کاتالیست در محیط متخلخل همگن فرض می‌شوند.

۵.۲.۲. معادلات بقای انرژی

معادله انرژی را به‌صورت زیر می‌توان نوشت:

$$\nabla \cdot (\rho_i U_i T) = \nabla \cdot (k^{eff} \nabla T) + S_T \quad (17)$$

که در آن k^{eff} هدایت پذیری حرارتی مؤثر می‌باشد. S_T نیز ترم چشمه است که ناشی از گرمای اهمی (ترم اول سمت راست معادله ۱۸)، گرمای واکنش (عبارت دوم سمت راست معادله ۱۸)، بازگشت‌ناپذیری‌های واکنش‌ها (عبارت سوم و چهارم سمت راست معادله ۱۸) است [۱۵].

$$S_T = I^2 R_{ohm} + h_{reaction} + \eta_{an} i_{an} + \eta_{cat} i_{cat} \quad (18)$$

I جریان الکتریکی، R مقاومت الکتریکی و $h_{reaction}$ آنتالپی واکنش است.

۶.۲.۲. ولتاژ پیل

حداکثر مقدار انرژی الکتریکی تولیدشده در یک پیل سوختی برابر با انرژی آزاد گیبس است.

$$\Delta G = \Delta(H - TS) \quad (19)$$

ΔH تغییر آنتالپی، ΔS تغییر آنتروپی و ΔG تغییر انرژی آزاد گیبس است. پتانسیل تئوری پیل با استفاده از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$E_{theory} = \frac{\Delta G}{nF} \quad (20)$$

n تعداد الکترون‌های درگیر در واکنش است. رابطه نرنست با استفاده از مقادیر تجربی به‌دست‌آمده از جداول ترمودینامیکی مقدار دهی می‌شود و حاصل آن ولتاژ ایده‌آل پیل است [۲۰].

$$E_{T,P}^0 = 1.23 - 0.83 \times 10^{-3} (T - 298.15) + 4.31 \times 10^{-5} T \left[\ln P_{H_2} + \frac{1}{2} \ln P_{O_2} \right] \quad (21)$$

۳. مدل سازی عددی

دقت در تعیین خصوصیات مواد تأثیر مستقیمی بر دقت نتایج شبیه سازی دارد. خصوصیات مواد و مقادیر پارامترهای ورودی در جدول (۱) ارائه شده است. مشخصات هندسی مدل نیز در جدول (۲) آمده است.

جدول (۱): خصوصیات و پارامترهای عملکردی پیل [۲۲-۲۴]

پارامترها	واحد	مقادیر
ثابت فارادی	$C.mol^{-1}$	۹۶۴۸۷
نرخ استوکیومتری جریان هیدروژن		۲
نرخ استوکیومتری جریان اکسیژن		۱/۴۴
دمای عملکرد پیل	K	۳۵۳
جریان الکتریکی مرجع	$A.m^{-2}$	$۱۰^۴$
فشار عملکرد	Pa	۳×۱۰^۵
کسر مولی هیدروژن ورودی		۰/۸۴۵
کسر مولی اکسیژن ورودی		۰/۱۷۷
چگالی جریان مرجع آند	$A.m^{-2}$	۲۵۰۰
چگالی جریان مرجع کاتد	$A.m^{-2}$	۶×۱۰^{-۳}
کسر مولی بخار آب ورودی در آند و کاتد		۰/۱۵۵
کسر مولی نیتروژن ورودی		۰/۶۶۸
تخلخل غشاء		۰/۲۸
تخلخل لایه کاتالیست		۰/۲۸
تخلخل لایه پخش گاز		۰/۳
دبی ورودی کانال آند	$kg.s^{-1}$	$۵/۱۰۷۵ \times ۱۰^{-۵}$
دبی ورودی کانال کاتد	$kg.s^{-1}$	$۸/۵۳۴ \times ۱۰^{-۵}$
غلظت ثابت بارهای الکتریکی	$mol.m^{-3}$	۱/۲۱۰۴
ضریب انتقال آند		۱
ضریب انتقال کاتد		۱
ضریب پخش مرجع بخار آب	$m^2.s^{-1}$	۳×۱۰^{-۵}
ضریب هدایت حرارتی هیدروژن	$W.m^{-1}.K^{-1}$	۰/۲۰۴۰
ضریب هدایت حرارتی اکسیژن	$W.m^{-1}.K^{-1}$	۰/۰۲۹۶
ضریب هدایت حرارتی نیتروژن	$W.m^{-1}.K^{-1}$	۰/۰۲۹۳
ضریب هدایت حرارتی بخار آب	$W.m^{-1}.K^{-1}$	۰/۰۲۳۷
ضریب هدایت حرارتی مؤثر غشا	$W.m^{-1}.K^{-1}$	۰/۹۵
ضریب هدایت حرارتی جمع کننده	$W.m^{-1}.K^{-1}$	۱۲۰
ضریب پخش مرجع هیدروژن	$m^2.s^{-1}$	$۹/۱۵ \times ۱۰^{-۶}$
ضریب پخش مرجع اکسیژن	$m^2.s^{-1}$	$۲/۲ \times ۱۰^{-۶}$

جدول (۲): پارامترهای هندسی مربوط به میدان جریان مدل (تمام اعداد به غیر از زاویه بازشدگی برحسب میلی متر است.)

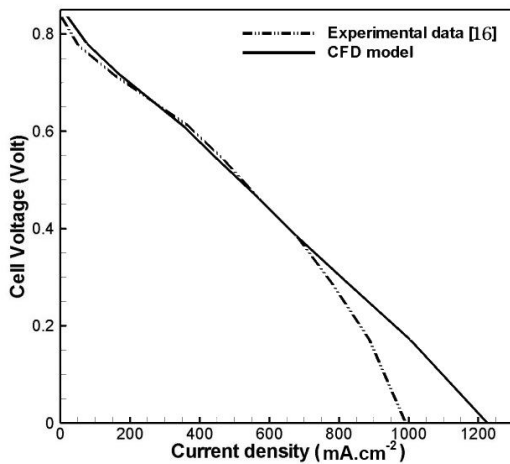
پارامترها	مقادیر
شعاع انحنای	۱/۳
زاویه بازشدگی	۷۵ درجه
طول خط مماس	۳/۰
ضخامت بین	۱/۰
ارتفاع بین	۱/۰
طول کانال گاز	۶۸/۱۱
عرض کانال گاز	۱۰/۶۳
ارتفاع کانال گاز	۱/۰
عرض جمع کننده جریان	۱۲/۲۳
ارتفاع جمع کننده جریان	۱/۵
ضخامت لایه پخش	۰/۲۶
ضخامت غشا (نافیون ۱۱۲)	۰/۰۵
ضخامت لایه کاتالیست	۰/۰۱

معادلات حاکم بر پیل سوختی غشاپلیمری همراه با شرایط مرزی مشخص شده، با روش حجم محدود گسسته شده و با استفاده از نرم افزار دینامیک سیالات محاسباتی فلوئنت حل شده اند. فرآیند گسسته سازی معادلات بقای جرم، مومنتوم، انرژی و غلظت گونه های جرمی برای هر حجم کنترل انجام گرفته است. طرح تفاضل پیشرو برای حل معادلات سرعت مورد استفاده قرار گرفته است؛ این در حالی است که از روش تفاضل مرکزی برای گسسته سازی معادلات چگالی جریان، دما، و غلظت گونه ها استفاده شده است. حجم کنترل سرعت به طور متناوب به حجم کنترل پایه رجوع کرده و میدان سرعت و فشار مطابق الگوریتم سیمپل رفتار می کند. برای حل معادلات از یک روند تکراری استفاده شده است و حل تا رسیدن به همگرایی با دقت $۱۰^{-۶}$ ادامه پیدا کرده است.

در شکل (۳)، کل دامنه محاسباتی به صورت شبکه بندی شده و در شکل (۴) شبکه محاسباتی در اطراف پین ها و شبکه بندی خود پین ها نشان داده شده است. تعداد شبکه ۹۹۵۲۸۰ المان انتخاب شده، به طوری که تعداد شبکه در لایه پخش گاز، کاتالیست و غشا که نیاز به کوچک تر شدن سلول ها به ترتیب ۱۵۰۸۰۰، ۶۰۳۲۰، ۱۵۰۸۰۰ المان است. شبکه بندی هر کدام از پین ها به صورت سازمان یافته بوده و تعداد سلول های شبکه برای هر کدام از پین ها ۴۸۰ عدد است. از آنجایی که جریان در اطراف پین ها دارای اهمیت است، سعی شده است که

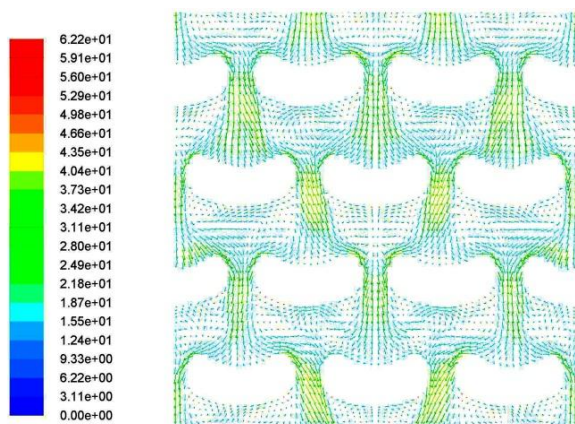
۳۱ بررسی عملکرد پیل سوختی غشاپلیمری با میدان شارش پینی لوبیا شکل

به صورت بخار باقی بماند. این فرض در دانسیته جریان‌های معمول و با توجه به شرایط عملکرد پیل (دمای ۳۵۳ کلوین و فشار ۳ اتمسفر)، فرض مناسب و منطقی است و در بسیاری از مقالات با هدف مدل‌سازی عددی پیل سوختی از این فرض استفاده شده است.



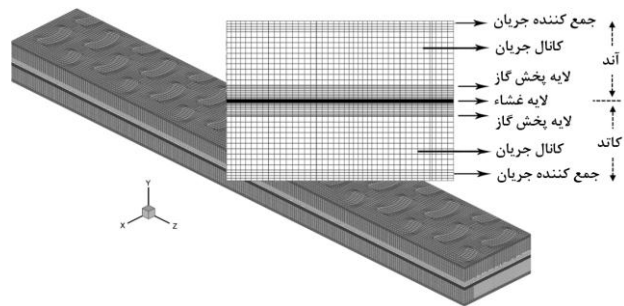
شکل (۵): مقایسه نمودار عملکرد پیل حاصل از نتایج تجربی [۱۶] با مدل عددی حاضر

در شکل (۶)، بردارهای سرعت جریان در مقطعی از کانال کاتد ارائه شده است. سرعت در بین دو پین مجاور بیشترین مقدار را دارد که از لحاظ برآیند مقدار برابر ۶۲ متر بر ثانیه است. در هنگام برخورد جریان به مرکز انحنا داخلی پین، کم‌ترین سرعت و بیشترین فشار ایجاد می‌شود که این همان نقطه سکون است. در پشت پین‌ها، گردابه‌های ایجاد شده سبب جریان برگشتی می‌شود. پارامترهای هندسی جریان تا حد امکان طوری انتخاب شده است که بردارهای سرعت از نظم و یکنواختی بیشتری برخوردار باشند.

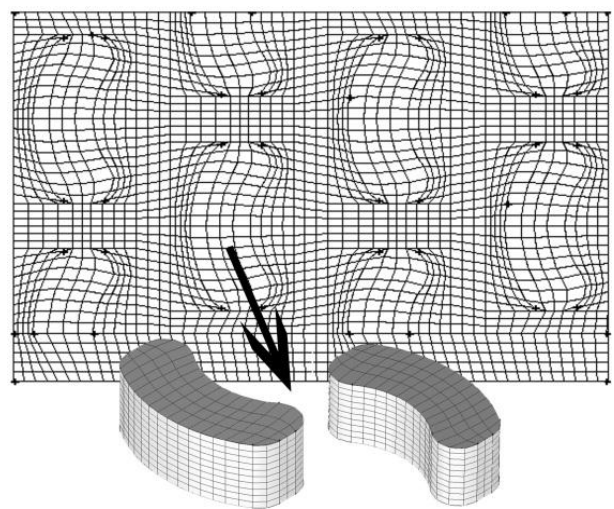


شکل (۶): بردارهای سرعت در مقطعی از میدان جریان کاتد

شبکه‌بندی در این ناحیه نسبت به نواحی دیگر ریزتر باشد.



شکل (۳): نمای سه‌بعدی دامنه محاسباتی و شبکه‌بندی آن همراه با تفکیک لایه‌های مختلف پیل

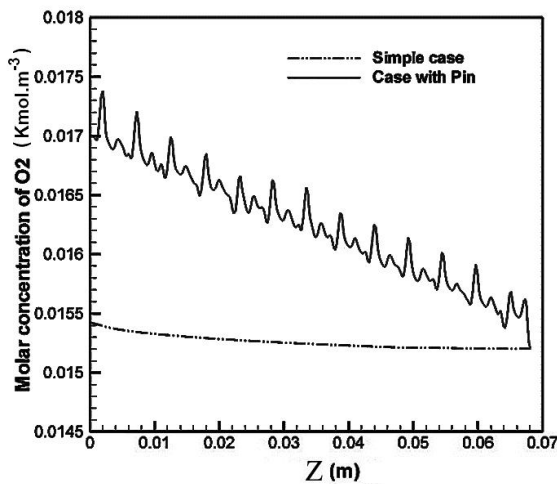


شکل (۴): نمای دوبعدی میدان جریان پینی همراه با شبکه‌بندی آن و نمای سه‌بعدی پین‌های داخل میدان

۴. نتایج

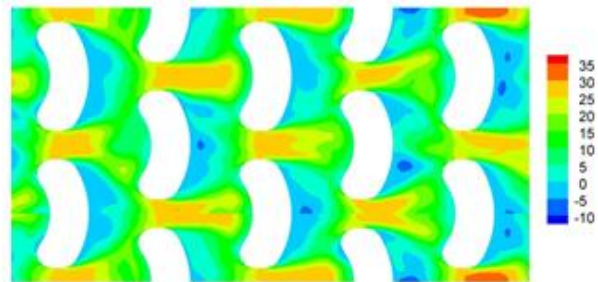
برای اطمینان از روند حل عددی، یک نمونه ساده پیل سوختی بدون پین ایجاد شده، و عملکرد پیل نمونه با نتایج به دست آمده از یک نمونه آزمایشگاهی توسط تیکنالی [۱۶] در شرایط هندسی و عملکردی یکسان مقایسه شده است. مطابق شکل (۵) منحنی قطبش پیل برای مدل هم‌خوانی خوبی با منحنی قطبش تجربی در دانسیته جریان‌های پایین و متوسط دارد. عمده اختلاف مدل حاضر با نتایج تجربی مربوط به دانسیته جریان‌های بالاست. در دانسیته جریان‌های بالا، میزان آب مایع اهمیت پیدا می‌کند و باعث شناوری لایه پخش گاز شده و انتقال گازهای واکنشگر به لایه کاتالیست را مختل می‌کند. در اثر پدیده شناوری و بسته شدن بخشی از تخلخل‌های لایه پخش گاز، عملکرد پیل به شدت افت می‌یابد. به علت پیچیدگی بسیار زیاد بحث تغییر فاز آب در پیل سوختی، در این مقاله فرض شده که آب تغییر فاز نداد و

یافته است.

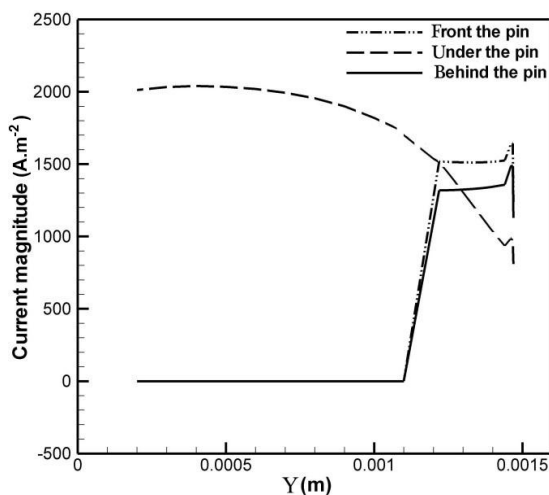


شکل (۸): غلظت اکسیژن بر روی خط مرکزی در راستای کانال در فصل مشترک لایه پخش گاز و لایه کاتالیست کاتد در زیر پین‌ها برای دو نمونه ساده و همراه با پین در ولتاژ عملکردی ۰/۵ ولت

برای درک بهتر نقاط سرعت بالا و سکون و همچنین نواحی گردابه‌ای در نمونه پیل پینی، توزیع بردارهای سرعت در طول کانال کاتد در شکل (۷) ارائه شده است. مقادیر منفی مربوط به بردارهای با جهت مخالف یا جریان برگشتی است. در نواحی پشت پین‌ها معمولاً بیشترین گردابه به وجود می‌آید، اما در انتخاب پارامترهای هندسی سعی بر آن بوده تا نواحی گردابه‌ای به حداقل ممکن برسد.



شکل (۷): توزیع بردارهای سرعت در میدان جریان سمت کاتد

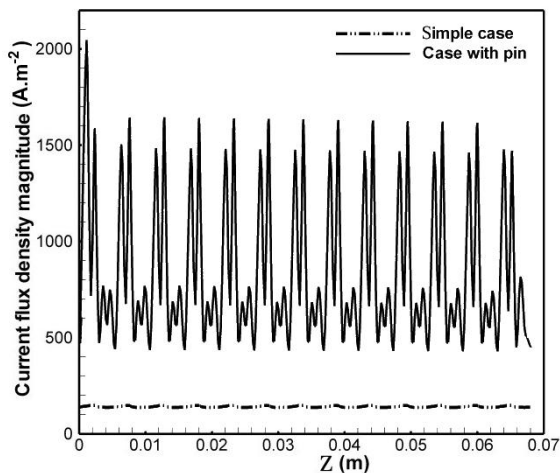


شکل (۹): غلظت مولی اکسیژن بر روی خطی در امتداد ضخامت کانال تا لایه کاتالیست برای سه حالت جلو، زیر و پشت پین در ولتاژ عملکردی ۰/۵ ولت

در شکل (۸)، تغییرات غلظت اکسیژن بر روی خط مرکزی سطح لایه کاتالیست در طول کانال کاتد، برای دو نمونه پیل ساده و همراه با پین ارائه شده است. در هر دو مدل، در طول کانال به دلیل نفوذ گاز اکسیژن به لایه پخش گاز و لایه کاتالیست و سپس مصرف آن، غلظت اکسیژن کاهش می‌یابد، اما غلظت اکسیژن در لایه کاتالیست در مدل پینی به مراتب بالاتر از مدل ساده است. در نواحی زیر پین‌ها نسبت به بقیه نواحی، غلظت اکسیژن در لایه پخش گاز و به تبع آن لایه کاتالیست به مراتب افزایش یافته است که اثر مثبت حضور پین‌ها را نشان می‌دهد. علاوه بر ناحیه زیر پین‌ها، در بالادست پین‌ها نیز غلظت اکسیژن به دلیل وجود پین افزایش می‌یابد؛ هرچند که مقادیر پیشینه غلظت اکسیژن در نواحی زیر پین‌ها اتفاق می‌افتد. تغییرات غلظت اکسیژن در نواحی بالادست و پایین دست پین‌ها متعادل می‌شود. در واقع، در نواحی زیر پین‌ها به دلیل افزایش سرعت گاز، اکسیژن بیشتری به سمت لایه پخش گاز هل داده شده است. دانسیته جریان متناسب با مصرف اکسیژن می‌باشد و با مصرف بیشتر اکسیژن، دانسیته جریان نیز افزایش می‌یابد.

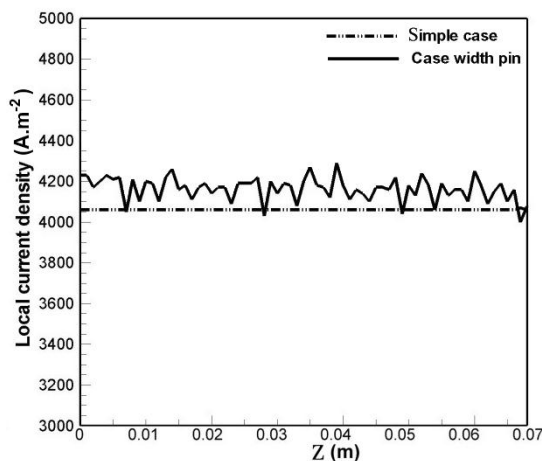
در شکل (۱۰)، توزیع غلظت اکسیژن در لایه کاتالیست کاتد برای دو مدل پیل پینی و پیل با کانال ساده ارائه شده است. روند کاهش غلظت اکسیژن در هر دو کانال دیده می‌شود؛ اما توزیع اکسیژن در مدل ساده یکنواخت‌تر است. وجود پین‌ها هرچند باعث می‌شود غلظت اکسیژن در لایه کاتالیست کاتد افزایش یابد، توزیع اکسیژن نا یکنواخت‌تر می‌شود. این قضیه ایجاب می‌کند تا از نظر توزیع یکنواخت اکسیژن در الگوی پینی نیز مطالعاتی انجام شود؛ هرچند که مزیت افزایش غلظت اکسیژن در لایه پخش گاز و لایه کاتالیست بسیار اساسی بوده و تأثیر بسیار مثبتی بر عملکرد پیل می‌گذارد، به طوری که

به منظور درک بهتر تغییرات غلظت اکسیژن در اطراف پین‌ها، در شکل (۹) مقدار غلظت اکسیژن بر روی خطی در امتداد ضخامت لایه‌های پیل (از کانال تا لایه کاتالیست) برای سه حالت جلو، زیر و پشت پین ارائه شده است. غلظت اکسیژن در ناحیه حدود ۰/۰۰۱۱ تا ۰/۰۰۱۴۷ متر از ناحیه انتهایی این نمودار، مربوط به قسمت لایه پخش گاز و لایه کاتالیست است. مشاهده می‌شود که تغییرات غلظت در زیر پین ناگهانی بوده و غلظت اکسیژن در ناحیه زیر پین به شدت افزایش



شکل (۱۱): چگالی موضعی جریان بر روی خط مرکزی، در فصل مشترک لایه پخش گاز و لایه کاتالیست کاند در راستای کانال در زیر پین‌ها، برای دو نمونه ساده و همراه با پین در ولتاژ عملکردی ۰/۵ ولت

اگر جریان موضعی میانگین در کل صفحه جمع‌کننده جریان از ورودی تا خروجی رسم شود، افزایش کلی در میانگین جریان موضعی برای مدل همراه با پین نسبت مدل ساده مشاهده می‌شود. این نمودار در شکل (۱۲) ارائه شده است. دیده می‌شود که هرچند نمونه ساده یکنواختی بیشتری در جریان موضعی دارد، نایکنواختی چگالی جریان میانگین نسبت به چگالی موضعی در مدل پینی بسیار کم است. در عوض میانگین نمودار برای نمونه همراه با پین از مقدار بالاتری نسبت مدل ساده برخوردار است.

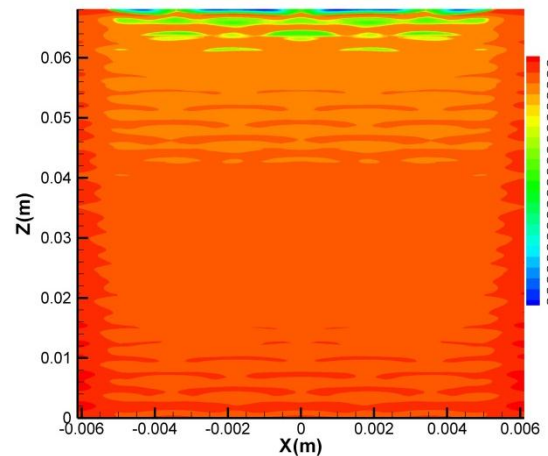


شکل (۱۲): جریان موضعی کلی برای دو مدل همراه با پین و ساده از ورودی تا خروجی در ولتاژ عملکردی ۰/۵ ولت

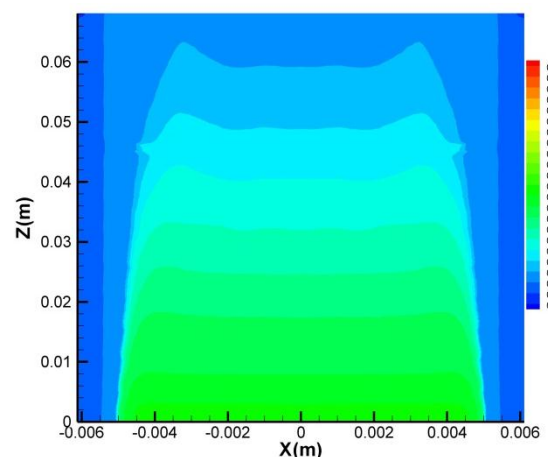
در شکل (۱۳) منحنی عملکرد و در شکل (۱۴) چگالی توان دو نمونه پیل یکی برای مدل ساده و دیگری همراه با پین در شرایط یکسان هندسی و عملکردی، باهم مقایسه شده است. همان‌طورکه

تأثیر منفی نایکنواختی غلظت اکسیژن قابل چشم‌پوشی است یا باید بهینه‌سازی‌هایی انجام شود. بهینه‌سازی ابعاد هندسی کانال از دیدگاه‌های عملکرد بالای پیل، توزیع یکنواخت اکسیژن در لایه پخش گاز و حداقل افت فشار ناشی از پین‌ها، دیگر مطالعه در حال انجام نویسندگان است.

در شکل (۱۱)، چگالی جریان موضعی در هر دو نمونه پیل با کانال ساده و همراه با پین بر روی خط مرکزی فصل مشترک لایه کاتالیست/ لایه پخش گاز ارائه شده است. به دلیل غلظت بالای اکسیژن روی لایه کاتالیست در نمونه همراه با پین، سطح بیشتری از لایه کاتالیست درگیر واکنش شده، در نتیجه سرعت واکنش افزایش یافته و در نهایت، منجر به افزایش چگالی جریان محلی در نمونه همراه با پین می‌شود. باید توجه داشت که به دلیل توزیع نایکنواخت اکسیژن در این لایه، توزیع چگالی جریان نیز نایکنواخت است.



الف



ب

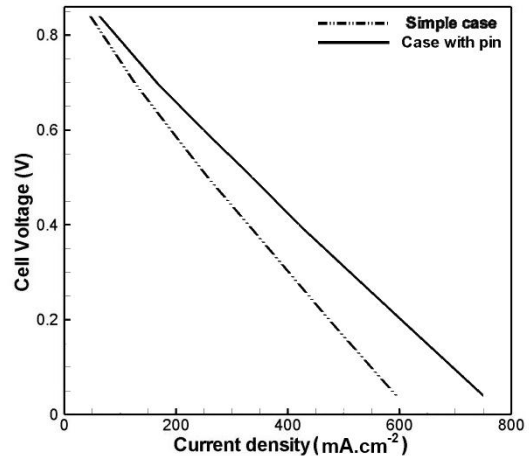
شکل (۱۰): توزیع غلظت اکسیژن بر روی فصل مشترک لایه پخش گاز و لایه کاتالیست کاند. الف. مدل همراه با پین؛ ب. مدل پیل ساده در ولتاژ عملکردی ۰/۵ ولت

۵. جمع بندی

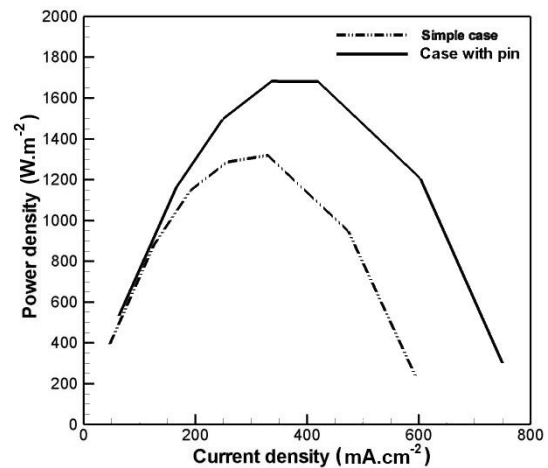
در پژوهش حاضر، با پیشنهاد یک مدل جدید میدان جریان در سمت کاتد پیل سوختی غشاپلمیری، میدان پینی، به بررسی انتقال گازهای واکنشگر و عملکرد پیل پرداخته شده است. مقایسه انتقال اکسیژن و عملکرد پیل با کانال ساده و میدان جریان پینی، تأثیر بسیار مثبت الگوی پینی را نمایان می کند. در کار حاضر، با مقایسه یک پیل با کانال ساده و یک پیل با الگوی پینی با ابعاد هندسی، خصوصیات و شرایط عملکردی یکسان، دستاوردهای زیر حاصل شده است:

حضور پین ها در میدان جریان سمت کاتد تأثیر زیادی بر انتقال اکسیژن به لایه پخش گاز و در نتیجه لایه کاتالیست دارد. پین ها بخشی از جریان گاز را در میدان جریان مسدود می کنند و گاز بیشتری مجبور می شود به داخل لایه پخش گاز وارد شود، به طوری که غلظت اکسیژن در ناحیه زیر پین ها به بیشینه مقدار خود می رسد. این واقعیت باعث می شود دانسیته جریان در الگوی پینی نسبت به کانال ساده به طور محسوسی افزایش یابد و در نتیجه به واسطه حضور پین ها، عملکرد پیل به میزان زیادی افزایش یابد. در دانسیته جریان های بالا که افت های انتقال جرم مهم ترین افت پیل سوختی است، میزان افزایش عملکرد پیل با الگوی پینی بسیار محسوس است. علاوه بر مزایای اساسی مطرح شده برای الگوی پینی، نباید از دو مسئله نایکخواختی توزیع دانسیته جریان و افت فشار بالای آن نسبت به کانال ساده غافل شد. این امر مستلزم بهینه سازی ابعاد پین ها، شکل پین ها و تعداد آن هاست.

مشاهده می شود، عملکرد نمونه همراه با پین نسبت به نمونه ساده و بدون پین بهبود بخشیده شده و در یک ولتاژ مشخص، مقادیر بالاتری چگالی جریان دارد و همچنین دامنه وسیع تری از نمودار چگالی توان را نیز به خود اختصاص داده است. این افزایش همان طور که دلایل آن قبلاً بررسی شد، تأثیر مثبت پین ها بر عملکرد پیل را اثبات می کند. این تأثیر بر منحنی عملکرد پیل، بسیار محسوس بوده و الگوی پینی را به عنوان الگویی مناسب برای توزیع جریان اکسیژن در سمت کاتد پیل مطرح می کند.



شکل (۱۳): مقایسه نمودار عملکرد مربوط به دو نمونه ساده و بدون پین در ولتاژ عملکردی ۰/۵ ولت



شکل (۱۴): مقایسه نمودار چگالی توان مربوط به دو نمونه ساده و بدون پین در ولتاژ عملکردی ۰/۵ ولت

۶. مراجع

- [1] Scholta, J., Haussler, F., Zhang, W., Ku, L., Jorissen, L., Lehnert, W., "Development of a Stack Having an Optimized Flow Field Structure With Low Cross Transport Effects," Journal of Power Sources, Vol. 155, PP. 60-65, 2006.
- [2] Pollegri, A., Spaziant, P.M., US Patent, No. 4,197,178, 1980.
- [3] Johnson, M.C., Wilkinson, D.P., Kenna, J., Vanderleeden, O.R., Zimmerman, J., Tabatabaian, M., US Patent, No.6, 586, 128, 2003.
- [4] Shi, Z., Wang, X., "A Numerical Study of Flow Crossover Between Adjacent Flow Channels in a Proton Exchange Membrane Fuel cell With Serpentine Flow Field," Journal of Power Sources, Vol. 185, pp. 985-992, 2008.

- [5] Watkins, D.S., Dircks, K.W., Epp, D.G., US Patent, No. 5,108,849, 1992.
- [6] Huan, J., Yan, J.W., Li, H.Y., Tsai, W.C., "Three-Dimensional Numerical Study on Cell Performance and Transport Phenomena of PEM Fuel Cells With Conventional Flow Fields," International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 33, pp. 156–164, 2008.
- [7] Roshandel, R., Arbabi, F., Karimi Moghaddam, G., "Simulation of an Innovative Flow-Field Design Based on a Bio Inspired Pattern for PEM Fuel Cells," Renewable Energy, Vol. 41, pp. 86-95, 2012.
- [8] Hu, M., Gu, A., Wang, M., Zhu, X., Yu, L., "Three Dimensional, Two Phase Flow Mathematical Model for PEM Fuel Cell: Part I. Model Development," Energy Conversion and Management, Vol. 45, pp. 1861–1882, 2004.
- [9] Soong, C.Y., Yan, W.M., Tseng, C.Y., Liu, Falin Chen, H.C., Chu, H.S., "Analysis of Reactant Gas Transport in a PEM Fuel Cell With Partially Blocked Fuel Flow Channels," Journal of Power Sources, Vol. 143, pp. 36–47, 2005.
- [10] Perng, S.W., Wu, H.W., "Non-Isothermal Transport Phenomenon and Cell Performance of a Cathodic PEM Fuel Cell with a Baffle Plate in a Tapered Channel," Applied Energy, Vol. 88, pp. 52–67, 2011.
- [11] Khazaei, I., Ghazikhani, M., "Performance Improvement of Proton Exchange Membrane Fuel Cell by Using Annular Shaped Geometry," Journal of Power Sources, Vol. 196, pp. 2661-2668, 2011.
- [12] Reiser, C.A., US patent, No. 4.826,742, 1989.
- [13] Ticianelli, E.A., Derouin, C.R., Redondo, A., Srinivasan, S., "Methods to Advance Technology of Proton Exchange Membrane Fuel Cells," Journal of the Electrochemical Society, Vol. 135, pp. 2209-2214, 1988.
- [14] Zawodzinski, T.A., Springer, T.E., Gottesfeld, S., "Polymer Electrolyte Fuel Cell Model," Journal of the Electrochemical Society, Vol. 138, pp. 2334-2342, 1991.
- [15] Baca, C.M., Travis, R., Bang, M., "Three-Dimensional, Single-Phase, Non-Isothermal CFD Model of a PEM Fuel Cell," Journal of Power Source, Vol. 178, pp. 269-281, 2008.
- [16] Afshari, E., Jazayeri, S.A., Mollayi Barzi, Y., "Effect of Water Phase Change on Temperature Distribution in Proton Exchange Membrane Fuel Cells," Heat and Mass Transfer, Vol. 46, pp.1295–1305, 2101.
- [17] Carton, J., Olabi, A., "Three-Dimensional Proton Exchange Membrane Fuel Cell Model: Comparison of Double Channel and Open Pore Cellular Foam Flow Plates," Energy, (In Press) 2016.
- [18] Xing, L., Liu, X., Alaje, T., Kumar, R., Mamlouk, M., Scott, K., "A Two-Phase Flow and Non-Isothermal Agglomerate Model for a Proton Exchange Membrane (PEM) Fuel Cell," Energy, Vol. 73, pp. 618–34, 2014.
- [19] Afshari, E., Houreh, N.B., "Numerical Predictions of Performance of the Proton Exchange Membrane Fuel cell With Baffle(s)-Blocked Flow Field Designs," International Journal of Modern Physics B, Vol. 28, No. 16, pp. 1450097–1450113, 2014.
- [20] Perng, S.W., Wu, H.W., Jue, T.C., "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 pp. 1541–1554, 2009.
- [21] Liu, H., Li, P., Hartz, A., Wang, K., "Effects of Geometry/Dimensions of Gas Flow Channels and Operating Conditions on High-Temperature PEM Fuel Cells," International Journal of Energy Environment Engineering, Vol. 6, pp. 75–89, 2015.
- [22] Duy, V.N., Kim, K., Lee, J., Ahn, J., Park, S., Kim, T., Kim, H.M., "Parametric Simulations of Optimum Flow-Field Configuration for Efficient Proton Exchange Membrane Fuel Cell," International Journal of Electrochemical Science, Vol. 10, pp. 5842–5861, 2015.
- [23] 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, pp. 423-432, 2009.
- [24] Afshari, E., Jazayeri, S.A., "Effects of the Cell Thermal Behavior and Water Phase Change on a Proton Exchange Membrane Fuel Cell Performance," Energy Conversion and Management, Vol. 51, No. 4, pp. 655-662, 2010.