

بررسی تجربی تأثیر حالت بهره‌برداری انتها‌باز و انتها‌بسته بر مدیریت آب در استک پیل سوختی پلیمری H_2/O_2

مظاهر رحیمی اسبویی^{۱*}، ابراهیم علیزاده^۱، علی اکبر رنجبر^۲، سید مجید رهگشای^۱، سید حسین مسروری سعادت^۱، مجید خورشیدیان^۱

^۱آزمایشگاه تحقیقاتی فناوری پیل سوختی، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، فریدون‌کنار، ایران

^۲دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۶/۱۰/۲۰

بازنگری: ۱۳۹۷/۰۲/۱۹

پذیرش: ۱۳۹۷/۰۴/۲۶

ارائه آنلاین: ۱۳۹۷/۰۵/۱۴

کلمات کلیدی:

پیل سوختی شفاف

جریان فیلمی آب

زمان تخلیه

حالت انتها بسته

تغییرات ولتاژ

خلاصه: مدیریت مصرف گازهای واکنشگر پیل‌های سوختی غشاء پلیمری به سه حالت انتها‌باز، برگشت مجدد و انتها‌بسته طبقه‌بندی می‌گردد. گازهای واکنشگر در حالت انتها‌بسته به دلیل انباشته‌شدن گاز بی‌اثر و آب به صورت تناوبی تخلیه می‌گردند. در این مقاله یک استک پیل سوختی پلیمری با صفحات انتهایی شفاف و طراحی منحصر بفرد برای بررسی مدیریت آب در حالت‌های عملیاتی انتها‌باز و انتها‌بسته، طراحی، ساخت و مونتاژ شد. در این مقاله برای اولین بار بحث مدیریت آب در یک استک پیل سوختی پلیمری انتها بسته آندی و کاتدی با جزییات کامل مربوط به نحوه تشکیل و دفع آب مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج نشان داده است تا چگالی جریان ۲۰۰ میلی‌آمپر بر سانتیمتر مربع آب تشکیل شده به صورت قطرات مجزا بوده و هیچگونه جریان فیلمی و انسداد در کانال مشاهده نمی‌شود. همچنین همانگونه که انتظار می‌رفت تجمع قطرات و جریان فیلمی در نیمه پایینی بیشتر از نیمه بالایی بوده و لذا کاهش تعداد کانال برای افزایش سرعت و دفع آب در نیمه پایینی میدان شارش گازهای واکنشگر ضروری می‌باشد. همچنین نتایج نشان داده است که برای عملکرد پایدار در حالت انتها‌بسته حداکثر زمان ممکن برای بسته‌بودن شیرهای خروجی ۵ ثانیه و حداقل زمان لازم برای بازبودن آن ۵ ثانیه بوده است.

پیش‌رانش مستقل از هوا و مخصوصاً در زیردریایی‌ها موجب افزایش ماندگاری شده‌اند.

به منظور دستیابی به بازده بالا در سری پیل سوختی باید واکنشگرها به صورت یکنواختی در سطح فعال پیل سوختی پخش شوند که این امر از طریق طراحی مناسب میدان شارش صفحات دو قطبی حاصل می‌شود. صفحات دو قطبی به صورت کلی وظایف اساسی متفاوتی از قبیل جمع‌آوری جریان و انتقال آن، پخش واکنشگرها بر سطح فعال مجموعه الکترو-غشاء. مدیریت آب تولیدی و همچنین نقش نگهدارنده مکانیکی برای غشا را بر عهده دارند. عملکرد پیل سوختی تا حد زیادی تابع انتقال و توزیع مناسب واکنشگرها بر کاتالیست الکتروود و همچنین تابع مدیریت مناسب آب از قبیل توزیع و خارج سازی مناسب آب تولیدی در طول میدان شارش می‌باشد. طراحی میدان شارش، عملکرد پیل سوختی را با کنترل گرادیان غلظت واکنشگرها، دبی جریان، افت فشار، توزیع آب و پروفیل دانسیته جریان تحت

۱- مقدمه

نگرانی جهانی در مورد آلودگی محیط زیست و کاهش ذخایر سوخت‌های فسیلی، دانشمندان در جستجوی جایگزینی مناسب برای سوخت‌های فسیلی با استفاده از انرژی پاک بوده‌اند. در دهه‌های اخیر یکی از بهترین جایگزین‌ها برای سوخت‌های فسیلی، پیل‌های سوختی پلیمری بوده است. پیل‌های سوختی پلیمری به عنوان یک منبع انرژی پاک قابلیت استفاده در نیروگاه‌ها، اتومبیل‌ها و وسایل قابل حمل، کاربردهای فضایی و زیردریایی‌ها را دارند. از مزایای پیل سوختی پلیمری آماده‌سازی آسان، عمر طولانی، انجام عملیات در دمای کم، چگالی توان بالا، شروع به کار سریع و نشستی کم است. تمامی این ویژگی‌ها، صنایع مختلف را برای سرمایه‌گذاری در این بخش تشویق کرده است. در این میان پیل‌های سوختی پلیمری انتها‌بسته با توجه به طراحی خاص و قابلیت مصرف سوخت بالای ۹۹ درصد در سامانه‌های

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: mrahimi@mut.ac.ir



تأثیر قرار می‌دهد. از آنجایی که ساخت، تست و ارزیابی عملکرد انواع میدان‌های شارش نیازمند صرف وقت و هزینه زیاد می‌باشد لذا نیاز به مدل‌سازی و شبیه‌سازی میدان‌های شارش و بررسی عملکرد آنها به منظور دستیابی به طرحی مناسب امری اجتناب ناپذیر است.

در زمینه بررسی میدان‌های شارش گاز در پیل‌های سوختی پلیمری تحقیقات گسترده‌ای انجام شده است. لی و همکاران [۱] به بهینه‌سازی ابعاد کانال در یک میدان شارش ماریپیجی تک کاناله به صورت تجربی و عددی به پرداختند. بررسی آن‌ها نشان داده است که برای دستیابی به چگالی جریان بالا باید از نسبت عرض کانال به مجموع عرض کانال و ریب کوچکتری استفاده کرد. آن‌ها برای یک مجموعه پیل سوختی با ابعاد بهینه و دلخواه مقایسه‌ای را انجام دادند و گزارش کردند که ابعاد بهینه شده جریان بیشتری در یک ولتاژ خاص تولید می‌کند. جون و همکاران [۲] در یک شبیه‌سازی عددی به بررسی توزیع پتانسیل و چگالی جریان و مقدار آب غشا در رطوبت‌های بالا و پایین در چهار نوع میدان ماریپیجی تک کاناله، دوکاناله، تک کاناله دایره‌وار و تک کاناله متقارن پرداختند. نتایج بررسی آن‌ها نشان داده است که در رطوبت بالا دو کاناله بهترین عملکرد را بر اساس منحنی پلاریزاسیون در توزیع یکنواخت جریان دارد در حالی که در رطوبت پایین تفاوت جزئی بین چهار کانال مورد بررسی در افزایش عملکرد و توزیع یکنواخت جریان وجود داشت. چوی و همکاران [۳] تأثیر نسبت ارتفاع به عرض سطح مقطع کانال‌های مختلف را بر روی عملکرد پیل سوختی با میدان جریان ماریپیجی چندگانه با سطح فعال 25 cm^2 به صورت عددی بررسی کرده‌اند. نتایج نشان داده که با افزایش ارتفاع کانال افت فشار به دلیل افزایش سطح مقطع جریان گاز کاهش می‌یابد. این اثر باعث تجمع آب مایع در خروجی می‌شود که موجب کاهش اندکی در عملکرد پیل می‌شود. آن‌ها گزارش کردند خشکی غشاء با عریض کردن کانال افزایش می‌یابد و کسر جرمی اکسیژن در مناطق زیر دندان به جابه‌جایی همرفتی افزایش می‌یابد و وقوع واکنش‌های الکتروشیمیایی در این نواحی درصد رطوبت را افزایش می‌دهند. جیتیش و همکاران [۴] در یک کار عددی میدان‌های شارش موازی، ماریپیجی و ترکیبی از این‌ها را بررسی کردند. آن‌ها کار عددی خود را با یک کار تجربی مقایسه کرده و گزارش کردند که میدان ترکیبی از نظر انتقال و دفع آب و ایجاد توزیع جریان یکنواخت نسبت به میدان‌های موازی و

ماریپیجی عملکرد بهتری دارد.

مدیریت مصرف گازهای واکنشگر پیل‌های سوختی غشاء پلیمری به سه حالت انتها‌باز، برگشت مجدد و انتها‌بسته طبقه‌بندی می‌گردد. در حالت انتها‌باز، گازهای واکنشگر هیدروژن و اکسیژن به مقدار زیاد وارد پیل سوختی می‌شوند که بخشی از گازهای واکنشگر مصرف شده و مابقی آن نیز آب تولیدی را از پیل سوختی خارج می‌نمایند. حالت انتها‌باز معمولاً برای تست‌های آزمایشگاهی بکار می‌رود. در حالت برگشت مجدد، گاز استفاده‌نشده به وسیله پمپ یا کمپرسور به ورودی باز می‌گردد. این حالت برای پیل‌های سوختی غشاء پلیمری کوچک قابل حمل و یا پیل‌های سوختی که باید در فضاهای محدود نصب شوند مناسب نمی‌باشد. در حالت انتها‌بسته، هیدروژن و اکسیژن دقیقاً به اندازه مصرف وارد پیل سوختی می‌گردند. گازهای واکنشگر در حالت انتها‌بسته می‌بایست به دلیل انباشته شدن گاز بی‌اثر و آب به صورت تناوبی تخلیه گردند. روش‌های مختلفی همچون رادیوگرافی نوترونی، تصویربرداری با استفاده از اشعه X و تصویربرداری با استفاده از اشعه مادون قرمز برای بررسی توزیع آب در پیل سوختی وجود دارد. این روش‌ها به دلیل هزینه بالا، خطرناک بودن و مشکلات ناشی از ورود یا خرید تکنولوژی در اکثر موارد قابل اجرا نبوده و توجیه اقتصادی ندارد. لذا ساده‌ترین، کم‌هزینه‌ترین و در دسترس‌ترین روش استفاده از پیل‌های سوختی شفاف است.

جانگ ون چوی و همکاران [۵] به بررسی عملکرد تک سل پیل سوختی هیدروژن- هوا در حالت آند انتها بسته پرداختند. اگرچه فرایند تخلیه برای حمایت از غشاء در حالت انتها بسته ضروری است، به علت خروج هیدروژنی که در واکنش شرکت نکرده به همراه آب در هنگام تخلیه، بازدهی پیل کاهش می‌یابد. مطالعه تجربی آن‌ها برای شناسایی مشخصات سیکل تخلیه و تلاش برای افزایش زمان‌های تخلیه متوالی به منظور افزایش بازدهی پیل متمرکز شده بود. آنها از روش تزریق ضربانی هیدروژن به منظور افزایش بازدهی استفاده کردند. با توجه به تست‌های انجام شده با استفاده از جریان ضربانی نتایج زیر توسط آن‌ها گزارش شده است:

- نرخ پایین آمدن ولتاژ پیل با استفاده از جریان ضربانی کم می‌شود زیرا مقادیر آب مایع در منافذ لایه نفوذ گازی را کم می‌کند.
- متوسط زمان‌های تخلیه متوالی کم می‌شود در نتیجه بازده پیل افزایش می‌یابد.

در سمت آند و جریان پالسی در سمت کاتد را به منظور دفع آب مایع مورد استفاده قرار دادند. افزایش ولتاژ در مواقع تخلیه و جریان ناگهانی سمت کاتد به عنوان یک ابزار شناسایی وضعیت‌های غرقابگی و مسدود شدن کانال‌ها می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد. کاهش ولتاژ ۵-۸ میلی ولت بر دقیقه به هنگام مسدودبودن کانال‌های آند مشاهده شد، بدون اینکه هیچ آب‌گرفتگی در کانال‌های کاتد اتفاق بیفتد که نشان از اهمیت غرقابگی آند در کارایی پیل دارد.

موکوتیگی و همکاران [۱۱] به بررسی عملکرد یک استک ۵ سل پیل سوختی با سطح فعال 300 cm^2 در حالت انتها بسته پرداختند. آن‌ها تغییرات ولتاژ پیل سوختی را در حالت انتها بسته بعد از افزایش یک گام در بارگذاری مورد بررسی قرار دادند و رفتار آن را تحلیل کردند. همچنین تأثیر موقعیت سل در داخل استک را بر عملکرد آن مشاهده کردند. سل‌هایی که در ورودی گازها قرار دارند عملکرد بهتری نسبت به آن‌هایی که در انتهای استک قرار دارند از خود نشان دادند. این اختلاف ناشی از تجمع بیشتر آب در سل‌های انتهایی و فشار جزئی کمتر گازها در این سل‌ها است.

یانگ و همکاران [۱۲] تأثیر پارامترهای عملکردی همانند میزان رطوبت، فشار هیدروژن و چگالی جریان را به صورت تجربی بر عملکرد یک پیل سوختی با آند انتها بسته بررسی کردند. معیار تخلیه در سمت آند کاهش 0.1 ولتی ولتاژ سل بوده و مدت زمان متوسط بین ۲ تخلیه متوالی به عنوان دوره زمانی تخلیه در نظر گرفته شده است. چگالی جریان موضعی برای مطالعه تأثیر محلی پارامترها اندازه گرفته شد. نتایج آن‌ها نشان داد مدت زمان بین دو تخلیه متوالی با افزایش رطوبت ورودی کاتد و افزایش چگالی جریان کاهش یافته و با افزایش فشار هیدروژن و استوکیومتری هوای سمت کاتد افزایش می‌یابد.

وان و همکاران [۱۳] خصوصیات عملکردی یک پیل سوختی اکسیژن-هیدروژن با سطح فعال 75 cm^2 را در حالت انتها بسته به صورت تئوری و تجربی مورد مطالعه قرار دادند. آن‌ها گزارش نمودند که با افزایش دما مقاومت سل افزایش می‌یابد. اگرچه نمودار ولتاژ با دما به صورت منحنی درجه دوم است و بهترین عملکرد در چگالی جریان 800 mA/cm^2 و در دمای 65 درجه سانتیگراد حاصل شد.

در مقالات قبلی تیم پژوهش حاضر [۱۴ و ۱۵] مدیریت آب در یک تک سل پیل سوختی به صورت عددی و تجربی مورد بررسی قرار گرفته است. با توجه به اینکه در تک سل پیل سوختی میدان

• بیشترین زمان بسته بودن شیر خروجی سمت آند برای جریان ضربانی با فرکانس 8 Hz و دامنه 20 mm ، 546 ثانیه بود که $3/4$ برابر از سامانه بدون جریان پالسی با شرایط عملکردی یکسان بیشتر است.

جان ونگ چوی و همکاران [۶] مطالعاتی را نیز بر روی پیل سوختی پلیمری با کاتد انتها بسته برای کارکرد در زیر دریایی‌ها و کاربردهای فضایی انجام دادند. همچنین توسط آن‌ها مطالعاتی بر روی ارتقاء عملکرد این سامانه‌ها با اعمال اثرات پالسی صورت گرفت. در این سامانه نیز از شیرهای تخلیه آب که به صورت تناوبی باز و بسته می‌شوند برای زدودن آب استفاده شده است. در این تحقیق کانال به صورت مارپیچی تکی با سطح مقطع 25 سانتی مترمربع انتخاب شد. آن‌ها دو روش برای طراحی پیل سوختی انتها بسته ارائه دادند. همچنین در این تحقیق مشاهده شد با افزایش بسامد و دامنه پالس‌ها باز شدن شیرها با تأخیر بیشتری انجام می‌پذیرد.

چن و همکاران [۷] به صورت تحلیلی و تجربی استراتژی‌های مختلف تخلیه برای پیل سوختی با آند انتها بسته را بر اساس غلظت نیتروژن بررسی کردند. آن‌ها از تست تجربی برای اعتبارسنجی مدل دینامیکی خود استفاده کردند. آن‌ها گزارش کردند که غلظت نیتروژن در سمت آند را می‌توان به عنوان تابعی از چگالی جریان و شرایط عملکردی به یک کنترلر داد و از آن طریق فرایند پرج را مدیریت کرد. ساسمیتو و همکاران [۸] به بررسی عددی یک پیل سوختی پلیمری با آند انتها بسته در حالت دوبعدی پرداختند. بررسی آن‌ها به دو کانال موازی برای آند و کاتد محدود بود. آن‌ها تأثیر زمان بسته بودن مختلف را بر عملکرد پیل بررسی کردند.

گومز و همکاران [۹] تأثیر پارامترهای عملکردی بر کارایی گذرای یک استک پیل سوختی پلیمری هیدروژن- هوا با آند انتها بسته را مورد مطالعه قرار دادند. آنها تجمع آب در سمت آند و عبور عرضی نیتروژن از سمت کاتد به آند را موجب کاهش عملکرد پیل سوختی با زمان دانسته‌اند. آب و نیتروژن جمع شده نیاز به دفع مناسب و مؤثری با استفاده از روش‌های تخلیه دارند تا عملکرد مناسب و پایدار پیل سوختی را تضمین کنند.

سیگل و همکاران [۱۰] تجمع آب مایع در داخل یک تک پیل سوختی هیدروژن- هوا با سطح فعال 53 cm^2 با آند انتها بسته را با استفاده از رادیوگرافی نوترونی مورد مطالعه قرار دادند. تخلیه

در حالت انتها بسته به علت خارج نشدن گازها از پیل سوختی واکنش دهنده‌ها به ناچار کاملاً مصرف می‌گردند و می‌توان ضریب استوکیومتری را خیلی نزدیک به یک در نظر گرفت. این عمل هرچند باعث افزایش راندمان مصرف گازها در پیل و کم کردن تجهیزات جانبی می‌گردد ولی ممکن است مشکلاتی از نظر غرقابگی در آند و کاتد را به همراه داشته باشد. چون در این روش مسیری برای حذف آب‌های اضافی وجود ندارد.

مشکل آب در سمت کاتد پیل سوختی یعنی جایی که محصول واکنش الکتروشیمیایی آب است تشدید می‌شود. آب در اثر درگ الکترواستمیتیک از سمت آند به کاتد انتقال می‌یابد و یا در اثر نفوذ معکوس از سمت کاتد به آند انتقال می‌یابد. فهم دقیق از توزیع آب در داخل پیل سوختی برای طراحی و بهینه کردن عملکرد آن ضروری می‌باشد. این موضوع به ویژه در پیل‌های سوختی انتها بسته که فقط در زمان‌های تخلیه آب اجازه خروج پیدا می‌کند بسیار مهم می‌باشد. از یک طرف به منظور افزایش ضریب مصرف سوخت مطلوب است که تا حداکثر زمان ممکن برای مسدود بودن خروجی گازها وجود داشته باشد و از طرفی به علت تجمع آب و ناخالصی‌ها، بازدهی و عملکرد سل به علت کم شدن سطح فعال شدیداً تحت تأثیر قرار می‌گیرد. لذا درک درست و عمیق از فرایندهای تجمع آب در کانال‌ها و انتقال آب در زمان تخلیه و تنظیم زمان تخلیه برای خروج آب و ناخالصی‌ها بدون خارج شدن مقدار قابل توجه از گاز واکنشگر به فضای خارج از سل امری اجتناب ناپذیر است، به‌ویژه برای مواردی که نیاز است پیل یا توده پیل برای مدت زمان طولانی در حالت عملیاتی باشد. خروج گازهای واکنشگر در زمان تخلیه علاوه بر خطرات ناشی از هیدروژن موجب افزایش مصرف سوخت و کاهش بازده کل سامانه می‌شود.

در این مقاله در قسمت اول ابتدا از طریق مدل‌سازی عددی میدان شارش مناسب برای عملکرد پیل سوختی در حالت انتها بسته پیشنهاد شده و سپس با توجه به میدان طراحی شده یک استک پیل سوختی با تمامی جزئیات مربوط به قطعات طراحی و تمامی پارامترهای موثر بر عملکرد استک و مدیریت آب در حالت انتها باز و انتها بسته تست شده است.

۳- بررسی عددی

در این قسمت معادلات حاکم بر پیل سوختی غشا پلیمری بیان

خنک‌کاری و منیفولدهای توزیع واکنشگر نداریم بحث مدیریت آب به مراتب کم‌اهمیت‌تر از استک پیل سوختی می‌باشد. حجم آب تولیدی و مدیریت حرارت در استک به مراتب سخت‌تر و تکنیکی‌تر از تک سل می‌باشد. همچنین در مقاله حاضر تمامی پارامترهای موثر بر عملکرد و جزئیات مربوط به نحوه تشکیل و دفع آب مورد توجه قرار گرفته است که این امر در مقالات قبلی لحاظ نشده است.

در مورد تحقیقاتی که در ارتباط با طراحی، ساخت و تست پیل‌های سوختی انتها بسته انجام شده است باید گفت که اکثر تحقیقات فقط به انتها بسته بودن سمت آند پرداخته و سمت کاتد مورد توجه آن‌ها قرار نگرفته است. نتایج این مقاله نشان داده است که مدیریت آب در سمت کاتد بسیار مهم‌تر و بحرانی‌تر از سمت آند است. همچنین در هیچکدام از تحقیقات، پارامترهای تخلیه در استک و تک سل به صورت دقیق و مدون مورد تحلیل قرار نگرفته است و هیچگونه جزئیاتی در ارتباط با مدیریت پارامترهای تخلیه در اختیار محققین قرار نمی‌دهند. در این مقاله برای اولین بار بحث مدیریت آب در یک استک پیل سوختی پلیمری انتها بسته آندی و کاتدی با جزئیات کامل مربوط به نحوه تشکیل و دفع آب مورد بررسی قرار گرفته است. تأثیر تمامی پارامترهای عملکردی مورد بررسی قرار گرفته و تحلیل شدند. از نکات برجسته این مقاله تشریح ارتباط بین تشکیل، انباشتگی و دفع آب با تغییرات فشار، ولتاژ و جریان الکتریکی می‌باشد. نتایج مقاله حاضر در کاربری‌های صنعتی بسیار مفید و قابل اعمال بوده و اطلاعات بسیار ارزشمند و بدیعی در اختیار پژوهشگران و محققین عرصه پیل سوختی قرار می‌دهد.

۲- ضرورت انجام تحقیق

با توجه به اینکه گازهای واکنش دهنده با صرف هزینه‌های زیاد بدست می‌آیند و همین‌طور ذخیره‌سازی آنها بخصوص در کاربردهای فضایی و هوایی و زیردریایی‌ها محدود و پرهزینه می‌باشد محققان به دنبال روش‌هایی هستند تا راندمان مصرف سوخت را در پیل‌های سوختی افزایش دهند. در حالت کانال‌های انتها باز این کار با چرخش مجدد گازهای خارج شده به داخل پیل توسط پمپ یا دمنده انجام می‌پذیرد و این خود باعث افزایش افت فشار گازها و نیز مصرف توان اضافی در دستگاه‌های جانبی می‌شود که راندمان عملکردی پیل سوختی را کاهش می‌دهد.

۳-۲- شرایط مرزی

در قسمت ورودی میدان‌های آند و کاتد در حالت انتها بسته از شرط فشار ورودی استفاده می‌شود و با توجه به رطوبت گازهای ورودی کسر جرمی‌ها مشخص می‌شود. برای حالت انتها باز نیز از شرط دبی جرمی ورودی استفاده می‌شود. در قسمت خروجی نیز شرایط مرزی برای حالت انتها باز (رابطه (۹)) و بسته (رابطه (۱۰)) به صورت زیر می‌باشد.

$$P = P_{ref}, \frac{\partial \vec{V}}{\partial n} = 0, \frac{\partial T}{\partial n} = 0, \quad (9)$$

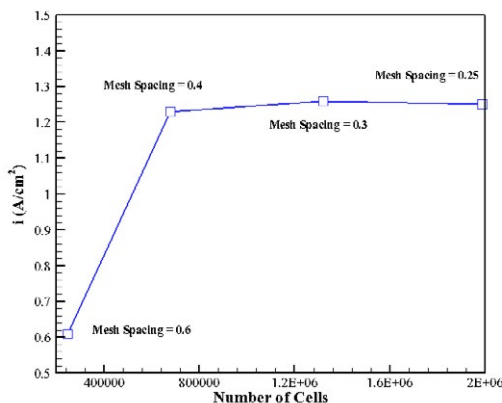
$$\frac{\partial Y_i}{\partial n} = 0, \frac{\partial s}{\partial n} = 0$$

$$\vec{V} = 0, \frac{\partial \vec{V}}{\partial n} = 0, \quad (10)$$

$$\frac{\partial T}{\partial n} = 0, \frac{\partial Y_i}{\partial n} = 0, \frac{\partial s}{\partial n} = 0$$

۳-۳- اعتبارسنجی

به منظور انجام حل مستقل از شبکه برای یک هندسه‌ی معین و در یک ولتاژ معین تغییرات چگالی جریان را مورد بررسی قرار داریم. نتایج نشان می‌دهد بین مش با اندازه ۰/۳ و ۰/۲۵ میلی‌متر اختلاف ناچیزی در حدود ۰/۸ درصدی وجود دارد بنابراین از مش ۰/۳ میلی‌متری برای محاسبات استفاده شده است. تعداد و اندازه مش در شکل ۱ نشان داده شده است.



شکل ۱: بررسی استقلال از مش برای نمونه انتخاب شده

Fig. 1: Mesh Independence study for selected sample

می‌شود. همچنین حل مستقل از شبکه و اعتبارسنجی نتایج عددی با نتایج تجربی ارائه می‌شود. نتایج مربوط به حل عددی برای انتخاب میدان شارش بهینه به طور مفصل در کار منتشر شده توسط همین گروه تحقیقاتی آمده است [۱۶].

۳-۱- معادلات حاکم

مدل ریاضی برای سیال نیوتنی و در حالت جریان آرام به ترتیب شامل معادله پیوستگی جرم در حالت گاز، معادله پیوستگی جرم در حالت مایع، معادله مومنتم، معادله انرژی، معادله گونه‌ها، محتوای آب غشاء، پتانسیل غشاء و پتانسیل جامد می‌باشد [۱۷]. همچنین ترم‌هایی موجود در معادلات در مرجع [۱۷] به تفصیل شرح داده شده است.

$$\frac{\partial}{\partial t} (\epsilon \rho^{(g)}) + \nabla \cdot (\rho^{(g)} \mathbf{u}^{(g)}) = S_{mass} - \dot{m}_{H_2O} \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\epsilon \rho^{(l)}) + \nabla \cdot (\rho^{(l)} \mathbf{u}^{(l)}) = \nabla \cdot (D^{(c)} \nabla s) + \dot{m}_{H_2O} \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\epsilon \rho^{(g)} \mathbf{u}^{(g)}) + \nabla \cdot (\rho^{(g)} \mathbf{u}^{(g)} \mathbf{u}^{(g)}) = \nabla \cdot \sigma + S_{mom} \quad (3)$$

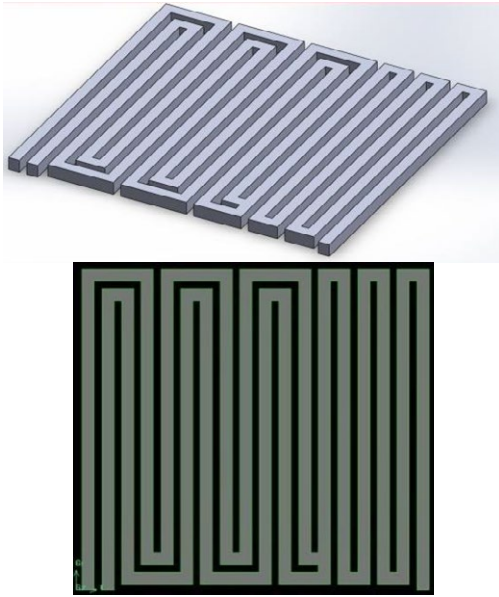
$$\frac{\partial}{\partial t} (\epsilon \rho^{(g)} C_p^{(g)} T + (1 - \epsilon) \rho^{(s)} C_p^{(s)} T) + \nabla \cdot (\rho^{(g)} C_p^{(g)} \mathbf{u}^{(g)} T) = \nabla \cdot (k_{eff} \nabla T) + S_{temp} \quad (4)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\epsilon \rho^{(g)} \omega_i^{(g)}) + \nabla \cdot (\rho^{(g)} \mathbf{u}^{(g)} \omega_i^{(g)}) = \nabla \cdot (\rho^{(g)} D_{i,eff}^{(g)} \nabla \omega_i^{(g)}) + S_i \quad (5)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\rho^{(m)}}{M^{(m)}} M_{H_2O} \lambda \right) + \nabla \cdot \left(\frac{n_d M_{H_2O}}{F} i^{(m)} \right) = \nabla \cdot \left(\frac{\rho^{(m)}}{M^{(m)}} M_{H_2O} D_{H_2O,eff}^{(m)} \nabla \lambda \right) \quad (6)$$

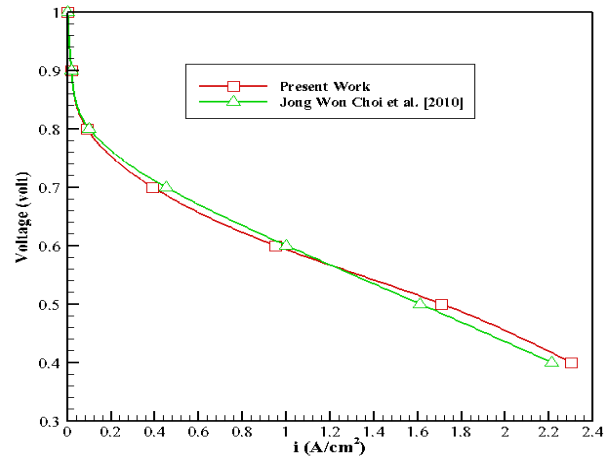
$$\nabla \cdot (\sigma_{eff}^{(m)} \nabla \phi^{(m)}) = -S_{pot} \quad (7)$$

$$\nabla \cdot (\sigma_{eff}^{(s)} \nabla \phi^{(s)}) = S_{pot} \quad (8)$$



شکل ۳: نمای دوبعدی و سه‌بعدی از هندسه بهینه شده

Fig. 3: 2D and 3D view of optimized geometry



شکل ۲: اعتبار سنجی عددی انجام شده با کارجونگ ون و همکاران [۶]

Fig. 2: Numerical Validation with Choi et al. [6] results

برای اعتبار سنجی از داده‌های تجربی مقاله آقای جونگ ون و همکاران [۶] استفاده شده است. همانطور که در شکل ۲ مشاهده می‌گردد نتایج شبیه‌سازی با داده‌های تجربی مقاله همخوانی خوبی دارد.

۳-۴- روش حل

معادلات حاکم بر جریان و انتقال حرارت با استفاده از روش حجم محدود گسسته‌سازی می‌شود و از الگوریتم سیمپل برای حل معادلات کوپل فشار و سرعت در یک شبکه هم‌جا استفاده می‌شود. برای گسسته‌سازی معادلات از روش پیشرو مرتبه اول به علت پایداری بیشتر و زمان حل کمتر استفاده شده است. برای همگرایی معادلات خطای 10^{-4} برای جریان سمت‌های آند و کاتد در نظر گرفته شده است. مدل‌سازی و شبکه‌بندی در نرم‌افزار گمبیت^۱ و شبیه‌سازی در نرم‌افزار فلونت انجام شده است.

در شکل ۳ هندسه بهینه شده برای ساخت نشان داده شده است. جزییات بیشتر مربوط به طراحی در مقاله همین گروه تحقیقاتی [۱۷] آمده است. عرض کانال $1/8$ ، عرض ریب $1/2$ و عمق کانال ۲ میلی‌متر است. سطح فعال ۲۵ سانتیمتر مربع در نمونه شبیه‌سازی شده است.

۴- طراحی و ساخت اجزای مختلف استک پیل شفاف

۴-۱- صفحات انتهایی

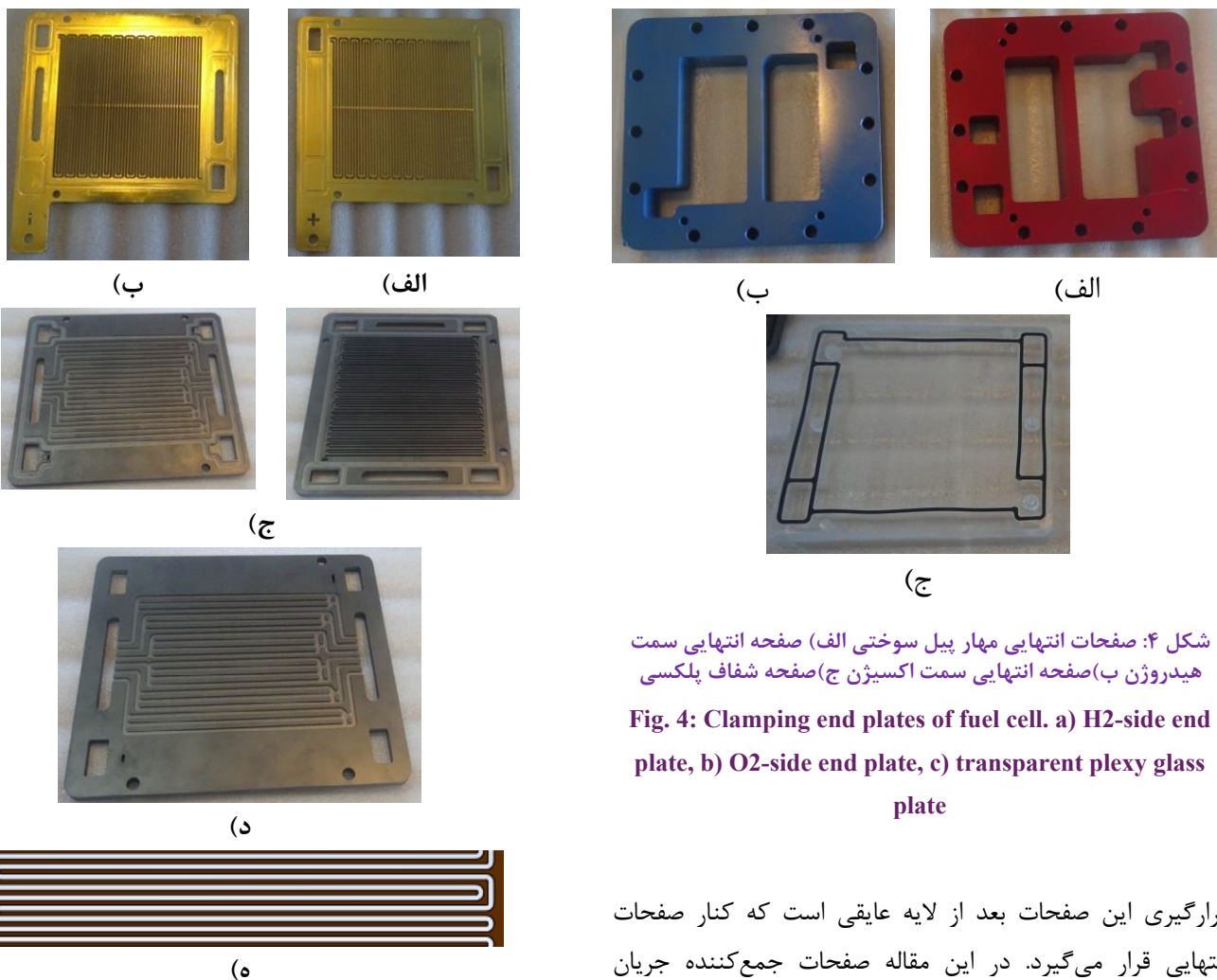
نقش عمده صفحات انتهایی فراهم آوردن توزیع یکنواخت فشار در

- 1 Gambit 2.3.16
- 2 Fluent6.3.26

سطح اجزای مختلف یک پیل (صفحات دوقطبی، لایه نفوذ گاز، غشا و صفحات جمع‌کننده جریان) و در نتیجه کاهش مقاومت تماسی می‌باشد. در این مقاله با توجه به شفاف بودن تک سل از صفحات پلکسی‌گلس به عنوان صفحات انتهایی نگه‌دارنده استفاده شده است. با توجه به صلبیت کم صفحات پلکسی‌گلس صفحات آهنی به ضخامت ۴ سانتیمتر به صورت نواری و کمربندی بر روی صفحات پلکسی قرار گرفته است تا از تماس مناسب بین اجزاء مطمئن شد. صفحات پلکسی و آهنی هردوسمت سوخت و اکسیدان که برای مهار استک پیل سوختی استفاده شده، در شکل ۴ نشان داده شده است. جای بین‌های راهنمای مونتاژ، پیچ‌های مهار و محل عبور منی‌فولد گاز در روی صفحات تعبیه شده است. شیار آب‌بندی به ضخامت ۱ میلی‌متر برای آب‌بندی در سمت تماس پلکسی با صفحات جمع‌کننده‌ی جریان قرار دارد. همچنین ورود و خروج سیال خنک‌کاری از سمت آند صورت می‌گیرد و منی‌فولد ورودی و خروجی آن بر روی صفحات انتهایی و پلکسی تعبیه شده است.

۴-۲- صفحات جمع‌کننده جریان

این صفحات که معمولاً از مواد با قابلیت هدایت الکتریکی بالا مانند مس و یا مس با پوشش طلا انتخاب می‌شوند، وظیفه جمع‌آوری جریان تولیدی و شارش آن در مدار خارجی را بر عهده دارند. محل



شکل ۴: صفحات انتهایی مهار پیل سوختی الف) صفحه انتهایی سمت هیدروژن ب) صفحه انتهایی سمت اکسیژن ج) صفحه شفاف پلکسی

Fig. 4: Clamping end plates of fuel cell. a) H2-side end plate, b) O2-side end plate, c) transparent plexy glass plate

قرارگیری این صفحات بعد از لایه عایقی است که کنار صفحات انتهایی قرار می‌گیرد. در این مقاله صفحات جمع‌کننده جریان از جنس مس می‌باشد که میدان شارش کاتد سل اول و آند سل سوم واکنشگرها نیز بر روی آن‌ها طراحی شده است. این کار برای مشاهده آب تولیدی در زمان انتهابسته بودن پیل در نظر گرفته شده است. همچنین با این عمل مقاومت تماسی بین صفحات دوقطبی و صفحات جمع‌کننده جریان نیز حذف شده است. یکی از سخت‌ترین قسمت‌های ساخت پیل، ساخت میدان شارش مارپیچی کاهشی بر روی صفحات جمع‌کننده جریان بود که نیازمند مهارت خاصی در مهار قطعه‌کار بود. در شکل ۵ تصاویر مربوط به صفحات جمع‌کننده جریان و میدان‌های شارش و خنک‌کاری گرافیتی نشان داده شده است. در یک سوم پایانی تعداد کانال‌های موازی مارپیچ از ۲ عدد به یک عدد کاهش یافت. با این کار سرعت در این ناحیه که محل تجمع آب است افزایش یافته و مومنتم لازم برای دفع آب ایجاد می‌شود.

۴-۳- مجموعه غشاء و الکتروود

معمولاً مجموعه غشاء و الکتروود به صورت یک واحد یکپارچه از

۴-۴- آب‌بندهای نواری و صفحه‌ای

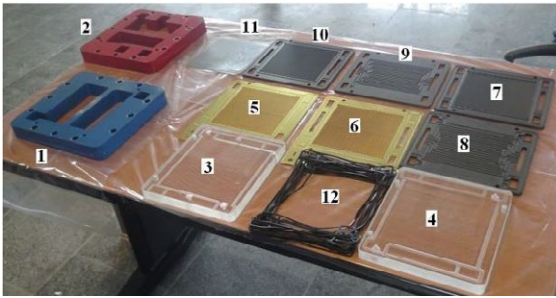
آب‌بندها وظیفه جلوگیری از نشت گاز و آب چه به سمت خارج

شکل ۵: الف) صفحه جمع‌کننده جریان و میدان شارش کاتد سل اول ب) صفحه جمع‌کننده جریان و میدان شارش آند سل اول ج) میدان شارش گاز گرافیتی د) میدان خنک‌کاری پشت صفحات میدان شارش گرافیتی ه) ناحیه کاهش تعداد کانال از ۲ به ۱

Fig. 5: a) current collector plate and flow field of first cell cathode, b) current collector plate and flow field of first cell anode, c) graphite gas flow field, d) cooling flow field on the other side of graphite gas flow field, e) zone of the reduction of the number of channels from 2 to 1

سوی شرکت‌ها عرضه می‌شود. این مجموعه شامل سه جزء لایه نفوذ گاز، لایه کاتالیست و غشاء می‌باشد.

در این مقاله از غشاء ساخت شرکت پکسی تک برای مونتاژ تک سل استفاده شده است که در شکل ۶ نشان داده شده است.



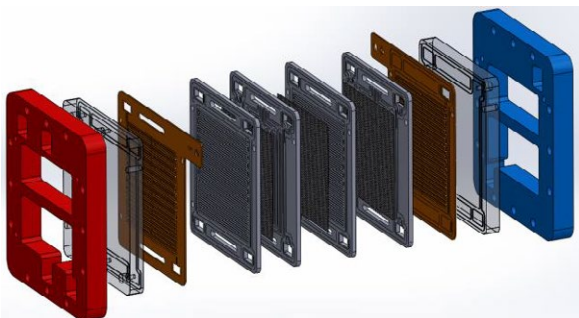
شکل ۷: اجزای استک قبل از مونتاژ نهایی

Fig. 7: Stack components before final assembling

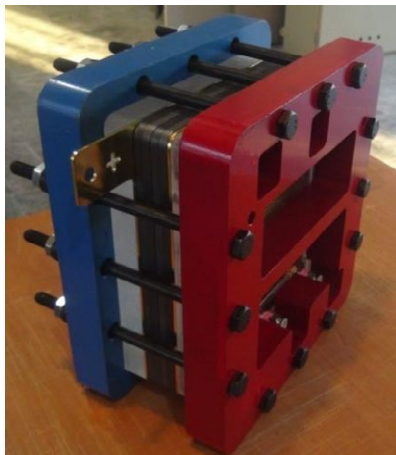


شکل ۶: مجموعه غشاء الکتروود (شرکت PaxiTeck)

Fig. 6: Membrane-electrode assembly of PaxiTeck Company



(الف)



(ب)

شکل ۸: الف) نمای کلی از استک پیل سوختی طراحی شده ب) استک پیل سوختی ساخته شده

Fig. 8: overall view of a) designed fuel cell stack, b) manufactured fuel cell stack

خنک‌کاری ۳/۵۵۶ سانتیمتر در نظر گرفته شده است تا هم جریان آرام باشد و هم سرعت سیال در لوله از محدوده مجاز صوتی بیشتر نشود. نمونه نهایی ساخته شده نیز در این شکل نشان داده شده است.

و چه به سمت دیگر غشاء را به عهده دارند در صورت وجود نشستی بیشتر از حد مجاز سامانه باید به طور دقیق بازبینی و مشکل برطرف شود. این نشستی در سمت هیدروژن به علت قابلیت خوداشتعالی این گاز بسیار خطرناک است. معمولاً مطابق استاندارد کمسیون بین المللی الکترونیک^۱ [۱۸]، سامانه باید تا دو برابر فشار کاری از نشستی به دور باشد. در این مقاله با توجه به اینکه صفحات جمع‌کننده جریان در تماس با صفحات شفاف پلکسی هستند نیاز به آببندهای صفحه‌ای نیست و فقط از آببندهای نواری استفاده شده است. اجزای استک قبل از مونتاژ در شکل ۷ نشان داده شده است که شامل ۱- صفحه انتهایی فلزی سمت کاتد، ۲- صفحه انتهایی فلزی سمت آند، ۳- صفحه شفاف پلکسی سمت آند، ۴- صفحه شفاف پلکسی سمت کاتد، ۵- صفحه جمع‌کننده جریان و میدان شارش کاتد سل سوم، ۶- صفحه جمع‌کننده جریان و میدان شارش آند سل اول، ۷- میدان شارش گرافیتی آند سل سوم و پشت آن نیمی از عمق میدان خنک‌کاری، ۸- نیمی از میدان شارش خنک‌کاری و پشت آن میدان شارش گاز کاتد سل دوم، ۹- نیمی از میدان شارش خنک‌کاری و پشت آن میدان شارش گاز آند سل دوم، ۱۰- میدان شارش گرافیتی کاتد سل اول و پشت آن نیمی از عمق میدان خنک‌کاری، ۱۱- غشاء، ۱۲- آببندها می‌باشد.

نمای انفجاری از استک طراحی شده در شکل ۸ نشان داده شده است. قطر منیفولد ورودی و خروجی گازهای واکنشگر و سیال

1 International Electrotechnical Commission (IEC)



شکل ۱۱: نرم افزار تست، کنترل و مانیتورینگ استک پیل سوختی

Fig. 11: The software for Test, control and monitoring of fuel cell stack

جدول ۱: شرایط عملیاتی مربوط به تست انتها باز و انتها بسته

Table 1: Operating conditions of open-end and dead-end tests

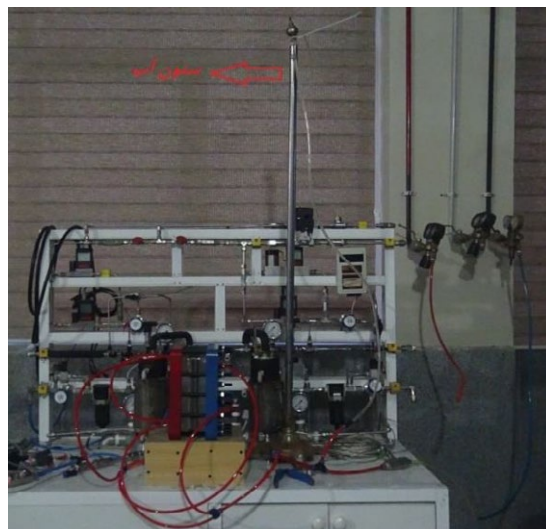
گاز	دما (°C)	فشار، bar	استوکیومتری در حالت انتها باز	رطوبت نسبی (%)
H ₂	۷۰	۱	۱/۲	۱۰۰
O ₂	۷۰	۱	۱/۵	۱۰۰

داده که تقریباً ۱۵ سانتیمتر آب موجود در شیلنگ پنوماتیک ۱۰ در طی این مدت مصرف و جذب غشاء شد. نتایج نشان داده است این عمل زمان فعال سازی را کاهش داده است. شکل ۹ نمایی از فرایند آب بستن استک را نشان می دهد.

بعد از فرایند آب بستن پیل سوختی فرایند فعال سازی همانند تک سل مطابق با دستورالعمل شرکت سازنده انجام شد. بعد از گذشت تقریباً ۱ ساعت در ولتاژ ثابت ۱/۸ ولت، چگالی جریان در مقدار ۱۰۶۷ میلی آمپر بر سانتیمتر مربع ثابت ماند. تغییرات چگالی جریان و توان در طی فرایند فعال سازی در شکل ۱۰ نشان داده شده است.

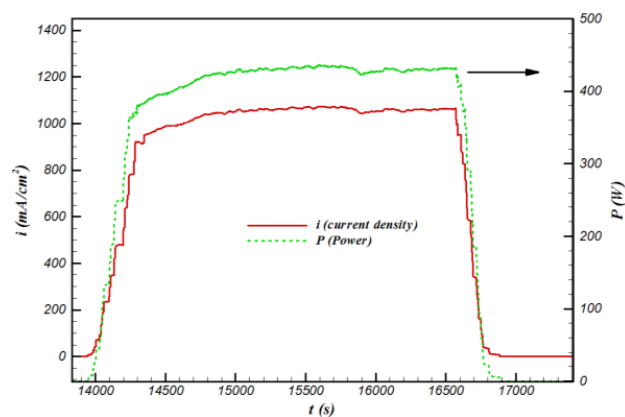
همچنین تصویر صفحه فرمان و کنترل پیل سوختی در شکل ۱۱ نشان داده شده است. قابلیت ثبت ولتاژ تمامی سل ها، کنترل مدار خنک کاری، مانیتورینگ تمامی پارامترهای پیل سوختی در حال انجام تست، قابلیت تنظیم فرایند تخلیه در حالت ولتاژ ثابت و زمان، کنترل رطوبت زن ها و تنظیم دبی ورودی واکنشگرها از جمله قابلیت های این نرم افزار است.

شرایط عملیاتی مربوط به تست های انتها باز و انتها بسته در جدول ۱ آمده است.



شکل ۹: آب بستن پیل سوختی پیش از فرایند فعال سازی

Fig. 9: Hydrating the stack before activation process



شکل ۱۰: نمودار جریان الکتریکی و چگالی جریانی الکتریکی بر حسب زمان در تست فعال سازی

Fig. 10: Power and current density vs. time in activation process

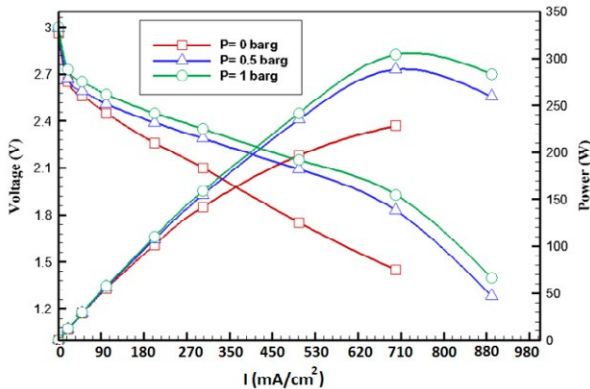
۵- تست تجربی

قبل از انجام تست های نمودار قطبش پیل سوختی غشاء پلیمری مطابق با دستورالعمل شرکت سازنده فعال سازی شد.

بعد از انجام تست های نشتی و توزیع فشار، تمامی میدان های گاز را با آب پر کرده و به مدت ۱۰۰ ساعت استک را در این شرایط نگه داشته شد. به این صورت که آب را از خروجی گازها تزریق کرده و زمانی که آب از ورودی خارج شد، ورودی را مسدود کرده و با شیلنگ پنوماتیک ستونی به ارتفاع ۱/۵ متر از آب را ایجاد کرده و تغییرات ستون آب را در مدت ۱۰۰ ساعت ثبت شده است. مشاهدات نشان

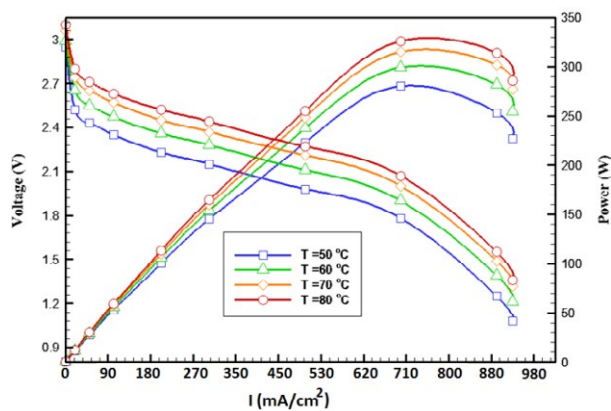
در شکل ۱۴ نمودار قطبیت و توان مربوط به فشارهای کاری مختلف به تصویر کشیده شده است. همانطور که در شکل مشاهده می‌گردد، با افزایش فشار با توجه به افزایش شدت و سرعت نفوذ واکنشگرها به سطح کاتالیست و افزایش شدت واکنش نمودار قطبیت بهبود یافته است. با افزایش فشار از حالت اتمسفریک به ۱ بار توان بیشینه استک ۳۰ درصد افزایش یافته است.

در شکل ۱۵ نمودار قطبیت و توان در دماهای مختلف کاری نمایش داده شده است. برخلاف تک سل در استک پیل سوختی با افزایش دما بهبود عملکرد مشاهده شده است که با توجه به افزایش شدت واکنش با افزایش دما، منطقی می‌باشد. البته با توجه به اینکه در استک میدان خنک‌کاری وجود داشته است مقدار دمای استک قابل تنظیم بوده اما در تک سل این امکان میسر نبوده و دمای تنظیم



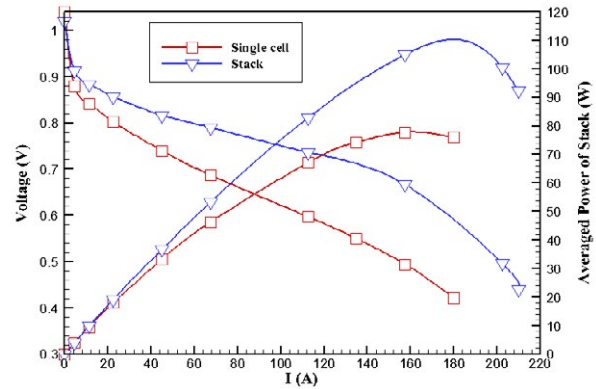
شکل ۱۴: نمودار قطبیت و توان در حالت انتها باز و در فشارهای مختلف کاری

Fig. 14: Polarization and power curves in open-end mode for various operating pressure



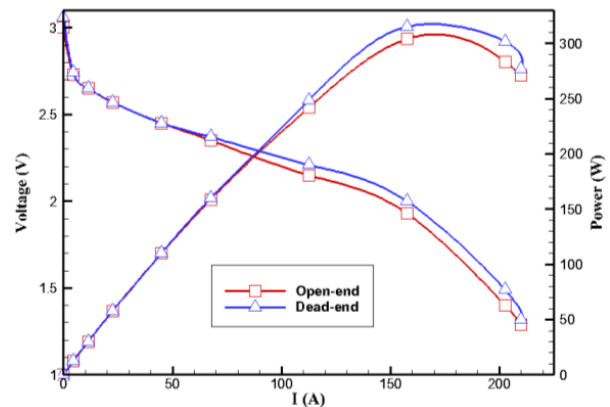
شکل ۱۵: نمودار قطبیت و توان در دماهای مختلف

Fig. 15: Polarization and power curves in different temperatures



شکل ۱۲: نمودار قطبیت و توان متوسط استک و تک سل

Fig. 12: Polarization and average power curves for stack and single cell



شکل ۱۳: نمودار قطبیت و توان استک در حالت انتها باز و انتها بسته

Fig. 13: Polarization and stack power curves in open-end and dead-end modes

در شکل ۱۲ ولتاژ و توان متوسط هر سل استک با تک سل مقایسه شده است. همانگونه که مشاهده می‌شود ارتقاء قابل توجهی در عملکرد مشاهده شده است که ناشی از توزیع فشار بسیار مناسب و کنترل دمای استک می‌باشد. نتایج افزایش ۴۰ درصدی توان بیشینه استک را نسبت به تک سل نشان می‌دهد.

نمودار قطبیت و توان استک در حالت انتها باز و انتها بسته در شکل ۱۳ با هم مقایسه شده است. با اعمال زمان‌های بسته بودن و تخلیه مناسب که هر دو ۵ ثانیه بودند حالت انتها بسته عملکردی یکسان و در برخی ولتاژها عملکردی بهتر نسبت به حالت انتها باز نشان داده است. در چگالی جریان‌های بالا با توجه به اینکه توزیع واکنشگرها بین سل‌ها در حالت انتها بسته مناسب‌تر است عملکرد آن نیز بهبود یافته است. همچنین با توجه به اینکه بهره‌وری سوخت در حالت انتها بسته بیشتر است کارایی آن نیز افزایش می‌یابد.

ولتاژ استک مقداری بالاتر از ۱ داشت، تست انتها بسته ولتاژ ثابت نیز برای بررسی روند نتایج عددی قابل انجام شد. نتایج تست نشان داد که حداقل زمان ممکن برای باز بودن شیر سولنوییدی خروجی برای پایدار ماندن تغییرات ولتاژ و یا جریان ۵ ثانیه می‌باشد.

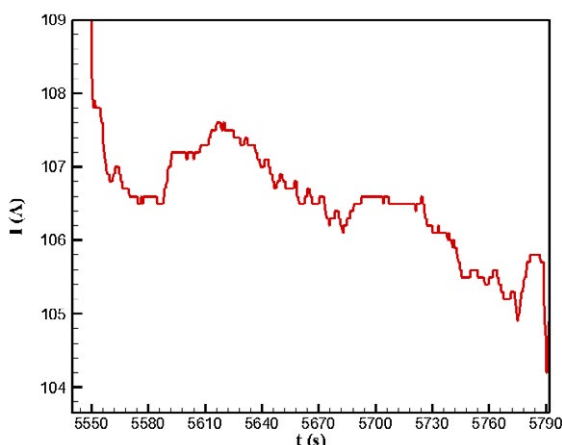
در شکل ۱۷ نمودار تغییرات جریان استک در ولتاژ ثابت ۲/۱ ولت و با ۲ ثانیه باز ماندن شیر خروجی نشان داده شده است. همانگونه که مشاهده می‌شود در مدت ۷ دقیقه جریان سل به علت تجمع آب تولیدی و انباشت آن به دلیل کافی نبودن زمان خروج مدام در حال کاهش است. این روند برای مدت زمان‌های باز بودن ۳ و ۴ ثانیه نیز رخ داد و حداقل زمان لازم برای باز بودن شیر برقی خروجی برای پایدار ماندن جریان ۵ ثانیه بوده است.

تغییرات جریان در حالت انتها بسته با ولتاژ ۲/۱ ولت و مدت زمان باز بودن و بسته بودن شیر سولنوییدی به مدت ۵ ثانیه در شکل ۱۸ نشان داده شده است. همچنین ولتاژ هر یک از سل‌ها و ولتاژ استک در شکل ۱۹ نشان داده شده است. همانطور که در شکل مشاهده می‌گردد، سل شماره ۲ بیشترین سطح ولتاژ را دارد که این موضوع با توجه به نوع تغذیه واکشگرها که به صورت U می‌باشد و مدیریت حرارت مناسب‌تر در این سل قابل پیش‌بینی بود. حداکثر کاهش جریان نسبت به سطح اولیه خود به علت تجمع آب و کاهش سطح فعال تقریباً ۵ آمپر (تقریباً ۵ درصد) بوده که با باز شدن شیر خروجی بدون هیچگونه کاهشی به سطح اولیه خود برمی‌گردد. همچنین همانگونه که از شکل پیداست در برخی از دوره‌های زمانی

شده تقریبی بوده است. انتظار می‌رفت با توجه به اینکه شیب افزایش عملکرد با افزایش دما در حال کاهش بوده، در دماهای بالاتر از ۸۰ درجه سانتیگراد کاهش عملکرد مشاهده شود. اما با اطلاع از اینکه دمای سطح غشاء اختلافی بین ۱۵-۲۰ درجه‌ای از دمای تنظیم شده استک دارد و نتایج مدل‌سازی عددی نیز این موضوع را نشان داده است (شکل ۱۲) و از طرفی شرکت سازنده غشاء دمای گذار شیشه‌ای غشاء را ۱۰۰ درجه اعلام کرده است احتمال آسیب‌دیدگی غشاء در دماهای بالاتر بوده و لذا از تست آن صرف‌نظر شد.

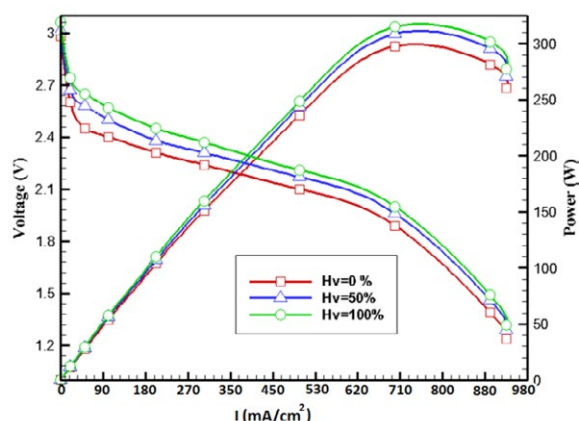
در شکل ۱۶ نمودار قطبیت و توان در رطوبت نسبی‌های مختلف گازهای واکشگر نشان داده شده است. غشاء پلیمری برای عبور یون H^+ نیاز به مرطوب بودن دارد لذا انتظار کلی این است که با کاهش رطوبت، کاهش عملکرد مشاهده شود. نتایج تست نیز این امر را نشان می‌دهد. در چگالی جریان‌های پایین با توجه به اینکه میزان آب تولیدی استک پایین است اختلاف عملکرد بیشتر است. اما در چگالی جریان‌های بالاتر با توجه به اینکه میزان آب تولیدی افزایش می‌یابد بخشی از این آب برای مرطوب سازی غشاء استفاده شده و لذا اختلاف عملکرد کمتری مشاهده شده است.

با توجه به اینکه در تک پیل سوختی بررسی پارامترهای پرچ انجام شده بود [۱۴ و ۱۵] و زمان بهینه بسته بودن و باز بودن شیر به ترتیب ۵ و ۱ ثانیه به دست آمد، در استک پیل سوختی سعی بر آن شد تا زمان بسته بودن شیر به همان اندازه تک سل باقی بماند و بررسی روی زمان باز بودن شیر انجام شود. همچنین با توجه به اینکه



شکل ۱۷: تغییرات جریان در ولتاژ ثابت ۲/۱ ولت و زمان تخلیه ۲ ثانیه

Fig. 17: Current variations at constant voltage of 2.1 volts and purge time of 2 seconds

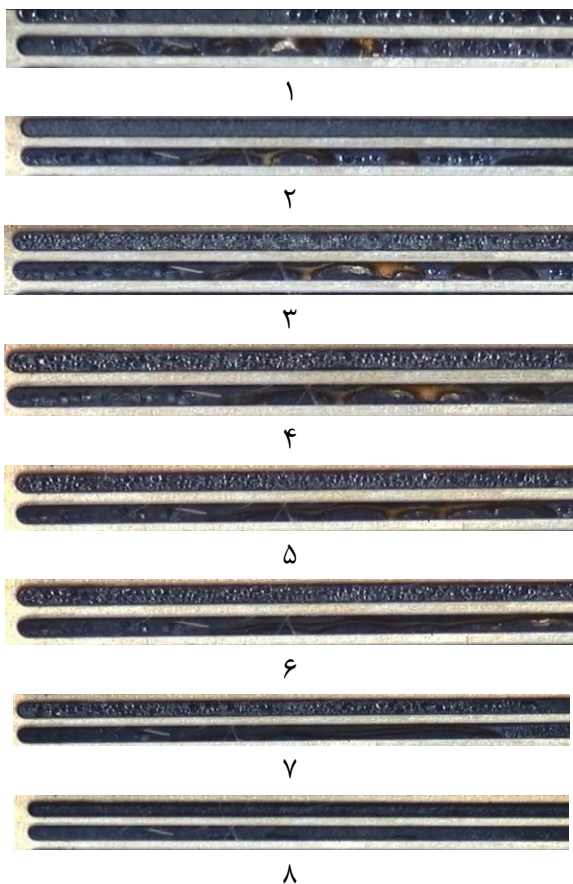


شکل ۱۶: نمودار قطبیت و توان در رطوبت نسبی‌های مختلف

Fig. 16: Polarization and power curves in different relative humidity

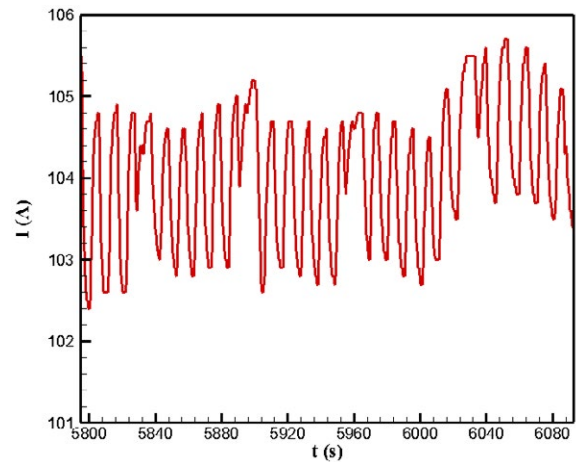
(تقریباً ۷ کیلوپاسکال) تا این که قطرات به هم چسبیده و با ایجاد جریان فیلمی به طور کامل دفع شوند. همزمان با افزایش فشار گاز، جریان افزایش یافته تا دفع کامل انسداد صورت بگیرد. در شکل ۲۰ مراحل مختلف تشکیل قطره و انسداد کانال (۱-۴) و ایجاد جریان فیلمی (۵-۷) و سپس دفع کامل انسداد (۸) نشان داده شده است. با توجه به اینکه تست مذکور برای شناسایی عامل ناهمگن کردن کاهش جریان در حالت انتها بسته انجام شد، در شرایط انتها باز صورت گرفت. همچنین تغییرات جریان و فشار در طی این فرایند در شکل ۲۱ نشان داده شده است.

تغییرات جریان در ولتاژ ۱/۲ ولت که معادل با جریان نزدیک به ۲۲۰ آمپر در حالت انتها بسته می‌باشد در شکل ۲۲ نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌گردد، افت جریان بسیار بیشتری نسبت به ولتاژ ۲/۱ ایجاد شده است که با توجه به حجم آب تولیدی



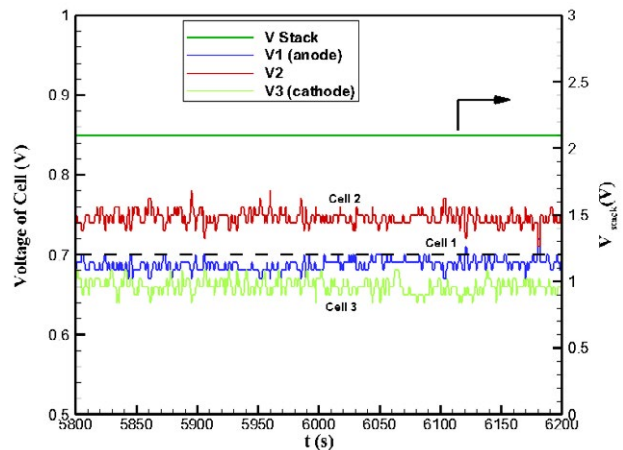
شکل ۲۰: مراحل مختلف تشکیل قطره آب، انسداد کانال، جریان فیلمی آب و دفع آن

Fig. 20: Different stages of water drop formation, channel blockage, water film flow and its removal



شکل ۱۸: تغییرات جریان استک در حالت انتها بسته با زمان بسته بودن و باز بودن شیر خروجی به مدت ۵ ثانیه

Fig. 18: Stack current variations in dead-end mode with closing and opening the outlet valve for 5 seconds

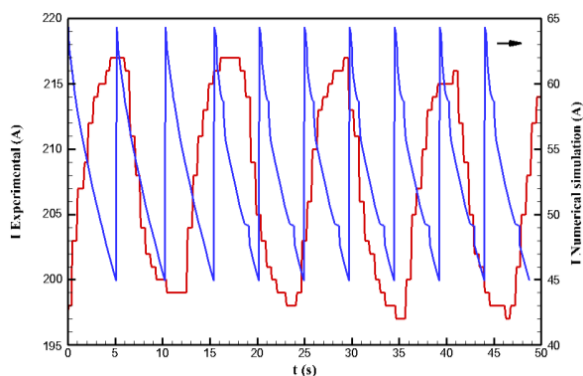


شکل ۱۹: ولتاژ استک و هر یک از سل‌ها در حالت انتها بسته با زمان بسته بودن و باز بودن شیر خروجی به مدت ۵ ثانیه

Fig. 19: Stack and each cell voltage in dead-end mode with closing and opening the outlet valve for 5 seconds

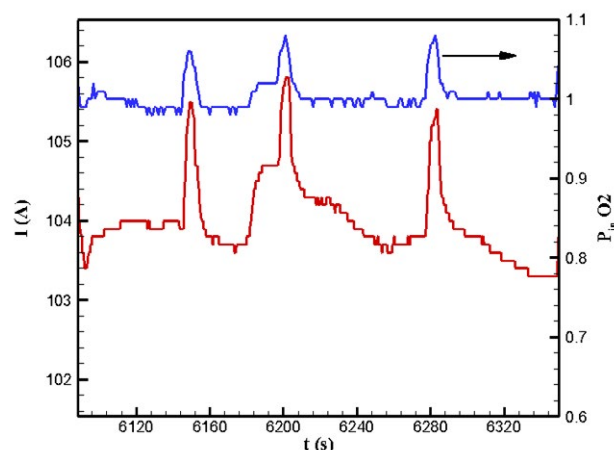
تخلیه رفتار ناهمگن مشاهده شده که این امر در قسمت بعدی با جزئیات بیشتر بررسی شده است.

دلیل رفتار ناهمگنی که در تغییرات جریان در حالت انتها بسته مشاهده شد، بعد از بررسی دقیق و استفاده از تصاویر بزرگنمایی شده، مشخص شد. در توضیح این فرایند باید گفت که قطرات ریز تشکیل شده در میدان شارش به مرور زمان بزرگتر شده و موجب انسداد کامل مسیر حرکت گاز می‌شوند. همزمان با این انسداد، فشار گاز در کانال افزایش یافته



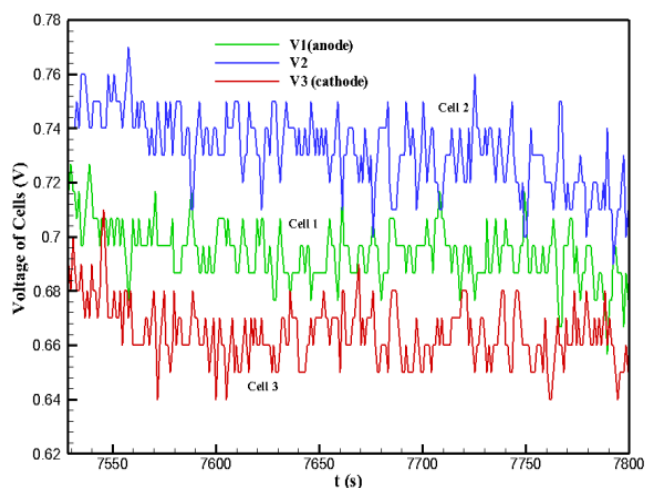
شکل ۲۳: مقایسه تغییرات جریان در حالت انتها بسته در حل عددی (ستون سمت راست) و تجربی در ولتاژ ۱/۲ ولت

Fig. 23: Comparison of current variation in dead-end mode from numerical simulation (right-side axis) and experimental data at a voltage of 1.2 volts



شکل ۲۱: تغییرات جریان و فشار به هنگام ایجاد انسداد ناشی از تشکیل آب در کانال و دفع آن

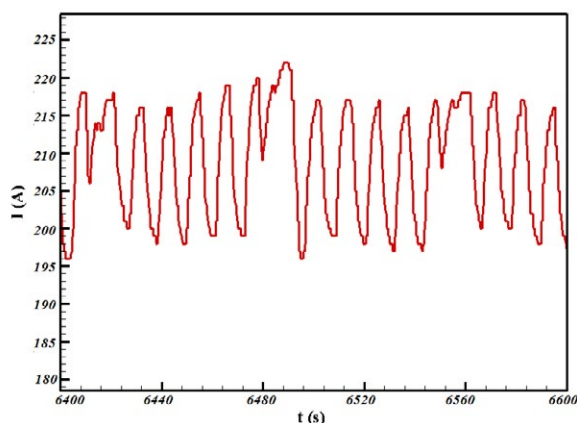
Fig. 21: variations in current and pressure when the blockage occurs due to the formation of water in the channel and its removal



شکل ۲۴: تغییرات ولتاژ سل‌ها در تست انتها بسته در چگالی جریان ۵۰۰ میلی‌آمپر بر سانتیمتر مربع

Fig. 24: Cells voltage variation in dead-end test at a current density of 500 mA/cm²

افزایش داد بدون اینکه کاهش چشمگیری در فشار مشاهده شود. در حل عددی با توجه با اینکه بحث آسیب به غشاء اصلا مطرح نیست شرایط مرزی مطابق با یک شیر برقی تغییر می‌کند و لذا بلافاصله بعد از باز شدن انتهای کانال به سطح جریان اولیه بازمی‌گردد. میزان کاهش جریان در حل عددی ۱۸ آمپر و در تست تجربی حدود ۲۰ آمپر بوده است. البته در تست تجربی بخشی از تغییرات جریان که مربوط به انسداد در کانال بوده است، حذف گردیده است. تست انتها بسته در جریان ثابت نیز به منظور بررسی تغییرات



شکل ۲۲: تغییرات جریان در حالت انتها بسته در ولتاژ ۱/۲ ولت

Fig. 22: Current variations in dead-end mode at a voltage of 1.2 volts

بیشتر و یکسان ماندن شرایط تخلیه، امری بدیهی است. در این ولتاژ نیز رفتارهای ناهمگن مشاهده شده است.

در شکل ۲۳ روند تغییرات جریان در حل عددی با روند تغییرات در حالت تجربی مقایسه شده است. اولین نکته‌ای که در این مقایسه به چشم می‌خورد علت تاخیر در افزایش جریان در تست تجربی است. در توضیح این مطلب باید گفت در تست تجربی، قبل از شیر برقی یک شیر سوزنی به خط تست اضافه شده است. با استفاده از شیر سوزنی به دو هدف ارزشمند دنبال شد. اول اینکه از تغییرات ولتاژ ناگهانی و شدید به هنگام تخلیه که موجب آسیب‌های برگشتناپذیر به غشاء می‌شود جلوگیری شده است و دوم اینکه می‌توان زمان تخلیه را

بسیار بزرگتر صورت پذیرد و با این عمل بهره‌وری سوخت و بازده استک را افزایش داد.

در شکل ۲۷ آب تشکیل شده در کانال کاتد پیل سوختی در حالت‌های انتها باز و انتها بسته با هم مقایسه شده‌اند. همانگونه که مشاهده می‌شود، در حالت انتها باز اصلاً معضل مدیریت آب مطرح نبوده و گاز اضافی ورودی به کانال به راحتی آب تشکیل شده را با خود به سمت خروجی حمل کرده و هیچگونه تجمع آب و انسداد در کانال نداریم و فقط قطرات ریز و مجزایی از آب روی سطح لایه نفوذ گاز مشاهده می‌شوند.

۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله اجزاء مختلف تک پیل و استک پیل سوختی شفاف شرح داده شد و مراحل تست نشتی، توزیع فشار و فعالسازی تشریح شد. همچنین نتایج مربوط به تست حالت انتها بسته و انتها باز به طور کامل بررسی شد.

نتایج به دست آمده شامل موارد زیر است:

✓ آب بستن استک به مدت ۱۰۰ ساعت قبل از انجام فرایند فعالسازی موجب کاهش زمان فعالسازی می‌شود. علاوه بر این افت فعالسازی در استک نسبت به تک سل با اعمال این روش کاهش چشمگیر داشته است.

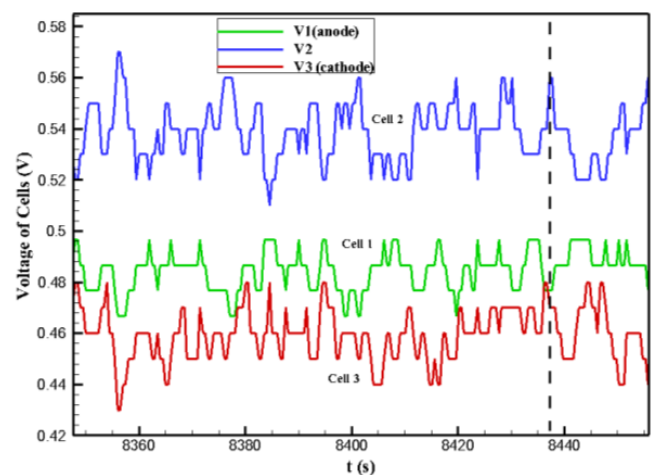
✓ با بهبود توزیع فشار و کنترل دمای استک، افزایش ۴۰ درصدی توان بیشینه استک نسبت به تک سل حاصل شد.

✓ با اعمال زمان‌های بسته بودن و تخلیه مناسب که در تک سل به ترتیب ۵ و ۱ ثانیه و در استک هر دو ۵ ثانیه بودند حالت انتها بسته استک عملکردی یکسان و در برخی ولتاژها عملکردی بهتر نسبت به حالت انتها باز نشان داد. در چگالی جریان‌های بالا با توجه به اینکه توزیع واکنشگرها بین سل‌ها در حالت انتها بسته مناسب‌تر است، عملکرد نیز بهبود یافته است. همچنین با توجه به اینکه بهره‌وری سوخت در حالت انتها بسته بیشتر است، کارایی آن نیز افزایش می‌یابد.

✓ با افزایش فشار با توجه به افزایش شدت و سرعت نفوذ واکنشگرها به سطح کاتالیست و افزایش شدت واکنش، نمودار قطبیت بهبود یافته است. با افزایش فشار از حالت اتمسفریک به ۱ بار توان بیشینه استک ۳۰ درصد افزایش یافته است.

ولتاژ سل‌ها در چگالی جریان‌های ۵۰۰ و ۹۰۰ میلی‌آمپر بر سانتیمتر مربع انجام شده و نتایج آن در شکل‌های ۲۴ و ۲۵ آمده است. بیشینه تغییرات ولتاژ در چگالی جریان ۵۰۰ میلی‌آمپر بر سانتیمتر مربع مقدار ۰/۰۴ ولت و در چگالی جریان ۹۰۰ میلی‌آمپر بر سانتیمتر مربع مقدار ۰/۰۶ ولت مشاهده شده است. زمان تخلیه ۵ ثانیه در هر دو چگالی جریان برای تخلیه آب تجمع یافته کافی بوده و روند کاهشی در ولتاژ مشاهده نشد. برخلاف تغییرات جریان، تغییرات ولتاژ آهنگ کاهشی و افزایشی منظم از خود نشان نمی‌دهد و لذا توصیه می‌شود در حالت جریان ثابت معیار تخلیه از زمان به ولتاژ تغییر کند. همچنین افزایش و کاهش ولتاژ سل‌ها هم‌فاز نبوده و بسیار نامنظم بوده‌اند. همچنین سل ۲ که سل میانی بوده در هر دو چگالی جریان، بیشترین مقدار و سل سوم که مجاور صفحه انتهایی کاتد بوده کمترین مقدار را از خود نشان دادند.

در شکل ۲۶ آب تشکیل شده در سمت‌های آند و کاتد در دو چگالی جریان ۷۰۰ و ۹۰۰ میلی‌آمپر بر سانتیمتر مربع با هم مقایسه شده است. در سمت آند نحوه تشکیل و میزان آب تجمع یافته تقریباً ثابت مانده و همچنین جریان فیلمی از آب مشاهده نشده است. همچنین در نیمه بالایی میدان آند قطرات اندکی به صورت مجزا تشکیل شده است. همانطور که انتظار می‌رفت و در فصل قبل هم توضیح داده شد دفع آب در سمت آند می‌تواند در دوره‌های زمانی



شکل ۲۵: تغییرات ولتاژ سل‌ها در تست انتها بسته در چگالی جریان ۹۰۰ میلی‌آمپر بر سانتیمتر مربع

Fig. 25: Cells voltage variation in dead-end test at a current density of 900 mA/cm²



ه) $i=900 \text{ mA/cm}^2$ نیمه بالایی آند



و) $i=900 \text{ mA/cm}^2$ نیمه پایینی آند



ز) $i=900 \text{ mA/cm}^2$ نیمه بالایی کاتد



ح) $i=900 \text{ mA/cm}^2$ نیمه پایینی کاتد



الف) $i=700 \text{ mA/cm}^2$ نیمه بالایی آند



ب) $i=700 \text{ mA/cm}^2$ نیمه پایینی آند



ج) $i=700 \text{ mA/cm}^2$ نیمه بالایی کاتد



د) $i=700 \text{ mA/cm}^2$ نیمه پایینی کاتد

شکل ۲۶: تشکیل آب در میدان سمت کاتد در چگالی جریان‌های مختلف و حالت انتها بسته

Fig. 26: Water formation in the cathode-side flow field at different current densities in dead-end mode

✓ با افزایش رطوبت نسبی ورودی گازهای واکنشگر عملکرد استک بهبود یافته است. در چگالی جریان‌های پایین با توجه به اینکه میزان آب تولیدی استک پایین است اختلاف عملکرد بیشتر است. اما در چگالی جریان‌های بالاتر با توجه به اینکه میزان آب تولیدی افزایش می‌یابد بخشی از این آب برای مرطوب سازی غشاء استفاده شده و لذا اختلاف عملکرد کمتری مشاهده شده است.

✓ در استک پیل سوختی سل شماره ۲ بیشترین سطح ولتاژ را دارد که این موضوع با توجه به نوع تغذیه واکنشگرها که به صورت

✓ بر خلاف تک سل، در استک پیل سوختی با افزایش دما همواره بهبود عملکرد مشاهده شده است که با توجه به افزایش شدت واکنش با افزایش دما، منطقی بوده است. البته با توجه به اینکه در استک میدان خنک‌کاری وجود داشته است، مقدار دمای استک قابل تنظیم بوده، اما در تک سل این امکان میسر نبوده و دمای تنظیم شده تقریبی بوده است. انتظار می‌رود با توجه به اینکه شیب افزایش عملکرد با افزایش دما در حال کاهش بوده، در دماهای بالاتر از ۸۰ درجه سانتیگراد با کاهش عملکرد مواجه باشیم.

✓ در توضیح علت تأخیر در افزایش جریان در تست تجربی، باید گفت در تست تجربی قبل از شیر برقی یک شیر سوزنی به خط تست اضافه شده است که هم از تغییرات ولتاژ ناگهانی و شدید به هنگام تخلیه که موجب آسیب‌های برگشت‌ناپذیر به غشاء می‌شود جلوگیری شد و هم زمان تخلیه را افزایش داد.

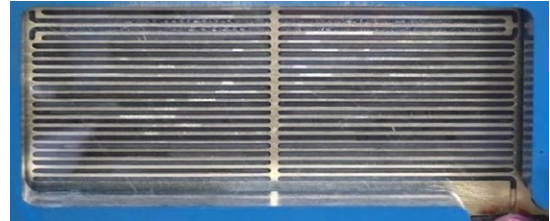
✓ در حالت انتها باز اصلاً معضل مدیریت آب مطرح نبوده و گاز اضافی ورودی به کانال به راحتی آب تشکیل شده را با خود به سمت خروجی حمل کرده و هیچگونه تجمع آب و انسداد در کانال مشاهده نشده است و فقط قطرات ریز و مجزایی از آب روی سطح لایه نفوذ گاز مشاهده می‌شود.

✓ نتایج نشان می‌دهد در سمت آند نحوه تشکیل و میزان آب تجمع یافته تقریباً ثابت مانده و همچنین جریان فیلمی از آب مشاهده نشده است. همچنین در نیمه بالایی میدان آند قطرات اندکی به صورت مجزا تشکیل شده است.

✓ دفع آب در سمت آند می‌تواند در دوره‌های زمانی بسیار بزرگتر صورت پذیرد و با این عمل بهره‌وری سوخت و بازده استک افزایش یابد.



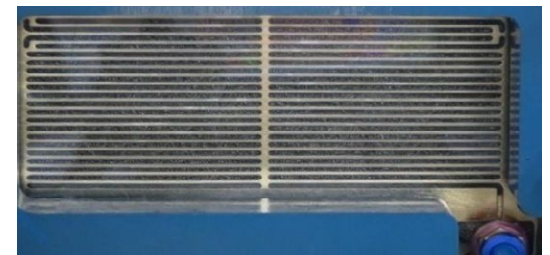
الف) $i=700 \text{ mA/cm}^2$ نیمه بالایی کاتد حالت انتها بسته



ب) $i=700 \text{ mA/cm}^2$ نیمه پایینی کاتد حالت انتها بسته



ج) $i=700 \text{ mA/cm}^2$ نیمه بالایی کاتد حالت انتها باز



د) $i=700 \text{ mA/cm}^2$ نیمه پایینی کاتد حالت انتها باز

شکل ۲۷: تشکیل آب در میدان سمت کاتد در چگالی جریان‌های مختلف و دو حالت انتها باز و انتها بسته

Fig. 27: Water formation in the cathode-side flow field at different current densities in both dead-end and open-end modes

U می‌باشد و مدیریت حرارت مناسب‌تر در این سل قابل پیش‌بینی بود.

✓ نتایج تست انتها بسته نشان می‌دهد که حداقل زمان ممکن برای تخلیه آب تجمع یافته و گازهای بی‌اثر ۵ ثانیه بوده که نسبت به تک سل (۱ ثانیه) افزایش قابل توجهی داشت. این امر لزوم استفاده از استک‌های پلکانی در عملکرد انتها بسته استک‌های با توان بالا و تعداد سل زیاد را نشان می‌دهد. به این ترتیب که با مرحله‌ای کردن استک فقط تعداد محدودی از سل‌ها را در فرایند تخلیه دخیل کرده و زمان تخلیه با این تکنیک کاهش خواهد یافت.

فهرست اصطلاحات

گرمای ویژه مخلوط گاز، $\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$	$C_p^{(g)}$
نفوذ گونه، $\text{m}^2 \text{s}^{-1}$	$D_i^{(g)}$
نفوذ آب در غشاء، $\text{m}^2 \text{s}^{-1}$	$D_{H_2O}^{(m)}$
ولتاژ سل، V	E_{cell}
ثابت فارادی، A s m^{-1}	F
ارتفاع، m	h
هدایت الکتریکی، $\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$	k
طول، m	L
انتقال جرم به علت چگالش یا تبخیر، $\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$	\dot{m}_{H_2O}
جرم مولکولی جزء، kg mol^{-1}	M_i
وزن هم ارز غشاء خشک، kg mol^{-1}	$M^{(m)}$
ضریب درگ الکتروسموتیک	n_d
شار جرمی جزء، $\text{kg m}^2 \text{s}^{-1}$	$n_i^{(g)}$

- International journal of hydrogen energy, 37(22) (2012) 17158-17171.
- [5] J.W. Choi, Y.-S. Hwang, S.W. Cha, M.S. Kim, Experimental study on enhancing the fuel efficiency of an anodic dead-end mode polymer electrolyte membrane fuel cell by oscillating the hydrogen, International journal of hydrogen energy, 35(22) (2010) 12469-12479.
- [6] J.W. Choi, Y.-S. Hwang, J.-H. Seo, D.H. Lee, S.W. Cha, M.S. Kim, An experimental study on the purge characteristics of the cathodic dead-end mode PEMFC for the submarine or aerospace applications and performance improvement with the pulsation effects, international journal of hydrogen energy, 35(8) (2010) 3698-3711.
- [7] Y.-S. Chen, H. Peng, D.S. Hussey, D.L. Jacobson, D.T. Tran, T. Abdel-Baset, M. Biernacki, Water distribution measurement for a PEMFC through neutron radiography, Journal of Power Sources, 170(2) (2007) 376-386.
- [8] A.P. Sasmito, A.S. Mujumdar, Performance evaluation of a polymer electrolyte fuel cell with a dead-end anode: A computational fluid dynamic study, International Journal of Hydrogen Energy, 36(17) (2011) 10917-10933.
- [9] Gomez, A. Raj, A.P. Sasmito, T. Shamim, Effect of operating parameters on the transient performance of a polymer electrolyte membrane fuel cell stack with a dead-end anode, Applied energy, 130 (2014) 692-701.
- [10] J.B. Siegel, D.A. McKay, A.G. Stefanopoulou, D.S. Hussey, D.L. Jacobson, Measurement of liquid water accumulation in a PEMFC with dead-ended anode, Journal of the Electrochemical Society, 155(11) (2008) B1168-B1178.
- [11] P. Moçotéguy, F. Druart, Y. Bultel, S. Besse, A. Rakotondrainibe, Monodimensional modeling and experimental study of the dynamic behavior of proton exchange membrane fuel cell stack operating in dead-end mode, Journal of Power Sources, 167(2) (2007)

فشار مویبستگی و فشار گاز، Pa	$P^{(c)}, P^{(g)}$
مابع اشباع	s
ترم چشمه	S
دما، K	T
	u, v, w, U
سرعت، $m\ s^{-1}$	
مختصات، m	x, y, z
کسر جرمی جزء i	$\omega_i^{(g)}$
علائم یونانی	
تخلخل	ϵ
محتوای آب	λ
ویسکوزیته دینامیکی، $kg\ m^2\ s^{-1}$	μ
چگالی، $kg\ m^{-3}$	ρ
تانسور تنش کلی، $N\ m^{-2}$	σ
هدایت پروتونی، $S\ m^{-1}$	$\sigma^{(m)}$
هدایت الکتریکی، $S\ m^{-1}$	$\sigma^{(s)}$
پتانسیل فاز یونی، V	$\phi^{(m)}$
پتانسیل فاز جامد، V	$\phi^{(s)}$

مراجع

- [1] H. Liu, P. Li, K. Wang, Optimization of PEM fuel cell flow channel dimensions—Mathematic modeling analysis and experimental verification, International Journal of Hydrogen Energy, 38(23) (2013) 9835-9846.
- [2] D. Jeon, S. Greenway, S. Shimpalee, J. Van Zee, The effect of serpentine flow-field designs on PEM fuel cell performance, International journal of hydrogen energy, 33(3) (2008) 1052-1066.
- [3] K.-S. Choi, H.-M. Kim, S.-M. Moon, Numerical studies on the geometrical characterization of serpentine flow-field for efficient PEMFC, International Journal of Hydrogen Energy, 36(2) (2011) 1613-1627.
- [4] P. Jithesh, A. Bansode, T. Sundararajan, S.K. Das, The effect of flow distributors on the liquid water distribution and performance of a PEM fuel cell,

- 42(16) (2017) 11673-11688.
- [15] M. Rahimi-Esbo, A. Ranjbar, A. Ramiar, E. Alizadeh, M. Aghaee, Improving PEM fuel cell performance and effective water removal by using a novel gas flow field, *international journal of hydrogen energy*, 41(4) (2016) 3023-3037.
- [16] A.P. Sasmito, E. Birgersson, A.S. Mujumdar, A novel flow reversal concept for improved thermal management in polymer electrolyte fuel cell stacks, *International Journal of Thermal Sciences*, 54 (2012) 242-252.
- [17] E. IEC 62282-3-200: Fuel cell technologies - Part 3-200: Stationary fuel cell power systems - Performance test methods, in.
- 349-357.
- [12] Y. Yang, X. Zhang, L. Guo, H. Liu, Overall and local effects of operating conditions in PEM fuel cells with dead-ended anode, *International Journal of Hydrogen Energy*, 42(7) (2017) 4690-4698.
- [13] Z. Wan, J. Liu, Z. Luo, Z. Tu, Z. Liu, W. Liu, Evaluation of self-water-removal in a dead-ended proton exchange membrane fuel cell, *Applied energy*, 104 (2013) 751-757.
- [14] M. Rahimi-Esbo, A. Ramiar, A. Ranjbar, E. Alizadeh, Design, manufacturing, assembling and testing of a transparent PEM fuel cell for investigation of water management and contact resistance at dead-end mode, *International Journal of Hydrogen Energy*,