مقاله

استفاده از فوم فلزی در پیل سوختی غشا پلیمری

ابراهیم افشاری*
استادیار گروه مهندسی مکانیک
دانشگاه اصفهان
e.afshari@eng.ui.ac.ir

زهرا شریعتی
دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک
دانشگاه اصفهان
zahra_shariati@ymail.com

تاریخ دریافت: ۱۳۹۳/۰۲/۱۰ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۳/۰۵/۱۱

چکیده

در این مقاله، استفاده از فوم فلزی به‌عنوان توزیع‌کنندهٔ گازهای واکنشگر و سیال خنک‌کننده، به‌منظور توزیع یکنواخت گازهای واکنشگر و دما، کاهش وزن، صرفه‌جویی در هزینهٔ ماشین‌کاری کانال‌های جریان و عملکرد بهتر پیل سوختی غشا پلیمری مطرح و بررسی شده است. معادلات حاکم بر جریان گازهای واکنشگر در نواحی گوناگون پیل (اعم از معادلات پیوستگی، بقای مومنتوم، اجزاء شارژ و انرژی به‌همراه روابط الکتروشیمیایی)، همچنین معادلات حاکم بر جریان سیال خنک‌کاری (اعم از معادلات پیوستگی، بقای مومنتوم و انرژی) به‌کمک نرم‌افزار فلوئنت حل شده‌اند و عملکرد کلی و گرمایی پیل با فوم فلزی بررسی شده است. نتایج شبیه‌سازی عددی نشان می‌دهد که در پیل با فوم فلزی نسبت به پیل با کانال‌های متداول، انتقال گازهای واکنشگر به لایه‌های کاتالیست بیشتر و توزیع گازها یکنواخت‌تر است. توزیع یکنواخت گازهای واکنشگر به توزیع یکنواخت چگالی جریان منجر و سبب می‌شود انتقال آب در سراسر سطح غشا بهتر انجام شود. در مورد خنک‌کاری پیل سوختی نیز میدان جریان با ساختار فوم فلزی مطلوب‌ترین میدان جریان خنک‌کاری به‌منظور کاهش اختلاف دمای سطح، کاهش دمای ماکزیمم و دمای میانگین سطح می‌باشد. از طرفی، افت فشار سیال خنک‌کننده نیز در پیل با فوم فلزی نسبتاً کم است. بنابراین میدان جریان متخلخل با ساختار فوم فلزی این پتانسیل را دارد که به‌عنوان میدان جریان گازها و میدان خنک‌کننده برای بهبود عملکرد تودهٔ پیل سوختی غشا پلیمری انتخاب شود.

واژگان کلیدی: پیل سوختی، پیل سوختی غشا پلیمری، میدان جریان گاز و خنک‌کاری، توزیع گاز و دما، افت فشار

۱. مقدمه

پیل‌های سوختی غشا پلیمری با مشخصات بارزی چون بازده بالا، دمای عملکرد پایین، تولید انرژی الکتریکی بدون ایجاد آلودگی، دانسیتهٔ انرژی بالا، تنوع و زمان راه‌اندازی کوتاه به‌عنوان یک گزینهٔ تولید توان برای استفاده در وسائل حمل‌ونقل و همچنین وسائل قابل حمل مطرح می‌باشند [۱]. با وجود پیشرفت‌های عدیده‌ای که طی

سال‌های اخیر برای ارتقاء عملکرد کلی پیل‌های انجام شده است، از جمله مسائل عمده در پیل سوختی غشا پلیمری، توزیع مناسب گازهای واکنشگر در داخل پیل و مدیریت صحیح حرارت می‌باشد. اگر مقدار گازها و آب خروجی پیل کنترل نشود، انتقال اکسیژن و هیدروژن به لایهٔ کاتالیست به‌طور قابل توجهی کاهش می‌یابد و ممکن است سبب گرم‌شدن بیش از حد و خشکی غشا شود. این وضعیت نامطلوب سبب افزایش مقاومت درونی پیل و در نتیجه افت عملکرد آن می‌شود. از این‌رو طراحی مؤثر کانال‌های جریان برای اطمینان از توزیع یکنواخت گازهای واکنشگر در پیل سوختی بسیار مهم و اساسی است.

مدیریت حرارت در پیل همان دفع گرمای تولیدشده درون تودهٔ پیل به محیط اطراف می‌باشد. عوامل تولید گرما در پیل شامل گرمای حاصل از واکنش‌های الکتروشیمیایی، بازگشت‌ناپذیر بودن واکنش‌ها و گرمای ناشی از تغییر فاز آب است. به‌عبارتی، با اینکه این پیل‌ها بازده تبدیل انرژی بسیار بالایی دارند، گرمای زیادی تولید می‌کنند که تقریباً معادل توان الکتریکی تولیدی آنها و یا حتی کمی بیشتر از آن است [۲ - ۳]. این گرمای اضافی باید از طریق کانال‌های خنک‌کاری دفع شود. علاوه بر این، توزیع غیریکنواخت غلظت واکنشگرها و دما داخل الکترودها سبب می‌شود نرخ واکنش‌های الکتروشیمیایی در قسمت‌های گوناگون سطح کاتالیست متفاوت باشد که این خود سبب کاهش بهره‌گیری و دوام کاتالیست می‌شود.

یک تک‌سل پیل سوختی غشا پلیمری متداول، شامل اسمبل الکترود - غشا و دو صفحهٔ قطبی است. در صفحات قطبی، کانال‌های جریان و خنک‌کاری از طریق ماشین‌کاری یا شکل‌دهی فلز ایجاد می‌شوند. وظیفهٔ ویژهٔ صفحات قطبی این است که جمع‌کنندهٔ جریان الکتریکی باشند، گازهای هیدروژن و اکسیژن را به لایهٔ کاتالیست هدایت و توزیع کنند و آب و حرارت تولیدی در پیل را به بیرون منتقل نمایند. علاوه بر این، توزیع یکنواخت گازهای واکنشگر در لایهٔ کاتالیست و خنک‌کاری یکنواخت پیل از دیگر وظایف این صفحات است. ساختارهای متنوعی از کانال‌های جریان از قبیل کانال‌های موازی، مارپیچی تک، مارپیچی چندتایی و کانال‌های به‌هم پیوسته برای پیل‌های سوختی توسعه و استفاده شده است [۴ - ۵]. هر یک از طرح‌های گوناگون کانال‌ها، مشخصات و آثاری دارند؛ اما توزیع غلظت واکنشگرها و توزیع دما داخل الکترودها یکنواخت نیست. به‌علاوه، هزینهٔ ماشین‌کاری کانال‌های جریان، به‌خصوص کانال‌ها با ابعاد کوچک زیاد است. صفحات قطبی ۴۰ درصد قیمت تودهٔ پیل سوختی را به‌خود اختصاص می‌دهند. در کنار معایب مربوط به انواع کانال‌های جریان، صفحات قطبی بیشتر از نصف وزن کل و حجم کل تک‌سل را اشغال می‌کنند [۶].

در این مقاله، علاوه بر استفاده از فوم فلزی به‌عنوان توزیع‌کنندهٔ گازهای واکنشگر، که به‌منظور کاهش حجم و وزن صفحات قطبی پیشنهاد و استفاده شده است [۷]، استفاده از فوم فلزی به‌جای کانال‌های خنک‌کاری نیز پیشنهاد شده است و عملکرد پیل با فوم فلزی به‌عنوان توزیع‌کنندهٔ گازهای واکنشگر و توزیع‌کنندهٔ سیال خنک‌کاری به‌طور همزمان بررسی شده است.

۲. فوم‌های فلزی

مواد فومی خانواده‌ای از مواد نو و پیشرفته‌اند؛ موادی که با توجه به ویژگی‌های منحصر به‌فرد خود، امکانات زیادی برای توسعه در سال‌های آتی دارند. این مواد در سه گروه عمده شامل فوم‌های پلیمری، سرامیکی و فلزی مطرح‌اند و تشابه زیادی با مواد طبیعی دارند. به‌عبارت دیگر، مواد موجود در طبیعت بیشتر به‌صورت سلولی و فومی هستند و کمتر به‌صورت توپر ظاهر می‌شوند. یک فوم فلزی، یک ساختار سلولی شامل یک فلز جامد (مانند آلومینیوم) به‌همراه تخلخل‌های پرشده با گاز می‌باشد. ویژگی بارز فوم‌های فلزی میزان تخلخل بالای آنهاست؛ به‌طوری‌که معمولاً ۷۵ تا ۹۵ درصد حجم کلی، شامل فضاهای خالی است. در شکل ۱ نمونه‌ای از یک فوم آلومینیومی نمایش

داده شده است. در خانوادهٔ مواد فومی، فوم‌های فلزی در مقایسه با فوم‌های سرامیکی و پلیمری جدیدترند و می‌توان بیان داشت بسیاری از افراد که در محدودهٔ دانش مهندسی مواد، فعالیت و مطالعه می‌کنند با این مواد به تازگی آشنا شده‌اند و با روش‌های تولید، خواص و کاربرد آنها کمتر آشنا هستند. به‌همین دلیل تحقیق در زمینهٔ روش‌های تولید، خواص و کاربرد این مواد به‌سرعت در حال گسترش است و به نظر می‌رسد که آیندهٔ درخشانی در انتظار این خانواده از مواد باشد [۸].

شکل ۱. نمایی از یک فوم آلومینیومی

این مواد در گروه مواد پیشرفته دسته‌بندی می‌شوند و به‌دلیل خواصی چون جذب انرژی در ضربه، انتقال حرارت بالا به‌دلیل سطح تماس زیاد با سیالات و جذب صدا اخیراً مورد توجه قرار گرفته و در کاربردهایی چون ضربه‌گیرها، مبدل‌های حرارتی، کاتالیزورها و جز این‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرند [۹].

در این مقاله از خاصیت تخلخل و انتقال حرارت بالای آنها استفاده شده و استفاده از فوم فلزی به‌عنوان توزیع‌کنندهٔ گازهای واکنشگر و سیال خنک‌کاری در پیل سوختی غشا پلیمری مطالعه شده است. روش‌های تولید فوم‌های فلزی، طی سالیان متمادی از طریق کار پژوهشی تنوع گسترده‌ای یافته‌اند. برخی روش‌ها کاملاً جنبهٔ تجاری پیدا کرده و تلاش‌هایی روی کاهش قیمت آنها در جریان است. اما برخی روش‌ها در حد کار آزمایشگاهی باقی مانده و هنوز به‌صورت تجاری عرضه نشده و یا توسعهٔ تجاری چندانی نیافته‌اند. در یک تقسیم‌بندی کلی روش‌های تولید فوم فلزی به سه روش فرایندهای حالت جامد، فرایندهای حالت مایع (ذوبی) و رسوب‌دهی بخار فلز روی پلیمر تقسیم می‌شوند که در این میان روش‌های ذوبی اهمیت بیشتری یافته‌اند [۸ – ۹]. روش‌های ذوبی نیز خود به سه روش عمده تقسیم می‌شوند که شامل روش افزودن مواد حباب‌زا به مذاب با گرانروی بالا، دمش هوا درون مذاب با گرانروی بالا و روش ریخته‌گری است [۹].

۳. ویژگی مواد فوم فلزی برای استفاده در پیل سوختی

مواد فلزی متخلخل، تفاوت‌های بسیاری از نظر ریخت‌شناسی، ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی دارند. هرچند تمامی این مواد ساختاری متخلخل دارند، اما ممکن است ویژگی‌های ریخت‌شناسی ویژه و منحصر به‌فردی داشته باشند. فوم‌های فلزی می‌توانند از حیث جانمایی سلولی به سه شکل سلول بسته، سلول باز و نیمه‌باز تقسیم شوند [۱۰]. یک مادهٔ فلزی متخلخل ساختاری ناهمگن دارد و دارای فاز جامد و غیرجامد است که فاز جامد، اسکلت و فاز غیرجامد، فضای متخلخل را شکل می‌دهد. سه نوع خلل و فرج در یک مادهٔ فلزی متخلخل شامل تخلخل سراسری، تخلخل پوشیده (نیمه‌باز) و تخلخل بسته وجود دارد. داخل یک مادهٔ نفوذپذیر، تنها تخلخل‌های سراسری در فرایند جریان سیال سهیم هستند؛ زیرا دو نوع تخلخل دیگر قابل دسترسی نیستند. تخلخل نیمه‌باز و بسته، به‌عنوان بخشی از زیرلایهٔ جامد عمل می‌کنند. اتصال داخلی تخلخل‌ها تأثیر مهمی بر نفوذپذیری یک مادهٔ فلزی متخلخل دارد. چنانچه یک مادهٔ فلزی متخلخل مشخص به‌عنوان واسطهٔ انتقال جرم و زیرلایهٔ واکنش، در یک پیل سوختی غشا پلیمری استفاده شود، باید به اندازهٔ کافی تخلخل داشته باشد تا

مسیرهای پخش و مساحت سطح کافی پیدا کند. همچنین، ساختار تخلخل داخلی ممکن است ایزوتروپیک (داراي خواص برابر از هر سو) نباشد [۱۰]. در جدول ۱، کاربرد و عملکرد فوم‌های فلزی متخلخل برای پیل‌های سوختی غشا پلیمری ارائه شده است.

هدایت گرمایی یک مادهٔ فلزی متخلخل، به‌ویژه هنگامی‌که این ماده به‌منظور مدیریت حرارت در یک پیل غشا پلیمری استفاده می‌شود نیز تأثیر بسیاری بر عملکرد آن دارد. مثلاً چنانچه پیل در دمای پایین کار کند، می‌تواند گرمای تولیدی را حفظ کند که منجر به افزایش دمای عملکردی داخلی پیل و افزایش عملکرد آن می‌گردد. در این شرایط هدایت گرمایی کمتر برای کاهش پخش گرما مفید است. هرچند در این میان چالشی وجود دارد و آن این است که برای افزایش هدایت الکتریکی، هدایت گرمایی بالاتری نیز مورد نیاز است. بنابراین باید مصالحه‌ای بین این دو پارامتر وجود داشته باشد. از طرف دیگر، چنانچه پیل در دمای بسیار بالا کار کند، هدایت گرمایی بالاتر به افزایش انتقال حرارت از داخل به خارج، به روش تابش و جابه‌جایی کمک می‌کند. بنابراین انتخاب مقدار بهینهٔ هدایت گرمایی به شرایط عملکردی واقعی پیل بستگی دارد [۱۰]. در شکل ۲ نمایی شماتیک از مواد مورد استفاده در پیل‌های سوختی غشا پلیمری، فرایند ساخت، ساختار و ویژگی‌های دیگر آنها نمایش داده شده است.

در سال‌های اخیر، مطالعات اندکی در زمینهٔ تحقیق و توسعه درخصوص مواد فلزی متخلخل انجام شده است. مواد خام متفاوتی چون فلز مرکب متخلخل و سرامیک برای تشکیل چنین مادهٔ فلزی متخلخلی می‌توانند استفاده شوند. در هر لایه از این ماده عملکرد متفاوتی حاصل می‌شود. مثلاً وقتی چنین ماده‌ای در لایهٔ پخش گاز پیل سوختی پلیمری استفاده می‌شود، می‌تواند به‌عنوان یک تنظیم‌کننده و متعادل‌کننده نرخ جریان عمل کند و یا می‌تواند در ساخت الکترود کامپوزیتی پیل نیز استفاده شود [۱۰].

جدول ۱. کاربرد و عملکرد فوم‌های فلزی متخلخل برای پیل‌های سوختی غشا پلیمری [۱۰]

شرح عملکرد	مقایسه با	کاربرد	فوم فلزی متخلخل
کاهش نفوذپذیری	کانال‌های موازی	میدان جریان	فوم آلیاژ نیکل - کروم و فوم SS316
توزیع یکنواخت جریان، افزایش انتقال جرم با جریان مغشوش	میدان جریان مارپیچ	میدان جریان	فوم نیکلی و تیتانیوم مشبک روکش طلا
توزیع مطلوب واکنشگرها، مقاومت به خوردگی قابل قبول، خطر نگه‌داری آب به‌واسطهٔ فرایندهای موئینگی	میدان جریان کانال‌بندی شده	میدان جریان	فوم نیکلی به‌همراه روکش
نفوذپذیری قابل کنترل، کاهش مقاومت الکتریکی و مقاومت در برابر انتقال جرم	–	صفحهٔ دوقطبی و لایهٔ پخش گاز	فوم کره‌های توخالی از جنس فولاد ضدزنگ
توزیع یکنواخت جریان گاز، مقاومت کمتر در برابر انتقال جرم، مقاومت الکتریکی ویژهٔ کمتر	کربن کاغذی، کربن پارچه‌ای، نمد فولاد ضدزنگ و صفحهٔ گرافیتی شیاردار	میدان جریان	فوم نیکلی

شکل ۲. نمایی شماتیک از طرح مواد مورد استفاده در پیل سوختی غشا پلیمری، فرایند ساخت، ساختار و ویژگی‌های دیگر [۱۰]

٤. صفحات قطبی پیل سوختی با فوم فلزی

صفحات قطبی/انتهایی یکی از مهم‌ترین و گران‌ترین بخش‌های تودهٔ پیل سوختی غشا پلیمری است و بیشتر از ۸۰ درصد کل وزن تودهٔ پیل را اشغال می‌کنند [۲]. وظیفهٔ این صفحات جداکردن سل‌های متفاوت پیل است.

کانال‌های جریان و خنک‌کاری، که وظیفهٔ توزیع گازهای واکنشگر و توزیع سیال خنک‌کاری در پیل را برعهده دارند، روی این صفحات ماشین‌کاری می‌شوند. کارایی خالص تودهٔ پیل سوختی به عملکرد این صفحات وابسته است. عملکرد این صفحات نیز به جنس و کانال‌های طراحی‌شده در آنها وابسته است.

فرایند ماشینکاری، که برای ایجاد کانال‌های جریان در صفحات قطبی گرافیتی استفاده می‌شود، بسیار گران و هزینه‌بر است. به‌علاوه خواص مکانیکی پایین (تردبودن) و طبیعت متخلخل گرافیت مانعی برای توسعه‌دهندگان پیل سوختی است که از صفحات نازک استفاده کنند. از این‌رو صفحات قطبی فلزی اخیراً توسعه پیدا کرده‌اند؛ اما پی‌آمدهای اصلی استفاده از آلیاژهای فلزی در تودهٔ پیل، خوردگی و آلودگی الکترولیت است. برخی راه‌حل‌ها شامل استفاده از پوشش مقاوم در برابر خوردگی پیشنهاد شده است تا از این مشکلات جلوگیری شود. اما چون در این صفحات نیز کانال‌هایی ایجاد می‌شود تا گازهای واکنشگر و سیال خنک‌کاری به‌داخل پیل انتقال یابد، توزیع این گازها و سیال خنک‌کاری داخل پیل یکنواخت نیست. دلیل این امر، وجود شانه‌های کانال‌ها در این صفحات است. منظور از شانه‌ها فاصلهٔ بین دو کانال است که گاز یا سیال خنک‌کننده در آنجا جریان ندارد. مشکل دیگر، گران‌بودن ماشینکاری کانال‌ها روی صفحات قطبی است. مسئلهٔ مهم دیگر نیز این است که صفحات قطبی یک بخش بزرگ؛ یعنی بالای ۵۰ درصد وزن کل و حجم کل پیل سوختی غشا پلیمری را اشغال می‌کند [۲].

مطابق شکل ۳، به‌منظور کاهش وزن و حجم پیل سوختی غشا پلیمری، می‌توان از فوم فلزی به‌عنوان توزیع‌کنندهٔ جریان گازها و سیال خنک‌کاری استفاده کرد؛ یعنی فوم فلزی جایگزین کانال‌های جریان (جریان گازها و یا جریان سیال خنک‌کاری) در صفحات قطبی می‌شود. به‌کار بردن فوم‌های فلزی متخلخل به‌عنوان میدان جریان مزایا و برتری‌هایی نسبت به کانال‌های معمولی دارد. توزیع یکنواخت گازهای واکنشگر روی لایهٔ پخش گاز و لایهٔ کاتالیست و همچنین توزیع یکنواخت دمای پیل مهم‌ترین مزایای استفاده از فوم فلزی به‌عنوان توزیع‌کنندهٔ جریان در پیل سوختی غشا پلیمری می‌باشد. اما، خورنده‌بودن محیط پیل سوختی استفاده از فلزات را با مشکل جدی مواجه کرده است؛ زیرا یون‌های فلزی درون پیل سبب تخریب الکترولیت می‌شوند. فوم‌های فلزی باید از نوعی انتخاب شوند تا در برابر مواد خورندهٔ درون پیل سوختی مقاومت کنند. از این‌رو فوم‌های فلزی به پوشش نیاز دارند. همچنین فوم فلزی باید خروج آب را تسهیل کند، لذا نیاز است که سطح آن (مشابه لایهٔ پخش گاز) آبگریز باشد. معمولاً فوم فلزی با موادی پوشش داده می‌شود تا به خارج‌شدن آب از داخل فوم فلزی کمک کند و خوردگی فلز نیز کم شود.

(الف)

(ب)

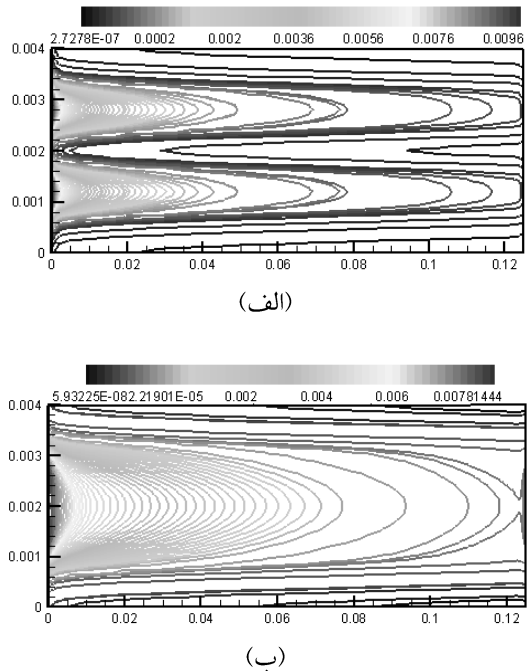
شکل ۳. مقایسهٔ دو میدان جریان واکنشگرها
الف) کانال‌های متداول، ب) فوم فولاد ضدزنگ

۵. فوم فلزی به‌عنوان توزیع‌کنندهٔ گازهای واکنشگر

به‌منظور بررسی توزیع گازهای واکنشگر در پیل سوختی و عملکرد پیل با فوم فلزی، یک تک‌سل پیل سوختی غشا پلیمری با میدان جریان فوم فلزی، با اجزای مرتبط به آن به‌روش عددی و به‌کمک ماژول پیل سوختی مدل‌سازی شده است. به‌دلیل طبیعت پیچیدهٔ پیل و به‌منظور سادگی حل معادلات، در توسعهٔ مدل فرض می‌شود که جریان دائم، جریان آرام، مخلوط گاز، گاز کامل، مخلوط جریان‌های گاز، تراکم‌پذیر، لایه‌های متخلخل همگن و ایزوتروپیک و پیل آدیاباتیک باشد و از تأثیر گرانش و مقاومت تماسی بین لایه‌ها صرف‌نظر شده و مدل انتقال آب به‌صورت تک‌فاز باشد.

مدل شامل معادلات بقای جرم، مومنتوم، بار الکتریکی و انرژی با واکنش‌های الکتروشیمیایی است. با محاسبهٔ ترم‌های چشمه و چاه واکنش‌های الکتروشیمیایی و همچنین خواص متفاوت اجزای پیل معادلات به‌روش عددی حل شده‌اند. برای مشاهدهٔ جزئیات معادلات حاکم، ترم‌های چشمه، خواص فیزیکی و خواص شیمیایی اجزای متفاوت پیل می‌توان به مرجع [۱۱] مراجعه کرد. ذکر این نکته لازم است که در این مدل‌سازی، در هر دو سمت آند و کاتد از فوم فلزی استفاده شده و ضریب تخلخل فوم فلزی ۰/۹ و ضریب نفوذپذیری آن $۱۰^{-۸}$ در نظر گرفته شده است.

در شکل ۴ توزیع غلظت اکسیژن در لایهٔ کاتالیست کاتد برای پیل با کانال ساده و پیل با فوم فلزی به‌عنوان توزیع‌کنندهٔ نمایش داده شده است. در هر دو پیل، در طول کانال به‌دلیل مصرف اکسیژن به‌واسطهٔ واکنش‌های الکتروشیمیایی، غلظت اکسیژن کاهش می‌یابد. اما با مقایسهٔ دو شکل مشاهده می‌شود که توزیع اکسیژن در پیل با فوم فلزی بسیار یکنواخت‌تر است. در پیل با کانال ساده، در زیر شانه‌ها نفوذ اکسیژن بسیار پایین بوده، لذا در این ناحیه نرخ واکنش‌ها کاهش می‌یابد. همچنین، چون سرعت اکسیژن عبوری از نواحی متخلخل پایین‌تر است، اکسیژن بهتر به لایهٔ پخش گاز و کاتالیست نفوذ می‌کند و بیشتر مصرف می‌شود. دانسیتهٔ جریان متناسب با مصرف اکسیژن می‌باشد و با مصرف بیشتر اکسیژن، دانسیتهٔ جریان افزایش می‌یابد. همچنین، توزیع یکنواخت گازهای واکنشگر منجر به توزیع یکنواخت دانسیتهٔ جریان می‌شود. این نتیجهٔ بسیار جالبی است که علاوه بر اینکه دانسیتهٔ جریان در پیل با فوم فلزی بالاتر از پیل با کانال ساده است، توزیع دانسیتهٔ جریان نیز یکنواخت‌تر است.

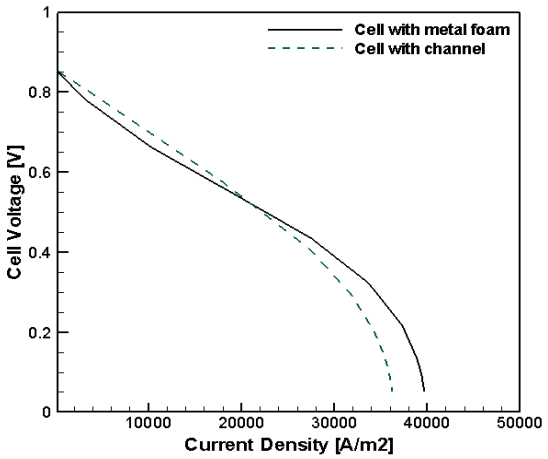


شکل ٤. توزیع غلظت اکسیژن در لایهٔ کاتالیست

الف) پیل با کانال متداول، ب) پیل با فوم فلزی

در شکل ۵ منحنی‌های پلاریزاسیون مربوط به پیل با کانال‌های ساده و پیل با فوم فلزی نمایش داده شده است. در دانسیتهٔ جریان‌های پایین و متوسط، عملکرد پیل با توزیع‌کنندهٔ فوم فلزی و کانال به‌عنوان توزیع‌کنندهٔ گازها تقریباً مشابه است. در دانسیتهٔ جریان‌های بالا، عملکرد پیل با فوم فلزی به‌عنوان توزیع‌کنندهٔ جریان بهتر است؛ زیرا در این ناحیه، عمدهٔ افت‌های داخل پیل ناشی از

محدودیت‌های انتقال جرم است. چون در پیل با فوم فلزی هم اکسیژن بیشتری در لایهٔ کاتالیست کاتد مصرف می‌شود و هم اکسیژن توزیع یکنواخت‌تری دارد؛ محدودیت‌های انتقال جرم کاهش یافته و عملکرد پیل بالاتر است.



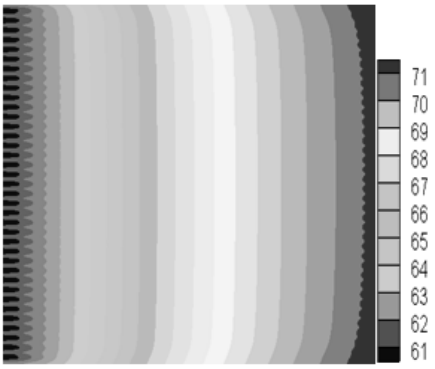
شکل ۵. مقایسهٔ منحنی قطبش پیل
با کانال‌های ساده و پیل با فوم فلزی

٦. فوم فلزی به‌عنوان توزیع‌کنندهٔ سیال خنک‌کننده

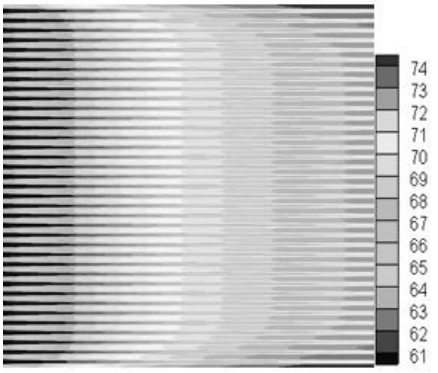
برای دستیابی به توان مورد نظر پیل، چند پیل تکی را کنار هم قرار می‌دهند و بدین ترتیب تودهٔ پیل ساخته می‌شود. برای عملکرد مناسب پیل، دفع گرمای ناشی از واکنش‌های الکتروشیمیایی بسیار مهم است و معمولاً به‌وسیلهٔ آب، که در کانال‌های خنک‌کاری تعبیه‌شده در صفحات قطبی یا صفحات خنک‌کاری مخصوص جریان دارد، انجام می‌شود [۲]. در کارکرد دائم پیل، شار حرارتی میانگین یک صفحهٔ خنک‌کاری (دو سطح خنک‌کاری) به‌کمک معادلهٔ ۱ به‌دست می‌آید [۲].

$$q = \frac{nI\left(-\frac{\Delta h_f^{\circ}}{2F} - V\right)}{2A} \qquad (۱)$$

به‌طوری‌که در این رابطه n تعداد پیل‌های تکی مربوط به هر صفحهٔ خنک‌کاری، I جریان، V ولتاژ خروجی، A سطح کل پیل، $h\Delta^{\circ}_f$ آنتالپی تشکیل آب و F ثابت فارادی است. به‌منظور مدل‌سازی عددی جریان سیال خنک‌کننده و صفحات قطبی، که این سیال در آن جریان می‌یابد، گرمای تولیدی در پیل به‌صورت شار حرارتی که به سطح صفحهٔ خنک‌کاری وارد می‌شود، شبیه‌سازی شده است [۲]. میدان جریان خنک‌کاری مورد مطالعه یک صفحهٔ قطبی و فوم فلزی تعبیه‌شده در آن به‌عنوان توزیع‌کنندهٔ سیال خنک‌کاری برای یک پیل با توان ۵ کیلووات و مساحت فعال ۲۲۵ سانتی‌متر مربع می‌باشد. معادلات حاکم بر جریان سیال خنک‌کاری نیز شامل بقای جرم، بقای مومنتوم و بقای انرژی در سیال خنک‌کاری و صفحات خنک‌کاری می‌باشد. با توجه به هندسهٔ مسئله و عدد رینولدز فرض می‌شود که جریان آرام و سیال غیرقابل تراکم است. به‌دلیل عملکرد خنک‌کاری در حالت دائم، ترم‌های گذرا در معادلات بقاء در نظر گرفته نشده است. شبیه‌سازی عددی جریان سیال و انتقال حرارت در صفحات با استفاده از نرم‌افزار فلوئنت انجام شده است (جزئیات بیشتر در مرجع [۲]). در شکل ۶ توزیع دما در سطح مرکزی صفحهٔ خنک‌کاری برای پیل با فوم فلزی به‌عنوان توزیع‌کنندهٔ سیال خنک‌کننده (شکل الف) در مقایسه با کانال‌های موازی متداول (شکل ۲) برحسب درجهٔ سلسیوس نمایش داده شده است. در حالت کلی، در طول کانال دمای آب به‌دلیل جذب حرارت از پیل افزایش می یابد. این شکل اختلاف دمای موضعی بین سیال و صفحه و همچنین میزان افزایش دمای سیال خنک‌کننده را نشان می‌دهد. افزایش دمای خنک‌کننده در پیل با کانال‌های موازی حدود ۱۴ درجهٔ سلسیوس است؛ اما در پیل با ساختار فوم فلزی حدود ۱۱ درجه می‌باشد. چون هرچه اختلاف دما کمتر باشد مطلوب‌تر است؛ لذا پیل با فوم فلزی از این دیدگاه مطلوب‌تر می‌باشد. مطابق شکل توزیع دما نیز در پیل با فوم فلزی یکنواخت‌تر است. توزیع یکنواخت دما منجر به توزیع یکنواخت واکنش‌های الکتروشیمیایی می‌شود و نتیجهٔ آن توزیع یکنواخت‌تر چگالی جریان است.



(الف)



(ب)

شکل ٦. توزیع دما در میدان جریان خنک‌کننده در سطح مرکزی صفحه در الف) پیل با کانال‌های ساده، ب) پیل با فوم فلزی

هرچند افت فشار در پیل با فوم فلزی نسبت به کانال‌های موازی بالاتر است (۱۴۰۰ کیلوپاسکال در مقایسه با ۱۰۰ پاسکال)؛ اما اولاً این میزان افت فشار در مقایسه با کانال‌های مارپیچی بسیار اندک است، ثانیاً می‌توان با افزایش نفوذپذیری فوم فلزی، میزان افت فشار را کنترل کرد. ثالثاً تأثیر بسیار مطلوب فوم فلزی بر پارامترهای گرمایی و همچنین کاهش وزن پیل آنقدر قابل توجه است که می‌توان از این اثر منفی چشم‌پوشی کرد.

۷. نتیجه‌گیری

در این مقاله، استفاده از فوم فلزی به‌عنوان توزیع‌کنندهٔ گازها و سیال خنک‌کاری به‌جای کانال‌های متداول بررسی شده است. به‌منظور بررسی توزیع گازهای واکنشگر و عملکرد کلی پیل، یک مدل عددی توسعه داده شده و معادلات بقای جرم، مومنتوم، اجزاء شارژ و انرژی به‌همراه روابط سینتیک الکتروشیمیایی در نواحی گوناگون پیل حل شده و عملکرد پیل با دو میدان جریان قیدشده مقایسه شده است. همچنین، به‌منظور بررسی عملکرد سیال خنک‌کاری در پیل، معادلات پیوستگی، مومنتوم و انرژی توسط نرم‌افزار فلوئنت حل شده و جریان سیال خنک‌کننده و انتقال حرارت در صفحات خنک‌کاری با سطح مقطع ۱۵×۱۵ سانتی‌متر برای یک پیل غشا پلیمری خنک‌شونده با آب مایع بررسی شده است. نتایج نشان می‌دهند که در پیل با فوم فلزی، انتقال گازهای واکنشگر به لایه‌های کاتالیست بیشتر و توزیع گازها یکنواخت‌تر است. همچنین، به‌دلیل حذف شانه‌های کانال در پیل با فوم فلزی انتقال آب در سرتاسر سطح غشا بهتر انجام شده و از خشکی غشا جلوگیری به‌عمل می‌آید. در مورد خنک‌کاری پیل سوختی نیز میدان جریان با ساختار فوم فلزی مطلوب‌ترین میدان جریان خنک‌کاری به‌منظور کاهش اختلاف دمای سطح، کاهش دمای ماکزیمم و دمای میانگین سطح می‌باشد. از طرفی، افت فشار سیال خنک‌کننده نیز در پیل با فوم فلزی نسبتاً کم است. بنابراین میدان جریان متخلخل با ساختار فوم فلزی، این پتانسیل را دارد که به‌عنوان میدان جریان خنک‌کننده برای بهبود عملکرد تودهٔ پیل سوختی غشا پلیمری انتخاب شود.

۸. مآخذ

[1] Afshari, E., S.A. Jazayeri .“Analyses of heat and water transport interactions in a proton exchange membrane fuel cell.” *Journal of Power Sources*, 194, 2006, pp. 423-432.

[2] Asghari, S., H. Akhgar, "Design of thermal management subsystem for a 5kW polymer electrolyte membrane fuel cell system. "*Journal of Power Sources*, 196(6), 2011, pp. 3141-3148.

[3] Baek, S.M., S.H. Yu, J.H. Nam, C.J. Kim "A numerical study on uniform cooling of large-scale PEMFCs with different coolant flow field design", *Applied Thermal Engineering*, 1427, 2011, pp. 1431-1434.

[4] Ge, S.H., B.L. Yi. "A mathematical model for PEMFC in different flow modes." *Journal of Power Sources*, 124, 2003, pp. 1-11.

[5] Scholta, J., F. Haussler, W. Zhang, L. Kuppers, L. Jorissen, W. Lehnert. "Development of a stack having an optimized flow field structure with low cross transport effects", *Journal of Power Sources*, 155, 2006, pp. 60-65.

[6] Tseng, C.J., B.T. Tsai, Z.S. Liu, T.C. Cheng, W.C. Chang, S.K. Lo. "A PEM fuel cell with metal foam as flow distributor", *Energy Conversion and Management* 62, 2012, pp. 14-21.

[7] Kumar, A., R.G. Reddy. "Modeling of polymer electrolyte membrane fuel cell with metal foam in the flow-field of bipolar/end plates", *Journal of Power Sources* 114, 2003, pp. 54-62.

[8] Banhart, J. "Manufacture, characterisation and application of cellular metals and metal foams." *Progress in Materials Science*, 46, 2001, pp. 559-632.

[۹] زمانی، جمال، محمد دیانی، میثم غیاثوند. "تولید فوم فلزی سلول بسته استحکام بالا با استفاده از روش ریخته‌گری." *دهمین کنفرانس مهندسی ساخت و تولید ایران*، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، ۱۳۸۸.

[10] Yuan, W., Y. Tang, X. Yang, Z. Wan. "Porous metal materials for polymer electrolyte membrane fuel cells – A review", *Journal of Applied Energy* 94, 2012, pp.309-329.

[۱۱] افشاری، ابراهیم، سیدعلی جزایری. "بررسی انتقال آب در پیل سوختی غشا پلیمری." *نشریهٔ پژوهشی مهندسی مکانیک ایران*، ۱۴(۱)، ص.۶-۲۹، ۱۳۹۱.