



# Numerical Investigation of Fluid Flow in the Cathode Side of Polymer Membrane Fuel Cell with Foam-Based Distributor with Non-Uniform Porosity

## ARTICLE INFO

### Article Type

Original Research

### Authors

Maleki M.E.<sup>1</sup>,  
Keikhaei M.J.<sup>2</sup>,  
Jahromi M.M.<sup>3</sup>,  
Kermani M.J.<sup>4\*</sup>,

### How to cite this article

Maleki ME, Keikhaei MJ, Jahromi MM, Kermani MJ, Numerical Investigation of Fluid Flow in the Cathode Side of Polymer Membrane Fuel Cell With Foam-Based Distributor With Non-Uniform Porosity. Modares Mechanical Engineering; 2024;24(06):373-383.

<sup>1</sup> Energy Conversion Academic Department, Mechanical Engineering Department, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran

<sup>2</sup> Energy Conversion Academic Department, Mechanical Engineering Department, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran

<sup>3</sup> Mechanical Engineering Department, Faculty of Engineering, University of Jahrom, Jahrom, Iran

<sup>4</sup> Energy Conversion Academic Department, Mechanical Engineering Department, Amirkabir University of Technology, Tehran

### \*Correspondence

Address: Energy Conversion Academic Department, Mechanical Engineering Department, Amirkabir University of Technology, Tehran  
mkermani@aut.ac.ir

### Article History

Received: April 13, 2024

Accepted: August 26, 2024

ePublished: September 14, 2024

## ABSTRACT

Recently, in many fuel cell applications, foam is being used as a flow distributor to increase efficiency and achieve a more uniform distribution of reactants on the active surface. However, despite the improvement in the efficiency and performance of the fuel cell, this method does not fully achieve the desired uniformity in reactant distribution. Therefore, in this study, non-uniform porosity metal foam has been utilized to improve the homogeneous flow distribution on the cathode side of the PEM fuel cell. At first, the foam is assumed to be uniform with the same porosity. After the numerical solution of the flow in homogeneous foam (first type), Two types of foam with variable porosity coefficient have been designed. These foams are divided into checkerboard shape, where the porosity coefficients in the concave corners (dead areas) with low molar fraction of oxygen are higher. This facilitates easier movement of the flow towards these corners, resulting in a more uniform flow distribution. the simulation results indicate that, for a constant current density, the distribution of the mole fraction of oxygen in both types of foam with a variable porosity coefficient has become more uniform. Additionally, the average molar fraction of oxygen has increased by 9.45% in the second type of foam and by 32.02% in the third type of foam compared to the uniform foam, which indicates an increase in generated power. Also, compared to the uniform foam, the pressure gradient in the foam with variable porosity of the second type increased by 75.80%, while it remained relatively unchanged for the third type foam.

**Keywords** Fuel Cell, Metal Foam-Based Distributor, Variable Porosity Foam, Uniform Flow Distribution

## CITATION LINKS

1- Fuel cell application in the automotive industry and future perspective. 2- Battery-electric or hydrogen fuel cell? VW lays out why one is the winner. 3- Energy efficiency improvements by investigating the water flooding management on proton exchange membrane fuel cell (PEMFC). 4- Multi-phase models for water and thermal management of proton exchange membrane fuel cell: A review. 5- Performance evaluation of porous gas channel ribs in a polymer electrolyte fuel cell. 6- Enhancement of mass transport in fuel cells using three-dimensional graphene foam as flow field. 7- An investigation of the PEM fuel cells performance with partially restricted cathode flow channels and metal foam as a flow distributor. 8- Experimental performance investigation on the arrangement of metal foam as flow distributors in proton exchange membrane fuel cell. 9- Numerical analysis of modified parallel flow field designs for fuel cells. 10- Computational exploration of ultra-high current PEFC operation with porous flow field. 11- A PEM fuel cell with metal foam as flow distributor. 12- Application of metal foam as a flow field for PEM fuel cell stack. 13- Numerical modelling and CFD simulation of a polymer electrolyte membrane (PEM) fuel cell flow channel using an open pore cellular foam material. 14- Effects of flow field design on the performance of a PEM fuel cell with metal foam as the flow distributor. 15- Effect of cell size in metal foam inserted to the air channel of polymer electrolyte membrane fuel cell for high performance. 16- Study on the metal foam flow field with porosity gradient in the polymer electrolyte membrane fuel cell. 17- Development of a variable-porosity metal-foam model for the next fuel cells flow-distributors. 18- Application of a foam-based functionally graded porous material flow-distributor to PEM fuel cells. 19- Parametric Study of Two-Phase Flow on the Cathode Side of a Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell. 20- Wicking in porous materials: traditional and modern modeling approaches.

## حل عددی جریان سیال سمت کاتد پیل سوختی غشاء پلیمری دارای توزیع کننده فوم با تخلخل غیریکنواخت

محمد عرفان ملکی<sup>۱</sup>، محمد جواد کیخانی<sup>۲</sup>، مهید معین جهرمی<sup>۳</sup>، محمد جعفر کرمانی<sup>۴\*</sup>

<sup>۱</sup> گروه آموزشی تبدیل انرژی، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

<sup>۲</sup> گروه آموزشی تبدیل انرژی، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران

<sup>۳</sup> گروه آموزشی مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه جهرم، جهرم، ایران

<sup>۴</sup> گروه آموزشی تبدیل انرژی، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران

### چکیده

اخیرا در بسیاری از کاربردهای پیل سوختی، به منظور افزایش بازدهی و یکنواخت تر کردن توزیع واکنش دهنده ها در سطح فعال، از فوم به عنوان توزیع کننده جریان استفاده می شود. اما این روش علیرغم ایجاد بهبود نسبی در بازدهی و عملکرد پیل سوختی، توزیع واکنش دهنده ها را به یکنواختی مطلوب نمی رساند. از این رو در این مطالعه، از فوم فلزی با تخلخل غیر یکنواخت جهت توزیع همگن تر جریان هوا در سمت کاتد پیل سوختی غشاء پلیمری استفاده شده است. در ابتدا فوم به صورت یکنواخت و با تخلخل یکسان فرض شده است. پس از حل عددی جریان در فوم همگن (نوع اول)، دو نوع فوم با ضریب تخلخل متغیر طراحی شده است به گونه ای که با تقسیم فوم به شکل شطرنجی، ضرایب تخلخل در گوشه های مقعر که کسر مولی اکسیژن در آن ها پایین است (نواحی مرده)، حائز مقدار بالاتری هستند تا حرکت جریان به این گوشه ها تسهیل و در نتیجه توزیع جریان نیز یکنواخت تر شود. نتایج شبیه سازی حاکی از آن بود که به ازای چگالی جریان ثابت، توزیع کسر مولی اکسیژن در هر دو نوع فوم با ضریب تخلخل متغیر، یکنواخت تر شده و متوسط کسر مولی اکسیژن نیز در فوم نوع دوم ۹/۴۵٪ و در فوم نوع سوم ۳۲/۰۲٪ نسبت به فوم یکنواخت افزایش داشته، همچنین گرادین فشار در فوم با تخلخل متغیر نوع دوم، ۸۰/۷۵٪ نسبت به فوم یکنواخت افزایش یافته، در حالی که به ازای فوم نوع سوم، تغییر چندانی نداشته است.

**کلیدواژه ها:** پیل سوختی، توزیع کننده فوم فلزی، فوم با ضریب تخلخل متغیر، توزیع یکنواخت جریان

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۱/۲۵

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۶/۰۵

\* نویسنده مسئول: mkermani@aut.ac.ir

### ۱- مقدمه

امروزه نشر گازهای گلخانه ای به یکی از چالش های اصلی محیط زیست تبدیل شده است که مستقیما بر کیفیت زندگی تاثیر می گذارد. از این رو در سال های اخیر، تمرکز جوامع بر کاهش میزان گاز کربن دی اکسید تولیدی به عنوان یکی از راه های اصلاح نشر گازهای گلخانه ای بوده است. علاوه بر آن، برای کاهش مصرف سوخت های فسیلی و نیز کاهش آلاینده های موجود در هوا، پیدا

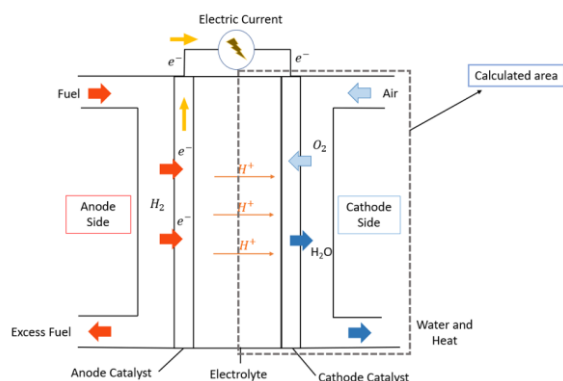
کردن جایگزین برای موتور های احتراق داخلی، اهمیت ویژه ای یافته است. یکی از مهم ترین و جدی ترین جایگزین ها برای موتور های احتراق داخلی، پیل های سوختی هستند<sup>[۱]</sup>. پیل سوختی وسیله ای است که برای تبدیل انرژی شیمیایی به انرژی الکتریکی به طور مستقیم به کار می رود. در واقع پیل های سوختی بدون ایجاد هرگونه آلودگی صوتی و زیست محیطی، و با واکنش مستقیم بین سوخت و اکسید کننده، انرژی الکتریکی با بازدهی بالا تولید می کنند. در حال حاضر از جمله پرکاربردترین و معروف ترین انواع پیل سوختی به ویژه برای کاربردهای حمل و نقلی، پیل سوختی هیدروژنی است. با استفاده از پیل سوختی به عنوان جایگزین موتور های احتراق داخلی، آلودگی ناشی از سوخت های فسیلی و همچنین نشر گازهای گلخانه ای به صفر می رسد که به شدت در جلوگیری از گرمایش زمین موثر است. علاوه بر آن، در پیل سوختی از انرژی تجدیدپذیر استفاده می شود. آلودگی صوتی نیز در پیل های سوختی تقریبا صفر می باشد و راندمان بالاتری نیز دارند. وسایل نقلیه که از پیل سوختی به عنوان مولد توان استفاده می کنند، نسبت به وسایل نقلیه ای که از باتری برای تامین برق موتور الکتریکی استفاده می کنند، دارای چگالی انرژی بیشتری بوده و زمان شارژ مجدد نیز در آنها کوتاه تر است<sup>[۲]</sup>.

در پیل سوختی غشاء پلیمری، توزیع کننده جریان وظیفه رساندن واکنش دهنده ها به سطح کاتالیست و برداشت فرآورده های واکنش از سطح کاتالیست را دارد. بیش از چند دهه است که برای طراحی توزیع کننده های جریان، از سیستم کانال - دنده استفاده می شود. این طراحی سبب می شود که نواحی دنده در معرض مستقیم جریان سیال قرار نگیرند و سبب کاهش سطح فعال موثر واکنش و در نهایت بازدهی پیل سوختی می شود. در سال های اخیر توجه ویژه ای به توزیع کننده های جریان بر اساس فوم شده است<sup>[۳]</sup>. در این نوع توزیع کننده ها، توزیع واکنش دهنده ها بر روی سطح کاتالیست به طور یکنواخت تر انجام می شود<sup>[۴]</sup>. همچنین این نوع از توزیع کننده ها مزایای دیگری مانند پیوسته بودن جریان بر روی کل سطح فعال<sup>[۵]</sup>، افزایش توان تولیدی و در نتیجه انتقال یکنواخت تر واکنش دهنده ها به محل های انجام واکنش<sup>[۶]</sup>، و توزیع یکنواخت تر دما را دارند<sup>[۷]</sup>.

یکی از مشکلات استفاده از فوم به عنوان توزیع کننده جریان این است که به گوشه های مقعر، جریان سیال کمتری می رسد و این نواحی، جریان الکتریکی کمتری نسبت به سایر بخش ها تولید می کنند. برای رفع این مشکل، اخیرا مطالعاتی برای استفاده از فوم های فلزی با تخلخل متغیر به عنوان توزیع کننده جریان پیل های سوختی برای بهبود عملکرد انجام شده است. در همین رابطه، وان و همکاران، عملکرد یک پیل سوختی با کانال های موازی گرافیتی رایج را با قراردادن توزیع کننده جریان از نوع فوم در (۱) الکترود آند، (۲) الکترود کاتد، و (۳) هر دو سمت الکترود مورد مقایسه قرار دادند<sup>[۸]</sup>. آزمایش های آن ها نشان داد که مورد (۱)

مولی اکسیژن درون کاتالیست سمت کاتد، توزیع کننده فومی با ضریب تخلخل متغیر به صورت شطرنجی متشکل از نواحی مربعی شکل با دو نوع توزیع تخلخل متفاوت در نظر گرفته شده است. پیش از این، مطالعاتی توسط سایر محققان به منظور طراحی فوم با ضریب تخلخل متغیر انجام شده است. به عنوان مثال، کرمانی و همکاران ضرایب تخلخل و نفوذپذیری برای میدان های جریان Z شکل و U شکل در فوم فلزی را به گونه ای تعیین کردند که خطوط جریان سیال از ورودی تا خروجی، گسترش بیشتری داشته باشند و بخش های بیشتری از فوم را در برگیرد<sup>[17,18]</sup>. در این مطالعه برای نخستین بار، فوم به صورت شطرنجی به قسمت های مربعی شکل تقسیم شده است و برای قسمت هایی که جریان سیال در آن ها کمتر است، ضریب تخلخل بیشتر در نظر گرفته می شود تا جریان بیشتری از سیال به این نواحی برسد. همچنین نوآوری این مطالعه نسبت به مطالعات انجام شده توسط کرمانی و همکاران در این است که در این مقاله، تعداد قسمت های با ضریب تخلخل مختلف، ۲۵ قسمت است در حالی که در پژوهش های انجام شده توسط کرمانی و همکاران، فوم به حدود ۱۳۰ قسمت تقسیم شده است<sup>[17,18]</sup>. در واقع در این مطالعه هدف ارائه راه حل سریع و چالاک برای محاسبه عملکرد پیل سوختی به صورت نیم سل بوده تا با تقسیم نواحی میدان جریان به تعدادی کمتر نسبت به مراجع قبلی (تعداد ۲۵ ناحیه) میدان جریان با توزیع تخلخل مناسب جهت دستیابی به توزیع یکنواخت تر سیال واکنشگر در سطح فعال و حذف (یا کاهش) نواحی با غلظت اندک تا حد ممکن، به دست آید.

در ادامه به بررسی عملکرد فوم مورد نظر و مقایسه آن با فوم همگن (ضریب تخلخل یکسان) به ازای شرایط مرزی و عملکردی یکسان پرداخته می شود. در شکل (۱) نمایی کلی از پیل سوختی و نحوه عملکرد آن می باشد که سمت کاتد (ناحیه مورد بررسی در این مطالعه) به صورت خط چین مشخص شده. شکل (۲) نشان دهنده توزیع کننده فوم و لایه کاتالیست روی آن می باشد که ناحیه مورد بررسی در این مطالعه را نشان می دهد.



شکل (۱) شکل شماتیک از پیل سوختی غشاء پلیمری و اجزاء مختلف آن به همراه ناحیه حل مورد نظر (الکتروکاتد).

بهترین عملکرد و مورد (۲) بدترین عملکرد را دارد. در واقع توزیع -کننده جریان در الکتروکاتد مستعد مسدود شدن با آب مایع به ویژه در موارد با رطوبت نسبی بالا است. برای دستیابی به توزیع یکنواخت تر واکنش دهنده ها در سطح فعال، لیم و همکاران یک توزیع کننده جریان دارای دو بخش جداگانه و ورودی ها و خروجی های جداگانه ارائه دادند تا به یک جریان یکنواخت تر دست یابند<sup>[9]</sup>. اخیراً، مطالعات متعددی در زمینه استفاده از فوم فلزی به عنوان توزیع کننده جریان به انجام رسیده است. آزمایش های انجام شده توسط ژنگ و همکاران نشان داد که توزیع کننده های جریان از نوع فوم، عملکرد بهتری نسبت به توزیع کننده های جریان کانال - دنده رایج دارند<sup>[10]</sup>. سنگ و همکاران آزمایش بر روی عملکرد یک پیل سوختی با توزیع کننده جریان از نوع فوم انجام دادند و به این نتیجه رسیدند که تخلخل بالا (حدود ۹۸٪) موجب کاهش محدودیت انتقال جرم، مخصوصاً در چگالی جریان بالا می شود اما از سوی دیگر موجب کاهش رسانایی الکتریکی نیز می شود<sup>[11]</sup>. کیم و همکاران نشان دادند که تخلیه آب مایع در توزیع کننده های جریان از نوع فوم، با افزایش ضریب تخلخل، افزایش می یابد که موجب بهبود عملکرد پیل سوختی می شود<sup>[12]</sup>. ویلبرفورس و همکاران، ورودی و خروجی جریان سیال را در گوشه های توزیع کننده جریان از نوع فوم همگن در نظر گرفتند که مشکل اساسی طرح آن ها وجود نواحی ایزوله شده در گوشه های فوم همگن بود<sup>[13]</sup>. با این حال، سای و همکاران اظهار کردند که علیرغم کاهش توزیع جریان در گوشه ها، توزیع کننده جریان از نوع فوم در مقایسه با توزیع کننده جریان از نوع کانال موازی، عملکرد بهتری دارد<sup>[14]</sup>. شین و همکاران، نظریه استفاده از یک فوم دو قسمتی جهت بهبود عملکرد پیل های سوختی را ارائه دادند. قسمت اول میزان تخلخل کمتری داشت و نزدیک به ورودی جریان قرار داده شده بود تا علاوه بر هدایت سیال به گوشه ها مساحت سطح تماس به سایر لایه ها را افزایش دهد (مقاومت تماسی را کاهش دهد). قسمت دوم میزان تخلخل بیشتری داشت و در نزدیکی خروجی جریان قرار داده شده بود تا انتشار گاز را تسهیل کند. این توزیع کننده با تخلخل متغیر توان حداکثر را به میزان ۶۰/۸٪ افزایش داد<sup>[15]</sup>. کانگ و همکاران اثر استفاده از فوم فلزی به عنوان توزیع کننده جریان سمت کاتد با پنج بخش قطری و ضرایب تخلخل متفاوت را به صورت آزمایشگاهی بررسی کردند. آنها سعی کردند جریان از ناحیه مرکزی (مسیر قطری اصلی از ورودی به خروجی) به گوشه های مقعر که سرعت جریان در آن ها پایین است هدایت شود تا جریان یکنواخت تری اعمال گردد، فوم فلزی با ضریب تخلخل متغیر توانست توان حداکثر را به میزان ۸/۳۲٪ نسبت به فوم همگن افزایش دهد<sup>[16]</sup>. در این مقاله، به منظور بهبود عملکرد توزیع کننده های جریان از نوع فوم در سمت کاتد در پیل سوختی غشاء پلیمری و رسیدن جریان سیال بیشتر به گوشه های مقعر و همچنین توزیع یکنواخت تر و افزایش متوسط کسر

$$K = 0.00073(1 - \varepsilon)^{-0.224} \left(\frac{d_f}{d_p}\right)^{-1.11} d_p^2 \quad (6)$$

$$C = \frac{2}{\sqrt{K}} 0.00212(1 - \varepsilon)^{-0.132} \left(\frac{d_f}{d_p}\right)^{-1.63} \quad (7)$$

با توجه به معادلات (۵) - (۷) تغییر در اندازه قطر حفرات ( $d_p$ ) و تخلخل ( $\varepsilon$ )، تغییر در ضریب نفوذپذیری و ضریب فرجه‌میر را در پی دارد که این تغییر برای هریک از ۲۵ تکه با تخلخل متغییر به صورت جداگانه بر مبنای روابط مذکور محاسبه و در شبیه سازی CFD اعمال می‌گردد.

از آنجایی که هوا یک سیال تراکم‌ناپذیر فرض شده‌است، معادله پیوستگی برای آن به صورت رابطه (۸) نوشته می‌شود، در این رابطه  $V$  بردار سرعت نفوذ جریان و  $\rho$  چگالی جریان می‌باشد. معادله مومنتوم نیز به صورت رابطه (۹) نوشته می‌شود [18]:

$$\nabla \cdot (\rho \vec{V}) = 0 \quad (8)$$

$$\nabla \cdot \left( \frac{\rho \vec{V} \vec{V}}{\varepsilon^2} \right) = -\nabla P + \mu \left[ \nabla \cdot \left( \frac{\vec{V}}{\varepsilon} \right) + \nabla \cdot \left( \frac{\vec{V}}{\varepsilon} \right)^T - \frac{2}{3} \nabla \cdot \left( \frac{\vec{V}}{\varepsilon} \right) I \right] + S_v \quad (9)$$

$$S_v = -\left( \frac{\mu}{K} \vec{V} + \frac{C}{2} \rho |\vec{V}| \vec{V} \right) \quad (10)$$

$$\text{where } \nabla \cdot (\rho \vec{V} X_k) = \nabla \cdot (\rho D_{k,mix}^{eff} \nabla X_k) + S_k \quad (11)$$

$k$  is for  $O_2$  and  $H_2O$  species

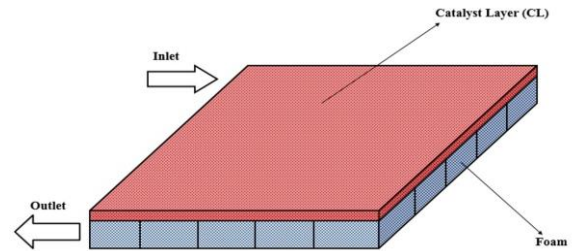
در رابطه (۹)،  $P$  برابر با فشار،  $\rho$  و  $\mu$  برابر چگالی با ویسکوزیته سیال می‌باشند.  $S_v$  نیز از رابطه (۱۰) به‌دست می‌آید که در این رابطه،  $K$  ضریب نفوذپذیری با واحد متر مربع و  $C$  ضریب مقاومت جریان اینرسی (ضریب فرجه‌میر) می‌باشد (که از روابط (۴)-(۷) محاسبه می‌شوند)، این معادله شامل دو ترم تلفات ناشی از ویسکوز و مقاومت اینرسی جریان سیال می‌باشد. در رابطه شماره (۱۱)،  $X_k$  معرف کسر جرمی گونه شیمیایی  $k$ ام در مخلوط گازی کاتد است، که شامل جز اکسیژن و بخار آب می‌گردد.  $D_{k,mix}^{eff}$  در رابطه (۱۱) بیانگر ضریب نفوذ موثر جز  $k$ ام در مخلوط گازی می‌باشد. در رابطه (۱۱)،  $S_k$  نشان دهنده مصرف و تولید اجزای اکسیژن و بخار آب در لایه کاتالیست کاتد است و در سایر نواحی صفر در نظر گرفته می‌شود. این ترم با استفاده از قانون فارادی برای هریک از اجزا به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$S_{O_2} = -\frac{M_{O_2} (i \cdot A)}{4F V_{cl}} \quad (12)$$

$$S_{H_2O} = +\frac{M_{H_2O} (i \cdot A)}{2F V_{cl}} \quad (13)$$

در روابط (۱۲) و (۱۳)،  $M$ ،  $A$ ،  $i$  و  $F$  به ترتیب چگالی جریان، سطح فعال لایه کاتالیست، وزن مولکولی، حجم لایه کاتالیست و ثابت فارادی می‌باشند.

شایان ذکر است که با توجه به میزان مصرف هریک از اجزا، مطابق روابط (۱۲) و (۱۳)، و با در نظر گرفتن ضریب بهره‌وری ( $u$ ) بر مبنای



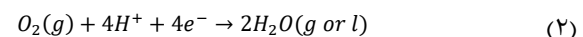
شکل ۲) طرح کلی فوم و لایه کاتالیست روی آن و نحوه مش بندی فوم.

## ۲-معادلات حاکم

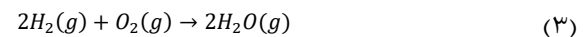
در پیل سوختی هیدروژنی، از واکنش بین هیدروژن و اکسیژن، آب، حرارت، و الکتریسیته تولید می‌شود. هر پیل سوختی از دو الکترود (آند و کاتد)، الکترولیت، و غشا تشکیل شده است. الکترولیت در میان دو الکترود قرار می‌گیرد و غشا نیز برای جدا کردن دو بخش پیل به کار می‌رود. در سمت آند، هیدروژن بر روی کاتالیست واکنش داده و دو یون هیدروژن و دو الکترون تولید می‌کند، معادله (۱).



پروتون (یون هیدروژن) به وجود آمده از واکنش بالا از الکترولیت گذر کرده و الکترون نیز در مدار، جریان الکتریکی ایجاد می‌کند. در سمت کاتد، اکسیژن با پروتون و الکترون واکنش داده و تولید بخار آب و حرارت می‌کند، معادله (۲).



واکنش شیمیایی کلی انجام گرفته در پیل سوختی به صورت رابطه (۳) می‌باشد:

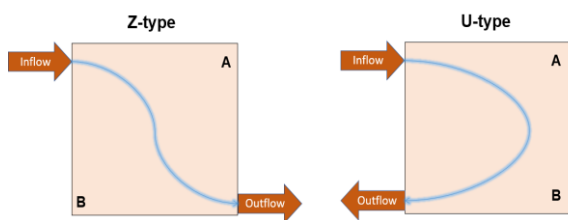


برای تعریف دقیق یک محیط متخلخل و ویژگی‌های مرتبط با آن، باید پارامترهای محیط متخلخل به طور دقیق محاسبه شوند. برای محاسبه دقیق پارامترهای محیط متخلخل، به معادلات حاکم بر آن‌ها نیاز است. این پارامترها عبارتند از: چگالی تخلخل که با واحد روزنه در اینج بیان می‌شود (PPI)، قطر روزنه ( $d_p$ ) با واحد متر، قطر فیلامنت ( $d_f$ ) با واحد متر، ضریب تخلخل ( $\varepsilon$ )، ضریب نفوذ-پذیری ( $K$ ) با واحد متر مربع، و ضریب فرجه‌میر ( $C$ ) با واحد متر معکوس. رابطه بین قطر و چگالی روزنه‌ها به صورت رابطه (۴) بیان می‌شود [18]:

$$d_p = \frac{0.0254}{PPI} \quad (4)$$

قطر فیلامنت (فیبر فلزی)، ضریب نفوذپذیری و ضریب فرجه‌میر نیز به ترتیب طبق روابط (۵)، (۶) و (۷) محاسبه می‌شود. که این رابطه‌ها نشان دهنده وابستگی ضرایب نفوذ پذیری و فرجه‌میر به ضریب تخلخل و اندازه قطر حفرات می‌باشد [18].

$$d_f = 1.18 d_p \sqrt{\frac{1 - \varepsilon}{3\pi}} \left( \frac{1}{1 - e^{-\frac{1-\varepsilon}{0.04}}} \right) \quad (5)$$



شکل ۳) فوم های نوع Z و U و گوشه های مقعر آن ها (نقاط A و B).

جدول ۱) مشخصات هندسی فوم و شرایط عملکردی.

| ردیف | نام مشخصه                   | مقدار       | واحد             |
|------|-----------------------------|-------------|------------------|
| ۱    | مساحت سطح فعال              | ۵۰×۵۰       | میلی متر مربع    |
| ۲    | ضخامت فوم                   | ۰/۵         | میلی متر         |
| ۳    | طول نواحی ورود و خروج جریان | ۷/۳         | میلی متر         |
| ۴    | ضخامت کاتالیست              | ۰/۰۱        | میلی متر         |
| ۵    | ضخامت لایه میکرومتخلخل      | ۰/۰۳۵       | میلی متر         |
| ۶    | رطوبت نسبی هوا              | ۱۰۰٪        | -                |
| ۷    | دمای نقطه شبنم              | ۶۰          | درجه سلسیوس      |
| ۸    | دمای کارکرد پیل             | ۶۰          | درجه سلسیوس      |
| ۹    | چگالی جریان                 | ۰/۵         | آمپر بر متر مربع |
| ۱۰   | دبی جرمی جریان هوا          | ۱/۰۲۴۸×۱۰-۵ | کیلوگرم بر ثانیه |
| ۱۱   | ضریب بهره‌وری               | ۰/۵         | -                |
| ۱۲   | فشار هوای محیط              | ۱۰۱۳۲۵      | پاسکال           |

#### ۴- شرایط مرزی

شرایط مرزی به کار رفته در این شبیه‌سازی عبارت اند از: سرعت در ناحیه ورودی جریان، که به صورت یکنواخت و عمود بر سطح ورودی جریان اعمال شده. شرط مرزی عدم لغزش در دیواره ها و فشار اتمسفر در ناحیه خروجی که در این ناحیه، هوا به‌صورت مخلوطی از گازهای اکسیژن، نیتروژن و بخار آب فرض شده است.

#### ۵- مشخصات محیط متخلخل فوم

ضریب تخلخل مناسب فوم همگن جهت کاربرد در پیل سوختی بین ۰/۸۵ تا ۰/۹۵ گزارش شده است<sup>[۱۹]</sup>. در این مطالعه، ضریب تخلخل فوم همگن، برابر ۰/۹۱ در نظر گرفته شده است. ضریب تخلخل در کاتالیست باید خیلی کمتر از ضریب تخلخل در فوم باشد که در این مطالعه از مقدار ۰/۶ استفاده شده است. لایه ریزمتخلخل برای کاهش مقاومت تماسی میان فوم و کاتالیست به کار می‌رود، از این رو ضریب تخلخل آن نیز باید میان ضریب تخلخل فوم و کاتالیست باشد که برابر با ۰/۷ در نظر گرفته شده است.

در این مطالعه به منظور یکنواخت‌تر کردن توزیع جریان سیال و دستیابی به توزیع همگن و یکنواخت کسر مولی اکسیژن (محركه واکنش پیل سوختی) به معرفی و بررسی ساختارهای مختلف توزیع کننده جریان از نوع فوم پرداخته می‌شود. با توجه به این

آنالیز ترمودینامیکی ساده می‌توان میزان دبی جرمی اجزای خروجی را از الکتروود سمت کاتد به نحوه زیر محاسبه نمود:

$$\dot{m}_{O_2, \text{outlet}} = \frac{M_{O_2} (i \cdot A)}{4F u} - \frac{M_{O_2} (i \cdot A)}{O_2 \text{ consumption mass flow}} \quad (14)$$

$$\dot{m}_{H_2O, \text{outlet}} = \frac{M_{O_2} (i \cdot A)}{4F X_{O_2} u} X_{H_2O} + \frac{M_{H_2O} (i \cdot A)}{H_2O \text{ production mass flow}} \quad (15)$$

$$\begin{aligned} \dot{m}_{N_2, \text{outlet}} &= \dot{m}_{N_2, \text{inlet}} \\ &= \frac{M_{O_2} (i \cdot A)}{4F X_{O_2} u} (1 - X_{H_2O} - X_{O_2}) \end{aligned} \quad (16)$$

از روابط ترمودینامیکی-تحلیلی (۱۴) تا (۱۶) جهت چک کردن صحت نتایج حل CFD در راستای همگرایی معادلات بقای جرم گونه‌های شیمیایی به عنوان بخشی از صحت سنجی مدل استفاده می‌گردد.

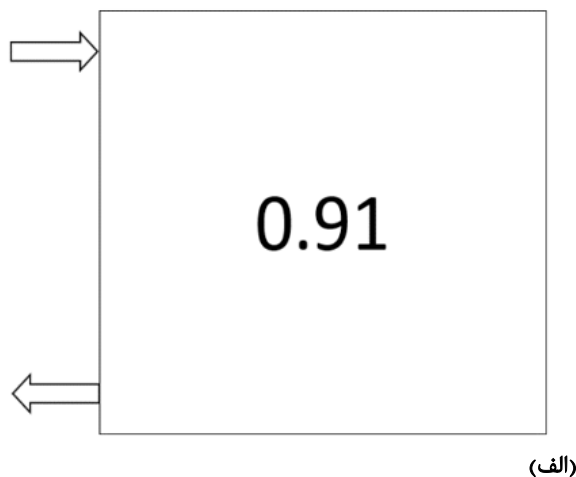
در نهایت معادله بقای انرژی نیز به صورت یک معادله انتقالی جابه‌جایی-پخش به صورت زیر در گرفته شده است:

$$\nabla \cdot (\rho C_p \vec{V} T) = \nabla \cdot (K_T^{eff} \nabla T) \quad (17)$$

در رابطه (۱۷)،  $T$ ،  $C_p$  و  $K_T^{eff}$  به ترتیب بیانگر ظرفیت گرمایی ویژه، دما، و ضریب هدایت حرارتی موثر می‌باشند. شایان ذکر است، چون هدف اصلی پژوهش حاضر بررسی نحوه توزیع جریان در میدان متخلخل فومی ارائه شده بوده است و هدف محاسبه راندمان و کارایی پیل سوختی نبوده است، لذا از در نظر گرفتن حرارت تولید شده در لایه کاتالیست کاتد در معادله (۱۷)، جهت ساده سازی فرآیند حل، صرف نظر گردید.

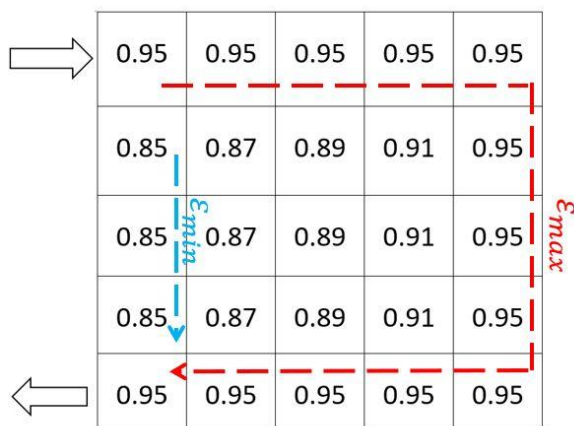
#### ۳- هندسه و شرایط عملکردی

به طور کلی فوم‌های مربعی شکل از نظر محل قرار گرفتن ورودی و خروجی جریان سیال، عمدتاً به دو نوع Z شکل و U شکل تقسیم‌بندی می‌شوند. در نوع Z شکل، ورودی و خروجی جریان در دو وجه مقابل مربع واقع شده‌اند. به عنوان مثال ورودی جریان در گوشه بالا سمت چپ و خروجی جریان در گوشه پایین سمت راست واقع شده است. در حالی که در نوع U شکل، ورودی و خروجی جریان هر دو در یک وجه مربع قرار دارند. هندسه فوم به کار گرفته شده در این مطالعه از نوع U شکل می‌باشد. در شکل (۳) فوم های Z شکل و U شکل و گوشه‌های مقعر آن‌ها که جریان سیال کمتری به آنها می‌رسد (نقاط A و B) نشان داده شده است. در این تحقیق جهت بررسی عملکرد پیل سوختی با توزیع کننده جریان از نوع فوم، مطالعه عددی نیم سل سمت کاتد انجام می‌شود که مشخصات هندسی و شرایط کاری پیل سوختی مورد مطالعه در جدول (۱) بیان شده است.



|      |      |      |      |      |
|------|------|------|------|------|
| 0.85 | 0.87 | 0.91 | 0.93 | 0.95 |
| 0.85 | 0.89 | 0.91 | 0.93 | 0.95 |
| 0.89 | 0.91 | 0.91 | 0.93 | 0.95 |
| 0.91 | 0.91 | 0.93 | 0.95 | 0.95 |
| 0.93 | 0.93 | 0.95 | 0.95 | 0.95 |

(ب)



شکل ۴) نمایش ساختار مختلف فوم های مورد بررسی به همراه توزیع ضرایب تخلخل آنها، (الف) نوع اول (تخلخل یکنواخت)، (ب) نوع دوم و (ج) نوع سوم.

همچنین در این مطالعه برای اعتبارسنجی دبی جرمی خروجی اجرا نیز به صورت تحلیلی با استفاده از روابط (۱۴)–(۱۶) محاسبه و با نتایج شبیه سازی CFD مورد مقایسه قرار گرفت. نتایج این اعتبارسنجی در نمودار شکل (۷) آمده است، نزدیکی نتایج حل تحلیلی به CFD، نشان از صحت روش به کار گرفته شده و همگرایی خوب معادلات بقاء می باشد.

نکته که جریان سیال در هنگام عبور از توزیع کننده فوم تمایل به پیمایش کوتاه ترین مسیر از ورود تا خروج را دارد، این امر موجب کاهش غلظت واکنشگر ها در نواحی مقعر می شود و لذا افت عملکرد پیل را در پی دارد، بنابراین از یک فوم با ضریب تخلخل متغیر جهت هدایت جریان و دستیابی به یک توزیع یکنواخت، استفاده می شود. برای طراحی فوم با ضریب تخلخل متغیر، فوم به ۲۵ قسمت مربعی شکل تقسیم شده است و برای هر یک از این ۲۵ قسمت، ضریب تخلخل به گونه ای تعریف می شود که توزیع جریان، یکنواخت تر شده و به گوشه های مقعر، جریان بیشتری برسد. مطابق شکل (۴) (ب) و (ج)، نحوه تعیین ضریب تخلخل هر یک از ۲۵ قسمت مربعی شکل در فوم نوع دوم با ضریب تخلخل متغیر نشان داده شده است. در این حالت برای قسمت های از فوم که جریان کمتری دریافت می کنند، ضریب تخلخل بیشتری به منظور تسهیل حرکت جریان نسبت به سایر قسمت ها در نظر گرفته شده است.

برای فوم نوع سوم، شکل (۴)، با ضریب تخلخل متغیر، ضریب تخلخل در قسمت هایی که در مجاورت اضلاع بالا و پایین و سمت راست فوم قرار دارند (مسیر طولانی خط چین)، مقدار حداکثر و در قسمت هایی که در مجاورت ضلع سمت چپ فوم قرار دارند (مسیر کوتاه با خط توپر، قسمت های بین ورودی و خروجی جریان) مقدار حداقل در نظر گرفته شده است، زیرا جریان هوا تمایل دارد که مسیر کوتاه تر بین ورودی تا خروجی را طی کند و بنابراین، در این نواحی، ضریب تخلخل باید کمتر از سایر نواحی باشد.

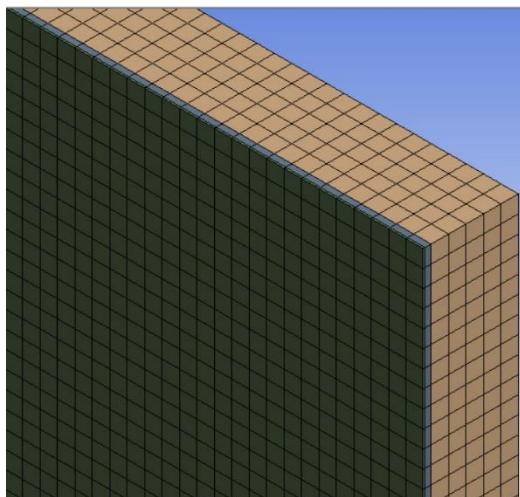
## ۶- نتایج

### ۶-۱- اعتبار سنجی

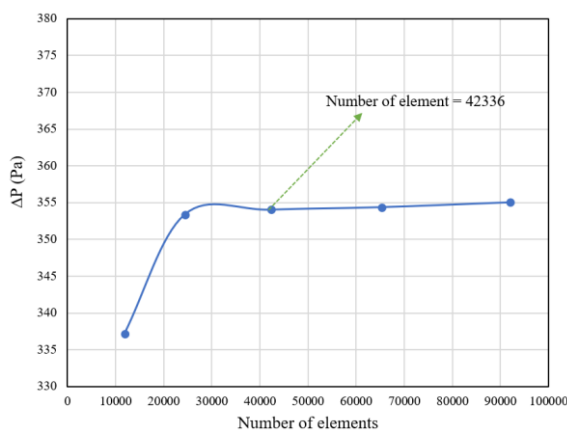
در این مطالعه جهت اعتبار سنجی نتایج عددی، به مقایسه آنها با رابطه تحلیلی برگرفته شده از مطالعات انجام شده توسط مسعودی و همکاران پرداخته می شود [20]. معادله (۱۸) نشان دهنده افت فشار در محیط متخلخل با صرف نظر از تلفات اینرسی می باشد، این رابطه نشان دهنده فشار ( $\Delta P$ ) بر حسب دبی حجمی ( $Q$ )، لزجت ( $\mu$ )، ضریب نفوذپذیری ( $K$ )، سطح مقطع ( $A$ ) و طول کانال ( $L$ ) می باشد. در این مقایسه، با توجه به شکل (۵) از مسیر متوسط عبور جریان از ورود تا خروج (میانگین نزدیک ترین و دورترین مسیر عبور در میدان جریان) به صورت یک کانال مستقیم با طول معادل ( $L_e$ ) استفاده شده.

$$\Delta P = \frac{\mu L Q}{A K} \quad (18)$$

شکل (۶) نشان دهنده مقایسه نتایج عددی و تحلیلی به ازای دبی های مختلف جریان می باشد، با توجه به این شکل تطابق خوبی میان نتایج عددی و تحلیلی وجود دارد البته با افزایش دبی، اختلاف بین نتایج نیز کمی افزایش می یابد که ناشی از افزایش اثرات اینرسی می باشد که در رابطه تحلیلی در نظر گرفته نشده است.



شکل ۸) نمایی از شبکه بندی مورد استفاده در ناحیه محاسباتی توزیع کننده جریان.

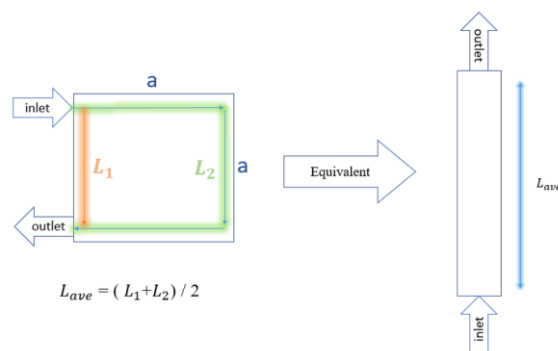


شکل ۹) بررسی نتایج شبکه بندی های مختلف بر اساس تعداد المان.

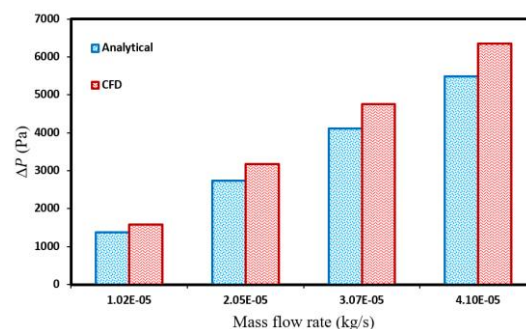
نشان دهنده انواع مختلف شبکه بر حسب تعداد المان از سائز از ریز تا درشت می باشد و محور عمودی نیز میزان افت فشار مسیر ورود تا خروج جریان سیال در میدان را نشان می دهد. با توجه به نمودار شبکه بندی با سائز متوسط ( $N = 42336$ ) می تواند تعادلی منطقی بین دقت و زمان محاسبات ایجاد کند و به عنوان مبنای شبکه بندی در این مطالعه انتخاب می شود. تعداد مش ها در راستای طول و عرض برابر با ۵۰۰ عدد، در راستای ضخامت لایه فوم برابر با ۵ عدد، و در راستای ضخامت لایه ریزمتخلخل و لایه کاتالیست نیز ۱ عدد می باشد.

### ۳-۶- افت فشار

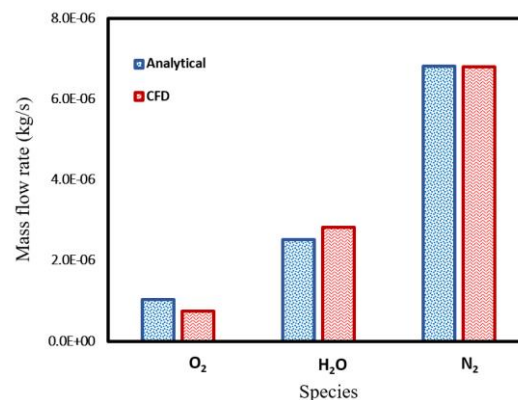
کانتور فشار به دست آمده بر روی صفحه میانی فوم نوع اول (تخلخل یکنواخت) در شکل (۱۰) قسمت (الف) نشان داده شده است. گرادیان فشار در فوم، برابر با حاصل تقسیم اختلاف فشار ورودی تا خروجی جریان بر میانگین طول دو مسیر مختلف می- باشد: (۱) مسیری که مستقیماً از ورودی به خروجی می رود و طول آن برابر با طول ضلع فوم است. (۲) مسیری که از ورودی به دور فوم حرکت می کند و به خروجی می رود و طول آن سه برابر طول



شکل ۵) شماتیک مسیرهای مختلف عبور جریان و شکل معادل به ازای طول متوسط مسیر جریان.



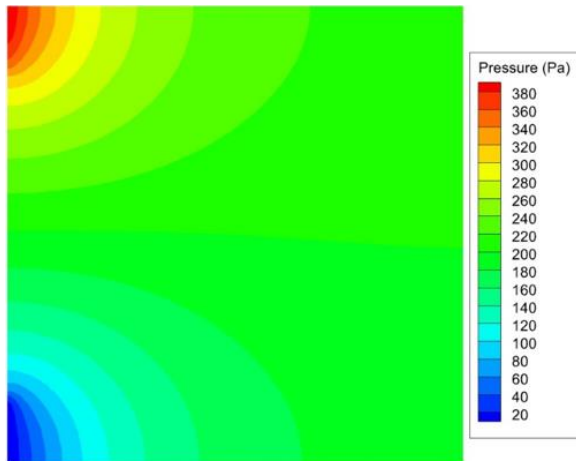
شکل ۶) نمودار مقایسه نتایج حل عددی و تحلیلی به ازای دبی های مختلف جریان.



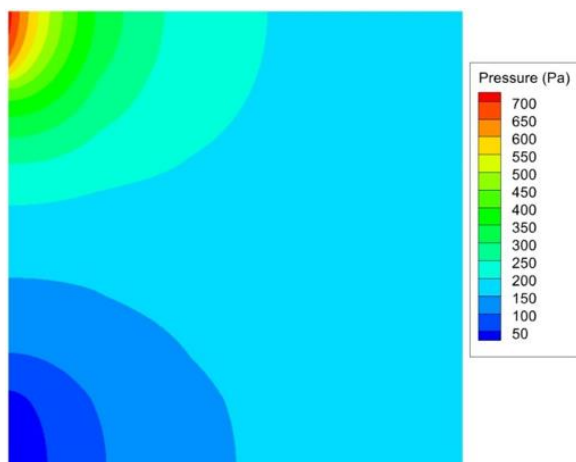
شکل ۷) نمودار مقایسه نتایج تحلیلی و عددی دبی خروجی اجزاء در سمت کاتد.

### ۲-۶- استقلال از شبکه بندی

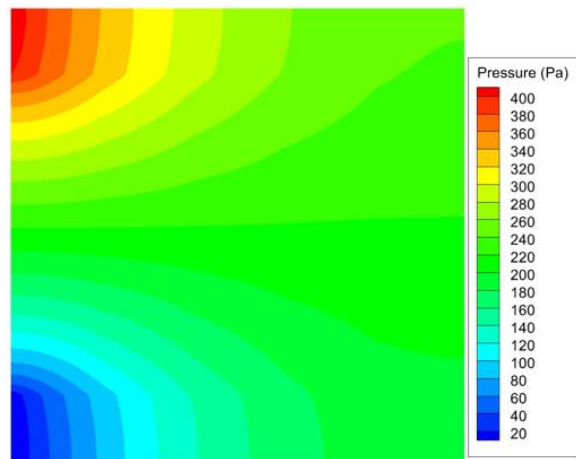
در مطالعه پیش رو جهت استقلال و عدم وابستگی نتایج به شبکه بندی، ساختارهای مختلف شبکه به ازای تنظیمات حلگر ثابت بررسی شد. افزایش تعداد المان ها و ظرافت شبکه در اغلب موارد دقت بیشتر محاسبات عددی را در پی دارد اما از طرف دیگر منجر به افزایش هزینه های محاسباتی و زمان نیز می شود، لذا دستیابی به حد بهینه از دقت و محاسبات هزینه امری مهم می باشد. در شکل (۸) نمایی از شبکه بندی به کار گرفته شده در مطالعه حاضر را نشان می دهد. شکل (۹) نشان دهنده نتایج استقلال از شبکه بندی برای این مطالعه می باشد، در این نمودار محور افقی



(الف)



(ب)



(ج)

شکل ۱۰) کانتور فشار به ازای به کارگیری فوم با ساختارهای مختلف، (الف) نوع اول (تخلخل یکنواخت)، (ب) نوع دوم و (ج) نوع سوم.

جدول ۲) گرادیان فشار به ازای به کارگیری فوم با ساختارهای مختلف با واحد میلی بار بر متر.

| نوع سوم             | نوع دوم | نوع اول |
|---------------------|---------|---------|
| ۴۱/۸                | ۷۲/۳    | ۴۰      |
| $\Delta P$ (mbar/m) |         |         |

ضلع فوم است. بنابراین گرادیان فشار، برابر با حاصل تقسیم اختلاف فشار ورودی تا خروجی جریان بر دو برابر طول ضلع فوم می باشد. اختلاف فشار در حالت فوم نوع اول (تخلخل یکنواخت) از ورودی به خروجی جریان برابر با ۴۰۰ پاسکال است، بنابراین گرادیان فشار برابر با ۴۰ میلی بار بر متر به دست می آید.

در شکل (۱۰) کانتور فشار در صفحه میانی فوم با ضریب تخلخل متغیر نوع دوم و سوم نیز نشان داده شده است بر این اساس، گرادیان فشار برای فوم با ضریب تخلخل متغیر نوع دوم برابر با ۷۲/۳ میلی بار بر متر و برای فوم با ضریب تخلخل متغیر نوع سوم نیز تقریباً با فوم نوع اول برابر و برابر با ۴۱/۸ میلی بار بر متر بدست می آید. از مقایسه گرادیان فشار محاسبه شده برای هر یک از دو حالت، نتیجه می شود که گرادیان فشار برای حالت فوم با ضریب تخلخل متغیر نوع دوم، نسبت به حالت فوم نوع اول، تقریباً به میزان ۸۰/۷۵٪ افزایش یافته است. جدول (۲) نشان دهنده گرادیان فشار برای هر سه نوع فوم با توزیع تخلخل متفاوت می باشد. از نتایج به دست آمده اختلاف فشارهای ورودی تا خروجی میدان جریان، می توان پتانسیل توزیع کننده جریان فومی به کارگرفته برای تخلیه آب تشکیل شده در حین عملکرد پیل را نتیجه گرفت که مانع از پدیده ای مثل غرقابی شدن پیل می شود.

#### ۴-۶- غلظت اکسیژن

کانتور کسر مولی اکسیژن بر روی یک صفحه که در مرز مشترک بین لایه میکرومتخلخل و لایه کاتالیست قرار گرفته است در شکل (۱۱) رسم شده است. با توجه به فوم نوع اول با تخلخل یکنواخت، توزیع کسر مولی اکسیژن بر روی سطح کاتالیست یکنواخت نبوده و به گوشه های مقعر، جریان سیال بسیار کمتری می رسد.

در شکل (۱۱) همچنین کانتور کسر مولی اکسیژن در مرز مشترک لایه میکرومتخلخل و لایه کاتالیست برای فوم نوع دوم و سوم نیز نشان داده شده است. از مقایسه کانتورهای کسر مولی اکسیژن فوم نوع اول و نوع دوم (با گستره کسر مولی یکسان) چنین نتیجه می شود که نواحی آبی رنگ (مناطق که کسر مولی اکسیژن در آن ها صفر یا نزدیک به صفر می باشد) در فوم نوع دوم، بسیار کمتر از فوم نوع اول (تخلخل یکنواخت) می باشد. در واقع استفاده از فوم با ضریب تخلخل متغیر، باعث شده تا توزیع گاز اکسیژن درون کاتالیست در مقایسه با فوم همگن، یکنواخت تر شود. هرچند هنوز هم نواحی آبی رنگ زیادی به ویژه در گوشه پایین سمت راست فوم وجود دارند.

با توجه به شکل برای فوم نوع سوم، نواحی آبی رنگ در این فوم، نسبت به فوم نوع اول (تخلخل یکنواخت) بسیار کمتر شده است و در نتیجه این فوم، توزیع جریان بسیار بهتر و یکنواخت تری نسبت به فوم نوع اول دارد. ضمن اینکه در فوم نوع سوم، هیچ ناحیه ای وجود ندارد که کسر مولی اکسیژن در آن صفر باشد و به همه قسمت های فوم، جریان می رسد.

متوسط کسر مولی اکسیژن برای فوم نوع اول برابر با ۰/۰۸۶۹ و برای فوم نوع دوم برابر با ۰/۰۹۵۲ و برای فوم نوع سوم برابر با ۰/۱۱۴۸ به دست می‌آید. از مقایسه این مقادیر نتیجه می‌شود که متوسط کسر مولی اکسیژن در فوم نوع دوم، در مقایسه با فوم نوع اول، تقریباً به میزان ۹/۴۵٪ و در فوم نوع سوم، حدود ۳۲/۰۲٪ افزایش یافته است. در جدول (۳) متوسط کسر مولی اکسیژن برای هر سه نوع فوم، نشان داده شده و با یکدیگر مقایسه شده است.

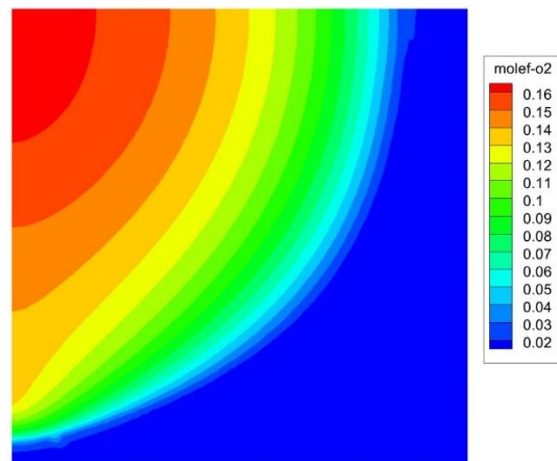
#### ۵-۶- خطوط جریان

شکل (۱۲) نشان دهنده خطوط جریان بر روی یک صفحه در وسط فوم است. همچنین جهت مقایسه بهتر عملکرد توزیع کنند های جریان سه نقطه با مختصات  $A(0.02,0.02)$ ,  $B(0.02,0)$ ,  $C(0.02,-0.02)$  در گوشه‌های سمت راست فوم که جریان کمتری را دریافت می‌کنند انتخاب شده‌اند. از مقایسه توزیع های مختلف فوم چنین نتیجه می‌شود که خطوط جریان در فوم‌های با ضریب تخلخل متغیر، نسبت به فوم همگن، گستردگی بیشتری دارند و درصد بیشتری از سطح فوم را پوشش داده و به عبارت دیگر مساحت سطح فعال واکنش افزایش یافته است. جدول (۴) نشان دهنده نتایج به کسر مولی اکسیژن مربوط به این سه نقطه می باشد، همان‌طور که مشاهده می‌شود، در نقطه A کسر مولی اکسیژن در فوم نوع دوم نسبت به فوم همگن حدود ۳/۲۷ برابر و در فوم نوع سوم نسبت به فوم همگن حدود ۶/۷۲ برابر شده است. همچنین در نقطه B کسر مولی اکسیژن در فوم نوع دوم نسبت به فوم همگن حدود ۱/۸۶ برابر و در فوم نوع سوم نسبت به فوم همگن حدود ۶/۷۳ برابر شده است. در نقطه C نیز کسر مولی اکسیژن در فوم نوع دوم نسبت به فوم همگن تغییر چندانی نداشته ولی در فوم نوع سوم نسبت به فوم همگن حدود ۳/۳۱ برابر شده است.

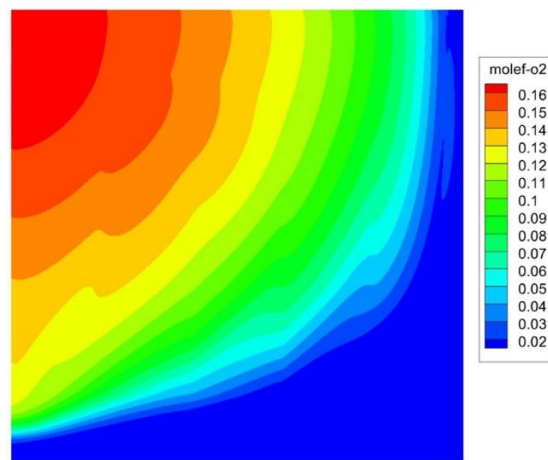
#### ۷- بحث و نتیجه‌گیری

در این مطالعه هدف اصلی، دستیابی به توزیع جریان یکنواخت در توزیع‌کننده جریان از نوع فوم مربعی، در سمت کاتد پیل سوختی غشا پلیمری بود تا از این طریق، به گوشه‌های مقعر فوم که جریان سیال به آنها نمی‌رسد، جریان بیشتری برسد و در نتیجه، توزیع کسر مولی اکسیژن یکنواخت‌تر شود. یکنواخت‌تر شدن توزیع جریان در فوم، باعث افزایش سطح فعال واکنش و در نتیجه افزایش راندمان پیل سوختی و بهبود عملکرد آن می‌شود.

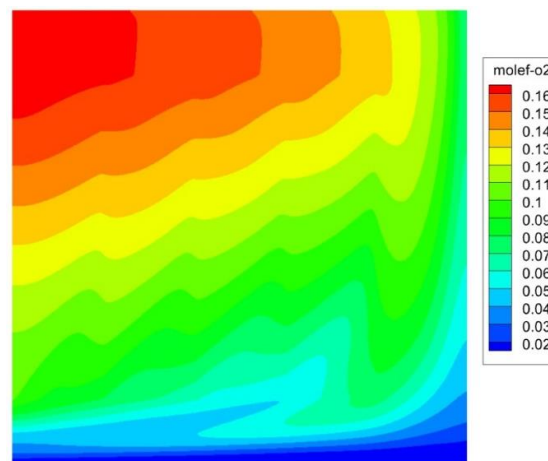
بدین منظور به جای استفاده از فوم همگن که ضریب تخلخل در همه جای آن یکسان است، از یک فوم با ضریب تخلخل متغیر استفاده شد به گونه‌ای که مناطقی از فوم همگن که کسر مولی اکسیژن در آن‌ها کمتر است، ضریب تخلخل بالاتری نسبت به سایر مناطق داشته باشند تا جریان بیشتری دریافت کنند. به همین دلیل، فوم به قسمت‌های مختلف به صورت شطرنجی تقسیم شد



(الف)



(ب)



(ج)

شکل ۱۱) کانتر غلظت کسر مولی اکسیژن به ازای به کارگیری فوم با ساختار های مختلف، (الف) نوع اول (تخلخل یکنواخت)، (ب) نوع دوم و (ج) نوع سوم.

جدول ۳) متوسط کسر مولی اکسیژن به ازای به کارگیری فوم های مختلف.

| نوع سوم | نوع دوم | نوع اول (تخلخل یکنواخت) | متوسط کسر مولی اکسیژن |
|---------|---------|-------------------------|-----------------------|
| ۰/۱۱۴۸  | ۰/۰۹۵۲  | ۰/۰۸۶۹                  |                       |

**جدول ۴)** کسر مولی اکسیژن نقاط مشخص شده به ازای فوم با توزیع های مختلف تخلخل.

| فوم نوع سوم | فوم نوع دوم | فوم نوع اول (تخلخل یکنواخت) |        |
|-------------|-------------|-----------------------------|--------|
| ۰/۱۲۱۶۰۴    | ۰/۰۵۹۱۳۲    | ۰/۰۱۸۵۰۸                    | نقطه A |
| ۰/۱۰۱۱۹۷    | ۰/۰۲۸۴۹۱    | ۰/۰۱۵۸۹۸                    | نقطه B |
| ۰/۰۴۳۳۸۹    | ۰/۰۱۴۶۳۴    | ۰/۰۱۳۴۵۱                    | نقطه C |

و پس از بررسی و یافتن بخش هایی از فوم همگن که کسر مولی اکسیژن در آن ها صفر یا بسیار اندک است، ضریب تخلخل در آن نواحی، بیشتر از سایر نواحی تعریف شده است. نتایج فوم همگن، با نتایج به دست آمده از دونوع فوم با ضریب تخلخل متغیر، مقایسه شد که نتایج حاصل آن به شرح زیر هستند:

- گرادیان فشار در فوم همگن (نوع اول)، برابر با ۴۰ میلی بار بر متر بود، اما در فوم با ضریب تخلخل متغیر نوع دوم برابر با ۷۲/۳ میلی بار بر متر می باشد که به میزان ۸۰/۷۵٪ افزایش یافته است. افزایش گرادیان فشار اگرچه باعث افزایش توان پمپاژ مورد نیاز می شود اما موجب بهبود تخلیه آب مایع حاصل از میعان بخار از محیط فوم و جلوگیری از پدیده انباشت آب و به موجب آن افت عملکرد پیل می شود.

- گرادیان فشار در فوم با ضریب تخلخل متغیر نوع سوم، برابر با ۴۱/۸ میلی بار بر متر می باشد که تقریباً با فوم نوع اول برابر است. - توزیع کسر مولی اکسیژن، در فوم نوع دوم نسبت به فوم همگن یکنواخت تر شده و مناطقی که کسر مولی اکسیژن در آن ها بسیار اندک و نزدیک به صفر بود، کاهش یافته اند.

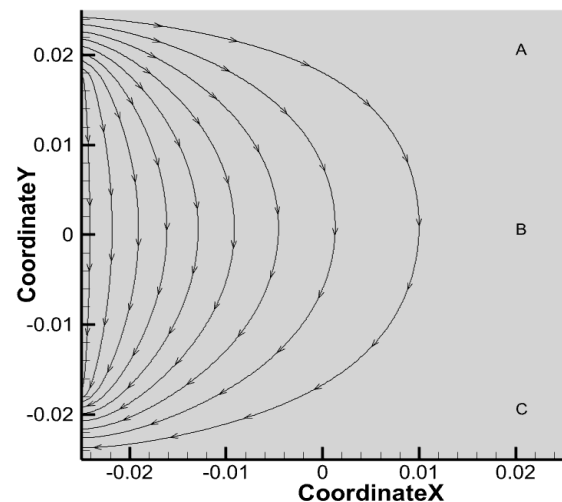
- در فوم نوع سوم، توزیع کسر مولی اکسیژن بسیار بهتر و یکنواخت تر انجام شده است و هیچ ناحیه ای که در آن کسر مولی اکسیژن صفر باشد وجود ندارد.

- متوسط کسر مولی اکسیژن در فوم نوع اول، برابر با ۰/۰۸۶۹ و در فوم نوع دوم و سوم، به ترتیب برابر با ۰/۰۹۵۲ و ۰/۱۱۴۸ می باشد که به ترتیب به میزان ۹/۴۳٪ و ۳۲/۰۲٪ بهبود یافته است.

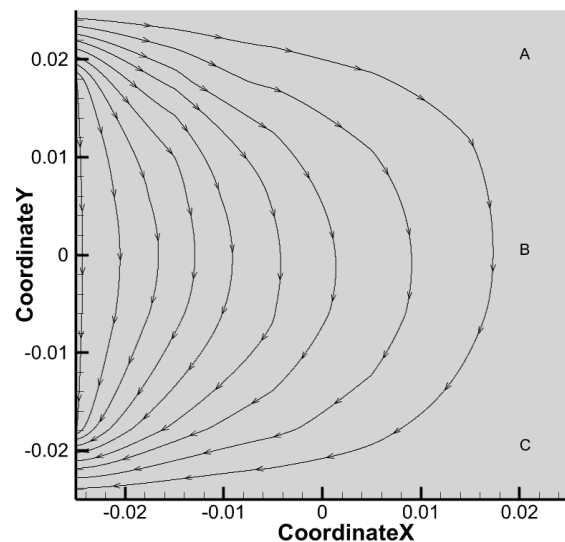
**تأییدیه اخلاقی:** محتویات علمی حاصل فعالیت های پژوهشی نویسندگان بوده و صحت نتایج آن نیز بر عهده نویسندگان مقاله است.

**تعارض منافع:** در فرآیند انجام و گزارش، بی طرفی رعایت شده و تعارض منافی وجود نداشته است.

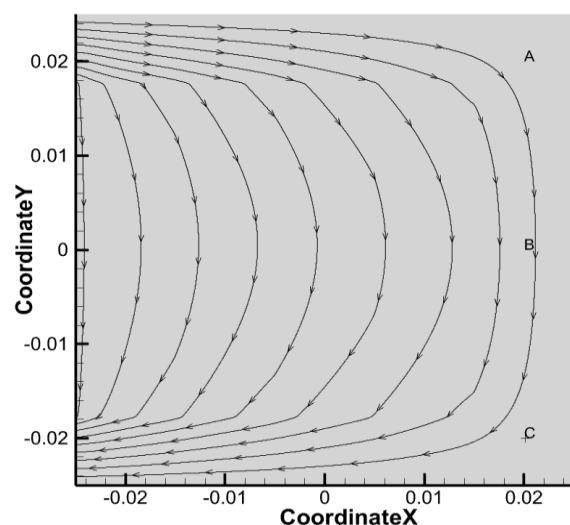
**منابع مالی:** این اثر تحت حمایت مادی صندوق حمایت از پژوهشگران و فناوریان کشور (INSF) برگرفته از طرح شماره "۴۰۰۱۳۳۵" انجام شده است.



(الف)



(ب)



(ج)

**شکل ۱۲)** خطوط میدان جریان سیال به ازای به کارگیری فوم با ساختار های مختلف، (الف) نوع اول (تخلخل یکنواخت)، (ب) نوع دوم و (ج) نوع سوم.

- 9- Lim BH, Majlan EH, Daud WR, Rosli MI, Husaini T. Numerical analysis of modified parallel flow field designs for fuel cells. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2017 Apr 6;42(14):9210-8.
- 10- Zheng LJ, Srouji AK, Turhan A, Mench MM. Computational exploration of ultra-high current PEFC operation with porous flow field. *Journal of The Electrochemical Society*. 2012 Jul 17;159(7):F267.
- 11- Tseng CJ, Tsai BT, Liu ZS, Cheng TC, Chang WC, Lo SK. A PEM fuel cell with metal foam as flow distributor. *Energy Conversion and Management*. 2012 Oct 1;62:14-21.
- 12- Kim M, Kim C, Sohn Y. Application of metal foam as a flow field for PEM fuel cell stack. *Fuel Cells*. 2018 Apr;18(2):123-8.
- 13- Wilberforce T, Khatib FN, Ijaodola OS, Ogungbemi E, El-Hassan Z, Durrant A, Thompson J, Olabi AG. Numerical modelling and CFD simulation of a polymer electrolyte membrane (PEM) fuel cell flow channel using an open pore cellular foam material. *Science of The Total Environment*. 2019 Aug 15;678:728-40.
- 14- Tsai BT, Tseng CJ, Liu ZS, Wang CH, Lee CI, Yang CC, Lo SK. Effects of flow field design on the performance of a PEM fuel cell with metal foam as the flow distributor. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2012 Sep 1;37(17):13060-6.
- 15- Shin DK, Yoo JH, Kang DG, Kim MS. Effect of cell size in metal foam inserted to the air channel of polymer electrolyte membrane fuel cell for high performance. *Renewable energy*. 2018 Jan 1;115:663-75.
- 16- Kang DG, Lee DK, Choi JM, Shin DK, Kim MS. Study on the metal foam flow field with porosity gradient in the polymer electrolyte membrane fuel cell. *Renewable energy*. 2020 Aug 1;156:931-41.
- 17- Kermani MJ, Moein-Jahromi M, Hasheminasab MR, Wei L, Guo J, Jiang FM. Development of a variable-porosity metal-foam model for the next fuel cells flow-distributors. *International journal of hydrogen energy*. 2022 Jan 22;47(7):4772-92.
- 18- Kermani MJ, Moein-Jahromi M, Hasheminasab MR, Ebrahimi F, Wei L, Guo J, Jiang FM. Application of a foam-based functionally graded porous material flow-distributor to PEM fuel cells. *Energy*. 2022 Sep 1;254:124230.
- 19- Havaye P, Kermani MJ, Heydari H, Abdollahzadeh Sangroodi MM. Parametric Study of Two-Phase Flow on the Cathode Side of a Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell. *Amirkabir Journal of Mechanical Engineering*. 2019 Oct 23; 51(4):31-40. (In Persian)
- 20 - Masoodi R, Pillai KM, editors. *Wicking in porous materials: traditional and modern modeling approaches*. CRC Press; 2012 Oct 26.

## فهرست علائم

|                   |                            |
|-------------------|----------------------------|
| C                 | ضریب فرجه‌میر، 1/m         |
| K                 | ضریب نفوذپذیری، m2         |
| P                 | فشار، Pa                   |
| T                 | دما، K                     |
| V                 | سرعت نفوذ جریان، m/s       |
| dp                | قطر روزنه، m               |
| df                | قطر فیلامنت، m             |
| $X_k$             | کسر جرمی گونه شیمیایی k ام |
| $D_{k,mix}^{eff}$ | ضریب نفوذ موثر جز k ام     |
| i                 | چگالی جریان، A/m2          |
| A                 | سطح مقطع، m2               |
| M                 | وزن مولکولی، g/mol         |
| Vcl               | حجم کاتالیست، m3           |
| F                 | ثابت فارادی، C/mol         |
| u                 | ضریب بهره وری              |
| Cp                | ظرفیت گرمایی ویژه، J/kg.°C |
| KT                | ضریب هدایت حرارتی، W/m.k   |
| Q                 | دبی حجمی، m3/s             |
| L                 | طول، m                     |
| $\epsilon$        | ضریب تخلخل                 |
| $\rho$            | چگالی، kg/m3               |
| $\mu$             | ویسکوزیته سیال، Pa.s       |

## منابع

- 1- Olabi AG, Wilberforce T, Abdelkareem MA. Fuel cell application in the automotive industry and future perspective. *Energy*. 2021 Jan 1;214:118955.
- 2- Edelstein S, Battery-electric or hydrogen fuel cell? VW lays out why one is the winner.
- 3- Ijaodola OS, El-Hassan Z, Ogungbemi E, Khatib FN, Wilberforce T, Thompson J, Olabi AG. Energy efficiency improvements by investigating the water flooding management on proton exchange membrane fuel cell (PEMFC). *Energy*. 2019 Jul 15;179:246-67.
- 4- Zhang G, Jiao K. Multi-phase models for water and thermal management of proton exchange membrane fuel cell: A review. *Journal of Power Sources*. 2018 Jul 1;391:120-33.
- 5- Owejan JP, Goebel SG. Performance evaluation of porous gas channel ribs in a polymer electrolyte fuel cell. *Journal of Power Sources*. 2021 May 15;494:229740.
- 6- Park JE, Lim J, Kim S, Choi I, Ahn CY, Hwang W, Lim MS, Cho YH, Sung YE. Enhancement of mass transport in fuel cells using three-dimensional graphene foam as flow field. *Electrochimica acta*. 2018 Mar 1;265:488-96.
- 7- Afshari E, Mosharaf-Dehkordi M, Rajabian H. An investigation of the PEM fuel cells performance with partially restricted cathode flow channels and metal foam as a flow distributor. *Energy*. 2017 Jan 1;118:705-15.
- 8- Wan Z, Sun Y, Yang C, Kong X, Yan H, Chen X, Huang T, Wang X. Experimental performance investigation on the arrangement of metal foam as flow distributors in proton exchange membrane fuel cell. *Energy Conversion and Management*. 2021 Mar 1;231:113846.