



مقایسه عملکرد پیل سوختی غشا پلیمری با کانال ساده و فوم فلزی به عنوان توزیع کننده جریان

ابراهیم افشاری^{1*} و جاماسب پیرکندی²

¹ استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه اصفهان، اصفهان

² استادیار، مجتمع دانشگاهی هوافضا، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران

تاریخ دریافت: 1392/06/17؛ تاریخ بازنگری: 1393/06/20؛ تاریخ پذیرش: 1393/09/26

چکیده

به منظور، توزیع یکنواخت گازهای واکنشگر، کاهش وزن، صرفه‌جویی در هزینه ماشین‌کاری کانال‌های جریان و عملکرد بهتر پیل سوختی غشا پلیمری، در این مقاله از فوم فلزی به عنوان توزیع کننده گازها استفاده می‌شود. با توسعه یک مدل سه بعدی، معادلات پیوستگی، بقای مومنتوم، اجزا، شارژ و انرژی به همراه روابط الکتروشیمیایی در نواحی مختلف پیل با یک مدل تک ناحیه‌ای و به روش عددی حل شده‌اند و عملکرد پیل با فوم فلزی با پیل‌های متداول مقایسه گردیده است. نتایج نشان می‌دهند که در پیل با فوم فلزی، انتقال گازهای واکنشگر به لایه‌های کاتالیست و میزان چگالی جریان بیشتر و توزیع گازها و چگالی جریان در دانسیته جریان‌های بالا، بسیار یکنواخت‌تر است. در دانسیته جریان‌های پایین و متوسط، عملکرد پیل با فوم فلزی و کانال معمولی تقریباً مشابه یکدیگر است؛ اما در دانسیته جریان‌های بالا، عملکرد پیل با فوم فلزی به دلیل انتقال بالاتر اجزا و از بین رفتن افت‌های انتقال جرم ناشی از شانه‌های کانال بهتر است. به دلیل ضریب نفوذپذیری بالای فوم فلزی، افت فشار این پیل‌ها در مقایسه با پیل‌های متداول اندکی بیشتر است و این مساله، نگرانی ناشی از افزایش مصرف توان پیل در سیستم‌های جانبی پیل را بر طرف کرده و استفاده از فوم‌های فلزی را بسیار توجیه‌پذیر می‌سازد.

کلمات کلیدی: پیل سوختی غشا پلیمری؛ فوم فلزی؛ کانال جریان؛ نفوذپذیری؛ دینامیک سیالات محاسباتی.

Comparison of PEM fuel cell performance with metal foam and parallel channel as flow-field gas distributor

E. Afshari^{1,*} and J. Pirkandi²

¹ Assist. Prof., Mechanical Eng., University of Isfahan, Isfahan, Iran

² Assist. Prof., Aerospace Eng., Malek Ashtar University of Technology, Tehran, Iran

Abstract

In this paper, metal foams as flow field are used in structures to effectively distribute the gaseous reactants for the electrochemical reactions, reduce weight, save the cost of machining of flow-field channels and enhance performance in the PEM fuel cells. A 3D model is considered and a set of equations consist of continuity, momentum, species and charge together with electrochemical kinetics in the form of single domain is developed and solved numerically. The comparison is made between the PEM unit cell with metal foam and parallel channel as flow-field gas distributor. The results show that after using metal foam flow field designs, the reactant gases transfer and current density increases and gases and current density distribution improves. The performance of the cell with metal foam are similar to cell with parallel channels for low and intermediate current densities; however by increasing current density, the cell with metal foam has better performances, due to omit of ribs effects. Furthermore, metal foam high permeability and foam structure help distributing the reactant gases evenly while keeping pressure loss and therefore parasitic power loss low.

Keywords: PEM fuel cell; Metal foam, Gas channel; Permeability; CFD.

1- مقدمه

پیل‌های سوختی، مبدل‌هایی الکتروشیمیایی هستند که مستقیماً انرژی شیمیایی ناشی از واکنش‌های شیمیایی را به انرژی الکتریکی تبدیل می‌کنند. بر خلاف باتری‌ها که وسایل ذخیره انرژی هستند، پیل‌های سوختی تا زمانی که سوختشان تامین شود، پیوسته می‌توانند کار کنند. بازده بالا و منافع زیست محیطی مشخصاتی هستند که پیل‌های سوختی را به مبدل‌هایی توانمند و جذاب تبدیل کرده‌اند. در میان انواع پیل‌ها، پیل‌های سوختی غشا پلیمری با مشخصات بارزی از قبیل: راندمان بالا، دمای عملکرد پایین، دانسیته انرژی بالا، تنوع و زمان راه‌اندازی کوتاه به عنوان یک گزینه تولید توان برای استفاده در وسایل حمل و نقل و وسایل قابل حمل مطرح می‌باشند. یک تک سل پیل سوختی غشا پلیمری متداول، شامل مجموعه الکتروود - غشا و دو صفحه قطبی است. در صفحات قطبی، کانال‌های جریان از طریق ماشین‌کاری یا شکل‌دهی فلز ایجاد می‌شوند. وظیفه ویژه صفحات قطبی این است که جمع‌کننده جریان الکتریکی باشند، گازهای هیدروژن و اکسیژن را به لایه کاتالیست هدایت و توزیع کنند و آب و حرارت تولیدی در پیل را به بیرون منتقل کند. علاوه بر این موارد، توزیع یکنواخت گازهای واکنشگر در لایه کاتالیست از دیگر وظایف این صفحات است. ساختارهای مختلفی از کانال‌های جریان از قبیل کانال‌های موازی، مارپیچی تک، مارپیچی چند تایی و کانال‌های به هم پیوسته برای پیل‌های سوختی توسعه داده شده و استفاده گردیده است [1]. هر کدام از طرح‌های مختلف کانال‌ها، مشخصات و پی‌آمدهایی دارند؛ اما به دلیل وجود شانه‌ها و کانال‌ها در صفحات قطبی، توزیع غلظت واکنشگرها و همچنین توزیع دما داخل الکتروودها یکنواخت نیست. این امر باعث می‌شود نرخ واکنش‌های الکتروشیمیایی در قسمت‌های مختلف سطح کاتالیست متفاوت باشد که سبب می‌شود بهره‌گیری و دوام لایه کاتالیست کاهش یابد. به علاوه، هزینه ماشین‌کاری کانال‌های جریان، به خصوص کانال‌ها با ابعاد کوچک، زیاد است. صفحات قطبی 40 درصد قیمت توده پیل سوختی را به خود اختصاص می‌دهند. در کنار این معایب مربوط به انواع کانال‌های جریان، صفحات قطبی بیشتر از نصف وزن کل و حجم کل تک سل را اشغال می‌کنند [2].

به منظور کاهش حجم و وزن، کومار¹ و ردی² [3] استفاده از فوم فلزی به عنوان توزیع‌کننده جریان را پیشنهاد دادند که جایگزین کانال‌های جریان می‌شود. عملکرد تک سل‌های آنها با فوم فلزی نسبتاً خوب بود.

کومار و ردی [3-5] با ارائه مدل‌های عددی سه بعدی و دائم برای یک تک سل پیل سوختی غشا پلیمری با فوم فلزی به عنوان توزیع‌کننده جریان، به بررسی عملکرد پیل با فوم‌های فلزی مختلف پرداختند. نتایج آنها نشان دهنده تاثیر زیاد نفوذپذیری فوم فلزی بر عملکرد پیل می‌باشد. مدل آنها دما ثابت بوده و تاثیر فوم فلزی بر انتقال گرما و تاثیر تغییر دما بر خواص فیزیکی و شیمیایی بررسی نشده است. تسای³ و همکارانش [6 و 7] به مقایسه میدان جریان‌های مرسوم در پیل سوختی با فوم فلزی به عنوان توزیع‌کننده جریان پرداختند. نتایج تجربی آنها نشان می‌دهد که استفاده از فوم فلزی به دلیل توزیع مناسب‌تر گازهای واکنشگر در محل واکنش‌های شیمیایی، عملکرد پیل سوختی بهبود می‌یابد. علاوه بر مقایسه میدان‌های مختلف جریان، مطالعه پارامتری پیل شامل تاثیر فشار عملکرد و استوکیومتری نیز انجام شده است. آریستی⁴ و همکارانش [8] به بررسی فوم‌های فلزی به عنوان میدان جریان و همچنین لایه پخش‌گاز در پیل‌های سوختی متانولی پرداختند. تاثیر اندازه تخلخل‌ها و دانسیته فوم بر عملکرد پیل از نتایج تحقیق آنها می‌باشد. آنها نشان دادند که عملکرد فوم‌های فلزی با دانسیته یکسان و اندازه تخلخل‌های مختلف، یکسان نیست. یان⁵ و همکاران [9] در مقاله‌ای مروری به بررسی مواد فلزی متخلخل برای کاربرد در پیل‌های سوختی غشا پلیمری پرداختند. نویسندگان مروری بر فرایند ساخت، مشخصات و کاربردهای انواع فوم‌های فلزی برای استفاده در پیل‌های سوختی غشا پلیمری انجام داده‌اند. وانگ⁶ [10] با ارائه مدلی از پیل سوختی غشا پلیمری با فوم فلزی، به بررسی انتقال گازهای واکنشگر، گرما و الکترون

¹ Kumar Reddy

² Reddy

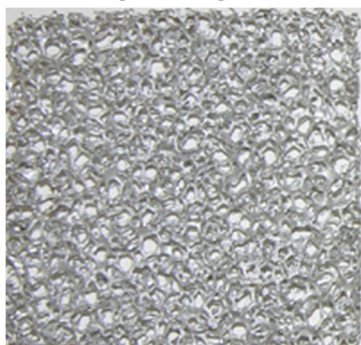
³ Tsai

⁴ Arisetty

⁵ Yuan

⁶ Wang

هر روش تولید برای یک زیر مجموعه از فلزات متخلخل با یک رنج محدود چگالی نسبی و اندازه منافذ، استفاده می‌شود. وابسته به نوع فرایند ساخت، خواص فوم‌های فلزی به خواص فلز، چگالی نسبی، توپولوژی منافذ وابسته است. شکل 1 ساختار داخلی یک فوم فلزی با تخلخل‌های مختلف را نشان می‌دهد. به دلیل فشرده شدن فوم هنگام مونتاژ کردن دستگاهی که فوم داخل آن قرار می‌گیرد (از جمله پیل سوختی)، این تخلخل کمی کاهش می‌یابد.



الف



ب



ج

شکل 1- ساختار میکروسکوپی فوم فلزی با اندازه تخلخل - های مختلف (الف) 10ppi، (ب) 20ppi و (ج) 40ppi [8]

پرداختند. محدودیت این مطالعه این است که عملکرد پیل با رطوبت نسبی ورودی پایین بررسی شده است. در مطالعات گذشته کمتر به مطالعه سه بعدی پیل با فوم فلزی پرداخته شده و تاثیر حضور شانه‌های کانال در حالت بدون فوم و حذف آنها با فوم فلزی بررسی نشده است.

در این مقاله، طرح استفاده از فوم فلزی به عنوان توزیع کننده جریان گازهای واکنشگر به جای کانال‌های رایج مطرح و استفاده گردیده است. تمام نواحی پیل سوختی به صورت یک مدل سه بعدی و تک ناحیه‌ای در نظر گرفته شده و انتقال گازهای واکنشگر و توزیع دانسیته جریان در پیل با کانال ساده و با فوم فلزی انجام گرفته است. مقایسه عملکرد پیل با این دو میدان جریان، بررسی تاثیر شانه‌ها و افت فشار ایجاد شده در آنها از اهداف عمده این مقاله می‌باشد.

2- فوم‌های فلزی

توجه به فوم‌های فلزی به دهه 1940، هنگامی که سوسنیک اختراعی را در زمینه ساخت فوم‌های فلزی ثبت کرد، بر می‌گردد [11]. او در روش ابداعی خود عناصری را با هم مخلوط کرد که اختلاف دمای ذوب و جوش بسیار زیادی داشتند. در نتیجه، در دمای ذوب یکی از آنها، عنصر دیگر بخار می‌شد (برای مثال آلومینیوم و جیوه). با این روش او توانست فلز متخلخل تولید کند. در طبیعت نیز شاهد موادی مانند استخوان و چوب هستیم که دارای ساختاری شبیه به فوم‌های فلزی هستند. پس از آن، فوم‌های فلزی به عنوان شاخه‌ای از مواد نوین مطرح شدند. در واقع، فوم‌های فلزی یک کلاس جدید از مواد هستند که تاکنون به طور دقیق مشخص نشده‌اند؛ اما بعضی خواص جذاب و مهم دارند. این فوم‌ها شبیه دیگر فوم‌ها یک ساختار سلولی دارند. فوم‌های فلزی محدوده خواص فلزات را توسعه داده، سبک، سفت و خشک هستند، مشخصه جذب انرژی در ضربه خوب دارند، هدایت حرارتی و الکتریکی آنها بالا است، شکل‌پذیری و قابلیت جوشکاری و نفوذپذیری گاز آنها بالا است. فوم‌های فلزی بعضی مزایای جدید در توزیع منافذ، کنترل نفوذپذیری و اندازه تخلخل و سطح ویژه بزرگ‌تر را از خود نشان می‌دهند. در یک تقسیم‌بندی بر اساس ماده اولیه فوم، این فوم‌ها می‌توانند به روش‌های: بخار فلز، فلز مایع، پودر فلز و یون فلز ساخته شوند و بر مبنای ماده پایه آنها دسته‌بندی می‌شوند.

کنند. از این رو صفحات قطبی فلزی اخیراً توسعه پیدا کرده‌اند؛ اما پی‌آمدهای اصلی استفاده از آلیاژهای فلزی در توده پیل، خوردگی و آلوده شدن الکترولیت است. بعضی راه حل‌ها شامل استفاده از پوشش مقاوم در مقابل خوردگی پیشنهاد شده است تا از این مشکلات جلوگیری شود.

به منظور استفاده مناسب‌تر از سطح مجموعه الکتروود - غشا، کانال‌های جریان معمولاً روی سطح صفحات قطبی ماشینکاری می‌شوند. میدان‌های جریان مختلفی برای ایجاد در صفحات قطبی پیل‌های سوختی در گذشته توسعه داده شده است. این میدان‌ها شامل: کانال‌های موازی، مارپیچی، پینی و بین انگشتی¹ است. اهداف عمده این طرح‌ها که هر کدام پیامدهای مخصوصی دارند، توزیع کارا و موثر گازهای واکنشگر و خارج کردن آسان آب است. به دلیل وجود شانه‌ها و کانال‌ها در صفحات قطبی، توزیع غلظت واکنشگرها و همچنین توزیع دما داخل الکتروودها در داخل مجموعه الکتروود - غشا یکنواخت نیست، که این امر توزیع نرخ واکنش‌های الکتروشیمیایی نایکنواخت را نتیجه می‌دهد [1]. مساله دوم گران بودن ماشینکاری کانال‌های جریان بر روی صفحات قطبی است. مساله سوم این است که صفحات قطبی یک بخش بزرگ یعنی بالای 50 درصد وزن کل و حجم کل پیل سوختی غشا پلیمری را اشغال می‌کند [2].

به منظور کاهش وزن و حجم پیل سوختی غشا پلیمری، می‌توان از فوم فلزی به عنوان توزیع کننده جریان استفاده کرد. یعنی فوم فلزی جایگزین کانال‌های جریان در صفحات قطبی می‌شود. به کار بردن فوم‌های فلزی متخلخل به عنوان میدان جریان مزایا و برتری‌هایی نسبت به کانال‌های معمولی دارد. توزیع یکنواخت گازهای واکنشگر بر روی لایه پخش گاز و لایه کاتالیست، مهمترین مزیت استفاده از فوم فلزی به عنوان توزیع کننده جریان در پیل سوختی غشا پلیمری می‌باشد. عملکرد پیل با فوم‌های فلزی نسبت به کانال‌های رایج می‌تواند با کاهش نفوذپذیری فوم فلزی افزایش یابد. هر چند که کاهش نفوذپذیری در طرح کانال ماشینکاری شده متداول به دلیل سختی در براده‌برداری کانال با سطح مقطع نازک، کمتر از مقدار مشخص⁸ 10^{-8} امکان‌پذیر نیست [12]. در کانال‌های معمولی، لایه پخش گاز زیر شانه‌ها معمولاً

بر مبنای خواص منحصر به فرد فوم‌های فلزی، آنها نقش مهم و حیاتی در زمینه‌های مختلف از قبیل انرژی، محیط زیست، ذوب و استخراج فلزات، صنایع فلزی، صنعت پزشکی و غیره دارند و به طور گسترده برای صافی‌ها و جدا کننده‌ها، توزیع کننده‌های جریان، مبدل‌های حرارتی، لوله‌های حرارتی، پشتیبان کاتالیست‌ها، توزیع کننده‌های جریان در پیل سوختی و مانند این‌ها استفاده می‌شوند. مشخصه بارز قابلیت هدایت حرارتی بالای فوم‌های فلزی، آنها را از دیگر فوم‌ها برای کاربرد در پیل سوختی متمایز کرده است. زیرا انتقال گرما به بیرون پیل (مدیریت گرما) بر عملکرد پیل تاثیر گذار است [12].

3- صفحات قطبی پیل سوختی با فوم فلزی

صفحات قطبی یکی از مهمترین و گران‌ترین بخش‌های توده پیل سوختی غشا پلیمری است و بیشتر از 80 درصد کل وزن توده پیل را اشغال می‌کند [4]. وظیفه این صفحات به عنوان صفحات جدا کننده در بین سل‌های مختلف و در نتیجه نگه داشتن مجزا اکسید کننده و سوخت در تماس مستقیم با یکدیگر است. کانال‌های جریان که وظیفه توزیع گازها در پیل را دارند روی این صفحات ماشین‌کاری می‌شوند. این صفحات به انتقال موثر گرمای تولیدی واکنش از سطح فعال کمک می‌کنند و بنابراین از تولید گرمای موضعی در پیل جلوگیری می‌شود. این صفحات همچنین به عنوان جمع کننده‌های جریان عمل کرده و اتصالات الکتریکی در بین سل‌های تکی را ایجاد کرده و یک زیر ساخت ساختاری برای توده پیل فراهم می‌کنند. کارایی خالص توده پیل سوختی وابسته به عملکرد این صفحات در توده پیل می‌باشد. عملکرد این صفحات نیز وابسته به جنس آنها و کانال‌های طراحی شده در آنها است.

صفحات قطبی/انتهایی گرافیتی در پیل سوختی غشا پلیمری زیاد استفاده شده و عملکرد خوبی دارند. طرح‌های فرایندهای مختلف ساخت برای این صفحات بر مبنای جنس گرافیت پیشنهاد و اجرا شده است. اما فرایند ماشینکاری که برای ایجاد کانال‌های جریان در این صفحات استفاده می‌شود بسیار گران و هزینه‌بر است. به علاوه خواص مکانیکی پایین (ترد بودن) و طبیعت متخلخل گرافیت مانعی برای توسعه دهندگان پیل سوختی است که از صفحات نازک استفاده

¹Interdigitated

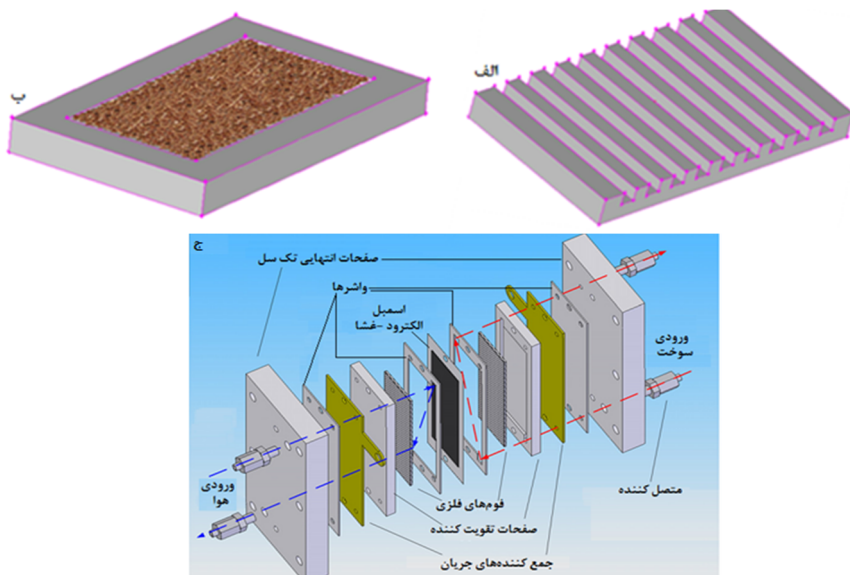
شامل دو لایه متمایز و در بر گیرنده اندازه‌های مختلف تخلخل است (تخلخل‌های بزرگ برای میدان جریان و تخلخل کوچک‌تر جایگزین لایه پخش گاز) و می‌تواند در تماس مستقیم با غشا پوشیده شده با کاتالیست، قرار گیرد.

باید توجه داشت که خورنده بودن محیط پیل سوختی استفاده از فلزات را با مشکل جدی مواجه کرده است؛ زیرا یون‌های فلزی در درون پیل سبب تخریب الکترولیت می‌شوند. مشابه با صفحات قطبی فلزی که نیاز به پوشش دارند تا از خوردن شدن آنها جلوگیری شود، فوم‌های فلزی نیز باید از نوعی انتخاب شوند تا در برابر مواد خورنده در داخل پیل سوختی مقاومت کنند. از این‌رو فوم‌های فلزی به پوشش نیاز دارند. همچنین فوم فلزی باید خروج آب را تسهیل کند و بنابراین نیاز است که سطح آن (مشابه لایه پخش گاز) آبگریز باشد. فوم فلزی با PTFE پوشش داده می‌شود تا به خارج شدن آب از داخل فوم فلزی کمک کند و خوردگی فلز نیز کم شود. فوم‌های فلزی عموماً ایزوتروپیک بوده و بنابراین نفوذپذیری وابسته به جهت جریان است. شکل 2 توده پیل با فوم فلزی به عنوان توزیع کننده جریان را نشان می‌دهد. صفحات آلومینیومی ماشینکاری می‌شوند و فوم فلزی در داخل آنها قرار می‌گیرد. این صفحات، فوم فلزی را تقویت می‌کنند و به عنوان جمع کننده جریان نیز استفاده می‌شوند.

10 تا 20 درصد حجمی فشرده می‌شود و در حالی که هدایت الکتریکی افزایش می‌یابد، تخلخل و نفوذپذیری لایه پخش گاز کم شده و بنابراین از انتقال گازهای واکنشگر ممانعت می‌شود. پی‌آمد این امر، کاهش دوام لایه کاتالیست و استفاده کمتر از این لایه است. فوم‌های فلزی مشبک تماس سه بعدی با لایه پخش گاز از طریق شبکه شانه‌ها را فراهم می‌کنند و مقاومت الکتریکی پیل را کاهش می‌دهند. ساختار متخلخل و نفوذپذیری بالای آنها به توزیع مناسب و یکنواخت واکنشگرها، در حالی که افت فشار پایین است کمک می‌کند.

مزیت مهم دیگر فوم‌های فلزی این است که می‌توانند به عنوان محافظ لایه کاتالیست (برای انجام واکنش‌های الکتروشیمیایی) در پیل سوختی استفاده شوند. جدا از خواص ساختاری، با مقایسه میدان‌های جریان متداول و فوم‌های فلزی، فوم‌های فلزی مزیت‌هایی در بالا بردن و تسهیل جریان دو فاز و ظرفیت جمع شدن جریان ایجاد می‌کنند. به عنوان مثال، خارج شدن موثر دی اکسید کربن در دانسیته جریان‌های بالا، فاکتور مهمی است که بر عملکرد پیل متانولی تاثیر می‌گذارد.

فوم‌های فلزی، متخلخل و هدایت کننده گاز بوده و از این‌رو این قابلیت را دارند که وظایف لایه پخش گاز را انجام دهند. بنابراین این امکان وجود دارد که با به کار بردن فوم فلزی، لایه پخش گاز را حذف کرد. در این وضعیت، فوم فلزی



شکل 2- اجزا پیل سوختی الف) صفحه قطبی با کانال‌های جریان گاز ب) صفحه قطبی با فوم فلزی ج) توده پیل با فوم فلزی

4- مدل فیزیکی و عددی

پیل شامل صفحات قطبی همراه با کانال‌ها (فوم فلزی) در سمت آند و کاتد، لایه‌های پخش گاز آند و کاتد، لایه‌های کاتالیست آند و کاتد و غشا می‌باشد. هوای مرطوب وارد کانال (ناحیه فوم) کاتد و گاز هیدروژن وارد کانال (ناحیه فوم) آند می‌شود. پخش هیدروژن از میان لایه پخش گاز آند به طرف لایه کاتالیست انجام می‌شود. در لایه کاتالیست آند، مولکول‌های هیدروژن به دو یون هیدروژن و دو الکترون تبدیل می‌شوند. پروتون‌ها از میان غشاء به طرف لایه کاتالیست کاتد حرکت کرده و الکترون‌ها نیز از طریق مدار خارجی به سمت کاتد منتقل می‌شوند و یک جریان الکتریکی خارجی به وجود می‌آید. در طرف کاتد، اکسیژن از میان لایه پخش گاز کاتد به طرف سطح کاتالیست منتقل شده و با پروتون‌ها و الکترون‌ها واکنش داده و آب تشکیل می‌شود.

با در نظر گرفتن عملکرد یکسان همه سل‌ها در توده پیل سوختی، در مدل‌سازی پیل سوختی غشا پلیمری متداول است که فقط یک تک کانال مدل شود. اما در این مطالعه، چون هدف مقایسه عملکرد دو پیل با کانال به عنوان توزیع کننده جریان و فوم فلزی به عنوان توزیع کننده جریان می‌باشد، نیاز است که حداقل دو کانال و معادل مساحت کانال‌ها و شانه بین آنها فوم فلزی مدل‌سازی شود. این کار باعث می‌شود تاثیر مهم شانه‌های کانال (ناحیه بین دو کانال که در تماس با لایه پخش گاز است) نیز بررسی شود.

به دلیل طبیعت پیچیده پیل و به منظور سادگی حل معادلات، در توسعه مدل فرض می‌شود که جریان دائم؛ جریان آرام (عدد رینولدز در کانال بدون فوم 20 و در کانال با فوم 0/1 است)؛ مخلوط گاز، گاز کامل (دما حدود 80°C و فشار 1/5 atm)؛ مخلوط جریان‌های گاز، تراکم‌پذیر؛ لایه‌های متخلخل همگن و ایزوتروپیک [13]؛ پیل آدیاباتیک؛ از تاثیر گرانش صرف‌نظر (جهت نیروی جاذبه در جهت حرکت سیال در کانال‌ها نمی‌باشد)؛ از مقاومت تماسی بین لایه‌ها صرف‌نظر [13] و مدل انتقال آب به صورت تک فاز کامل (دما حدود 80°C و میزان آب مایع بسیار ناچیز است) می‌باشد.

4-1 معادلات حاکم

مدل شامل معادلات دیفرانسیل همبسته شده غیر خطی شامل بقا جرم، مومنوم، بار الکتریکی و انرژی با واکنش‌های

الکتروشیمیایی است. با محاسبه ترم‌های چشمه و چاه واکنش‌های الکتروشیمیایی، ابتدا معادلات گونه‌های جرمی برای مرحله اول مصرف واکنشگرها و تولید آب و در مرحله بعد معادله بار الکتریکی و انرژی به کار می‌روند. معادلات حاکم در جدول 1 خلاصه شده‌اند. برای حل معادلات، از روش تک ناحیه‌ای استفاده می‌شود. در این روش فقط یک سری معادلات بقا در تمام نواحی پیل سوختی به کار می‌رود و نیاز به مشخص کردن شرایط مرزی در فصل مشترک بین نواحی نمی‌باشد و شرایط مرزی فقط در سطح بیرونی پیل نیاز است. عدم اعمال شرایط مرزی در فصل مشترک نواحی به دقت حل مساله افزوده و حل معادلات را آسان‌تر می‌نماید؛ اما زمان محاسبات کامپیوتری طولانی‌تر می‌شود [14].

جدول 1- معادلات حاکم بر مدل پیل سوختی

شماره	معادله بقا	فرم ریاضی معادله حاکم
(1)	جرم	$\nabla \cdot (\rho \vec{u}) = 0$
(2)	مومنوم	$\frac{1}{\varepsilon} \nabla \cdot (\rho \vec{u} \vec{u}) = -\nabla p + \nabla \cdot (\mu \nabla \vec{u}) + S_{Dar}$
(3)	اجزا	$\nabla \cdot (\vec{u} X_k) = \nabla \cdot (D_k^{eff} \nabla X_k) + S_k$
(4)	پروتون	$\nabla \cdot (\sigma_e^{eff} \nabla \phi_e) + S_e = 0$
(5)	الکترون	$\nabla \cdot (\sigma_s^{eff} \nabla \phi_s) + S_s = 0$
(6)	انرژی	$\nabla \cdot (\rho c_p \vec{u} T) = \nabla \cdot (k^{eff} \nabla T) + S_T$

در معادلات 1 تا 6، ρ ، ε ، P ، X_k ، ϕ_e ، ϕ_s ، μ و T به ترتیب بردار سرعت، چگالی سیال، ضریب تخلخل، فشار، کسر مولی جز k ام، پتانسیل الکتریکی در الکترولیت (غشا)، پتانسیل فاز جامد، ضریب هدایت حرارتی موثر، ویسکوزیته و دما است. ترم‌های چشمه مربوط به این معادلات در جدول 2 ارائه شده است. خواص الکتروشیمیایی و فیزیکی پیل نیز به ترتیب در جداول 3 و 4 ارائه شده‌اند. در جداول 2 تا 4، j ، α ، η ، ϕ و V_{oc} ، به ترتیب دانسیته جریان تبادل، ضریب انتقال، اضافه ولتاژ، پتانسیل و پتانسیل مدار باز می‌باشد. جدول 5 پارامترهای فیزیکی و خصوصیات پیل سوختی را نشان می‌دهد.

جدول 2- ترم‌های چشمه و چاه [13، 14]

معادلات بقا	کانال (فوم فلزی)*	لایه‌های پخش گاز	لایه‌های کاتالیست	غشا
مومنوم	$S_{Dar} = -\frac{\mu}{K} \bar{u}$	$S_{Dar} = -\frac{\mu}{K} \bar{u}$	$S_{Dar} = -\frac{\mu}{K} \bar{u}$	$S_{Dar} = -\frac{\mu}{K} \bar{u}$
اجزا	$S_k = 0$	$S_k = 0$	$S_k = -\nabla \cdot (\frac{n_d}{F} I) - \frac{s_k j}{nF}$	$S_k = -\nabla \cdot (\frac{n_d}{F} I)$
پروتون	$S_e = 0$	$S_e = 0$	$S_e = j$	$S_e = 0$
الکترون	$S_s = 0$	$S_s = 0$	$S_s = -j$	$S_s = 0$
انرژی	$S_T = 0$	$S_T = 0$	$S_T = j(\eta + T \frac{dU_0}{dT}) + \frac{I^2}{\sigma^{eff}}$	$S_T = \frac{I^2}{\sigma^{eff}}$

واکنش‌های الکتروشیمیایی:
 M_k : chemical formula of species k
 s_k : stoichiometry coefficient
 n : number of electron transferred
 $\sum s_k M_k = ne^-$ where

واکنش اکسایش در آند: $H_2 - 2H^+ \rightarrow 2e^-$ و اکنش کاهش اکسیژن در کاتد: $2H_2O - O_2 - 4H^+ \rightarrow 4e^-$

* اگر به جای فوم فلزی، کانال در پیل سوختی باشد، تمام ترم‌های چشمه این ستون صفر می‌باشد

جدول 3- خواص الکتروشیمیایی [13، 14]

پارامتر	مقدار در سمت آند	مقدار در سمت کاتد
دانسیتته جریان تبادل (A/m ³)	$j = ai_{0,a} (\frac{C_{H_2}}{C_{H_2}^{ref}})^{1/2} (\frac{\alpha_a + \alpha_c}{RT} F \eta)$	$j = -ai_{0,c} (\frac{C_{O_2}}{C_{O_2}^{ref}}) \exp(-\frac{\alpha_c}{RT} F \eta)$
اضافه پتانسیل سطح (V)	$\eta = \phi_s - \phi_e - U_o (\phi_s = 0)$	$\eta = \phi_s - \phi_e - U_o (\phi_s = V_{cell})$
پتانسیل مدار باز (V)	$U_o = 0$	$U_o = 1.23 - 0.9 \times 10^{-3} (T - 298.15)$
ضریب انتقال	$\alpha_a + \alpha_c = 2$	$\alpha_c = 1$
دانسیتته جریان تبادل × مساحت سطح فعال (A/m ³)	$ai_{0,a} = 1.0 \times 10^9$	$ai_{0,c} (353) = 2.0 \times 10^4$

جدول 4- خواص فیزیکی [13، 14]

پارامتر	نماد و مقدار
فعالیت بخار آب	$a = C^{H_2O} / C_{sat}^{H_2O}$
هدایت یونی غشا (Ω/m)	$\sigma = (0.5139\lambda - 0.326) \exp(12680(\frac{1}{303} - \frac{1}{T}))$
محتوی بخار آب غشا	$\lambda = \begin{cases} 0.043 + 17.81a - 39.85a^2 + 36.0a^3 & 0 < a \leq 1 \\ 14 + 1.4(a - 1) & 1 < a \leq 3 \\ 16.8 & a > 3 \end{cases}$
ضریب درگ الکترو-اسمزیک	$n_d = \begin{cases} 1.0 & \lambda \leq 14 \\ 1.5/8(\lambda - 14) + 1.0 & otherwise \end{cases}$
ضریب پخش آب در غشا (m ² /s)	$D_e^{H_2O} = \begin{cases} 3.1 \times 10^{-7} \lambda (e^{0.28\lambda} - 1) e^{(-2346/T)} & 0 < \lambda \leq 3 \\ 4.17 \times 10^{-8} \lambda (1 + 161e^{-\lambda}) e^{(-2346/T)} & \lambda > 3 \end{cases}$
ضریب پخش جز k (m ² /s)	$D_k = \varepsilon_i^{1.5} D_0 (\frac{T}{T_0})^{1.5} (\frac{P}{P_0})$
ضریب پخش موثر (m ² /s)	$D_k^{eff} = \varepsilon^{1.5} D_k$
ضریب هدایت حرارتی موثر (W/m.K)	$k^{eff} = \frac{1}{\frac{1-\varepsilon}{3k_s} + \frac{\varepsilon}{2k_s + k_f}} - 2k_s$

2-4 شرایط مرزی

روابط (1) تا (6) یک دستگاه معادلات حاکم را برای حل مجهولات $u, v, w, p, X_k, \phi_e, \phi_s$ و T تشکیل می‌دهند. برای حل این معادلات نیاز به مشخص کردن شرایط مرزی مناسب می‌باشد. در این مدل از روش تک ناحیه‌ای استفاده شده است و فقط شرایط مرزی بیرونی باید مشخص شود. در ورودی کانال‌ها یا فوم‌های فلزی آند و کاتد، سرعت‌های ورودی مشخص است که با استفاده از نسبت استوکیومتری تعیین می‌شود. فشار جزئی بخار آب در ورودی مساوی با فشار اشباع در دمای مرطوب‌سازی واکنشگرهای ورودی است. نسبت مولی آب ورودی در سمت آند مشابه با سمت کاتد محاسبه می‌شود؛ اما در سمت آند باید از فشار ورودی سمت آند استفاده شود و نسبت مولی نیتروژن نیز صفر است. دمای گازهای ورودی به پیل نیز برابر دمای عملکرد پیل، 80°C در نظر گرفته می‌شود. جریان در مرزهای خروجی به صورت توسعه یافته یا شار صفر با فشار برگشتی در نظر گرفته شده است.

$$\begin{aligned} \frac{\partial \bar{u}}{\partial n} = 0; \quad \frac{\partial X_k}{\partial n} = 0; \quad \frac{\partial \phi_s}{\partial n} = 0; \\ \frac{\partial \phi_e}{\partial n} = 0; \quad \frac{\partial T}{\partial n} = 0 \end{aligned} \quad (7)$$

پتانسیل الکتریکی، ϕ_e ، در وجه مشترک لایه کاتالیست آند/لایه پخش گاز آند صفر، در وجه مشترک لایه کاتالیست کاتد/لایه پخش گاز کاتد، $\phi_e = -V_{cell}$ بوده و در بقیه مرزها، گرادین آن صفر است.

بر روی دیوارها، شرط عدم لغزش برای سرعت و شار صفر برای دیگر متغیرها به استثنای شرط دمایی، به کار می‌رود.

$$\begin{aligned} \bar{u} = 0; \quad \frac{\partial P}{\partial n} = 0; \quad \frac{\partial X_k}{\partial n} = 0; \\ \frac{\partial \phi_e}{\partial n} = 0; \quad \frac{\partial \phi_e}{\partial n} = 0; \quad \frac{\partial T}{\partial n} = 0 \end{aligned} \quad (8)$$

در دیواره‌های کانال شرط شار صفر در نظر گرفته می‌شود.

3-4 روش حل عددی

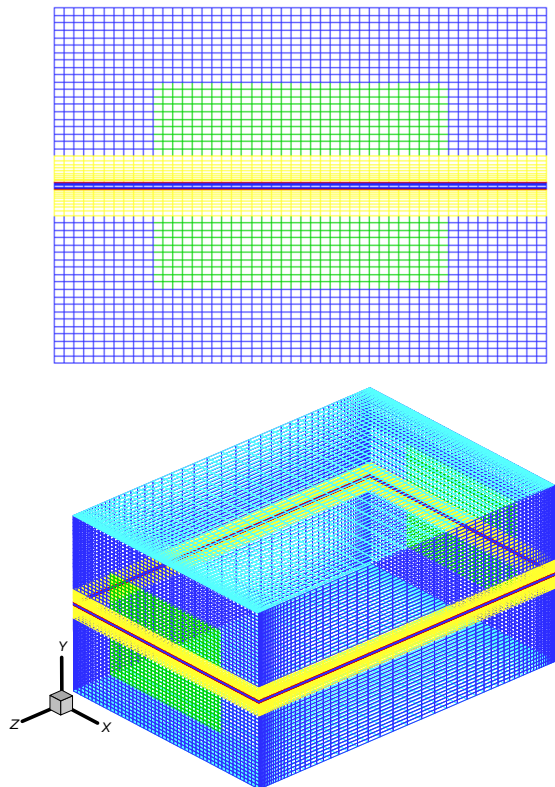
معادلات حاکم بر پیل سوختی غشا پلیمری همراه با شرایط مرزی مشخص شده، با روش حجم محدود گسسته شده و با استفاده از نرم افزار دینامیک سیالات محاسباتی فلوئنت حل شده‌اند. در این برنامه، میدان‌های سرعت و فشار با استفاده از الگوریتم سیمپل به دست آمده‌اند [14]. برای حل مجموعه

معادلات از یک روند تکراری استفاده شده است و حل تا رسیدن به همگرایی با دقت 10^{-6} ادامه پیدا کرده است. مهمترین علت انتخاب روند تکرار برای حل معادلات، کوپل بودن آنها می‌باشد. معادلات بقا در پیل سوختی غشا پلیمری به دو دلیل به شدت با یکدیگر کوپل می‌باشند.

- 1- خواص فیزیکی و شیمیایی مواد متغیر بوده و تابع پارامترهای انتقال (مانند دما و غلظت) می‌باشد
- 2- معادلات بقا از طریق معادله باتلر - ولمر (سطر اول جدول 3) با یکدیگر کوپل هستند. در واقع این معادله، ترم چشمه معادلات بقا است. از طرفی ترم‌های سرعت، فشار، دما و غلظت اجزا که از معادلات بقا به دست می‌آیند بر معادله باتلر - ولمر تاثیر می‌گذارند. به عنوان مثال معادله باتلر - ولمر تابع غلظت اکسیژن و هیدروژن بوده و در معادله بقا اجزا که غلظت‌ها را محاسبه می‌کند، معادله باتلر - ولمر به عنوان بخشی از ترم چشمه وارد معادله می‌شود و نرخ مصرف اکسیژن و هیدروژن را تعیین می‌کند.

جدول 5- پارامترهای فیزیکی پیل سوختی [3-4، 12-14]

مقادیر	پارامترها
0.8/2.4 mm	عرض کانال/عرض فوم فلزی
0.6/0.6 mm	ارتفاع کانال/ارتفاع فوم فلزی
300 μm	ضخامت لایه پخش گاز
10 μm	ضخامت لایه کاتالیست
50 μm	ضخامت غشا
125 mm	طول پیل
1/1	نرخ استوکیومتری جریان هیدروژن/اکسیژن
66.817/17.808 mol m ⁻³	غلظت کلی آند/ کاتد
1×10 ⁵ Pa	فشار ورودی آند و کاتد
0.8441/0.19	کسر مولی هیدروژن/ اکسیژن ورودی
0.1559	کسر مولی بخار آب ورودی در آند و کاتد
15W m ⁻¹ K ⁻¹	ضریب هدایت حرارتی فوم فلزی
0.0296W m ⁻¹ K ⁻¹	ضریب هدایت حرارتی اکسیژن
0.0237W m ⁻¹ K ⁻¹	ضریب هدایت حرارتی بخار آب
0.2040W m ⁻¹ K ⁻¹	ضریب هدایت حرارتی هیدروژن
0.9	تخلخل فوم فلزی
0.28	تخلخل غشا و لایه کاتالیست
0.4	تخلخل لایه پخش گاز
0.01 ms ⁻¹	سرعت ورودی کانال آند و کاتد
0.55	کسر مولی مرجع هیدروژن
0.02	کسر مولی مرجع اکسیژن
1.873×10 ⁻⁵ m ² s ⁻¹	ضریب پخش بخار آب در کانال
1×10 ⁻⁸ m ²	نفوذپذیری فوم فلزی
2.63×10 ⁻⁶ m ² s ⁻¹	ضریب پخش هیدروژن در کانال
5.2197×10 ⁻⁶ m ² s ⁻¹	ضریب پخش اکسیژن در کانال



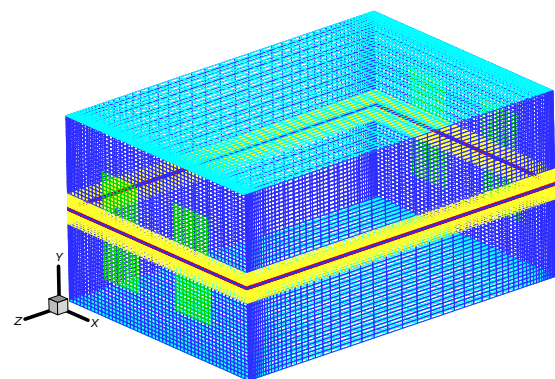
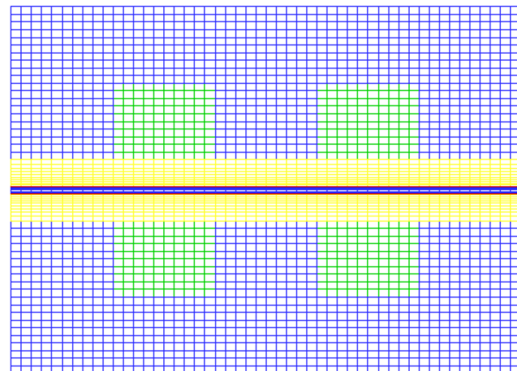
شکل 4- شبکه‌بندی مدل پیل با فوم فلزی، صفحه xy (شکل بالا) و مدل سه بعدی (شکل پایین)

5- نتایج

به منظور صحت‌گذاری نتایج، منحنی دانسیته جریان - ولتاژ در شکل 5 برای یک کانال ساده مستقیم (بدون فوم فلزی) با اطلاعات تجربی مرجع [15] مقایسه شده که توافق بسیار خوبی با نتایج تجربی دارد. عمده اختلاف مدل حاضر با نتایج تجربی مربوط به دانسیته جریان‌های بالا، میزان آب مایع بسیار اهمیت پیدا می‌کند و باعث شناوری لایه پخش گاز شده و انتقال گازهای واکنشگر به لایه کاتالیست را مختل می‌کند. در اثر پدیده شناوری و بسته شدن بخشی از تخلخل‌های لایه پخش گاز، عملکرد پیل افت می‌یابد. به علت پیچیدگی بسیار زیاد بحث تغییر فاز آب، در این مقاله فرض شد که آب تغییر فاز نداده و به صورت بخار باقی می‌ماند. این فرض در دانسیته جریان‌های معمول و با توجه به شرایط عملکرد پیل (دمای 353K و فشار 1/5atm)، فرض مناسبی می‌باشد و در بسیاری از مقالات با هدف مدل‌سازی عددی پیل از این فرض استفاده شده است.

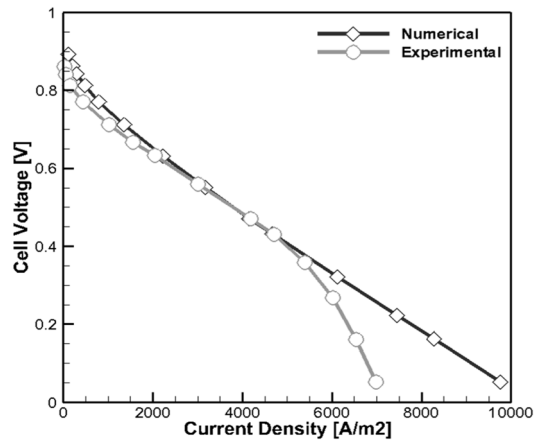
برای شبکه‌بندی مدل با فوم فلزی، تعداد شبکه 216000 انتخاب شده است؛ به طوری که تعداد شبکه در راستای ضخامت لایه پخش گاز، لایه کاتالیست و غشا به ترتیب 10، 4 و 4 می‌باشد. تعداد شبکه مقطع کانال ساده، 10×10 و در راستای طول کانال 60 مش می‌باشد. به منظور مدل‌سازی دقیق، در بخش فوم فلزی شبکه نسبت به کانال ساده ریزتر شده است و تعداد شبکه مقطع کانال با فوم فلزی 10×30 است. تعداد گره‌ها طوری تنظیم شده که نتایج مدل عددی مستقل از تعداد شبکه شود. شبکه‌بندی با سازمان انجام شده برای پیل با دو کانال ساده و پیل با فوم فلزی به عنوان توزیع‌کننده جریان به ترتیب در شکل‌های 3 و 4 نشان داده شده است.

در شکل‌های 3 و 4، نواحی از بالا به پایین شامل: صفحه قطبی آند، کانال (ناحیه فوم) آند، لایه پخش گاز آند، لایه کاتالیست آند، لایه غشا، لایه کاتالیست کاتد، لایه پخش گاز کاتد، کانال (ناحیه فوم) کاتد و صفحه قطبی کاتد می‌باشد.



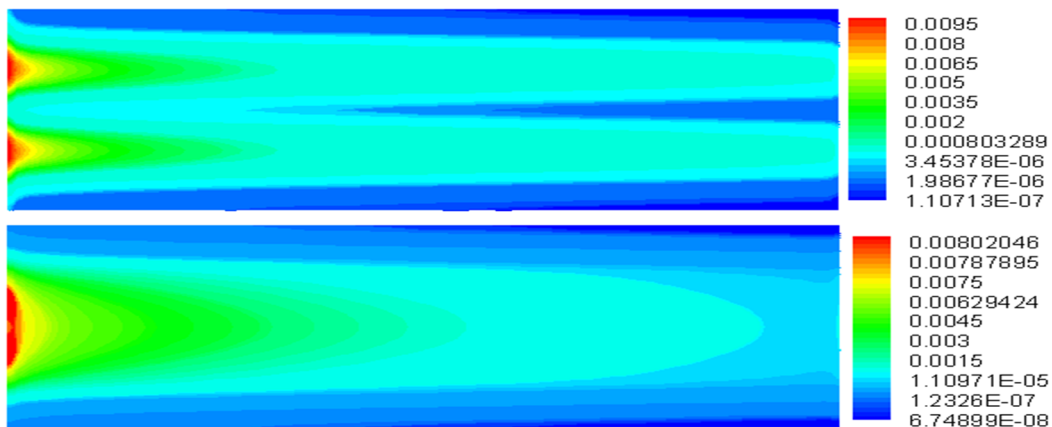
شکل 3- شبکه‌بندی مدل پیل با دو کانال ساده، صفحه xy (شکل بالا) و مدل سه بعدی (شکل پایین)

اکسیژن پایین می‌آید. همچنین، چون سرعت اکسیژن عبوری از نواحی متخلخل پایین‌تر می‌باشد، اکسیژن بهتر به لایه پخش گاز و کاتالیست نفوذ کرده و بیشتر مصرف می‌شود. دانسیته جریان متناسب با مصرف اکسیژن می‌باشد و با مصرف بیشتر اکسیژن، دانسیته جریان افزایش می‌یابد. در شکل 7 توزیع دانسیته جریان در طول کانال، در فصل مشترک لایه پخش گاز/لایه کاتالیست کاتد نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که دانسیته جریان در پیل با فوم فلزی بسیار بیشتر از دانسیته جریان در پیل با کانال ساده است. این نتیجه بسیار جالبی است که علاوه بر این که دانسیته جریان در پیل با فوم فلزی بالاتر از پیل با کانال ساده است، توزیع دانسیته جریان نیز یکنواخت‌تر است. توزیع یکنواخت‌تر دانسیته جریان ناشی از توزیع یکنواخت‌تر اکسیژن است که مطابق شکل 6 در پیل با فوم فلزی بسیار یکنواخت‌تر است. مصرف اکسیژن معادل با تولید آب است، در نواحی که اکسیژن بیشتری مصرف می‌شود، آب بیشتری تولید می‌گردد. در شکل 8 توزیع آب در فصل مشترک لایه پخش گاز/لایه کاتالیست نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که در پیل با کانال ساده، در زیر شانه‌ها میزان آب تولیدی پایین است. میزان آب کمتر در نواحی زیر شانه‌ها باعث می‌شود در این نواحی، میزان رطوبت غشا پایین آمده و مقاومت یونی پیل افزایش می‌یابد. در پیل با فوم فلزی، معادل سطح زیر شانه‌ها، غلظت آب تولیدی بالا است.

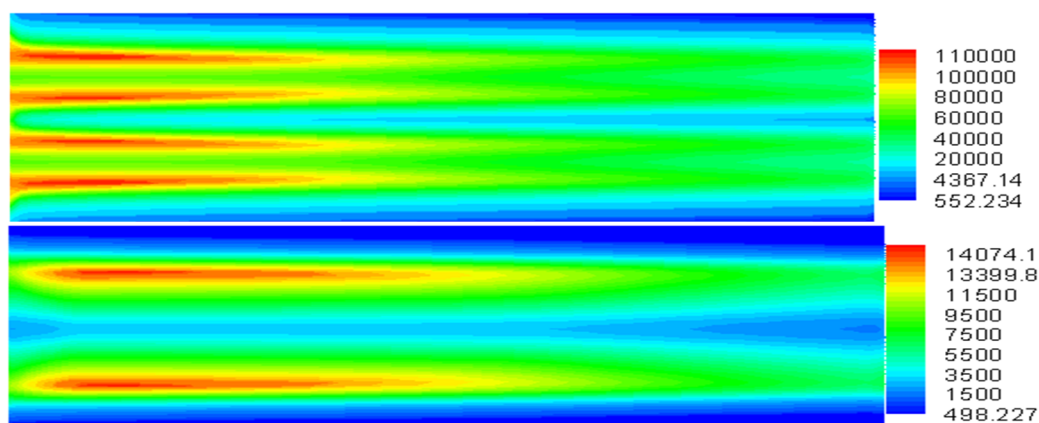


شکل 5- مقایسه منحنی پلاریزاسیون تجربی [15] و حل عددی

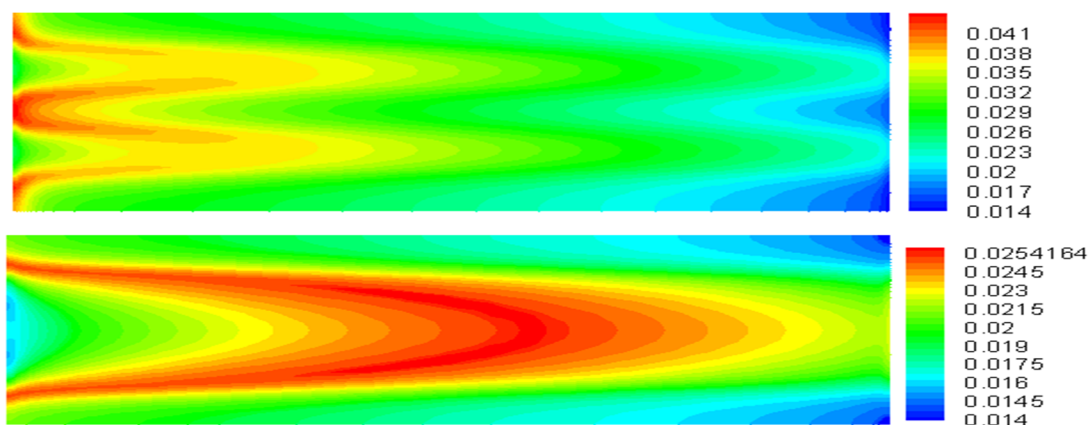
در شکل 6 توزیع غلظت اکسیژن در فصل مشترک لایه پخش گاز/لایه کاتالیست کاتد برای پیل با کانال ساده و پیل با فوم فلزی به عنوان توزیع کننده جریان در ولتاژ 0/35V نشان داده شده است. در هر دو پیل، در طول کانال به دلیل مصرف اکسیژن به واسطه واکنش‌های الکتروشیمیایی، غلظت اکسیژن کاهش می‌یابد. اما با مقایسه دو شکل 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 و در نتیجه در این ناحیه نرخ واکنش‌ها کاهش می‌یابد. باید توجه داشت که در پیل با کانال ساده، تعداد کانال‌ها بسیار بیشتر از 2 کانال بوده و به تبع آن تعداد نواحی زیر شانه‌ها زیاد بوده و در این نواحی غلظت



شکل 6- توزیع غلظت اکسیژن در فصل مشترک لایه پخش گاز/لایه کاتالیست کاتد (الف) کانال ساده (شکل بالا) (ب) فوم فلزی (شکل پایین)



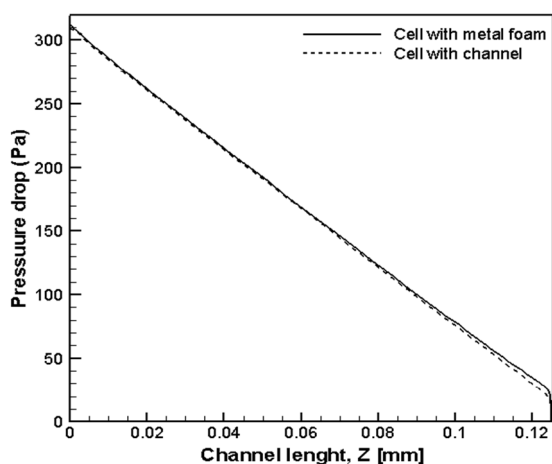
شکل 7- توزیع دانسیته جریان در فصل مشترک لایه پخش گاز/لایه کاتالیست کاتد الف) کانال ساده (شکل بالا) ب) فوم فلزی (شکل پایین)



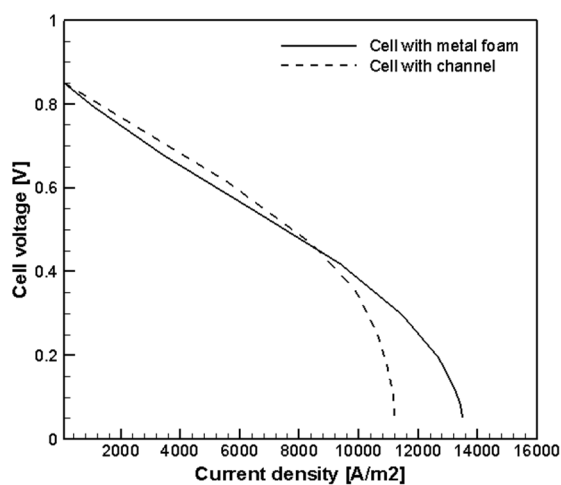
شکل 8- توزیع غلظت آب در فصل مشترک لایه پخش گاز/لایه کاتالیست کاتد الف) کانال ساده (شکل بالا) ب) فوم فلزی (شکل پایین)

از سوی دیگر اکسیژن توزیع یکنواخت‌تری دارد؛ در این پیل محدودیت‌های انتقال جرم کاهش یافته و عملکرد پیل بالاتر است. در واقع با صفحات همراه با کانال‌ها، نسبت مساحت بین شانه‌ها و کانال‌های جریان 1:1 است و بنابراین مقدار گازهای واکنشگر انتقال یافته از طریق سطح زیر شانه‌ها به داخل لایه کاتالیست کمتر از سطح کانال است که باعث افت عملکرد پیل می‌شود. همچنین آب تولیدی در معرض و مستعد است تا در نزدیک فصل مشترک بین شانه‌ها و لایه پخش گاز جمع گردد. اما از طرف دیگر، فوم فلزی به عنوان توزیع کننده جریان، یکنواختی خوبی در توزیع گازهای واکنشگر ایجاد می‌کند. یکنواختی گازهای واکنشگر به یکنواختی بهتر واکنش‌هایی شیمیایی منجر می‌شود.

منحنی‌های پلاریزاسیون مربوط به پیل با کانال‌های ساده و پیل با فوم فلزی در شکل 9 نشان داده شده است. در دانسیته جریان‌های پایین و متوسط، عملکرد هر دو پیل یعنی پیل با توزیع کننده فوم فلزی و پیل با کانال به عنوان توزیع کننده گازها تقریباً مشابه یکدیگر است. به علت مقاومت اهمی ایجاد شده در اثر فوم فلزی، حتی عملکرد پیل در این دانسیته جریان‌ها از عملکرد پیل با کانال‌های ساده کمی پایین‌تر است. در دانسیته جریان‌های بالا، عملکرد پیل با فوم فلزی به عنوان توزیع کننده جریان بهتر است. در دانسیته جریان‌های بالا، عمده افت‌های داخل پیل سوختی ناشی از محدودیت‌های انتقال جرم است. چون در پیل با فوم فلزی هم اکسیژن بیشتری در لایه کاتالیست کاتد مصرف می‌شود و



شکل 10- مقایسه افت فشار پیل با کانال‌های ساده و پیل با فوم فلزی



شکل 9- مقایسه منحنی پلاریزاسیون پیل با کانال‌های ساده و پیل با فوم فلزی

6- نتیجه‌گیری

در این مقاله، استفاده از فوم فلزی به عنوان توزیع کننده گازها به جای کانال‌های جریان بررسی گردید. با توسعه یک مدل سه بعدی پیل، معادلات بقای جرم، مومنتوم، اجزاء شارژ و انرژی به همراه روابط سینتیک الکتروشیمیایی در نواحی مختلف پیل به صورت کوپل، با یک مدل تک ناحیه‌ای و به روش عددی حل شده و عملکرد پیل با دو میدان جریان قید شده مقایسه گردیده است. نتایج حاصل از تحقیق به شرح زیر می‌باشد.

1- در پیل با فوم فلزی، انتقال گازهای واکنشگر به لایه‌های کاتالیست بیشتر و توزیع گازها در دانسیته جریان‌های بالا، بسیار یکنواخت‌تر است.

2- در دانسیته جریان‌های پایین و متوسط، عملکرد پیل با فوم فلزی و کانال معمولی تقریباً مشابه یکدیگر است؛ اما در دانسیته جریان‌های بالا، عملکرد پیل با فوم فلزی بسیار بهتر است.

3- به دلیل حذف شانه‌های کانال در الگوی پیل با فوم فلزی انتقال آب در سرتاسر سطح غشا بهتر انجام شده و از خشکی جلوگیری به عمل می‌آید.

4- به دلیل ضریب نفوذپذیری بالای فوم فلزی، افزایش افت فشار پیل با فوم فلزی نسبت به پیل با کانال ساده بسیار اندک می‌باشد.

5- بر خلاف بسیاری از طرح‌هایی که تاکنون برای میدان‌های جریان پیل ارائه شده است و در هر طرح یا افت فشار بالا

جریان هوا معمولاً به وسیله یک پمپ برای پیل تامین می‌شود که این پمپ بخشی از توان خروجی پیل سوختی را مصرف می‌کند. بنابراین توان پمپ هوا باید برای ماکزیمم توان خروجی سیستم مینیمم شود. مهمترین دلیل افت فشار در محیط متخلخل نیروی اصطکاک بین جریان و بخش جامد و نیروی اینرسی (مانند) مایع است. افت فشار برای دو نوع میدان جریان در شکل 10 نشان داده شده است.

پیل با کانال به عنوان توزیع کننده گازها، افت فشار کمتری دارد؛ زیرا مسیر جریان سیال کوتاه‌تر است. در میدان جریان با فوم فلزی، افت فشار بیشتری مشاهده می‌شود؛ هر چند که اختلاف بین آنها بسیار کم و در حد 10Pa است. این امر ناشی از طولانی بودن مسیر جریان است؛ اما در پیل‌ها با فوم فلزی، فوم‌های استفاده شده چون دارای ضریب تخلخل و نفوذپذیری بالا هستند، این مشخصات سبب می‌شوند افت فشار نسبت به کانال ساده زیاد متفاوت نباشد. ضریب نفوذپذیری محیط متخلخل یک فاکتور کنترل کننده افت فشار و نفوذ بیشتر گازهای واکنشگر به داخل لایه‌های پخش گاز و لایه‌های کاتالیست می‌باشد که در این مطالعه مقدار آن ثابت و برابر 10^{-8} m^2 در نظر گرفته شد [4 و 12]. انتخاب ضریب نفوذپذیری پایین‌تر منجر به افت فشار بالاتر در پیل می‌گردد. ضمن این که هزینه‌های ساخت آن نیز افزایش می‌یابد. بررسی دقیق تاثیر نفوذپذیری بر افت فشار و نفوذ گازها مستلزم مطالعه‌ای دیگر است که نویسندگان قصد دارند در مطالعات آتی به آن بپردازند.

ضریب تخلخل	ε
پتانسیل الکتریکی در غشا (V)	ϕ_e
پتانسیل الکتریکی در فاز جامد (V)	ϕ_s
ثابت فعالیت در غشا	λ
لزجت (Pa.s)	μ
چگالی سیال (kg/m^3)	ρ
اضافه پتانسیل (V)	η
ضریب هدایت یونی (S/m)	σ
نرخ استوکیومتری	ξ

زیر نویس‌ها

آند	a
کاتد	c
الکترولیت	e
مرجع	ref
جامد	s
اشباع	sat

مراجع

- [1] Ge SH, Yi BL (2003) A mathematical model for PEMFC in different flow modes. Journal of Power Sources 124: 1–11.
- [2] Tseng CJ, Tsai BT, Liu ZS, Cheng TC, Chang WC, Lo SK (2012) A PEM fuel cell with metal foam as flow distributor. Energy Conversion and Management 62: 14–21.
- [3] Kumar A, Reddy RG (2003) Modeling of polymer electrolyte membrane fuel cell with metal foam in the flow-field of bipolar/end plates. Journal of Power Sources 114: 54–62.
- [4] Kumar A, Reddy RG (2003) Polymer electrolyte membrane fuel cell with metal foam in the gas flow-field of bipolar/end plates. Journal of New Materials for Electrochemical Systems 6: 231–236.
- [5] Kumar A, Reddy RG (2004) Materials and design development for bipolar/end plates in fuel cells. Journal of Power Sources 129: 62–67.
- [6] Tsai BT, Tseng CJ, Liu ZS, Wang CH, Lee CI Yang, CC, Lo SK (2012) Effects of flow field design on the performance of a PEM fuel cell with metal foam as the flow distributor. International Journal of Hydrogen Energy 37: 13060–13066.
- [7] Tseng CJ, Tsai BT, Liu ZS, Cheng TC, Chang WC, Lo SK (2012) A PEM fuel cell with metal foam as flow distributor. Energy Conversion and Management 62: 14–21.
- [8] Arisetty S, Prasad AK, Advani SG (2007) Metal foams as flow field and gas diffusion layer in direct

بوده و یا توزیع گازهای واکنشگر یکنواخت نیست [16 و 17]؛ افت فشار پایین، همراه با انتقال بهتر و توزیع یکنواخت‌تر گازهای واکنشگر سه مزیت اصلی استفاده از فوم‌های فلزی در پیل سوختی می‌باشند.

تشکر و قدردانی

نویسندگان از کمک‌ها و حمایت‌های سازمان انرژی‌های نو ایران تشکر و قدردانی می‌کنند.

علائم، نشانه‌ها

علائم انگلیسی

فعالیت آب در غشا	a
غلظت جزء i (mol/m^3)	C^i
ظرفیت گرمایی ویژه (J/kg K)	C_p
ضریب پخش جزء k (m^2/s)	D_k
ضریب پخش موثر (m^2/s)	D_k^{eff}
ضریب پخش آب در غشا (m^2/s)	$D_e^{H_2O}$
ثابت فارادی (C/mol)	F
آنتالپی (J)	H
چگالی جریان الکتریکی (A/m^2)	I
چگالی جریان انتقالی (A/m^3)	j
نفوذپذیری (m^2)	K
ضریب هدایت حرارتی موثر (W/m K)	k^{eff}
ضریب هدایت حرارتی فاز جامد (W/m K)	k_s
ضریب هدایت حرارتی فاز سیال (W/m K)	k_f
ضریب درگ الکترو-اسمزیک	k_f
فشار (Pa)	P
ثابت عمومی گازها (8.314J/kg mol K)	R
جمله چشمه در معادله بقا جرم (ترم دارسی)	S_{Dar}
جمله چشمه در معادله بقا اجزا	S_k
جمله چشمه در معادله بقا پروتون	S_e
جمله چشمه در معادله بقا الکترون	S_s
جمله چشمه در معادله بقا انرژی	S_T
دما (K)	T
سرعت (m/s)	u
پتانسیل مدار باز (V)	U_0
کسر مولی جز k	X_k

علائم یونانی

ضریب انتقال	α
-------------	----------

- [14] Afshari E, Jazayeri SA (2009) Analyses of heat and water transport interactions in a proton exchange membrane fuel cell. *Journal of Power Sources* 194: 423–432.
- [15] Ticianelli EA, Derouin CR, Redondo A, Srinivasan S (1988) Methods to advance of proton exchange membrane fuel cells. *Journal of The Electrochemical Society* 135: 2209–221.
- [16] Feser JP, Prasad AK, Advani SG (2006) On the relative influence of convection in serpentine flow fields of PEM fuel cells. *Journal of Power Sources* 161: 404–412.
- [17] Shimpalee S, Greenway S, Van Zee JW (2006) The impact of channel path length on PEMFC flow-field design. *Journal of Power Sources* 160: 398–406.
- methanol fuel cells. *Journal of Power Sources* 165: 49–57.
- [9] Yuan W, Tang Y, Yang X, Wan Z (2012) Porous metal materials for polymer electrolyte membrane fuel cells – A review. *Applied Energy* 94: 309–329.
- [10] Wang Y (2009) Porous-media flow fields for polymer electrolyte fuel cells I. low humidity operation. *Journal of The Electrochemical Society* 156(10): B1124–B1133.
- [11] Sosnick B US Patent 2, 434, 775, 1984.
- [12] Kumar A, Reddy RG (2003) Application of metal foam in the flow-field distributor of polymer electrolyte membrane fuel cell stack. 204th Meeting, The Electrochemical Society.
- [13] Pasaogullari U, Wang CY (2005) Two-Phase modeling and flooding prediction of polymer electrolyte fuel cell. *Journal of The Electrochemical Society* 152: A380–A390.