



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

قدیر اسماعیلی\*، مجید اسحق نیموری

استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه تخصصی فناوری‌های 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:

### چکیده

یکی از مهمترین عوامل در کاهش طول عمر پیل‌های سوختی پلیمری، پخش غیریکنواخت جریان در سطح غشاء می‌باشد. از آنجا که میدان شارش، نقش زیادی در پخش واکنشگرها و انتقال آب و در نتیجه پخش، جریان دارد، لذا در این مقاله، با توسعه‌ی مدلی فشرده، پخش آب و جریان در سطح غشاء پیل‌های سوختی پلیمری در دو طرح متفاوت، مورد ارزیابی قرار گرفت. در مدل استفاده شده، میدان شارش به بخش‌های مساوی تقسیم‌بندی شده و ارتباط میان هر بخش با سایر بخش‌ها از طریق میدان شارش استفاده شده در پیل سوختی، ایجاد می‌گردد. میدان شارش سمت آند، در هر دو طرح ماریچ بوده ولی در سمت کاتد در طرح اول از میدان شارش موازی و در طرح دوم از میدان شارش ماریچ استفاده شده‌است. شبیه‌سازی برای رطوبت‌های 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 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 می‌دهد به طوری که در طرح اول در شرایط ورودی اشباع، اختلاف بین درصد جریان تولید شده بین ورودی و خروجی 1.57 درصد می‌باشد که در حالت دوم 1.45 درصد می‌رسد.

پیل سوختی پلیمری  
مدل فشرده  
مدیریت آب  
پخش جریان

## 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 پیل‌های سوختی پلیمری، مدیریت آب در آن‌ها می‌باشد. 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 می‌شود. از طرف دیگر، انباشته شدن آب در لایه‌های مختلف آن نیز مانع انتقال مناسب واکنشگرها به سطح لایه‌ی 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 محل‌های 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

پیل‌های سوختی پلیمری یکی از مهمترین منابع انرژی پاک در سال‌های آتی بشمار می‌رود. از سوی دیگر امکان تولید هیدروژن از منابع انرژی تجدیدپذیر، توجه به آن را در سال‌های اخیر، دوچندان نموده‌است. پیل‌های سوختی از عملکرد ساده‌ای برخوردار بوده و هیدروژن و هوا (یا اکسیژن) به عنوان واکنشگرها در لایه‌ی کاتالیستی غشاء پلیمری واکنش داده و الکتریسیته و آب در آن‌ها تولید می‌گردد. همچنین، قابلیت تولید توان در محدوده چند وات تا چندین مگاوات، امکان استفاده از آن‌ها در کاربردهای مختلفی از جمله نیروی محرکه برای کشتی‌ها و قطارها تا تولید توان، برای سنسورها را میسر نموده‌است. با وجود مزایای متعدد، قیمت بالا و طول عمر پایین، مهمترین موانع در تجاری‌سازی آن‌ها بشمار می‌روند [1].

Please cite this article using:

Q. Esmaili, M. Eshagh Nimvari, Modeling of PEM fuel cells performance using lumped method, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 18, No. 01, pp. 188-198, 2018 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

می‌گردد [2].

هرچند تاکنون روش‌های آزمایشگاهی متعددی [3] جهت بررسی جریان آب داخل کانال و غشاء، مورد استفاده قرار گرفته‌است. ولی پیاده‌سازی شرایط واقعی پیل سوختی در این روش‌های آزمایشگاهی قابل انجام نبوده و لذا این روش، شناخت دقیقی از رفتار آب و به خصوص پخش جریان روی سطح غشاء را نتیجه نمی‌دهند. از این رو، شبیه‌سازی و مدل‌سازی رفتار واکنشگرها و پخش جریان، مورد توجه پژوهشگران زیادی قرار گرفته است. از آنجا که در پیل‌های سوختی پلیمری پدیده‌های متعددی از مقیاس بسیار کوچک در کاتالیست و لایه‌ی نفوذ تا مقیاس بزرگ، در طول کانال و سری روی عملکرد آن‌ها تاثیرگذار می‌باشند، لذا، مدل‌های ارائه شده نیز بسته به میزان در نظر گرفتن جزئیات پدیده‌ها دارای تنوع زیادی بوده و هرکدام از این مدل‌ها براساس فرضیات بکار رفته در آن‌ها، جهت بررسی برخی از این پدیده‌ها مناسب می‌باشند [4]. بطور کلی دو روش مدل‌سازی عددی و صفر بعدی برای پیل‌های سوختی می‌توان در نظر گرفت. از مدل‌های عددی، جهت شبیه‌سازی عملکرد و همچنین، بررسی رفتار جریان آب تولید شده در لایه‌ی نفوذ و کانال استفاده شده است [5,6]. اگرچه اغلب از دینامیک سیالات محاسباتی در طراحی دقیق تک سل و کانال استفاده می‌گردد، ولی این مدل‌ها علیرغم توانایی در بررسی جزئیات، با توجه به حجم محاسباتی بالا از سرعت پاسخ‌دهی مناسبی برخوردار نبوده و لذا در طراحی در سطح سری و یا برای کنترل کل مجموعه، قابل استفاده نمی‌باشند [7]. به همین علت، مدل‌های ساده‌تری توسط محققین ارائه گردیده که از سرعت مناسبی برخوردار بوده و توانایی مطالعه و طراحی سل‌های بزرگ و سری را دارا می‌باشند. در این مدل‌ها بخش‌های مختلف سل توسط مدل‌های صفر بعدی حل شده و پارامترهای تعریف شده در مدل با استفاده از نتایج آزمایشگاهی برای سل یا سری مشخص می‌گردند [8]. این روش‌ها ابزاری مناسب جهت کنترل و طراحی سیستم‌های دارای پیل سوختی مناسب می‌باشند ولی فقط برای پیل سوختی خاص بررسی شده قابل استفاده بوده و فاقد دقت مناسب جهت طراحی می‌باشند. لذا، به منظور شبیه‌سازی پیل‌های سوختی در سطح سری و یا ابعاد بزرگ، دسته‌ی دیگری از مدل‌ها مطرح شده‌اند که ترکیبی از مدل‌های صفر بعدی و عددی می‌باشند. در روش‌های ترکیبی از دقت و سرعت مناسبی برخوردار بوده و لذا ابزار مناسبی برای کاربری‌هایی مانند طراحی سری و عیب‌یابی می‌باشند.

پوکروشین 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. مک‌کی و همکاران [10] نیز با ارائه مدلی فشرده، رفتار دینامیکی تک سل پیل سوختی پلیمری را مطالعه نمودند. در مدل آن‌ها، امکان بررسی اثر شکل‌گیری آب در غشا بر عملکرد پیل‌های سوختی پلیمری وجود دارد اما شرایط داخل کانال، در مدل آن‌ها نیز ثابت در نظر گرفته شد. یانگ و همکاران [11] با استفاده از مدل فشرده و تقسیم‌بندی سطح غشاء به بخش‌های مساوی، عملکرد پیل سوختی با کانال موازی و مارپیچ به ترتیب در دو سمت کاتد و آند را مورد ارزیابی قرار دادند. آنها با حل معادلات بقاء در هر بخش، اثر شکل‌گیری آب در سمت کاتد را روی پخش جریان مورد ارزیابی قرار دادند. در مدل آن‌ها، میزان رطوبت ورودی از سمت آند صفر بوده و شرایط به گونه‌ای تنظیم شد که در سمت آند جریان دوفاز ایجاد نمی‌گردد.

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

مورد بررسی قرار دادند. اگرچه در مدل آن‌ها با در نظر گرفتن پدیده‌های فیزیکی و الکتروشیمیایی نتایج بهتری در بررسی رفتار دینامیکی پیل‌های سوختی پلیمری در مقایسه با مدل‌های قبلی بدست آمد اما در شرایط پایدار، نتایج آنها اختلاف چندانی با نتایج مدل‌های قبلی نشان نمی‌دهد. در تحقیق دیگری، هنگ و همکاران [13] نیز با ارائه مدلی صفر بعدی، عملکرد پیل‌های 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 می‌باشد. ضرایب استفاده شده در مدل نیز از نتایج آزمایشگاهی استخراج گردید.

آبدین و همکاران [14] با استفاده از نرم‌افزار سیمولینک متلب، از مدلی فشرده جهت بررسی عملکرد پیل سوختی پلیمری استفاده نمودند. اگرچه در مطالعه آن‌ها، مدلی یک‌بعدی با سرعت بالا و دقت مناسب جهت پیش‌بینی عملکرد پیل‌های سوختی پلیمری ارائه گردید، اما چگالی جریان در سطح غشاء، ثابت فرض شده و همچنین اثرات کانال، در مدل لحاظ نشده‌است. مطالعه تحقیقات پیشین، نشان می‌دهد که میدان شارش، یکی از مهمترین عوامل تاثیرگذار در دفع آب و پخش یکنواخت گاز، روی سطح غشاء می‌باشد [4]. از میان طرح‌های مختلف مطرح شده برای میدان شارش، کانال‌های مارپیچ با توجه به سادگی و عملکرد مناسب، متداول‌ترین نوع میدان شارش به حساب می‌روند [15] که در پژوهش‌های قبلی از مدل‌سازی به روش فشرده برای میدان شارش مارپیچ، در هر دو سمت استفاده نشده است. در این پژوهش، با استفاده از مدلی فشرده، عملکرد پیل‌های سوختی پلیمری با میدان شارش مارپیچ، مورد بررسی قرار گرفته‌است. در مدل توسعه داده شده، با تقسیم‌بندی سطح فعال به بخش‌های مساوی اثر، شکل‌گیری جریان دوفاز و تغییرات واکنشگر در طول کانال نیز قابل ارزیابی می‌باشد. بررسی پخش جریان روی سطح غشاء برای میدان شارش مطالعه شده، نشان می‌دهد که استفاده از میدان شارش مارپیچ، پخش یکنواخت‌تری را نتیجه می‌دهد.

## 2- معادلات حاکم

در مدل توسعه داده شده از روش ارائه شده در مرجع [11] جهت شبیه‌سازی استفاده شده‌است. در این مدل، برای گرفتن ویژگی‌های توزیع شده پیل سوختی پلیمری، سطح فعال آن‌ها به چندین بخش تقسیم می‌شود. بخش‌های مختلف با توجه به میدان‌های جریان به یکدیگر متصل شده و ورودی‌های هر بخش، خروجی‌های بخش قبلی می‌باشند. خواص واکنشگر/غشا و واکنش در هر بخش، یکنواخت فرض شده و از مدل فشرده برای شبیه‌سازی رفتار جریان واکنشگرها و آب استفاده می‌شود. همانطور که در مقدمه اشاره شد، در مرجع [11] از میدان شارش خمیده در سمت آند و میدان موازی در سمت کاتد استفاده شده‌است اما در این پژوهش از میدان شارش خمیده در هر دو سمت استفاده می‌شود. شکل 1 نحوه ارتباط بخش‌های مختلف را در طرح 1 (میدان شارش خمیده در سمت آند و موازی در سمت کاتد) و طرح 2 (میدان شارش مارپیچ در هر دو سمت) نشان می‌دهد.

به منظور ساده سازی مدل فرضیات زیر استفاده گردید:

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

در لایه‌های نفوذ گاز در دو سمت آند و کاتد نیز از مدل غشاء محاسبه می‌گردد.

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، معادله‌ی (6) به شکل معادله‌ی (7) تبدیل می‌شود:

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

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

## 2-2- لایه‌ی نفوذ گاز

لایه‌ی نفوذ گاز، نقش انتقال واکنشگرها و آب را بین کانال و لایه‌ی کاتالیستی دارا می‌باشد. همچنین، الکترون‌ها نیز از طریق آن جابجا می‌شوند. از آنجا که لایه‌ی نفوذ گاز یک ماده متخلخل می‌باشد، لذا اثر تخلخل در فرایند انتقال گاز و آب در نظر گرفته می‌شود. علاوه بر این، آب در لایه‌ی نفوذ گاز می‌تواند 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 لایه‌های نفوذ آب و گاز منتقل می‌گردد، اما با شکل‌گیری آب (حالت اشباع) آب بصورت مایع در کانال و لایه‌ی نفوذ، ظاهر می‌شود و آب تولید شده در لایه کاتالیستی از طریق لایه‌ی نفوذ گاز به شکل مایع انتقال خواهد یافت. وجود آب مایع در لایه‌ی نفوذ نه تنها باعث مقاومت بیشتر در برابر نفوذ گاز می‌شود، بلکه بخشی از سطوح فعال لایه کاتالیست را نیز پوشش می‌دهد.

معادله استفان-ماکسول برای توصیف نفوذ مخلوط‌های گازی چند جزئی، در لایه‌ی نفوذ گاز به کار می‌رود [17]. برای نفوذ گاز  $n$  جزئی از میان محیط با تخلخل متوسط، گرادیان کسر مولی مولفه‌های  $i$  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 می‌شود [18]:

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

که  $\varepsilon$  و  $S$  به ترتیب، درجه‌ی اشباع و ضریب تخلخل لایه‌ی نفوذ گاز می‌باشند. تاثیر تخلخل بر ضریب نفوذ با چندجمله‌ای بصورت معادله (10) تقریب زده می‌شود:

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

وجود آب، مایع سطح نفوذ در لایه‌ی نفوذ گاز را کاهش می‌دهد و اثر آن معمولاً به صورت تابع نرمال شده مدل می‌شود:

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

که  $m$  مقدار ثابت بوده و در این تحقیق مقدار آن 2 در نظر گرفته می‌شود [19]. لایه‌ی نفوذ گاز آند شامل هیدروژن و بخار آب می‌باشد. 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 می‌باشد.

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

هر بخش شامل زیر مدل‌های کانال و لایه‌ی نفوذ گاز در آند و کاتد،

غشاء و الکتروشیمی برای محاسبه‌ی ولتاژ می‌باشد و از طریق شرایط مرزی در فصل مشترک، به یکدیگر مرتبط می‌گردند. در ادامه، معادلات حاکم بر هر یک از این بخش‌ها مورد بررسی قرار می‌گیرد.

## 2-1- کانال

از مدل‌سازی کانال، جهت محاسبه‌ی دبی مولی گازها و فشار در خروجی هر بخش استفاده می‌شود. به منظور محاسبه‌ی 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 نشان‌دهنده‌ی اکسیژن و هیدروژن در سمت کاتد و آند می‌باشد. همچنین، ضریب  $n$  برای واکنش هیدروژن برابر 2 و برای واکنش اکسیژن برابر 4 می‌باشد. مقدار دبی مولی آب

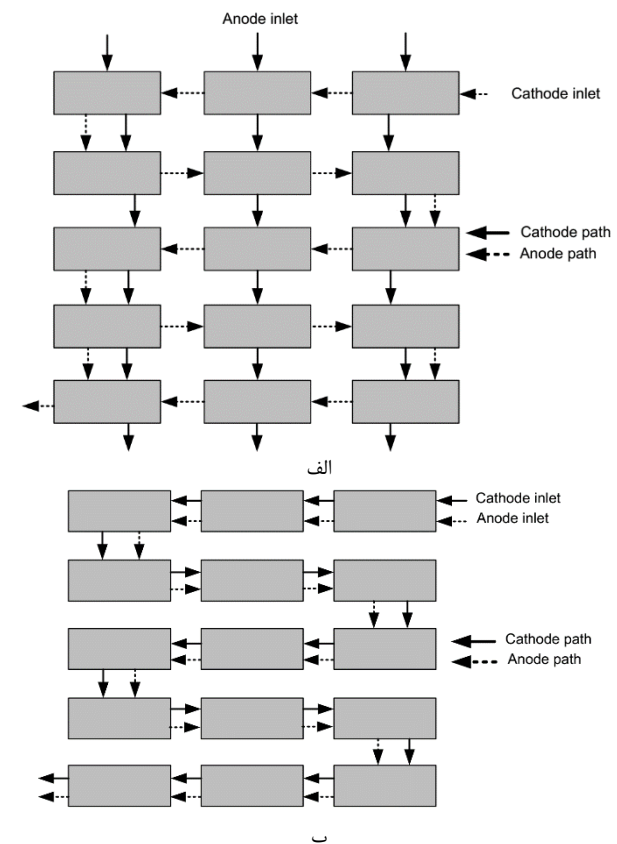


Fig. 1 Schematic of connection of each segment in simulation a) first design b) second design

شکل 1 شماتیک ارتباط بخش‌های مختلف در شبیه‌سازی (الف) طرح اول (ب) طرح دوم

در شرایط اشباع، در سمت آند، از آنجا که کسر مولی بخار آب ثابت است، کسر مولی هیدروژن از معادله‌ی (13) محاسبه می‌شود. در سمت کاتد از آنجا که گرادینان کسر مولی آب برابر صفر می‌باشد، فقط معادله‌ی (14) حل خواهد شد.

در شرایط اشباع، در داخل لایه‌ی نفوذ گاز، آب مایع توسط فشار مویینگی 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 لایه‌ی نفوذ گاز می‌باشند.  $\theta_c$  زاویه تماس و  $K$  نفوذپذیری لایه‌ی نفوذ گاز بوده و هر دو از ویژگی‌های لایه‌ی نفوذ گاز می‌باشند. مقدار کشش سطحی،  $\sigma$ ، برای آب - هوا  $0.0625 \text{ Nm}^{-1}$  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 معادله‌ی (23) تعریف می‌شود.

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

در معادله‌ی (23)،  $s_{im}$  درجه‌ی اشباع ساکن لایه‌ی نفوذ گاز بوده و مقدار آن برابر با 0.1 انتخاب می‌شود [19]. جریان مایع از طریق لایه‌ی نفوذ گاز در زیر کانال، توسط فشار مویینگی بیان می‌شود [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 آن‌ها در جدول 1 آورده شده‌است. در حالت پایا،  $\dot{N}_{w,gdl}$  برابر با شار خالص آب از آند به کاتد بوده و با مدل غشاء محاسبه می‌شود. لذا، با حل معادله‌ی (24) می‌توان درجه‌ی اشباع در لایه‌ی 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 می‌گردد. انتقال پروتون از سمت آند به کاتد همراه با کشیده شدن آب از آند به کاتد می‌باشد 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،  $\lambda_{pem}$  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 لایه‌ی نفوذ گاز [11]

**Table 1** Parameters used in gas diffusion layer [11]

پارامتر	واحد	مقدار
چگالی آب مایع، $\rho_w$	$\text{kg/m}^3$	1000
نفوذپذیری مطلق، $K$	$\text{m}^2$	$1 \times 10^{-8}$
نفوذپذیری نسبی، $K_{rw}$	---	S
لزجت دینامیکی بخار آب، $\mu_w$	$\text{Ns m}^{-2}$	$4 \times 10^{-4}$

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

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

در معادله‌ی (13)،  $\dot{N}_{v,gdl}$ ، شار مولی آب در لایه‌ی نفوذ بوده و مقدار آن از مدل غشاء پلیمری محاسبه می‌شود. شار مولی هیدروژن نیز برابر با نرخ هیدروژن مورد نیاز جهت انجام واکنش بوده که تابعی از جریان، در هر بخش می‌باشد. از آنجا که در سمت کاتد هوای مرطوب در نظر گرفته شده‌است، لذا با استفاده از معادله‌ی (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 محاسبه‌ی 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 لایه‌ی 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 لایه‌ی کاتالیستی برابر صفر می‌باشد. با دانستن کسر مولی، بخار آب در فصل مشترک غشاء/لایه‌ی نفوذ گاز، می‌توان فعالیت آب را در دو طرف غشاء از معادله‌ی (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، می‌توان فشار جزئی آن‌ها را در فصل مشترک غشاء/لایه‌ی نفوذ گاز محاسبه نمود، که پارامترهایی مهم جهت محاسبه ولتاژ در هر بخش می‌باشند.

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

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

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

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

که  $D_{ij}$  ضریب نفوذ مولفه‌ی  $i$  در جریان گاز  $z$  می‌باشد. برای جریان آرام و شرایط سطح با دمای ثابت در پیل سوختی، عدد شروود ثابت و برابر با 3.21 می‌باشد [20].

هنگامی که فشار بخار به فشار اشباع می‌رسد، میعان اتفاق می‌افتد. تحت این شرایط، تمام آب اضافه تولید شده در لایه کاتالیست کاتد به شکل مایع ظاهر می‌شود. برای شرایط اشباع، فرض می‌شود فشارهای بخار در کانال و در لایه‌ی نفوذ گاز هر دو برابر با فشار بخار آب اشباع می‌باشند. فشار بخار متناسب با کسر مولی است، بنابراین کسر مولی بخار آب در لایه‌ی نفوذ گاز برابر با کسر مولی بخار اشباع می‌باشد:

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

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

مقاومت داخلی هر بخش،  $R_{seg}$ ، مجموع همه مقاومتهای داخلی در مسیر انتقال الکترون ناشی از لایه‌ی 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 لایه‌ی نفوذ گاز، از مقاومت آن‌ها صرف‌نظر شده و بنابراین فقط مقاومت غشاء در این مدل در نظر گرفته می‌شود که از معادله زیر بدست می‌آید:

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

که  $\sigma_{pem}$  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 می‌شوند. اضافه ولتاژ غلظت در چگالی جریان بالا اثر گذار بوده و بصورت تابعی از چگالی جریان،  $i_{seg}$ ، و درجه‌ی اشباع آب،  $s$ ، از معادله‌ی تجربی (42) محاسبه می‌شود [25]:

$$V_{conc} = -0.75 i_{seg}^2 \ln \left( 1 - \frac{i_{seg}}{1.2 (1-s)} \right) \quad (42)$$

### 3- الگوریتم حل

همانطور که در بخش 2 اشاره شد، به منظور شبیه‌سازی، ابتدا سطح سل به بخش‌های کوچکتری تقسیم شده و از خروجی هر بخش به عنوان ورودی بخش بعدی استفاده خواهد شد. در واقع، تفاوت میان میدان‌های شارش مختلف نحوه‌ی ارتباط میان هر یک از این بخش‌ها به یکدیگر می‌باشد. در هر یک از بخش‌ها، معادلات (1) تا (42) در قالب شش زیر مدل، در محیط متلب-سیمولینک حل می‌گردند که در شکل 2 ارتباط میان هر یک از زیرمدل‌ها نشان داده شده‌است. با توجه به اینکه پس از حل معادلات حاکم تمامی بخش‌ها، ولتاژ خروجی از تمامی بخش‌ها باید یکسان باشد، لذا جهت یکسان‌سازی ولتاژ خروجی، نیاز به تنظیم پخش جریان در هر یک از بخش‌ها می‌باشد. در نتیجه، پس از محاسبه‌ی ولتاژ خروجی تمامی بخش‌ها، 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 بخش‌ها در نظر گرفته شده و سپس، ولتاژ خروجی از هر یک از آنها محاسبه خواهد شد. با توجه به حدس اولیه‌ی انجام شده برای جریان‌های 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 جریان‌های هر بخش می‌باشد. 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 جریان‌های هر مرحله، از اختلاف بیشترین و کمترین ولتاژ بخش‌ها بدست می‌آید:

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

که  $k$  ضریب ثابت جهت کنترل سرعت همگرایی می‌باشد. با استفاده از  $\Delta I$  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 می‌باشد. اختلاف غلظت بخار آب، در دو سمت، سبب نفوذ بخار آب شده که مقدار آن از رابطه‌ی (28) محاسبه می‌شود:

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

که  $t_{pem}$  ضخامت غشاء و  $C_w$  غلظت آب در دو سمت آند و کاتد بوده که از رابطه‌ی زیر محاسبه می‌شود [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  $\rho_{pem}$  و  $M_{pem}$  به ترتیب چگالی و غلظت غشاء می‌باشد. 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  $K_{\lambda}$  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 لایه‌ی کاتالیستی سمت کاتد می‌باشد. لذا، مقدار آب ورودی به لایه‌ی 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 لایه‌ی کاتالیستی برابر است با:

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

### 2-4- محاسبه ولتاژ هر بخش

ولتاژ برگشت‌پذیر تئوری قابل تولید در پیل سوختی،  $E_{rev}$ ، به واسطه برگشت‌ناپذیری‌های ناشی از اضافه ولتاژ فعال‌سازی،  $V_{act}$ ، اضافه ولتاژ اهمی ناشی از مقاومت داخلی،  $V_{ohm}$ ، و اضافه ولتاژ غلظت ناشی از کمبود گاز واکنش‌دهنده در لایه‌ی کاتالیستی،  $V_{conc}$ ، کاهش می‌یابد. ولتاژ هر بخش در جریان مشخص، با استفاده از فشار جزئی هیدروژن، اکسیژن، محتوای آب غشاء و دما محاسبه می‌شود. به عبارت دیگر، ولتاژ خروجی پیل سوختی عبارت است از:

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

که ولتاژ برگشت‌پذیر 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 مدل‌های لایه‌ی نفوذ در دو سمت آند و کاتد بدست می‌آید و  $T_{cell}$  دمای سل به کلون می‌باشد.

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

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

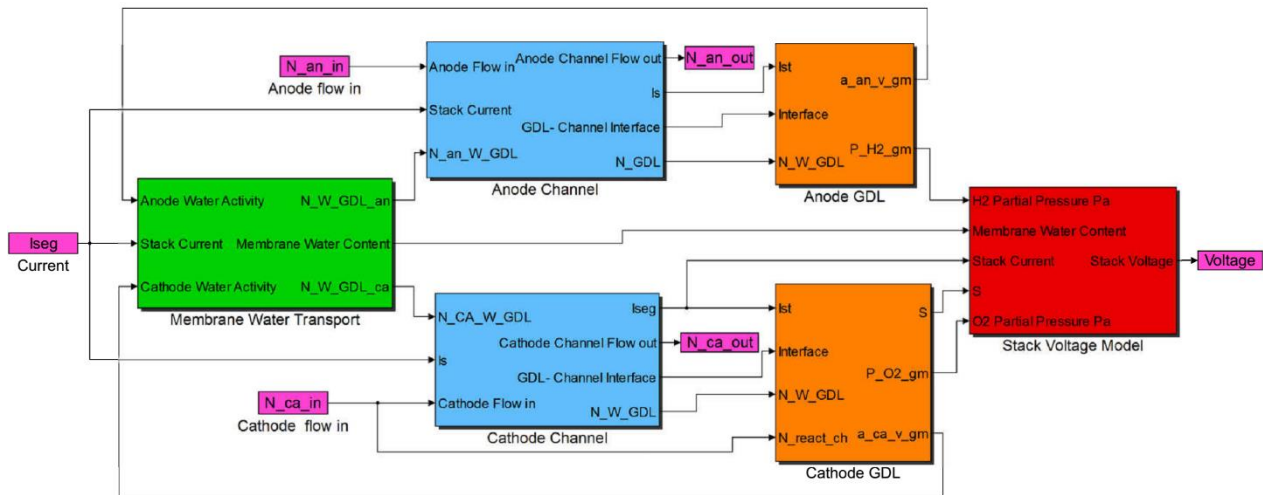


Fig. 2 Simulink environment developed for simulation

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]

مقدار	واحد	پارامتر
100	cm <sup>2</sup>	A <sub>cell</sub> سطح فعال سل
1	mm	H <sub>ch</sub> عمق کانال
1.6	mm	W <sub>ch</sub> پهنای کانال
1.7	mm	W <sub>rib</sub> پهنای ریب
6	---	Z <sub>an</sub> تعداد کانال در هر بخش آند
10	---	Z <sub>ca</sub> تعداد کانال در هر بخش کاتد حالت اول
6	---	Z <sub>ca</sub> تعداد کانال در هر بخش کاتد حالت دوم
3.33	cm	L <sub>an</sub> طول کانال در هر بخش آند
2	cm	L <sub>ca</sub> طول کانال در هر بخش کاتد حالت اول
3.33	cm	L <sub>ca</sub> طول کانال در هر بخش کاتد حالت دوم
184	Mm	t <sub>gdl</sub> ضخامت لایه نفوذ
0.725	---	ε تخلخل لایه نفوذ
2000	kg m <sup>-3</sup>	ρ <sub>pem</sub> چگالی غشاء خشک
1.1	kg mol <sup>-1</sup>	M <sub>pem</sub> وزن معادل غشاء خشک

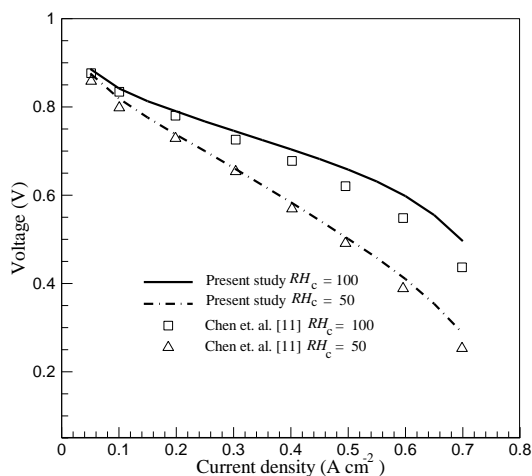


Fig. 3 Comparison of simulation results with Ref. [11]

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:

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

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

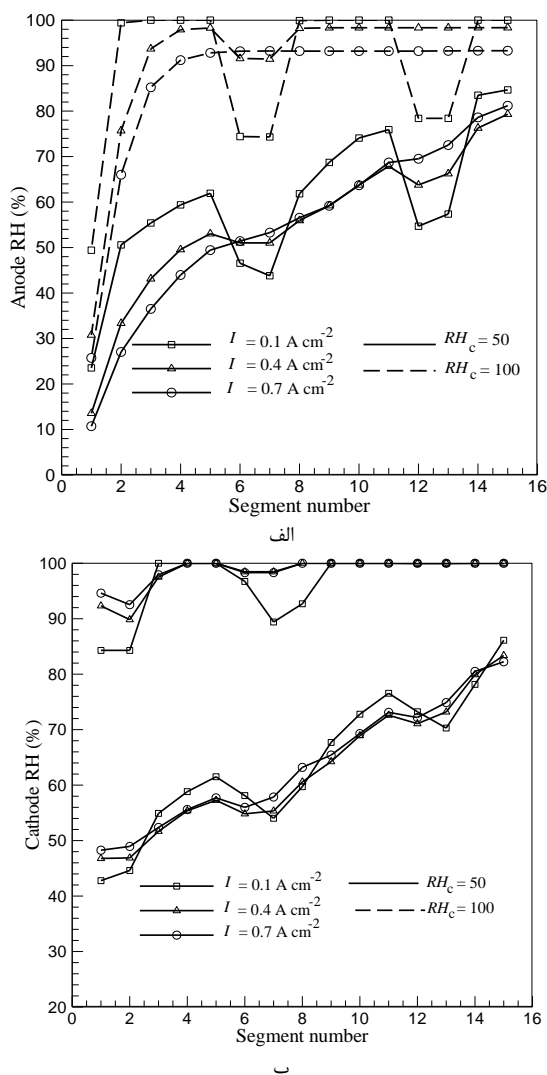
که بالابویس  $n$  در این معادلات،  $n$  امین مرحله تکرار را نشان می دهد. همچنین،  $NGE$  و  $NLE$  به ترتیب، تعداد بخشهایی را نشان می دهند که ولتاژ آنها، بیشتر و کمتر از ولتاژ متوسط می باشد.

#### 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 نگردد.

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 جریان 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:

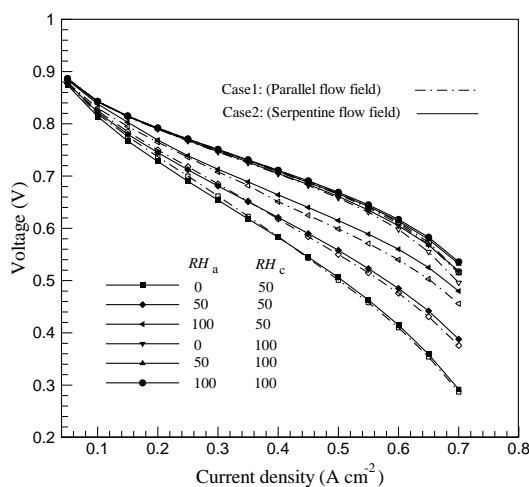
$$\frac{I_{\text{seg}}}{I_{\text{cell}}} \times 100 \quad (46)$$

شکل 7 پخش جریان روی سطح غشاء در چگالی جریان  $0.7 \text{ A cm}^{-2}$  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.

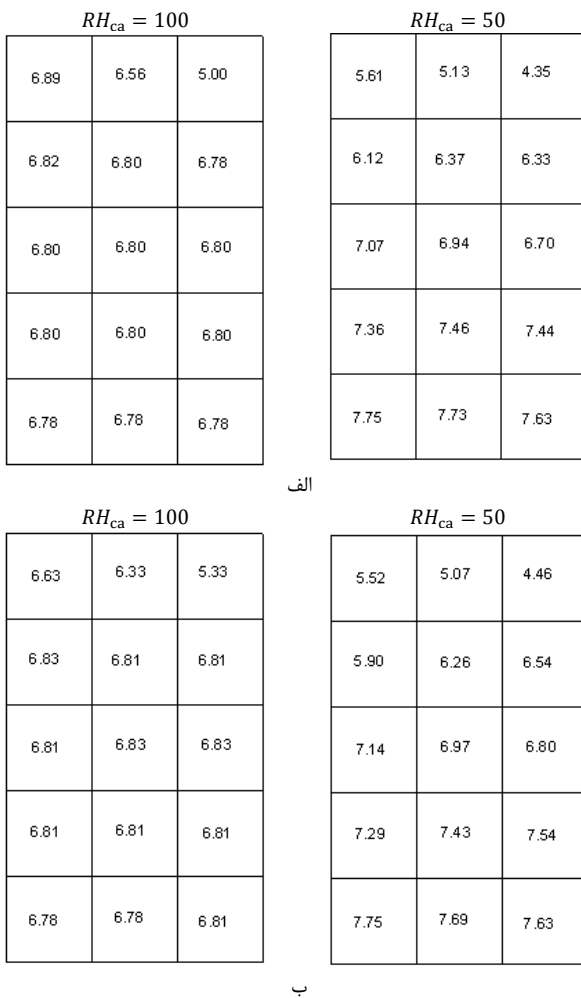
شکل 5 و شکل 6 پخش رطوبت در کانال های آند و کاتد برای دو طرح بررسی شده را در سه چگالی جریان مختلف برای رطوبت های ورودی 100 در سمت آند و رطوبت های ورودی 50 و 100 در سمت کاتد نشان می دهد. همانگونه که قبلاً اشاره شد، آب بین آند و کاتد طی مکانیزیم های درگ الکترواسمزی و نفوذ جابجا می شود. در طرح اول، بخصوص 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  $0.1 \text{ A cm}^{-2}$  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

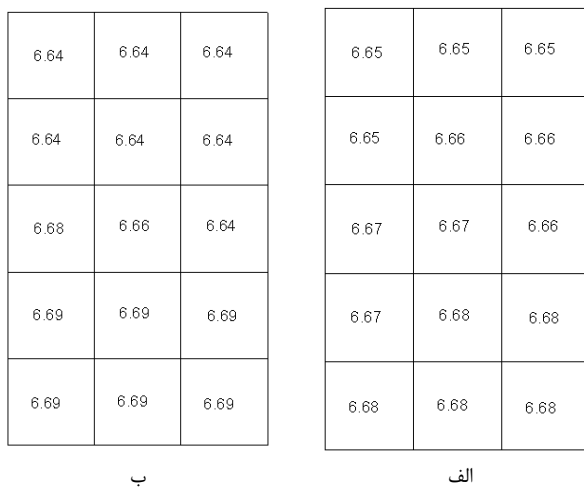
شکل 4 اثر رطوبت ورودی روی عملکرد پیل سوختی پلیمری

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



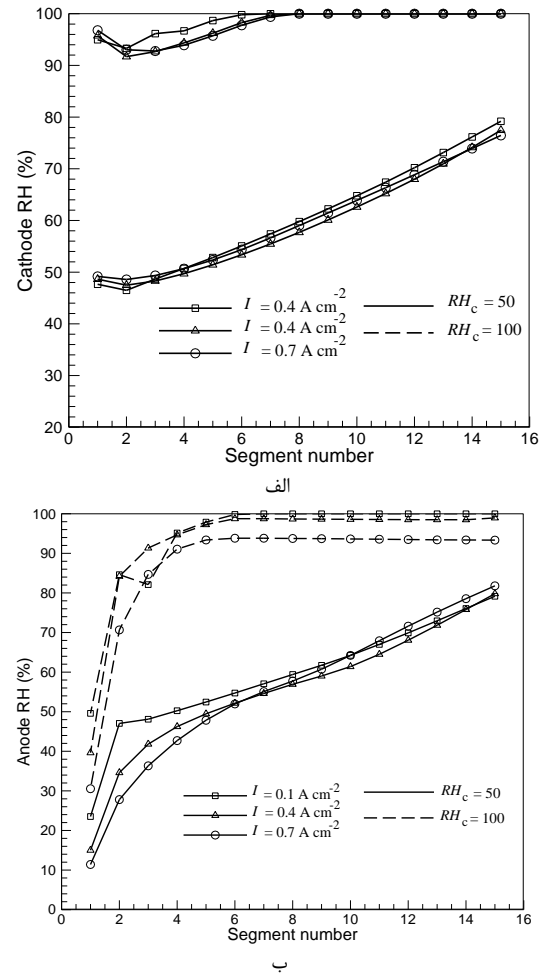
**Fig. 7** Current density distribution at  $I = 0.7 \text{ A cm}^{-2}$  with the inlet cathode humidity 50 % and 100 % and anode 0 % a) first design b) second design

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



**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 به دست 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 دهنده‌ی 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