مجله مهندسی مکانیک مدرس، اسفند1396، دوره 17، شماره 12، ص‌ص 297-308

ماهنامه علمی پژوهشی

مهندسی مکانیک مدرس

mme.modares.ac.ir

طراحی جدید و بررسی عملکرد میدان جریان پیل سوختی غشاء پلیمری جهت بهبود عملکرد برای کاربرد در یک وسیله هوایی

آرمان عبدلی[1]، مجتبی دهقان منشادی[2*]، ابراهیم افشاری[3]

1- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، اصفهان

2- دانشیار، مهندسی هوافضا، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، اصفهان

3- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه اصفهان، اصفهان

*شاهین شهر، صندوق پستی 153/83145، mdmanshadi@mut-es.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 25 شهریور 1396

پذیرش: 10 آبان 1396

ارائه در سایت: 24 آذر 1396

کلید واژگان:

پیل سوختی غشاء پلیمری

طراحی میدان جریان

توزیع یکنواخت گازهای واکنش‌گر

کاربرد هوایی

چکیده

از مهم‌ترین قسمت‌های پیل‌های سوختی پلیمری صفحات دوقطبی می‌باشد که از طریق مسیر کانال‌هایی که به‌عنوان میدان جریان در این صفحات مطرح می‌گردد، دسترسی گازهای واکنش‌گر به سطح لایه‌های کاتالیست برای انجام واکنش‌های الکتروشیمیایی پیل سوختی امکان‌پذیر می‌باشد. تاکنون محققان بسیاری به طراحی میدان جریان‌های مختلفی برای پیل‌های سوختی پرداخته‌اند. گرچه هر یک از مدل‌های مطرح شده دارای مزایا و معایب مربوط به خود می‌باشد؛ اما یک طراحی مناسب برای میدان جریان پیل سوختی که توزیع یکنواخت گازهای واکنش‌گر را روی سطح لایه کاتالیست داشته باشد، دسترسی به عملکرد بالاتر و عمر بیشتر پیل‌های سوختی را نتیجه می‌دهد و از اهمیت بسیار بالایی برخوردار است. در این تحقیق به معرفی یک الگوی جریان جدید برای میدان جریان پیل سوختی پرداخته‌شده است و نتایج عددی به‌دست آمده با یک مدل با آرایش متداول موازی مورد مقایسه قرار گرفته شده است. میدان جریان ارائه‌شده به‌صورت مارپیچ اصلاح‌شده با ابعاد کلی پیل 6400 میلی‌متر مربع بوده که دسترسی به توزیع یکنواخت گازهای واکنش‌گر، چگالی جریان و دما ممکن شده است. افزایش 66 درصدی چگالی جریان محدود و رشد 1.7 برابر چگالی توان با اصلاح آرایش برای میدان جریان محقق شده است. در ادامه با در نظر گرفتن نقطه طراحی پیل سوختی براساس منحنی چگالی توان مدل جدید ارائه شده، به بررسی مشخصات و توان ویژه پیل سوختی در یک مأموریت هوایی پرداخته شده است و دسترسی به توان مخصوص بالا که در کاربردهای هوایی اهمیت ویژه‌ای دارد، حاصل‌شده است.

New interior design for polymer flow membrane fuel cell flow field to improve performance for use in an aerial vehicle

Arman Abdoli[1], Mojtaba Dehghan Manshadi[2*], Ebrahim Afshari[2]

1- Faculity of Mechanical and Aerospace Enginerring, malek ashtar University, Esfahan, Iran
2- Department of Mechanical Engineering, Esfahan University, Esfahan, Iran
* P.O.B. 153/83145, Tehran, Iran, mdmanshadi@mut-es.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 16 September 2017
Accepted 01 November 2017
Available Online 15 December 2017

Keywords:
Polymer membrane fuel cell
Flow field design
Fuel cell lifespan
Uniform distribution of reactive gases
Aerial application

ABSTRACT

One of the most important parts of the polymer fuel cell is the bipolar plate, which through the channel paths as the flow field in these plates, the availability of reactive gases to the surface of the catalyst layer is possible to carry out the electrochemical reactions of the fuel cell. So far, many researchers have been designing different flow streams for fuel cells, although each of the models has its own advantages and disadvantages, but a suitable design for the fuel cell flow field, which has a uniform distribution of reactive gases on the surface of the catalyst layer, Access to higher performance and longer fuel cell life is very important. In this paper, we introduce a new flow pattern for fuel cell flow field, and the numerical results obtained with a conventional parallel model are compared. The flow-shaped designs have been modified with a spiral and the total dimensions of the cell are 6400mm^2, which has allowed access to a uniform distribution of reactive gases, flow density and temperature distribution. An increase of 66% was achieved with a limited density and increased 1.7 times the power density by adjusting the arrangement for the flow field. Therefore, considering the design of the fuel cell based on the power density curve presented in the new model, the specific characteristics and power of the fuel cell in an air mission have been addressed and the availability of high specific power that is of particular importance in aerial applications is achieved.

1- مقدمه

در میان روش‌های نوین جایگزینی سوخت‌های فسیلی و تولید انرژی، استفاده از سوخت هیدروژن برای تولید انرژی به دلایل گوناگون به خصوص راندمان مناسب از اهمیت بسیار بالایی برخوردار است در حال حاضر استفاده از

Please cite this article using:

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

A. abdoli, M. dehghan manshadi, E. afshari, New interior design for polymer flow membrane fuel cell flow field to improve performance for use in an aerial vehicle, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 17, No. 12, pp. 297-308, 2018 (in Persian)

پیل‌های سوختی به‌عنوان یک فناوری در حال توسعه برای تأمین منبع توان بسیاری از کاربردها، مانند صنعت حمل‌ونقل، نیروگاه‌های تولید توان، زیردریایی، کاربرد در صنایع نظامی، تولید توان غیرمتمرکز در منازل و ... مطرح شده است.

انگیزه اصلی در تمایل به استفاده از پیل‌های سوختی پلیمری در پهپاد و وسایل هوایی، افزایش مداومت پروازی و درعین‌حال تأمین قابلیت پنهان‌کاری با توجه به دمای کاری پایین پیل پلیمری، برای وسایل هوایی می‌باشد. پیل‌های سوختی به دلیل عملکرد آرام، بدون صدا و بدون اجزایی متحرک و عدم انتشار یا انتشار کم گازهای گلخانه‌ای امروزه در حال رشد بوده و موردتوجه بسیاری از صنایع در بسیاری از کشورها قرار گرفته است. در حال حاضر تمامی وسایل نقلیه بدون سرنشین از باتری‌ها، موتورهای احتراق داخلی یا ترکیبی از این دو به‌عنوان سیستم پیشرانش بهره می‌برند. سیستم‌های پیل سوختی چون قدرت موردنیاز را در قالب فرآیندهای احتراقی تولید نمی‌کنند؛ دارای مصرف سوخت ویژه[1] کمتری نسبت به موتورهای سوخت سنگین پیشرفته یا ژنراتورهای قدرت دیزلی هستند.

کومار و همکاران [1] به بهبود عملکرد یک پیل سوختی غشاء پلیمری از طریق بهینه‌سازی ابعادی آن پرداختند. آن‌ها ابعاد کانال‌های میدان جریان صفحات دوقطبی را با یک الگوی کانال مارپیچ مورد بررسی قرار دادند. شبیه‌سازی برای ابعاد 0.05 تا 4 میلی‌متر برای عرض کانال، عمق و ناحیه شانه کانال، انجام گرفته شده است. بهینه‌ترین ابعاد برای مصرف هیدروژن بالا (حدود 80 درصد) به‌دست آمده است. عرض کانال 1.5میلی‌متر، عمق کانال 1.5 میلی‌متر و برای حاشیه کانال مقدار 0.5 میلی‌متر حاصل شده است طراحی نامناسب یک پیل سوختی غشاء پلیمری منجر به پخش غیریکنواخت واکنش‌دهنده‌های پیل سوختی شده که کاهش عملکرد و عمر مجموعه را به دنبال دارد. گرچه تحقیق‌های زیادی در زمینه طراحی میدان جریان برای پیل سوختی پلیمری انجام شده است؛ ولی طرح موازی- سری برای پیل‌های سوختی کمتر مطالعه شده است. در تحقیق لیمجراجاروس [2]، مطالعه عددی روی توزیع جریان در شش شکل میدان جریان با مساحت پنج سانتی‌متر مربع انجام شده است. این کار با تکنیک‌های عددی با نرم‌افزار فلوئنت صورت گرفته است. نتایج نشان می‌دهد که در اندازه‌های کوچک پیل سوختی، میدان جریان با تعداد کمتر کانال‌ها عملکردی بهتر و یکنواخت‌تری را دارا است و تعداد کانال از شکل خود کانال‌ها در این اندازه‌ها مهم‌تر و تأثیرگذارتر است. ولی دیده شده وقتی تعداد کانال زیادتر شود، بحث هندسه کانال مهم می‌گردد. با تعداد کانال برابر هندسه سری– موازی برای میدان جریان توزیع یکنواخت‌تر و عملکرد بهتری نسبت به هندسه چند مارپیچ ازنظر توزیع جریان و همچنین مدیریت آب نشان داده است. افشاری و همکاران [3] به بررسی کاتد پیل به‌صورتی که بخشی از کاتد به‌وسیله صفحات تیغه‌ای مسدود شده است، پرداخته و تأثیر محدودیت ایجاد شده با نسبت‌های مختلف گپ تحلیل شده است. بدین منظور یک مدل دوبعدی پیل سوختی که کانال کاتد آن مسدود شده است، در نظر گرفته شده و با تحلیل عددی، میدان سرعت، نرخ جریان جرم و شار اکسیژن وارد به لایه کاتالیست، غلظت بخارآب تولیدی و نسبت گاز ورودی به لایه پخش گاز در شرایط مختلف بررسی شده است. نتایج بیان کننده این است که کاهش اندازه گپ و یا افزایش تعداد تیغه‌ها به انتقال گازهای واکنش‌دهنده کمک می‌کند؛ اما منجر به افزایش افت فشار می‌شود. هندسه‌های مختلفی برای میدان جریان پیل سوختی توسط محققان به‌کار گرفته شده است. از جمله یو و همکاران [4] یک میدان جریان شبه موجی استفاده کردند و ابعاد این شکل را بهینه نمودند. مین نیز یک پژوهش [5] دیگر در زمینه کانال با شکل پله مانند از نوع مارپیچ انجام داد و به بهینه‌سازی ابعاد کانال پیل سوختی پرداخت. افشاری و همکاران [6] به بررسی پیل سوختی با سه هندسه پرداختند. کانال موازی، کانال موازی به همراه موانع و در حالت سوم فوم فلزی را به‌جای کانال فلزی به کار برده و نشان داده‌اند که استفاده از فوم فلزی به توزیع یکنواخت‌تر چگالی جریان و واکنش‌دهنده‌ها در سطح کاتالیست و افزایش چگالی جریان و عملکرد پیل منتج می‌شود. در تحقیق انجام‌شده توسط رنوا و همکاران [7] طراحی بهینه برای پهپاد سبک که با استفاده از پیل سوختی غشاء پلیمری کار می‌کند و در ارتفاع کاری بالا مأموریت دارد، انجام شده است. برای سقف‌های پروازی بالاتر از 10 کیلومتر یک وسیله هوایی برخی مشکلات ایجاد می‌شود که توسط شرایط کاری نامناسب محیطی اتفاق می‌افتد. ازاین‌رو استفاده از یک استراتژی جدید جهت مدیریت گرمای تولیدی توسط واکنش‌های الکتروشیمیایی پیل سوختی لازم است. گادالا و زفر [8] به بررسی سیستم قدرت ترکیبی برای وسایل هوایی بدون سرنشین پرداخته است. سیستم قدرت پیشنهادی از پیل سوختی هیدروژنی و صفحات خورشیدی و باتری تشکیل شده است. سطح بال از صفحات نوری پوشیده شده است و پیل سوختی از نوع پلیمری به کار برده شده و باتری استفاده‌شده از نوع لیتیوم پلیمری است. وسایل هوایی کوچک بدون سرنشین برای مطالعات و بررسی‌هایی استفاده می‌شود که وزن شروع به پرواز کمی لازم داشته و دارای ابعاد کوچک باشد تا قابلیت حمل توسط افراد را دارا باشد. تحلیل با توجه به آزمایش‌های مختلف به‌دست‌آمده از تست‌های مختلف انجام شده صورت گرفته است. با توجه به مقدار وزن، نیروی لیفت و درگ، توان موردنیاز برای وسیله مشخص شده است. نتایج تحقیق نشان داده شده با استفاده از سیستم قدرت ترکیبی، مداومت پروازی وسیله از 470 دقیقه به 970 دقیقه افزایش پیدا می‌کند و مطالعات تحقیق سودمندی سیستم توان ترکیبی را برای وسایل هوایی بدون سرنشین نشان داده است.

در این مدل‌سازی یک طرح جدید برای میدان جریان جهت غلبه بر توزیع غیریکنواخت چگالی جریان در سطح فعال پیل سوختی، به دست آوردن چگالی جریان بالا و توزیع دمای مناسب و توزیع یکنواخت گازهای واکنش‌گر برای پیل سوختی پیشنهاد شده است. این مدل جدید براساس آرایش اصلاح شده مارپیچ با آرایش متداول کانال موازی مقایسه شده است و افزایش عملکرد پیل مورد ارزیابی واقع شده است. در ادامه با بررسی حجم پیل سوختی و محاسبه وزن تشکیل‌دهنده آن، به محاسبه تعداد سل لازم جهت تأمین توان مشخصی از وسیله هوایی در حین گردش (فاز کروز) آن پرداخته شده است و پارامتر چگالی توان ویژه نیز که در افزایش مداومت پروازی وسایل بدون سرنشین مطرح است اندازه‌گیری شده است.

2- میدان جریان طراحی‌شده

در میان انواع پیل‌های سوختی، پیل‌های سوختی پلیمری دارای مزایایی است که آن را به مناسب‌ترین گزینه برای منبع تأمین توان پهپاد تبدیل نموده است. مهم‌ترین مزایای استفاده از پیل‌های سوختی پلیمری در وسایل هوایی را می‌توان در بازدهی بالاتر نسبت به فناوری سوخت‌های فسیلی، چگالی انرژی و توان بالاتر که منجر به مداومت بیشتر خواهد شد، قابلیت اطمینان بالا، عدم ایجاد صدا و عدم وجود اجزای متحرک، زمان راه‌اندازی سریع و دمای کاری پایین خلاصه کرد.

مشکل عمده استفاده از پیل‌های سوختی کاهش عمر کاری آن‌ها در

[1] Specific Fuel Consumption

صورت کارکرد مداوم در شرایط کاری دائم در کاربرد هوایی می‌باشد. طراحی مناسب یک میدان جریان مناسب برای پیل‌های سوختی غشاء پلیمری حائز اهمیت است، این اهمیت هم از لحاظ عملکرد و کارایی بهتر پیل سوختی به خاطر دسترسی و توزیع مناسب واکنش‌دهنده‌ها به سطح لایه کاتالیست و هم از سمت دیگر برای جمع‌آوری و خروجی آب تولیدی از واکنش‌های انجام‌شده در پیل اتفاق می‌افتد. توزیع مناسب گازهای واکنش‌گر باعث افزایش عمر و دوام کاری پیل شده و آب تولیدی در پیل مانعی برای دسترسی واکنش‌دهنده در سطح لایه کاتالیست بوده و کاهش عملکرد پیل را منجر می‌شود.

طراحی جدید برای میدان جریان، الگوی اصلاح‌شده‌ای از کانال‌های مارپیچ دارد. هدف از ایجاد این طرح استفاده از کانال‌های نیمه مارپیچ به‌جای کانال‌های طولانی و ممتد مارپیچ جهت مصرف گازهای واکنش‌گر به‌صورت یکنواخت در تمامی سطح پیل و عدم افزایش افت فشار با کوتاه‌تر شدن مسیرهای مارپیچ است. ایده اصلی برای این طراحی، تغییر آرایش کانال‌های مارپیچ برای کم‌تر شدن مسیر حرکت گازهای واکنش‌گر از ورودی تا خروجی کانال پیل، جهت توزیع مناسب‌تر گازهای واکنش‌گر و وجود مقادیر مناسب سوخت در قسمت‌های مرکزی و انتهایی کانال است. همچنین مسیرهای ورودی کانال و مسیرهای خروجی کانال به صورتی طراحی شده که در کنار هم باشند و با برابر بودن فشار در آن‌ها، از تلفات جرمی جلوگیری گردد. این شکل از میدان جریان از یک بخش منبع گازهای واکنش‌دهنده تشکیل‌شده و یک قسمت شاخه مشترک برای تمامی کانال‌های مارپیچ در سمت ورودی و خروجی داشته و یک منبع تخلیه برای گازهایی که واکنش انجام نداده و آب‌های خروجی از خود دارد. مزیت دیگر این طرح نسبت به استفاده از طرحی که کانال‌های مارپیچ به‌صورت ساده باشد در این است که فشار بالای داخل کانال مارپیچ عبوری از سمت خروجی در کنار قسمت انتهای خود که فشار کمتری دارد قرار نگرفته و امکان تلف شدن واکنش‌دهنده‌ها و انتقال براساس گرادیان‌های بالای فشار از طریق لایه متخلخل از بین می‌رود. از معایب این طرح هم می‌توان به محل قرار گیری منیفولد ورودی و عرض آن اشاره کرد که نیازمند بهینه سازی جهت انتخاب مقدار مناسب دارد. برای مقایسه بهتر الگوی جدید بر اساس "شکل 2" برای میدان جریان با یک مدل موازی مطابق با "شکل 1" برای میدان جریان مقایسه شده است.

3- معادلات حاکم بر مسأله

معادلات حاکم بر پیل‌های سوختی شامل معادلات بقایی شامل بقای جرم، مومنتوم، انرژی و انتقال گونه‌ها به‌علاوه معادلات بیانگر واکنش‌های الکتروشیمیایی در اجزای داخلی آن است. شکل کلی و عمومی معادلات حاکم بر پیل سوختی به شکل زیر است.

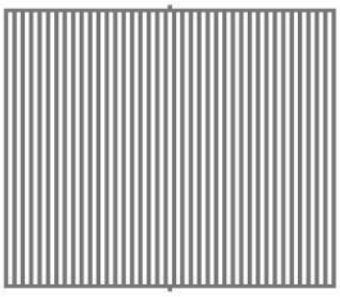

Fig. 1 Flow field with parallel channel

شکل 1 میدان جریان با کانال موازی

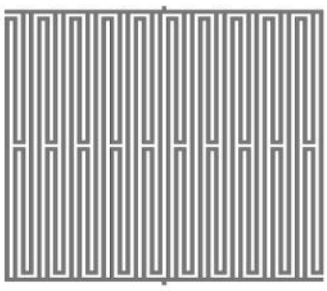

Fig. 2 The flow field is designed for fuel cell in shape of modified serpentine

شکل 2 میدان جریان طراحی‌شده برای پیل سوختی به شکل مارپیچ اصلاح‌شده

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\varphi) + \nabla\cdot(\rho\varphi\bar{V}) = \nabla\cdot\left(\Gamma_\varphi\nabla\varphi\right) + S_\varphi \quad (1)$$

فرضیات در نظر گرفته شده برای مدل‌سازی سه‌بعدی پیل سوختی به‌صورت مدل‌سازی پایای پیل، عدم وجود اثرات گرانش، در نظر گرفتن رژیم جریان آرام برای جریان سیال در کانال گازی، صرف‌نظر از تغییر فاز و چگالش بخارآب و شبیه‌سازی به‌صورت تک فازی است.

با توجه به فرضیات در نظر گرفته شده برای شبیه‌سازی زمانی در معادلات انتقال پیل سوختی از بین می‌رود متغیر φ در معادلات بقای جرم، گونه‌ها، مومنتوم و انرژی به‌صورت معادله (2) است که در آن X_k کسر جرمی اجزاء گازی است.

$$\varphi = \begin{cases} 1, & \text{پیوستگی} \\ V, & \text{مومنتوم} \\ T, & \text{انرژی} \\ X_k, & \text{گونه‌ها} \end{cases} \quad (2)$$

برای ترم پخشی Γ_φ نیز برای هر معادله مقادیر معادله (3) صادق است که μ ویسکوزیته دینامیکی مخلوط گازی، D_k ضریب پخش مؤثر است و $\tilde{k}$ ضریب هدایت گرمایی مؤثر است.

$$\Gamma_\varphi = \begin{cases} 0, & \text{پیوستگی} \\ \mu, & \text{مومنتوم} \\ \tilde{k}, & \text{انرژی} \\ D_k, & \text{گونه‌ها} \end{cases} \quad (3)$$

ترم چشمه یا چاه معادلات برای هر قسمت از پیل سوختی متفاوت است و در جدول 1 ارائه شده است.

عامل به وجود آورنده واکنش‌های الکتروشیمیایی در پیل سوختی، اختلاف پتانسیل بین فاز مربوط به بخش جامد و فاز پتانسیل غشاء پیل است. بنابراین معادله کلی پتانسیل پیل سوختی به شکل زیر است.

$$\nabla\cdot\left(\Gamma_\varphi\nabla\varphi\right) + S_\varphi = \begin{cases} \nabla\cdot(\sigma_{\mathrm{s}}\nabla\emptyset_{\mathrm{s}}) + R_{\mathrm{s}} = 0 & \text{فاز الکتریکی} \\ \nabla\cdot(\sigma_{\mathrm{m}}\nabla\emptyset_{\mathrm{m}}) + R_{\mathrm{m}} = 0 & \text{فاز پروتونی} \end{cases} \quad (4)$$

زیرنویس s و m در معادله (4) بیانگر معادله فاز جامد و غشاء پیل سوختی است که فاز پتانسیل الکتریکی جامد انتقال الکترون از میان اجزای جامد و هادی الکتریسیته پیل سوختی را نشان می‌دهد. پتانسیل پروتونی نیز به توضیح درباره انتقال پروتون‌ها از غشاء پیل سوختی می‌پردازد. σ_{m} هدایت پروتونی و σ_{s} هدایت الکتریکی را نشان داده و $\emptyset_{\mathrm{s}}$ پتانسیل فاز جامد و $\emptyset_{\mathrm{m}}$ پتانسیل غشاء پیل سوختی است. $R_{\mathrm{m-s}}$ نمایش‌دهنده جریان حجمی

انتقالی بین دو فاز الکتریکی و یونی (غشاء) است که به‌عنوان ترم چشمه و چاه در معادله وجود دارد. این ترم به علت انجام واکنش‌های الکتروشیمیایی در لایه کاتالیست پیل سوختی است و تنها در این لایه در دو سمت آند و کاتد پیل اضافه می‌شود و برای سایر بخش‌های پیل سوختی صفر می‌باشد. مقدار این ترم در دو سمت آند و کاتد برای فاز جامد و غشاء به‌صورت زیر است.

$$R_s = \begin{cases} -R_{\text{anode}} & \text{سمت آند} \\ +R_{\text{cathode}} & \text{سمت کاتد} \end{cases} \quad (5)$$

$$R_m = \begin{cases} +R_{\text{anode}} & \text{سمت آند} \\ -R_{\text{cathode}} & \text{سمت کاتد} \end{cases} \quad (6)$$

مقادیر R_{anode} و R_{cathode} طبق معادله باتلر- ولمر به‌دست می‌آیند. در این مدل‌سازی جهت گرفتن نتایج مناسب، معادله باتلر- ولمر در حالت کلی حل شده است.

$$R_{\text{anode}} = \zeta_{\text{an}} i_{0,\text{an}}^{\text{ref}} \left(\frac{[\text{H}_2]}{[\text{H}_2]_{\text{ref}}}\right)^{\gamma_{\text{an}}} \left(e^{\frac{\alpha_{\text{an}} F \eta_{\text{an}}}{RT}} - e^{\frac{-\alpha_{\text{an}} F \eta_{\text{an}}}{RT}}\right) \quad (7)$$

$$R_{\text{cathode}} = \zeta_c i_{0,\text{c}}^{\text{ref}} \left(\frac{[\text{O}_2]}{[\text{O}_2]_{\text{ref}}}\right)^{\gamma_{\text{c}}} \left(-e^{\frac{-\alpha_{\text{an}} F \eta_{\text{c}}}{RT}} + e^{\frac{-\alpha_{\text{c}} F \eta_{c}}{RT}}\right) \quad (8)$$

در معادله باتلر- ولمر $[\text{O}_2]$ و $[\text{H}_2]$ غلظت اکسیژن و هیدروژن در لایه کاتالیست سمت کاتد و آند پیل سوختی است که غلظت مرجع آن‌ها با $[\text{H}_2]_{\text{ref}}$ و $[\text{O}_2]_{\text{ref}}$ نمایش داده شده است. $i_{0,\text{an}}^{\text{ref}}$ و $i_{0,c}^{\text{ref}}$ چگالی‌های تبادلی جریان مرجع برحسب آمپر بر مترمربع به ترتیب برای آند و کاتد پیل سوختی است که معیاری برای آمادگی الکترودها جهت پیشرفت واکنش‌های الکتروشیمیایی است و مقدار آن برای آند از کاتد بسیار بزرگ‌تر است. α_{an} و α_{c} ضریب انتقال بار برای آند و کاتد پیل سوختی است که یک پارامتر تجربی محسوب می‌شوند. F ثابت فارادی است با مقدار ثابت 96485 کولمب بر مول است، Rثابت جهانی گازها، T دما، ζ_{an} سطح مخصوص کاتالیزور برای آند و ζ_{c} سطح مخصوص کاتالیزور برای کاتد است که در پیل‌های سوختی پلیمری برای کاتالیزور پلاتینیوم به کار می‌رود. اضافه پتانسیل آند و کاتد با η_{an} و η_{c} نمایش داده می‌شود و γ ضریب غلظت است.

4- مدل‌سازی عددی

جهت طراحی پیل سوختی، ابعاد انتخابی براساس اطلاعات جمع‌آوری شده از پیل‌های سوختی در مرجع [11] ساخته شده برای وسایل هوایی بدون سرنشین مطابق با جدول 3 در نظر گرفته شده است.

پیل سوختی طراحی شده در این تحقیق دارای مساحت کلی 6400 mm^2 می‌باشد و شامل صفحات دوقطبی با کانال‌های میدان جریان،

جدول 1 ترم‌های تولید چشمه و چاه در معادله (1) [9,10]

Table 1 Production terms in equation 1[9,10]

معادله	کانال جریان	لایه پخش گاز	لایه کاتالیست	غشاء مبادله کننده یون
بقای مومنتوم	$S_D = 0$	$S_D = -\frac{\mu}{K}\varepsilon\vec{V}$	$S_D = -\frac{\mu}{K}\varepsilon\vec{V}$	$S_D = -\frac{\mu}{K}\varepsilon\vec{V}$
بقای انرژی	$S_T = 0$	$S_T = 0$	$S_T = R_s\left(\eta + T\frac{\Delta S}{nF}\right) + \frac{I^2}{\sigma_s} + \frac{I^2}{\sigma_m}$	$S_T = \frac{I^2}{\sigma_m}$
بقای گونه‌ها	$S_k = 0$	$S_k = 0$	$S_k = -\nabla\cdot\left(\frac{n_d}{F}I\right) - \frac{S_k R_s}{nF}$	$S_k = -\nabla\cdot\left(\frac{n_d}{F}I\right)$

لایه پخش گاز، لایه کاتالیست برای دو سمت آند و کاتد بوده است و غشاء پیل سوختی نفیون 112 انتخاب شده است. طراحی طوری انجام شده که سطح فعال پیل سوختی در لایه کاتالیست جهت مقایسه بهتر بین الگوهای طراحی شده برابر باشند و سطح فعال در نظر گرفته برای پیل سوختی به میزان 6162 میلی‌متر مربع است. اطلاعات جزئی‌تر در خصوص سایر ابعاد در نظر گرفته شده برای پیل سوختی در جدول 2 آورده شده است.

جهت بررسی استقلال از شبکه پیل سوختی تعداد شبکه‌بندی در راستای عمود بر لایه پخش‌کننده گاز، لایه کاتالیست و غشاء پیل سوختی مورد مطالعه قرار گرفته است.. با توجه به "شکل 5" دیده می‌شود بیشترین میزان اختلاف برای چگالی جریان به میزان 1.5 درصد برای حالت (5-20-10) به ترتیب برای لایه پخش گاز-لایه کاتالیست و غشاء پیل سوختی نسبت به حالت پایه (2-3-3) می‌باشد. تعداد المان در نظر گرفته شده برای شبیه‌سازی (5-6-6) برای این سه لایه از پیل سوختی که واکنش‌های الکتروشیمیایی در آن‌ها رخ می‌دهد، بدون زیاد کردن هزینه می‌باشد و تعداد المان کل شبکه پیل سوختی 824808 ایجاد می‌گردد.

جهت حل عددی مسأله بعد از طراحی پیل سوختی، هندسه به شبکه‌های محاسباتی مانند "شکل 3" گسسته می‌شود.

درنهایت با اعمال شرایط مرزی مناسب به صورت روش تک ناحیه‌ای به پیل مطابق با معادلات (9) تا (11) و پارامترهای عملکردی پیل سوختی، خواص مواد و پارامترهای مربوط به معادلات الکتروشیمیایی پیل سوختی مطابق جدول 3، به حل معادلات به روش حجم محدود توسط نرم‌افزار فلوئنت پرداخته شده است.

شرط مرزی دبی جرمی در ورودی آند و کاتد پیل، اعمال می‌شود.

$$\dot{m}_{\text{air-in}} = \frac{S_{\text{O}_2} M_{\text{air}} I}{X_{\text{O}_2} 4F} \quad (9)$$

$$\dot{m}_{\text{H}_2\text{-in}} = \frac{S_{\text{H}_2} M_{\text{H}_2} I}{\text{X}_{\text{H}_2} 2F} \quad (10)$$

جدول 2 ابعاد هندسی پیل سوختی طراحی‌شده

Table 2 Geometric Dimensions of Designed Fuel Cell

پارامترهای ابعادی	مقدار	واحد	مرجع
طول	80	mm	[11]
عرض	80	mm	[11]
ارتفاع	3.66	mm	[2]
سطح‌فعال	6162	mm^2	[11]
عرض کانال	1	mm	[12]
عمق کانال	1	mm	[12]
شانه کانال	1	mm	[12]
ضخامت صفحه دوقطبی	1.6	mm	[13][2]
ضخامت لایه پخش گاز	0.19	mm	[14][2]
ضخامت لایه کاتالیست	0.015	mm	[14][2]
ضخامت غشاء	0.05	mm	[10][2]
عرض منیفولد کانال	1	mm	[15]

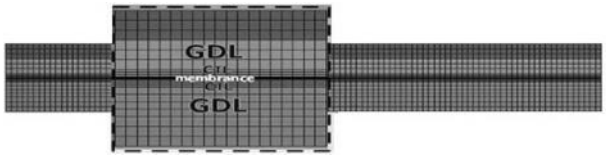

Fig. 3 Grid Model of fuel cell

شکل 3 مدل شبکه‌بندی شده پیل سوختی

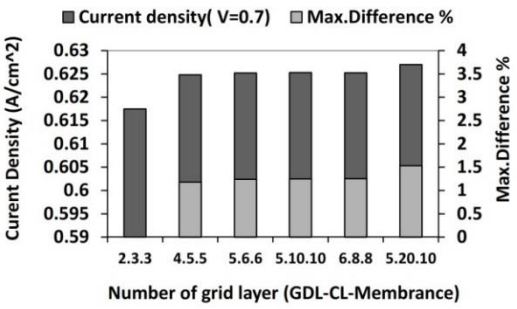

Fig. 4 Grid independence test for the designed fuel cell at the cell voltage of 0.7V

شکل 4 آزمون استقلال شبکه برای پیل سوختی طراحی شده در ولتاژ سلول 0.7 ولت

جدول 3 پارامترهای عملکردی در نظر گرفته‌شده برای پیل سوختی

Table 3 Functional parameters considered for fuel cell

پارامتر	مقدار	مشخصه	مرجع
پارامترهای عملکردی			
دمای کاری	333	K	
فشار کاری	2	atm	
رطوبت نسبی آند	100	%RH	
رطوبت نسبی کاتد	50	%RH	
استوکیومتری کاتد	1.5	S	
استوکیومتری آند	1.5	S	
پارامترهای انتقال			
ولتاژ مدار باز	1.06	V	[16]
غلظت مرجع	0.0008814	$Kmol/m^3$	[14][2]
چگالی جریان مبادله شده آند	7.17	A/m^3	[14][2]
چگالی جریان مبادله شده کاتد	7.17×10^{-5}	A/m^3	[14][2]
ضریب انتقال بار آند و کاتد	1	$\alpha_{anode/cathode}$	[14][2]
توان غلظت آند و کاتد	1	$\gamma_{anode/cathode}$	[14][2]
پخش گاز هیدروژن	6×10^{-5}	m^2/s	[17]
پخش گاز اکسیژن	3.5×10^{-5}	m^2/s	[17]
پخش آب به‌صورت بخار	6×10^{-5}	m^2/s	[17]
پخش سایر گازها	8×10^{-5}	m^2/s	[17]
خواص مواد			
تخلخل پخش گاز	0.4	ε	[18]
تخلخل لایه کاتالیست	0.4	ε	[18]
لایه پخش‌کننده گاز			
چگالی	490	kg/m^3	[19]
هدایت الکتریکی	5000	$1/\Omega m$	[19]
هدایت گرمایی	1.6	Watt/mK	[19]
لایه کاتالیست			
چگالی	2010	kg/m^3	[19]
هدایت الکتریکی	1000	$1/\Omega m$	[19]
نسبت سطح به حجم کاتالیزور	1.127×10^{-7}	m^2-Pt/m^3	[14][2]
غشاء			
وزن معادل غشاء	1100	kg/kmol	[2]
چگالی غشاء	1980	kg/m^3	[2]
هدایت گرمایی	0.16	Watt/mK	[2]
صفحات دوقطبی			
چگالی	1780	kg/m^3	[20]
هدایت الکتریکی	68000	$1/\Omega m$	[20]
هدایت گرمایی	95	Watt/mK	[20]

در خروجی شرط مرزی به صورت توسعه یافته و با شار صفر در نظر گرفته شده است.

$$\frac{\partial \vec{V}}{\partial n}=0 \quad \frac{\partial T}{\partial n}=0 \quad \frac{\partial \phi_e}{\partial n}=0 \quad \frac{\partial X_i}{\partial n}=0 \tag{11}$$

5- نتایج و بحث

5-1- اعتبارسنجی

جهت اعتبارسنجی نتایج، مدل‌سازی پیل سوختی با کانال تک مارپیچ انجام شده است و منحنی قطبیت برای پیل سوختی در "شکل 5" ارائه شده است. ابعاد پیل سوختی و شرایط کاری براساس تحقیق انجام شده توسط لیمجراجاروس و همکاران [2] انتخاب شده است. منحنی قطبیت به‌دست آمده از شبیه‌سازی همخوانی خوبی با نتایج تحقیق در چگالی‌های پایین جریان دارد؛ اما اختلاف نتایج در چگالی‌های بالای جریان ایجاد شده است. علت اصلی این اختلاف افت غلظتی اتفاق افتاده در پیل سوختی بوده که در چگالی‌های بالای جریان بر منحنی قطبیت حاکم می‌باشد. با تشکیل آب بیشتر در چگالی‌های بالای جریان، عملکرد پیل سوختی مختل می‌شود و بر نفوذپذیری گازهای واکنش‌گر اثر گذاشته و با کاهش دسترسی گازهای واکنش‌گر به سطح فعال لایه کاتالیست پیل سوختی، در منحنی قطبیت پیل سوختی اثر خود را به‌صورت کم شدن چگالی جریان نمایش می‌دهد. در نظر گرفتن تغییر فاز بخارآب در پیل سوختی و تشکیل آب مستلزم در نظر گرفتن معادلات مربوطه و پیچیدگی‌های زیاد است [21,22,23]، از این‌رو در تحقیق حاضر مدل‌سازی با فرض در نظر گرفتن تنها فاز بخار برای پیل سوختی انجام‌گرفته است و نتایج به‌دست آمده با وجود مقادیر افت غلظتی کمتر در چگالی بالای جریان نسبت به حالت دوفازی حاصل شده است [24,25,26,27].

5-2- عملکرد پیل سوختی

کارآمدی میدان جریان طراحی‌شده برای پیل سوختی در مقایسه با میدان جریان متداول موازی مشخص است. توزیع کسر جرمی و نحوه توزیع اکسیژن ورودی در پیل در مرز لایه کاتالیست و پخش گاز در سمت کاتد پیل سوختی آورده شده است. همان‌طور که در "شکل‌های 7 و 6" مشاهده می‌شود، یکنواختی توزیع اکسیژن در پیل سوختی در میدان جریان طراحی شده در مقایسه با کانال موازی بهبود زیادی پیدا کرده است که عملکرد بالاتر پیل سوختی را ایجاد می‌کند. توزیع گازهای واکنش‌گر از ورودی کانال در سمت کاتد تا خروجی آن روند کاهشی دارد؛ زیرا واکنش‌دهنده‌های پیل سوختی با

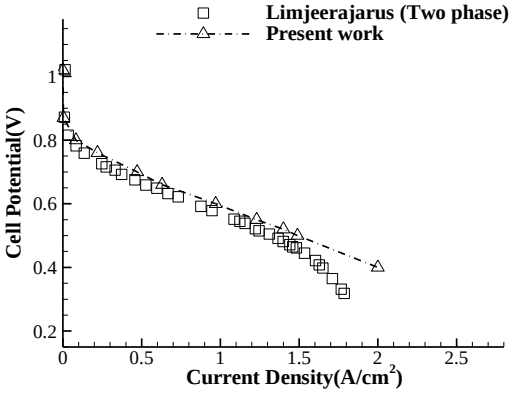

Fig. 5 Validation of fuel cell polarization curve based on reference[2]

شکل 5 اعتبارسنجی منحنی قطبیت پیل سوختی براساس مرجع [2]

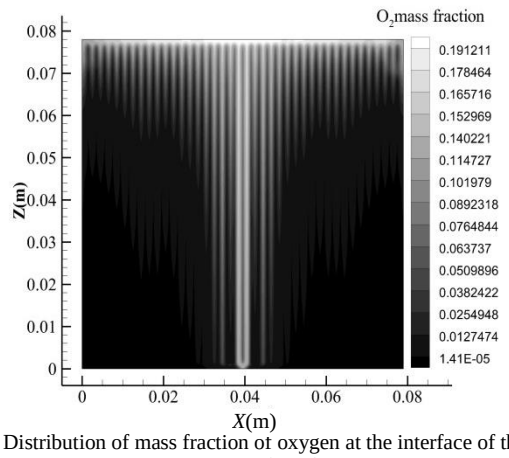

Fig. 6 Distribution of mass fraction of oxygen at the interface of the gas diffusion layer and the catalyst side of the fuel cell. voltage 0.5 volts, parallel model

شکل 6 توزیع کسر جرمی اکسیژن در فصل مشترک لایه پخش گاز و کاتالیست سمت کاتد پیل سوختی ولتاژ کاری 0.5 ولت، مدل موازی

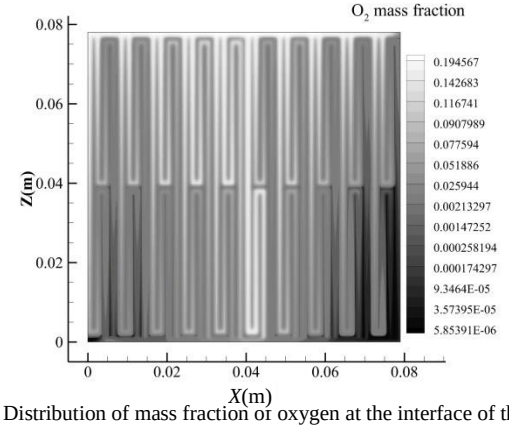

Fig. 7 Distribution of mass fraction of oxygen at the interface of the gas diffusion layer and the catalyst side of the fuel cell. voltage 0.5 volts, designed model (modify serpentine)

شکل 7 توزیع کسر جرمی اکسیژن در فصل مشترک لایه پخش گاز و کاتالیست سمت کاتد پیل سوختی ولتاژ کاری 0.5 ولت، مدل طراحی شده (مارپیچ اصلاح شده)

مصرف خود در واکنش‌های الکتروشیمیایی پیل سوختی شرکت می‌کنند. ازاین‌رو غلظت اکسیژن در قسمت‌های ورودی پیل سوختی بالاتر است.

در سمت آند، مخلوط گاز ورودی به پیل شامل دو جزء هیدروژن و بخار آب است. کسر جرمی بخار آب در سمت آند در خطوط هم‌تراز نمایش داده شده مقادیری مخالف هیدروژن دارد و هرکجا هیدروژن زیاد باشد بخار آب کم است. در مورد کاتد سه جز مخلوط گازی شامل اکسیژن، بخار آب و نیتروژن است و در مورد کسر جرمی بخار آب کاتد قضاوت دقیقی نمی‌توان کرد. از این‌رو نحوه توزیع بخار آب در سمت کاتد پیل در "شکل‌های 8 و 9" ارائه شده است. با مشاهده توزیع کسر جرمی بخارآب دیده می‌شود که مقادیر بخار آب در جایی که کسر جرمی اکسیژن کم است، بالا می‌باشد. از ابتدای کانال تا انتهای آن به‌دلیل مصرف سوخت و تولید آب، کسر جرمی آب روندی افزایشی دارد. ولی نکته بسیار مهم این است که در مناطقی از پیل سوختی که هم کسر جرمی اکسیژن و هم مقادیر کسر جرمی آب پایین است مناطقی راکدی است که واکنش‌های الکتروشیمیایی در آن اتفاق نمی‌افتد. یکی از نکات مهم در طراحی پیل ایجاد نشدن این مناطق است که در میدان جریان موازی این مناطق وجود دارد.

محتوای آب غشا یکی از خواص فیزیکی مهم غشاء محسوب می‌شود. از

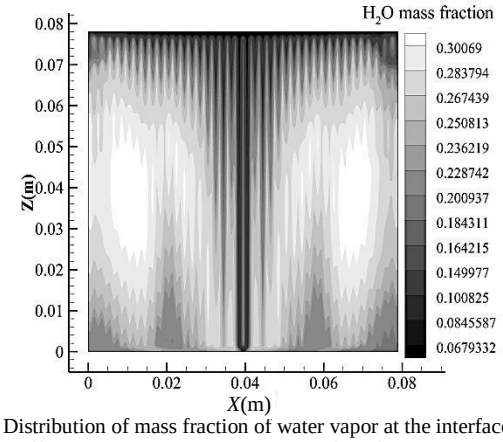

Fig. 8 Distribution of mass fraction of water vapor at the interface of the gas diffusion layer and the catalyst side of the fuel cell. voltage 0.5 volts, parallel model

شکل 8 توزیع کسر جرمی بخارآب در فصل مشترک لایه پخش گاز و کاتالیست سمت کاتد پیل سوختی ولتاژ کاری 0.5 ولت، مدل موازی

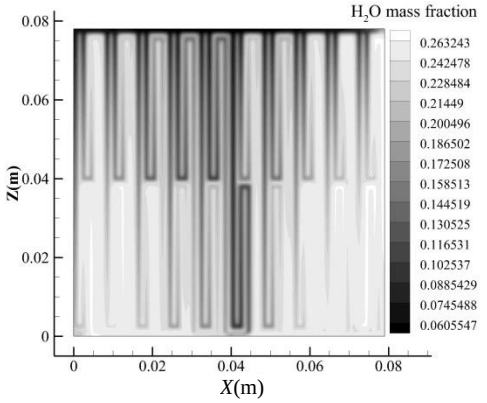

Fig. 9 Distribution of mass fraction of water vapor at the interface of the gas diffusion layer and the catalyst side of the fuel cell. voltage 0.5 volts, designed model (modify serpentine)

شکل 9 توزیع کسر جرمی بخارآب در فصل مشترک لایه پخش گاز و کاتالیست سمت کاتد پیل سوختی ولتاژ کاری 0.5 ولت، مدل طراحی‌شده (مارپیچ اصلاح‌شده)

آنجا که توزیع یکنواخت محتوای آب در غشای پیل به افزایش کارکرد و عمر پیل سوختی کمک زیادی می‌کند [28]، به بررسی آن در مرز لایه کاتالیست و غشاء سمت کاتد و آند پیل سوختی پرداخته شده است. محققان [29] به دنبال توسعه طرحی از میدان جریان بوده‌اند که محتوای آب یکنواختی را در پیل سوختی ایجاد نماید. مطابق "شکل‌های 11 و 10" با اصلاح طراحی شکل کانال از حالت موازی به حالت مارپیچ اصلاح‌شده، یکنواختی محتوای آب غشاء بهبود پیدا کرده است و به‌جز قسمت‌های مرکزی غشا، در بقیه قسمت‌ها توزیع مناسبی مشاهده می‌شود. نکته حائز اهمیت در خصوص محتوای آب غشا در سمت کاتد، ایجاد مشکل سرریز شدن باوجود مقادیر آب بالاتر از 14-15 [10] است که برای میدان جریان موازی به‌دلیل وجود آب زیاد در غشاء آن نسبت به میدان جریان طراحی‌شده جدید، رخ داده است. در قسمت‌های ورودی کانال محتوای آب بسیار کمتر از سایر بخش‌ها می‌باشد که به دلیل خروج آب از کانال‌های میدان جریان در این نواحی از پیل می‌باشد.

از آن‌جا که به دلیل کشش الکترو- اسمزیک آب از سمت آند به کاتد و همچنین تولید آب در سمت کاتد، مقادیر آب غشا در سمت کاتد بیشتر از آند است، به بررسی این مشخصه در سمت آند پیل نیز پرداخته شده است. یکنواختی بیشتر محتوای آب غشاء با بررسی آند پیل سوختی با توجه به

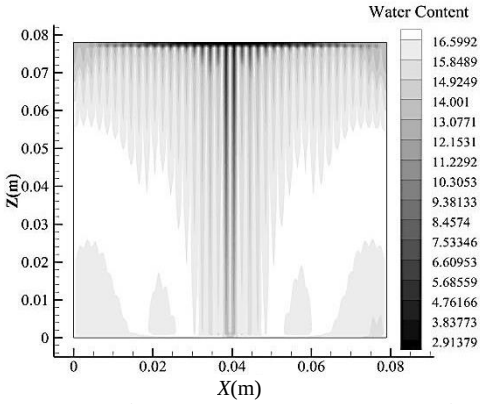

Fig. 10 Distribution of membrane water content at the interface between the catalyst bed and the chatode side membrane of the fuel cell. voltage 0.5 volts, parallel model

شکل 10 توزیع محتوای آب غشا در فصل مشترک لایه کاتالیست و غشاء سمت کاتد پیل سوختی ولتاژ کاری 0.5 ولت، مدل موازی

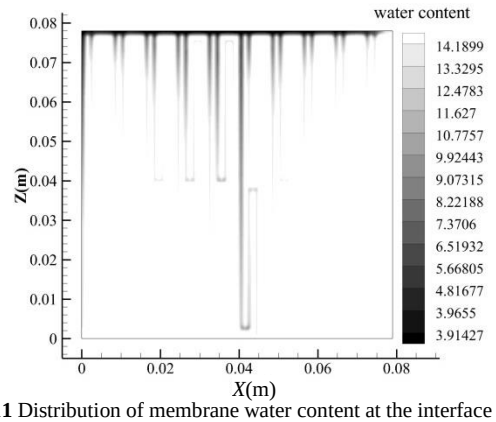

Fig. 11 Distribution of membrane water content at the interface between the catalyst bed and chatode side membrane of the fuel cell. voltage 0.5 volts, designed model (modify serpentine)

شکل 11 توزیع محتوای آب غشا در فصل مشترک لایه کاتالیست و غشاء سمت کاتد پیل سوختی ولتاژ کاری0.5 ولت، مدل طراحی‌شده (مارپیچ اصلاح شده)

"شکل‌های 12 و 13" در مدل جدید طراحی شده برای میدان جریان به‌صورت واضح‌تری مشخص می‌باشد. با مشاهده توزیع محتوای آب برای مدل موازی مناطقی از پیل سوختی با تجمع آب زیاد مشاهده می‌شود که علت آن کمبود و عدم نبودن واکنش‌دهنده و سوخت در این نواحی از پیل سوختی است که در صورت وجود با ایجاد با آزاد کردن الکترون و تشکیل دادن پروتون باعث انتقال آب از سمت آند به کاتد می‌شده و این تجمع زیاد محتوای آب را ایجاد نمی‌کرد.

بررسی موضوع عدم رسیدن سوخت مناسب به نواحی از پیل سوختی که محتوای آب غشاء بالا را ایجاد نموده است، با مطالعه توزیع کسر جرمی هیدروژن در سمت آند پیل سوختی مشخص می‌شود. با مشاهده توزیع کسر جرمی هیدروژن در "شکل‌های 15 و 14" برای مدل موازی و مدل طراحی شده پیل سوختی، ادعای ذکر شده در مورد کم بودن مقادیر سوخت در محل‌هایی با محتوای آب غشاء بالا ثابت می‌شود و همین‌طور توزیع یکنواخت هیدروژن برای مدل جدید میدان جریان طراحی شده نسبت به آرایش موازی دیده می‌شود.

توزیع چگالی جریان تولید شده پیل سوختی در فصل مشترک لایه کاتالیست و غشاء در ولتاژ کاری 0.5 ولت به‌علت انجام واکنش الکتروشیمیایی اصلی در سمت کاتد پیل، برای این قسمت از پیل سوختی استخراج شده است. براساس "شکل‌های 16 و 17" در برخی از نواحی مدل موازی چگالی جریان‌های پایین مشاهده شده و در برخی مقادیر بالای چگالی جریان مشهود است. این توزیع بسیار نامتوازن چگالی جریان را در ارتباط با نحوه توزیع اکسیژن در سطح لایه کاتالیست می‌توان دنبال کرد در حالی‌که

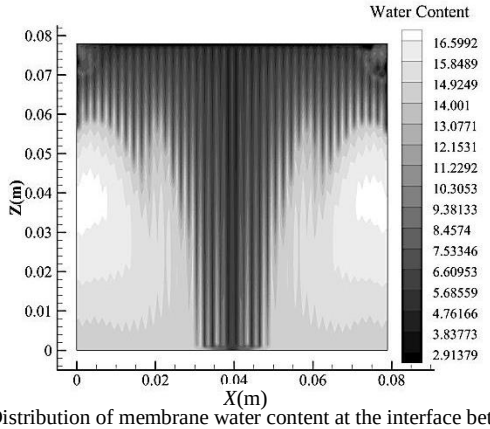

Fig.12 Distribution of membrane water content at the interface between the catalyst bed and the anode side membrane of the fuel cell. voltage 0.5 volts, parallel model

شکل 12 توزیع محتوای آب غشا در فصل مشترک لایه کاتالیست و غشاء سمت آند پیل سوختی ولتاژ کاری 0.5 ولت، مدل موازی

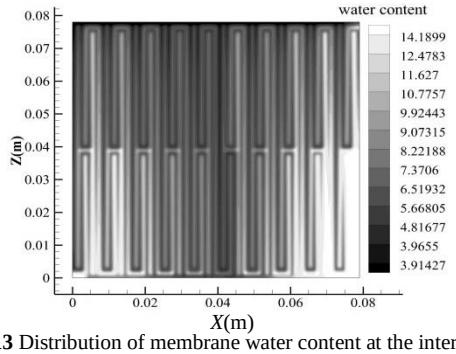

Fig. 13 Distribution of membrane water content at the interface between the catalyst bed and the anode side membrane of the fuel cell. voltage 0.5 volts, designed model (modify serpentine)

شکل 13 توزیع محتوای آب غشا در فصل مشترک لایه کاتالیست و غشاء سمت آند پیل سوختی ولتاژ کاری 0.5 ولت، مدل طراحی‌شده (مارپیچ اصلاح شده)

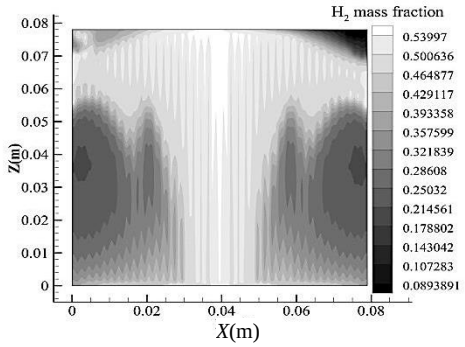

Fig. 14 Distribution of hydrogen mass fraction at the interface of the gas diffusion layer and the catalyst anode side of the fuel cell. voltage 0.5 volts, parallel model

شکل 14 توزیع کسر جرمی هیدروژن در فصل مشترک لایه پخش گاز و کاتالیست در سمت آند پیل سوختی، ولتاژ کاری 0.5 ولت، مدل موازی

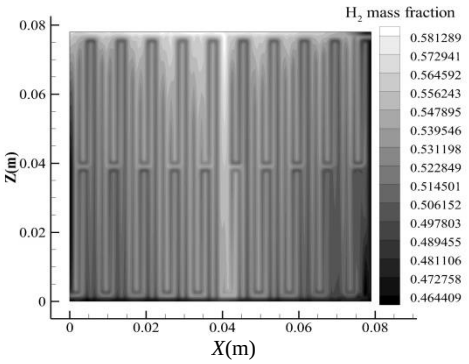

Fig. 15 Distribution of hydrogen mass fraction at the interface of the gas diffusion layer and the catalyst anode side of the fuel cell. voltage 0.5 volts, designed model (modify serpentine)

شکل 15 توزیع کسر جرمی هیدروژن در فصل مشترک لایه پخش گاز و کاتالیست در سمت آند پیل سوختی، ولتاژ کاری 0.5 ولت، مدل طراحی‌شده (مارپیچ اصلاح‌شده)

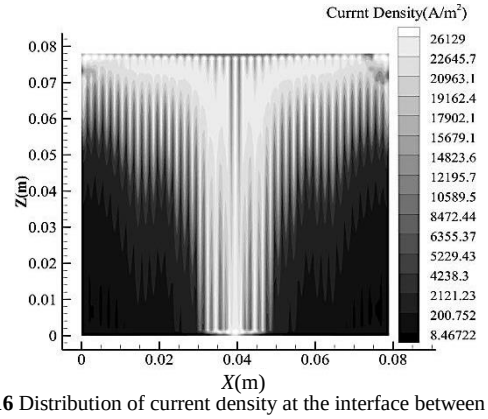

Fig. 16 Distribution of current density at the interface between the catalyst bed and the chatode side membrane of the fuel cell. voltage 0.5 volts, parallel model

شکل 16 توزیع چگالی جریان در فصل مشترک لایه کاتالیست و غشاء پیل سوختی در سمت کاتد پیل سوختی، ولتاژ 0.5 ولت، مدل موازی

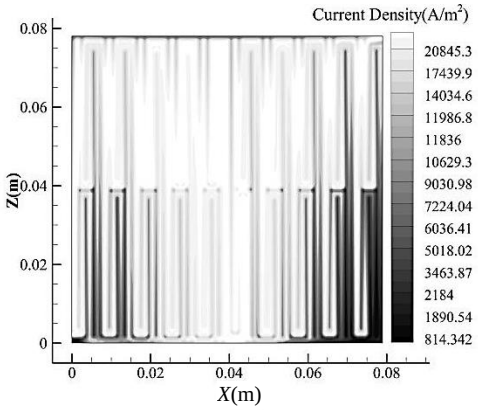

Fig. 17 Distribution of current density at the interface of the gas diffusion layer and the catalyst cathode side of the fuel cell.voltage 0.5 volts, designed model (modify serpentine)

شکل 17 توزیع چگالی جریان در فصل مشترک لایه کاتالیست و غشاء پیل سوختی در سمت کاتد پیل سوختی، ولتاژ 0.5 ولت، مدل طراحی‌شده (مارپیچ اصلاح‌شده)

در مدل جدید طراحی شده برای میدان جریان به شکل مارپیچ اصلاح شده، یکنواختی چگالی جریان در تمامی نواحی پیل سوختی مناسب است.

یکنواختی توزیع دما در پیل سوختی نیز یکی دیگر از موارد مهم می‌باشد که باید مورد بررسی قرار گیرد. با توجه به "شکل 18 و 19" توزیع دمای یکنواخت در پیل سوختی به دلیل تولید جریان یکنواخت در مدل جدید طراحی شده حاصل شده است. تنش‌های حرارتی که باعث کاهش عمر پیل سوختی می‌گردد یکی از عوامل مهم در طراحی به‌حساب می‌رود؛ از این‌رو مدل موازی کارایی کمتری دارد و طراحی جدید به شکل مارپیچ اصلاح شده از خرابی اجزای گران‌قیمت پیل سوختی جلوگیری کرده و افزایش عمر آن را نتیجه می‌دهد. توزیع نایکنواخت دما در پیل همچنین می‌تواند به توزیع نایکنواخت چگالی جریان تأثیر بگذارد؛ زیرا در نقاطی که دما بالا است نرخ واکنش‌های شیمیایی پیل افزایش پیدا می‌کند و بالعکس.

مشخصه عملکردی یک پیل سوختی را با نمودار قطبیت نمایش می‌دهند. این نمودار رایج‌ترین روش برای توصیف عملکرد پیل‌های سوختی براساس شرایط عملکردی مختلف مانند دما، رطوبت، بار اعمالی، دبی جریان ورودی سوخت و ... می‌باشد. "شکل 20" نمودار قطبیت چگالی جریان‌های مختلف براساس ولتاژ پیل را نمایش می‌دهد. این نمودار از تفاضل افت‌های پتانسیل موجود در پیل سوختی از ولتاژ برگشت‌پذیر آن به‌دست می‌آید. منحنی چگالی توان نیز مطابق با "شکل 21" یک منحنی مهم است که از حاصل‌ضرب مقادیر چگالی جریان در ولتاژ پیل سوختی حاصل می‌شود.

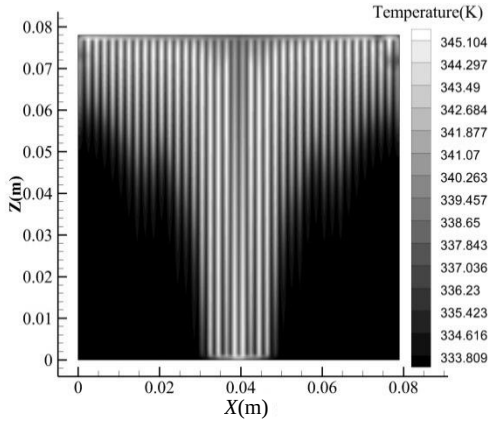

Fig. 18 Distribution of fuel cell temperature at the interface of the catalyst layer and memberance at cathode side of the fuel cell. voltage 0.5 volts, parallel model

شکل 18 توزیع دمای پیل سوختی در فصل مشترک لایه کاتالیست و غشاء در سمت کاتد پیل سوختی، ولتاژ کاری 0.5 ولت، مدل موازی

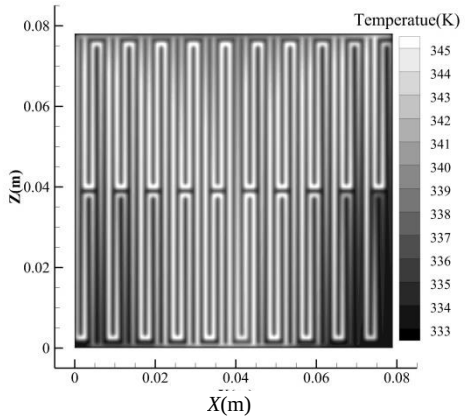

Fig. 19 Distribution of fuel cell temperature at the interface of the catalyst layer and memberance at cathode side of the fuel cell.voltage 0.5 volts, designed model (modify serpentine)

شکل 19 توزیع دمای پیل سوختی در فصل مشترک لایه کاتالیست و غشاء در سمت کاتد پیل سوختی، ولتاژ کاری0.5 ولت، مدل طراحی شده (مارپیچ اصلاح شده)

توزیع یکنواخت واکنش‌دهنده‌ها در مدل جدید طراحی شده برای میدان جریان پیل سوختی منجر به ایجاد چگالی جریان یکنواخت، دمای یکنواخت، محتوای آب یکنواخت و درنهایت عملکرد بهتر و مناسب‌تر شده است. با مشاهده منحنی قطبیت برای دو مدل موازی و طراحی شده در "شکل 20 و 21" دیده می‌شود که چگالی جریان محدود به خاطر تمام شدن و عدم وجود سوخت کافی برای مدل موازی به بیشترین مقدار 11400 آمپر بر مترمربع می‌رسد درحالی‌که با طراحی مناسب مدل جدید به‌علت سوخت‌رسانی یکنواخت‌تر چگالی جریان محدود به 19200 آمپر بر مترمربع رسیده است. همچنین بیشترین چگالی توان از مقدار 4830 در مدل موازی به 8250 وات بر مترمربع در مدل جدید (مارپیچ اصلاح شده) افزایش پیدا کرده است. این افزایش 70 درصدی، اهمیت میدان جریان طراحی شده و عملکرد مناسب آن را نشان می‌دهد. همچنین با افزایش نسبت استوکیومتری کاتد از مقدار 1.5 به 2 و 3، با ایجاد شدن شرایط ایده‌آل برای جریان اکسیژن پیل روی صفحات توزیع جریان در مدل جدید، بهبود عملکرد پیل در "شکل‌های 20 و 21" قابل مشاهده است.

3-5- به‌کارگیری پیل سوختی طراحی‌شده جهت تأمین توان وسیله هوایی

چگالی توان بالا یکی بهترین ویژگی‌های یک منبع توان جهت کاربرد در

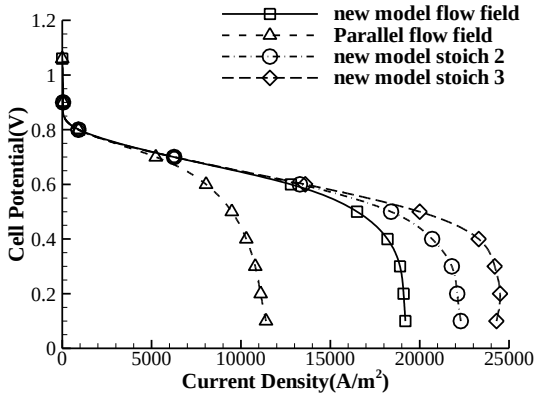

Fig. 20 Comparation of polarization curve between parallel model and designed model (modify serpentine)

شکل 20 مقایسه منحنی قطبیت بین دو مدل موازی و مدل طراحی‌شده (مارپیچ اصلاح‌شده)

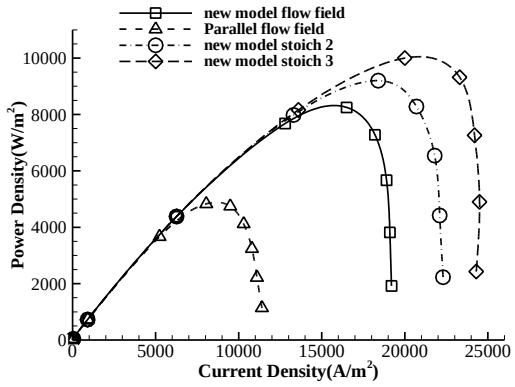

Fig. 21 Comparation of power density curve between parallel model and designed model (modify serpentine)

شکل 21 مقایسه منحنی چگالی توان بین دو مدل موازی و مدل طراحی‌شده (مارپیچ اصلاح شده)

مصارف گوناگون است. ازاین‌رو با توجه به رسیدن به چگالی توان بالاتر در مدل جدید ارائه شده برای پیل سوختی، تأمین توان سیستم پیشرانش برای یک وسیله هوایی بدون سرنشین با استفاده از پیل سوختی مورد بررسی قرار گرفته شده است.

رسیدن به ذخیره انرژی بالا برای مداومت پروازی، ظرفیت توان بالا جهت تأمین توان بالا موقع برخاست و ارتفاع گرفتن وسیله و وزن پایین با استفاده از یک سیستم تأمین توان مانند پیل سوختی یا باتری قادر به دسترسی نبوده و با استفاده از ترکیب این دو سیستم می‌توان به این سه مهم دسترسی بهتری داشت. از پیل سوختی در مرحله حرکت مستقیم وسیله در فاز کروز جهت تأمین توان و برای افزایش مداومت پروازی استفاده شده و در مرحله بلند شدن و ارتفاع گرفتن از باتری جهت تأمین توان استفاده می‌شود. از پیل سوختی برای شارژ مجدد باتری در مرحله حرکت مستقیم و کروز استفاده می‌شود.

با توجه به نحوه پرواز یک پرنده بدون سرنشین براساس مرجع [30] در قسمت‌های مختلف حرکت خود مطابق با جدول 4 به بررسی استفاده از پیل سوختی در آن پرداخته شده است.

جهت تأمین فاز گشت زنی مستقیم (کروز) وسیله هوایی به محاسبات تعداد سل پیل سوختی و وزن آن‌ها برای ایجاد و تشکیل توده پیل سوختی پرداخته می‌شود. حجم بخش‌های مختلف پیل سوختی برای مدل طراحی شده پیل سوختی که توسط نرم افزار از مدل طراحی شده گرفته شده است به همراه چگالی آن که از مراجع مشخص شده آورده شده است، جهت محاسبه وزن در جدول 5 ارائه شده است. وزن کلی با دو برابر کردن وزن تمامی اجزاء به جز غشاء، با توجه به وجود تمامی اجزاء در دو سمت آند و کاتد پیل به اضافه وزن غشاء پیل حاصل شده است.

جدول 4 پارامترهای عملکردی در نظر گرفته شده برای پیل سوختی[30]

Table 4 Functional parameters considered for fuel cell[30]

وضعیت پروازی	توان و زمان موردنیاز
انتظار برای بلند شدن (قبل از بلند شدن)	2 min −12 Watt
برخاستن	30 sec − 800 Watt
صعود به ارتفاع بالا	2 min − 350 Watt
گشت زدن (قاز کروز)	2 h − 194 Watt
فرود آمدن	2 min −12 Watt

جدول 5 مشخصات اجزای مختلف پیل سوختی طراحی‌شده و وزن آن

Table 5 Specifications of different fuel cell components and weighed in designed model

اجزای پیل	حجم (mm^3)	جنس	چگالی (kg/m^3)	وزن (kg)
صفحه دوقطبی [20]	7060	گرافیت	1780	0.02513
لایه پخش گاز [19]	170.78	پارچه یا کاغذ کربنی	490	0.001147
لایه کاتالیست [19]	92.43	ذرات پلاتینوم و کربن	2010	0.00037
غشاء [2]	308.1	نفیون	1980	0.00061
صفحه جمع کننده [20]	6400	آلومینیوم	2700	0.034
صفحات عایق [31]	6400	تفلون	2200	0.028
			وزن کل:	0.08925

اکنون با داشتن وزن پیل سوختی و سطح فعال آن، از منحنی چگالی توان به‌دست آورده شده برای میدان جریان جدید طراحی شده (مارپیچ اصلاح شده) در "شکل 21" برای پیل سوختی، قادر به یافتن توان ویژه و همچنین تعداد سل‌ها برای ساخت توده پیل سوختی جهت تأمین توان فاز حرکت در مسیر مستقیم یا (کروز) پیل سوختی مقدور است. لازم به تذکر است از آنجا که راندمان پیل سوختی طبق رابطه (12) به ولتاژ مرتبط است، بنابراین معمولاً پیل‌های سوختی در نقطه ماکزیمم چگالی توان ساخته نشده و در ولتاژ کاری حدود 0.7 ولت ساخته می‌شوند [10].

$$\eta = \frac{V}{1.482\, S_{\text{fuel}}} \tag{12}$$

در رابطه (12)، S نسبت استوکیومتری است که در این‌جا منظور استوکیومتری هیدروژن است. محاسبات برای دو نقطه طراحی از منحنی چگالی توان پیل سوختی مدل طراحی‌شده (مارپیچ اصلاح‌شده) در ولتاژهای کاری 0.6 و 0.7 ولت مطابق با "شکل 22" جهت ایجاد راندمان بالا انجام گرفته شده است. همچنین جهت تأمین توان‌های بالا، تعداد سل‌های لازم برای ساخت توده پیل سوختی با توان 2.5 کیلووات نیز محاسبه شده است.

با انتخاب نقاط طراحی طبق "شکل 23" و دانستن سطح فعال پیل سوختی به میزان 6162 میلی‌متر مربع و همچنین میزان وزن آن در جدول 5، چگالی توان پیل سوختی به‌صورت جدول 6 محاسبه شده است.

توان مخصوص به‌دست آمده از این وسیله تبدیل مستقیم انرژی در نقطه طراحی 1 به میزان 530.07 وات بر کیلوگرم است که مقدار مناسبی بوده و در مقایسه با باتری‌های توان بالا که توان مخصوصی در حدود 250 وات بر کیلوگرم دارد، تقریباً دو برابر می‌باشد؛ از این‌رو با استفاده از چندین مجموعه از سل‌های پیل سوختی یک توده پیل سوختی جهت ایجاد توان سیستم پیشران برای وسیله هوایی بدون سرنشین در نظر گفته می‌شود از این‌رو تعداد سل‌های لازم جهت تأمین توان فاز گردش مستقیم وسیله هوایی و همچنین بررسی تعداد سل‌های لازم جهت دسترسی به توان‌های بالاتر مورد

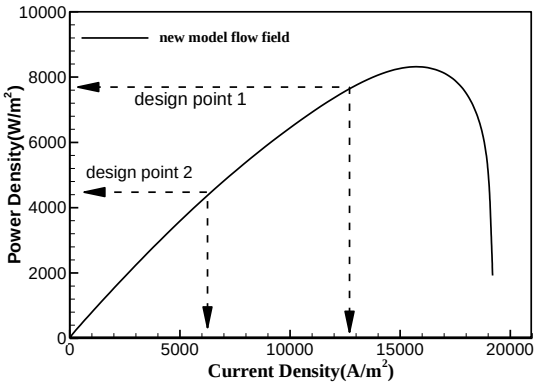

Fig. 22 The design point of the fuel cell intended for use with aerial application

شکل 22 نقاط طراحی در نظر گرفته شده جهت به‌کارگیری پیل سوختی با کاربرد هوایی

جدول6 توان مخصوص برای نقاط طراحی در نظر گرفته شده در مدل طراحی شده برای پیل سوختی

Table 6 Special powers for design points are considered inr a model designed for fuel cell

نقطه طراحی	توان مخصوص W/kg
نقطه طراحی 1	530.07
نقطه طراحی 2	302.15

جدول 7 محاسبه تعداد سل لازم جهت تأمین توان خروجی لازم برای سیستم پیشرانش وسیله هوایی برای دو حالت توان خروجی 200 وات و 2500 وات

Table 7 Calculation number of cell to provide the power of the air propulsion vehicle for two output power modes of 200 watts and a power output of 2500 watts

نقطه طراحی	تعداد سل 200 وات	وزن توده پیل (کیلوگرم)	توان مخصوص (وات بر کیلوگرم)	تعداد سل 2.5 کیلووات	وزن توده پیل (کیلوگرم)	توان مخصوص (وات بر کیلوگرم)
نقطه 1	5	0.44	454	53	4.7	531
نقطه 2	8	0.71	281	93	8.30	301.2

ارزیابی قرار گرفته شده است.

مطابق جدول 7، تعداد سل برای ایجاد توان 200 وات و 25000 وات در نقطه طراحی اول به ترتیب 5 و 53 سل است و برای نقطه طراحی دوم که چگالی توان پایین‌تری دارد با تعداد سل‌های بیشتری می‌توان به توان موردنظر رسید؛ ازاین‌رو انتخاب نقطه طراحی برای ساخت پیل سوختی در اختیار سازنده پیل با توجه به کاربرد موردنظر است. در کاربردهایی مانند وسایل بدون سرنشین که اندازه مطرح است از نقطه طراحی 1 استفاده می‌شود ولی در صورت عدم محدودیت ابعادی و نیاز به راندمان بالاتر، نقطه طراحی 2 مناسب تر می‌باشد.

6- نتیجه‌گیری

یک عامل اساسی که باعث کاهش عمر پیل‌های سوختی غشاء پلیمری می‌گردد، توزیع غیریکنواخت گازهای واکنش‌گر در سطح لایه کاتالیست پیل سوختی است. با توزیع غیریکنواخت گازهای واکنش‌گر، واکنش‌های الکتروشیمیایی حاصل از پیل سوختی به‌صورت غیریکنواخت رخ داده و موجب افزایش تنش‌های حرارتی و توزیع نامناسب چگالی جریان می‌گردد. در این تحقیق ضمن بررسی مدل متداول موازی در میدان جریان پیل‌های سوختی به طراحی مدلی جدید برای میدان جریان پیل سوختی پلیمری به شکل مارپیچ اصلاح شده پرداخته شده است. با ایجاد طراحی جدید برای میدان جریان، دسترسی به توزیع یکنواخت‌تر گاز اکسیژن در سطح لایه کاتالیست نسبت به مدل موازی به‌صورت قابل ملاحظه‌ای بهبود پیدا کرده است. مشکل تجمع محتوای آب غشاء در سمت آند پیل سوختی که به خاطر عدم رسیدن مناسب گازهای واکنش‌دهنده ایجاد می‌گردد در مدل موازی مشاهده شده که با اصلاح هندسه میدان جریان این مشکل برطرف شده است. ایجاد یکنواختی توزیع چگالی جریان در مدل جدید طراحی شده برای میدان جریان با توجه به مقادیر مینیمم 800 آمپر بر مترمربع در مقابل مقدار 8 آمپر بر متر مربع در مدل موازی به‌صورت مناسبی بهبود پیدا کرده است. در منحنی قطبیت پیل سوختی که عملکرد پیل را مشخص می‌کند، چگالی جریان محدود پیل سوختی به میزان 60 درصد در مدل مارپیچ اصلاح شده نسبت به موازی افزایش پیدا کرده است و همچنین بیشترین چگالی توان خروجی از پیل سوختی نیز در حدود 1.5 برابر افزایش پیدا کرده است و مقدار آن به میزان 8250 وات بر مترمربع رسیده است که مقدار مناسبی برای پیل سوختی می‌باشد. با توجه به توان خروجی مناسب به‌دست‌آمده از پیل سوختی، استفاده از آن در یک وسیله هوایی جهت تأمین توان موردنیاز در فاز حرکت مستقیم‌الخط برای افزایش مداومت پروازی وسیله مورد بررسی قرار گرفته شده و با به دست آوردن وزن پیل با مدل جدید طراحی‌شده، توان مخصوص 530 وات بر کیلوگرم حاصل شده است که افزایش مداومت پروازی

را نتیجه می‌دهد.

7- فهرست علایم

D	ضریب پخش (m^2/s)
F	ثابت فارادی (C/mol)
$[H_2]$	غلظت هیدروژن ($kmol/m^3$)
i	چگالی تبادل جریان (A/m^2)
$\tilde{k}$	ضریب هدایت گرمایی (W/m.K)
K	نفوذپذیری (m^2)
m	دبی جرمی (kg/sec)
n	ضریب کشش الکترو- اسمزی ($mol/m^2.s$)
$[O_2]$	غلظت اکسیژن ($kmol/m^3$)
P	فشار ($kg/m.s^2$)
R	جریان الکتریکی حجمی(A/m^3)
S	نسبت استوکیومتری
t	زمان (s)
T	دما (K)
$\bar{V}$	بردار سرعت (m/s)
X	کسر جرمی

علایم یونانی

α	ضریب انتقال بار
γ	ضریب غلظت
ε	تخلخل
μ	لزجت دینامیکی (kg/m.s)
ζ	سطح مخصوص کاتالیزور (1/m)
ρ	چگالی (kg/m^3)
σ	هدایت 1/(ohm.m)
$\emptyset$	پتانسیل (V)
η	اضافه پتانسیل سطحی(V)

زیرنویس‌ها

air	هوا
anode	آند
cathode	کاتد
d	درگ الکترو- اسمزی
D	ترم مرجع معادله مومنتوم
fuel	سوخت
H_2	هیدروژن
k	ترم مرجع معادله بقای گونه
T	ترم مرجع معادله انرژی
φ	متغیر
k	جزء گازی
m	فاز یونی
s	فاز جامد
ref	مرجع

8- مراجع

[1] A. Kumar, R. G. Reddy, Effect of channel dimensions and shape in the flow-field distributor on the performance of polymer electrolyte membrane fuel cells, *Journal of Power Sources*, Vol. 113, No. 1, pp. 11–18, 2003..

[2] N. Limjeerajarus, P. Charoen-Amornkitt, Effect of different flow field designs and number of channels on performance of a small PEFC, *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 40, No. 22, pp. 7144–7158, 2015.

[3] E. Afshari, Investigation of gas transfer in fuel cells of polymer membrane with blocked cathode channel, *Proceedings of the 4th Conference on Fuel Cell, Shahid Rajaee University*, Tehran, Iran, 2010. (in Persian فارسی)

[4] J. K. Kuo, T. H. Yen, Three-dimensional numerical analysis of PEM fuel cells with straight and wave-like gas flow fields channels, *Journal of Power Sources*, Vol. 177, No. 1, pp. 96–103, 2008

[5] C. H. Min, Performance of a proton exchange membrane fuel cell with a stepped flow field design, *Journal of Power Sources*, Vol. 186, No. 2, pp. 370–376, 2009.

[6] E. Afshari, M. Mosharaf-Dehkordi, H. Rajabian, An investigation of the PEM fuel cells performance with partially restricted cathode flow channels and metal foam as a flow distributor, *Energy*, Vol. 118, pp. 705–715, 2017.

[7] J. Renau, J Barroso, A Lozano, A Nueno, Design and manufacture of a high-temperature PEMFC and its cooling system to power a lightweight UAV for a high altitude mission, *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 41, No. 43, pp. 19702–19712, 2016.

[8] M. Gadalla, S. Zafar, Analysis of a hydrogen fuel cell-PV power system for small UAV, *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 41, No. 15, pp. 6422–6432, 2016.

[9] E. Afshari, S. A. Jazayeri, Y. M. Barzi, Effect of water phase change on temperature distribution in proton exchange membrane fuel cells, *Heat and mass Transfer*, Vol. 46, No. 11–12, pp. 1295–1305, 2010.

[10] F. Barbir, *PEM Fuel Cells: Theory And Practice*, Second Edittion, pp. 73-155, United States of America: Academic Press, 2012.

[11] A. Mendez, T. J. Leo, M. A. Herreros, Current state of technology of fuel cell power systems for autonomous underwater vehicles, *Energies*, Vol. 7, No. 7, pp. 4676–4693, 2014.

[12] C. C. Chen, D. Shaw, K. L. Hsueh, Optimization of the electrodes humidification temperature and clamping pressure to achieve uniform current density in a commercial-sized proton exchange membrane fuel cell, *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 42, No. 5, pp. 3185–3196, 2017.

[13] J. M. Sierra, J. Moreira, P. J. Sebastian, Numerical analysis of the effect of different gas feeding modes in a proton exchange membrane fuel cell with serpentine flow-field, *Journal of Power Sources*, Vol. 196, No. 11, pp. 5070–5076, 2011.

[14] N. Limjeerajarus, Y. Nishiyama, H. Ohashi, T. Ito, T. Yamaguchi, Modeling for PEFC MEAs based on reaction rate on Pt surface and microstructures of catalyst layers, *Journal of Chemical Energy*, Japan, Vol. 42, No. 8, pp. 616–631, 2009

[15]X. Li,I. Sabir, Review of bipolar plates in PEM fuel cells: Flow-field designs, *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 30, No. 4, pp. 359–371, 2005.

[16] J. J. Baschuk, X. Li, A general formulation for a mathematical PEM fuel cell model, *Journal of Power Sources*, Vol. 142, No. 1, pp. 134–153, 2005.

[17] J. G. Carton, A. G. Olabi, Three-dimensional proton exchange membrane fuel cell model: comparison of double channel and open pore cellular foam flow plates, *Energy*, Vol. 136, pp. 185–195, 2017.

[18] T. Monsaf, B. M. Hocine, S. Youcef, M. Abdallah, Unsteady three-dimensional numerical study of mass transfer in PEM fuel cell with spiral flow field, *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 42, No. 2, pp. 1237–1251, 2017.

[19] W. Yuan, Y. Tang, M. Pan, Z. Li, B. Tang, Model prediction of effects of operating parameters on proton exchange membrane fuel cell performance, *Renewable Energy*, Vol. 35, No. 3, pp. 656–666, 2010.

[20] H. Kahraman, M. F. Orhan, Flow field bipolar plates in a proton exchange membrane fuel cell: Analysis & modeling, *Energy Conversion and Management*, Vol. 133, pp. 363–384, 2017.

[21] D. Spernjak, A. K. Prasad, S. G. Advani, Experimental investigation of liquid water formation and transport in a transparent single-serpentine PEM fuel cell, *Journal of Power Sources*, Vol. 170, No. 2, pp. 334–344, 2007.

[22] A. Iranzo, P. Boillat, J. Biesdorf, A. Salva, Investigation of the liquid water distributions in a 50 cm 2 PEM fuel cell: Effects of reactants relative humidity, current density, and cathode stoichiometry, *Energy*, Vol. 82, pp. 914–921, 2015.

[23] J. P. Owejan, T. A. Trabold, D. L. Jacobson, D. R. Baker, D. S. Hussey, M. Arif, In situ investigation of water transport in an operating PEM fuel cell using neutron radiography: Part 2–Transient water accumulation in an interdigitated cathode flow field, *International Journal of Heat and Mass Transfer*,Vol. 49, No. 25, pp. 4721–4731, 2006.

[24] M. Jang, M. Ciobotaru, V. G. Agelidis, A single-phase grid-connected fuel cell system based on a boost-inverter, *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol. 28, No. 1, pp. 279–288, 2013.

[25] C. A. García, F. Llorens, P. García, L. M. Fernández, F. Jurado, Improving voltage harmonic compensation of a single phase inverted-based PEM fuel cell for stand-alone applications, *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 39, No. 9, pp. 4483–4492, 2014.

[26] H. Sun, C. Xie, H. Chen, S. Almheiri, A numerical study on the effects of temperature and mass transfer in high temperature PEM fuel cells with ab-PBI membrane, *Applied Energy*, Vol. 160, pp. 937–944, 2015.

[27] B. Najafi, A. H. Mamaghani, A. Baricci, F. Rinaldi, A. Casalegno, Mathematical modelling and parametric study on a 30 kW el high

temperature PEM fuel cell based residential micro cogeneration plant, *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 40, No. 3, pp. 1569–1583, 2015.

[28] S. Shimpalee, S. Greenway, J. W. Van Zee, The impact of channel path length on PEMFC flow-field design, *Journal of Power Sources*, Vol. 160, No. 1, pp. 398–406, 2006.

[29] A. P. Manso, F. F. Marzo, M. G. Mujika, J. Barranco, A. Lorenzo, Numerical analysis of the influence of the channel cross-section aspect ratio on the performance of a PEM fuel cell with serpentine flow field design, *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 36, No. 11, pp. 6795–6808, 2011.

[30] N. Lapeña-Rey, J. A. Blanco, E. Ferreyra, J. L. Lemus, S. Pereira, E. Serrot, A fuel cell powered unmanned aerial vehicle for low altitude surveillance missions, *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 42, No. 10, pp. 6926–6940, 2017.

[31] E. C. M. Sanga, A. S. Mujumdar, G. S. V Raghavan, Simulation of convection-microwave drying for a shrinking material,*Chemical Engineering and Processing. Process Intensification*., Vol. 41, No. 6, pp. 487–499, 2002.