



## تحلیل آزمایشگاهی و عددی تاثیر عرض شانه و شکل هندسی کانال‌های گاز بر عملکرد سلول سوختی با غشاء تبادل پروتون

سجاداله رضازاده<sup>۱\*</sup>، مجتبی رسولی قره ورن<sup>۲</sup>، نیما احمدی<sup>۳</sup> و هاله صادقی<sup>۴</sup>

<sup>۱</sup> استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی ارومیه، ارومیه، ایران

<sup>۲</sup> دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی ارومیه، ارومیه، ایران

<sup>۳</sup> استادیار، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه تالین تک، استونی

<sup>۴</sup> دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران

مقاله مستقل، تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۱۱/۱۰؛ تاریخ بازنگری: ۱۳۹۹/۰۶/۱۶؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۸/۱۱

### چکیده

در مقاله حاضر، تاثیر تغییر شکل هندسی دیواره‌های جانبی کانال‌های گاز آند و کاتد و نیز تغییر اندازه عرض ناحیه شانه بر عملکرد یک سلول سوختی با غشاء تبادل پروتون مطالعه شده است. در بررسی عددی، جهت گسسته سازی معادلات حاکم از روش عددی حجم محدود بهره گرفته شده است. در ابتدا، عرض ناحیه شانه یا به عبارتی صفحه بای پولار بررسی گردیده است. بدین منظور پارامتر مذکور، جهت عدم افزایش در مصرف مواد گران قیمت در تولید پیل سوختی، به تدریج کاهش یافته است. نتایج نشان می‌دهند که در عرض  $b=0.4$  mm عملکرد مطلوب حاصل شده و تراکم جریان الکتریکی خروجی ماکزیمم مقدار را دارا بوده و نسبت به حالت پایه حدود ۱۰ درصد بازدهی را افزایش داده است؛ همچنین تاثیر تبدیل کانال‌های گاز آند و کاتد از حالت مستقیم مرسوم به حالت‌های سینوسی مختلف نیز، بررسی شده است. نتایج حاکی است که در کانال‌های گاز با دیواره‌های سینوسی، مسیر حرکت مواد واکنش دهنده افزایش یافته و به تبع آن میزان نفوذ آنها به لایه‌های کاتالیست برای وقوع واکنش الکتروشیمیایی بیشتر شده و در نتیجه عملکرد پیل سوختی بهبود می‌یابد. نهایتاً جهت اعتباردهی به کار عددی، از نتایج آزمایشگاهی نیز بهره گرفته شده است که بیانگر تطابق مطلوب بین آنهاست.

**کلمات کلیدی:** صفحه بای پولار؛ سلول سوختی پلیمری؛ دینامیک سیالات محاسباتی؛ کانال‌های گاز.

## Experimental and Numerical Analysis of Bipolar width and Gas Channels Geometrical Configuration Effect on Proton Exchange Membrane Fuel cell

S. Reza zadeh<sup>1,\*</sup>, M. Rasouli Garaveran<sup>2</sup>, N. Ahmadi<sup>3</sup>, H. Sadeghi<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Assistant Professor, Department of Mechanical Engineering, Urmia University of technology, Urmia, Iran.

<sup>2</sup> M.sc student, Department of Mechanical Engineering, Urmia University of technology, Urmia, Iran.

<sup>3</sup> Assistant Professor, Department of technical and engineering, Tallintech, Estonia.

<sup>4</sup> PhD student, Department of Mechanical Engineering, Urmia University, Urmia, Iran.

### Abstract

In this paper, the besides walls of anode and cathode gas channels geometrical configuration changing effect and also bipolar plate width on proton exchange membrane fuel cell performance has been studied. In numerical procedure, for descritizing the governing equations, the finite volume method has been used. At first, the bipolar plate width has been investigated. For this purpose, the mentioned parameter, for preventing from expensive material using, has been decreased gradually. The results revealed that at width  $b=0.4$  mm, the best performance has been produced and the current density has its maximum magnitude and about 10 percent enhances the performance compared with conventional model. Also, the effect of gas channels conversion from conventional straight form to the different sinusoidal modes has been investigated. The results showed that in channels with sinusoidal walls, the reactants pathway has been increased and consequently, their diffusion to the catalyst layers, where the chemical reaction occurs, has been grown and the the cell performance enhances. Finally, for validating the numerical work, the experimental test has been done, which is seen favorable agreement between them.

**Keywords:** Bipolar Plate; Polymer Fuel Cell; Computational Fluid Dynamics; Gas Channels.

## ۱- مقدمه

یکی از نیازهای بنیادین در راستای تامین نیازهای اساسی بشریت، بحث انرژی است. انرژی را می‌توان به دو دسته انرژی های نو و قدیم تقسیم کرد که بخش اعظمی از نیاز بشر توسط انرژی‌های قدیم مانند انرژی فسیلی تامین می‌شود. با این حال، بدلیل انتشار آلاینده‌ها و رو به اتمام بودن انرژی‌های فسیلی، استفاده از انرژی‌های جدید و یا به عبارتی تجدیدپذیر مانند انرژی باد، آب، هیدروژن و خورشید، اهمیت پیدا می‌کند. بدلیل فراوانی هیدروژن در طبیعت، می‌توان انرژی تجدیدپذیر هیدروژن را در زمره بهترین گزینه‌ها برای منابع انرژی آینده مد نظر قرار داد. سلول سوختی دستگاهی است که انرژی هیدروژن را با فعل و انفعالاتی به انرژی الکتریکی تبدیل می‌کند. سلول (پیل) سوختی با غشاء تبادل پروتون، بدلیل دمای عملکرد متوسط (تنش های حرارتی کم) و تولید چگالی الکتریکی بالا و نیز طول عمر بیشتر نسبت به سایر انواع پیل های سوختی، از اهمیت برخوردار است. غشاء این پیل سوختی الکترولیتی، نفیون نام دارد که وظیفه اصلی آن هدایت پروتون‌های هیدروژن تشکیل شده در کاتالیست آند به سمت کاتالیست کاتد جهت انجام واکنش الکتروشیمیایی است [۱]. ساندیپ و همکاران، از جمله نخستین افرادی بودند که موفق به شبیه سازی عددی پیل سوختی پلیمری سه بعدی شدند [۲]. آنها در کار مذکور، به بررسی تاثیر معکوس کردن جریان گاز درون کانال‌ها پرداخته و نیز تاثیر ضخامت لایه غشاء را تحلیل نمودند. برنینگ و همکاران نیز، یک مدل عددی سه بعدی غیر همدم، جهت بررسی تاثیر پارامترهایی از قبیل، ضخامت لایه نفوذ گاز، رطوبت نسبی، دما و فشار را بر عملکرد پیل سوختی بررسی کردند [۳]. با این حال، اخیراً توجه پژوهشگران بر پیکر بندی‌های جدید بیشتر معطوف شده است. احمدی و همکاران [۴]، تغییر شکل سطح مقطع ورودی کانال های گاز آند و کاتد را بصورت عددی بررسی نموده و دریافتند که شکل مستطیلی بهترین بازده را بدست می‌دهد. مجیدی فر و همکاران و نیز پورمحمود و همکاران در کارهای عددی سه بعدی [۵ و ۶] در بررسی ضخامت لایه نفوذ گاز دریافتند که با کاهش این پارامتر مهم، مقاومت لایه‌ای و اهمی در برابر حرکت گونه‌ها درون پیل سوختی کاهش یافته و سبب افزایش بازدهی می‌شود؛ ولی این کاهش تا یک حد مشخصی

امکان پذیر بوده و کاهش بیشتر ضخامت لایه نفوذ گاز، سبب کم شدن رطوبت غشاء و کاهش عملکرد می‌شود. احمدی و همکاران [۷ و ۸] دریافتند که اگر شکل کانال گاز متوازی الاضلاع باشد، عملکرد پیل نسبت به حالتی که کانال مربعی است کمتر بوده و نیز در کاری دیگر، اثر اضافه نمودن مانعی از جنس خود لایه نفوذ گاز در کف کانال‌ها را مطالعه نمودند و دریافتند که این برجستگی ها سبب نفوذ بهتر مواد واکنش دهنده به سمت محل انجام واکنش شده و کارایی پیل بیشتر می‌شود.

در اکثر تحقیقات صورت گرفته اهمیت درجه آبدار بودن غشا پیل سوختی نیز مهم است که عوامل مختلفی از جمله، پیکربندی هندسی در آن تاثیر گذارند. آبدار بودن غشا توانایی آن را در انتقال پروتون‌های هیدروژن افزایش داده و از سویی بیش از حد بودن رطوبت بالاخص در سمت کاتد، سبب تشکیل قطره‌های آب مایع و بسته شدن خلل و فرج لایه‌های پیل سوختی و کاهش غلظت مواد واکنش دهنده می‌شود. به این پدیده، اصطلاحاً غرقابی گفته می‌شود. لی و چون [۹] مدل بسیار مفیدی از انتقال و جابجایی مولکول‌های آب درون لایه ای پیل سوختی ارائه نمودند. نشستن غبار و یا موادی از قبیل مونوکسید کربن روی لایه‌های پیل سوختی بالاخص لایه کاتالیست، باعث مسموم شدن آن و در نتیجه کاهش کارایی می‌گردد. این مهم در کار کیم و همکارانش [۱۰] مطالعه شده است. در مدل دوفازی که در آن عنصر آب هم در فاز مایع و هم در فاز بخار قرار دارد، احتمال تشکیل قطرات آب در لایه های پیل سوختی را بررسی می‌نماید. اکبری و همکاران [۱۱] تشکیل و رفتار قطره را با استفاده از روش لاتیس-بولتزمن، مورد بررسی و تحلیل قرار دادند. روش‌های عددی دیگری نیز برای شبیه سازی عملکرد پیل سوختی استفاده شده‌اند که از جمله آنها می‌توان به بهره گیری از روش المان محدود توسط کارال و همکاران [۱۲] نام برد. رضازاده و همکاران [۱۳] در یک شبیه سازی سه بعدی به بررسی عددی تاثیر U شکل کردن کانال‌های گاز پرداخته و دریافتند که مدل جدید نسبت به حالتی که کانال‌های گاز مستقیم هستند، کارایی بالاتری دارد. رضازاده و همکاران [۱۴] با شکستن مجموعه الکتروود و غشا و به تبع آن افزایش مساحت سطح واکنش توانستند، عملکرد پیل سوختی را

درون پیل سوختی و نفوذ بهتر آنها به لایه های کاتالیست، کانال‌ها به شکل مارپیچ (سینوسی) درآمده‌اند. نتایج آزمایشگاهی و عددی مربوط به هر حالت نیز کاربر را در انتخاب مدل بهتر یاری می‌نماید. شرح مختصر کارهای انجام شده در جدول ۱ آورده شده است.

جدول ۱- شرح مختصر کارهای انجام شده

بررسی پارامتری	بررسی هندسی
تأثیر تغییر اختلاف ولتاژ بر توزیع دما	تغییر نسبت عرض کانال به عرض شانه
تأثیر تغییر اختلاف ولتاژ بر توزیع گونه‌ها	تبدیل کانال‌های گاز از حالت مستقیم به حالت سینوسی

## ۲- مدل ریاضی

شماتیک کلی پیل سوختی پلیمری در نماهای روبرو و جانبی در شکل ۱ نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، پیل سوختی از نه لایه تشکیل شده و هر کدام از لایه‌ها وظیفه بخصوص خود را دارند.

## ۳- فرضیات شبیه سازی

- ۱- گازهای واکنش دهنده ورودی ایده آل فرض می‌شوند.
- ۲- جریان سیال بدلیل کم بودن عدد رینولدز (در حدود ۲۰۰) آرام و نیز پایین بودن عدد ماخ تراکم ناپذیر است.
- ۳- لایه‌های نفوذ گاز متخلخل و همگن می‌باشند.
- ۴- بدلیل انجام واکنش الکتروشیمیایی درون پیل سوختی، فرایند غیرهمدما است.

## ۴- معادلات حاکم

معادلات حاکم بر میدان جریان سیال شامل معادلات پیوستگی، اندازه حرکت، انرژی، غلظت و پتانسیل بشرح زیر است:

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

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

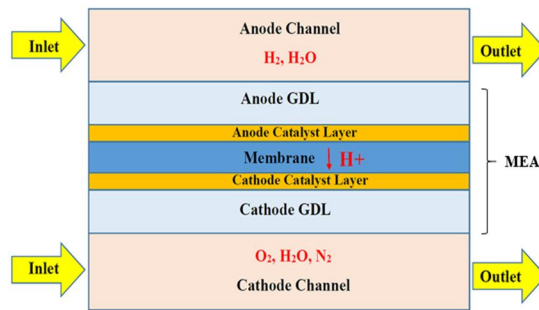
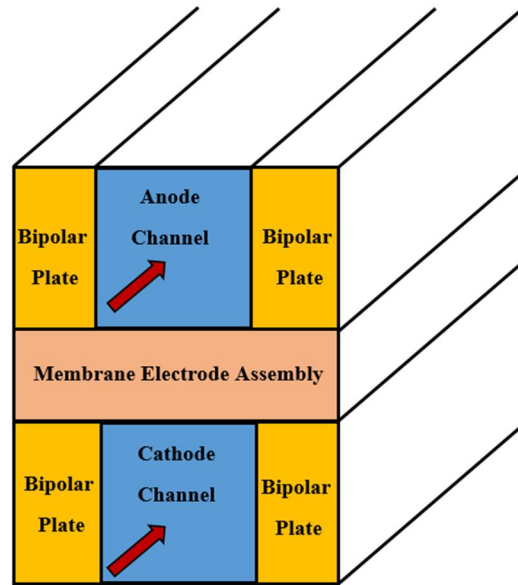
$$\nabla \cdot (\mathbf{u} C_k) = \nabla \cdot (D_k^{eff} \nabla C_k) + S_k \quad (3)$$

بهبود بخشیده و برای درجه شکسته شدن مقدار بهینه را گزارش نمایند.

فرقانی و همکاران [۱۵]، روش جدیدی را به نام لانه زنبور به منظور بهینه سازی پارامترهای حاکم بر پیل سوختی پلیمری توسعه دادند. بدین منظور جهت بهبود عملکرد لایه‌های کاتالیزور طراحی جدیدی برای این لایه به عنوان کاتالیزور الکتروکربن آزاد انجام شد. رجیبیان و همکاران [۱۶]، در یک کار جدید به تحلیل آزمایشگاهی و عددی پیل سوختی پلیمری با کانال مارپیچ متقارن پرداختند. آنها دریافته‌اند که مدل پیشنهادی جدید حتی در چگالی‌های جریان بالا نیز توزیع دما و غلظت مطلوبی در سطح واکنش ایجاد نماید. افشاری و همکاران [۱۷]، در یک کار عددی سه بعدی تأثیر تغییر تخلخل لایه نفوذ گاز و فشار را در یک میدان لانه زنبوری بررسی کرده و دریافته‌اند، افزایش نفوذپذیری باعث افزایش یکنواختی توزیع چگالی جریان می‌شود و در نهایت محصول آب تولیدی در مجموعه الکتروکود - غشاء تجمع نمی‌یابد و موجب اختلال در روند انتقال گازهای واکنش دهنده به لایه کاتالیست نخواهد شد. شیخ محمدی و همکاران [۱۸]، نیز در یک بررسی عددی و آزمایشگاهی مدلی سه بعدی از پیل سوختی پلیمری را تحلیل نموده و اثر سرعت واکنش دهنده‌های ورودی و نیز مشخصات هندسی مانعی روی لایه‌های نفوذ گاز آند و کاتد را مطالعه نمودند. نتایج آنها نشان دهنده افزایش کارایی با افزایش برجستگی مذکور است. با عنایت به تحقیقات مطالعه شده اهمیت بررسی هندسی و تحلیل پارامترهای حاکم دوچندان به نظر می‌رسد. حسن احمد و همکاران [۱۹]، در یک کار عددی سه بعدی، با ثابت نگه داشتن مساحت سطح واکنش الکتروشیمیایی و تغییر عرض کانال به تحلیل نسبت عرض کانال به عرض ناحیه شانه پرداختند. ضمناً شکل هندسی سطح مقطع کانال‌های گاز را به شکل متوازی الاضلاع و دوزنقه در آورده و با کار اصلی مقایسه نمودند و دریافته‌اند، مدل اصلی بهترین بازدهی را دارا است. از سویی هدف محققان ساخت مدلی با کارایی بهتر و مواد اولیه کمتر با هزینه پایین تر است؛ لذا در این مقاله عرض صفحات بای پولار (شانه) که در واقع وزن اصلی پیل را حمل می‌کنند و نیز هزینه خرید نسبتاً بالایی دارند بررسی شده و در ادامه جهت طولانی تر کردن مسیر حرکت مواد واکنش دهنده

جدول ۲- شرایط مرزی

نوع شرط مرزی	ناحیه مورد نظر
$u = u_{in}, T = T_{in}, v = 0,$	ورودی کانال گاز
$C_{H_2} = C^a_{H_2,in}, C_{H_2O} = C^a_{H_2O,in}$	آند
$u = u_{in}, T = T_{in}, v = 0,$	ورودی کانال گاز
$C_{O_2} = C^c_{O_2,in}, C_{N_2} = C^c_{N_2,in}$	کاتد
$\frac{\partial u}{\partial x} = \frac{\partial v}{\partial x} = \frac{\partial w}{\partial z} = \frac{\partial T}{\partial x} = 0$	خروجی کانال‌های گاز آند و کاتد
$\frac{\partial u}{\partial y} = \varepsilon_{eff,GDL} \frac{\partial u}{\partial y} = \varepsilon_{eff,CL} \frac{\partial u}{\partial y}$	فصل مشترک لایه نفوذ گاز و کانال کاتالیست
$\frac{\partial v}{\partial y} = \varepsilon_{eff,GDL} \frac{\partial v}{\partial y} = \varepsilon_{eff,CL} \frac{\partial v}{\partial y}$	فصل مشترک لایه نفوذ گاز و کانال کاتالیست
$\frac{\partial w}{\partial y} = \varepsilon_{eff,GDL} \frac{\partial w}{\partial y} = \varepsilon_{eff,CL} \frac{\partial w}{\partial y}$	فصل مشترک لایه نفوذ گاز و کانال کاتالیست
$u = v = w = C_i = 0$	فصل مشترک غشا و کاتالیست
$u = v = w = C_i = 0, T_{surface} = 353K$	صفحه بالایی کانال
$u = w = 0, T_{surface} = T_{wall}$	صفحه پایینی کانال
$\phi_{sol} = 0, \frac{\partial \phi_{mem}}{\partial y} = 0$	صفحه بالایی صفحه بی پولار آند
$\phi_{sol} = V_{cell}, \frac{\partial \phi_{mem}}{\partial y} = 0$	صفحه بالایی صفحه بی پولار کاتد
$\frac{\partial \phi_{mem}}{\partial x} = 0, \frac{\partial \phi_{mem}}{\partial z} = 0, \frac{\partial \phi_{sol}}{\partial x} = 0,$	سطوح بیرونی
$\frac{\partial \phi_{sol}}{\partial z} = 0$	سطوح بیرونی



شکل ۱- شماتیک پیل سوختی پلیمری از نمای روبرو (بالا) و جانبی (پایین)

(۴)  $\nabla \cdot (\kappa_e^{eff} \nabla \phi_e) + S_\phi = 0$   
 در معادلات فوق  $\mathbf{u}$  بیانگر بردار سرعت،  $\mu$  نشان دهنده ویسکوزیته دینامیکی و  $S_m$  ترم چشمه مربوط به توصیف جریان کششی دارسی از طریق لایه‌های انتشار گاز متخلخل و لایه های کاتالیزور است. منابع [۸ و ۷] اطلاعات کاملتری از معادلات حاکم و جزئیات آن ارائه کرده است.

۶- روند حل عددی و کار آزمایشگاهی

برای گسسته سازی و نهایتاً حل عددی معادلات حاکم بر میدان جریان سیال از روش حجم محدود و نرم افزار تجاری فلونت بهره گرفته شده که در ادامه جهت کوپلینگ میدان سرعت و فشار از الگوریتم سیمپل استفاده شده است. پس از گسسته شدن معادلات، از روش ماتریسی تکراری گوس

۵- شرایط مرزی

برای حل عددی معادلات حاکم بر میدان جریان سیال به شرایط مرزی نیاز است که مشروح آن در جدول ۲ نشان داده شده است.

جدول ۳ نیز مشخصات هندسی و عملکردی پیل سوختی را نشان می‌دهد [۲۰].

جهت تحلیل کار عددی و شبکه بندی مدل شبیه سازی شده از مش مربعی سازمان یافته استفاده شده است. لازم بذکر است که شبکه بندی میدان محاسباتی توسط نرم افزار گمبیت انجام شده است. جهت اطمینان از روند حل عددی تست‌های دقیقی مبنی بر مستقل بودن حل از تعداد مش انجام گرفته که بر اساس اطلاعات موجود در شکل‌های ۳ و ۴ تعداد ۲۴۰۰۰۰ عدد مش به عنوان مش پایه انتخاب شده است.

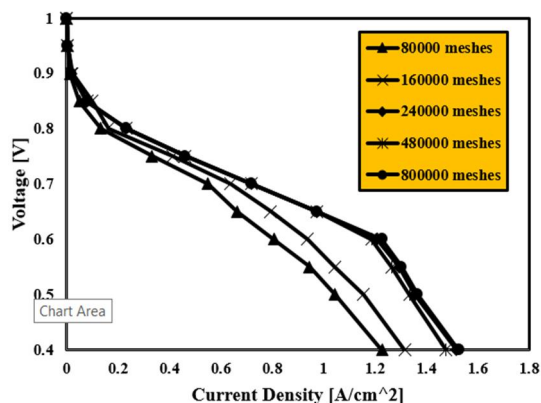
شکل ۴ بررسی کیفی استقلال از شبکه را با ارایه کانتور اکسیژن در فصل مشترک بین لایه‌های کاتالیست کاند و غشا در دو نوع مش مختلف در اختلاف ولتاژ  $V=0.4[V]$  نشان می‌دهد که بیانگر مستقل بودن حل عددی از تعداد مش است.

پس از اطمینان از صحت حل عددی، یک مدل آزمایشگاهی نیز جمع بندی و راه اندازی شده است. جنس غشاء از نفیون ۱۱۷ بوده و در لایه‌های کاتالیستی آند و کاتد از ۴ میلی گرم بر مترمربع Pt-Ru/C و ۴ میلی گرم بر سانتی متر مربع Pt/C استفاده شده است. کانال‌های گاز نیز بصورت ماشین کاری روی صفحات دوقطبی ایجاد می‌شوند. شکل ۵ نمایی از ایستگاه تست آزمایشگاهی را نشان می‌دهد. در انتهای استک از صفحات جمع آوری کننده جریان با جنس مس و برای آب بندی مابین آند و کاتد از واشرهای لاستیکی به ضخامت ۰/۱ میلی متر استفاده شده است. برای بستن پیچ‌ها و نگهداشتن استک‌ها از گشتاور ۶ نیوتن متر استفاده شده است. پس از سرهم‌بندی استک تست نشستی برای استک

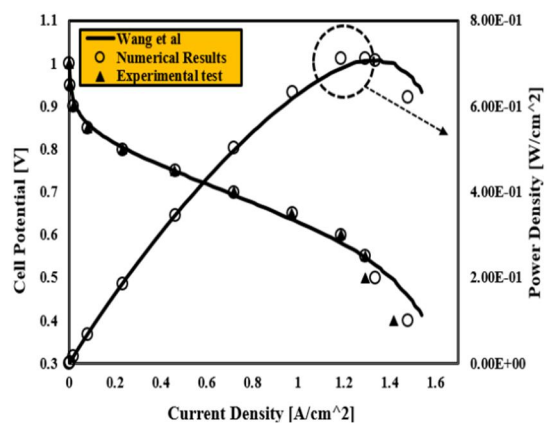
سایدل برای حل معادلات جبری بدست آمده، استفاده می‌شود؛ لذا می‌توان دریافت که روند حل عددی تکراری است تا نهایتاً همگرایی حاصل شود. معیار همگرایی نیز  $10^{-10}$  در نظر گرفته شده است. ضمناً جهت اعتباردهی به کار عددی از کار آزمایشگاهی و نیز داده‌های موجود در پژوهش ونگ و همکاران [۲۱] نیز استفاده شده است که در شکل ۲، مطابقت نتایج مذکور بوضوح دیده می‌شود.

جدول ۳- مشخصات هندسی و عملکردی [۲۰]

طول کانال پیل سوختی	۷ cm
عرض کانال گاز	۰/۱ cm
عرض لایه نفوذ گاز	۰/۰۳ cm
عرض لایه کاتالیستی	۰/۰۰۱۲۹ cm
عرض غشاء	۰/۰۱۰۸ cm
عرض شانه	۰/۰۵ cm
ثابت فارادی F	۹۶۴۸۷
ضریب انتقال آند و کاتد	۲
تخلخل لایه نفوذ گاز و کاتالیست	۰/۴
رطوبت نسبی کاتد و آند (درصد)	۱۰۰
فشار آند و کاتد	۳ atm
دما	۷۰ °C



شکل ۳- استقلال حل عددی از تعداد شبکه محاسباتی



شکل ۲- اعتباردهی به کار عددی

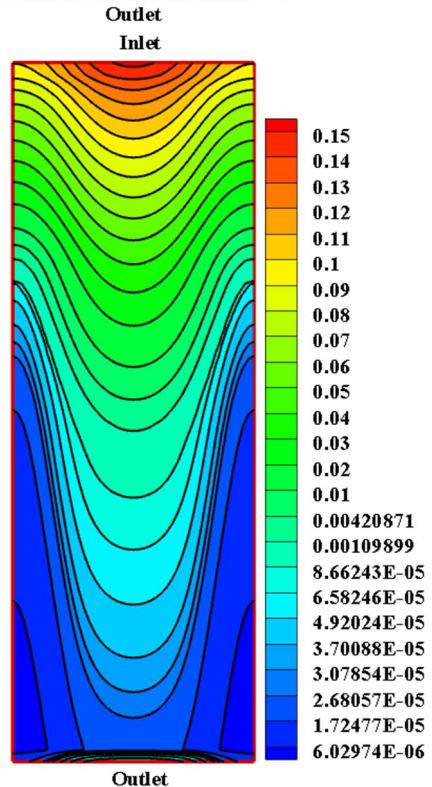
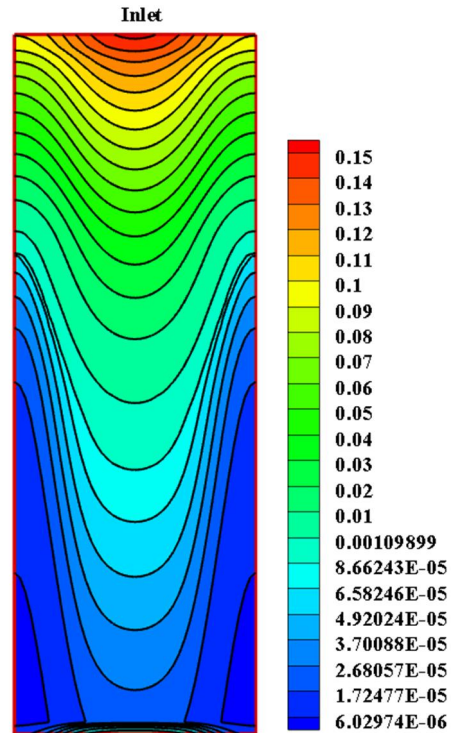
مورد نظر به عمل آمد. جهت جلوگیری از نشتی گازهای واکنش دهنده و نیز کاهش مقاومت تماسی سل‌ها، تمامی اجزا پیل سوختی از قبیل T غشه، لایه توزیع کننده گاز و صفحات دوقطبی می بایستی به ترتیب و با فشار مناسب و یکنواخت در کنار یکدیگر قرار گیرند. به همین دلیل توده پیل سوختی پلیمری بین دو صفحه انتهائی توسط پیچ یا هر نوع اتصال دیگر تحت فشار مناسب و یکنواخت نگه داشته می‌شوند. نیروی نگهدارنده لازم برابر است با نیروی لازم جهت نگه داشتن اجزا داخلی، به اضافه نیروی داخلی ناشی از فشار گازهای واکنش دهنده، به اضافه نیروی لازم جهت نگه داشتن واشرها جهت آب بندی پیل. میزان دبی جرم گازهای واکنش دهنده توسط فلومتر کنترل می‌شود؛ همچنین از کنترل کننده دما و رطوبت در استک بهره گرفته شده است. اطلاعات مربوط به چگالی جریان الکتریکی بوسیله کامپیوتر برای هر ولتاژ ثبت می‌شود که برای ثبت این اعداد به منظور رسیدن به شرایط پایا در حدود ۲۰ ثانیه تامل می‌شود.



شکل ۵- مدل آزمایشگاهی

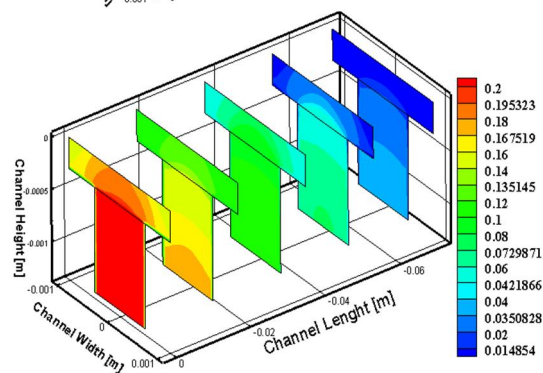
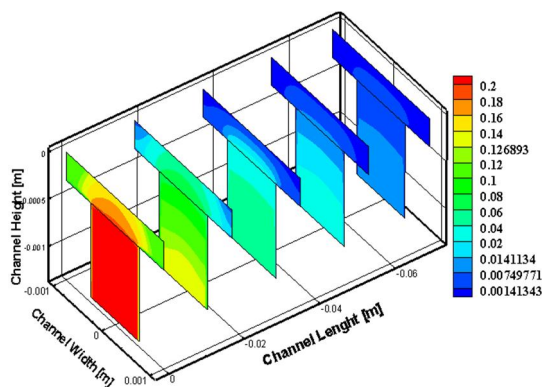
#### ۷- نتایج مدل پایه

در ابتدا برخی نتایج عددی حاصل از شبیه سازی انجام شده ارایه می‌شود تا نحوه توزیع گونه‌ها و پارامترهای مهم دیگر گزارش شود؛ لذا شکل ۶ توزیع دما در مقاطع مختلف را بیان



شکل ۴- توزیع کسر جرمی اکسیژن برای ۲۴۰۰۰۰ (بالا) و ۴۸۰۰۰۰ (پایین) مش

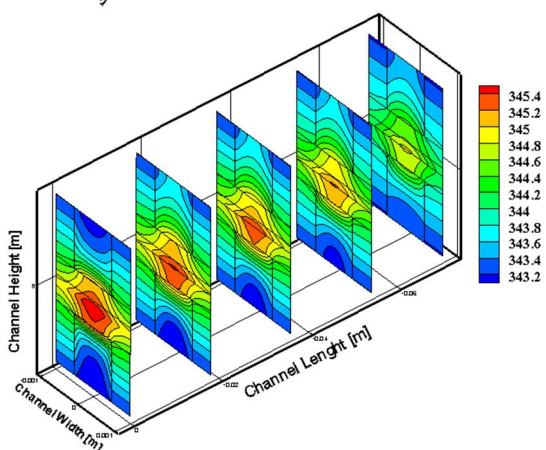
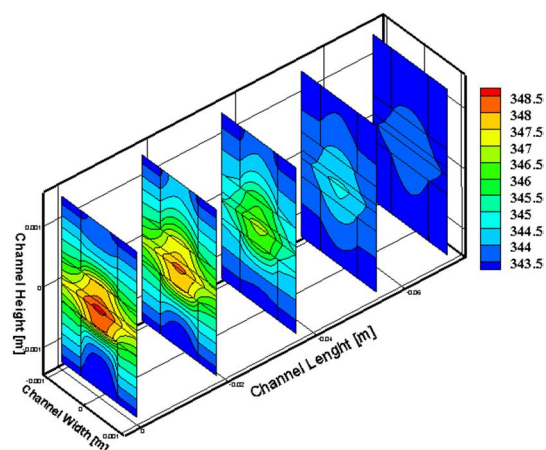




شکل ۷- توزیع کسر جرمی اکسیژن در  $V=0.4[V]$  (بالا) و  $V=0.6[V]$  (پایین)

ارایه شده فقط بخش کانال و مجموعه الکترو-غشای سمت کاتد آورده شده است.

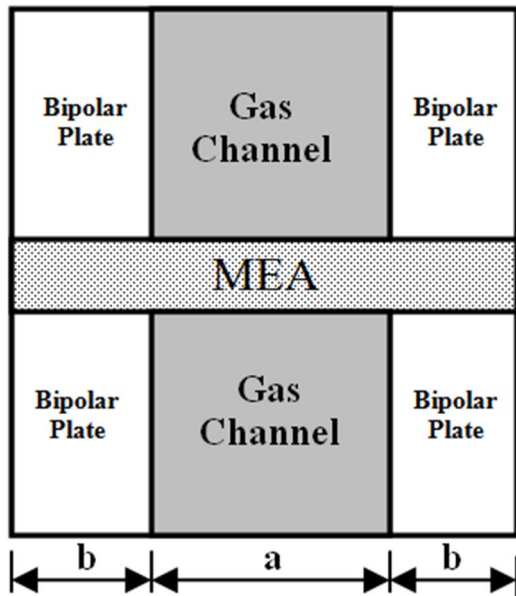
تایید کننده کانتورهای توزیع دما و اکسیژن که در فوق ارایه شده‌اند، کانتور توزیع آب در مقاطع مختلف در بخش آند و کاتد است. شکل ۸ توزیع کسر جرمی آب را در کانال‌های گاز و مجموعه الکترو-غشا در دو ولتاژ مختلف را نشان می‌دهد. در اختلاف ولتاژ کمتر بدلیل تولید جریان الکتریکی بیشتر طبیعتاً اکسیژن بیشتری مصرف شده و به تبع آن آب بیشتری تولید می‌شود. در سمت کاتد در راستای پیل سوختی مقدار آب افزایش می‌یابد؛ زیرا در سمت کاتد آب تولید می‌شود، ولی در سمت آند رفته رفته آب کاهش می‌یابد، چون در سمت آند وظیفه آب، حمل پروتون‌های هیدروژن بسمت کاتد است. شکل ۹ نیز توزیع کسر جرمی آب را در ولتاژهای مختلف و در راستای طولی فصل مشترک بین لایه کاتالیست آند و غشا نشان می‌دهد. با کاهش اختلاف ولتاژ، فعالیت آب برای انتقال پروتون‌ها بیشتر شده، پس مقدار آب نیز کمتر خواهد بود.



شکل ۶- توزیع دما در  $V=0.4[V]$  (بالا) و  $V=0.6[V]$  (پایین)

می‌کند. شکل حاکی از آن است که مقدار کمی دما در اختلاف ولتاژ  $V=0.4[V]$  بیشتر از مقادیر مربوط به اختلاف ولتاژ  $V=0.6[V]$  است؛ زیرا در اختلاف ولتاژ کمتر، نرخ انجام واکنش الکتروشیمیایی بیشتر بوده و تولید حرارت بالاتر خواهد بود. ضمناً در راستای جریان سیال نیز دما کاهش می‌یابد؛ زیرا آب وظیفه خنک‌کنندگی ایفا کرده و صفحات دوقطبی نیز به مرور بدلیل رسانا بودن حرارتی، سبب کاهش دما می‌شوند.

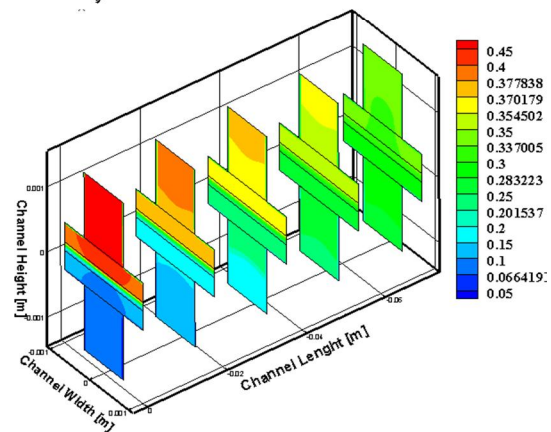
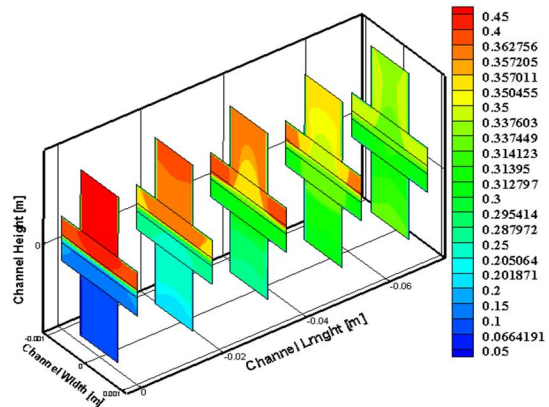
همانطور که اشاره شد، در اختلاف ولتاژ کمتر که شدت واکنش الکتروشیمیایی بیشتر بوده و در نتیجه تراکم جریان الکتریکی نیز بالاتر است، میزان مصرف مواد واکنش‌دهنده نیز بیشتر بوده که این مطلب در شکل ۷ نشان داده شده است که بیانگر توزیع کسر جرمی اکسیژن است. البته چون اکسیژن فقط از سمت کانال کاتد وارد می‌شود، در کانتورهای



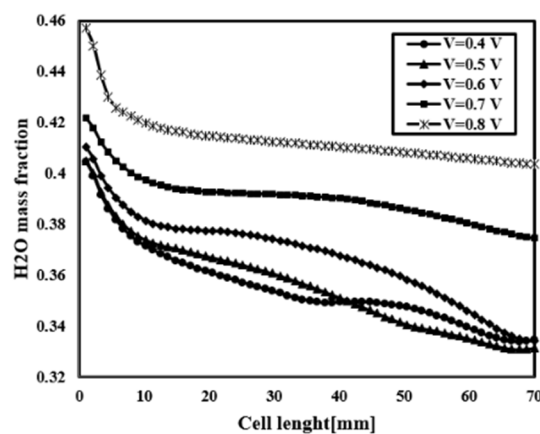
شکل ۱۰- شماتیک دوبعدی بررسی تأثیر عرض شانه

می‌شود. علت این بررسی اهمیت کاهش میزان مصرفی گران قیمت در بخش صفحات دوقطبی با لزوم حفظ یا افزایش میزان تولید جریان الکتریکی است. شکل ۱۰ شماتیک بررسی پارامتر مذکور را از نمای روبرو نشان می‌دهد. لازم بذکر است که در این بررسی عرض ناحیه کانال  $a$  ثابت فرض شده است.

جدول ۳ مشخصات طرح پیشنهادی را بیان می‌کند. قابل ملاحظه است که با کاهش عرض شانه از میزان سطح واکنش الکتروشیمیایی نیز کاسته شده است. این بخش علاوه بر شبیه سازی عددی، بصورت آزمایشگاهی نیز مورد تحلیل قرار گرفته است تا به نوعی اعتباردهی به کار عددی نیز باشد. شکل ۱۱ نشان می‌دهد که  $case 1$  نسبت به مدل پایه و سایر مدل‌ها کارایی بیشتری دارد و چون به لحاظ مواد مصرفی در تولید صفحات بی پولار ۲۰٪ کمتر است، پس می‌توان آن را بهترین گزینه دانست. علت افزایش تراکم جریان الکتریکی در  $case 1$  نسبت به حالت پایه، هجوم الکترون‌ها به سمت کاتالیست کاتد برای انجام واکنش بیشتر است. در شکل‌ها،  $a/b$  همان  $Ch/Sh$  (نسبت عرض کانال به عرض شانه) است. تمام شرایط مرزی و نیز تعداد مش‌ها در طرح‌های جدید، برابر مدل پایه در نظر گرفته شده است.



شکل ۸- توزیع کسر جرمی آب در  $V=0.4[V]$  (بالا) و  $V=0.6[V]$  پایین



شکل ۹- توزیع کسر جرمی آب در ولتاژهای مختلف سمت آند

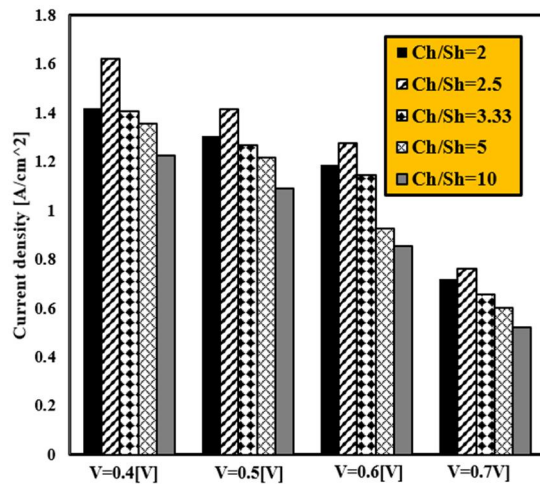
#### ۷-۱- تأثیر عرض ناحیه شانه

پس از تأیید نتایج عددی مدل پایه، به بررسی تأثیر تغییر عرض ناحیه شانه یا همان صفحات بای پولار (دو قطبی) پرداخته

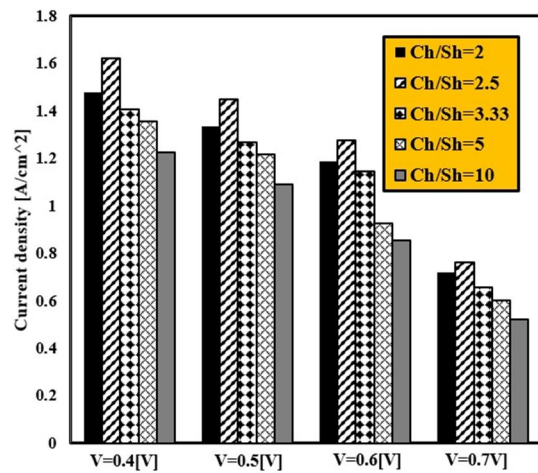


جدول ۳- مشخصات هندسی مدل پیشنهادی

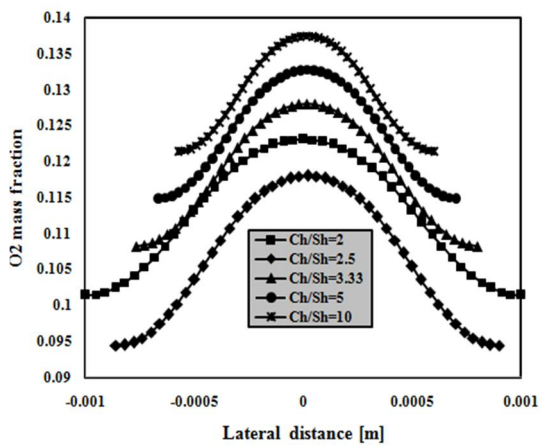
نسبت منظر	سطح واکنش (mm <sup>2</sup> )	عرض کانال (mm)	عرض بی پولار (mm)
Ch/Sh=2	۱۴۰	a=1	b=0.5(base)
Ch/Sh=2.5	۱۲۶	a=1	b=0.4(case1)
Ch/Sh=3.33	۱۱۲	a=1	b=0.3(case2)
Ch/Sh=5	۹۸	a=1	b=0.2(case3)
Ch/Sh=10	۸۴	a=1	b=0.1(case4)



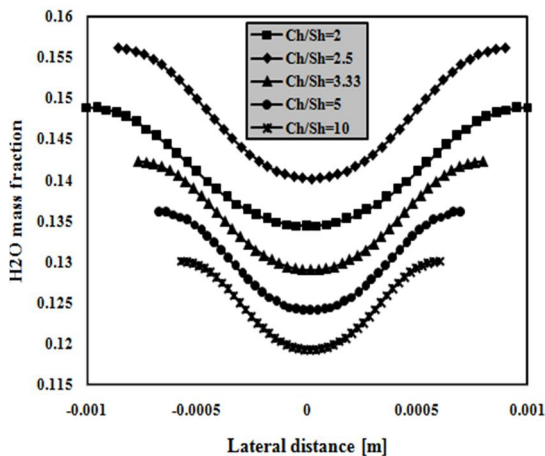
شکل ۱۲- میزان تراکم جریان خروجی در کار آزمایشگاهی



شکل ۱۱- میزان تراکم جریان خروجی در کار عددی



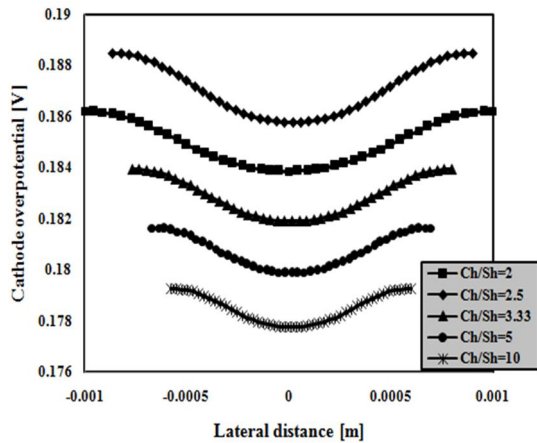
شکل ۱۳- میزان کسر جرمی اکسیژن در V=0.4[V]



شکل ۱۴- میزان کسر جرمی آب در V=0.4[V]

نتایج آزمایشگاهی نیز در شکل ۱۲ نشان داده شده است. لازم بذکر است که درصد خطای مربوط به نتایج عددی و آزمایشگاهی، مربوط به شکل‌های ۱۱ و ۱۲ برای اختلاف ولتاژهای کم در حدود ۵ درصد است که با توجه به دقت صورت گرفته در انجام آزمایشات خطای قابل قبولی است. علت اصلی کاهش تراکم جریان الکتریکی با کاهش عرض شانه از case2 به بعد، کاهش سطح مقطع واکنش الکتروشیمیایی است. برای تایید و اطمینان بیشتر از صحت نتایج فوق، نمودار توزیع کسر جرمی اکسیژن و آب در فاصله 10mm از ورودی مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج حاکی است که در case1 بدلیل بالا بودن میزان تراکم جریان الکتریکی، مصرف اکسیژن زیاد (پس مقدار آن کم) و میزان آب تولیدی نیز بیشتر سایر مدل‌ها خواهد بود. شکل‌های ۱۳ و ۱۴ موید همین مطلب هستند.

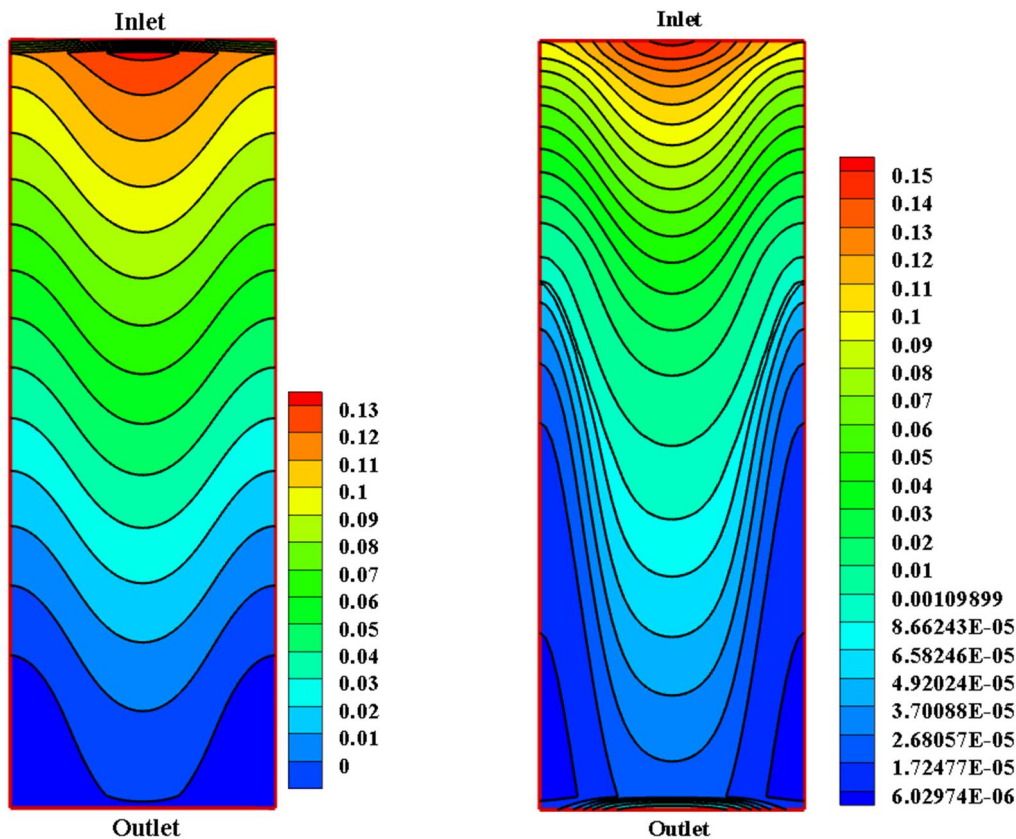
بیشتر خواهد بود. پس نهایتاً می‌توان دریافت که case 1 از مدل پایه عملکرد بهتری دارد.



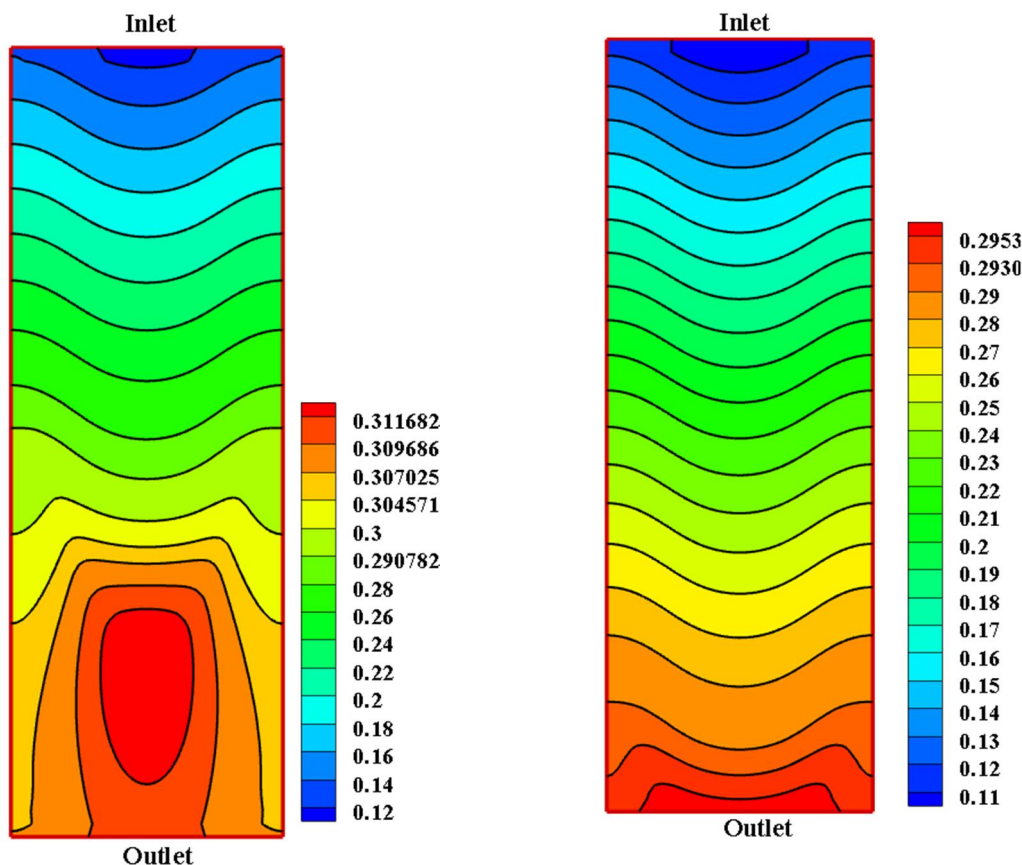
شکل ۱۵- میزان اضافه پتانسیل کاتد در  $V=0.4[V]$

نتیجه بسیار مهم دیگری که ارتباط مستقیم با مقدار کسر جرمی اکسیژن دارد، اضافه پتانسیل در سمت کاتد است. هر چقدر اکسیژن کمتر باشد، میزان پارامتر مذکور بیشتر خواهد بود، لذا برای case 1 که اکسیژن بیشتری مصرف کرده است، مقدار اضافه پتانسیل بیشتر خواهد بود. شکل ۱۵ توزیع اضافه پتانسیل در فصل مشترک لایه کاتالیست و غشا را در  $V=0.4[V]$  نشان می‌دهد. شکل ۱۶ نیز کانتور توزیع کسر جرمی اکسیژن را برای مدل پایه (base) و case 1 نشان می‌دهد. سایر مدل‌ها چون بازدهی کمتری از مدل پایه داشتند، به‌لحاظ کیفی نتایج از آنها ارایه نمی‌شود.

ضمناً در شکل ۱۷ نیز کانتور توزیع کسر جرمی آب در فصل مشترک بین لایه کاتالیست کاتد و غشا ارایه شده است. مشخصاً چون case 1 نسبت به مدل پایه جریان الکتریکی بیشتری تولید کرده است، لذا مقدار آب تولیدی آن نیز



شکل ۱۶- توزیع کسر جرمی اکسیژن در  $V=0.4[V]$  برای مدل پایه (بالا) و case 1 (پایین)

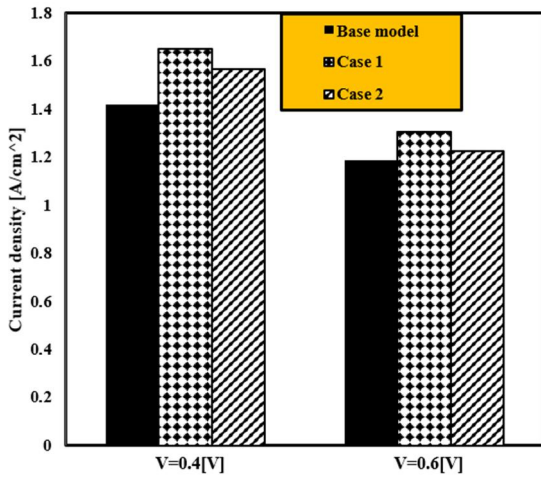


شکل ۱۷- توزیع کسر جرمی آب در  $V=0.4[V]$  برای مدل پایه (بالا) و case1 (پایین)

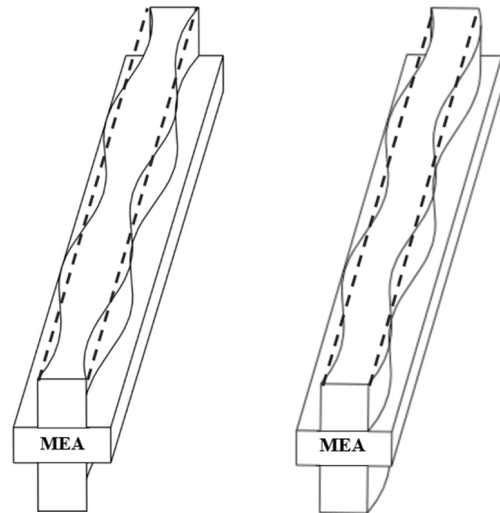
پیل سوختی راه اندازی گردیده است. در ابتدا، برای بررسی عددی و تجربی دو نوع کانال مارپیچ با ۵ قوس ایجاد شده و از بین آنها بهترین مدل معرفی می‌شود و در ادامه، تاثیر تعداد قوس‌ها مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. لازم بذکر است که یکی از چالش‌های اساسی در این بخش، تولید هندسه و مش بندی در کار عددی بوده است. چون طول پیل سوختی ۷۰ میلی‌متر است، به ازای تعداد قوس‌ها می‌توان مشخصات هندسی آنها را تعیین کرد. ضمناً میزان انحراف کمان‌ها از حالت مستقیم  $0/2$  میلی‌متر در نظر گرفته شده است. مدل‌های جدید به لحاظ هندسی، مسیر حرکت مواد واکنش دهنده را در یک سطح واکنش برابر افزایش داده و سبب بهبود نفوذ به لایه‌های درونی می‌شوند؛ لذا، در محل انجام واکنش به میزان کافی مواد واکنش دهنده موجود خواهد بود و این امر سبب بهبود عملکرد مدل‌های پیشنهادی نسبت به مدل پایه می‌شود. شکل ۱۹ نشان دهنده میزان تراکم جریان الکتریکی در دو ولتاژ مختلف است.

#### ۷-۲- تاثیر تغییر شکل کانال‌های گاز

در شکل ۱۸ مدل پیشنهادی سه بعدی از یک پیل سوختی با کانال‌های گاز سینوسی (مارپیچ) مشاهده می‌شود. در این مدل سه بعدی پس از بررسی حساسیت شبیه سازی به اندازه شبکه در حدود ۲۴۰۰۰۰ سلول محاسباتی تولید شده است که این تعداد با مدل پایه تقریباً یکسان است. جهت مقایسه صحیح بین مدل پایه و مدل پیشنهادی، مطابق با مطالعات موجود در ادبیات فن، مساحت سطح واکنش الکتروشیمیایی، دبی جرمی ورودی و نیز دمای سیال‌های ورودی یکسان فرض شده است. ضمناً میزان انحراف دیواره‌های کانال از حالت مستقیم به اندازه  $0/2$  میلی‌متر لحاظ شده است. این مدل‌ها هم بصورت عددی و هم بصورت آزمایشگاهی برای ۵ قوس بررسی و تحلیل شده اند. کانال‌های مارپیچ با استفاده از ابزار CNC روی صفحات بی پولار ایجاد شده‌اند و سپس طبق روال ذکر شده، مجموعه

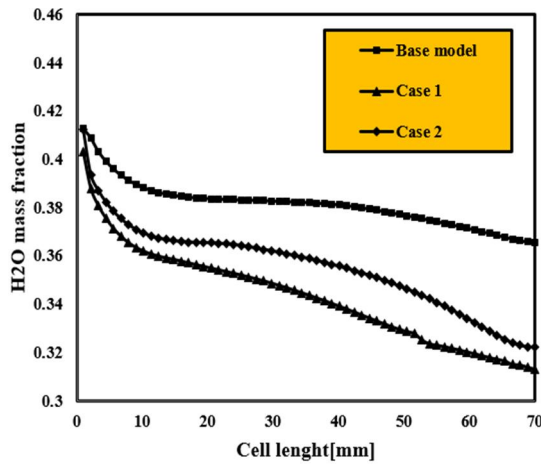


شکل ۲۰- مقایسه تراکم جریان الکتریکی آزمایشگاهی

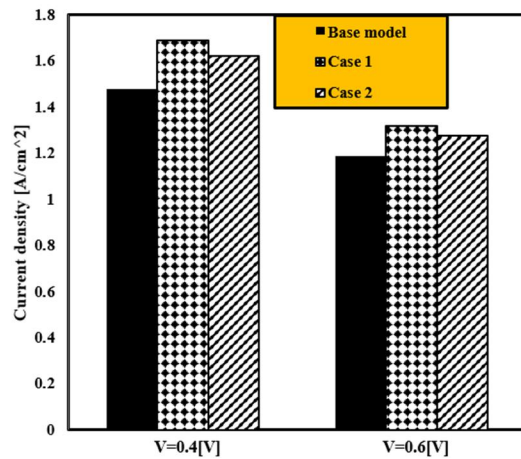


شکل ۱۸- مدل‌های پیشنهادی با ۵ قوس

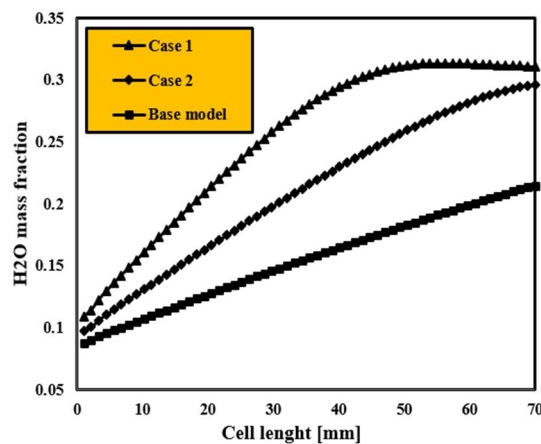
Case 1 (چپ) و Case 2 (راست)



شکل ۲۱- توزیع آب برای مدل‌ها در بخش آند



شکل ۱۹- مقایسه تراکم جریان الکتریکی عددی

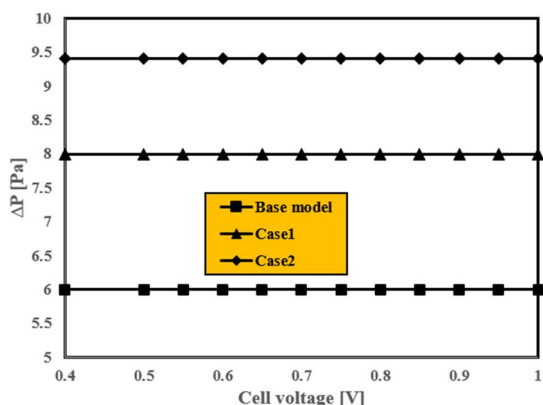


شکل ۲۲- توزیع آب برای مدل‌ها در بخش کاتد

شکل ۲۰ نتایج آزمایشگاهی را نشان می‌دهد که در اختلاف ولتاژ کم در حدود ۵ درصد اختلاف با نتایج عددی دارد.

با توجه به کارایی بهتر case 1 نسبت به سایر مدل‌ها انتظار می‌رود که مقدار آب تولید شده در بخش کاتالیست این مدل از سایر مدل‌ها بیشتر بوده و نیز در سمت آند بدلیل فعالیت بیشتر آب برای حمل پروتون‌های هیدروژن، مقدار آب در این بخش برای case 1 کمتر خواهد بود. شکل‌های ۲۱ و ۲۲، بوضوح نشان دهنده این واقعیت هستند.





شکل ۲۴- افت فشار مدل‌ها

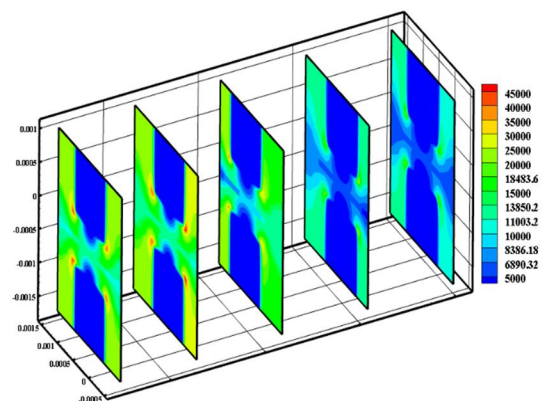
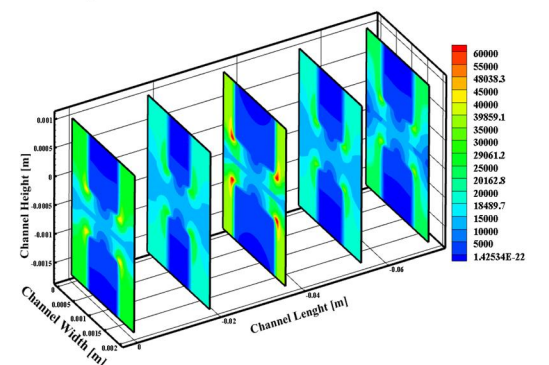
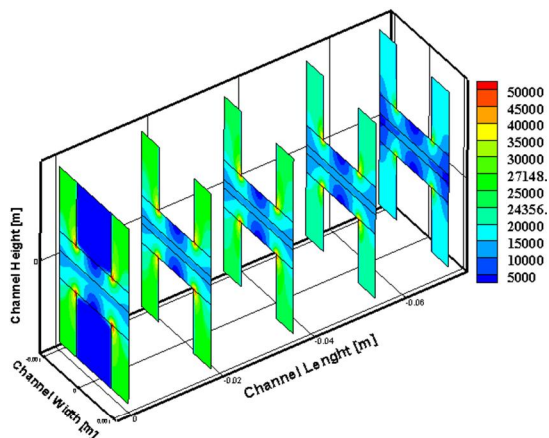
در ادامه با انتخاب case1 تعداد قوس‌ها از ۵ عدد ۶ و ۷ عدد افزایش داده می‌شوند. مطابق گزارش جدول ۴ با افزایش تعداد قوس‌ها، روند افزایش تراکم جریان الکتریکی کندتر، ولی روند افزایش افت فشار بیشتر می‌شود؛ لذا برای در این پژوهش case1 ترجیح داده می‌شود. اعداد بصورت گرد شده تا دو رقم اعشار نشان داده شده‌اند. تراکم جریان بر حسب  $A/cm^2$  و افت فشار بر حسب Pa است. گفتنی است، بدلیل پرهزینه بودن آزمایشات صورت گرفته بررسی ۶ و ۷ قوس فقط بصورت عددی انجام شده است.

شکل ۲۵ مقایسه توزیع کسر جرمی اکسیژن را برای case1 در سه نوع قوس مختلف انجام داده است و چون تراکم جریان الکتریکی در ۷ قوس بیشتر است، پس مصرف اکسیژن هم بیشتر بوده و نتیجتاً مقدار آن کمتر خواهد بود. همانطور که مشاهده می‌شود، در مدلی که دارای ۷ قوس است، در خروجی پیل سوختی کمبود اکسیژن وجود دارد که دلیل بسیار مهم برای عدم افزایش کافی تراکم جریان الکتریکی با افزایش قوس از ۶ به ۷ است.

توزیع عرضی اضافه پتانسیل در سمت کاتد برای قوس‌های مختلف در شکل ۲۶ ارایه شده است. با توجه به توضیحات قبل این توزیع منطقی بوده و کاربر را برای انتخاب مدل با ۵ قوس قانع تر می‌نماید؛ زیرا اضافه پتانسیل مدل ۷ قوس از همه بیشتر بوده که در واقع یک نوع افت ولتاژ محسوب می‌شود. لازم بذکر است، بدلیل هزینه بر بودن و بالا بودن زمان ران کامپیوتری، تعداد قوس‌های بیشتر از ۷ بررسی نشد و برای انجام کارهای آتی توصیه می‌شود.

شکل ۲۳ کانتور توزیع تراکم جریان الکتریکی را برای هر سه مدل نشان می‌دهد. نتیجه حاکی از برتری case1 است که قبلاً نیز به آن اشاره شد.

نهایتاً بر اساس افت فشار مدل‌ها می‌توان case 1 را به کاربر پیشنهاد کرد. شکل ۲۴ نشان دهنده همین مطلب است.



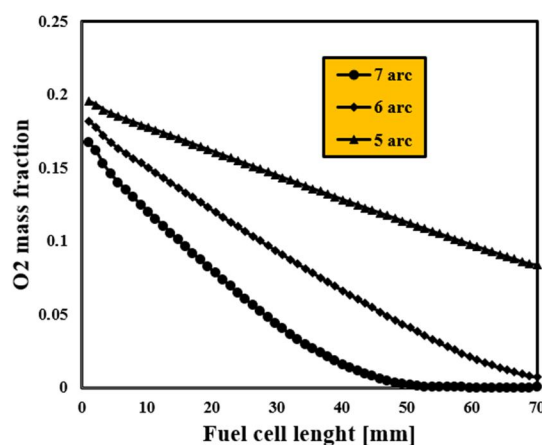
شکل ۲۳- توزیع تراکم جریان الکتریکی



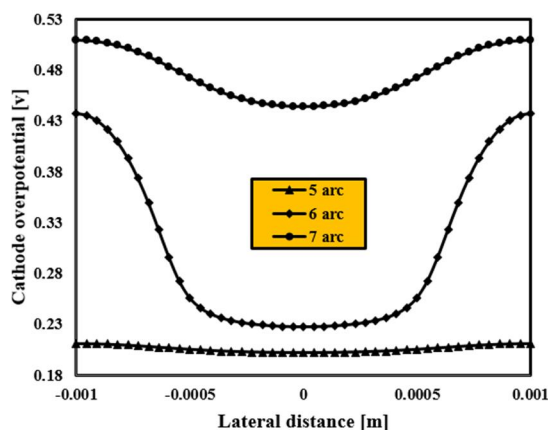
عددی با استفاده از روش حجم محدود انجام شده و نتایج حاصل از آن با نتایج تجربی و نیز نتایج موجود در ادبیات فن اعتباردهی شده است. تحلیل نمودارها حاکی از وابستگی پارامترهای حیاتی پیل سوختی بهم است. بدین معنی که با کاهش اختلاف ولتاژ و افزایش تراکم جریان الکتریکی، میزان مصرف گونه‌هایی مانند اکسیژن و هیدروژن افزایش یافته و به تبع آن مقدار آب در بخش آند کاهش و در بخش کاتد افزایش می‌یابد. با کاهش اکسیژن، مقدار اضافه پتانسیل کاتد بیشتر می‌شود. در یک بخش تأثیر عرض ناحیه شانه بررسی شده و بهترین نتیجه برای  $b=0.4\text{mm}$  بدست آمده که سبب افزایش ۱۰ درصدی جریان الکتریکی در  $V=0.4[\text{V}]$  می‌شود. در ادامه کانال‌های گاز از حالت مستقیم به دو حالت سینوسی تبدیل شدند که در بهترین مدل، ۵ قوس در ولتاژ مذکور حدود ۱۳ درصد بهبود عملکرد دیده می‌شود؛ اما برای تعداد قوس‌های بیشتر بدلیل رشد نرخ افت فشار در مقایسه با نرخ رشد تراکم جریان الکتریکی، همان مدل قوس ترجیح داده شد. جهت انجام کارهای آینده می‌توان تعداد قوس‌های بیشتر و متنوعتر را هم بصورت عددی و هم تجربی تحلیل کرد. شایان ذکر است که کانال‌های گاز معرفی شده، کاملاً جدید بوده و پتانسیل بسیار بالایی جهت تمرکز دارند.

جدول ۴- مقایسه عملکرد case 1 با تعداد قوس‌های مختلف

Case1	تراکم جریان (عددی)	تراکم جریان (آزمایشگاهی)	افت فشار (عددی)
۵ قوس	۱/۶۷	۱/۶۴	۸
۶ قوس	۱/۷	-	۹
۷ قوس	۱/۷۱	-	۱۲



شکل ۲۵- توزیع کسر جرمی اکسیژن برای قوس‌های مختلف



شکل ۲۶- توزیع اضافه پتانسیل کاتد برای قوس‌های مختلف

#### ۸- نتیجه گیری

در تحقیق حاضر یک پیل سوختی پلیمری بصورت عددی و در برخی بخش‌ها بصورت آزمایشگاهی تحلیل شده است. کار

#### ۹- نمادها

ضریب فعالیت آب (بدون بعد)	A
ضریب درگ الکترواستمیک (بدون بعد)	N
غلظت گونه ( $\text{mol}/\text{m}^3$ )	C
ضریب پخش ( $\text{m}^2/\text{s}$ )	D
پتانسیل تعادلی (Volt)	E
ثابت فارادی ( $\text{C}/\text{mol}$ )	F
آنتالپی (J)	H
جریان الکتریکی (A)	I
شار مولی ذرات واکنش دهنده	J
چگالی جریان الکتریکی ( $\text{A}/\text{m}^2$ )	J
ضریب نفوذپذیری هیدرولیکی ( $\text{m}^2$ )	K

- 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] Molaieimaneh 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] Pourmahmud N, Rezazadeh S, Mirzaei I, Motalleb S (2012) A computational study of PEMFC with conventional and deflected MEA. *J Mech Sci Technol* 26(9): 2959-2968.
- [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] Rajabian H, Amiri H, Rahimi M, Marashi SMB, Arab Solghar A (2015) Experimental and numerical analysis of PEM fuel cell performance with a new helically symmetrical flow channel. *Journal of Solid and Fluid Mechanics*. Shahrood university.
- [17] Atyabi SA, Afshari E (2013) Effect of GDL porosity and pressure on the PEM fuel cell performance with honeycomb flow-field. *Journal of Solid and Fluid Mechanics*. Shahrood university.
- [18] Sheikhmohammadi A, Mirzaee I, Pormahmod N, Ahmadi N (2019) Influence of gas channels and gas diffusion layers configuration on the performance of polymer electrolyte membrane fuel cell. *Journal of Solid and Fluid Mechanics*. Shahrood university.
- [19] Dewan HA, Hyung JS (2006) Effects of channel geometrical configuration and shoulder width on PEMFC performance at high current density. *J Power Sources* 162(1): 327-339.
- ضریب هدایت حرارتی (W/m.K) K
- جرم مولکولی ذرات واکنش دهنده M
- فشار (Pa) P
- جریان الکتریکی حجمی ( $A/m^3$ ) R
- ثابت جهانی گاز (J/kg-K) R
- ترم چشمه S
- دما (K) T
- سرعت مخلوط گازها (m/s) V
- کسر جرمی گازهای واکنش دهنده (بدون بعد) W
- کسر مولی (بدون بعد) X
- غلظت محلی ذرات ( $mol/m^3$ ) []

#### ۱۰- مراجع

- [1] William Grubb (1959) Proceedings of the 11<sup>th</sup> 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) Threedimensional numerical simulation of straight 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] Ahmadi N, Rezazadeh S, Dadvand A, Mirzaee I (2017) Study of the effect of gas channels geometry on the performance of polymer electrolyte membrane fuel cell. *periodica polytechnica chemical engineering*. *Period Polytech-Chem* 62(1).
- [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, Heidarpoor 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

[21] 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.

[20] 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: 369-375.