



## تاثیر کانال‌های گاز و پیکربندی لایه‌های انتشار گاز بر روی عملکرد غشای الکترولیتی پلیمر سلول سوختی

علی شیخ محمدی<sup>۱</sup>، ایرج میرزایی<sup>۲</sup>، نادر پور محمود<sup>۲</sup> و نیما احمدی<sup>۳\*</sup>

<sup>۱</sup> دانشجوی دکترا، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران

آستاد، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران

آستادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه فنی حرفه‌ای شهید بهشتی، ارومیه، ایران

مقاله مستقل، تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۳/۱۲؛ تاریخ بازنگری: ۱۳۹۸/۰۵/۰۹؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۰۷/۱۴

### چکیده

در پژوهش حاضر روی کانال‌های گاز و پیکربندی لایه‌های انتشار گاز و تاثیر آنها روی عملکرد غشاء الکترولیتی پلیمر سلول سوختی توجه شده است. در ابتدا اثر برجسته کردن لایه نفوذ گاز مورد مطالعه قرار می‌گیرد. به این منظور، شعاع بر جسته به تدریج افزایش می‌یابد. عملکرد مطلوب در شعاع  $R=0/45\text{mm}$  به دست آمده است. علاوه بر این سرعت ورودی جریان گاز بررسی شده است. نتایج نشان می‌دهد، زمانی که سرعت ورودی جریان گاز تقریباً روی  $0/2$  تنظیم می‌شود، میزان نفوذ گونه‌ها بصورت بهینه انجام می‌شود؛ همچنین تاثیر میزان ارتفاع کانال‌ها برای پیدا کردن ارتفاع مطلوب نیز، مورد بررسی قرار گرفته است. مشخص شده است که عملکرد بالاتر وقتی به دست می‌آید که ارتفاع کانال حدود  $h=1\text{mm}$  و  $R=0/45\text{mm}$  باشد. نتایج نشان می‌دهد که با ایجاد برجستگی در لایه نفوذ گاز، چگالی جریان خروجی افزایش می‌یابد. برای تایید اعتبار نتایج عددی، مجموعه‌ای از آزمایش‌های تجربی انجام گرفته است که مطابقت مطلوبی بین آنها وجود دارد.

کلمات کلیدی: لایه نفوذ گاز؛ پیل سوختی پلیمری؛ شبیه سازی عددی؛ پیکربندی هندسی.

## Influence of Gas Channels and Gas Diffusion Layers Configuration on the Performance of Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell

A. Sheikhmohammadi<sup>1</sup>, I. Mirzaee<sup>2</sup>, N. Pormahmod<sup>2</sup>, N. Ahmadi<sup>3,\*</sup>

<sup>1</sup> Ph.D. Student, Department of Mechanical engineering, Urmia University, Urmia, Iran.

<sup>2</sup> Professor, Department of Mechanical engineering, Urmia University, Urmia, Iran.

<sup>3</sup> Assistant Professor, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Shaheed Beheshti, Technical and Vocational University (TVU), Urmia, Iran.

### Abstract

In this work, it is focused on the configurations of Gas Diffusion Layers and their influences on the performance of Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell. At first, effect of prominent GDLs is studied. For this purpose, radius (R) of prominences is grown gradually. The optimal performance is obtained in the  $R=0.45$ . In addition, the inlet velocity of gas flow is surveyed. The results indicates that when the inlet velocity of gases is set about 0.2 m/s, the species diffusion is optimized. Also, the height of channels is investigated to find out the optimal channel height. It is found that the higher performance is achieved in channel height about  $h=1\text{mm}$  and  $R=0.45\text{mm}$ . The number of prominences on GDLs is investigated as the last parameter. The results demonstrates that by rising the number of prominences, output current density is grown.

To validating numerical results, a set of experimental tests is carried out, which is seen favorable accordance between them. Moreover, the results of base model, has been compared with the result of published papers.

**Keywords:** Gas Diffusion Layer; PEMFC; Numerical Simulation; Geometrical Configuration; Prominence.

\* نویسنده مسئول؛ تلفن: ۰۹۳۶۴۵۰۸۴۱۴؛ فکس: ۰۴۴۳۳۳۷۰۸۵۷

آدرس پست الکترونیک: [nima.ahmadi.eng@gmail.com](mailto:nima.ahmadi.eng@gmail.com)

## ۱- مقدمه

انرژی یکی از نیازهای اساسی جوامع بشری است. بخش اصلی از این نیاز، توسط سوخت‌های فسیلی تامین می‌شود. با این حال، با توجه به آلودگی سوخت‌های فسیلی و اتمام آنها در آینده، دیگر منابع انرژی مورد توجه قرار می‌گیرند، آنهایی که تجدید پذیر می‌باشند، مانند انرژی باد، انرژی توده زیستی، انرژی خورشیدی، انرژی هیدروژن و غیره... در میان منابع ذکر شده از انرژی‌های تجدید پذیر، انرژی هیدروژن یکی از بهترین کاندیدها برای منابع انرژی آینده بشریت به دلیل فراوانی هیدروژن است. انرژی هیدروژن در دستگاه‌های سلول سوختی می‌تواند به الکتریک تبدیل شود. از میان سلول‌های سوختی مختلف، سلول سوختی غشاء الکترولیتی پلیمر به عنوان منبع قدرت آینده، به علت تراکم بیشتری که نسبت به بقیه دارد، انتخاب مطلوب‌تری است. در این نوع سلول سوختی، یک لایه باریک از پلیمر به عنوان الکترولیت استفاده می‌شود. در پیل سوختی پلیمری، پروتون‌ها حول غشاء حرکت می‌کنند که بین لایه‌های کاتالیزور و آنود و کاتود قرار داد و به مناطق واکنش رسیده است [۱]. از کاربر اولیه این نوع سلول سوختی، می‌توان به کبریت اشاره کرد که از غشاء کاتیونی در سلول‌های سوختی استفاده می‌کند [۱]. با این حال در میان الکترولیت‌هایی که در پیل سوختی پلیمری استفاده می‌شود، نفیون، دارای بهترین عملکرد است. از اولین شبیه‌سازی عددی برای پیل سوختی پلیمری کار دوتا و همکاران می‌تواند در نظر گرفته شود [۲]. آنها یک مدل عددی سه بعدی برای پیل سوختی پلیمری ارائه دادند. برینگ و همکارانش [۳]، یک مدل غیر ایزوترمال سه بعدی ارائه دادند. این مدل می‌تواند اثرات پارامترهای مختلف مانند دما، فشار، ضخامت و تخلخل لایه نفوذ گاز بر عملکرد پیل سوختی پلیمری را مدل‌سازی کند. در تجزیه و تحلیل گذشته برخی از آزمایش‌ها و شبیه‌سازی انجام شده تا تاثیر پیکربندی هندسی روی پیل سوختی پلیمری را مدل‌سازی کنند. احمدی و همکارانش [۴]، شکل (فرم) ورودی کانال گاز را مطالعه کردند. آنها دریافتند که شکل مستطیلی برای ورودی کانال بهتر از اشکال دیگر است. رضازاده و همکاران [۵ و ۶]، ضخامت لایه نفوذ گاز به عنوان یک پارامتر قابل توجه بر عملکرد پیل سوختی پلیمری مدل‌سازی کرده‌اند. کاهش ضخامت لایه نفوذ گاز موجب می‌شود که مقاومت

هدایت یونی کاهش یابد؛ بنابراین تراکم جاری فصلی، رشد می‌کند. افزایش می‌یابد.

احمدی و همکارانش [۷ و ۸]، ردیابی کانال گاز، شانه هندسی را بر عملکرد سلول سوختی، مورد بررسی قرار دادند. در این کار، آنها نشان دادند که شکل ورودی متوازی الاضلاع به دلیل عدم یکنواختی حمل و نقل گونه‌ها، عملکرد پایینی دارد. علاوه بر این آنها به بررسی اثر برجسته مستطیلی لایه نفوذ گاز به صورت عددی پرداختند. نتایج نشان داد که پیدا کردن این برجسته‌ها، باعث افزایش بهره‌وری پیل سوختی پلیمری شد.

یکی دیگر از ضرورت این نوع سلول سوختی، مدیریت آب در مجموعه اکترو و غشاء چون پروتون‌ها در حول غشا به وسیله مولکول‌های آب حرکت می‌کنند، کمبود مقدار آب توانایی غشا در هدایت یونی را کاهش می‌دهد. بر خلاف انتظار اگر مقدار آب، مخصوصاً در سمت کاتد بیش از حد مورد نظر باشد، کاهش غلظت گونه‌ها رخ خواهد داد. لی و چول [۹]، اولین مدل پویای محاسباتی را ارائه دادند که می‌توانست شبیه سازی حمل و نقل آب در پیل سوختی پلیمری را داشته باشد. کیم و همکارانش [۱۰]، عملکرد پیل سوختی پلیمری را با معرفی یک لیست نوآورانه و تولید لایه‌های کاتالیزور بهبود بخشیدند. آنها همچنین اثر سمی کربن و مونوکسید را در پیل سوختی پلیمری مورد بررسی قرار دادند. در چند سال گذشته، چند مدل عددی جدید و نوآورانه برای شبیه‌سازی عملیات پیل سوختی پلیمری پیشنهاد شده است. اکبری و همکارانش [۱۱] رفتار قطر، آب را که در سمت کاتد شکل گرفته است با استفاده از روش لیتیس بولتزنم مورد بررسی قرار دادند. کارال و همکارانش [۱۲]، روش عنصر محدود را برای مدل توده پیل سوختی پلیمری انجام دادند. نتایج آنها نشان داد که روش عنصر محدود یک راه موثر برای شبیه سازی مجموعه اکترو و غشاء در کارهای آینده است. یی و همکارانش [۱۳]، تاثیر افزایش نفوذپذیری صفحه دو قطبی را بر تراکم چگالی جریان خروجی مورد بررسی قرار دادند. آنها نشان دادند که با افزایش نفوذپذیری صفحه دو قطبی، تراکم جریان به طور قابل توجهی کاهش می‌یابد. تاثیر پارامترهای عملیاتی مانند، دما و فشار و رطوبت و غیره برای عملکرد پیل سوختی پلیمری بسیار مهم است. با توجه به اهمیت این پارامترها،

همکارانش [۲۴] مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاکی از آن است که از طریق گرادیان تخلخل هوا لایه نفوذ گاز تاثیر قابل توجهی بر عملکرد و توزیع آب دارد. لی و همکاران [۲۵]، عملکرد پیل سوختی پلیمری را با ارائه شبیه سازی عددی یکپارچه و سه بعدی پیش‌بینی کردند. نتایج آنها نشان داد که مدل دوبعدی نوع دقیق تر است، در حالی که مدل یک بعدی دارای کمترین زمان شبیه سازی است. همانطور که در بالا ذکر شد، پیکر بندی عملیاتی و هندسی پیل سوختی پلیمری از جمله پارامترهایی است که عملکرد را تحت تاثیر قرار می‌دهند؛ بنابراین با توجه به تحقیقات در مورد پیکربندی کانال‌های گاز و لایه نفوذ گاز مقاله حاضر برای بررسی این پارامترها متمرکز شده است. در ادامه، عملکردهای عرض کانال گاز شمار آن بررسی می‌شود؛ همچنین، اثرات لایه نفوذ گاز و پارامترهایی مانند اندازه، سرعت ورودی، ارتفاع کانال و تعداد برجسته‌ها از طریق آزمون‌های عددی و تجربی بررسی می‌شود.

## ۲- مدل ریاضی

پیکربندی پیل سوختی پلیمری برای مورد پایه در شکل ۱ در هر دو جهت جلو و جانبی نشان داده شده است.

## ۳- مفاهیم برای شبیه‌سازی عددی

مدل‌های عددی شبیه‌سازی شد، تحت برخی فرضیه‌ها که در زیر آمده‌اند [۳]:

- مخلوط گازهای واکنش‌دهنده که به عنوان گازهای ایده‌آل قرار دارند.
- لایه‌های لایه نفوذ گاز و کاتالیزور، رسانای متخلخل همگن هستند.
- جریان گاز در کانال‌ها آرام و غیرمترکم است.

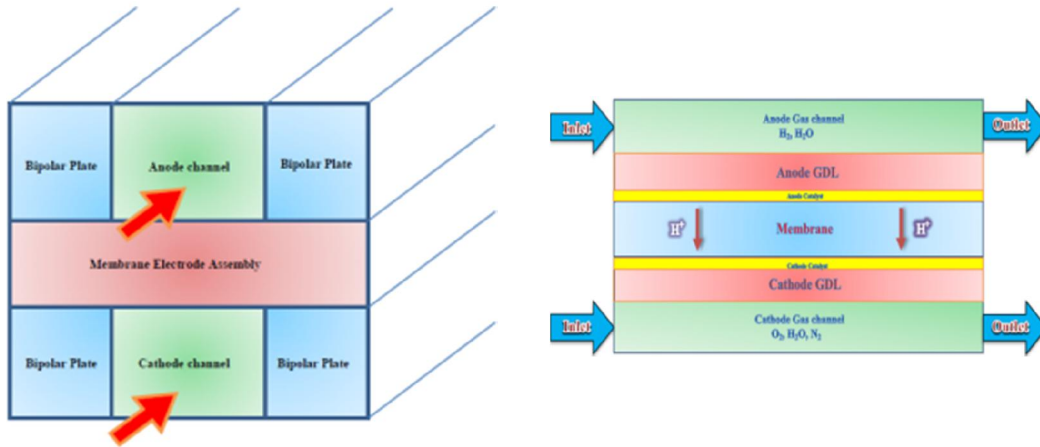
## ۴- معادلات حاکم

معادلات حاکم بر میدان جریان در پیل سوختی پلیمری شامل: معادلات جرمی حرکتی، گونه‌ای و حفاظتی است که می‌تواند به صورت زیر نوشته شود.

$$(\nabla \cdot \rho \mathbf{u}) = 0 \quad (1)$$

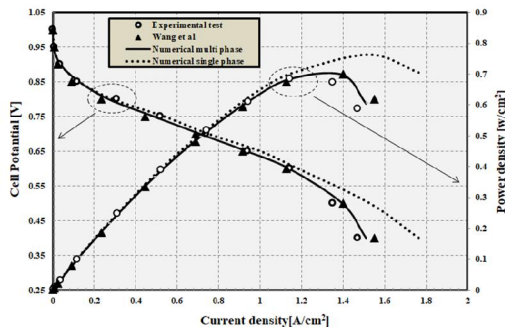
$$\frac{1}{(\varepsilon^{eff})^2} \nabla \cdot (\rho \mathbf{u} \mathbf{u}) = -\nabla P + \nabla \cdot (\mu \nabla \mathbf{u}) + S_{ii} \quad (2)$$

تحقیقات بسیاری در این زمینه انجام شده است. ونگ و همکارانش [۱۴]، با استفاده از آزمایش هیدروژنی اگر برخی پارامترهای اصلی مانند، دما و رطوبت را بر کارایی پیل سوختی پلیمری مورد بررسی قرار دادند. احمدی و همکارانش [۱۵]، شبیه‌سازی عددی و آزمایش‌های تجربی متعددی را برای بررسی پارامترهای مهم عملی انجام دادند. در این مقاله عملکرد کانال‌ها گام به گام مورد بررسی قرار گرفته و مشاهده می‌شود که این طراحی برای کانال، باعث افزایش کارایی انتقال گونه‌ها به مناطق واکنش می‌شود. اثر دما روی لایه کاتالیزور با استفاده از محاسبات دینامیک مولکولی توسط چن و همکارانش [۱۶] ارائه شده است. یان و همکارانش [۱۷]، یک مدل پویا از کانال‌های جریان سر پائین را برای پیل سوختی پلیمری معرفی کردند. آنها نتیجه گرفتند که سلول سوختی که دارای جریان ورودی وسیع است، سریعاً به حالت پایدار می‌رسد. Ma و همکارانش [۱۸]، تاثیر رطوبت نسبی گازها بر دمای غشاء را بررسی کردند. لازم به ذکر است که آنها از جریان متفاوتی به عنوان کانال‌های گاز استفاده می‌کردند. نتایج نشان داد که در شرایط عملیاتی مشابه رطوبت آنود در اثر افزایش تراکم جریان بیشتر تاثیر می‌گذارد. ابراهیمی و همکارانش [۱۹]، توزیع کاتالیست را در طول سلول با ارائه مدل دو مرحله‌ای با استفاده از الگوریتم ژنتیک بهینه‌سازی کردند. پارامترهای هندسی پیل سوختی پلیمری با استفاده از یک روش نوآورانه که بهینه‌سازی گرگ خاکستری نامیده می‌شود، مورد بررسی قرار گرفت. این روشی است که پیل سوختی پلیمری را به طول دقیق مدل-سازی می‌کند [۲۰]. علاوه بر این الفرقانی [۲۱]، روش جدید را به نام لانه زنبور به منظور بهینه‌سازی پارامترهای مطلوب پیل سوختی پلیمری توسعه داده است. برای بهبود عملکرد لایه‌های کاتالیزور طراحی جدیدی برای این لایه به عنوان کاتالیزور الکتروکربن آزاد برای بهبود عملکرد لایه‌های کاتالیزور طراحی جدیدی برای این لایه پیشنهاد شده است [۲۲]. این طراحی جدید کاتالیزورها، پتانسیل بیش از حد را کاهش می‌دهد. چن و همکارانش [۲۳]، یک روش کنترل تطبیقی برای درجه حرارت پیشنهاد دادند. با استفاده از این روش همگرایی شبیه سازی پیل سوختی پلیمری سریع‌تر انجام می‌شود بدست می‌آید. تاثیر پارامتر لایه نفوذ گاز به صورت صفحه متخلخل به صورت آزمایشگاهی توسط پارک و



شکل ۱- شماتیک طرح از جلو (سمت چپ) و جانبی (سمت راست)

عددی، آزمایش‌های تجربی نیز انجام می‌گیرد؛ همچنین به منظور اعتبار دادن تمامی نتایج نسبت به مدل پایه با نتایج وانگ و همکارانش، مورد مقایسه قرار گرفته‌اند. این مقایسه در شکل ۲ نمایش داده شده است. همانگونه که دیده می‌شود، موافقت مطلوب بین آنها وجود دارد.



شکل ۲- منحنی قطبی شدن مدل عددی و داده‌های تجربی و منحنی تراکم توان

برای شبیه‌سازی عددی، از سلول‌های منظم و سازمان یافته استفاده شده است. همانطور که در شکل ۳ دیده می‌شود، تعداد مطلوب سلول‌های محاسباتی تقریباً برابر ۱۷۴۰۰۰ است. برای پیدا کردن سایز مناسب برای شبکه ابتدا از یک شبکه درشت استفاده شد. مشاهده شد که با ریز کردن میزان سایز شبکه (تعداد سلول‌ها) جواب‌ها نیز متفاوت

$$\nabla \cdot (\mathbf{u} C_K) = \nabla \cdot (D_K^{eff} \nabla C_K) + S_K \quad (3)$$

$$\nabla \cdot (\kappa_e^{eff} \nabla \Phi_e) + S_\Phi = 0 \quad (4)$$

در معادله اول تراکم مخلوط چگالی ترکیب به صورت  $\rho \cdot \epsilon$  نشان داده شده است که عنصر القایی متخلخل ورودی کارآمد موثر تخریب پذیر است و ویسکوزیته مخلوط گاز در معادله حرکتی به صورت  $\mu$  در معامله نشان داده شده است. Su منبع معامله حرکت است و برای توصیف جریان کششی داری از طریق لایه‌های انتشار گاز متخلخل و لایه‌های کاتالیزور استفاده می‌شود. اطلاعات بیشتر در مورد معاملات حاکم و اصطلاحات منبع در منابع [۸ و ۷] موجود است.

### ۵- شرایط مرزی

معادلات حاکم ذکر شده با استفاده از شرایط مرزی حل شده‌اند که در جدول ۱ نشان داده شده است.

### ۶- روش عددی و تجربی

برای گسسته سازی معادلات حاکم از طرح روش حجم محدود در فرم ضمنی استفاده می‌شود. پس از آن، برای کوپل سرعت و فشار از الگوریتم سیمپل استفاده شده است. از الگوریتم‌های تکرارپذیر گوس-سایدل برای حل معادلات جبری استفاده شده است [۲۵]. محاسبات تا جایی انجام می‌گیرد که معیار همگرایی برآورده شود. اگر باقیمانده‌های حل به کمتر از  $10^{-10}$  رسیده باشند، می‌توان انتظار داشت که همگرایی به دست آید [۲۶]. علاوه بر این برای تایید نتایج

جدول ۱- شرایط مرزی

محل مورد نظر	نوع شرط مرزی
ورودی آند	$u = u_{in}, T = T_{in}, v = 0, C_{H_2} = C_{H_2,in}^a, C_{H_2,o} = C^a_{H_2,o,in}$
ورودی کاتد	$T = T_{in}, v = 0, C_{O_2} = C^c_{O_2,in}, C_{N_2} = C^c_{N_2,in} \quad u = u_{in}$
خروجی آند و کاتد	$\frac{\partial u}{\partial x} = \frac{\partial v}{\partial x} = \frac{\partial w}{\partial z} = \frac{\partial T}{\partial x} = 0$
مابین کانال گاز و صفحه نفوذ گاز	$\frac{\partial v}{\partial y} \Big _{y=h_1^-} = \varepsilon_{eff,GDL} \frac{\partial v}{\partial y} \Big _{y=h_1^+}, \frac{\partial u}{\partial y} \Big _{y=h_1^-} = \varepsilon_{eff,GDL} \frac{\partial u}{\partial y} \Big _{y=h_1^+}$
مابین لایه نفوذ گاز و لایه کاتالیستی	$\frac{\partial w}{\partial y} \Big _{y=h_1^-} = \varepsilon_{eff,GDL} \frac{\partial w}{\partial y} \Big _{y=h_1^+}$ $\varepsilon_{eff,GDL} \frac{\partial v}{\partial y} \Big _{y=h_2^-} = \varepsilon_{eff,CL} \frac{\partial v}{\partial y} \Big _{y=h_2^+}, \varepsilon_{eff,GDL} \frac{\partial u}{\partial y} \Big _{y=h_2^-} = \varepsilon_{eff,CL} \frac{\partial u}{\partial y} \Big _{y=h_2^+}$ $\varepsilon_{eff,GDL} \frac{\partial w}{\partial y} \Big _{y=h_2^-} = \varepsilon_{eff,CL} \frac{\partial w}{\partial y} \Big _{y=h_2^+}$
مابین لایه کاتالیستی و غشاء	$u = v = w = C_i = 0$
سطوح بالای کانال گاز	$T_{surface} = 353K \quad u = v = w = C_i = 0$
سطوح پایین کانال گاز	$T_{surface} = T_{wall} \quad u = w = 0$
سطوح بالای صفحات دو قطبی آند	$\frac{\partial \phi_{mem}}{\partial y} = 0 \quad \phi_{sol} = 0$
سطوح بالای صفحات دو قطبی کاتد	$\frac{\partial \phi_{mem}}{\partial y} = 0 \quad \phi_{sol} = V_{cell}$
سطوح بیرونی	$\frac{\partial \phi_{mem}}{\partial z} = 0, \frac{\partial \phi_{sol}}{\partial x} = 0, \frac{\partial \phi_{sol}}{\partial z} = 0, \frac{\partial \phi_{mem}}{\partial x} = 0$

در کار حاضر از یک پیل سوختی پلیمری استفاده شده است. مجموعه الکتروود و غشاء دارای مساحت موثر واکنش به اندازه ۲۵ سانتی متر مربع بوده که در یک مجموعه ۳ سلولی استفاده می‌شود که بصورت استک است. جنس غشاء از نفیون ۱۱۷ بوده و در لایه‌های کاتالیستی آند و کاتد به ترتیب از ۴ میلی گرم بر متر مربع Pt-Ru/C و ۴ میلی گرم بر سانتی متر مربع Pt/C استفاده شده است. مدل دارای دو لایه نفوذ گاز در دو طرف آند و کاتد است. کانال‌های گاز بصورت مارپیچ بوده که بوسیله ماشین کاری در صفحات دوقطبی ایجاد شده‌اند که مشخصات آنها در جدول ۲ آورده شده است.

از حالت قبل می‌شدند. مشاهده شد که با افزایش تعداد سلول‌های شبکه به میزان ۲۵۰۰۰۰، جواب‌های حاصل از حل تغییر چشمگیری از خود نشان ندادند؛ بنابراین برای صرفه-جویی در زمان مربوط به محاسبات، ساین شبکه ۱۷۴۰۰۰ به عنوان تعداد بهینه سلول انتخاب شد.

سیستم مورد استفاده در این کار عددی یک کامپیوتر چهار هسته‌ای است. میانگین زمان عملیاتی و هندسی در جدول ۲ آورده شده است.

شکل ۴، نمونه آزمایشگاهی پیل سوختی پلیمری مورد استفاده را با جزئیات بیشتر نشان می‌دهد؛ برای اطلاعات بیشتر در مورد نتیجه و بحث مدل پایه می‌توان به منابع [۷ و ۸ و ۱۰] مراجعه کرد.

در انتهای استک از صفحات جمع آوری کننده جریان با جنس مس استفاده شده است. برای آب بندی مابین آند و کاتد از واشرهای لاستیکی به ضخامت ۰/۱ میلی متر استفاده شده است. برای بستن پیچها برای نگهداشتن استکها از گشتاور ۶ نیوتن متر استفاده شده است. پس از سرهم بندی استک تست نشتی برای استک مورد نظر به عمل آمد. میزان دبی گازهای واکنش دهنده به توسط فلومتر کنترل می شود [۲۷]؛ همچنین از کنترل کننده دما و رطوبت در استک استفاده شده است. اطلاعات مربوط به چگالی جریان بوسیله کامپیوتر برای هر ولتاژ ثبت می شود که برای ثبت این اعداد به منظور رسیدن به شرایط پایا در حدود ۱۰ ثانیه صبر می شود.

#### ۷- نتایج

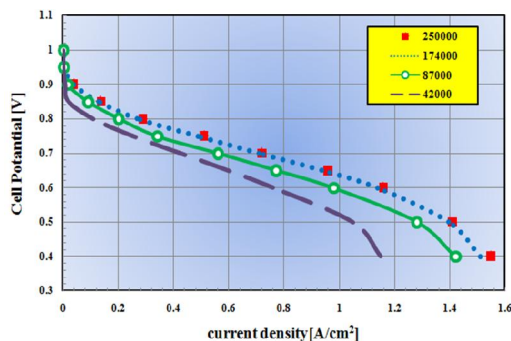
۷-۱- تاثیر قرار گرفتن دادن نیمه استوانه ای برجسته در لایه نفوذ گاز

۷-۱-۱- تغییر اندازه برجسته (برجستگی)

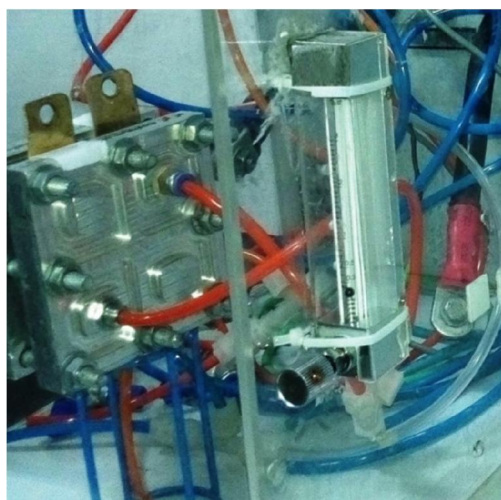
لایه های نفوذ گاز نقش بسیار مهمی در تعیین عملکرد خروجی پیل سوختی پلیمری بازی می کنند. با طراحی مطلوب لایه نفوذ گاز، انتقال گازهای واکنش دهنده به مناطق واکنش بهینه می شود. شکل ۵ طرح کلی لایه نفوذ گاز برجسته را در نمای جانبی نشان می دهد. نتایج نشان می دهد که لایه نفوذ گازهای برجسته دارای عملکرد بالاتری نسبت به موارد معمولی هستند. برای رسیدن به این هدف تنها یک نیمه استوانه ای برجسته در لایه نفوذ گاز در هر دو طرف آند و کاتد واقع شده است. به عبارت دیگر، لایه نفوذ گازها طوری ساخته و طراحی شده اند که در کانال گاز برجستگی وجود داشته باشد.

برای این منظور مجموعه ای از شبیه سازی های عددی و تجربی برای بررسی اثر این طراحی جدید انجام شده است. جدول ۳ نشان دهنده پیکربندی موارد مختلف است.

همانطور که در جدول ۳ ذکر شده، چهار مورد برای بررسی تاثیرات برجسته لایه نفوذ گاز با جزئیات بیشتر پیشنهاد شده است. در پایین نتایج با مورد اصلی با یکدیگر مقایسه می شود. برای این منظور در هر مرحله شعاع لایه نفوذ گاز برجسته کمی از ۰/۲۵ به ۰/۳۵ و از ۰/۴۵ به ۰/۵۵



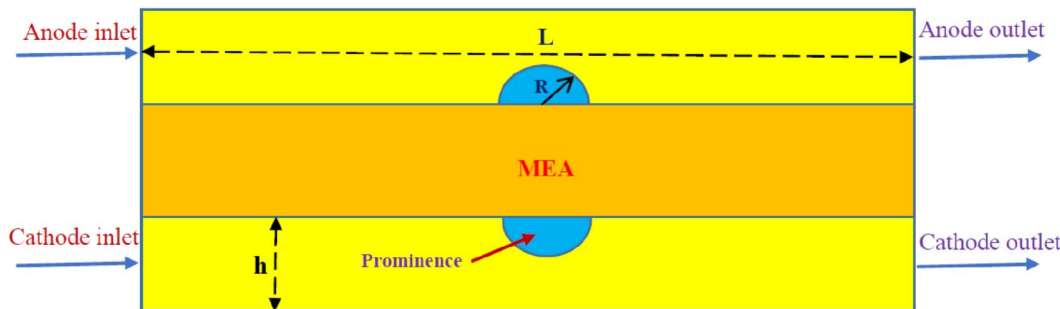
شکل ۳- استقلال از شبکه منحنی پلاریزاسیون



شکل ۴- مدل آزمایشگاهی

جدول ۲- پارامترهای هندسی و شرایط عملیاتی

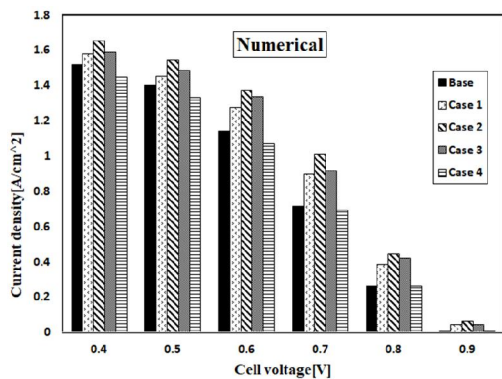
پارامتر	مقدار
طول کانال گاز	$7.0 \times 10^{-2}$ m
عرض و عمق کانال گاز	$1.0 \times 10^{-3}$ m
عرض کانال دوقطبی	$5.0 \times 10^{-4}$ m
ضخامت لایه انتشار گاز	$3.0 \times 10^{-4}$ m
ضخامت لایه	$1.29 \times 10^{-5}$ m
ضخامت غشا	$1.08 \times 10^{-4}$ m
دمای سلول	343.15 K
فشار آند	303975 Pa
فشار کاتد	303975 Pa



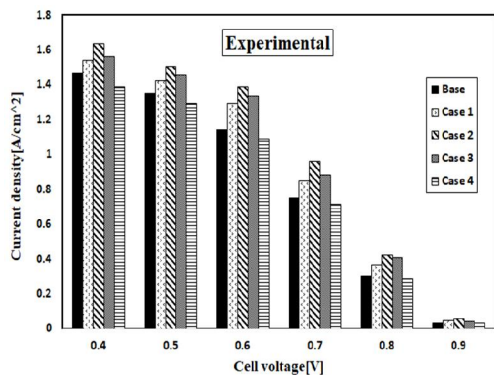
شکل ۵- طرح کلی نمایه لایه نفوذ گاز در پیل سوختی پلیمری

جدول ۳- مشخصات هندسی مورد با GLDs برجسته

نماد	حالت ۱	حالت ۲	حالت ۳	حالت ۴
R	0.25mm	0.35mm	0.45mm	0.55mm



(الف)



(ب)

شکل ۶- نمودار قطبش برای موارد (نتایج عددی و تجربی)

افزایش می‌یابد. شکل ۶ موارد دارای شکل هندسی در قطبی را نشان می‌دهد که با اندازه‌های مختلف و نمونه پایه مقایسه شده‌اند. نتایج نشان می‌دهد که توافق مطلوب بین شبیه‌سازی‌های عددی و آزمایش تجربی وجود دارد.

همانطور که در شکل ۶ نمایش داده شده با قراردادن برجستگی در لایه نفوذ گاز تراکم جریان خروجی در ولتاژ یکسان افزایش می‌یابد. با تغییر شعاع برجسته برجستگی شعاع از ۰/۲۵ میلی‌متر به ۰/۳۵ میلی‌متر و ۰/۴۵ میلی‌متر مشاهده شده است که عملکرد به طور قابل توجهی افزایش می‌یابد. با این وجود اگر افزایش شعاع به ۰/۵۵ میلی‌متر ادامه یابد، افت شدید عملکرد دیده می‌شود (مورد ۴). دلایلی که باعث افزایش عملکرد پیل سوختی پلیمری می‌شود، می‌توان به این طریق توضیح داده شود که برجستگی‌ها باعث افزایش قابل توجهی در سرعت جریان گاز در کانال‌ها می‌شوند. با کاهش جریان مقطع عرض بخش عبور جریان در کانال، سرعت جریان گاز کمی افزایش می‌یابد. افزایش سرعت به میزان مشخص می‌تواند به افزایش حمل و نقل گونه به مناطق واکنش کمک کند؛ همچنین برجسته بودن لایه نفوذ گاز ها جذب و حمل و نقل گونه‌های مختلف را از طریق لایه نفوذ گاز افزایش می‌دهد. علاوه بر این برجستگی‌ها مانند موانع با قرار گرفتن در برابر جریان گاز مقدار بیشتری از گونه‌ها را دریافت و به واکنش دهنده‌ها را به مناطق واکنش انتقال می‌دهند. اگر شعاع برجسته به ۰/۵۵ میلی‌متر افزایش یابد، مقدار سرعت جریان ناشی از کاهش بیشتر در سطح جریان از محدوده بهینه بالاتر می‌شود و منجر به از دست دادن غلظت در هر دو طرف آنود و کاتد می‌شود. این پدیده به طور معکوسی بر عملکرد تاثیر می‌گذارد. کسر مولی اکسیژن و



میانه به سمت منطقه خروجی است. تجمع بیش از حد آب در قسمت کاتد، موجب پدیده غرقابی در لایه نفوذ گاز می شود که منجر به افت غلظت گونه ها در مناطق واکنش می شود. در مورد ۲، کمبود هیدروژن و اکسیژن عمدتاً پس از  $L = 0.04$  و از سوی دیگر تجمع آب در این منطقه در کارکرد درازمدت، طول عمر سلول های سوختی را کاهش می دهند و منجر به تخریب و خوردگی پیل سوختی پلیمری می شود. در مقابل، مورد ۳ مشکل یاد شده را ندارد. در مورد ۳ عملکرد و چرخه عمر در مقایسه با سایر موارد بهینه سازی شده است. مقایسه ولتاژ تلف شده در شکل ۹ نشان داده شده است. برای نشان دادن این افت ها، میانگین این تلفات لحاظ شده است که عبارتند از تلفات اهمی آند (aop) و کاتد (cop). همانطور که مشاهده می شود، مقدار پتانسیل اضافی آند (aop) از کل موارد ناچیزتر است. شکل ۱۰ نمودار میزان متوسط تراکم جریان را نشان می دهد. واضح است که مورد ۲ و مورد ۴ به ترتیب حداکثر و حداقل مقادیر تراکم جریان هستند.

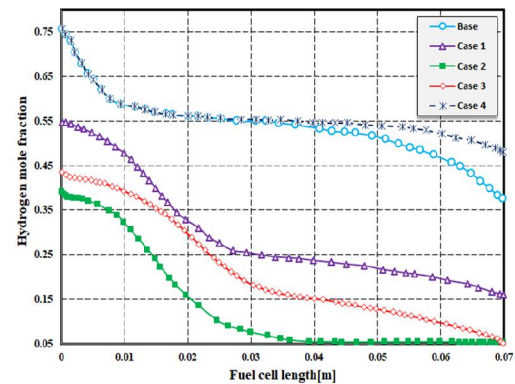
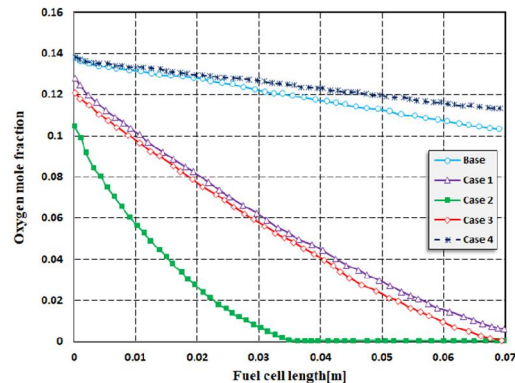
#### ۷-۱-۲- اثر سرعت ورودی گاز

سرعت ورودی جریان گاز یکی از پارامترهای اصلی است که به راندمان پیل سوختی پلیمری و تاثیر میزان نفوذ گونه ها به لایه نفوذ گاز تاثیر می گذارد. تراکم جریان خروجی برای ولتاژهای مختلف پیل سوختی پلیمری برای سرعت های مختلف حدود گازها در کانال های جریان در شکل ۱۱ برای هر دو نتایج عددی و تجربی نشان داده شده است. لازم به ذکر است که شعاع برجسته در این مرحله در  $0.45$  میلی متر ثابت است.

جدول ۴- مقایسه درصد خطا بین نتایج تجربی و عددی

ولتاژ	درصد خطا (%)
0.9	0.15
0.8	0.35
0.7	0.88
0.6	1.2
0.5	3.2
0.4	5.6

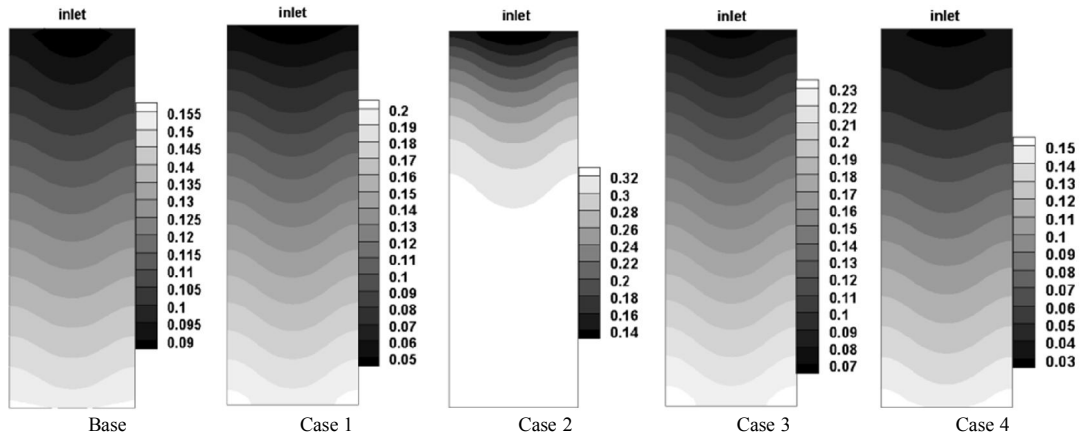
هیدروژن در شکل ۷ ارائه شده است که در طول لایه کاتالیستی کاتد است. همانطور که نشان داده شد، مورد ۲ کمترین مقدار از اکسیژن و غلظت هیدروژن به خصوص در مناطق خروجی ناشی از بهره برداری بزرگتر از آن است. مقادیر اکسیژن و هیدروژن در این مورد به ترتیب نزدیک به صفر در انتهای کاتد کاتالیزور آند قرار می گیرند. در مقابل از مقادیر کمتر گونه ها به علت مشکلات انتشار آن که قبلاً ذکر شده استفاده می کنند.



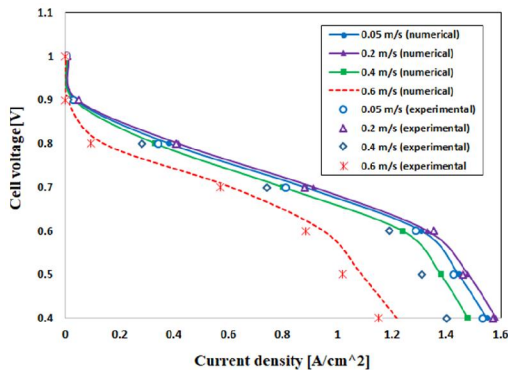
شکل ۷- مقایسه مقدار کسر مولکولی اکسیژن و هیدروژن

جدول شماره ۴ میزان خطای مابین نتایج آزمایشگاهی و عددی را نشان می دهد. همانطور که انتظار می رفت، میزان خطا در ولتاژهای پایین بیشتر است؛ اما در مجموع این خطاها حاکی از تطابق بسیار خوب بین نتایج است. توزیع جرم آب در امتداد سمت کاتد برای موارد در شکل ۸ نشان داده شده است. مورد ۲ در همان شرایط عملیاتی دارای حداکثر غلظت آب در جهت جریان به ویژه در



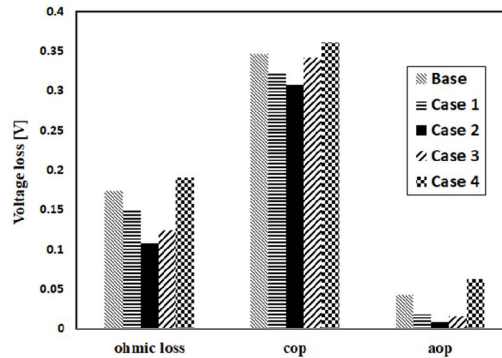


شکل ۸- کسر جرمی آب در طول لایه کاتالیست کاند و رابط غشاء

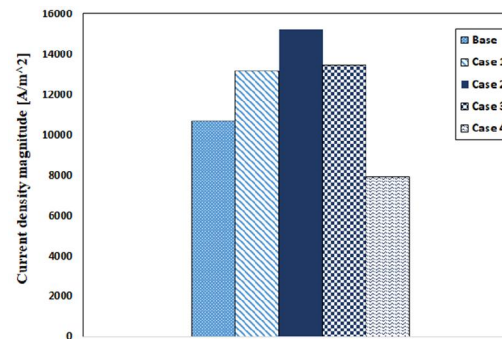


شکل ۱۱- منحنی‌های قطبش برای سرعت ورودی متفاوت (نتایج عددی و تجربی)

نزدیکی برجستگی‌ها به طور چشمگیری افزایش یافته است. این پدیده باعث شد که میزان نفوذ گونه‌ها افزایش یابد. اگر افزایش میزان سرعت ادامه یابد، سرعت در نزدیکی برجستگی‌ها به بیش از ۱ می‌رسد. در این حالت گونه‌ها زمان کافی را برای نفوذ به سمت لایه نفوذ گاز نخواهند داشت و در نتیجه عملکرد کلی پیل کاهش خواهد یافت. همانطور که اشاره شده، افزایش اندازه مقدار سرعت ورودی به بیش از ۰/۲ برای لایه نفوذ گازهای برجسته بر نفوذ گونه‌ها در کانال‌ها تاثیر منفی می‌گذارد. از سوی دیگر، اگر سرعت به مقادیر ۰/۰۵ یا کمتر کاهش پیدا کند، مقدار زیادی از گازها، زمانی کافی را برای انتقال به مناطق واکنش به خصوص در مناطق ورودی کانال‌ها بدست می‌آورند. همانطور که در شکل ۱۳ نشان داده شده است. از آنجا که



شکل ۹- مقایسه میانگین مقدار تلفات ولتاژ



شکل ۱۰- مقایسه میانگین چگالی جریان برای موارد مختلف

همانطور که مشاهده می‌شود، با افزایش سرعت ورودی از ۰/۰۵ به ۰/۲ تراکم جریان افزایش قابل توجهی را نشان می‌دهد. این به این دلیل است که با افزایش سرعت گاز همانطور که در شکل ۱۲ دیده می‌شود، سرعت جریان در

ارتفاع کانال مطلوب تلاش می شود. پیکربندی هندسی حالت های مختلف در جدول ۵ ارائه شده است. نتایج آزمایش های عددی و تجربی نشان می دهد که مورد ۲ با ارتفاع کانال برابر ۱ میلی متر، کارآمدتر از دو مورد دیگر است. با کاهش ارتفاع کانال در حدود ۲۰٪ از یک میلی متر، عملکرد در مقایسه با موارد دیگر کاهش می یابد (مطابق شکل ۱۴). لازم به ذکر است که سرعت جریان گاز حدود ۰/۲ میلی متر بر ثانیه است.

شکل ۱۵ مقدار کسر جرمی هیدروژن را در امتداد کانال آند نشان می دهد. کاهش یا افزایش ارتفاع کانال گاز در حدود ۰/۲ باعث ایجاد تاثیر منفی در انتشار گونه ها می شود که مقدار قابل توجهی از گازهای واکنش دهنده از طریق کانال ها عبور کند، بدون اینکه برجستگی آنها را تحت تاثیر قرار دهد در مورد ۲، انتقال هیدروژن از کانال بهتر از سایر موارد است.

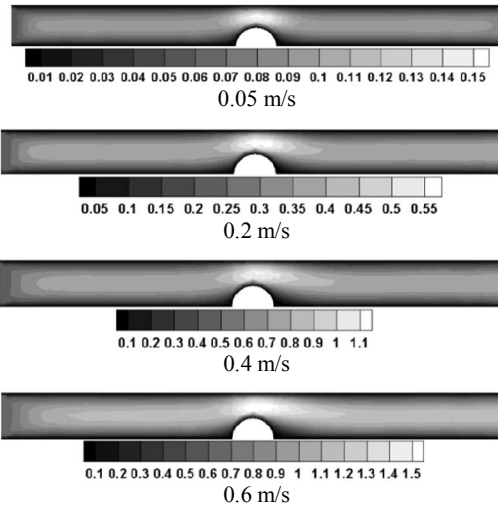
از سوی دیگر کاهش ارتفاع کانال مانند مورد ۴ در بخش ۳،۳،۱ عمل می کند. افزایش سرعت ناشی از کاهش ارتفاع کانال، سبب کاهش جذب گونه توسط لایه نفوذ گاز می شود. در شکل ۱۶، کسر جرمی اکسیژن از طریق کانال کاتده برای ارتفاع کانال های مختلف مقایسه می شود.

با طراحی ارتفاع کانال در حدود  $h=1$  میلی متر، مشاهده می شود که مقدار تراکم جاری، جریان تراکم یا جریان چگالی به دلیل بهبود انتقال گونه ها و افزایش شدت واکنش الکتروشیمیایی به طور قابل توجهی افزایش یافته است. شکل ۱۷ کسر جرمی آب برای موارد مختلف، از نمای جانبی کاتالیست کاتدی و غشا را نشان می دهد. مقدار بیشتر آبتولید شده در مورد ۲، گفته های قبلی را تایید می کند. مورد ۲ دارای حداکثر مقدار آب به دلیل شدت واکنش بالا و مورد ۳ دارای حداقل مقدار آب است.

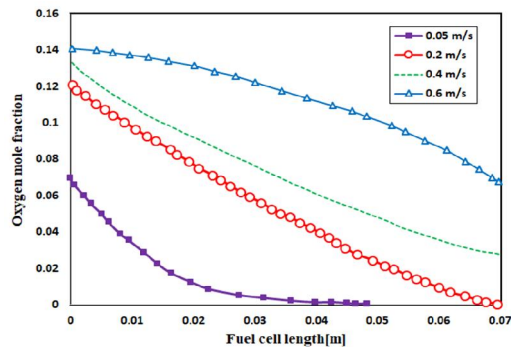
جدول ۵- پیکربندی هندسی موارد

حالت ها	R (mm)	h (mm)	L (mm)	R/h
1	0.45	0.8	70	0.5625
2	0.45	1	70	0.45
3	0.45	1.2	70	0.375

تراکم جریان خروجی در مقایسه با مقدار ۰/۴ بیشتر است، با این حال، در مقادیر نزدیک به ۰/۰۵ یا کمتر کمبود کاهش گونه ها در مناطق خروجی منجر به از دست دادن کاهش غلظت می شود که این ممکن است، در طول عمر مدت زمان بر عمر دستگاه پیل سوختی پلیمری تاثیر منفی داشته باشد.



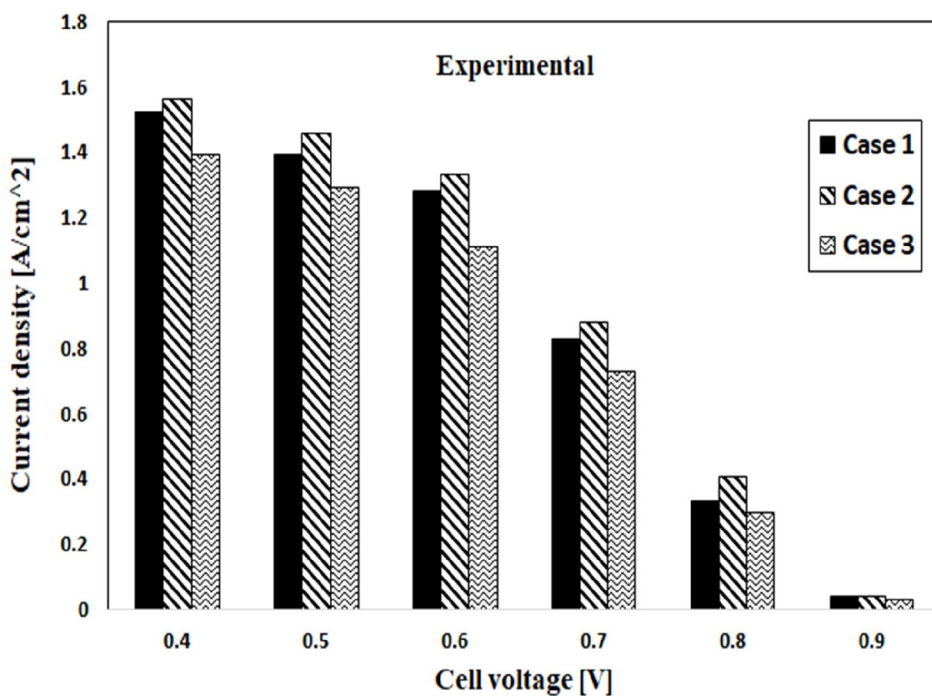
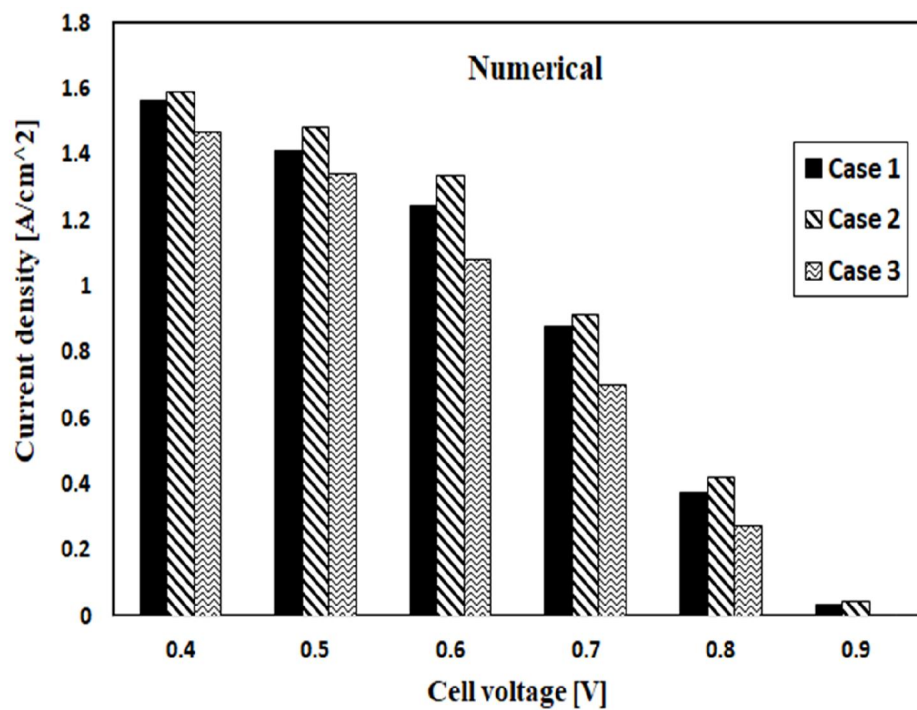
شکل ۱۲- توزیع سرعت در کانال گاز در نزدیکی برجستگی ها



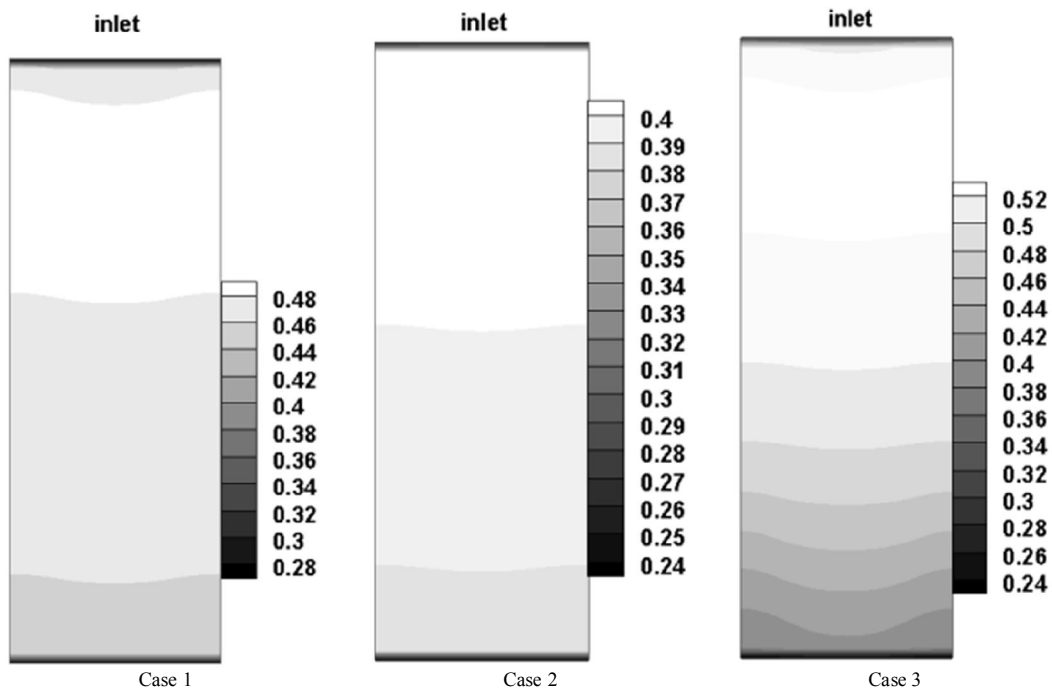
شکل ۱۳- کسر مولی اکسیژن در طول کانال کاتد

### ۷-۱-۳- تاثیر تغییرات ارتفاع کانال گاز در اندازه برجستگی ثابت

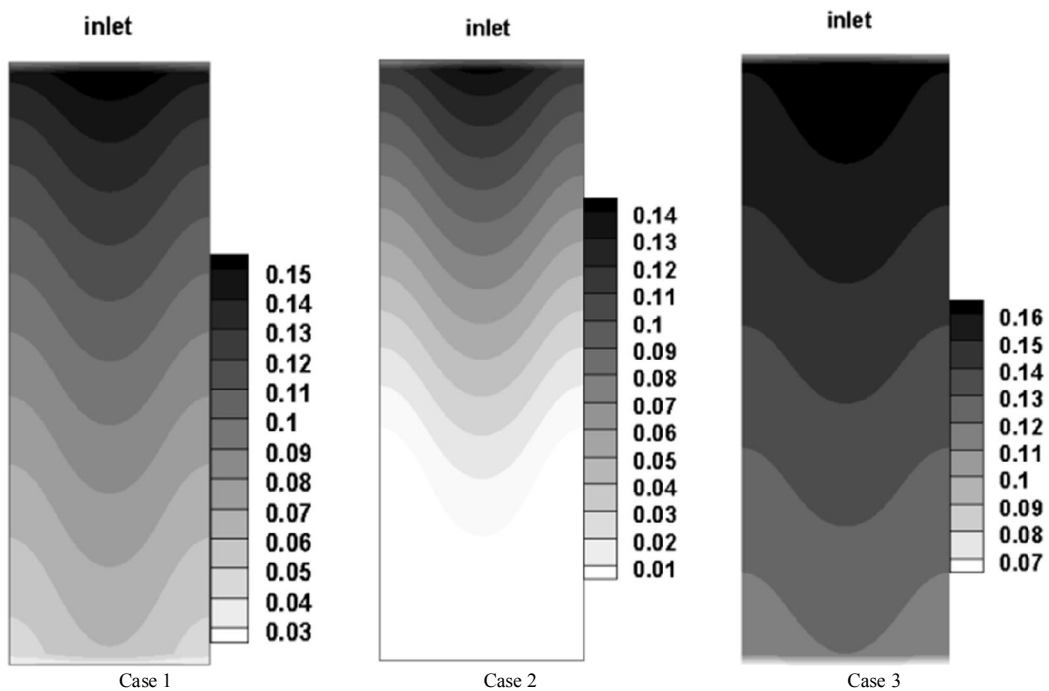
کانال های گاز در سلول سوختی وظیفه انتقال جریان گونه لایه نفوذ گاز ها را دارند؛ بنابراین پیدا کردن طرح هندسی بهینه مطلوب از آنها، در مورد لایه نفوذ گاز برجسته اهمیت خاصی دارد، به همین دلیل در این بخش برای پیدا کردن



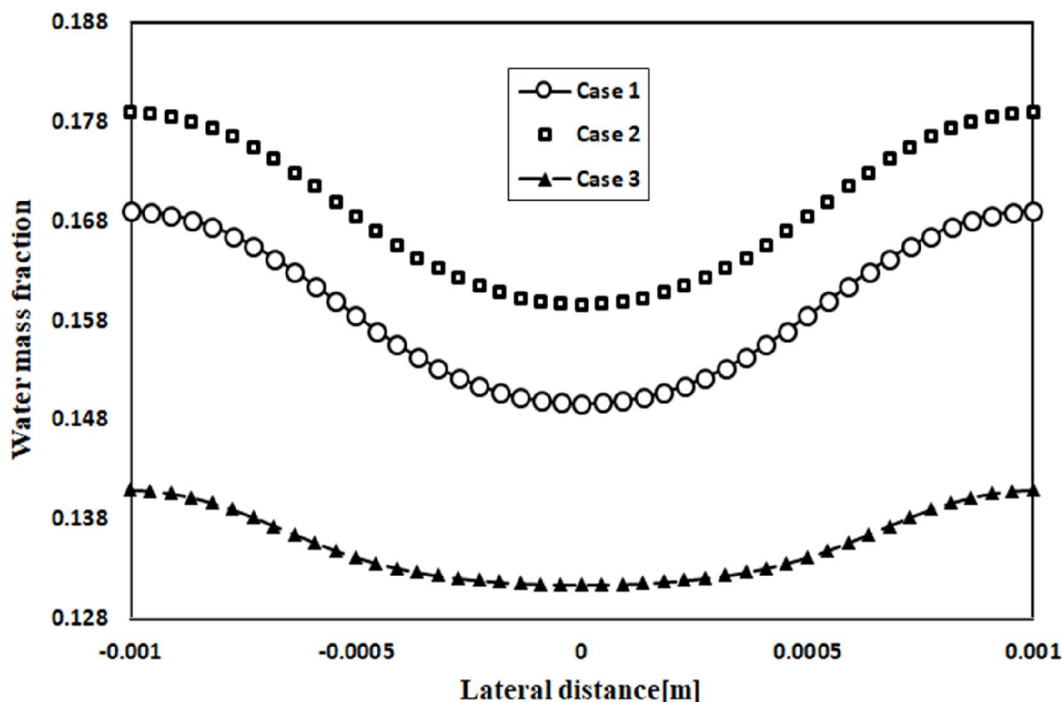
شکل ۱۴- نمودار قطبش برای ارتفاع های مختلف کانال



شکل ۱۵- کسر جرمی هیدروژن در طول کانال آند



شکل ۱۶- کسر جرمی اکسیژن در فصل مشترک لایه کاتد و لایه کاتالیزور



شکل ۱۷- کسر جرمی آب در فاصله جانبی لایه کاتالیست کاتد (L=60mm)

اگر میزان سرعت به حدود ۰/۰۵ یا کمتر کاهش یابد، منجر به کاهش گونه به ویژه در مناطق خروجی می‌شود. ارتفاع کانال همچنین نقش حیاتی مهمی در کارایی عملکرد برجسته‌ها دارد. اگر ارتفاع کانال حدود ۲۰٪ از ارتفاع اولیه افزایش یا کاهش یابد، عملکرد پیل سوختی پلیمری به طور قابل توجهی کاهش یابد. به عنوان فعالیت کار تحقیق آینده ارائه راه حل تحلیلی برای مدیریت معادلات کانال‌های گاز با استفاده از روش تعریف آشفتگی برای تحقیق رسیدن در مورد پیکربندی هندسی پیل سوختی پلیمری برنامه ریزی شده است.

#### ۹- نمادها

C	غلظت گونه‌ها [ $\text{mol m}^{-3}$ ]
D	ضریب انتشار جرم [ $\text{m}^2 \text{s}^{-1}$ ]
I	چگالی جریان محلی [ $\text{A cm}^{-2}$ ]
K	نفوذپذیری [ $\text{m}^2$ ]

#### ۸- نتیجه‌گیری

در تحقیق حاضر، برای بررسی تاثیر کانال گاز، صفحات دوقطبی و تغییرات هندسی لایه نفوذ گاز بر تراکم جریان خروجی یک سری آزمایشات عددی و تجربی انجام شده است. در نتایج عددی، معادلات حاکم بر استفاده از روش حجم محدود، گسسته سازی شده‌اند؛ بنابراین یک برنامه کامپیوتری سه‌بعدی برای حل این معادلات توسعه داده شده است. برای تایید نتایج عددی در هر مرحله، آزمایش‌های تجربی انجام می‌شود. ابتدا تاثیر لایه نفوذ گاز بر جسته در هر دو طرف آند و کاتد با جزئیات بیشتر مورد بررسی قرار می‌گیرد. برای رسیدن به این هدف، اندازه برجستگی‌ها، سرعت جریان ورودی، ارتفاع کانال به‌طور دقیق، مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج آزمایشات و شبیه‌سازی نشان می‌دهد که افزایش عملکرد برای اندازه برجسته در شعاع  $R = 0/45$  بدست می‌آید. سرعت جریان به عنوان پارامتر دیگر که نفوذ گونه‌های واکنش را تغییر می‌دهد، اثر می‌گذارد. مشاهده شده که سرعت مناسب در حدود ۰/۲ است. افزایش سرعت به ۰/۴ یا بیشتر، منجر به مشکلات نفوذ جدی می‌شود. علاوه بر این،

- channel PEM fuel cells. *J Appl Electrochem* 30(2):135-146.
- [3] Torsten B, Djilali N (2003) Three-dimensional computational analysis of transport phenomena in a PEM fuel cell—a parametric study. *J Power Sources* 124(2): 440-452.
- [4] Hasan AD, Sung HJ (2006) Effects of channel geometrical configuration and shoulder width on performance at high current density. *J Power Sources* 162(1):327-339.
- [5] Majidifar S, Mirzaei I, Rezazadeh S, Mohajeri P, Oryani H (2011) Effect of gas channel geometry on performance of PEM fuel cells. *Aust J Basic Appl Sci* 5(5): 943-954.
- [6] Pourmahmoud N, Rezazadeh S, Mirzaee I, Heidarpour V (2011) Three-dimensional numerical analysis of proton exchange membrane fuel cell. *J Mech Sci Technol* 25(1): 2665.
- [7] Ahmadi N, Pourmahmoud N, Mirzaee I, Rezazadeh S (2011) Three-dimensional computational fluid dynamic study of effect of different channel and shoulder geometries on cell performance. *Aust J Basic Appl Sci* 5(12): 541-556.
- [8] Ahmadi N, Rezazadeh S, Mirzaee I, Pourmahmoud N (2012) Three-dimensional computational fluid dynamic analysis of the conventional PEM fuel cell and investigation of prominent gas diffusion layers effect. *J Mech Sci Technol* 26(8): 2247-2257.
- [9] Lee CS, Yi SC (2004) Numerical methodology for proton exchange membrane fuel cell simulation using computational fluid dynamics technique. *Korean J Chem Eng* 21(6): 1153-1160.
- [10] Yang TH, Park GG, Pugazhendhi P, Lee WY, Kim CS (2002) Performance improvement of electrode for polymer electrolyte membrane fuel cell. *Korean J Chem Eng* 19(3): 417-420.
- [11] Molaeimanesh G, Akbari MH (2014) Water droplet dynamic behavior during removal from a proton exchange membrane fuel cell gas diffusion layer by Lattice-Boltzmann method. *Korean J Chem Eng* 31(4):598-610.
- [12] Carral C, Mélé P (2014) A numerical analysis of stack assembly through a 3D finite element model. *Int J Hydrogen Energ* 39(9):4516-4530.
- [13] Jung CY, Kim JJ, Lim SY, Yi SC (2007) Numerical investigation of the permeability level of ceramic bipolar plates for polymer electrolyte fuel cells. *J Ceram Process Res* 8(5): 369.
- [14] Wang L, Husar A, Zhou T, Liu H (2003) A parametric study of PEM fuel cell performances. *Int J Hydrogen Energ* 28(11): 1263-1272.
- [15] Ahmadi N, Rezazadeh S, Mirzaee I (2015) Study the effect of various operating parameters of proton exchange membrane. *Period Polytech-Chem* (3): 221.
- [16] He Y, Chen C, Yu H, Lu G (2017) Effect of temperature on compact layer of Pt electrode in by first-principles molecular dynamics calculations. *Appl Surf Sci* 392:109-116.
- ضرب کشش الکترو اسموتیک  $n_d$
- فشار [Pa] P
- دما [K] T
- بردار سرعت  $\mathbf{u}$
- آنود یا کاتود k
- چگالی  $[\text{kg m}^{-3}]$   $\rho$
- تخلخل موثر  $\varepsilon^{\text{eff}}$
- پتانسیل فاز الکترولیتی (از ۱- به ۱ متغیر است)  $\Phi_e$
- ویسکوزیته  $[\text{kg m}^{-1}\text{s}^{-1}]$   $\mu$
- هدایت پروتون  $[\text{ohm}^{-1}\text{m}^{-1}]$   $\sigma_m$
- هدایت یونی غشاء (S/m)  $\kappa$
- طول کانال گاز L
- ارتفاع کانال گاز h
- کانال ch
- صفحه دو قطبی Bp
- شعاع R
- مونتاز الکترولیت غشاء MEA
- لایه نفوذ گاز
- کاتد بیش از پتانسیل cop
- آنود بیش از پتانسیل aop
- نسبت ابعاد نماد نسبت به کانال AR
- عدد رینولدز Re
- ۱۰- مراجع**
- [1] William Grubb (1959) Proceedings of the 11th Annual Battery Research and Development Conference, PSC Publications Committee, Red Bank, NJ, p. 5, 1957; U.S. Patent No. 2,913,511.
- [2] Sandip D, Shimpalee S, Van Zee JW (2000) Three-dimensional numerical simulation of straight

- guaranteed performance. *Int J Hydrogen Energ* 43(25): 11550-11558.
- [23] Ko D, Doh S, Park HS, Kim MH (2017) The effect of through plane pore gradient GDL on the water distribution of PEMFC. *Int J Hydrogen Energ* 43(4): 2369-2380.
- [24] Zhang Q, Xu L, Li J, Ouyang M (2018) Performance prediction of proton exchange membrane fuel cell engine thermal management system using 1D and 3D integrating numerical simulation. *Int J Hydrogen Energ* 43(3): 1736-1748.
- [25] Patankar S (1980) Numerical heat transfer and fluid flow.
- [۲۶] رجیبیان، ح، امیری ح، رحیمی، م، مرعشی، س.م.ب، عرب سلغار ع (۱۳۹۵) تحلیل آزمایشگاهی و عددی پیل سوختی پلیمری با یک کانال مارپیچ متقارن جدید. *مجله مکانیک سازه‌ها و سازه‌ها* ۳۰۰-۲۵۸: ۴(۴).
- [۲۷] افشاری، ا، پیرکندی، ج (۱۳۹۳) مقایسه عملکرد پیل سوختی غشا پلیمری با کانال ساده و فوم فلزی به عنوان توزیع کننده جریان. *مجله مکانیک سازه‌ها و سازه‌ها* ۱۳۶-۱۲۳: ۴(۳).
- [17] Yan WM, Li HY, Weng WC (2017) Transient mass transport and cell performance of a PEM fuel cell. *Int J Heat Mass Tran* 107:646-656.
- [17] Jian QF, Ma GQ, Qiu XL (2014) Influences of gas relative humidity on the temperature of membrane in with interdigitated flow field. *Renew Energ* 62: 129-136.
- [18] Ebrahimi S, Ghorbani B, Vijayaraghavan K (2017) Optimization of catalyst distribution along channel through a numerical two-phase model and genetic algorithm. *Renew Energ* 113: 846-854.
- [19] A M, El-Hameed MA, Farahat MA (2017) Effective parameters' identification for polymer electrolyte membrane fuel cell models using grey wolf optimizer. *Renew Energ* 111: 455-462.
- [20] El-Fergany AA (2018) Extracting optimal parameters of PEM fuel cells using salp swarm optimizer. *Renew Energ* 119: 641-648.
- [21] Esfahani Moghadam RA, Gavidia LMR, Garcia G, Pastor E, Specchia S (2017) Highly active platinum supported on Mo-doped titanium nanotubes suboxide (Pt/TNTS-Mo) electrocatalyst for oxygen reduction reaction in. *Renew Energ* 120: 209-219.
- [22] Huang L, Chen J, Z Liu, Becherif M (2018) Adaptive thermal control for PEMFC systems with