



مدل سازی عملکرد پیل های سوختی پلیمری با استفاده از مدل فشرده

قدیر اسماعیلی^{*}، مجید اسحق نیموری

استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه تخصصی فناوری های نوین آمل، آمل
^{*}آمل، صندوق پستی 4616849767، q.esmaili@ausmt.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل
 دریافت: 26 مهر 1396
 پذیرش: 17 آذر 1396
 ارائه در سایت: 15 دی 1396

کلید واژگان:

پیل سوختی پلیمری
 مدل فشرده
 مدیریت آب
 پخش جریان

چکیده

یکی از مهمترین عوامل در کاهش طول عمر پیل های سوختی پلیمری، پخش غیریکنواخت جریان در سطح غشاء می باشد. از آنجا که میدان شارش، نقش زیادی در پخش واکنشگرها و انتقال آب و در نتیجه پخش، جریان دارد، لذا در این مقاله، با توسعه مدلی فشرده، پخش آب و جریان در سطح غشاء پیل های سوختی پلیمری در دو طرح متفاوت، مورد ارزیابی قرار گرفت. در مدل استفاده شده، میدان شارش به بخش های مساوی تقسیم بندی شده و ارتباط میان هر بخش با سایر بخش ها از طریق میدان شارش استفاده شده در پیل سوختی، ایجاد می گردد. میدان شارش سمت آند، در هر دو طرح مارپیچ بوده ولی در سمت کاتد در طرح اول از میدان شارش موازی و در طرح دوم از میدان شارش مارپیچ استفاده شده است. شبیه سازی برای رطوبت های ورودی مختلف از 0 تا 100 در هر دو سمت انجام گرفت. نتایج نشان داد که تغییر میدان شارش در یک سمت، تاثیر اندکی روی منحنی پلاریزاسیون داشته و در چگالی جریان بالا، طرح دوم از عملکرد بهتری برخوردار است. همچنین، از لحاظ پخش جریان، طرح دوم، یکنواختی بهتری را نشان می دهد به طوری که در طرح اول در شرایط ورودی اشباع، اختلاف بین درصد جریان تولید شده بین ورودی و خروجی 1.57 درصد می باشد که در حالت دوم 1.45 درصد می رسد.

Modeling of PEM fuel cells performance using lumped method

Qadir Esmaili^{*}, Majid Eshagh Nimvari

Faculty of Engineering Modern Technologies, Amol University of Special Modern Technologies, Amol, Iran
^{*}P.O.B. 4616849767, Tehran, Iran, q.esmaili@ausmt.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
 Received 18 October 2017
 Accepted 08 December 2017
 Available Online 05 January 2018

Keywords:
 PEM fuel cell
 Lumped method
 Water management
 Current distribution

ABSTRACT

One of the most important factors in reducing the lifetime of PEM fuel cells is heterogeneous current distribution on membrane surface. Since flow field plays an important role in reactants distribution and water depletion and consequently current distribution, hence, in this paper, with development of a lumped model, water and current distributions on membrane surface were evaluated in two different designs. In this model, the flow field is divided into equal segments and connection between segments are created through flow field pattern. In both designs, flow field of anode side was serpentine, but on cathode side, parallel and serpentine flow field were used in first and second design, respectively. Simulations were carried out for different input relative humidity from 0 to 100 in both sides. The results showed that flow field had no significant effect on polarization curve and the second design had a little better performance in high current density. Also, in terms of current distribution, the second design shows a better uniformity, so that in the first design in fully saturated inlet condition, difference between the percentage of current generated between the first and last segments is about 1.57 percent which reaches to 1.45 percent in the second case.

1- مقدمه

یکی از مهمترین عوامل تاثیرگذار روی عملکرد قیمت و طول عمر پیل های سوختی پلیمری، مدیریت آب در آن ها می باشد. از یک طرف، غشاء پلیمری جهت عملکرد مناسب، نیاز به رطوبت داشته و کمبود آب در آن موجب افزایش مقاومت اهمی غشاء و افت عملکردی زیاد آن می شود. از طرف دیگر، انباشته شدن آب در لایه های مختلف آن نیز مانع انتقال مناسب واکنشگرها به سطح لایه ی کاتالیستی شده که کاهش عملکرد و پخش غیریکنواخت چگالی جریان روی سطح غشاء را در پی خواهد داشت. توزیع غیریکنواخت گازهای واکنشگر در سطح کاتالیست سبب نرخ متفاوت واکنش در محل های مختلف شده که توزیع دمای غیریکنواخت را در پی خواهد داشت. تنش مکانیکی وارد شده در نواحی دارای دمای بالاتر، افزایش یافته و به دنبال آن احتمال، ایجاد سوراخ در غشاء و پارگی در آن نواحی بیشتر

پیل های سوختی پلیمری یکی از مهمترین منابع انرژی پاک در سال های آتی بشمار می رود. از سوی دیگر امکان تولید هیدروژن از منابع انرژی تجدیدپذیر، توجه به آن را در سال های اخیر، دوچندان نموده است. پیل های سوختی از عملکرد ساده ای برخوردار بوده و هیدروژن و هوا (یا اکسیژن) به عنوان واکنشگرها در لایه ی کاتالیستی غشاء پلیمری واکنش داده و الکتریسیته و آب در آن ها تولید می گردد. همچنین، قابلیت تولید توان در محدوده چند وات تا چندین مگاوات، امکان استفاده از آن ها در کاربردهای مختلفی از جمله نیروی محرکه برای کشتی ها و قطارها تا تولید توان، برای سنسورها را میسر نموده است. با وجود مزایای متعدد، قیمت بالا و طول عمر پایین، مهمترین موانع در تجاری سازی آن ها بشمار می روند [1].

می گردد [2].

هرچند تاکنون روش های آزمایشگاهی متعددی [3] جهت بررسی جریان آب داخل کانال و غشاء، مورد استفاده قرار گرفته است. ولی پیاده سازی شرایط واقعی پیل سوختی در این روش های آزمایشگاهی قابل انجام نبوده و لذا این روش، شناخت دقیقی از رفتار آب و به خصوص پخش جریان روی سطح غشاء را نتیجه نمی دهند. از این رو، شبیه سازی و مدل سازی رفتار واکنشگرها و پخش جریان، مورد توجه پژوهشگران زیادی قرار گرفته است. از آنجا که در پیل های سوختی پلیمری پدیده های متعددی از مقیاس بسیار کوچک در کاتالیست و لایه ی نفوذ تا مقیاس بزرگ، در طول کانال و سری روی عملکرد آن ها تاثیر گذار می باشند، لذا، مدل های ارائه شده نیز بسته به میزان در نظر گرفتن جزئیات پدیده ها دارای تنوع زیادی بوده و هر کدام از این مدل ها براساس فرضیات بکار رفته در آن ها، جهت بررسی برخی از این پدیده ها مناسب می باشند [4]. بطور کلی دو روش مدل سازی عددی و صفر بعدی برای پیل های سوختی می توان در نظر گرفت. از مدل های عددی، جهت شبیه سازی عملکرد و همچنین، بررسی رفتار جریان آب تولید شده در لایه ی نفوذ و کانال استفاده شده است [5، 6]. اگرچه اغلب از دینامیک سیالات محاسباتی در طراحی دقیق تک سل و کانال استفاده می گردد، ولی این مدل ها علیرغم توانایی در بررسی جزئیات، با توجه به حجم محاسباتی بالا از سرعت پاسخ دهی مناسبی برخوردار نبوده و لذا در طراحی در سطح سری و یا برای کنترل کل مجموعه، قابل استفاده نمی باشند [7]. به همین علت، مدل های ساده تری توسط محققین ارائه گردیده که از سرعت مناسبی برخوردار بوده و توانایی مطالعه و طراحی سل های بزرگ و سری را دارا می باشند. در این مدل ها بخش های مختلف سل توسط مدل های صفر بعدی حل شده و پارامترهای تعریف شده در مدل با استفاده از نتایج آزمایشگاهی برای سل یا سری مشخص می گردند [8]. این روش ها ابزاری مناسب جهت کنترل و طراحی سیستم های دارای پیل سوختی مناسب می باشند ولی فقط برای پیل سوختی خاص بررسی شده قابل استفاده بوده و فاقد دقت مناسب جهت طراحی می باشند. لذا، به منظور شبیه سازی پیل های سوختی در سطح سری و یا ابعاد بزرگ، دسته ی دیگری از مدل ها مطرح شده اند که ترکیبی از مدل های صفر بعدی و عددی می باشند. در روش های ترکیبی از دقت و سرعت مناسبی برخوردار بوده و لذا ابزار مناسبی برای کاربری هایی مانند طراحی سری و عیب یابی می باشند.

پوکروشپن و همکاران [9] با ارائه مدلی فشرده، رفتار دینامیکی پیل سوختی پلیمری را مطالعه کردند. در مدل ارائه شده، شرایط داخل کانال، ثابت و تغییرات، فقط درون غشاء در نظر گرفته شد.

مک کی و همکاران [10] نیز با ارائه مدلی فشرده، رفتار دینامیکی تک سل پیل سوختی پلیمری را مطالعه نمودند. در مدل آن ها، امکان بررسی اثر شکل گیری آب در غشاء بر عملکرد پیل های سوختی پلیمری وجود دارد اما شرایط داخل کانال، در مدل آن ها نیز ثابت در نظر گرفته شد.

یانگ و همکاران [11] با استفاده از مدل فشرده و تقسیم بندی سطح غشاء به بخش های مساوی، عملکرد پیل سوختی با کانال موازی و مارپیچ به ترتیب در دو سمت کاتد و آن د را مورد ارزیابی قرار دادند. آنها با حل معادلات بقاء در هر بخش، اثر شکل گیری آب در سمت کاتد را روی پخش جریان مورد ارزیابی قرار دادند. در مدل آن ها، میزان رطوبت ورودی از سمت آن د صفر بوده و شرایط به گونه ای تنظیم شد که در سمت آن د جریان دوفاز ایجاد نمی گردد.

لیزو و همکاران [12] با ارائه مدلی صفر بعدی، انتقال آب در غشاء را

مورد بررسی قرار دادند. اگرچه در مدل آن ها با در نظر گرفتن پدیده های فیزیکی و الکتروشیمیایی نتایج بهتری در بررسی رفتار دینامیکی پیل های سوختی پلیمری در مقایسه با مدل های قبلی بدست آمد اما در شرایط پایدار، نتایج آنها اختلاف چندانی با نتایج مدل های قبلی نشان نمی دهد.

در تحقیق دیگری، هنگ و همکاران [13] نیز با ارائه مدلی صفر بعدی، عملکرد پیل های سوختی پلیمری با سطح مقطع بزرگ را مورد ارزیابی قرار دادند. با توجه به محدوده چگالی جریان استفاده شده - چگالی جریان پایین (گاز اشباع نشده در خروجی کاتد) و بالا (وجود آب در خروجی) - معادلات حاکم، در مدل متفاوت می باشد. ضرایب استفاده شده در مدل نیز از نتایج آزمایشگاهی استخراج گردید.

آبدین و همکاران [14] با استفاده از نرم افزار سیمولینک متلب، از مدلی فشرده جهت بررسی عملکرد پیل سوختی پلیمری استفاده نمودند. اگرچه در مطالعه آن ها، مدلی یک بعدی با سرعت بالا و دقت مناسب جهت پیش بینی عملکرد پیل های سوختی پلیمری ارائه گردید، اما چگالی جریان در سطح غشاء، ثابت فرض شده و همچنین اثرات کانال، در مدل لحاظ نشده است.

مطالعه تحقیقات پیشین، نشان می دهد که میدان شارش، یکی از مهمترین عوامل تاثیر گذار در دفع آب و پخش یکنواخت گاز، روی سطح غشاء می باشد [4]. از میان طرح های مختلف مطرح شده برای میدان شارش، کانال های مارپیچ با توجه به سادگی و عملکرد مناسب، متداول ترین نوع میدان شارش به حساب می روند [15] که در پژوهش های قبلی از مدل سازی به روش فشرده برای میدان شارش مارپیچ، در هر دو سمت استفاده نشده است. در این پژوهش، با استفاده از مدلی فشرده، عملکرد پیل های سوختی پلیمری با میدان شارش مارپیچ، مورد بررسی قرار گرفته است. در مدل توسعه داده شده، با تقسیم بندی سطح فعال به بخش های مساوی اثر، شکل گیری جریان دوفاز و تغییرات واکنشگر در طول کانال نیز قابل ارزیابی می باشد. بررسی پخش جریان روی سطح غشاء برای میدان شارش مطالعه شده، نشان می دهد که استفاده از میدان شارش مارپیچ، پخش یکنواخت تری را نتیجه می دهد.

2- معادلات حاکم

در مدل توسعه داده شده از روش ارائه شده در مرجع [11] جهت شبیه سازی استفاده شده است. در این مدل، برای گرفتن ویژگی های توزیع شده پیل سوختی پلیمری، سطح فعال آن ها به چندین بخش تقسیم می شود. بخش های مختلف با توجه به میدان های جریان به یکدیگر متصل شده و ورودی های هر بخش، خروجی های بخش قبلی می باشند. خواص واکنشگر/غشا و واکنش در هر بخش، یکنواخت فرض شده و از مدل فشرده برای شبیه سازی رفتار جریان واکنشگرها و آب استفاده می شود. همانطور که در مقدمه اشاره شد، در مرجع [11] از میدان شارش خمیده در سمت آن د و میدان موازی در سمت کاتد استفاده شده است اما در این پژوهش از میدان شارش خمیده در هر دو سمت استفاده می شود. شکل 1 نحوه ارتباط بخش های مختلف را در طرح 1 (میدان شارش خمیده در سمت آن د و موازی در سمت کاتد) و طرح 2 (میدان شارش مارپیچ در هر دو سمت) نشان می دهد.

به منظور ساده سازی مدل فرضیات زیر استفاده گردید:

- 1- شرایط پایا می باشد.
- 2- قانون گاز ایده ال برای مخلوط گاز به کار برده می شود.
- 3- دما در سراسر سل پیل سوختی ثابت می باشد.

در لایه های نفوذ گاز در دو سمت آند و کاتد نیز از مدل غشاء محاسبه می گردد.

افت فشار ناشی از اصطکاک در کانالی مستقیم به طول L از برابر است با [16]:

$$\Delta P = 32 \int_0^L \frac{\mu(y) Q(y)}{A_{ch} d_{ch}^2} dy \quad (6)$$

با فرض تغییرات خطی لزجت و دبی مخلوط در راستای کانال، معادله ی (6) به شکل معادله ی (7) تبدیل می شود:

$$P_{in} - P_{out} = \frac{16L}{3A_{ch}d_{ch}^2} [Q_{in}(2\mu_{in} + \mu_{out}) + Q_{out}(\mu_{in} + 2\mu_{out})] \quad (7)$$

لذا با مشخص بودن لزجت و دبی جرمی مخلوط در ورودی و خروجی هر بخش می توان فشار، در خروجی هر بخش را محاسبه نمود.

2-2- لایه ی نفوذ گاز

لایه ی نفوذ گاز، نقش انتقال واکنشگرها و آب را بین کانال و لایه ی کاتالیستی دارا می باشد. همچنین، الکترون ها نیز از طریق آن جابجا می شوند. از آنجا که لایه ی نفوذ گاز یک ماده متخلخل می باشد، لذا اثر تخلخل در فرایند انتقال گاز و آب در نظر گرفته می شود. علاوه براین، آب در لایه ی نفوذ گاز می تواند در دو فاز گازی و یا مایع ظاهر شود که برای هر فاز، معادلات حاکم، متفاوت خواهد بود. در حالتی که آب بصورت بخار در گاز وجود داشته باشد (حالت زیر اشباع)، بخار آب بین لایه های نفوذ آب و گاز منتقل می گردد، اما با شکل گیری آب (حالت اشباع) آب بصورت مایع در کانال و لایه ی نفوذ، ظاهر می شود و آب تولید شده در لایه کاتالیستی از طریق لایه ی نفوذ گاز به شکل مایع انتقال خواهد یافت. وجود آب مایع در لایه ی نفوذ نه تنها باعث مقاومت بیشتر در برابر نفوذ گاز می شود، بلکه بخشی از سطوح فعال لایه کاتالیست را نیز پوشش می دهد.

معادله استفان-ماکسول برای توصیف نفوذ مخلوط های گازی چند جزئی، در لایه ی نفوذ گاز به کار می رود [17]. برای نفوذ گاز n جزیی از میان محیط با تخلخل متوسط، گرادیان کسر مولی مولفه های i عبارتست از:

$$\nabla x_i = RT \sum_j^n \frac{x_i \dot{N}_j - x_j \dot{N}_i}{PD_{i-j}^{eff}} \quad (8)$$

که $\dot{N}_i$ و $\dot{N}_j$ به ترتیب شار مولی مولفه های i و j هستند. D_{i-j}^{eff} ضریب نفوذ موثر در مخلوط $i-j$ در محیط متخلخل است و با D_{i-j} محیط غیرمتخلخل بوسیله معادله (9) مرتبط می شود [18]:

$$D_{i-j}^{eff} = D_{i-j} f(\varepsilon) g(s) \quad (9)$$

که ε و S به ترتیب، درجه ی اشباع و ضریب تخلخل لایه ی نفوذ گاز می باشند. تاثیر تخلخل بر ضریب نفوذ با چند جمله ای بصورت معادله (10) تقریب زده می شود:

$$f(\varepsilon) = \varepsilon^{1.5} \quad (10)$$

وجود آب، مایع سطح نفوذ در لایه ی نفوذ گاز را کاهش می دهد و اثر آن معمولاً به صورت تابع نرمال شده مدل می شود:

$$g(s) = (1 - s)^m \quad (11)$$

که m مقدار ثابت بوده و در این تحقیق مقدار آن 2 در نظر گرفته می شود [19]. لایه ی نفوذ گاز آند شامل هیدروژن و بخار آب می باشد. لذا، گرادیان کسر مولی بخار آب برابر است با:

$$\frac{dx_{v,gdl}}{dz} = \frac{RT}{P_{an,avg} D_{H_2-v}} (x_{v,gdl} \dot{N}_{H_2,gdl} - x_{H_2,gdl} \dot{N}_{v,gdl}) \quad (12)$$

4- واکنش شیمیایی در سراسر هر بخش یکنواخت می باشد.

5- در هر بخش، تغییرات در جهت کانال ناچیز بوده و فقط انتقال گاز جهت غشاء با اهمیت می باشد.

هر بخش شامل زیر مدل های کانال و لایه ی نفوذ گاز در آند و کاتد، غشاء و الکتروشیمی برای محاسبه ی ولتاژ می باشد و از طریق شرایط مرزی در فصل مشترک، به یکدیگر مرتبط می گردند. در ادامه، معادلات حاکم بر هر یک از این بخش ها مورد بررسی قرار می گیرد.

1-2- کانال

از مدل سازی کانال، جهت محاسبه ی دبی مولی گازها و فشار در خروجی هر بخش استفاده می شود. به منظور محاسبه ی دبی خروجی از هر بخش، از قانون بقا جرم استفاده گردید که عبارت است از:

$$\dot{N}_{H_2,out} = \dot{N}_{H_2,in} - \dot{N}_{H_2,react} \quad (1)$$

$$\dot{N}_{O_2,out} = \dot{N}_{O_2,in} - \dot{N}_{O_2,react} \quad (2)$$

$$\dot{N}_{an,w,out} = \dot{N}_{an,w,in} - \dot{N}_{an,w,gdl} \quad (3)$$

$$\dot{N}_{ca,w,out} = \dot{N}_{ca,w,in} - \dot{N}_{ca,w,gdl} \quad (4)$$

مقدار هیدروژن و اکسیژن مصرفی تابعی از جریان هر بخش، I_{seg} بوده و برابر است با:

$$\dot{N}_{i,react} = \frac{I_{seg}}{nF} \quad (5)$$

که F ثابت فارادی و اندیس i به ترتیب نشان دهنده ی اکسیژن و هیدروژن در سمت کاتد و آند می باشد. همچنین، ضریب n برای واکنش هیدروژن برابر 2 و برای واکنش اکسیژن برابر 4 می باشد. مقدار دبی مولی آب

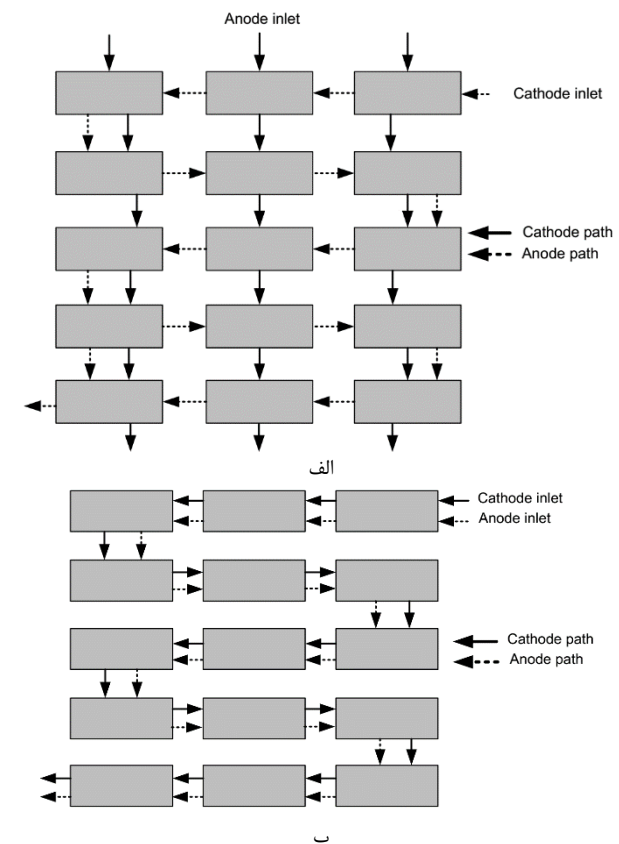


Fig. 1 Schematic of connection of each segment in simulation a) first design b) second design

شکل 1 شماتیک ارتباط بخش های مختلف در شبیه سازی (الف) طرح اول (ب) طرح دوم

که کسر مولی هیدروژن، $x_{H_2,gdl}$ برابر است با:

$$x_{H_2,gdl} = 1 - x_{v,gdl} \quad (13)$$

در معادله (13)، $N_{v,gdl}$ ، شار مولی آب در لایه نفوذ بوده و مقدار آن از مدل غشاء پلیمری محاسبه می شود. شار مولی هیدروژن نیز برابر با نرخ هیدروژن مورد نیاز جهت انجام واکنش بوده که تابعی از جریان، در هر بخش می باشد. از آنجا که در سمت کاتد هوای مرطوب در نظر گرفته شده است، لذا با استفاده از معادله (12) تغییرات کسر مولی گازهای اکسیژن و بخار آب برابر است با:

$$\frac{dx_{O_2,gdl}}{dz} = \frac{RT}{P_{ca,avg}} \left(\frac{x_{O_2,gdl} \dot{N}_{v,gdl} - x_{v,gdl} \dot{N}_{O_2,gdl}}{D_{O_2-v}} - \frac{x_{O_2,gdl} \dot{N}_{N_2,gdl} - x_{N_2,gdl} \dot{N}_{O_2,gdl}}{D_{N_2-O_2}} \right) \quad (14)$$

$$\frac{dx_{v,gdl}}{dz} = \frac{RT}{P_{ca,avg}} \left(\frac{x_{v,gdl} \dot{N}_{O_2,gdl} - x_{O_2,gdl} \dot{N}_{v,gdl}}{D_{O_2-v}} - \frac{x_{v,gdl} \dot{N}_{N_2,gdl} - x_{N_2,gdl} \dot{N}_{v,gdl}}{D_{N_2-v}} \right) \quad (15)$$

با محاسبه کسر مولی گاز اکسیژن و بخار آب، کسر مولی گاز نیتروژن برابر است با:

$$x_{N_2,gdl} = 1 - (x_{v,gdl} + x_{O_2,gdl}) \quad (16)$$

در معادلات (14) و (15)، شار مولی اکسیژن، $\dot{N}_{O_2,gdl}$ برابر مقدار مصرف شده در لایه کاتالیستی، شار مولی آب، $\dot{N}_{v,gdl}$ از مدل غشاء پلیمری و همچنین شار مولی نیتروژن، $\dot{N}_{N_2,gdl}$ با توجه به عدم واکنش نیتروژن در لایه کاتالیستی برابر صفر می باشد. با دانستن کسر مولی، بخار آب در فصل مشترک غشاء/لایه نفوذ گاز، می توان فعالیت آب را در دو طرف غشاء از معادله (17) محاسبه نمود.

$$a_{v,g/m} = \frac{x_{v,g/m} P_{avg}}{P_{v,sat}} \quad (17)$$

همچنین، با استفاده از کسر مولی گازهای هیدروژن و اکسیژن، می توان فشار جزئی آن ها را در فصل مشترک غشاء/لایه نفوذ گاز محاسبه نمود، که پارامترهایی مهم جهت محاسبه ولتاژ در هر بخش می باشند.

اگر رطوبت نسبی جریان گاز درون کانال متفاوت از مقدار آن در فصل مشترک کانال/لایه نفوذ گاز باشد، شار بخار آب بین آنها وجود خواهد داشت. شار مولی بخار آب در فصل مشترک کانال/لایه نفوذ گاز به رطوبت نسبی جریان ورودی، وابسته بوده و از معادله (18) بدست می آید.

$$N_{v,con} = k_{conv} (x_{c/g} - x_{in}) A_{seg,conv} \quad (18)$$

که K_{conv} ضریب انتقال جرم جابجایی بوده و توسط عدد شروود، Sh تعیین می شود.

$$k_{conv} = sh \cdot c \cdot D_{ij} / d_{ch} \quad (19)$$

که D_{ij} ضریب نفوذ مولفه i در جریان گاز j می باشد. برای جریان آرام و شرایط سطح با دمای ثابت در پیل سوختی، عدد شروود ثابت و برابر با 3.21 می باشد [20].

هنگامی که فشار بخار به فشار اشباع می رسد، میعان اتفاق می افتد. تحت این شرایط، تمام آب اضافه تولید شده در لایه کاتالیست کاند به شکل مایع ظاهر می شود. برای شرایط اشباع، فرض می شود فشارهای بخار در کانال و در لایه نفوذ گاز هر دو برابر با فشار بخار آب اشباع می باشند. فشار بخار متناسب با کسر مولی است، بنابراین کسر مولی بخار آب در لایه نفوذ گاز برابر با کسر مولی بخار اشباع می باشد:

$$x_{v,gdl} = \frac{P_{v,sat}}{P_{an,avg}} \quad (20)$$

در شرایط اشباع، در سمت آند، از آنجا که کسر مولی بخار آب ثابت است، کسر مولی هیدروژن از معادله (13) محاسبه می شود. در سمت کاتد از آنجا که گرادیان کسر مولی آب برابر صفر می باشد، فقط معادله (14) حل خواهد شد.

در شرایط اشباع، در داخل لایه نفوذ گاز، آب مایع توسط فشار موینگی رانده شده که مقدار آن برابر است با:

$$P_c = P_g - P_w = \sigma \cos(\theta_c) \left(\frac{\varepsilon}{K} \right)^{0.5} J(S) \quad (21)$$

که P_g و P_w به ترتیب فشار گاز و آب در لایه نفوذ گاز می باشند. θ_c زاویه تماس و K نفوذپذیری لایه نفوذ گاز بوده و هر دو از ویژگی های لایه نفوذ گاز می باشند. مقدار کشش سطحی، σ ، برای آب - هوا 0.0625 Nm^{-1} در نظر گرفته شد. همچنین، از تابع لورت جهت تعریف تابع $J(S)$ استفاده گردید که عبارت است از [19]:

$$J(S) = 1.417S - 2.120S^2 + 1.263S^3 \quad (22)$$

که در آن S درجهی اشباع آب کاهش یافته بوده و با معادله (23) تعریف می شود.

$$S = \frac{s - s_{im}}{1 - s_{im}} \quad (23)$$

در معادله (23)، s_{im} درجهی اشباع ساکن لایه نفوذ گاز بوده و مقدار آن برابر با 0.1 انتخاب می شود [19]. جریان مایع از طریق لایه نفوذ گاز در زیر کانال، توسط فشار موینگی بیان می شود [19]:

$$\dot{N}_{w,gdl} = - \frac{\rho_w K K_{rw}}{M_w \mu_w} \left(\frac{dP_c}{dS} \right) \frac{dS}{dz} \quad (24)$$

پارامترهای بکار رفته در معادله (24) و مقادیر آن ها در جدول 1 آورده شده است. در حالت پایا، $\dot{N}_{w,gdl}$ برابر با شار خالص آب از آند به کاتد بوده و با مدل غشاء محاسبه می شود. لذا، با حل معادله (24) می توان درجهی اشباع در لایه ی نفوذ را محاسبه نمود.

2-3- غشاء پلیمری

انتقال آب، توسط دو عامل اصلی نفوذ و درگ الکترواسمزی از طریق غشاء پلیمری بین دو سمت آند و کاتد جابجا می گردد. انتقال پروتون از سمت آند به کاتد همراه با کشیده شدن آب از آند به کاتد می باشد که با درگ الکترواسمزی شناخته شده و مقدار آن عبارت است از:

$$\dot{N}_{w,osmotic} = k_{osmotic} \frac{I_{seg}}{F} \quad (25)$$

که $K_{osmotic}$ ضریب درگ اسمزی و مقدار آن برابر است با [21]:

$$K_{osmotic} = \frac{2.5 \lambda_{pem}}{22} \quad (26)$$

که مقدار آب در غشاء، λ_{pem} تابعی از فعالیت آب غشاء بوده و برابر است با:

$$\lambda_{pem} = 0.043 + 17.8 a_{pem} - 39.85 a_{pem}^2 + 36.0 a_{pem}^3, \quad 0 < a_{pem} < 1 \quad (27)$$

جدول 1 پارامترهای استفاده شده در لایه نفوذ گاز [11]

پارامتر	واحد	مقدار
چگالی آب مایع، ρ_w	kg/m^3	1000
نفوذپذیری مطلق، K	m^2	1×10^{-8}
نفوذپذیری نسبی، K_{rw}	---	S
لزجت دینامیکی بخار آب، μ_w	N s m^{-2}	4×10^{-4}

$$V_{ohm} = I_{seg} R_{seg} \quad (38)$$

مقاومت داخلی هر بخش، R_{seg} ، مجموع همه مقاومتهای داخلی در مسیر انتقال الکترون ناشی از لایه ی نفوذ، R_{gdl} ، صفحات دو قطبی، $R_{bipolar}$ ، و غشاء پلیمری، R_{pem} ، و مقاومت تماسی، $R_{contact}$ ، است:

$$R_{seg} = R_{pem} + R_{gdl} + R_{bipolar} + R_{contact} \quad (39)$$

با توجه به هدایت الکتریکی بالای صفحات دوقطبی و لایه ی نفوذ گاز، از مقاومت آن ها صرف نظر شده و بنابراین فقط مقاومت غشاء در این مدل در نظر گرفته می شود که از معادله زیر بدست می آید:

$$R_{pem} = \frac{t_{pem}}{\sigma_{pem}} \quad (40)$$

که σ_{pem} رسانایی غشاء بوده و از طریق تابع زیر به دما و محتوای آب غشاء وابسته است [21]:

$$\sigma_{pem} = (0.195 \lambda_{pem} - 0.326) \exp \left[350 \left(\frac{1}{303} - \frac{1}{T_{cell}} \right) \right] \quad (41)$$

که ضرایب ثابت به طور تجربی از نتایج آزمایشات تعیین می شوند. اضافه ولتاژ غلظت در چگالی جریان بالا اثر گذار بوده و بصورت تابعی از چگالی جریان، i_{seg} ، و درجه ی اشباع آب، s ، از معادله ی تجربی (42) محاسبه می شود [25]:

$$V_{conc} = -0.75 i_{seg}^7 \ln \left(1 - \frac{i_{seg}}{1.2 (1-s)} \right) \quad (42)$$

3- الگوریتم حل

همانطور که در بخش 2 اشاره شد، به منظور شبیه سازی، ابتدا سطح سل به بخش های کوچکتری تقسیم شده و از خروجی هر بخش به عنوان ورودی بخش بعدی استفاده خواهد شد. در واقع، تفاوت میان میدان های شارش مختلف نحوه ی ارتباط میان هریک از این بخش ها به یکدیگر می باشد. در هر یک از بخش ها، معادلات (1) تا (42) در قالب شش زیر مدل، در محیط متلب-سیمولینک حل می گردند که در شکل 2 ارتباط میان هریک از زیرمدل ها نشان داده شده است. با توجه به اینکه پس از حل معادلات حاکم تمامی بخش ها، ولتاژ خروجی از تمامی بخش ها باید یکسان باشد، لذا جهت یکسان سازی ولتاژ خروجی، نیاز به تنظیم پخش جریان در هر یک از بخش ها می باشد. در نتیجه، پس از محاسبه ی ولتاژ خروجی تمامی بخش ها، از الگوریتمی مشابه روش بکار رفته در مراجع [26,11] جهت تنظیم جریان در هر بخش استفاده گردید.

در این الگوریتم، در ابتدا توزیع جریانی برای هر یک از بخش ها در نظر گرفته شده و سپس، ولتاژ خروجی از هر یک از آنها محاسبه خواهد شد. با توجه به حدس اولیه ی انجام شده برای جریان های هر بخش، پخش ولتاژ یکنواختی در سطح سل وجود نخواهد داشت. اگر تفاوت بین بیشترین و کمترین ولتاژ بدست آمده از مقدار مورد نظر، (خطای محاسبات) کمتر نباشد نیاز به اصلاح جریان های هر بخش می باشد. بر اساس منحنی قطبیت پیل سوختی، جهت کاهش ولتاژ در هر بخش با ولتاژ بیشتر، جریان باید افزایش یافته و جریان در بخش دارای ولتاژ کمتر، باید کاهش یابد. لذا تصحیح جریان های هر مرحله، از اختلاف بیشترین و کمترین ولتاژ بخش ها بدست می آید:

$$\Delta I = k [\max(V_{seg,i}) - \min(V_{seg,i})] \quad (43)$$

که k ضریب ثابت جهت کنترل سرعت همگرایی می باشد. با استفاده از ΔI محاسبه شده، افزایش و یا کاهش جریان هر بخش براساس کوچکتر یا

فعالیت آب غشاء، a_{pem} ، برابر میانگین فعالیت آب در دو سمت آند و کاتد می باشد. اختلاف غلظت بخار آب، در دو سمت، سبب نفوذ بخار آب شده که مقدار آن از رابطه ی (28) محاسبه می شود:

$$\dot{N}_{w,diff} = K_{diff} \frac{C_{w,ca} - C_{w,an}}{t_{pem}} \quad (28)$$

که t_{pem} ضخامت غشاء و C_w غلظت آب در دو سمت آند و کاتد بوده که از رابطه ی زیر محاسبه می شود [22]:

$$C_{w,i} = \frac{\rho_{pem}}{M_{pem}} \lambda_i \quad (29)$$

که اندیس i مربوط به هر یک از دو سمت آند و کاتد بوده و ρ_{pem} و M_{pem} به ترتیب چگالی و غلظت غشاء می باشد. همچنین، ضریب نفوذ غشاء، K_{diff} ، تابعی از دما و مقدار آب داخل غشاء است [23]:

$$K_{diff} = K_{\lambda} \exp \left(2416 \left(\frac{1}{303} - \frac{1}{T_{seg}} \right) \right) \quad (30)$$

که مقدار K_{λ} برابر است با:

$$K_{\lambda} = \begin{cases} 10^{-10}, & \lambda_{pem} < 2 \\ 10^{-10} (1 + 2(\lambda_{pem} - 2)), & 2 < \lambda_{pem} \\ 10^{-10} (3 - 1.167(\lambda_{pem} - 3)), & 3 < \lambda_{pem} \\ 1.25 \times 10^{-10}, & \lambda_{pem} \geq 4.5 \end{cases} \quad (31)$$

بنابراین، دبی مولی خالص آب ورودی از سمت کاتد به آند، $\dot{N}_{an,w,gdl}$ ، برابر است با:

$$\dot{N}_{an,w,gdl} = \dot{N}_{w,diff} - \dot{N}_{w,osmotic} \quad (32)$$

مقدار آب ورودی به کاتد برابر مجموع آب مبادله شده با آند توسط غشاء و آب تولید شده ناشی از واکنش الکتروشیمیایی در لایه ی کاتالیستی سمت کاتد می باشد. لذا، مقدار آب ورودی به لایه ی نفوذ کاتد، $\dot{N}_{ca,w,gdl}$ ، برابر است با:

$$\dot{N}_{ca,w,gdl} = \dot{N}_{pro} - \dot{N}_{w,diff} + \dot{N}_{w,osmotic} \quad (33)$$

مقدار آب تولیدی در لایه ی کاتالیستی برابر است با:

$$\dot{N}_{pro} = \frac{I_{seg}}{2F} \quad (34)$$

2-4- محاسبه ولتاژ هر بخش

ولتاژ برگشت پذیر تئوری قابل تولید در پیل سوختی، E_{rev} ، به واسطه برگشت ناپذیری های ناشی از اضافه ولتاژ فعال سازی، V_{act} ، اضافه ولتاژ اهمی ناشی از مقاومت داخلی، V_{ohm} ، و اضافه ولتاژ غلظت ناشی از کمبود گاز واکنش دهنده در لایه ی کاتالیستی، V_{conc} ، کاهش می یابد. ولتاژ هر بخش در جریان مشخص، با استفاده از فشار جزئی هیدروژن، اکسیژن، محتوای آب غشاء و دما محاسبه می شود. به عبارت دیگر، ولتاژ خروجی پیل سوختی عبارت است از:

$$V_{seg} = E_{rev} - V_{act} - V_{ohm} - V_{conc} \quad (35)$$

که ولتاژ برگشت پذیر تئوری برابر است با [24]:

$$V_{rev} = 1.229 - 0.85 \times 10^{-3} (T_{cell} - 298.15) + 4.3085 \times 10^{-5} T_{seg} \times \left[\ln(P_{an,H_2,g/m}) + \frac{1}{2} \ln(P_{ca,O_2,g/m}) \right] \quad (36)$$

که فشارهای جزئی هیدروژن، $P_{an,H_2,g/m}$ ، و اکسیژن، $P_{ca,O_2,g/m}$ ، از مدل های لایه ی نفوذ در دو سمت آند و کاتد بدست می آید و T_{cell} دمای سل به کلوین می باشد.

همچنین، اضافه ولتاژهای فعال سازی و اهمی برابرند با [9]:

$$V_{act} = 0.275 + 0.1 [1 - \exp(-12 I_{seg}/A_{seg})] \quad (37)$$

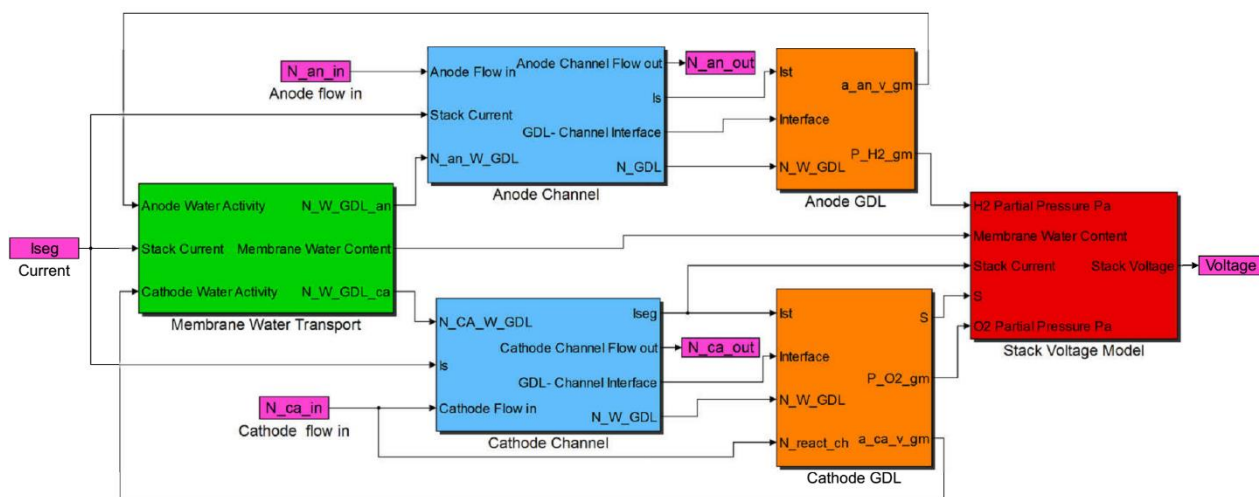


Fig. 2 Simulink environment developed for simulation

شکل 2 محیط سیمولینک ایجاد شده جهت شبیه سازی

سوختی، درصدهای مختلفی از رطوبت در هر یک از ورودی های آند و کاتد در

جدول 2 پارامترهای استفاده شده در شبیه سازی [11]

Table 2 Parameters used in simulation [11]

پارامتر	واحد	مقدار
سطح فعال سل، A_{cell}	cm^2	100
عمق کانال، H_{ch}	mm	1
پهنای کانال، W_{ch}	mm	1.6
پهنای ریب، W_{rib}	mm	1.7
تعداد کانال در هر بخش آند، Z_{an}	---	6
تعداد کانال در هر بخش کاتد حالت اول، Z_{ca}	---	10
تعداد کانال در هر بخش کاتد حالت دوم، Z_{ca}	---	6
طول کانال در هر بخش آند، L_{an}	cm	3.33
طول کانال در هر بخش کاتد حالت اول، L_{ca}	cm	2
طول کانال در هر بخش کاتد حالت دوم، L_{ca}	cm	3.33
ضخامت لایه نفوذ، t_{gdl}	Mm	184
تخلخل لایه نفوذ، ε	---	0.725
چگالی غشاء خشک، ρ_{pem}	$kg\ m^{-3}$	2000
وزن معادل غشاء خشک، M_{pem}	$kg\ mol^{-1}$	1.1

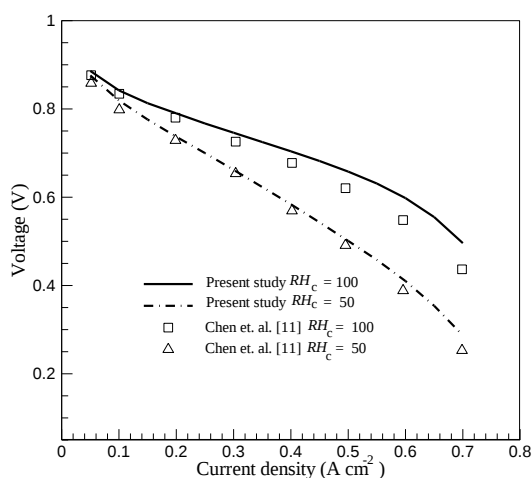


Fig. 3 Comparison of simulation results with Ref. [11]

شکل 3 مقایسه نتایج شبیه سازی انجام شده با نتایج مرجع [11]

بزرگتر بودن ولتاژ آن بخش، $V_{seg,i}$ ، نسبت به ولتاژ متوسط، V_{ave} ، (میانگین ولتاژ خروجی تمامی بخش ها) بصورت زیر انجام می شود:

$$I_{seg,i}^{n+1} = I_{seg,i}^n + \frac{\Delta I_{increased}}{NGE} \quad \text{if } V_{seg,i} > V_{ave} \quad (44)$$

$$I_{seg,i}^{n+1} = I_{seg,i}^n - \frac{\Delta I_{increased}}{NLE} \quad \text{if } V_{seg,i} < V_{ave} \quad (45)$$

که بالا نویس n در این معادلات، n امین مرحله تکرار را نشان می دهد. همچنین، NGE و NLE به ترتیب، تعداد بخشهایی را نشان می دهند که ولتاژ آنها، بیشتر و کمتر از ولتاژ متوسط می باشد.

4- نتیجه گیری و بحث

جهت استخراج منحنی قطبیت، معادلات حاکم در نرم افزار سیمولینک متلب برای چگالی جریان های مختلف حل می شوند. شکل 2 بخش های مختلف ایجاد شده در شبیه سازی و نحوه ی ارتباط آنها با یکدیگر را نشان می دهد. همچنین، از پارامترها و ثوابت مرجع [11] جهت شبیه سازی استفاده شده که مقادیر آنها در جدول 3 ارائه شده است.

به منظور بررسی صحت نتایج، شبیه سازی برای پیل سوختی طرح اول با استوکیومتری 1.2 و 2.5 به ترتیب در دو سمت آند و کاتد صورت گرفته است. همچنین، شرایط فشار خروجی از سل، فشار اتمسفر در نظر گرفته شده است و در هر مرحله از تکرار با محاسبه ی افت فشار در مسیر انتقال واکنشگرها از معادله ی (7)، فشار ورودی گاز در هر سمت به روزرسانی می شود. در شکل 3 منحنی پولاریزاسیون حاصل از تحقیق حاضر با نتایج شبیه سازی چن و همکاران [11] مقایسه شده است که همخوانی کامل نتایج موید صحت و دقت شبیه سازی مطالعه حاضر می باشد. لازم بذکر است که از تعداد 15 بخش جهت شبیه سازی استفاده شده که مشابه تعداد بخش های مرجع [11] می باشد. همچنین، به منظور بررسی اثر تعداد بخش ها شبیه سازی با 30 بخش نیز انجام گرفته که تغییر چندانی در نتایج مشاهده نگردید.

مدیریت آب در پیل سوختی از دو جنبه حایز اهمیت می باشد. از یک طرف، مقدار آب روی رسانندگی غشاء پلیمری و در نتیجه ولتاژ خروجی پیل سوختی موثر بوده و از طرف دیگر، شکل گیری آب مایع موجب برهم زدن توزیع واکنشگرها از کانال به لایه ی نفوذ می گردد که این پدیده روی طول عمر غشاء بسیار تاثیر گذار است. جهت بررسی اثر رطوبت زنی در عملکرد پیل

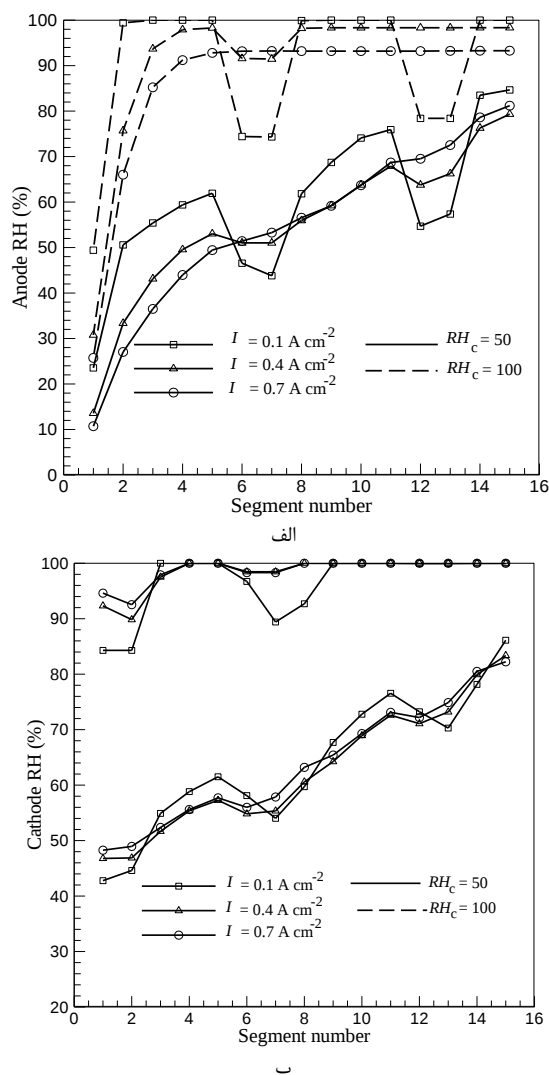


Fig. 5 Humidity distribution in the each segment of the first design in different current density a) anode b) cathode

شکل 5 پخش رطوبت در بخش های مختلف طرح اول در چگالی های مختلف (الف) آند (ب) کاتد

مصرف هیدروژن نسبت به اکسیژن (دو برابر)، رطوبت در سمت آند افزایش یافته و در امتداد کانال از نرخ انتقال کاسته می شود.

به منظور بررسی اثر میدان شارش های بررسی شده روی پخش جریان روی غشاء، درصد جریان تولید شده در هر بخش از رابطه زیر تعریف گردید:

$$\frac{I_{seg}}{I_{cell}} \times 100 \quad (46)$$

شکل 7 پخش جریان روی سطح غشاء در چگالی جریان 0.7 A cm^{-2} برای دو حالت بررسی شده با رطوبت ورودی 50 و 100 در سمت کاتد و رطوبت ورودی 0 در سمت آند را نشان می دهد. در هر دو طرح، با توجه به اینکه در ورودی سمت آند رطوبت وجود ندارد، کمترین درصد جریان تولیدی در سه بخش ابتدایی مشاهده می شود. در حالت اول، اختلاف بین درصد جریان تولید شده در ورودی و خروجی برای رطوبت های ورودی 50 و 100 به ترتیب در حدود 3.24 و 1.57 درصد و در حالت دوم مقدار اختلاف به 3.28 و 1.445 درصد می رسد. این نتایج نشان می دهد که در رطوبت های پایین، غیریکنواختی پخش جریان، در هر دو حالت تقریباً مشابه بوده ولی با افزایش

نظر گرفته شده و نتایج، جهت بررسی اثر میدان شارش در هر دو حالت استخراج می شود.

در شکل 4 اثر تغییرات رطوبت در ورودی کانال های آند و کاتد روی منحنی قطبیت برای دو طرح بررسی شده، نشان داده شده است. در صورتی که در سمت کاتد گازها در شرایط کاملاً مرطوب (رطوبت ورودی 100) وارد پیل سوختی شوند، افزایش رطوبت در سمت آند از 0 به 100 عملکرد پیل سوختی را افزایش خواهد داد اگرچه مقدار آن چشم گیر نمی باشد. اما افزایش رطوبت ورودی در سمت آند در صورتی که در سمت کاتد گاز ورودی اشباع نباشد، موجب افزایش چشم گیر ولتاژ خروجی پیل سوختی خواهد شد که با نتایج منتشر شده توسط سایر محققین، [28,27] همخوانی دارد. به عبارت دیگر، طبق این نتیجه بهتر است در سمت کاتد، همیشه گاز بصورت اشباع وارد کانال شود تا نوسان رطوبت در سمت آند روی خروجی پیل سوختی، تغییرات کمتری ایجاد نماید. همچنین، در حالتی که گاز ورودی به کاتد در حالت اشباع نباشد، عملکرد پیل سوختی در حالت دوم اندکی بهتر بوده که این امر ناشی از افزایش رطوبت گاز در مسیر حرکت داخل کانال خمیده می باشد که افزایش رطوبت در غشاء و کاهش مقاومت اهمی آن را در پی خواهد داشت. میزان افزایش عملکرد در چگالی جریان های بالاتر بیشتر نمایان می باشد. در شرایطی که گاز ورودی در سمت کاتد بصورت اشباع وارد کانال می گردد، رطوبت سمت آند فقط در چگالی جریان بالا در عملکرد، اثر گذاشته که این رفتار در حالت اول در شرایط $RH_a = 0$ بیشتر است.

شکل 5 و شکل 6 پخش رطوبت در کانال های آند و کاتد برای دو طرح بررسی شده را در سه چگالی جریان مختلف برای رطوبت های ورودی 100 در سمت آند و رطوبت های ورودی 50 و 100 در سمت کاتد نشان می دهد. همانگونه که قبلاً اشاره شد، آب بین آند و کاتد طی مکانیزیم های درگ الکترواسمزی و نفوذ جابجا می شود. در طرح اول، بخصوص در چگالی جریان های پایین، انتقال آب از کاتد به آند و بالعکس در طول مسیر وجود داشته و به عبارت دیگر، پخش رطوبت در دو سمت همراه با نوسان می باشد. نوسان رطوبت در ورودی کاتد 50 درصد و در چگالی جریان 0.1 A cm^{-2} بیشتر نمایان می باشد زیرا از یک طرف در چگالی جریان پایین، انتقال آب از آند به کاتد ناشی از درگ الکترواسمزی پایین بوده و از طرف دیگر، در ابتدای کانال آند، رطوبت از کاتد به آند به علت نفوذ به میزان زیادی منتقل شده و با توجه به استوکیومتری پایین تر استفاده شده در سمت آند و بالاتر بودن

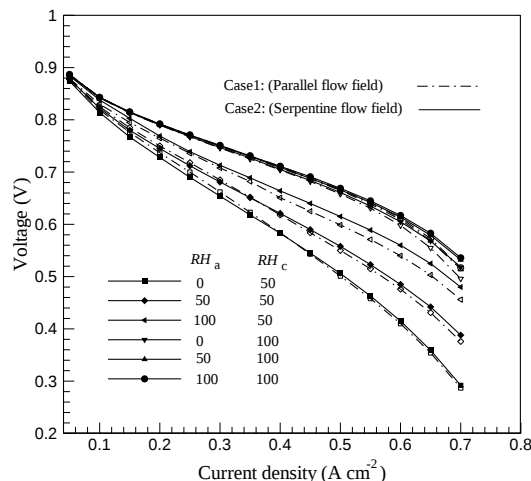


Fig. 4 Effect of the inlet humidity on PEM fuel cell performance

شکل 4 اثر رطوبت ورودی روی عملکرد پیل سوختی پلیمری

و کاتد استفاده شده و در طرح دوم در هر دو سمت میدان شارش خمیده در

$RH_{ca} = 100$			$RH_{ca} = 50$		
6.89	6.56	5.00	5.61	5.13	4.35
6.82	6.80	6.78	6.12	6.37	6.33
6.80	6.80	6.80	7.07	6.94	6.70
6.80	6.80	6.80	7.36	7.46	7.44
6.78	6.78	6.78	7.75	7.73	7.63

الف

$RH_{ca} = 100$			$RH_{ca} = 50$		
6.63	6.33	5.33	5.52	5.07	4.46
6.83	6.81	6.81	5.90	6.26	6.54
6.81	6.83	6.83	7.14	6.97	6.80
6.81	6.81	6.81	7.29	7.43	7.54
6.78	6.78	6.81	7.75	7.69	7.63

ب

Fig. 7 Current density distribution at $I = 0.7 \text{ A cm}^{-2}$ with the inlet cathode humidity 50 % and 100 % and anode 0 % a) first design b) second design

شکل 7 پخش جریان روی سطح غشاء در $I = 0.7 \text{ A cm}^{-2}$ با رطوبت های ورودی کاتد 50 و 100 درصد و آند 0 درصد (الف) حالت اول (ب) حالت دوم

6.64	6.64	6.64	6.65	6.65	6.65
6.64	6.64	6.64	6.65	6.66	6.66
6.68	6.66	6.64	6.67	6.67	6.66
6.69	6.69	6.69	6.67	6.68	6.68
6.69	6.69	6.69	6.68	6.68	6.68

ب

الف

Fig. 8 Current density distribution on MEA of the second design a) $I = 0.4 \text{ A cm}^{-2}$ b) $I = 0.7 \text{ A cm}^{-2}$

شکل 8 پخش جریان روی سطح غشاء طرح دوم (الف) در $I = 0.4 \text{ A cm}^{-2}$ (ب) $I = 0.7 \text{ A cm}^{-2}$

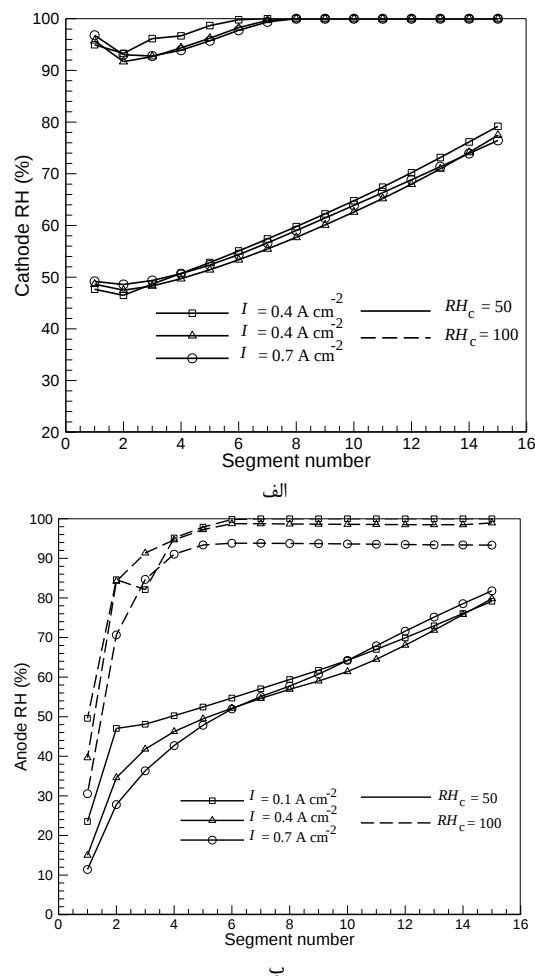


Fig. 6 Humidity distribution in the each segment of the second design in different current density a) anode b) cathode

شکل 6 پخش رطوبت در بخش های مختلف طرح دوم در چگالی جریان های مختلف (الف) آند (ب) کاتد

رطوبت ورودی کاتد و افزایش ولتاژ خروجی سل، پخش جریان در حالت اول غیریکنواختی بیشتری دارد [29]. همچنین، در حالت اول، پخش چگالی جریان رفتار نوسانی از خود نشان می دهد که علت این رفتار، نوسان رطوبت بین دو سمت بوده که تولید جریان در هر بخش را تحت تاثیر قرار می دهد. در حالت دوم، با توجه به افزایش یکنواخت رطوبت در هر بخش، درصد پخش جریان نیز رشد پیوسته ای دارد.

جهت بررسی اثر رطوبت ورودی در پخش جریان، در شکل 8 درصد جریان تولیدی در هر بخش برای شرایط ورودی اشباع برای هر دو سمت در طرح دوم برای دو چگالی جریان متوسط ($I = 0.4 \text{ A cm}^{-2}$) و بالا ($I = 0.7 \text{ A cm}^{-2}$) نشان داده شده است. با توجه به پخش یکنواخت تر رطوبت و واکنشگرها در هر دو چگالی جریان، توزیع یکنواخت جریان روی سطح غشاء ایجاد شده که نشان دهنده اهمیت رطوبت زنی در هر دو سمت، در پخش یکنواخت جریان می باشد.

5- نتیجه گیری

در این مقاله، با توسعه مدلی فشرده در نرم افزار متلب-سیمولینک، پخش رطوبت و جریان در پیل سوختی با دو طرح متفاوت مورد مطالعه قرار گرفت. در طرح اول، از میدان های شارش خمیده و موازی به ترتیب در دو سمت آند

- and prediction of temporal fuel cell voltage behavior during flooding and drying conditions, *Journal of Power Sources*, Vol. 178, No. 1, pp. 207-222, 2008.
- [11] Y. S. Chen, H. Peng, A segmented model for studying water transport in a PEMFC, *Journal of Power Sources*, Vol. 185, No. 2, pp. 1179-1192, 2008.
- [12] V. Liso, S. Simon Araya, A. C. Olesen, M. P. Nielsen, S. K. Kær, Modeling and experimental validation of water mass balance in a PEM fuel cell stack, *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 41, No. 4, pp. 3079-3092, 2016.
- [13] P. Hong, L. Xu, J. Li, M. Ouyang, Modeling and analysis of internal water transfer behavior of PEM fuel cell of large surface area, *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 42, No. 29, pp. 18540-18550, 2017.
- [14] Z. Abdin, C. J. Webb, E. M. Gray, PEM fuel cell model and simulation in Matlab-Simulink based on physical parameters, *Energy*, Vol. 116, No. 1, pp. 1131-1144, 2016.
- [15] A. P. Manso, F. F. Marzo, J. Barranco, X. Garikano, M. Garmendia Mujika, Influence of geometric parameters of the flow fields on the performance of a PEM fuel cell. A review, *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 37, No. 20, pp. 15256-15287, 2012.
- [16] R. W. Fox, A. T. McDonald, *Introduction to Fluid Mechanics*, 6 ed., pp. 310-407, New York: John Wiley & Sons, 2004.
- [17] J. Benitez, *Principles and Modern Applications of Mass Transfer Operations*, 3 ed., pp. 17-37, New Jersey: John Wiley & Sons, 2016.
- [18] T. E. Springer, M. S. Wilson, S. Gottesfeld, Modeling and experimental diagnostics in polymer electrolyte fuel cells, *Journal of the Electrochemical Society*, Vol. 140, No. 12, pp. 3513-3526, 1993.
- [19] J. H. Nam, M. Kaviany, Effective diffusivity and water-saturation distribution in single-and two-layer PEMFC diffusion medium, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 46, No. 24, pp. 4595-4611, 2003.
- [20] W. M. Rohsenow, J. P. Hartnett, Y. I. Cho, *Handbook of Heat Transfer*, pp. 651-732, New York: McGraw-Hill, 1998.
- [21] T. E. Springer, T. Zawodzinski, S. Gottesfeld, Polymer electrolyte fuel cell model, *Journal of the Electrochemical Society*, Vol. 138, No. 8, pp. 2334-2342, 1991.
- [22] T. F. Fuller, J. Newman, Water and thermal management in solid-polymer-electrolyte fuel cells, *Journal of the Electrochemical Society*, Vol. 140, No. 5, pp. 1218-1225, 1993.
- [23] S. Dutta, S. Shimpalee, J. Van Zee, Numerical prediction of mass-exchange between cathode and anode channels in a PEM fuel cell, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 44, No. 11, pp. 2029-2042, 2001.
- [24] J. Larminie, A. Dicks, M. S. McDonald, *Fuel Cell Systems Explained*, 2 ed., pp. 25-43, Chichester: John Wiley & Sons Ltd, 2003.
- [25] G. Squadrito, G. Maggio, E. Passalacqua, F. Lufrano, A. Patti, An empirical equation for polymer electrolyte fuel cell (PEFC) behaviour, *Journal of Applied Electrochemistry*, Vol. 29, No. 12, pp. 1449-1455, 1999.
- [26] H. Xi, *Dynamic Modeling and Control of Planar SOFC Power Systems*, PhD Thesis, Horace H. Rackham School of Graduate Studies, University of Michigan, Michigan, 2007.
- [27] L. Xing, Q. Cai, C. Xu, C. Liu, K. Scott, Y. Yan, Numerical study of the effect of relative humidity and stoichiometric flow ratio on PEM (proton exchange membrane) fuel cell performance with various channel lengths: An anode partial flooding modelling, *Energy*, Vol. 106, No. 1, pp. 631-645, 2016.
- [28] Q. Yan, H. Toghiani, J. Wu, Investigation of water transport through membrane in a PEM fuel cell by water balance experiments, *Journal of Power Sources*, Vol. 158, No. 1, pp. 316-325, 2006.
- [29] X. D. Wang, W. M. Yan, Y. Y. Duan, F. B. Weng, G. B. Jung, C. Y. Lee, Numerical study on channel size effect for proton exchange membrane fuel cell with serpentine flow field, *Energy Conversion and Management*, Vol. 51, No. 5, pp. 959-968, 2010.
- نظر گرفته شد. نتایج مهم به‌دست آمده نشان می‌دهد که:
- با افزایش رطوبت در ورودی پیل سوختی، عملکرد آنها بهبود می‌یابد. در صورتی که گاز بصورت اشباع از سمت آند وارد پیل سوختی شود، رطوبت آند تاثیر زیادی روی عملکرد نخواهد داشت.
 - عملکرد هر دو طرح در رطوبت‌های ورودی مختلف تقریباً یکسان بوده ولی در چگالی جریان‌های بالا، طرح دوم در رطوبت‌های ورودی پایین، عملکرد بهتری از خود نشان می‌دهد. به عبارت دیگر، در طرح دوم، پخش آب بهتری بوجود می‌آید.
 - پخش جریان روی سطح غشاء به رطوبت ورودی وابسته می‌باشد. در پیل‌های سوختی با گازهای ورودی اشباع شده، تعادل رطوبت سریع‌تر در دو سمت غشاء بوجود آمده و لذا پخش جریان در سطح غشاء یکنواخت‌تر می‌گردد. همچنین، در کانال‌های موازی، پخش جریان غیر یکنواخت‌تری ایجاد می‌گردد که نشان دهنده برتری استفاده از کانال‌های خمیده در پیل‌های سوختی از لحاظ پخش جریان و در نتیجه‌ی آن طول عمر بالاتر آنها می‌باشد.
- ### 6- مراجع
- [1] F. Barbir, *PEM fuel cells*, *Fuel Cell Technology*, Eds., pp. 27-51, London: Springer, 2006.
- [2] S. G. Kandlikar, M. L. Garofalo, Z. Lu, Water management in a pemfc: water transport mechanism and material degradation in gas diffusion layers, *Fuel Cells*, Vol. 11, No. 6, pp. 814-823, 2011.
- [3] A. Bazylak, Liquid water visualization in PEM fuel cells: A review, *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 34, No. 9, pp. 3845-3857, 2009.
- [4] H.-W. Wu, A review of recent development: Transport and performance modeling of PEM fuel cells, *Applied Energy*, Vol. 165, No. 1, pp. 81-106, 2016.
- [5] H. Hassanzadeh, S. H. Golkar, M. Barzgary, Modeling of two phase and non-isothermal flow in polymer electrolyte fuel cell, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 2, pp. 313-322, 2015. (In Persian فارسی)
- [6] S. A. Atyabi, E. Afshari, M. Adami, Effects of baffle-blocked flow cathode channel on reactant transport and cell performance of a PEMFC, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 4, pp. 158-166, 2014. (In Persian فارسی)
- [7] R. B. Ferreira, D. S. Falcão, V. B. Oliveira, A. M. F. R. Pinto, Numerical simulations of two-phase flow in proton exchange membrane fuel cells using the volume of fluid method – A review, *Journal of Power Sources*, Vol. 277, No. 1, pp. 329-342, 2015.
- [8] S. T. Revankar, P. Majumdar, *Fuel Cells: Principles, Design, and Analysis*, pp. 457-572, Florida: CRC press, 2014.
- [9] J. T. Pukrushpan, A. G. Stefanopoulou, H. Peng, Control of fuel cell breathing, *IEEE Control Systems*, Vol. 24, No. 2, pp. 30-46, 2004.
- [10] D. A. McKay, J. B. Siegel, W. Ott, A. G. Stefanopoulou, Parameterization