



مقایسه مدل‌های مختلف پیل سوختی غشا پلیمری با بکارگیری فوم فلزی به عنوان توزیع کننده جریان

صابر حیدری¹، ابراهیم افشاری^{2*}

1- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه اصفهان، اصفهان
2- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه اصفهان، اصفهان
* اصفهان، صندوق پستی 81746-73441، e.afshari@eng.ui.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل
دریافت: 13 مهر 1393
پذیرش: 12 آذر 1393
ارائه در سایت: 25 بهمن 1393
کلید واژگان:
پیل سوختی غشا پلیمری
فوم فلزی
شبیه‌سازی
چگالی جریان
عملکرد حرارتی

چکیده

استفاده از فوم فلزی به عنوان توزیع کننده جریان در پیل‌های سوختی غشا پلیمری باعث کاهش وزن و حجم، توزیع یکنواخت‌تر گازهای واکنش‌گر و در بعضی موارد حذف ماشین‌کاری برای ایجاد کانال‌های جریان می‌شود. در این مقاله 5 نمونه از پیل سوختی غشا پلیمری شامل: مدلی که در آن صفحه دو قطبی شامل دو کانال موازی است (مدل 1)؛ مدلی که همانند مدل 1 است با این تفاوت که در این مدل درون کانال‌ها فوم قرار داده شده است (مدل 2)؛ مدلی که در آن شانه‌های میان کانال‌ها در سمت آند و کاتد حذف گردیده و در سمت آند آن، فوم فلزی قرار داده شده است (مدل 3)؛ مدلی که همانند مدل 3 است با این تفاوت که در سمت کاتد فوم فلزی قرار داده شده است (مدل 4) و در مدل 5 هم در سمت آند و هم در سمت کاتد فوم فلزی قرار داده شده است، مدل‌سازی شده است. نتایج نشان می‌دهند که استفاده از فوم فلزی چه در سمت آند و چه در سمت کاتد، علاوه بر اینکه ماکزیمم دما را در مدل‌های مختلف کاهش می‌دهد به توزیع یکنواخت‌تر دما نیز کمک می‌کند. همچنین شاخص یکنواختی نشان می‌دهد که توزیع چگالی جریان با حذف شانه در مدل‌های 3، 4 و 5 بسیار بهتر و یکنواخت‌تر صورت گرفته است. با مقایسه صورت گرفته بین مدل‌های مختلف مشاهده می‌شود که افت فشار ایجاد شده با وجود فوم فلزی، به دلیل ضریب بالای نفوذپذیری و تخلخل، نیز اندک است.

Comparison between different models of polymer membrane fuel cell using a metal foam as a flow distributor

Saber Heidari, Ebrahim Afshari*

Department of Mechanical Engineering, University of Isfahan, Isfahan, Iran
* P.O.B. 81746-73441, Isfahan, Iran, e.afshari@eng.ui.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 05 October 2014
Accepted 03 December 2014
Available Online 14 February 2015

Keywords:
Polymer membrane fuel cells
Metal foams
Simulation
Current density
Thermal performance

ABSTRACT

The use of metal foam as a distributor flow field in a polymeric electrolyte membrane fuel cell reduces the weight and volume of the fuel cell, causes more uniform distribution of the reactant gases and, in some cases, eliminates the machining process required to create the flow channels. In this paper five models of polymer electrolyte membrane fuel cells are simulated including: the model with bipolar plate consisting of two parallel channels (model 1); The model that is similar to model 1 except that in this case channels are filled with metal foam (model 2); The model in which the rib between the channels in anode and cathode side are eliminated and in the anode, metal foam is placed (model 3); the model that is similar to model 3 except that the metal foam is placed on the cathode side (model 4); in model 5, both the anode side and the cathode side are filled with metal foam. The results show that the use of metal foam in the anode or the cathode side, in addition to decreasing maximum temperature in the models also enables a more uniform temperature distribution. The uniformity index shows that the distribution of current density is much better and more uniform when the ribs in models 3, 4 and 5 are eliminated. Comparison conducted between different models shows that the pressure drop caused by the presence of the metal foam, due to the high coefficient of permeability and porosity of the foam, is small.

1- مقدمه

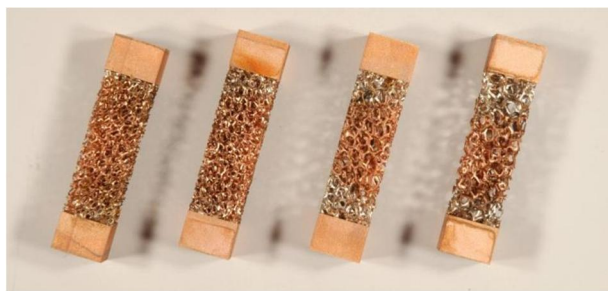
زیست محیطی مشخصاتی هستند که پیل‌های سوختی را به مبدل‌هایی توانمند و جذاب تبدیل کرده‌اند. یک تک سل پیل سوختی غشا پلیمری متداول، شامل اسمبل الکترو-غشا و دو صفحه دو قطبی است. صفحات قطبی 40% قیمت توده پیل سوختی را به خود اختصاص می‌دهند [1]. در کنار معایب مربوط به انواع کانال‌های

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

Please cite this article using:

S. Heidari, E. Afshari, Comparison between different models of polymer membrane fuel cell using a metal foam as a flow distributor, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 3, pp. 333-343, 2015 (In Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:



شکل 1 فوم فلزی مسی با ضریب تخلخل متفاوت [9]

یک ماده فلزی متخلخل ساختار ناهمگن دارد و دارای فاز جامد و غیر جامد است، که فاز جامد اسکلت و فاز غیر جامد، فضای متخلخل را شکل می‌دهد. سه نوع تخلخل در یک ماده فلزی متخلخل شامل تخلخل سراسری، تخلخل پوشیده (نیمه باز) و تخلخل بسته وجود دارد. داخل یک ماده نفوذپذیر، فقط تخلخل‌های سراسری در فرآیند جریان سیال سهیم هستند؛ زیرا دو نوع تخلخل دیگر، قابل دسترسی نیستند. تخلخل نیمه باز و بسته، به عنوان بخشی از زیرلایه جامد عمل می‌کنند. اتصال داخلی تخلخل‌ها تأثیر مهمی بر نفوذپذیری یک ماده فلزی متخلخل دارد. چنانچه یک ماده فلزی متخلخل مشخص به عنوان واسطه انتقال جرم و زیرلایه واکنش، در یک پیل سوختی غشا پلیمری استفاده شود، باید تخلخل‌های سراسری به اندازه کافی داشته باشد تا مسیرهای پخش و مساحت سطح کافی داشته باشد. واقعیت دیگر این است که ساختار تخلخل داخلی ممکن است ایزوتروپیک (دارای خواص برابر از هر سو) نباشد [7].

به طور کلی جریان سیال نیوتنی تراکم ناپذیر از درون محیط متخلخل را می‌توان به دو روش توصیف نمود: یکی آن که به طور مستقیم به حل معادلات ناویر-استوکس در مقیاس میکروسکوپی پرداخت و دیگری حل یک سری معادلات بر پایه برخی فرمول‌های تجربی موجود و با استفاده میانگین پارامترهایی مانند سرعت سیال می‌باشد. جریان سیال در مقیاس میکروسکوپی توسط معادلات ناویر-استوکس تراکم ناپذیر قابل توصیف است. برای فهم دقیق پدیده انتقال در محیط متخلخل لازم است که مستقیماً این معادلات در مقیاس میکروسکوپی حل شوند. اما پیچیدگی و بی‌قاعدگی ساختار محیط‌های متخلخل عملاً حل معادلات ناویر-استوکس را پرهزینه و حتی غیرممکن می‌سازد. از سوی دیگر برخی مدل‌های تجربی و نیمه تجربی از سادگی بیشتری برخوردارند. در این مدل‌ها از پیچیدگی ذاتی مدل‌ها صرف‌نظر شده و از این نظر سودمند می‌باشند. ولی از آنجا که این مدل‌ها بر پایه یک سری فرضیات تجربی هستند، مسلماً دقت کافی برای توصیف فیزیکی مکانیکی سیال از درون محیط متخلخل را نخواهند داشت. البته هر کدام از دو روش مذکور به نوعی به یکدیگر ارتباط دارند.

بررسی تجربی جریان از درون محیط متخلخل اولین بار توسط دارسی در سال 1856 میلادی انجام شد. رابطه (1) معروف به قانون دارسی، افت فشار با سرعت جریان سیال رابطه خطی خواهد داشت [9].

$$\frac{dp}{dx} = -\frac{\mu}{k} v \quad (1)$$

در رابطه (1) ضخامت یا طول ماده متخلخل، dp متوسط افت فشار در طول dx ، و v سرعت سیال یا همان سرعت ظاهری براساس سطح مقطع کل جریان می‌باشد. K نیز تانسور نفوذپذیری ماده متخلخل است که برای یک محیط متخلخل همگن و ایزوتروپ، که خواص آن در همه جهات یکسان باشد، به صورت یک مقدار ثابت درمی‌آید. واحد آن نیز مجذور طول می‌باشد. معادله دارسی را می‌توان با متوسط گیری از معادلات ناویر استوکس برای

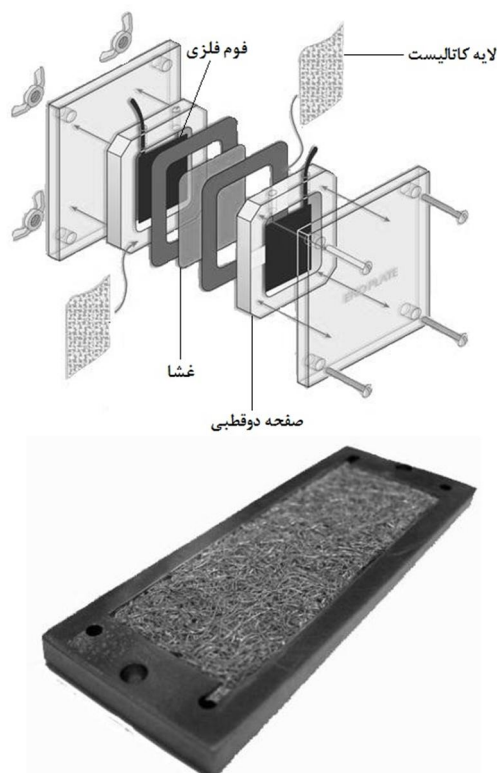
جریان، صفحات دو قطبی بیشتر از نصف وزن کل و حجم کل تک سل را اشغال می‌کنند [1]. به‌منظور کاهش حجم و وزن، کومار و ردی [2] استفاده از فوم فلزی به عنوان توزیع کننده جریان را پیشنهاد دادند که جایگزین کانال‌ها در صفحات دو قطبی می‌شود. عملکرد تک سل‌های آن‌ها با فوم فلزی نسبتاً خوب می‌باشد. کومار و ردی [3,4] با ارائه مدل‌های عددی سه بعدی و دائم برای یک تک پیل سوختی غشا پلیمری با فوم فلزی به‌عنوان توزیع کننده جریان، به بررسی عملکرد پیل با فوم‌های فلزی مختلف پرداختند. نتایج آن‌ها نشان دهنده تأثیر بسیار مثبت نفوذپذیری فوم فلزی بر عملکرد پیل می‌باشد. مدل آن‌ها دما ثابت بوده و تأثیر فوم فلزی بر انتقال گرما و تأثیر تغییر دما بر خواص فیزیکی و شیمیایی بررسی نشده است. تسای و همکارانش [5] به مقایسه میدان جریان‌های مرسوم در پیل سوختی با فوم فلزی به عنوان توزیع کننده جریان پرداختند. نتایج تجربی آن‌ها نشان می‌دهد که در پیل سوختی با فوم فلزی به دلیل توزیع مناسب‌تر گازهای واکنش‌گر در محل واکنش‌های شیمیایی، عملکرد پیل بهبود می‌یابد. علاوه بر مقایسه میدان‌های مختلف جریان، مطالعه پارامتری پیل شامل: تأثیر فشار عملکرد و استوکیومتری ورودی نیز انجام شده است. آریستی و همکارانش [6] به بررسی فوم‌های فلزی به‌عنوان میدان جریان و همچنین لایه پخش گاز در پیل‌های سوختی متانولی پرداختند. تأثیر اندازه تخلخل‌ها و چگالی 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. یان و همکاران [7] در مقاله‌ای مروری به بررسی مواد فلزی متخلخل برای کاربرد در پیل‌های سوختی غشا پلیمری پرداختند. نویسندگان مروری بر فرآیند ساخت، مشخصات و کاربردهای انواع فوم‌های فلزی برای استفاده در پیل‌های سوختی غشا پلیمری انجام داده‌اند. وانگ [8] با ارایه مدلی از پیل سوختی غشا پلیمری با فوم فلزی، به بررسی انتقال گازهای واکنش‌گر، گرما و الکترون پرداختند.

در این مطالعه، 5 مدل از پیل سوختی مدل‌سازی شده است، مدل اول پیل با کانال‌های موازی ساده، در مدل دوم درون این کانال‌ها فوم فلزی قرار داده شده است. در سه مورد دیگر نیز این کانال‌ها حذف شده‌اند و به جای آن‌ها از فوم فلزی به‌ترتیب در سمت آند، سمت کاتد و در هر دو سمت قرار داده شده است. بررسی توزیع چگالی جریان بررسی عملکرد حرارتی و افت فشار، در این 5 مدل و مقایسه آن‌ها با یکدیگر از اهداف عمده این مقاله می‌باشد. برخلاف تحقیقات گذشته که فقط به بررسی تأثیر فوم بر عملکرد پیل پرداخته‌اند، در این مقاله حذف شانه‌های کانال که تأثیر به‌سزایی بر توزیع دما و توزیع غلظت واکنش‌گرها (و در نتیجه توزیع چگالی جریان) دارد بررسی شده و با وضعیتی که این شانه‌ها وجود دارد مقایسه گردیده است.

2- فوم‌های فلزی

فوم‌های فلزی با تخلخل باز انتخاب مناسبی برای کاربردهای انتقال جرم و انتقال حرارت از جمله مبدل حرارتی، الکتروکود باتری، پایه کاتالیست، فیلتر و غیره می‌باشند. مقاومت در برابر جریان سیال در این دسته از کاربردهای انتقال جرم و انتقال حرارت از جمله مبدل حرارتی، الکتروکود باتری، پایه کاتالیست، فیلتر و غیره می‌باشند. مقاومت در برابر جریان سیال در این دسته از کاربردها به عنوان یک عامل مهم به‌شمار می‌رود.

یک فوم فلزی، یک ساختار سلولی شامل یک فلز جامد به همراه تخلخل‌های پر شده با گاز می‌باشد. ویژگی بارز فوم‌های فلزی میزان تخلخل بالای آنها است؛ به طوری که معمولاً 75%-95% حجم کلی، شامل فضاهای خالی است. شکل 1 نمونه‌هایی از فوم فلزی مسی را نشان می‌دهد [9].



شکل 2 توده پیل با فوم فلزی به عنوان توزیع کننده جریان [7]

معایب استفاده از کانال در صفحات دو قطبی به شرح زیر است.

- 1) گران بودن ماشین کاری برای ایجاد کانال‌ها.
 - 2) خواص مکانیکی پایین در صورت استفاده از صفحات گرافیتی.
 - 3) عدم یکنواختی توزیع غلظت واکنش‌گرها و همچنین توزیع دما داخل الکترودها در داخل مجموعه الکترودها - غشا به علت وجود شانه‌ها و کانال‌ها در صفحات دو قطبی.
- به علت وجود مشکلات فوق، از فوم‌های فلزی برای توزیع جریان استفاده می‌شود که دارای مزایای زیر می‌باشد.
- 1) کاهش وزن و حجم پیل سوختی غشا پلیمری؛ یعنی فوم فلزی جایگزین کانال‌های جریان در صفحات قطبی می‌شود.
 - 2) توزیع یکنواخت گازهای واکنش‌گر بر روی لایه پخش گاز و کاتالیست.
 - 3) بهبود عملکرد پیل نسبت به کانال‌های رایج به خصوص با کاهش نفوذپذیری فوم فلزی.
 - 4) استفاده به عنوان لایه پخش گاز

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 الکتروولیت می‌شوند. مشابه با صفحات قطبی فلزی که نیاز به پوشش دارند تا از خورده 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) آبریز 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 سوختی غشا پلیمری باتمامی اجزای آن نشان می‌دهد، که در این پیل از فوم فلزی مسی به عنوان توزیع کننده جریان استفاده شده است.

سرعت‌های به اندازه کافی پایین سیال نیز به دست آورد.

پس از دارسی محققین زیادی نشان دادند که قانون دارسی تنها برای سرعت‌های کم جریان و یا در رینولدزهای پایین، یعنی زمانی که افت فشار رابطه خطی با سرعت دارد برقرار خواهد بود. با افزایش سرعت جریان سیال، و به دنبال آن افزایش اثر اینرسی و اغتشاش (تبدیل جریان از آرام به مغشوش) افت فشار رابطه غیرخطی با سرعت از خود نشان می‌دهد که با افزایش سرعت مدام بر سهم این ترم غیرخطی افزوده می‌شود. این پدیده با عنوان رفتار جریان غیردارسی نیز شناخته می‌شود [10].

بنابراین با اصلاح قانون دارسی می‌توان رابطه کلی افت فشار جریان پایا از درون محیط متخلخل همگن را با مدل هزن-دوپویت-دارسی¹ به صورت رابطه (2) تعریف کرد.

$$-\frac{dp}{dx} = \frac{\mu}{k}v + \rho Cv^2 \quad (2)$$

که در اینجا v سرعت جریان سیال است که به صورت سرعت دارسی بر اساس نسبت دبی حجمی سیال به سطح مقطع کانال، طبق رابطه (3) تعریف می‌شود.

$$v_{\text{superficial}} = \frac{Q}{A} \quad (3)$$

C ضریبی است که به مشخصات ساختاری ماده متخلخل بستگی دارد. لذا در معادله (2) ترم اول نشان می‌دهد که یک حالت گذرا بین جریان لزج در سرعت‌های پایین سیال به جریان غیر لزج در سرعت‌های بالا وجود خواهد داشت.

در محیط متخلخل درون کانال با ضریب نفوذپذیری بالا ($0/8 <$) اندازه سرعت واقعی با سرعت درون کانال بدون فوم با اندازه‌های بدون فوم قابل مقایسه است، یعنی حدود 1 متر بر ثانیه، بنابراین عدد $Re (= \rho u d_p / \mu)$ از مرتبه 1 است و جریان آرام است و قانون دارسی به خوبی می‌تواند جریان را تقریب بزند [8].

در این مقاله سرعت پایین است ($1/25 \text{ m/s}$) و با توجه به ابعاد کانال، رینولدز در کانال بدون فوم $69/22$ می‌شود پس جریان آرام است. از طرفی ضریب نفوذپذیری نیز مقدار بالایی دارد (10^{-8} متر مربع)، که عدد رینولدز بر اساس قطر حفرات برابر $1/79$ می‌شود از این‌رو فرض مدل دارسی برقرار است.

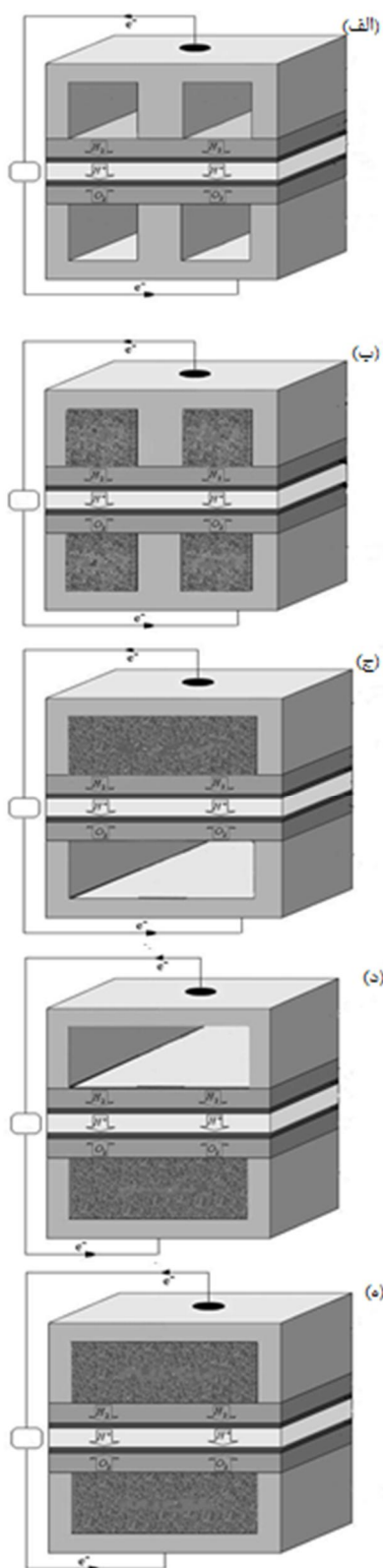
3- صفحات دو قطبی پیل سوختی با فوم فلزی

صفحات قطبی/انتهایی یکی از مهمترین و گران‌ترین بخش‌های توده پیل سوختی غشا پلیمری است و بیشتر از 80 درصد کل وزن توده پیل را اشغال می‌کند [2]. وظیفه این صفحات به‌عنوان صفحات جدا کننده در بین سل‌های مختلف و در نتیجه نگه داشتن مجزا اکسید کننده و سوخت در تماس مستقیم یا یکدیگر است. کانال‌های جریان که وظیفه توزیع گازهای واکنش‌گر در پیل را دارند روی این صفحات ماشین کاری 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 زیرساخت 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. میدان‌های جریان مختلفی برای ایجاد در صفحات دو قطبی پیل‌های سوختی در گذشته توسعه داده شده است. این میدان‌ها شامل: کانال‌های موازی، مارپیچی، پینی و ... است [11].

1- Hazen-dupuit-darcy model

4- مدل فیزیکی و عددی

در شکل 3، 5 مدل شبیه‌سازی شده در این مقاله نشان داده شده است، به طوری که یک تک سل پیل سوختی غشا پلیمری همراه با کانال جریان ساده و میدان جریان فوم فلزی، با اجزای مرتبط به آن را نشان می‌دهد. در شکل 3 الف پیل سوختی شامل دو کانال ساده است و در شکل 3 ب این کانال‌ها به وسیله فوم فلزی پر شده‌اند؛ ولی در شکل 3 ج شانه‌ها برداشته شده و کانال سمت آند با فوم فلزی پر شده است، این اتفاق در شکل 3 د نیز اتفاق افتاده با این تفاوت که در شکل 3 د، سمت کاتد از فوم فلزی پر شده است. در نهایت در شکل 3 ه، هم سمت آند، و هم سمت کاتد با فوم فلزی پر شده‌اند. پیل شامل صفحات دو قطبی همراه با کانال‌ها (فوم فلزی) در سمت آند و کاتد، لایه‌های پخش گاز آند و کاتد، لایه‌های کاتالیست آند 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.



شکل 3 مدل‌های شبیه‌سازی شده تک سل پیل سوختی با الف) کانال جریان ساده (ب) کانال جریان حاوی فوم فلزی (ج) میدان جریان فوم فلزی در سمت آند (د) میدان جریان فوم فلزی سمت کاتد (ه) میدان جریان فوم فلزی سمت آند و کاتد

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 به مدل شود. اما در این مطالعه، چون هدف مقایسه عملکرد 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 بسیار پیچیده پیل سوختی و به منظور سادگی حل معادلات حاکم، در توسعه مدل جریان دائم و آرام نظر گرفته می‌شود، همچنین مخلوط گاز کامل، لایه‌های متخلخل همگن، پیل آدیباتیک و از تأثیر گرانش صرف نظر می‌شود. از مقاومت تماسی بین لایه‌ها صرف نظر کرده و مدل انتقال آب نیز تک‌فاز می‌باشد.

4-1- معادلات حاکم

مدل شامل معادلات دیفرانسیل همبسته شده غیرخطی شامل بقا جرم، مومنوم، بارالکتریکی 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. 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 می‌افزاید و حل معادلات را آسان‌تر می‌نماید؛ اما زمان محاسبات کامپیوتری طولانی‌تر می‌شود [12].

در معادلات ارائه شده در روابط (4) تا (9)، ρ ، ϵ ، p ، X_k ، ϕ_e ، ϕ_s ،

4-2- شرایط مرزی

روابط (4) تا (9) یک دستگاه معادلات حاکم را برای حل مجهولات $u, v, w, p, \phi_s, \phi_e, X_k, T$ تشکیل می‌دهند. برای حل این معادلات نیاز به مشخص کردن شرایط مرزی مناسب می‌باشد. چون در این مدل از روش تک ناحیه‌ای استفاده شده است، 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 مرطوب سازی واکنش‌گرهای ورودی می‌باشد. نسبت مولی آب ورودی در سمت آند مشابه با سمت کاتد محاسبه می‌شود، با این تفاوت که 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 درجه سلسیوس، در نظر گرفته می‌شود. جریان در مرزهای خروجی به صورت توسعه یافته یا شار صفر با فشار برگشتی در نظر گرفته شده است.

که این روابط به ترتیب نشان‌دهنده معادله بقای پیوستگی، مونتوم، اجزا، پروتون، الکترون و انرژی هستند. ترم‌های چشمه مربوط به این معادلات در جدول 1 ارائه شده است. خواص الکتروشیمیایی و فیزیکی پیل نیز در جداول 2 و 3 ارائه شده‌اند.

در روابط درون جداول، $z, \alpha, \eta, \phi, U_0$ ، به ترتیب دانسیته جریان تبادل، ضریب انتقال، اضافه ولتاژ، پتانسیل و پتانسیل مدار باز می‌باشد. جدول 4 پارامترهای فیزیکی و خصوصیات پیل سوختی را نشان می‌دهد.

$$(\rho \vec{u}) = 0 \quad (4)$$

$$\frac{1}{\varepsilon^2} \nabla \cdot (\rho \vec{u} \vec{u}) = -\nabla p + \nabla \cdot (\mu \nabla \vec{u}) + S_{\text{Dar}} \quad (5)$$

$$\nabla \cdot (\vec{u} X_k) = \nabla \cdot (D_k^{\text{eff}} \nabla X_k) + S_k \quad (6)$$

$$\nabla \cdot (\sigma_e^{\text{eff}} \nabla \phi_e) + S_e = 0 \quad (7)$$

$$\nabla \cdot (\sigma_s^{\text{eff}} \nabla \phi_s) + S_s = 0 \quad (8)$$

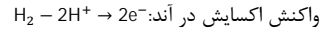
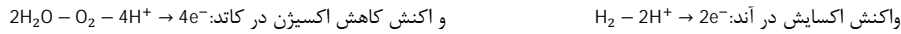
$$\nabla \cdot (\rho c_p \vec{u} T) = \nabla \cdot (k^{\text{eff}} \nabla T) + S_T \quad (9)$$

جدول 1 ترم‌های چشمه و چاه

معادلات بقا	کانال (فوم فلزی)*	لایه‌های پخش گاز	لایه‌های کاتالیست	غشا
اندازه حرکت	$S_{\text{Dar}} = -\frac{\mu}{K} \vec{u}$	$S_{\text{Dar}} = -\frac{\mu}{K} \vec{u}$	$S_{\text{Dar}} = -\frac{\mu}{K} \vec{u}$	$S_{\text{Dar}} = -\frac{\mu}{K} \vec{u}$
اجزا	$S_k = 0$	$S_k = 0$	$S_k = -\nabla \cdot \left(\frac{n_d}{F} I \right) - \frac{S_k j}{nF}$	$S_k = -\nabla \cdot \left(\frac{n_d}{F} I \right)$
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	$S_T = 0$	$S_T = 0$	$S_T = j(\eta + T \frac{dU_0}{dT}) + \frac{I^2}{\sigma^{\text{eff}}}$	$S_T = \frac{I^2}{\sigma^{\text{eff}}}$

واکنش‌های الکتروشیمیایی:

$$\sum s_k M_k = ne^- : \begin{cases} M_k: k \text{ فرمول شیمیایی جز} \\ s_k: \text{ضریب استوکیومتری} \\ n: \text{تعداد الکترون منتقل شده} \end{cases}$$



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

جدول 2 خواص الکتروشیمیایی [12]

پارامتر	مقدار در سمت آند	مقدار در سمت کاتد
دانسیته جریان تبادل (آمپر بر متر مکعب)	$j = -ai_{0,c} \left(\frac{C_{\text{O}_2}}{C_{\text{ref}}^{\text{O}_2}} \right) \exp\left(-\frac{\alpha_c}{RT} F\eta\right)$	$j = ai_{0,a} \left(\frac{C_{\text{H}_2}}{C_{\text{ref}}^{\text{H}_2}} \right)^{1/2} \left(\frac{\alpha_a + \alpha_c}{RT} F\eta \right)$
اضافه پتانسیل سطح (ولت)	$\eta = \phi_s - \phi_e - U_0$ ($\phi_s = V_{\text{cell}}$)	$\eta = \phi_s - \phi_e - U_0$ ($\phi_s = 0$)
پتانسیل مدار باز (ولت)	$U_0 = 1.23 - 0.9 \times 10^{-3}(T - 298.15)$	$U_0 = 0$
ضریب انتقال	$\alpha_c = 1$	$\alpha_a + \alpha_c = 2$
دانسیته جریان تبادل \times مساحت سطح فعال (آمپر بر متر مکعب)	$ai_{0,c}(353) = 2.0 \times 10^4$	$ai_{0,a} = 1.0 \times 10^9$

جدول 3 خواص فیزیکی [12]

پارامتر	نماد و مقدار
فعالیت بخار آب	$a = \frac{C_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{H}_2\text{O}} RT}{P_{\text{sat}}} = \frac{C_{\text{H}_2\text{O}}}{C_{\text{sat}}^{\text{H}_2\text{O}}}$
هدایت یونی غشا (زیمنس بر متر)	$\sigma = (0.5139\lambda - 0.326) \exp(1268.0 \left(\frac{1}{303} - \frac{1}{T} \right))$
محتوی بخار آب غشا	$\lambda = \begin{cases} 0.043 + 17.81a - 39.85a^2 + 36.0a^3 & 0 < a \leq 1 \\ 14 + 1.4(a - 1) & 1 < a \leq 3 \end{cases}$
ضریب درگ الکترو-اسمزیک	$n_d = \begin{cases} 16.8 & a > 3 \\ 1.0 & \lambda \leq 14 \\ 1.5 & 8(\lambda - 14) + 1.0 & \lambda > 14 \end{cases}$
ضریب پخش آب در غشا (متر مربع بر ثانیه)	$D_{\text{eH}_2\text{O}} = \begin{cases} 3.1 \times 10^{-7} \lambda (e^{0.28\lambda} - 1) \cdot e^{(-2346/T)} & 0 < \lambda \leq 3 \\ 4.17 \times 10^{-8} \lambda (1 + 161e^{-\lambda}) \cdot e^{(-2346/T)} & \lambda > 3 \end{cases}$
ضریب پخش گاز (متر مربع بر ثانیه)	$D_g = \varepsilon_i^{1.5} D_0 \left(\frac{T}{T_0} \right)^{1.5} \left(\frac{P}{P_0} \right)$
ضریب پخش موثر (متر مربع بر ثانیه)	$D_k^{\text{eff}} = \varepsilon^{1.5} D_k$
ضریب هدایت حرارتی موثر (وات بر متر کلوبین)	$k_{\text{eff}} = \frac{1 - \varepsilon}{3k_s + 2k_s + k_f} \varepsilon - 2k_s$

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 نرم‌افزار دینامیک سیالات محاسباتی فلوئنت حل شده‌اند. در این برنامه، میدان‌های سرعت و فشار با استفاده از الگوریتم سیمپل به دست آمده‌اند [13]. 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 با یکدیگر کوپل هستند. 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.

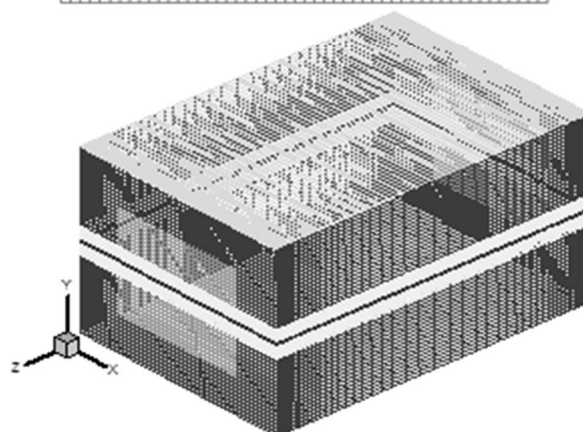
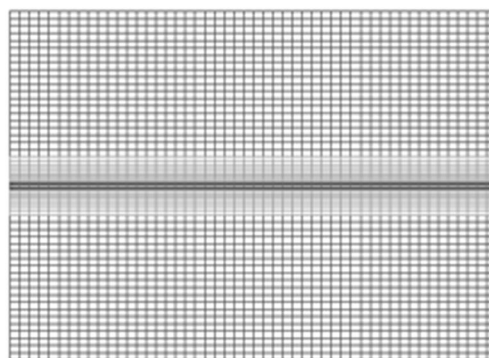
شبکه‌بندی به گونه‌ای است که تعداد شبکه در راستای ضخامت لایه پخش گاز، لایه کاتالیست و غشا به ترتیب 10، 4 و 4 می‌باشد. تعداد شبکه برای مدل‌های (الف)، (ب)، (ج)، (د) و (ه) به ترتیب برابر 450000، 850000، 750000، 750000 و 1050000 می‌باشد. در جاهایی که فوم فلزی وجود دارد تعداد مش‌ها افزایش داشته است، یعنی تعداد بیشتر مش‌ها، نشان دهنده استفاده بیشتر از فوم فلزی در کانال می‌باشد. تعداد گره‌ها طوری تنظیم شده که نتایج مدل عددی مستقل از تعداد شبکه شود. شبکه‌بندی انجام شده برای یک نمونه پیل با فوم فلزی به عنوان توزیع کننده جریان شکل 4 نشان داده شده است. در این شکل، نواحی از بالا به پایین شامل: صفحه دو قطبی آند، کانال (مدل‌های الف و ب)، ناحیه فوم (مدل‌های ج، د و ه) آند، لایه پخش گاز آند، لایه کاتالیست آند، غشا، لایه کاتالیست کاتد، لایه پخش گاز کاتد، کانال (مدل‌های الف و ب)، ناحیه فوم (مدل‌های ج، د و ه) کاتد و صفحه دو قطبی کاتد می‌باشد. در مدل (ج) تا (ه) دیواری در مقابل ورودی به گونه‌ای قرار داده شده تا مقدار شرایط ورودی در همه مدل‌ها یکسان باشد.

5- نتایج

به منظور صحت‌گذاری نتایج، منحنی دانسیته جریان - ولتاژ در شکل 5 برای یک کانال ساده مستقیم (بدون فوم فلزی) با اطلاعات تجربی تیکنالی [14] مقایسه شده که توافق بسیار خوبی با نتایج تجربی دارد. عمده اختلاف مدل حاضر با نتایج تجربی مربوط به چگالی جریان‌های بالا می‌باشد. در چگالی 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 تخل‌های لایه پخش گاز، عملکرد پیل به شدت افت می‌یابد. باید توجه داشت که به علت پیچیدگی بسیار زیاد بحث تغییر فاز آب در پیل سوختی، در این مقاله فرض شد که آب تغییر فاز نداده و به صورت بخار باقی می‌ماند. این فرض در چگالی جریان‌های معمول و با توجه به شرایط عملکرد پیل (دمای 353 کلون و فشار 1/5 اتمسفر، نسبت استوکیومتریک سمت آند و کاتد برابر 1)، فرض مناسب و منطقی می‌باشد و در بسیاری از مقالات با هدف مدل‌سازی عددی پیل سوختی از این فرض استفاده شده است.

جدول 4 خصوصیات و پارامترهای فیزیکی پیل سوختی [12]

پارامترها	مقادیر
عرض کانال، عرض فوم فلزی	0/8, 2/4mm
ارتفاع کانال/ارتفاع فوم فلزی	0/6, 0/6mm
ضخامت لایه پخش گاز	210 μm
ضخامت لایه کاتالیست	12 μm
ضخامت غشا	36 μm
طول پیل	125 mm
دمای عملکرد پیل سوختی	353 K
غلظت کلی آند، کاتد	66/817, 17/808 mol m ⁻³
جریان الکتریکی مرجع	10 ⁴ Am ⁻²
فشار ورودی آند و کاتد	1×10 ⁵ Pa
کسر مولی هیدروژن، اکسیژن ورودی	0/8441, 0/19
کسر مولی بخار آب ورودی در آند و کاتد	0/1559
تخلخل غشا و لایه کاتالیست	0/28
تخلخل لایه پخش گاز	0/4
دبی جرمی ورودی کانال آند	6×10 ⁻⁷ kg.s ⁻¹
دبی جرمی ورودی کانال کاتد	5×10 ⁻⁶ kg.s ⁻¹
ضریب هدایت حرارتی فوم فلزی (نیکل)	447 Wm ⁻¹ K ⁻¹
ضریب تخلخل فوم فلزی	0/9
ضریب انتقال آند/ کاتد	2.2
کسر مولی مرجع هیدروژن	0/8
کسر مولی مرجع اکسیژن	0/02
ضریب پخش بخار آب در کانال	1/873×10 ⁻⁵ m ² s ⁻¹
نفوذپذیری فوم فلزی	1×10 ⁻⁸ m ²
ضریب پخش هیدروژن در کانال	2/63×10 ⁻⁶ m ² s ⁻¹
ضریب پخش اکسیژن در کانال	5/2197×10 ⁻⁶ m ² s ⁻¹



شکل 4 شبکه‌بندی مدل پیل با فوم فلزی به عنوان توزیع کننده جریان، صفحه xy (شکل بالا) و مدل سه بعدی (شکل پایین)

باشند، حتی ضریب انتقال حرارت هدایتی فوم فلزی بالاتر از گرافیت بوده و سهم حرارت انتقال یافته از طریق محیط متخلخل نسبت به انتقال از طریق شانه‌های جریان بالا می‌باشد. در این مقاله از نیکل به عنوان فوم فلزی با ضریب تخلخل 90% استفاده شده است، که باعث شده انتقال حرارت از کانال نیز به خوبی صورت بگیرد.

در جدول 5 بیشینه دما، برای تمامی مدل‌ها آورده شده است. در پیل سوختی هر چه بیشینه دما و میانگین آن کمتر باشد به افزایش طول عمر پیل کمک می‌کند، زیرا باعث کاهش تنش‌های حرارتی می‌شود. اگر بیشینه دما در پیل افزایش پیدا کند علاوه بر این که طول عمر کاهش پیدا می‌کند، نیاز است تا خنک کاری بهتری در پیل سوختی انجام گیرد، که خنک کاری بهتر منجر به افزایش هزینه تمام شده پیل سوختی می‌شود.

همان‌گونه که در جدول 5 دیده می‌شود، در تمامی مدل‌هایی که در آن -ها از فوم فلزی استفاده شده است، بیشینه دما کاهش یافته است. در حالی که از فوم فلزی در سمت آند و کاتد (مدل ه) استفاده شده کاهش بیشینه دما از همه آن‌ها بیشتر شده است؛ زیرا گرما هم از سمت آند و هم از سمت کاتد به خوبی دفع شده است.

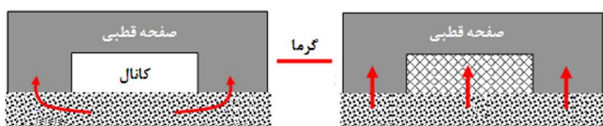
در شکل 8 توزیع دما در وسط غشا نشان داده شده است. تمامی توزیع دماها در ولتاژ 0/4 ولت آورده شده‌اند. مشاهده می‌شود که در حالی که از فوم استفاده نمی‌شود تمرکز بیشینه دما زیر کانال‌ها است، این موضوع در بقیه مدل‌ها اتفاق نمی‌افتد زیرا گرما علاوه بر این که از طریق جابه‌جایی دفع می‌شود از طریق فوم فلزی و به شکل هدایت الکتریکی نیز دفع می‌شود. همان‌گونه که در شکل مشخص است بین مدل (ج) و (د) تفاوت آشکاری نیست، زیرا فوم فلزی در هر سمتی که قرار بگیرد عمل انتقال حرارت را به یک میزان انجام می‌دهد.

برای مقایسه بهتر توزیع دما، از شاخص یکنواختی توزیع دما که در رابطه (10) آورده شده است استفاده شده است [15].

$$U_T = \frac{\int_A |T - T_{avg}| dA}{\int_A dA} \quad (10)$$

شاخص یکنواختی توزیع دما، U_T انحراف دمایی سطح را از میانگین دما به دست می‌دهد. به عبارت دیگر اگر دمایی کل سطح یکسان باشد این شاخص عدد صفر را نشان می‌دهد. در جدول 6 شاخص توزیع دما به همراه دمایی میانگین برای مدل 5 آورده شده است.

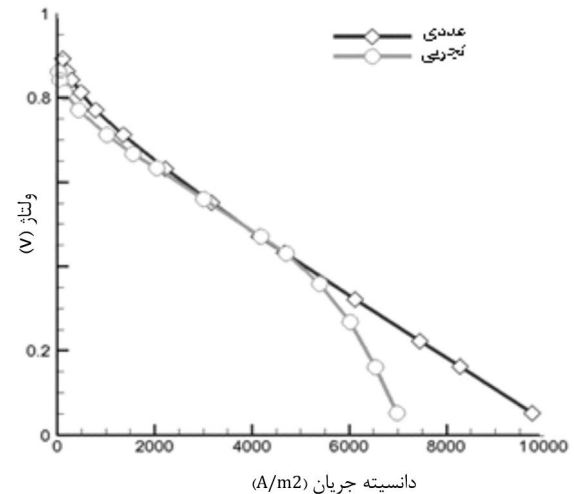
در جدول 6 مشاهده می‌شود که در مدل‌های (ب) و (ه) که شامل فوم فلزی در دو سمت آند و کاتد هستند از نظر توزیع دما وضعیت بهتری دارند. در مدل (ه) نیز به علت داشتن فوم فلزی در سمت کاتد و آند، علاوه بر این که بیشینه دمایی آن از بقیه مدل‌ها کمتر است توزیع دما نیز در آن بهتر صورت گرفته است. پس به لحاظ دمایی همان‌گونه که انتظار می‌رفت، مدل (ه) بهترین مدل است.



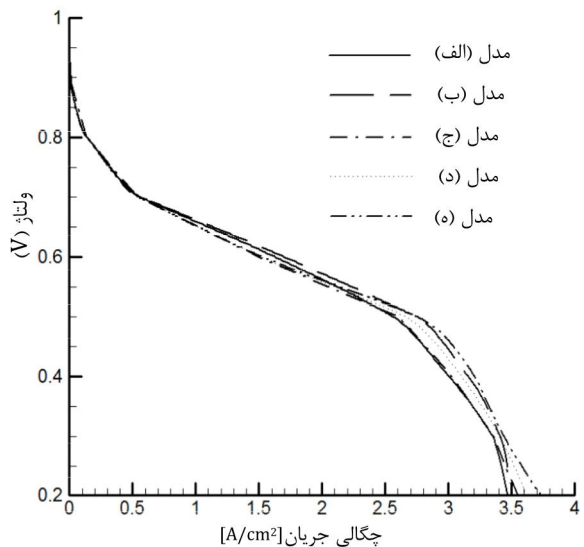
شکل 7 انتقال حرارت در پیل با کانال ساده و پیل با فوم فلزی

جدول 5 بیشینه دما در پیل

نام مدل	(الف)	(ب)	(ج)	(د)	(ه)
بیشینه دما	359/147	356/424	357/868	357/534	355/878



شکل 5 مقایسه منحنی قطبش تجربی [14] و حل عددی



شکل 6 نمودار دانسیته جریان - ولتاژ برای مدل 5

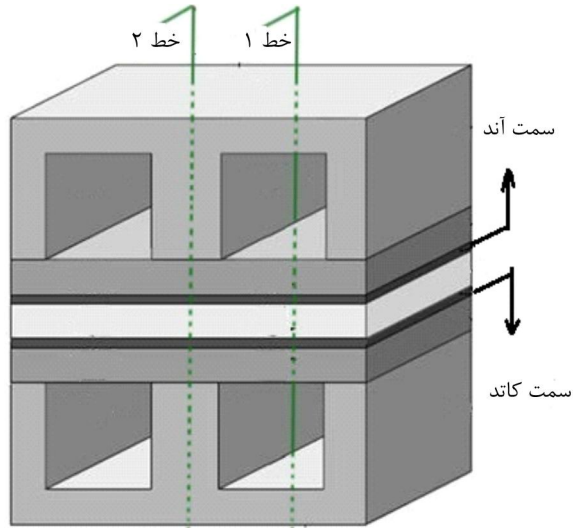
1-5- مقایسه منحنی قطبش

در شکل 6 منحنی دانسیته جریان - ولتاژ برای هر 5 مدل آورده شده است. هر چند تفاوت عمده‌ای از نظر عملکرد مشاهده نمی‌شود ولی باید توجه داشت که به جز در ولتاژهای بالا یعنی زمانی که نیازی به دانسیته جریان بالایی نیست، تمامی مدل‌ها در مقایسه با مدل (الف) که در آن از فوم فلزی استفاده نشده عملکرد بهتری دارند. نکته دیگر در مورد جدول 2-5، مقایسه‌ای است که باید بین مدل (ج) و مدل (د) صورت بگیرد، همان‌گونه که در نمودار نیز مشخص است مدل (د) در همه ولتاژها جریان بیشتری نسبت به مدل (ج) دارد، این امر به این سبب اتفاق می‌افتد که میزان نفوذپذیری اکسیژن نسبت به هیدروژن کمتر است، و قرار دادن فوم فلزی در سمت کاتد (همان سمتی که اکسیژن وارد می‌شود) باعث بهبود عملکرد پیل سوختی شده است. با مقایسه میان مدل‌های (ب) و (ه) با مدل (د) و (ج) مشاهده می‌شود که استفاده از فوم فلزی در دو سمت کاتد و آند در مقایسه با استفاده از فوم در یک سمت، باعث بهبود عملکرد پیل سوختی می‌شود.

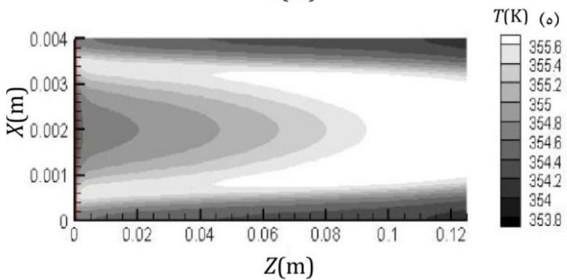
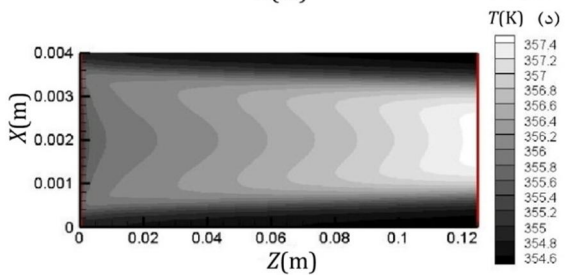
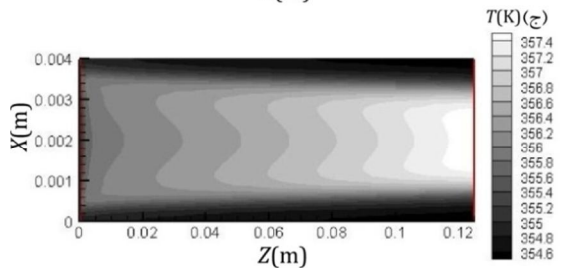
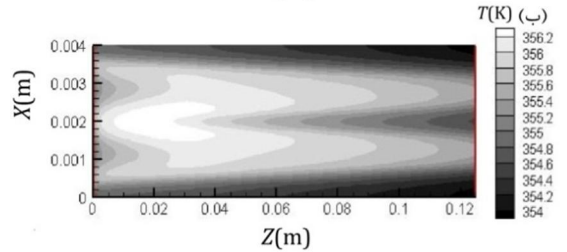
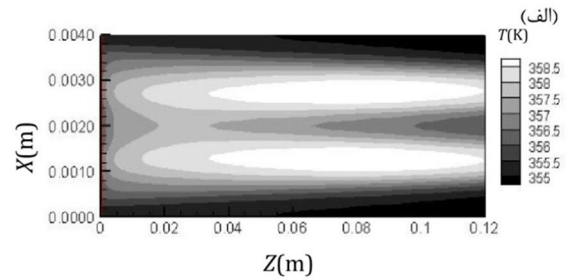
2-5- عملکرد حرارتی

مطابق شکل 7، علاوه بر شانه‌های کانال، بخشی از گرما نیز از طریق بخش جامد محیط متخلخل منتقل می‌شود. اگر صفحات دوقطبی از جنس گرافیت

این علت که حرارت از طریق هدایت دفع نمی‌شود شاهد یک پرش دمایی هستیم. این مورد در مقایسه میان مدل‌های (ج) و (د) به خوبی دیده می‌شود. برای مثال در مدل (ج) که سمت کاتد فوم فلزی به کار نرفته است پرش دمایی وجود دارد در صورتی که در سمت آند آن، چنین اتفاقی نمی‌افتد.



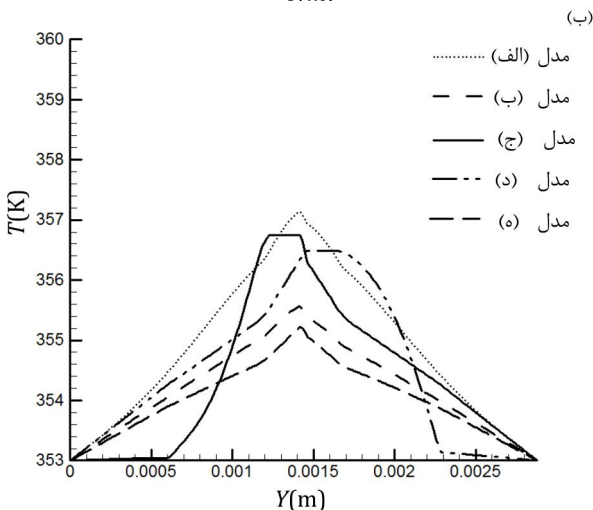
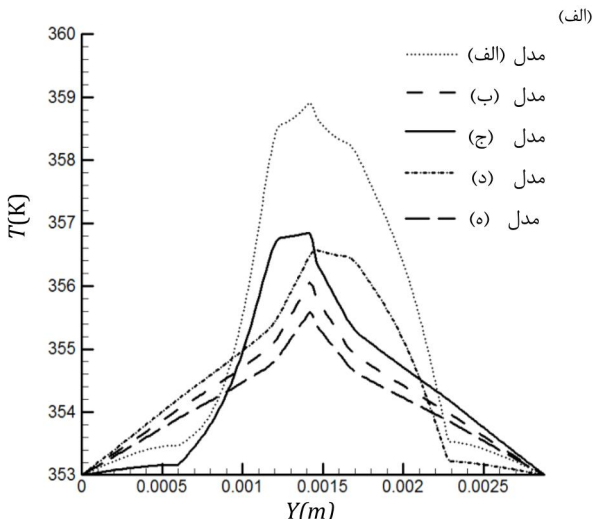
شکل 9 خطوط عبوری از پیل سوختی به منظور مشخص کردن تغییرات دما



شکل 8 توزیع دما در غشا: از بالا به پایین مدل الف، ب، ج، د و ه

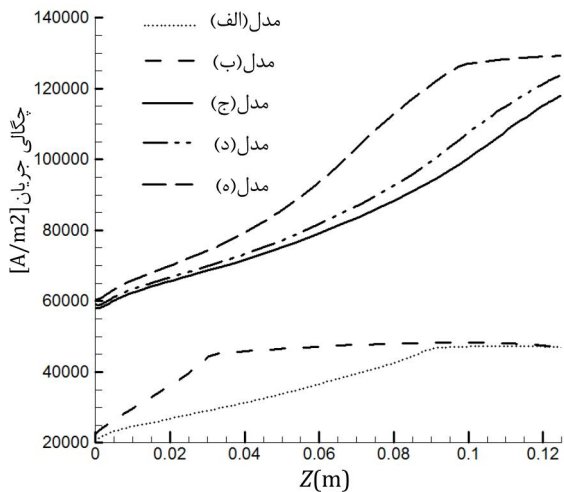
جدول 6 شاخص یکنواختی دما

نام مدل	(الف)	(ب)	(ج)	(د)	(ه)
U_T	1/1941	0/6045	0/9984	0/9519	0/5758



شکل 10 الف) توزیع دما روی خط 1 عبوری از کانال‌ها ب) خط 2 عبوری از شانه‌ها

همان‌گونه که در شکل 9 نشان داده شده است، دو خطی که یکی از کانال‌ها یعنی خط 1 (مدل‌های الف و ب) و دیگری از شانه یعنی خط 2 می‌گذرد آورده شده است. این خطوط از مرکز پیل سوختی (مرکز راستای Z) می‌گذرند. در شکل 10 توزیع دما روی دو خط برای تمامی مدل‌ها آورده شده است. در توضیح شکل 10 ابتدا باید توجه کرد در حالتی که در فوم فلزی در دو سمت کاتد و آند وجود نداشته باشد، دمای بالاتری مشاهده می‌شود (مدل‌های الف، ج، د). نکته دیگر در مورد شکل 10 این‌که در جاهایی که از فوم فلزی در دو سمت آند و کاتد استفاده نشده است (مدل‌های الف، ج، د) به



شکل 12 توزیع چگالی جریان روی خطی که از زیر کانال و بین لایه کاتالیست و غشا در راستای Z عبور می‌کند

جدول 7 شاخص یکنواختی چگالی جریان

نام مدل	(الف)	(ب)	(ج)	(د)	(ه)
U_1	21360	22012	15195	15542	16058

مشاهده می‌شود که در مدل‌های (الف) و (ب) در زیر کانال‌ها به دلیل عدم نفوذ اکسیژن، چگالی جریان نیز پایین است. دانسیته جریان در پیل با فوم فلزی خیلی بیشتر از دانسیته جریان در پیل با کانال ساده است.

نیز برای قضاوت بهتر در مورد یکنواخت بودن چگالی جریان، شاخص یکنواختی در جدول 7 آورده شده است. تعریف شاخص یکنواختی برای چگالی جریان، همانند شاخص یکنواختی برای توزیع دما تعریف می‌شود. در جدول 7 به خوبی می‌توان تأثیر حذف کردن شانه‌ها (در مدل‌های (ج)، (د) و (ه)) را بر روی یکنواخت بودن توزیع چگالی جریان به خوبی مشاهده کرد.

توزیع یکنواخت‌تر دانسیته جریان ناشی از توزیع یکنواخت‌تر اکسیژن می‌باشد. در مقایسه میان مدل‌های (ج) و (د) همان‌گونه که انتظار می‌رود در مدل (د)، که در سمت کاتد آن حاوی فوم فلزی است، شدت چگالی جریان بالاتر است؛ زیرا اگر در سمت آند فوم فلزی قرار داده نشود به علت میزان نفوذپذیری زیاد هیدروژن در لایه پخش گاز تأثیر چشم‌گیری روی میزان چگالی جریان نمی‌گذارد.

شکل 12 توزیع چگالی جریان را روی خطی که از زیر کانال و بین لایه کاتالیست و غشا در راستای Z عبور می‌کند نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود در حالت‌هایی که شانه‌ها حذف شده‌اند به دلیل این‌که اکسیژن بهتر در اختیار لایه کاتالیست قرار می‌گیرد واکنش‌ها بهتر اتفاق می‌افتند و در نتیجه چگالی جریان بیشتری تولید می‌شود. در این‌جا مجدداً مشاهده می‌شود که قرار دادن فوم فلزی در سمت کاتد تأثیر بهتری بر چگالی جریان دارد. در مقایسه میان مدل (الف) و (ب) نیز مشاهده می‌شود که به‌علت وجود فوم فلزی در مدل (ب) چگالی جریان مقدار بیشتری نسبت به حالت (الف) دارد. همچنین در مدل‌های (ج)، (د) و (ه) تغییرات چگالی جریان به‌صورت ناگهانی نیست.

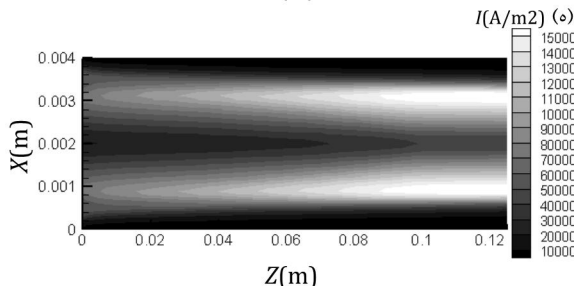
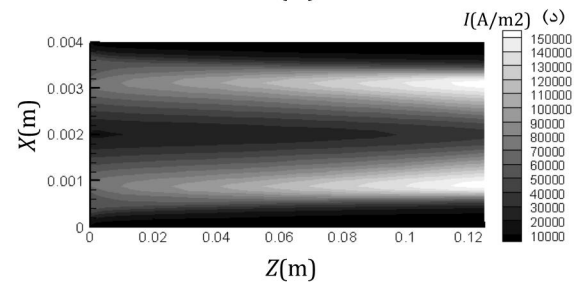
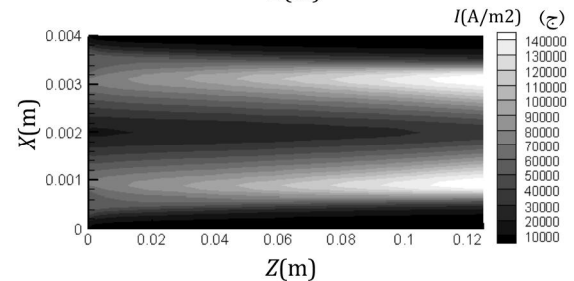
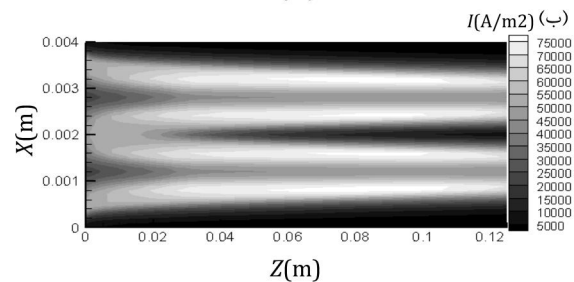
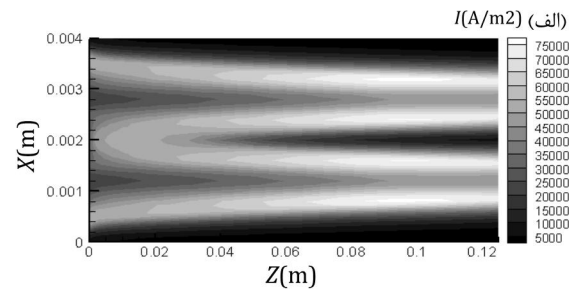
5-4- افت فشار

در شکل 13 مقایسه‌ای میان افت فشار در طول کانال کاتد میان مدل‌های (الف) و (ب) آورده شده است، زیرا در مدل‌های (الف) و (ب) از نظر هندسی شرایط یکسان است و می‌شود تأثیر افت فشاری که فوم فلزی ایجاد می‌کند به خوبی مشاهده کرد.

بیشینه دما در لایه کاتالیست سمت کاتد اتفاق می‌افتد زیرا در آن‌جا واکنش کاهش اکسیژن اتفاق می‌افتد که واکنشی گرماده است. طبق نمودار اگر فوم فلزی در سمت کاتد باشد باعث می‌شود مقداری از این گرما از طریق هدایت دفع شود که باعث کمتر شدن دما در لایه کاتالیست شده و باعث افزایش عمر پیل سوختی می‌شود.

5-3- توزیع چگالی جریان

در شکل 11 توزیع چگالی جریان در فصل مشترک لایه پخش گاز/لایه کاتالیست کاتد نشان داده شده است. دانسیته جریان متناسب با مصرف اکسیژن می‌باشد و با مصرف بیشتر اکسیژن، دانسیته جریان افزایش می‌یابد.



شکل 11 توزیع چگالی جریان (A/m²) در فصل مشترک لایه پخش گاز/لایه کاتالیست کاتد

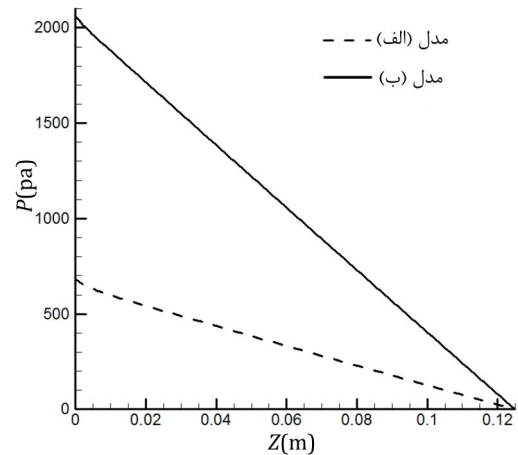
ضریب پخش جزء k (m^2/s)	D_k
ثابت فارادی (C/mol)	F
آنتالپی (J)	H
چگالی جریان الکتریکی (A/m^2)	I
چگالی جریان انتقالی (A/m^3)	J
نفوذپذیری (m^2)	K
ضریب هدایت حرارتی موثر ($W/m K$)	k_{eff}
ضریب هدایت حرارتی فاز سیال ($W/m K$)	k_f
ضریب هدایت حرارتی فاز جامد ($W/m K$)	k_s
فشار (Pa)	P
ثابت عمومی گازها ($8.314 J/kg mol K$)	R
جمله چشمه در معادلات انتقال	S
دما (K)	T
سرعت (m/s)	u
کسر مولی جز k	X_k
زمان	t
دبی جریان (m^3/s)	Q
عدد رینولدز	Re
ولتاژ (ولت)	V
ضریب درگ الکترو اسمزیک	n_d
غلظت (mol/m^3)	C
پتانسیل (ولت)	U
دبی جرمی (kg/s)	\dot{m}

علائم یونانی

ضریب انتقال	α
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 موثر یونی غشا، (S/m)	σ_k^{eff}
نرخ استوکیومتری	ξ
ویسکوزیته سینماتیکی، (m^2/s)	ν

8- مراجع

- [1] C. Tseng, B. Tsai, Z. Liu, T. Cheng, W. Chang, S. Lo, A PEM fuel cell with metal foam as flow distributor, *Energy Conversion and Management*, Vol. 62, pp. 14-21, 2012.
- [2] A. Kumar, R. Reddy, Modeling of polymer electrolyte membrane fuel cell with metal foam in the flow-field of bipolar/end plates, *Journal of Power Sources*, Vol. 114, pp. 54-62, 2003.
- [3] A. Kumar, R. Reddy, Materials and design development for bipolar/end plates in fuel cells, *Journal of Power Sources*, Vol. 129, pp. 62-67, 2004.
- [4] A. Kumar, R. Reddy, Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell with Metal Foam in the Gas Flow-Field of Bipolar/End Plates, *New Materials for Electrochemical Systems*, Vol. 6, pp. 231-236, 2003.
- [5] B. Tsai, C. Tseng, Z. Liu, C. Wang, L. Cl, Y. CC, L. SK, 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*, Vol. 37, pp. 13060-13066, 2012.



شکل 13 نمودار تغییرات فشار در کانال کاتد در مدل (الف) و (ب)

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. 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} متر مربع در نظر گرفته شد. به این دلیل که فوم فلزی دارای تخلخل بالا و ضریب نفوذپذیری زیادی است، افت فشار محسوسی ایجاد نمی‌کند.

6- نتیجه گیری

در این مقاله، مقایسه‌ای میان مدل‌هایی از پیل سوختی صورت گرفت که در آن‌ها از فوم فلزی به عنوان توزیع کننده جریان استفاده شده با توسعه یک مدل سه بعدی پیل، معادلات بقای جرم، مومنتوم، اجزا، 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) ماکزیمم دما هنگامی که از فوم فلزی در دو سمت آند و کاتد استفاده می‌شود، کاهش یافت.
- (2) با تعریف شاخص یکنواختی برای توزیع دما، مشاهده شد که با قرار دادن فوم فلزی در هر سمت (چه آند و چه کاتد) دما توزیع بسیار یکنواخت تری در همان سمت دارد.
- (3) توزیع چگالی جریان بسیار با توجه به شاخص یکنواختی، بهتر صورت گرفت به خصوص تأثیر آن هنگامی که از فوم فلزی در سمت کاتد استفاده شد.
- (4) افت فشار درون کانال در مدلی که از فوم فلزی استفاده شده افزایش داشته ولی این افزایش قابل صرف نظر کردن است.

7- فهرست علائم

علائم انگلیسی

فعالیت آب در غشا	A
غلظت جزء i (mol/m^3)	C^i
ظرفیت گرمایی ویژه ($J/kg K$)	C_p

- [11] E. Afshari, N. Baharloo Hoore, Analyses of oxygen transport and pressure drop in PEM fuel cell cathode with the partially blocked flow channel, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 5, pp. 43-58, 2013.
- [12] S. Ge, B. Yi, A mathematical model for PEMFC in different flow modes, *Journal of Power Sources*, Vol. 124, pp. 1-11, 2003.
- [13] E. Afshari, S. A. Jazayeri, Analyses of heat and water transport interactions in a proton exchange membrane fuel cell, *Journal of Power Sources*, Vol. 194, pp. 423-432, 2009.
- [14] E. Ticianelli, C. Derouin, A. Redondo, S. Srinivasan. Methods to Advance Technology of Proton Exchange Membrane Fuel Cells, *J. Electrochemical. So*, Vol. 135, pp. 2209-2214, 1988.
- [15] S. M. Baek, S. H. Yu, J. H. Num, C. J. Kim, A numerical study on uniform coolingof large-scale PEMFCs with differentcoolant flow field designs , *Applied Thermal Engineering* , Vol. 31, pp. 1427-1434, 2011.
- [6] S. Arisetty, A. Prasad, S. Advani, Metal foams as flow field and gas diffusion layer in direct methanol fuel cells, *Journal of Power Sources*, Vol. 165, pp. 49-57, 2007.
- [7] W. Yuan, Y. Tang, X. Yang, Z. Wan, Porous metal materials for polymer electrolyte membrane fuel cells – A review, *Applied Energy*, Vol. 94, pp. 309-329, 2012.
- [8] Y. Wang, Porous-Media Flow Fields for Polymer Electrolyte Fuel Cells I. Low Humidity Operation, *Journal of The Electrochemical Society*, Vol. 156, No. 10, pp. B1124-B1133, 2009.
- [9] J. Banhart, Manufacture, characterization and application of cellular metals and metal foams, *Progress in Materials Science*, Vol. 46, pp. 559-632, 2001.
- [10] K. Boomsma, D. Poulikakos, The effects of compression and pore size variations on the liquid flow characteristics in metal foams, *Journal of fluid trancactions of the ASME*, Vol. 124, No. 1, pp. 263-272, 2002.