



بررسی تجربی عملکرد یک سیستم توان یکپارچه سری پیل سوختی پلیمری انتها بسته هیدروژن-اکسیژن با سطح فعال بزرگ و سیستم رطوبت زن داخلی

مجید خورشیدیان^۱، سید مجید رهگشای^{۲*}، مظاهر رحیمی اسبویی^۱، سید حسین مسروری سعادت^۱

۱- دانشگاه صنعتی مالک اشتر، فریدونکنار، ایران

۲- آزمایشگاه تحقیقاتی فناوری پیل سوختی، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، فریدونکنار، ایران.

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۸/۰۷/۱۰

بازنگری: ۱۳۹۸/۱۰/۱۱

پذیرش: ۱۳۹۸/۱۱/۰۶

ارائه آنلاین: ۱۳۹۸/۱۱/۱۹

کلمات کلیدی:

پیل سوختی پلیمری

عملکرد انتها بسته

زمان تخلیه

کارایی

رطوبت زن یکپارچه

تجمع آب

خلاصه: پیل‌های سوختی پلیمری با آند و کاتد انتها بسته می‌توانند با سیستمی نسبتاً ساده درصد مصرف سوخت‌های اکسیژن و هیدروژن را افزایش دهند. با این وجود، تجمع آب در بخش انتهایی کانال‌های آند و کاتد موجب قحطی سوخت موضعی و در نتیجه کاهش عملکرد پیل سوختی می‌شود. در این مقاله، برای اولین بار یک طرح جدید برای سری پیل سوختی ارائه شده است که بدون استفاده از دستگاه‌های گردش مجدد سوخت که نیازمند صرف توان اضافی هستند، می‌تواند درصد مصرف سوخت را افزایش دهد. ایده اصلی طرح ارائه‌شده تقسیم سری به دو مرحله مجزا است: گاز خروجی از مرحله اول بعد از ورود به جداساز به مرحله بعدی وارد می‌شود. گازهای واکنشگر قبل از ورود به سلول‌ها از یک رطوبت‌زن یکپارچه با سری عبور کرده و رطوبت مورد نیاز برای عملکرد مناسب را کسب می‌کنند. در طرح ارائه‌شده اگرچه پیل سوختی در حالت انتها بسته کار می‌کند اما با توجه به مرحله‌ای بودن سری، بیشتر سلول‌ها در استوکیومتری بزرگتر از ۱ کار می‌کنند. با این طراحی نیاز به تخلیه کمتری برای دفع آب تجمع‌یافته است. به عبارتی دیگر، کارایی طرح انتها بسته معادل طرح انتها باز خواهد شد. تمامی آزمون‌های عملکردی در یک سیستم قدرت یکپارچه با پیل سوختی انجام شده است.

۱- مقدمه

امروزه پیل‌های سوختی به دلیل داشتن کارایی بالا، دمای پایین و شروع به کار سریع توجه زیادی را به خود جلب کرده‌اند. پیل‌های سوختی از مبدل‌های انرژی پاک هستند که انرژی ذخیره‌شده در هیدروژن و اکسیژن را به الکتریسیته تبدیل می‌نمایند. آن‌ها همچنین به علت دارا بودن چگالی توان بالا، شروع به کار سریع و آلودگی کم به عنوان جایگزین اصلی برای تولید توان اتومبیل‌ها، ایستگاه‌های توان ثابت و زیردریایی‌ها در نظر گرفته می‌شوند [۱-۳].

در بعضی از پیل‌های سوختی پلیمری، هیدروژن به عنوان سوخت استفاده می‌شود و هیدروژن مصرف نشده به همراه گازهای بی‌اثر دیگر به محیط تخلیه می‌شود. برای بالابردن کارایی و ایمنی لازم است تا حداقل هیدروژن ممکن به محیط تخلیه شود.

نسبت مقدار هیدروژن مصرف‌شده به هیدروژن ورودی به پیل سوختی درصد مصرف سوخت نامیده می‌شود. در پیل‌های سوختی پلیمری انتها بسته درصد مصرف سوخت تقریباً برابر با ۱۰۰ درصد

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

است؛ بدین معنا که تقریباً تمامی هیدروژن یا اکسیژن ورودی به پیل سوختی در واکنش الکتروشیمیایی شرکت می‌کنند. با این حال در حالت انتها بسته احتمال دارد در قسمت‌های انتهایی پیل سوختی با قحطی سوخت مواجه شویم که نتیجه آن کاهش ولتاژ و عملکرد سلول می‌باشد [۴-۶]. تجمع آب در قسمت انتهایی کانال‌های آند و کاتد عامل اصلی قحطی سوخت است [۶ و ۷].

به حالتی که هیدروژن و اکسیژن دقیقاً به اندازه مصرف وارد پیل سوختی گردند، حالت انتها بسته می‌گویند که شکل ۱(الف) نمایش داده شده است. اگر گازهای واکنش دهنده در فشار بیشتری همانند مخزن فشار بالا در شکل ۱ دسترس باشند، حالت انتها بسته به هیچ کنترلی نیاز نداشته و مقدار تأمین و مصرف برابر خواهند بود. در صورت اتلاف هیدروژن و اکسیژن به دلیل نفوذ و یا جریان‌های داخلی، دبی جرمی ورودی به اندازه کمی بیش از مصرف خواهد بود. در حالت دیگر، ممکن است هیدروژن و اکسیژن به مقدار زیاد وارد پیل سوختی گردند که به آن حالت انتها باز می‌گویند (شکل ۱(ب)).



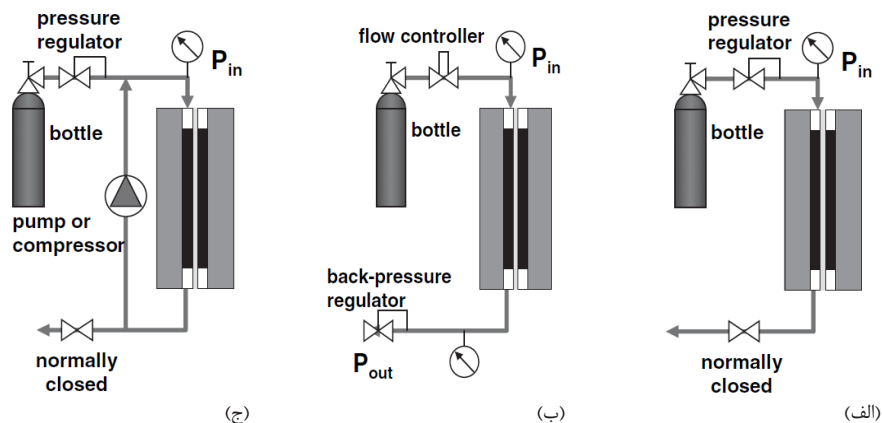


Fig. 1. Different modes of consuming reactant gases. (a) Dead-end mode, (b) Flow-through mode, (c) Recirculation mode

شکل ۱: حالت‌های مختلف مصرف گازهای واکنش‌دهنده. (الف) حالت انتها بسته، (ب) حالت انتها باز و (ج) حالت برگشت مجدد

هوانگ [۱۲] تأثیر روش‌های تغذیه مختلف هیدروژن به سلول را بر کارایی سیستم پیل سوختی بررسی کرد. وی کارایی الکتروشیمیایی پیل را در حالت انتها باز با استفاده از نرم‌افزار تجاری مرجع در حالت‌های مختلف تغذیه هیدروژن محاسبه کردند. همچنین از سیستم آزمایش بومی و استراتژی کنترل هوشمند برای آزمایش کارایی پیل سوختی در حالت‌های انتها بسته و انتها باز استفاده کردند. در ادامه گزارش کردند که اندازه‌گیری گذرای جریان سیال و خصوصیات الکتروشیمیایی به هنگام تخلیه، ولتاژ سلول را در حالت انتها بسته جریان ثابت پایدار نگه می‌دارد. در نهایت گزارش کردند که برای توان‌های کمتر از ۱ کیلووات، هر دو حالت انتها بسته و گردش مجدد بازدهی مشابه دارند.

پارک و چو [۱۳] یک مدل دینامیکی وابسته به دمای دوفازی را در یک سری ۲۰ سلولی پیل سوختی گسترش دادند. آن‌ها گزارش کردند اختلاف پتانسیل بین حالت‌های تک‌فاز و دوفاز تحت تأثیر شدید افت فعال‌سازی است. همچنین بیان کردند اختلاف ولتاژ بین سلول‌های ۱ و ۲ ناشی از گرادیان دما و افت اهمی است. آن‌ها رویه‌های مختلف فعال‌سازی را در این پیل سوختی بررسی کردند. بنابر گزارش ارائه شده، چگالی جریان بالاتر و نرخ سیال خنک‌کاری بیشتر زمان گرمایش اولیه را افزایش می‌دهد، درحالی‌که دمای اولیه صفحات انتهایی تأثیر مهمی بر آن ندارد. آن‌ها اختلاف ولتاژ بین سلول‌های مختلف را با افزایش دمای سیال خنک‌کاری به حداقل رساندند.

هان و همکاران [۱۴] طرح جدیدی را برای افزایش بهره‌وری سوخت در یک سری پیل سوختی ۱۵ کیلووات هیدروژن- هوا ارائه دادند. آن‌ها از طرح منی‌فولد خارجی برای تغذیه واکنشگرها استفاده

اگر حجم آب در کاتد زیاد شود مقداری از آب از سمت کاتد در اثر پدیده نفوذ معکوس به سمت آن‌د انتقال می‌یابد. این پدیده به غرقابگی معروف است [۸]. هو و همکاران [۹] پارامترهای دینامیکی مؤثر بر مصرف هیدروژن را در شرایط بار الکتریکی مختلف و پارامترهای تخلیه مختلف در یک پیل سوختی توسعه داده شده توسط گروه خودشان را به صورت تجربی بررسی کردند. آن‌ها یک مدل دینامیکی برای مصرف هیدروژن ارائه کردند که اثر تخلیه هیدروژن را در نظر می‌گیرد و سپس نتایج به دست آمده از مدل را با نتایج آزمایش تجربی در چندین حالت عملیاتی مختلف اعتبارسنجی کردند.

چن و همکاران [۱۰] استراتژی تخلیه سمت آن‌د را بر اساس تجمع نیتروژن در یک تک سلول پیل سوختی به صورت تحلیلی و تجربی بررسی کردند. آن‌ها گزارش کردند دوره زمانی برای باز کردن خروجی سلول در حالت انتها بسته با افزایش چگالی جریان کاهش می‌یابد. همچنین آن‌ها نشان دادند که ولتاژ پیش‌بینی شده با مدل کالیبره شده تطابق خوبی با داده‌های تجربی در شرایط جریان ثابت دارد.

بلودر و همکاران [۱۱] پدیده غرقابگی در یک پیل سوختی را با توجه به کاهش عملکرد بررسی کردند. آن‌ها فرایند تخلیه در سمت آن‌د و زمان تخلیه برای رسیدن ولتاژ سلول به سطح ولتاژ اولیه را تحلیل کردند. در ادامه فرایند تخلیه را در ۵ نقطه توانی مختلف بررسی کردند. همچنین یک منطق برنامه‌نویسی تخلیه جدید را بر اساس متغیرهای مؤثر بر غرقابگی آزمایش کردند. در نهایت گزارش کردند با استفاده از این منطق جدید کارایی سلول به شدت افزایش می‌یابد.

به کمک شبیه‌سازی، با داده‌های تجربی مطابقت داده شد و مشخص شد که خطای میانگین مربعات ریشه از ۳ درصد تجاوز نمی‌کند. مدل شبکه عصبی پیشنهادی می‌تواند به عنوان راهنما برای طراحی کنترل کننده و تشخیص عیب سری پیل سوختی پلیمری انتها بسته که از اکسیژن و هیدروژن خالص استفاده می‌کند، به کار رود.

در این مقاله یک سری ۵ کیلووات طراحی، مونتاژ و ساخته شد. هر دو سمت آند و کاتد در حالت انتها بسته قرار دارند و عملکرد حالت‌های انتها باز و انتها بسته با یکدیگر مقایسه شده‌اند. سلول‌های آندی و کاتدی به دو بخش مجزا تقسیم شده و با این ایده اگرچه کل سری در حالت انتها بسته کار می‌کند، بیش از ۸۷ درصد از سلول‌ها استوکیومتری بالاتر از ۱ داشته و در واقع انتها باز هستند و فقط ۱۳ درصد از سلول‌ها استوکیومتری برابر با ۱ دارند. از منیفولدهای داخلی برای توزیع واکنشگرها به سلول‌ها استفاده شده است و با این کار حجم سیستم به شدت کاهش یافته است. نوسانات ولتاژ در هنگام انتها بسته بودن آند، کاتد و یا هر دو سمت با هم بررسی شده است.

۲- طراحی جدید سری

شکل ۲ طرح شماتیک مورد استفاده برای سری پیل سوختی مورد نظر است که شامل هیچگونه دستگاه اضافه‌ای برای گردش مجدد اکسیژن و هیدروژن در مدار نیست. برای جداسازی آب از مخلوط گاز و آب خروجی از هر مرحله از جداساز استفاده شده است. پیل سوختی ۵ کیلووات ساخته شده به همراه دستگاه آزمایش بومی و حسگرهای ثبت ولتاژ در شکل ۳ نشان داده شده است. تعداد کل سلول‌های سری ۱۶ عدد می‌باشد که ۱۳ سلول در مرحله اول و ۳ سلول در مرحله دوم قرار گرفته‌اند. از سمت چپ به راست به ترتیب سلول‌های اول تا سوم در مرحله دوم اکسیژن و سلول‌های چهارم تا شانزدهم در مرحله اول اکسیژن قرار می‌گیرند. برای هیدروژن سلول‌های اول تا سیزدهم در مرحله اول و سلول‌های چهاردهم تا شانزدهم در مرحله دوم قرار گرفته‌اند. استوکیومتری مرحله اول برابر ۱/۲۳ و استوکیومتری مرحله دوم تقریباً ۱ می‌باشد.

۳- فعال‌سازی غشاء

فرایند آمادگی غشاء همواره برای فعال‌سازی پیل‌های سوختی غشاء پلیمری تازه‌ساخت احتیاج است. این فرایند رام کردن نیز نامیده

کردند و با مجزا کردن سری به چند قسمت مجزا استوکیومتری سوخت را در اکثر سلول‌ها بالا نگه داشتند. هان و همکاران [۱۵] اخیراً نیز یک سری پیل سوختی هیدروژن-اکسیژن را برای کاربری زبردیا طراحی و آزمایش کردند. ویژگی‌های طرح جدید این گروه همانند مقاله قبلی بود و فقط به علت کاربری زیر سطحی به جای هوا از اکسیژن استفاده کردند.

تخلیه یک روش مؤثر در حذف آب اضافی از الکتروود و افزایش مصرف اکسیژن و هیدروژن است [۱۶]. چن و همکاران [۱۶] در سال ۲۰۱۷ به بررسی عملکرد پیل سوختی و ویژگی‌های بازیابی پارامترهای مرتبط با آن در حین فرایند تخلیه در پیل سوختی با آند انتها بسته در شرایط عملکردی مختلف پرداختند. نتایج نشان داد عملکرد پیل سوختی در طی مدت زمان تخلیه به سرعت کاهش می‌یابد و پس از آن در ابتدا بلافاصله افزایش یافته و سپس به تدریج، چند ثانیه پس از تخلیه، به سطح اصلی خود می‌رسد. با این وجود، در نهایت عملکرد پیل سوختی قبل از شروع عملیات تخلیه بعدی تثبیت می‌شود. آن‌ها پیشنهاد کردند که زمان بازیابی عملکرد را می‌توان با افزایش چگالی جریان، رطوبت نسبی کاتد و دمای کاری کاهش داد.

جیان و همکاران [۱۷] در سال ۲۰۱۸، روند تخلیه در یک سری پیل سوختی غشای تبادل پروتون با آند انتها بسته را به طور تجربی مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها برای پیدا کردن بهترین استراتژی برای دستیابی به ولتاژ با ثبات بالا، فواصل مختلف تخلیه و مدت زمان تخلیه را مورد آزمایش قرار دادند. آزمایش‌ها نشان داد که زمان بازیابی ولتاژ سری بیشتر از زمان کاهش ولتاژ پس از فرایند تخلیه است. در ضمن برای تعیین استراتژی بهینه برای فرایند تخلیه، هیدروژن مورد استفاده و پایداری ولتاژ باید از قواعد معینی تبعیت کنند. آن‌ها فاصله تخلیه و مدت زمان تخلیه را برای نمونه مورد بررسی خود به ترتیب ۱۴/۸۶ ثانیه و ۰/۴۴ ثانیه در نظر گرفتند.

برزگری و همکاران [۱۸] در سال ۲۰۱۹ یک مدل پویا از سری پیل سوختی پلیمری انتها بسته بر اساس روش شبکه عصبی مصنوعی ارائه دادند. آن‌ها آزمایش‌های خود را بر روی یک پیل سوختی پلیمری از نوع آبشاری با توان ۴۰۰ وات انجام دادند. تعداد لایه‌های پنهان، تعداد نورون‌ها در هر لایه پنهان، عملکردهای انتقال و الگوریتم بهترین موقعیت شناسی شبکه عصبی مورد بررسی قرار گرفت. مدل ارائه شده توسط آن‌ها، پس از بهینه‌سازی پارامترهای شبکه عصبی

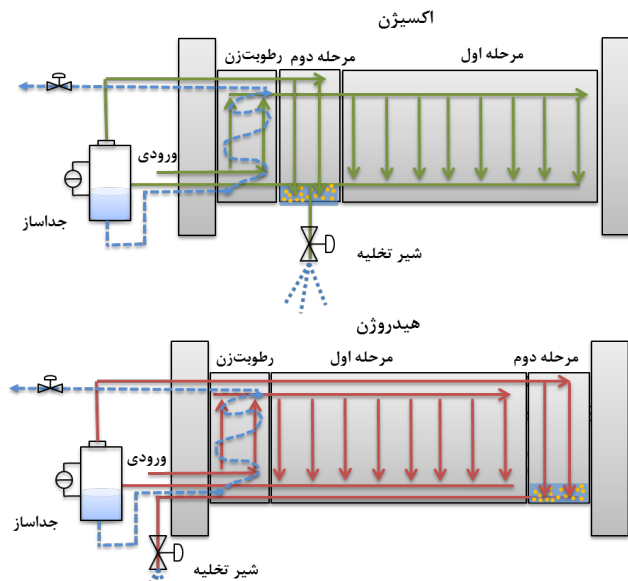


Fig. 2. Schematic diagram of designed fuel cell stack

شکل ۲: طرح شماتیک از سری پیل سوختی طراحی شده

خواهد بود. در این مقاله، غشاء مورد نظر که از شرکت پکسی تک^۱ فرانسه خریداری شده بود، مطابق با شرایط شرکت سازنده فعال سازی شد. روند فعال سازی به این صورت بود که با تنظیم ولتاژ سلول در مقدار ۰/۶ ولت تغییرات جریان رصد می شود و زمانی که تغییرات جریان به صفر میل کرد، عملیات فعال سازی کامل است. در جدول ۱ شرایط مربوط به فعال سازی شرکت سازنده آمده است.

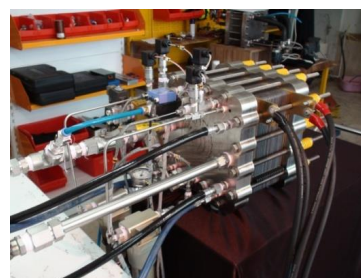
می شود که شامل یک دوره رشد نهفته جهت فعال سازی و رسیدن به بیشینه کارایی می باشد. در طول این دوره فعال سازی، کارایی غشاء طبیعتاً به تدریج افزایش می یابد تا به نقطه یکنواخت و صاف بدون رشد برسد. بسته به نحوه مونتاژ غشاء الکتروود این فرایند ممکن است از ساعتها تا روزها زمان ببرد. با توجه به مصرف سوخت هیدروژن و افزایش هزینه فرایند، شتاب دادن این فرایند در زمان بهینه با ارزش



(الف)



(ب)



(ج)

Fig. 3. (a) Fabricated testbench, (b) Piping of gases and cooling fluid, (c) Fabricated testbench with fuel cell stack
شکل ۳: (الف) دستگاه آزمایش ساخته شده (ب) لوله های ورودی گازها و سیال خنک کاری (ج) دستگاه آزمایش ساخته شده به همراه سری در حال آزمایش

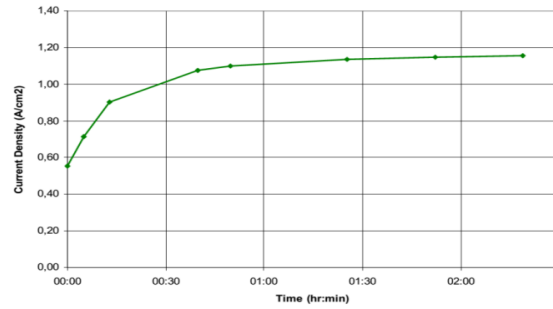
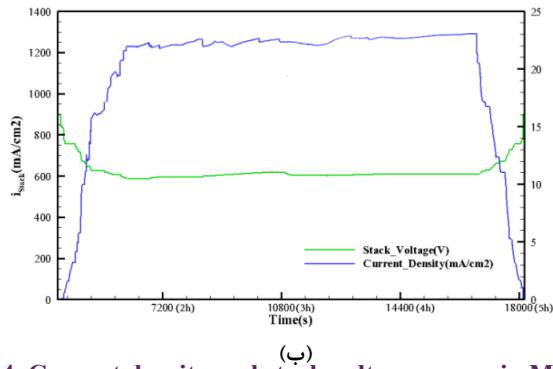


Fig. 4. Current density and stack voltage curves in MEA activation process. a) Manufacturer data, b) Present experiment

شکل ۴: نمودار چگالی جریان و ولتاژ سری در فرایند فعال سازی غشاء (الف) شرکت سازنده (ب) آزمایش حاضر

شانزدهم و سلول‌های تخلیه کاتد شامل سلول‌های اول تا سوم بوده، لذا هیچ سلولی به طور همزمان در حالت آند و کاتد انتها بسته قرار نخواهد گرفت و این امر به شدت در افزایش کارایی مؤثر بوده است. مقایسه‌ی بین نمودارهای قطبیت در حالت‌های انتها باز و انتها بسته در شکل ۶ نشان داده شده است. در تمامی آزمایش‌ها دمای عملکردی در ۷۰ درجه سانتی‌گراد، فشار نسبی ۱ بار و انرژی کلمپ ۹/۵ نیوتن در متر می‌باشد. استوکیومتری هیدروژن در حالت انتها باز ۱/۲ و در حالت انتها بسته ۱/۰۰۳ می‌باشد. استوکیومتری اکسیژن در حالت انتها باز ۱/۵ و در حالت انتها بسته ۱/۰۱ می‌باشد. رطوبت ورودی در تمامی حالات برای هیدروژن و اکسیژن بالای ۸۰ درصد می‌باشد. دبی حجمی اکسیژن ۱۸/۲۵ slpm و دبی حجمی هیدروژن ۳۶/۸۷ slpm است. دبی آب تولیدی را می‌توان از روابط استوکیومتری به دست آورد.

در شکل ۷ نمودار قطبیت مربوط به سری نشان داده شده است. همچنین توان و ولتاژ متوسط هر سلول نشان داده شده است. نتایج

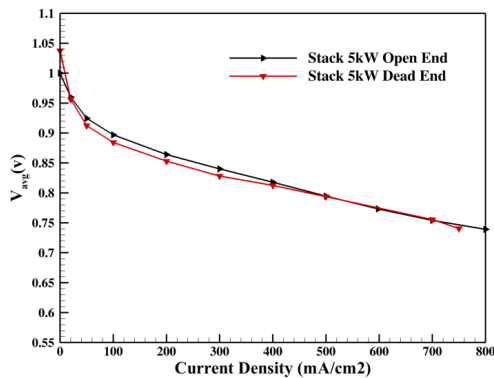


Fig. 6. Comparison of polarization curve for cells average between flow-through and dead-end modes

شکل ۶: مقایسه بین نمودار قطبیت حالت انتها باز و انتها بسته متوسط یک سلول سری



Fig. 5. Integrated power system for dead-end tests

شکل ۵: سیستم یکپارچه قدرت برای آزمایش‌های انتها بسته

جدول ۱: شرایط مربوط به فعال سازی شرکت سازنده غشاء

Table 1. Activation conditions of MEA manufacturer

گاز	دبی (dpm)	استوکیومتری	فشار (bar)	دمای رطوبت‌زنی (°C)
هیدروژن	۳۹	۱/۲	۲	خشک
اکسیژن	۲۴	۱/۵	۲	۵۳

همچنین نمودار فعال سازی مربوط به شرکت سازنده و آزمایش حاضر در شکل ۴ نشان داده شده است. نمودار فعال سازی مربوط به شرکت سازنده برای یک سلول تکی پیل سوختی است، اما نمودار مقاله‌ی حاضر مربوط به سری پیل سوختی است. در حالت سری به دلیل توزیع فشار و دمای بهتر چگالی جریان بهتری حاصل می‌شود، به همین دلیل جریان در حالت سری بیشتر از جریان در حالت تک سلول است.

۴- نتایج و بحث‌ها

بعد از انجام فرایند فعال سازی آزمایش‌های مربوط به نمودار قطبیت و آزمایش‌های مربوط به فرایند تخلیه انجام شد. این آزمایش‌ها در یک سیستم یکپارچه قدرت انجام شد که در شکل ۵ نشان داده شده است. با توجه به اینکه سلول‌های تخلیه آند شامل سلول‌های چهارم تا

تخلیه هیدروژن می‌باشند. همچنین استوکیومتری کل هیدروژن و اکسیژن و استوکیومتری مرحله اول آن‌ها به طور مجزا نشان داده شده است. نتایج حاکی از آن است متوسط ولتاژ سلول‌های تخلیه هیدروژن به متوسط کل سری بسیار نزدیک بوده ولی در سمت اکسیژن فاصله بیشتری از هم دارند. بر همین اساس پیشنهاد می‌شود از دو رویه مختلف برای تخلیه آب و ناخالصی برای سمت‌های اکسیژن و هیدروژن استفاده شود. همچنین بهتر است برای اکسیژن از رویه بر پایه‌ی تغییرات ولتاژ و در سمت هیدروژن بر پایه‌ی زمان استفاده شود.

شکل ۱۱ نمودار انواع افت‌های ولتاژ را در سری نشان می‌دهد. این افت‌ها از طریق برازش منحنی (رابطه‌ی الکتروشیمیایی نرنست [۱۹]) در نرم‌افزار متلب به دست آمده است. بیشترین افت ولتاژ مربوط به افت فعال‌سازی می‌باشد. افت غلظتی در چگالی جریان‌های خیلی بالا مشهود است و در چگالی جریان‌های کاری معمولاً قابل صرف‌نظر است.

افت اهمی نیز به جریان وابسته است و با افزایش جریان افزایش می‌یابد. رابط بین انواع افت‌های ولتاژ و ولتاژ سلول با رابطه (۱) قابل بیان است [۱۹].

$$V_{cell} = E_r - (\Delta V_{act} + \Delta V_{conc})_a - (\Delta V_{act} + \Delta V_{conc})_c - \Delta V_{ohm} \quad (1)$$

محدوده تغییرات و عدم قطعیت پارامترهای اندازه‌گیری شده در جدول ۲ آمده است.

شکل ۱۲ تغییرات بازده، ولتاژ و چگالی توان را با تغییرات چگالی

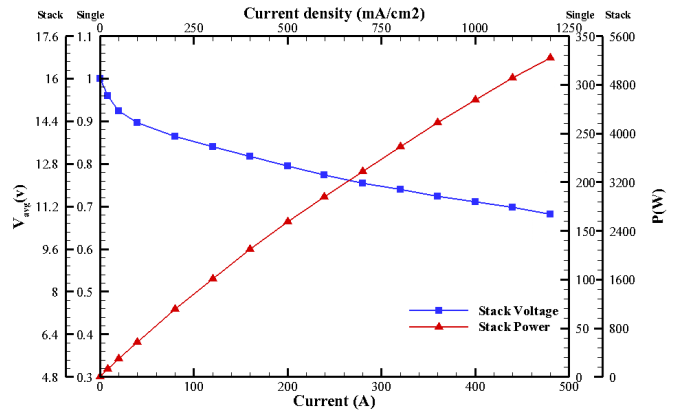


Fig. 7. Stack power and voltage curves

شکل ۷: نمودار توان و ولتاژ سری

نشان می‌دهد که با استفاده از طراحی یکپارچه و پلکانی، سری توانسته است به اهداف طراحی بدون اینکه به محدوده‌ی ولتاژ محدودکننده برسد، دست یابد.

تغییرات ولتاژ سلول‌های تخلیه هیدروژن، اکسیژن و سلول‌های میانی غیر تخلیه و همچنین کل سری در شکل ۸ نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهد با توجه به تجمع و تولید آب بیشتر در سمت کاتد نوسانات ولتاژ آن بیشتر است (نوسانات شدید نمودار آبی رنگ در شکل ۸) و باید رویه تخلیه در سمت کاتد و آند متفاوت از هم باشد. در این آزمایش دو سمت آند و کاتد به مدت ۱۰ ثانیه بسته بوده و به هنگام تخلیه ۱ ثانیه باز بوده‌اند.

نوسانات ولتاژ در هر یک از سلول‌های تخلیه هیدروژن و اکسیژن به طور مجزا در شکل‌های ۹ و ۱۰ نشان داده شده است. سلول‌های ۱، ۲ و ۳ سلول‌های تخلیه اکسیژن و سلول‌های ۱۴، ۱۵ و ۱۶ سلول‌های

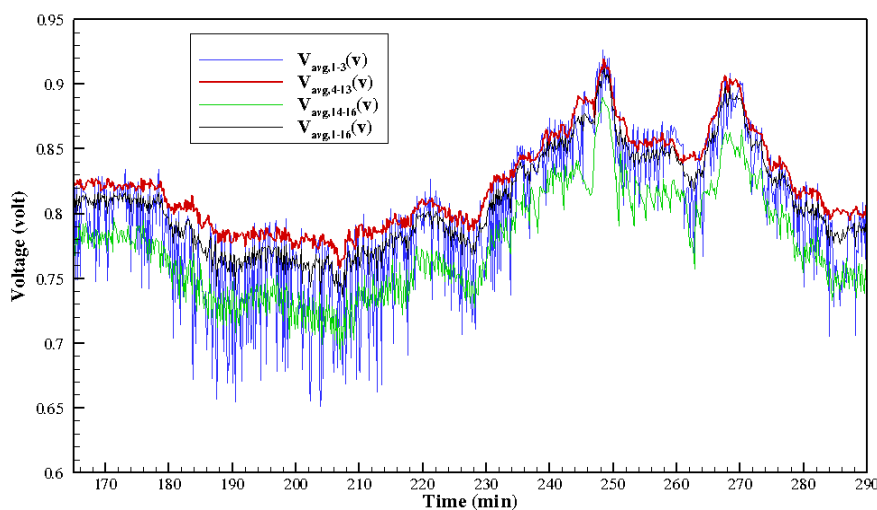


Fig. 8. Mean voltage fluctuation in dead-end mode for both anode and cathode (10 seconds closed and 1 second open)

شکل ۸: متوسط نوسانات ولتاژ در حالت انتها بسته آند و کاتد (۱۰ ثانیه بسته و ۱ ثانیه باز)

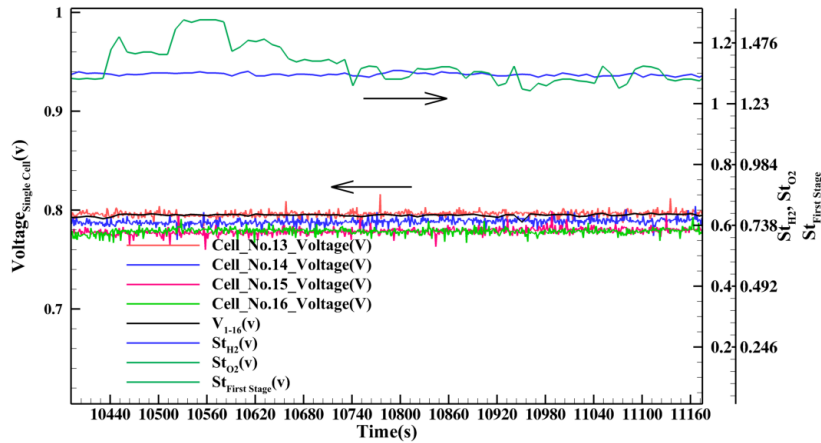


Fig. 9. Fluctuations of stoichiometry and voltage of H₂ purge cell and stack in dead-end mode for both anode and cathode (10 seconds closed and 1 second open)

شکل ۹: نوسانات استوکیومتری و ولتاژ سلول‌های تخلیه هیدروژن و کل سری در حالت انتها بسته آند و کاتد (۱۰ ثانیه بسته و ۱ ثانیه باز)

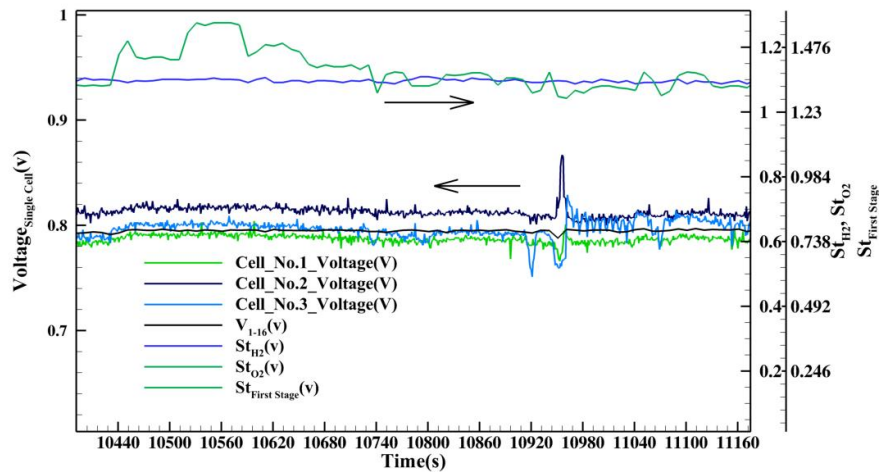


Fig. 10. Fluctuations of stoichiometry and voltage of O₂ purge cell and stack in dead-end mode for both anode and cathode (10 seconds closed and 1 second open)

شکل ۱۰: نوسانات استوکیومتری و ولتاژ سلول‌های تخلیه اکسیژن و کل سری در حالت انتها بسته آند و کاتد (۱۰ ثانیه بسته و ۱ ثانیه باز)

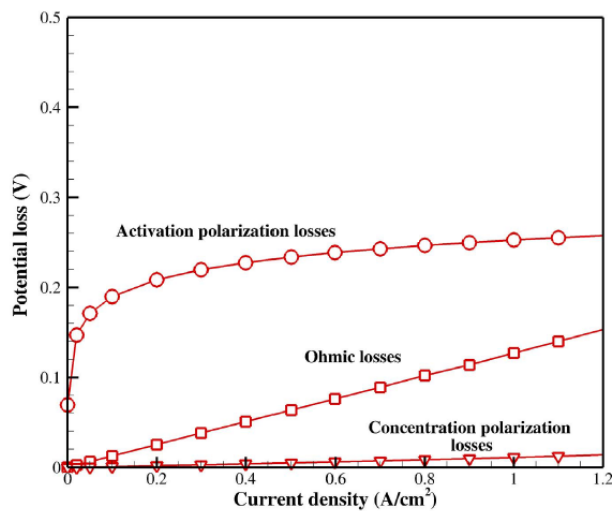


Fig. 11. Average of different types of potential loss in stack (inlet humidity above 80%, clamp torque 9.5 N.m, temperature 70 °C, relative pressure 1 barg, 0.3% hydrogen purge and 1% oxygen purge)

شکل ۱۱: متوسط انواع افت ولتاژ در سری (رطوبت ورودی بالای ۸۰ درصد، گشتاور کلمپ ۵/۹ نیوتن در متر، دما ۷۰ درجه سانتی‌گراد، فشار نسبی ۱ بار، تخلیه هیدروژن ۰/۳ درصد و تخلیه اکسیژن ۱ درصد)

جدول ۲: دقت و عدم قطعیت پارامترهای اندازه‌گیری، معیار پایداری کنترلرهای تی‌اس‌تی

Table 2. Accuracy and uncertainty of measurement parameters, stability criteria of TST controllers

پارامتر مورد اندازه‌گیری/کمیت	دقت	عدم قطعیت	کنترل پایداری تی‌اس‌تی (حداقل به حداکثر)
فشار گاز واکنشگر (kPa abs)	*fs ±۱٪ >	fs ۲٪ >	fs ۳٪ >
دبی گاز واکنشگر (N.l/min)	fs ±۱٪ >	fs ۲٪ >	fs ۳٪ >
دمای نقطه‌ی شبنم واکنشگر (°C)	±۱ K >	۲ K >	۳ K >
دمای خنک‌کاری T.Si.C (°C)	±۱ K >	۱ K >	۱ K >
بار الکتریکی (A)	±۰/۱ K >	۰/۵ A >	۰/۵ K >
ولتاژ متوسط سلول (V)	±۱ mV	۲ mV >	**N.A

* کل بازه‌ی اندازه‌گیری
** کاربرد ندارد.

در رابطه با St ضریب استوکومیتری گاز واکنشگر، V ولتاژ سری، I جریان و $\Delta H_f^\circ(H_2O(g))$ آنالپی تشکیل بخار آب است. نتایج نشان می‌دهد در نقطه‌ی بیشینه جریان آزمایش سری به نقطه‌ی بیشینه توان خود رسیده است.

نتیجه‌گیری

در این مقاله یک سری پیل سوختی پلیمری انتها بسته با طراحی پلکانی با رطوبت‌زن یکپارچه بعد از طراحی، ساخت و مونتاژ آزمایش شد. تمامی آزمایش‌ها در یک دستگاه آزمایش بومی انجام شد. غشاء پیل سوختی پلیمری بعد از انجام فرایند فعال‌سازی که مطابق با شرکت سازنده غشاء انجام گرفت، مورد انواع آزمایش‌های نمودار قطبیت و تخلیه قرار گرفت. نتایج نشان می‌دهد سلول‌های تخلیه

جریان نشان می‌دهد. نمودار نشان می‌دهد که با استفاده از طرح مذکور به بازده بالای ۵۰ درصد در چگالی توان ۱۰۰۰ میلی‌آمپر بر سانتی‌مترمربع خواهیم رسید. با افزایش چگالی جریان چگالی توان افزایش و بازده کاهش می‌یابد. بازده سری با استفاده از رابطه (۲) محاسبه می‌شود [۱۹].

$$\eta = \frac{V \times I}{\dot{n} \times \Delta H_f^\circ(H_2O(g))} \quad (2)$$

در رابطه با \dot{n} دبی مولی هیدروژن است که با استفاده از رابطه (۳) حساب می‌شود [۱۹].

$$\dot{n} = St \cdot \frac{I}{nF} \text{ mol/s} \quad (3)$$

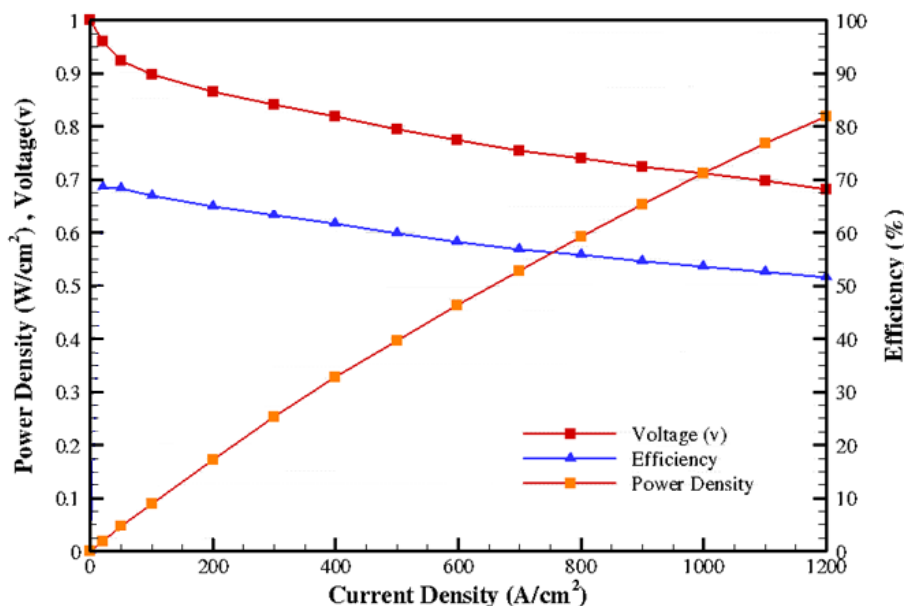


Fig. 12. Changes in efficiency, power density and voltage in terms of current density (test conditions as in Fig. 11)

شکل ۱۲: تغییرات بازده، چگالی توان و ولتاژ بر حسب چگالی جریان (شرایط آزمایش همانند شکل ۱۱)

- Membrane Science, 347(1-2) (2010) 26-31.
- [3] S.-D. Oh, K.-Y. Kim, S.-B. Oh, H.-Y. Kwak, Optimal operation of a 1-kW PEMFC-based CHP system for residential applications, *Applied Energy*, 95 (2012) 93-101.
- [4] W.R. Baumgartner, P. Parz, S. Fraser, E. Wallnöfer, V. Hacker, Polarization study of a PEMFC with four reference electrodes at hydrogen starvation conditions, *Journal of Power Sources*, 182(2) (2008) 413-421.
- [5] N. Yousfi-Steiner, P. Moçotéguy, D. Candusso, D. Hissel, A review on polymer electrolyte membrane fuel cell catalyst degradation and starvation issues: Causes, consequences and diagnostic for mitigation, *Journal of Power Sources*, 194(1) (2009) 130-145.
- [6] S. Zhang, X. Yuan, H. Wang, W. Mérida, H. Zhu, J. Shen, S. Wu, J. Zhang, A review of accelerated stress tests of MEA durability in PEM fuel cells, *International journal of hydrogen energy*, 34(1) (2009) 388-404.
- [7] D. Liang, Q. Shen, M. Hou, Z. Shao, B. Yi, Study of the cell reversal process of large area proton exchange membrane fuel cells under fuel starvation, *Journal of Power Sources*, 194(2) (2009) 847-853.
- [8] H. Li, Y. Tang, Z. Wang, Z. Shi, S. Wu, D. Song, J. Zhang, K. Fatih, J. Zhang, H. Wang, A review of water flooding issues in the proton exchange membrane fuel cell, *Journal of Power Sources*, 178(1) (2008) 103-117.
- [9] Y. Hou, C. Shen, D. Hao, Y. Liu, H. Wang, A dynamic model for hydrogen consumption of fuel cell stacks considering the effects of hydrogen purge operation, *Renewable energy*, 62 (2014) 672-678.
- [10] Y.-S. Chen, C.-W. Yang, J.-Y. Lee, Implementation and evaluation for anode purging of a fuel cell based on nitrogen concentration, *Applied energy*, 113 (2014) 1519-1524.
- [11] B. Belvedere, M. Bianchi, A. Borghetti, A. De Pascale, M. Paolone, R. Vecchi, Experimental analysis of a PEM fuel cell performance at variable load with anodic exhaust management optimization, *international journal of hydrogen energy*, 38(1) (2013) 385-393.

سمت کاتد به شدت به شرایط تخلیه حساس بوده و نوسانات شدید ولتاژ در آن‌ها مشاهده می‌شود. این بیانگر آن است که باید رویه تخلیه در سمت آند و کاتد متفاوت باشد و بهتر است از روش بر پایه ولتاژ برای تخلیه استفاده شود. همچنین تأثیر انواع افت‌های ولتاژ بر عملکرد سلول بررسی شد. نتایج نشان داده است که با استفاده از طرح حاضر به بازده بالای ۵۰ درصد خواهیم رسید که در مقایسه با سایر منابع تولید قدرت قابل توجه است.

فهرست علائم

علائم انگلیسی

H_2	گاز هیدروژن
H	آنتالپی
I	شدت جریان
\dot{n}	دبی مولی هیدروژن
O_2	گاز اکسیژن
P	توان، W
t	زمان، s
V	ولتاژ، V

زیرنویس

f	سیال
$cell$	سلول
r	بحرانی کمینه
ohm	بحرانی بیشینه
act	گاز
$conc$	مخلوط

مراجع

- [1] Z. Wan, J. Wan, J. Liu, Z. Tu, M. Pan, Z. Liu, W. Liu, Water recovery and air humidification by condensing the moisture in the outlet gas of a proton exchange membrane fuel cell stack, *Applied Thermal Engineering*, 42 (2012) 173-178.
- [2] K. Li, G. Ye, J. Pan, H. Zhang, M. Pan, Self-assembled Nafion®/metal oxide nanoparticles hybrid proton exchange membranes, *Journal of*

- and recovery characteristics during gas purging in a proton exchange membrane fuel cell with a dead-ended anode, *Applied Thermal Engineering*, 129 (2018) 968-978.
- [17] Q. Jian, L. Luo, B. Huang, J. Zhao, S. Cao, Z. Huang, Experimental study on the purge process of a proton exchange membrane fuel cell stack with a dead-end anode, *Applied Thermal Engineering*, 142 (2018) 203-214.
- [18] M.M. Barzegari, S.M. Rahgoshay, L. Mohammadpour, D. Toghraie, Performance prediction and analysis of a dead-end PEMFC stack using data-driven dynamic model, *Energy*, 188 (2019) 116049.
- [19] F. Barbir, *PEM fuel cells: theory and practice*, Academic Press, 2012.
- [12] J.-J. Hwang, Effect of hydrogen delivery schemes on fuel cell efficiency, *Journal of Power Sources*, 239 (2013) 54-63.
- [13] S.-K. Park, S.-Y. Choe, Dynamic modeling and analysis of a 20-cell PEM fuel cell stack considering temperature and two-phase effects, *Journal of Power Sources*, 179(2) (2008) 660-672.
- [14] I.-S. Han, J. Jeong, H.K. Shin, PEM fuel-cell stack design for improved fuel utilization, *International Journal of Hydrogen Energy*, 38(27) (2013) 11996-12006.
- [15] I.-S. Han, B.-K. Kho, S. Cho, Development of a polymer electrolyte membrane fuel cell stack for an underwater vehicle, *Journal of Power Sources*, 304 (2016) 244-254.
- [16] B. Chen, Z. Tu, S.H. Chan, Performance degradation

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:

M. Khorshidian, S. M. Rahgoshay, M. Rahimi, S. H. M. Saadat, *Experimental Investigation of Integrated Power System of Dead-End Proton Exchange Membrane Fuel Cell H₂/O₂ Stack with Large Active Area and Internal Humidifier*, *Amirkabir J. Mech Eng.*, 53(3) (2021) 1667-1676.

DOI: [10.22060/mej.2020.17133.6517](https://doi.org/10.22060/mej.2020.17133.6517)

