

## بررسی تاثیر هندسه کانال‌های تزریق گاز بر عملکرد

## و رفتار دینامیکی پیل سوختی غشا پلیمری

حجت اشرفی<sup>۱</sup>، نیما احمدی<sup>۱\*</sup>، نادر پورمحمود<sup>۲</sup>، ایرج میرزایی<sup>۲</sup>، امین دمیا<sup>۳</sup>، امین خلیل زادگان<sup>۴</sup><sup>۱</sup> استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه فنی و حرفه ای، تهران، ایران<sup>۲</sup> استاد، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران<sup>۳</sup> استادیار، گروه مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه فنی و حرفه ای، تهران، ایران<sup>۴</sup> مربی، گروه مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه فنی و حرفه ای، تهران، ایران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۱۰/۰۴؛ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۲/۰۲/۱۸؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۳/۰۳

## چکیده

پیل سوختی غشا پلیمری که با هیدروژن و هوا کار می‌کند و دارای راندمان و چگالی توان بالا، کارکرد در دمای پایین و قابلیت راه‌اندازی سریع و بدون آلاینده‌گی است، می‌تواند جایگزین مناسبی برای سوخت‌های فسیلی باشد. عملکرد سلول سوختی غشای تبادل پروتون بستگی زیادی به هندسه، پیکربندی کانال‌های جریان و اندازه دارد. پژوهش حاضر یک مطالعه عددی است که به بررسی عملکرد پیل سوختی غشا پلیمری با تکیه بر طراحی کانال‌های تزریق گاز با هندسه‌های مختلف در حالت ناپایا پرداخته شده است. برای حل معادلات حاکم از روش دینامیک سیالات محاسباتی بهره‌گیری شده است. در این روش برای گسسته سازی و حل کردن معادلات از متد حجم محدود استفاده می‌شود. هندسه‌های مختلفی که برای این پژوهش مورد استفاده قرار گرفته که شامل شبه مارپیچی (مدل A)، موازی (مدل B) و پینی (مدل C) است که ابعاد آن‌ها با مدل پایه مارپیچی شکل یکسان است. با استفاده از شبیه‌سازی دینامیکی مشاهده شد که بعد از گذشت حدود ۷۰ ثانیه جریان به حالت پایدار رسید و تولید آب رفته‌رفته افزایش یافت. نتیجه‌ها نشان می‌دهد که مدل C نسبت به سایر مدل‌ها عملکرد بهتری دارد و در مقابل مدل B بدترین عملکرد را از خود نشان می‌دهد.

**کلمات کلیدی:** پیل سوختی غشای پلیمری؛ مدل‌سازی عددی؛ رفتار دینامیکی؛ هندسه کانال گاز.

### Investigating the effect of the geometry of gas injection channels on the performance and dynamic behavior of the polymer electrolyte membrane fuel cell

Hojjat Ashrafi<sup>1</sup>, Nima Ahmadi<sup>1,\*</sup>, Nader Pormahmod<sup>2</sup>, Iraj Mirzaee<sup>2</sup>, Amin Damia<sup>3</sup>, Amin Khalilzadegan<sup>4</sup><sup>1</sup> Assist. Prof., Department of Mechanical Engineering, Technical and Vocational University (TVU), Tehran, Iran<sup>2</sup> Prof., Department of Mechanical Engineering, Urmia University, Urmia, Iran<sup>3</sup> Assist. Prof., Department of Electrical and Computer Engineering, Technical and Vocational University (TVU), Tehran, Iran<sup>4</sup> Tutor, Department of Electrical and Computer Engineering, Technical and Vocational University (TVU), Tehran, Iran

## Abstract

The polymer membrane fuel cell, which works with hydrogen and air and has high efficiency and power density, low-temperature operation, and the ability to start quickly and without pollution, can be a good alternative to fossil fuels. The performance of a proton exchange membrane fuel cell is highly dependent on the geometry, flow channel configuration, and size. In the current research, which is a numerical study, the performance of the polymer membrane fuel cell has been investigated by relying on the design of gas injection channels with different geometries in an unsteady state. The computational fluid dynamics method has been used to solve the governing equations. In this method, the finite volume method is used to discretize and solve the equations. Different geometries have been used for this research, including pseudo-spiral (model A), parallel (model B), and pin (model C), whose dimensions are the same as the spiral base model. Using dynamic simulation, it was observed that after about 70 seconds, the flow reached a stable state, and water production gradually increased. The results show that model C performs better than other models, and model B shows the worst performance.

**Keywords:** Polymer Membrane Fuel Cell; Numerical Modeling; Dynamic Behavior; Gas Channel Geometry.

## ۱- مقدمه

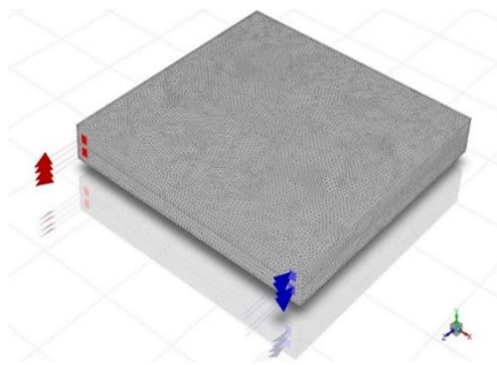
تامین انرژی یکی از دغدغه‌های اصلی بشر در عصر حاضر است. سوخت‌های فسیلی یکی از اصلی‌ترین منابع تامین انرژی است. مهمترین ایراد سوخت‌های فسیلی فناپذیر بودن آنها است. مساله بعدی در مورد این سوخت‌ها آن است که باعث آلودگی محیط زیست ( گرم شدن کره زمین، تغییرات اقلیمی، ذوب یخچال‌های قطبی، بارندگی‌های اسیدی، آلاینده‌ها، آسیب لایه ازن و ...) می‌گردند [۱]. بهره‌گیری از انرژی‌های پاک به جای انرژی‌های دارای محدودیت فسیلی، می‌تواند چالش‌های ایجاد شده را برطرف نماید. پیل سوختی غشای پروتون، یک منبع انرژی جدید برای حمل و نقل و ... است [۲]. راندمان بالا، چگالی توان بالا، دمای عملیاتی بالا و مزایای سازگاری با محیط زیست، قابلیت استفاده از پیل سوختی پلیمری در صنعت خودرو را در مقایسه با سایر پیل‌های سوختی به میزان قابل توجهی افزایش می‌دهد [۳]. در سال‌های اخیر، تحقیق و توسعه بر روی سلول‌ها و سیستم‌های سوختی بطور گسترده تسریع شده است، با این حال هزینه سیستم پیل سوختی هنوز بسیار زیاد است و نمی‌تواند آن را به یک محصول تجاری طولانی مدت تبدیل کند؛ همچنین برخی رویدادها مانند جاری شدن آب، توزیع واکنش دهنده‌ها، انتقال گرما و جرم که به طراحی هندسه کانال گاز بستگی دارند، مشکلاتی را در پیل سوختی پلیمری ایجاد می‌کنند [۴]. محققان بسیاری بر جنبه‌های مختلف افزایش عملکرد پیل سوختی تمرکز کرده‌اند. هاملین و همکارانش رفتار پویای محققان بسیاری بر جنبه‌های مختلف افزایش عملکرد پیل سوختی تمرکز کرده‌اند و نتایج تجربی خود را با امفلت و همکارانش و کیم و همکارانش مقایسه کردند [۵ و ۶]. اثر استوکیومتری بر رفتار دینامیکی پیل سوختی غشا پلیمری تحت بارهای متغیر در کارهای بسیار زیادی مورد توجه قرار گرفته است که این تجزیه و تحلیل گذرا به‌طور بالقوه در کاربردهای خودرویی و ساکن و طراحی میدان جریان جذاب است [۷-۹]. واتانا و همکارش یک مدل مدار معادل پویا برای لایه‌های نفوذ گاز PEMFC را ارائه کردند. لایه انتشار گاز قسمت مهمی از PEMFC است [۱۰]. هوانگ و همکارانش به مطالعه تجربی در مورد بهبود ویژگی‌های دینامیکی پشته PEMFC کاتد باز با آند بن‌بست با چگالش و گردش هیدروژن پرداختند [۱۱]. احمدی و همکاران در یک پژوهش تأثیر رطوبت گازهای ورودی را بر عملکرد پیل سوختی بررسی

کردند [۱۲]. ژانگ و همکاران [۱۳] یک مدل شبیه‌سازی سیستم با در نظر گرفتن تلاقی نیتروژن و انتقال آب انجام دادند که با نتایج تجربی مطابقت خوبی دارد. جیانو و همکارانش یک مدل در مورد عملکرد دینامیکی سیستم PEMFC بر اساس تئوری اساسی انتقال جرم و اصول الکتروشیمی ارائه کردند. این مدل روند پویایی GDL و غشا را ادغام می‌کند. شبیه‌سازی مدل نشان می‌دهد که ویژگی دینامیکی پیل سوختی تأثیر زیادی بر عملکرد دینامیکی ولتاژ PEMFC دارد [۱۴]؛ همچنین احمدی و همکاران تأثیر هندسی کانال‌های تزریق گاز را بر عملکرد یک پیل سوختی پلیمری در حالت پایا بررسی کردند [۱۵].

پژوهش حاضر یک مطالعه عددی است که به بررسی عملکرد پیل سوختی غشا پلیمری با تکیه بر طراحی کانال‌های تزریق گاز با هندسه‌های مختلف در حالت ناپایا می‌پردازد. هندسه‌های مختلفی برای این پژوهش مورد استفاده قرار گرفته که شامل شبه مارپیچی، موازی و پینی است که با مدل پایه مارپیچی شکل اعتبار سنجی می‌گردد. مهم‌ترین هدف این پژوهش توجه به طراحی‌های نوین پیل سوختی غشاء پلیمری و تغییر پارامترها برای عملکرد بهتر آن است.

## ۲- مدل ریاضی

شکل ۱ نمای کلی از مدل پایه پیل سوختی را نشان می‌دهد. این مدل شامل لایه‌های انتشار گاز متخلخل، غشای الکترولیت پلیمری، لایه‌های کاتالیزور، کانال‌های گاز مارپیچی و صفحات دوقطبی در دو سمت کاتد و آند است.



- غشاء در برابر عبور گازهای واکنش دهنده کاملاً نفوذ ناپذیر می باشد.

### ۲-۲- معادلات حاکم

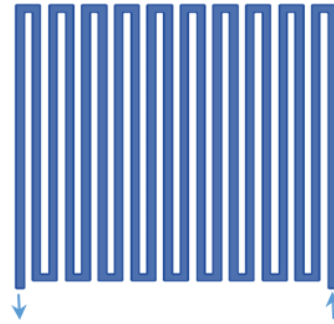
در این شبیه سازی عددی، معادلات جدول ۲ مورد استفاده قرار گرفته است. این معادلات حاکم عبارتند از: پیوستگی، مومنتوم، گونه‌ها و پتانسیل. در معادله اول تراکم مخلوط چگالی ترکیب به صورت  $\rho \cdot \epsilon$  است و ویسکوزیته مخلوط گاز در معادله حرکتی به صورت  $\mu$  نشان داده شده است.  $S_{ii}$  منبع معادله حرکت است و برای توصیف جریان درگ داری از طریق لایه‌های انتشار گاز متخلخل و لایه های کاتالیزور استفاده می‌شود. اطلاعات بیشتر در مورد معادلات حاکم و شرایط مرزی در منبع [۲] موجود است.

جدول ۲- معادلات حاکم [۲]

بقای جرم	$\frac{\partial(\epsilon\rho)}{\partial t} + \nabla(\epsilon\rho\vec{u}) = S_m$
بقای مومنتوم	$\frac{\partial(\epsilon\rho\vec{u})}{\partial t} + \nabla \cdot (\epsilon\rho\vec{u}\vec{u}) = -\epsilon\nabla P + \nabla \cdot (\epsilon\mu\nabla\vec{u}) + S_{ii}$
بقای انرژی	$\frac{\partial(\epsilon\rho C_p T)}{\partial t} + \nabla \cdot (\epsilon\rho C_p \vec{u} T) = \nabla \cdot (k^{eff} \nabla T) + S_Q$
بقای گونه‌ها	$\frac{\partial(\epsilon c_k)}{\partial t} + \nabla \cdot (\epsilon \vec{u} c_k) = \nabla \cdot (D_k^{eff} \nabla c_k) + S_k$

### ۲-۳- روند حل

برای حل کردن معادلاتی که بر پیل سوختی حاکم است، از نرم افزار Fluent بهره گیری شده است. این برنامه شبیه سازی، برای گسسته سازی و حل کردن معادلات از متد حجم محدود استفاده می‌کند. برای حل معادلات بقای انرژی و گونه‌ها و مومنتوم در آغاز حل، برای اینکه حل پایداری حاصل شود، از روش بالادست با دقت مرتبه‌ی اول استفاده می‌گردد. بعد از چند تکرار، دقت حل کردن معادلات به مرتبه‌ی دوم افزایش می‌یابد. از الگوریتم سیمپل برای کوپل کردن فشار و سرعت بهره گیری شده است [۱۶]. ضریب‌های زیر تخفیف، به جهت حفظ کردن پایداری حل معادلات، در آغاز حل به مقادیری کوچکتر از مقادیر پیش فرض کاهش می‌یابد. با گذشت تکرارهای پی در پی و پایدار شدن حل معادلات و کم شدن باقیمانده‌های حل، این ضریب‌ها به صورت مرحله‌ای به مقادیر



شکل ۱- مدل پایه پیل سوختی

جدول شماره ۱ مشخصات هندسی مدل را نشان می دهد.

جدول ۱- مشخصات هندسی مدل پایه [۶]

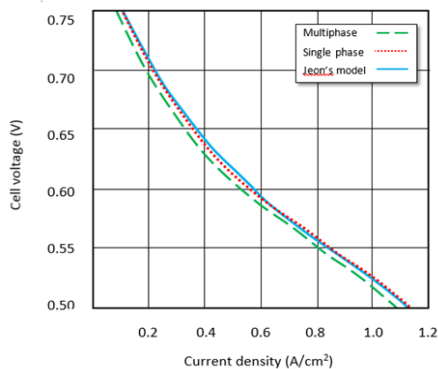
پارامتر	مقدار
ارتفاع کانال	۱ میلی متر
عرض کانال	۰/۸ میلی متر
مساحت کانال	۰/۸ میلی متر مربع
مساحت موثر	۱۱۰ میلی متر مربع
ضخامت لایه کاتالیستی	۰/۰۳ میلی متر
ضخامت لایه نفوذ گاز	۰/۲۵ میلی متر
ضخامت غشاء	۰/۰۱۳ میلی متر

### ۲-۱- فرضیات مدل

- گازهای ورودی و خروجی پیل که شامل هیدروژن، اکسیژن و آب هستند، ایده آل فرض شده‌اند.
- جریان به دلیل پایین بودن عدد رینولدز ( $Re \leq 200$ ) بصورت آرام و به علت پایین بودن عدد ماخ ( $Ma < 0.31$ ) غیر قابل تراکم فرض شده است.
- شرایط حاکم بر پیل سوختی بصورت ناپایا است.
- دمای صفحات دو قطبی آند و کاتد و نیز دمای جریان گازهای ورودی به کانال‌های آند و کاتد بصورت ثابت فرض شده است.
- مدل بصورت چند فازی در نظر گرفته شده است.

میزان اندازه شبکه جواب‌ها با حالت قبل دارای تفاوت می‌باشند؛ همچنین با افزایش تعداد سلول‌های شبکه به میزان ۷۰۰۰۰۰، جواب‌های حاصل تغییر چشمگیری نداشتند. بنابراین برای صرفه جویی در زمان محاسبات، سایز شبکه ۵۰۰۰۰۰ به عنوان تعداد بهینه سلول انتخاب شد.

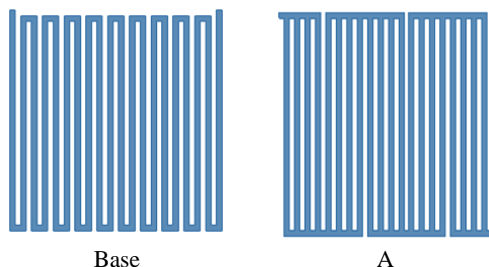
همانطور که در شکل ۴ مشاهده می‌شود، نتایج شبیه‌سازی چند فازی به شرایط واقعی نزدیکتر است، ولتاژ سلول در آن کمی کمتر از شرایط تک فاز است و نتایج مدل پایه به نتایج Jeon نزدیک است که نشان دهنده یک روش صحیح و مطمئن است [۱۸].



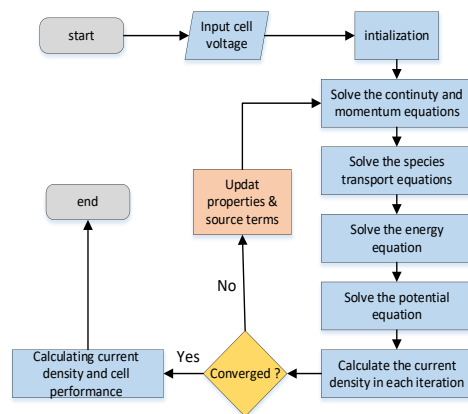
شکل ۴- اعتبارسنجی منحنی پلاریزاسیون

### ۳- نتایج و بحث

در مطالعه حاضر، سه هندسه میدان جریان مختلف به صورت عددی در مقایسه با مدل پایه مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است. مدل پایه که به شکل مارپیچی بوده و مدل‌های A، B و C به ترتیب به شکل‌های شبه مارپیچی، موازی و پینی است (شکل ۵).



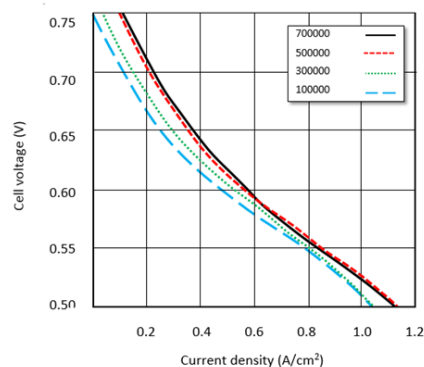
پیش فرض افزوده می‌شود. معیار هم‌گرایی در حل معادلات اینگونه است که باقیمانده‌های حل برای معادلات خاص پیل سوختی که در نرم افزار بصورت توابعی که توسط کاربر افزوده شده، به مقداری کمتر از حد معین شده (در معادله پیوستگی کوچکتر از  $10^{-2}$ ، بقای گونه‌ها و انرژی  $10^{-6}$ ، معادله پتانسیل  $10^{-10}$ ) تنزل یافته و مقدار شدت جریان خروجی نهایی پیل سوختی در چندین تکرار متوالی (حداقل ۴ تکرار) مقدار یکسانی باشد [۱۷]. الگوریتم حل در شکل ۲ نمایان است.



شکل ۲- الگوریتم حل

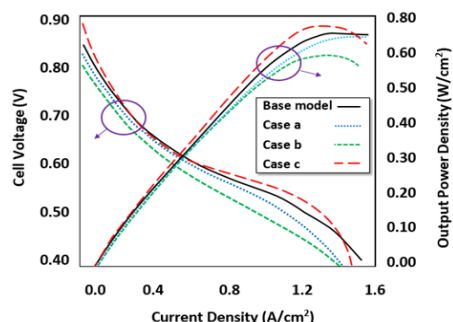
### ۲-۴- استقلال از شبکه و اعتبارسنجی

همانطور که در شکل ۳ مشاهده می‌شود، تعداد مطلوب سلول‌های محاسباتی تقریباً برابر ۵۰۰۰۰۰ است



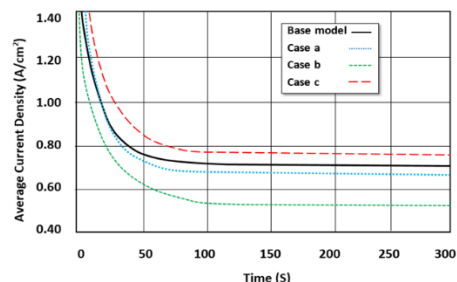
شکل ۳- استقلال از شبکه

برای پیدا کردن سایز مناسب برای شبکه بندی ابتدا از یک شبکه درشت استفاده شد. مشاهده شد که با ریز کردن



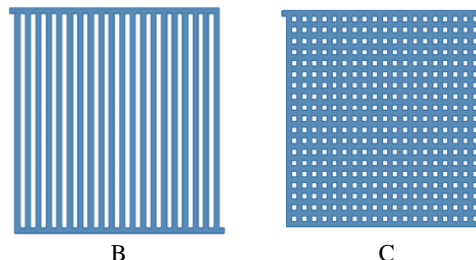
شکل ۶- منحنی پلاریزاسیون برای مدل‌های مختلف

در این بخش حالت دینامیکی پیل سوختی برای مدل‌های مختلف مورد بررسی قرار گرفته است. در شکل ۷ میانگین چگالی جریان با گذشت زمان برای مدل‌های مختلف نشان داده شده است. همان‌گونه که مشخص است، جریان در این مدل‌ها بعد از گذشت حدود ۷۰ ثانیه به حالت پایدار می‌رسند. گام زمانی در نظر گرفته شده برای تحلیل دینامیکی برابر ۵- است.



شکل ۷- نمودار چگالی جریان با زمان برای مدل‌های مختلف

در شکل ۸-الف تا ۸-د تولید آب مایع در سمت کاتد در حالت دینامیکی برای مدل‌های مختلف نمایش داده شده است. مشاهده می‌شود که مدل B بیشترین تولید آب مایع را دارد؛ بنابراین باعث بروز پدیده غرقابی شده و باعث از کار افتادگی پیل می‌شود. در مقابل مدل C کمترین میزان تولید آب مایع را دارد که نشانگر بهترین حالت برای جلوگیری از کاهش عملکرد و خرابی و در پیل است.



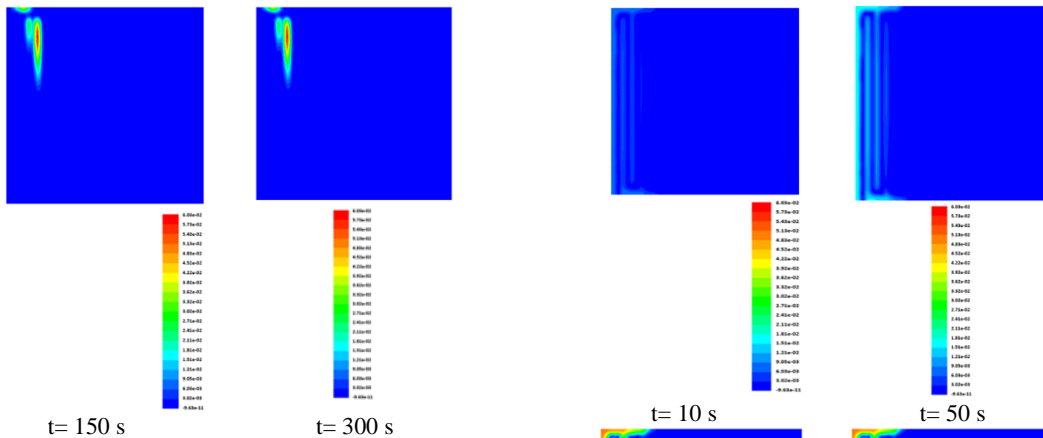
شکل ۸- هندسه‌های مورد مطالعه در این پژوهش

به طور کلی مفروضات و شرایط مرزی یکسان بوده تا بهینه‌ترین حالت جریان را نشان دهند. پارامترها و شرایط عملکردی مطابق با شرایط مدل Jeon انتخاب شده که در جدول ۳ نمایش داده شده است.

جدول ۳- پارامترها و شرایط عملکردی

۱۱/۵	کسر جرمی هیدروژن
۸۸/۵	کسر جرمی آب در آند
۱۸/۳	کسر جرمی اکسیژن
۲۱/۵	کسر جرمی آب در کاتد
$7/13 \times 10^{-6}$ کیلوگرم بر ثانیه	دبی جرمی در ورودی آند
$6/1 \times 10^{-6}$ کیلوگرم بر ثانیه	دبی جرمی در ورودی کاتد
۱۰۰ درصد	رطوبت نسبی
۱/۱۰۷۰ ولت	ولتاژ مدار باز
۱۰۰ کیلوپاسکال	فشار
۳۵۳ کلوبین	دما

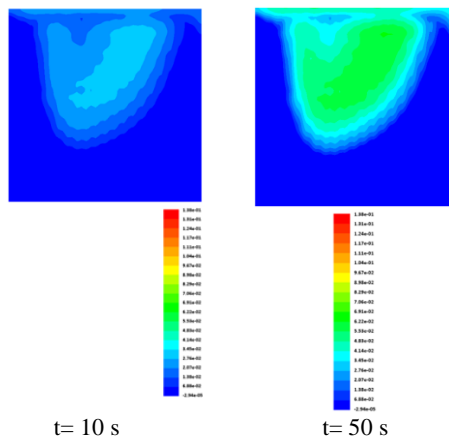
نمودار شکل ۶ منحنی پلاریزاسیون برای مدل‌های مختلف در ولتاژ ۰/۶ ولت را نشان می‌دهد. نتایج عددی نشان می‌دهد که در مدل C چگالی جریان و توان خروجی بیشتری در مقایسه با سایر مدل‌ها تولید می‌شود و مدل B کمترین مقدار را به خود اختصاص داده است.



t= 150 s                      t= 300 s

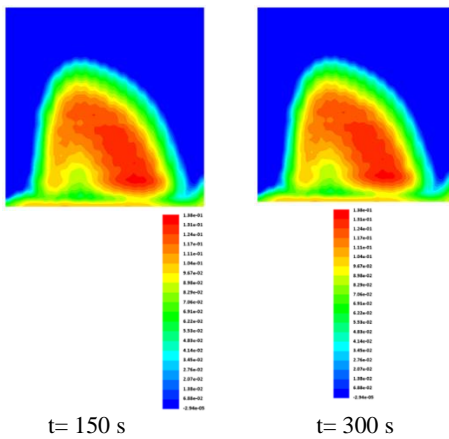
۸- ب- تولید آب مایع مدل A.

شکل ۸-ج نیز تولید و تجمع آب مایع را در سمت کاتد به وضوح نشان می‌دهد.



t= 10 s

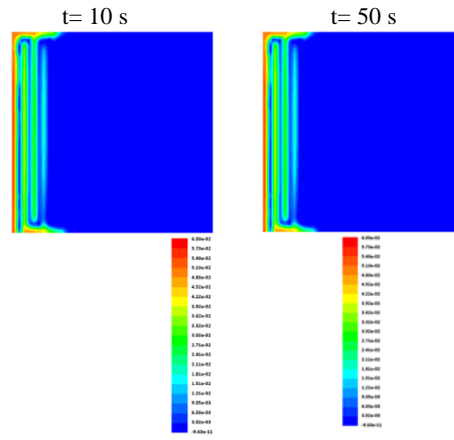
t= 50 s



t= 150 s

t= 300 s

۸- ج- تولید آب مایع مدل B.

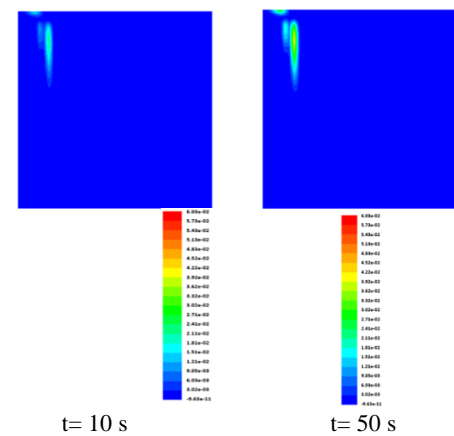


t= 150 s

t= 300 s

۸- الف- تولید آب مایع مدل پایه (Base)

شکل ۸-ب میزان تولید آب مایع در سمت کاتد را برای مدل A نشان می‌دهد. هرچه قدر تجمع آب مایع بیشتر باشد، باعث کاهش عملکرد پیل سوختی خواهد شد.



t= 10 s

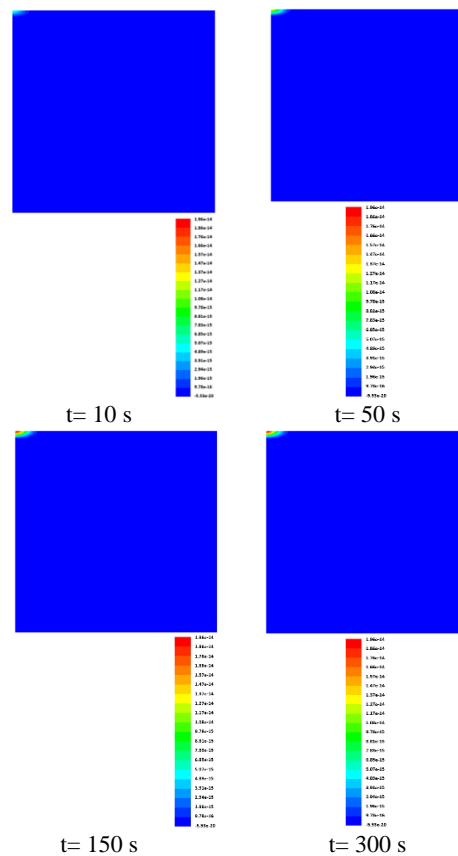
t= 50 s

انجام واکنش الکتروشیمیایی بین یون  $H^+$  و اکسیژن است؛ همچنین مقداری از مولکول‌های آب نیز به همراه یون  $H^+$  از سمت آند به سمت کاتد مهاجرت می‌کنند؛ بنابراین در پیل سوختی پلیمری با گذشت زمان، میزان آب در سمت کاتد تجمع یافته و از خود افزایش نشان خواهد داد. همانطور که پیش تر گفته شد، هرچه میزان تجمع آب در یک مدل بیشتر باشد، میزان نفوذ گونه‌ها به مناطق واکنش و به تبع آن میزان فعالیت و عملکرد آن مدل کاهش خواهد یافت. با توجه به شکل ۸، مشخص است که مدل B، میزان تجمع آب نسبتاً زیادتری را در مقایسه با تمامی مدل‌ها از خود نشان می‌دهد. این امر به دلیل آن است که این نوع آرایش کانال در ابتدا میزان فعالیت زیاد و به تبع آن میزان تولید آب بیشتری را دارد، ولی به دلیل نوع آرایش کانال‌ها، افت اصطکاکی زیادی دارد و همین امر مانع از حرکت و تخلیه آب مایع می‌شود. این امر سبب می‌شود که مدل مذکور میزان عملکرد پایینی در حالت پایا داشته باشد و نیاز به مدیریت آب در این مدل بیشتر است. در مقابل حالت C، تجمع آب کمتری دارد و به همین خاطر دارای عملکرد بهتری نسبت به سایر مدل‌ها است. آرایش شبکه‌ای حالت C، سبب می‌شود که انتقال آب از کاتد به بیرون پیل سوختی با سرعت بیشتری انجام شود و در نتیجه میزان عملکرد پیل افزایش خواهد یافت. به همین خاطر میزان عملکرد این حالت از تمامی حالات بهتر است.

#### ۴- نتیجه گیری

در مطالعه حاضر مدل‌های شبه مارپیچی، موازی و پین پیل سوختی غشای پلیمری با مدل پایه مارپیچی مقایسه شد. سپس، مدل‌ها با استفاده از روش دینامیک سیالات محاسباتی و روش حجم محدود شبیه‌سازی شدند. این مدل با مقایسه با کارهای قبلی تأیید شد. مشخص شد که مدل پیشنهادی با خوبی با مطالعات قبلی مطابقت دارد. با استفاده از شبیه‌سازی دینامیکی مشاهده شد که بعد از گذشت حدود ۷۰ ثانیه جریان به حالت پایدار رسید و تولید آب رفته‌رفته افزایش یافت و بعد گذشت حدود ۷۰ ثانیه به حالت پایدار نزدیک شد. در نهایت می‌توان گفت که مدل C از سایر مدل‌ها بهتر عمل می‌کند و عملکرد یک پیل سوختی غشای پلیمری را بهبود می‌بخشد. مطالعه حاضر می‌تواند به تولیدکنندگان در طراحی کانال‌های جریان گاز کمک کند. پیشنهاد می‌شود که کارهای آینده

وجود آب تا حدی برای انتقال یون‌ها از سمت آند به سمت کاتد لازم و ضروری است؛ اما با تولید آب در سمت کاتد و همچنین انتقال آب از سمت آند به کاتد، میزان آن در سمت کاتد افزایش می‌یابد و همین پدیده باعث مسدود شدن محیط متخلخل و جلوگیری از انتقال بهینه یون‌ها از سمت آند به سمت کاتد می‌شود و در نتیجه از شدت واکنش‌های الکتروشیمیایی در سمت کاتد کاسته می‌شود که کاهش عملکرد پیل سوختی را به همراه خواهد داشت؛ همچنین، میزان تجمع بیش از حد آب باعث افزایش بروز پدیده خوردگی به خصوص در قسمت‌های فلزی خواهد بود؛ بنابراین نقش مدیریت انتقال آب در پیل سوختی بسیار حیاتی می‌باشد. شکل ۸-د تولید آب مایع را در مدل C نشان می‌دهد.



۸-د- تولید آب مایع مدل C.

با توجه به مدل‌ها، مشاهده می‌شود که با گذشت زمان و افزایش فعالیت مربوط به پیل سوختی تمامی مدل‌ها دارای تولید آب می‌باشند. تولید آب در پیل سوختی پلیمری به دلیل

هندسه‌های جدیدی از سلول‌های سوختی را توسعه دهند و عملکرد آن‌ها را بررسی کنند.

## مراجع

- [10] Fang, L., L. Di, and Y. Ru. (2009) A dynamic model of PEM fuel cell stack system for real time simulation. in 2009 Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference. IEEE.
- [11] Huang, Z., Q. Jian, and J. Zhao, (2020) Experimental study on improving the dynamic characteristics of open-cathode PEMFC stack with dead-end anode by condensation and circulation of hydrogen. *International J. Hydr. Energ.*, 45(38): p. 19858-19868.
- [12] Ahmadi, Nima, Sajad Rezazadeh, Mirkazem Yekani, Alireza Fakouri, and Iraj Mirzaee. (2013): (2013) "NUMERICAL INVESTIGATION OF THE EFFECT OF INLET GASES HUMIDITY ON POLYMER EXCHANGE MEMBRANE FUEL CELL (PEMFC) PERFORMANCE." *Transactions of the Canadian Society for Mechanical Engineering* 37, no. 1: 1-20.
- [13] Zhang, Q., et al., Modeling and dynamic performance research on proton exchange membrane fuel cell system with hydrogen cycle and dead-ended anode. *Energy*, 2021. 218: p. 119476.
- [14] Jiao, J., et al. (2017) Modeling and simulation of PEMFC stack dynamic performance. in 2017 Chinese Automation Congress (CAC). IEEE.
- [۱۵] شیخ محمدی، علی، میرزایی، ایرج، پورمحمد، نادر، احمدی شیخ سرمست، نیما. (۱۳۹۸). 'تأثیر کانال‌های گاز و پیکربندی لایه‌های انتشار گاز بر روی عملکرد غشای الکترولیتی پلیمر سلول سوختی، مکانیک سازه‌ها و شاره‌ها، ۹(۳): ۲۴۹-۲۶۳.
- [16] Patankar, S.V., (2018) Numerical heat transfer and fluid flow. CRC press.
- [17] Sheikh Mohammadi, A., et al., (2019) Influence of gas channels and gas diffusion layers configuration on the performance of polymer electrolyte membrane fuel cell. *J. Solid Fluid Mech.*, 9(3): p. 249-263.
- [18] Jeon, D., et al., (2008) The effect of serpentine flow-field designs on PEM fuel cell performance. *Int. J. hydr. energy*, 33(3): p. 1052-1066.
- [1] Ashrafi, H., et al., (2022) Performance improvement of proton-exchange membrane fuel cells through different gas injection channel geometries. *International Journal of Energy Research*, 46(7): p. 8781-8792.
- [2] Ahmadi, N., S. Rezazadeh, and I. Mirzaee, (2015) Study the effect of various operating parameters of proton exchange membrane. *Periodica Polytechnica Chemical Engineering*, 59(3): p. 221-235.
- [3] Ashrafi, H., et al., (2022) Introducing a new serpentine configuration of gas channels to enhance the performance and reduce the water flooding in the PEMFC. *Ira. J. Chem. Chemical. Eng. (IJCCE)*.
- [4] Pei, P., et al., (2016) A review on water fault diagnosis of PEMFC associated with the pressure drop. *Applied Energy*, 173: p. 366-385.
- [5] Hamelin, J., et al., (2001) Dynamic behavior of a PEM fuel cell stack for stationary applications. *International J. Hydr. Energy*, 26(6): p. 625-629.
- [6] Kim, S., S. Shimpalee, and J. Van Zee, (2004) The effect of stoichiometry on dynamic behavior of a proton exchange membrane fuel cell (PEMFC) during load change. *J. Pwr. Sour.*, 135(1-2): p. 110-121.
- [7] Yan, Q., H. Toghiani, and H. Causey, (2006) Steady state and dynamic performance of proton exchange membrane fuel cells (PEMFCs) under various operating conditions and load changes. *J. Pwr. Sour.*, 161(1): p. 492-502.
- [8] Chen, J. and B. Zhou, (2008) Diagnosis of PEM fuel cell stack dynamic behaviors. *J. Pwr Sour.*, 177(1): p. 83-95.
- [9] Park, S.-K. And S.-Y. Choe, (2008) Dynamic modeling and analysis of a 20-cell PEM fuel cell stack considering temperature and two-phase effects. *J. Pwr Sour.*, 179(2): p. 660-672.