

بهبود توزیع جریان گاز در توده پیل سوختی پلیمری با خروج آب مایع از منیفولد

احمد رضایی سنگتابی^۱، علی کیانی فر^{۲*}، ابراهیم علیزاده

۱- دانشجوی دکترای تخصصی، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

۲- استاد، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

۳- دانشیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران

چکیده

در این مقاله، توزیع جریان اکسیژن در یک توده پیل سوختی پلیمری به صورت عددی مورد مطالعه قرار گرفت. در ابتدا توده به صورت تکفاز شبیه‌سازی شده و نقش کاهش تدریجی ارتفاع منیفولد (منیفولد دوزنقه‌ای) بر بهبود توزیع جریان میان سلول‌های سوختی بررسی گردید. از انحراف معیار و ضریب غیریکنواختی برای اندازه‌گیری بدتوزیعی جریان استفاده شده است. کاهش تدریجی ارتفاع منیفولد تا ۷۰ درصد در منیفولد دوزنقه‌ای، موجب بهبود ۶/۹ و ۸/۴ درصدی انحراف معیار استاندارد و ضریب غیریکنواختی گردید. نتایج شبیه‌سازی دوفازی نشان داد که چگالش بخار آب موجود در اکسیژن اشباع می‌تواند باعث تجمع آب مایع در انتهای منیفولد شود. با گذشت زمان و بهم پیوستن قطرات کوچک‌تر، شعاع قطره تشکیل شده در انتهای منیفولد افزایش یافته تا زمانی که از دیوار منیفولد جدا شده و وارد سلول‌های انتهای می‌گردد. در منیفولد دوزنقه‌ای، آب مایع با مقدار کمتر و فواصل زمانی کوتاه‌تر وارد سلول انتهای می‌گردد. پیشنهاد گردید با ایجاد محفظه‌ای در انتهای منیفولد، آب مایع جمع‌آوری شده و از توده تخلیه گردد. ورود مقداری گاز اضافه به منیفولد و خروج آن از محفظه جمع‌آوری آب می‌تواند باعث هدایت آب مایع به درون محفظه گردد بدون اینکه تغییرات محسوسی در افت فشار ایجاد کند.

واژه‌های کلیدی: توزیع جریان، پیل سوختی پلیمری، جریان دوفازی، تخلیه آب، منیفولد.

Improving the Gas Flow Distribution in a PEMFC Stack by Removing Liquid Water from the Manifold

Ahmad Rezaei Sangtabi¹, Ali Kianifar^{2*}, Ebrahim Alizadeh³

1- Ph.D student, Department of Mechanical Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran.

2- Professor, Department of Mechanical Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran.

3- Associate professor, Department of Mechanical Engineering, Malek Ashtar university of Technology, Tehran, Iran.

Abstract

This paper studied the oxygen flow distribution in a PEM fuel cell stack numerically. At first, the flow in the stack was simulated as a single phase, and the effect of gradual reduction of manifold height (tapered manifold) on improving the flow distribution between fuel cells was investigated. Standard deviation and non-uniformity coefficient have been used to measure the flow maldistribution. Gradual reduction of manifold height up to 70% in the tapered manifold improved standard deviation and non-uniformity coefficient by 6.9% and 8.4%, respectively. The results of the two-phase simulation showed that the condensation of water vapor in the saturated oxygen could cause the accumulation of liquid water at the end of the manifold. As the smaller droplets merged, the droplet radius formed at the end of the manifold increased until it detached from the manifold wall and entered the last cells. Less liquid water entered the last cell at shorter intervals in the tapered manifold. It was suggested that by creating a water chamber at the end of the manifold, condensed water be collected from the manifold and discharged from the stack. Increasing the mass flow at the manifold inlet and discharging the excess gas through the water collection chamber can push the liquid water into the chamber without causing significant changes in pressure drop.

Keywords: Flow distribution, PEM fuel cell, Two-phase Flow, Water removal, Manifold.

پیل سوختی وسیله‌ای است که انرژی شیمیایی سوخت را به طور مستقیم به انرژی الکتریکی تبدیل می‌کند [۱]. در میان انواع پیل‌های سوختی، پیل سوختی پلیمری به دلیل دمای عملکردی پایین، چگالی توان بالا، الکترولیت جامد و قابلیت حمل و نقل دارای اهمیت فراوان بوده و می‌تواند جایگزینی برای موتورهای احتراق داخلی باشد [۲].

یکی از محدودیت‌های پیل سوختی پلیمری، ولتاژ خروجی آن می‌باشد. ولتاژ خروجی هر پیل سوختی پلیمری در محدوده ۰/۶ تا ۱ ولت است. برای افزایش ولتاژ خروجی، چندین پیل سوختی به صورت سری به هم متصل شده و یک توده پیل سوختی را تشکیل می‌دهند. به دلیل سری بودن سلول‌ها، ولتاژ و بازده خروجی توده به عملکرد تک تک سلول‌ها وابسته بوده [۳] و در شرایط ایده‌آل تمام سلول‌ها باید مقدار برابری گاز واکنش‌دهنده دریافت کنند. در توده پیل سوختی، گازهای واکنش‌دهنده به‌طور برابر میان سلول‌ها تقسیم نمی‌شوند و با افزایش تعداد سلول‌های توده، مقدار بدتوزیعی (Maldistribution) افزایش می‌یابد. از تاثیرات مخرب بدتوزیعی می‌توان به دمای متغیر سلول‌ها، امکان غرق شدگی سلول و کمبود گاز در برخی سلول‌ها اشاره کرد که باعث کاهش بازده و ولتاژ خروجی توده می‌گردد و در حالت بحرانی به غشای سلول‌ها آسیب می‌زند [۴،۵].

توزیع جریان و دمای سیال، افت فشار و جریان دوفازی در کانال‌های جریان یک پیل سوختی با روش‌های آزمایشگاهی مورد مطالعه قرار گرفته است [۶،۷]. اما مطالعات تجربی کمی به بررسی موضوع بدتوزیعی جریان در یک توده پرداخته‌اند. کیم و کیم [۸] به صورت تجربی سرعت لحظه‌ای جریان هوا میان کانال‌های یک توده پیل سوختی را اندازه‌گیری کردند. نتایج آن‌ها نشان داد وجود زاویه قائمه در **هندسه** منیفولد می‌تواند باعث ایجاد گردابه و افزایش بدتوزیعی جریان شود و با خط جریانی کردن منیفولد می‌توان بدتوزیعی جریان را بهبود بخشید. **نتایج تجربی** لیبک و همکاران [۹] نشان داد که ورود

جریان از هندسه دایروی شکل لوله تغذیه به هندسه مستطیل شکل منیفولد می‌تواند باعث ایجاد جت جریان درون منیفولد شده و باعث توزیع نامتوازن جریان در توده شود. به همین دلیل استفاده از یک پخش‌کننده (Diffuser) جریان در ورودی توده را پیشنهاد دادند. حسین و همکاران [۱۰] با روابط تحلیلی، توزیع جریان در منیفولدی با ۳۳ کانال **موازی** را مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که به دلیل سرعت زیاد جریان در ورود به منیفولد بیشتر جریان از ۲۰ درصد کانال‌های انتهایی عبور می‌کند. که و همکاران [۱۱] با استفاده از قانون دارسی نشان دادند که بدتوزیعی جریان در توده پیل سوختی با افزایش عدد رینولدز افزایش می‌یابد و بدتوزیعی در بخش کاتد پیل سوختی شدیدتر است. پارک و لی [۱۲] نشان دادند با افزایش قطر هیدرولیکی منیفولد و کاهش قطر هیدرولیکی کانال‌های صفحات دوقطبی، میانگین ولتاژ خروجی از سلول‌ها در توده افزایش می‌یابد. کریمی و همکاران [۱۳] با **بررسی** روش‌های مختلف ورود/خروج جریان به/از توده، **پیشنهاد** دادند که جریان از دو سمت توده وارد منیفولد ورودی شده و از مرکز منیفولد خروجی تخلیه گردد. کین و همکاران [۱۴] به صورت تحلیلی نشان دادند که با کاهش عرض کانال‌های جریان از ۰/۶ به ۰/۲ میلی‌متر، میانگین ولتاژ خروجی سلول‌ها از ۰/۶۲ به ۰/۶۶ ولت افزایش می‌یابد درحالی که افت فشار در توده بیش از ۱۰ برابر می‌شود. موستاتا و همکاران [۱۵] بیان کردند به دلیل تعداد زیاد خروجی‌های جریان گاز از منیفولد به کانال‌های جریان صفحات دوقطبی، استفاده از تقریب شبکه هیدرولیک در روش‌های تحلیلی، نمی‌تواند نتایج دقیقی برای توزیع جریان گاز در توده ارائه دهد.

در مطالعات تحلیلی فرض‌هایی برای ساده‌سازی مدل‌های پیشنهادی در نظر گرفته شده‌اند که باعث شده است که محققان از دینامیک سیالات محاسباتی برای افزایش دقت نتایج استفاده کنند. چن و همکاران [۱۶] از دینامیک سیالات محاسباتی برای شبیه‌سازی جریان درون توده ۷۲ سلولی استفاده کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که

افزایش افت فشار در کانال‌های جریان، کاهش دبی ورودی و افزایش عرض منیفولد می‌تواند در بهبود توزیع جریان موثر باشد. سو و همکاران [۱۷] نشان دادند ورود جریان از لوله به منیفولد مستطیلی باعث شکل‌گیری گردابه‌هایی در منیفولد می‌گردد و سلول‌هایی که در نواحی شکل‌گیری گردابه قرار می‌گیرند، گاز کمتری دریافت می‌کنند. آن‌ها پیشنهاد دادند که سطح مقطع منیفولد توسط صفحاتی به بخش‌های کوچک‌تری تقسیم شود تا از قدرت گردابه‌ها کاسته شده و توزیع گاز بهبود یابد. جکسون و همکاران [۱۸] یک رابطه برای تغییر ارتفاع منیفولد برحسب تعداد سلول‌های یک توده ارائه دادند. رابطه ارائه شده اگرچه باعث بهبود توزیع جریان گردید اما باعث افزایش بیش از ۱۰ برابر ارتفاع منیفولد در یک توده ۲۶ سلولی گردید. با استفاده از نتایج بدست آمده از شبیه‌سازی عددی، لیم و همکاران [۱۹] پیشنهاد کردند جریان از دو سمت توده وارد منیفولد ورودی شده و پس از عبور کانال‌های جریان از دو انتهای توده خارج گردد.

افزایش رطوبت نسبی گازهای واکنش‌دهنده قبل از ورود به پیل سوختی، باعث بهبود عملکرد پیل سوختی می‌گردد [۲۰]. به دلیل اینکه رسانایی پروتونی غشا پیل سوختی به رطوبت وابسته بوده، گازهای واکنش‌دهنده قبل از ورود به منیفولد فرآیند رطوبت‌زنی را طی می‌کنند. فرآیند رطوبت‌زنی می‌تواند در خارج از توده انجام پذیرد [۲۱] و یا توسط رطوبت‌زن‌های تخت غشایی متصل به توده انجام شود [۲۲]. نتایج عددی و تجربی ویلبرفورس و همکاران [۲۳] نشان داد که استفاده از اکسیژن به جای هوا به عنوان اکسیدکننده به مقدار قابل توجهی عملکرد پیل سوختی را بهبود می‌بخشد. همچنین افزایش رطوبت نسبی گاز اکسیدکننده تا حالت اشباع، باعث افزایش بازده پیل سوختی می‌گردد.

در توده‌هایی که تعداد پیل‌های سوختی تشکیل‌دهنده آن زیاد و سطح فعال پیل‌های سوختی برای واکنش شیمیایی بزرگ می‌باشد، شبیه‌سازی کامل توده با در نظر گرفتن تمام جزئیات، هزینه و زمان محاسبات بسیار

زیادی به همراه خواهد داشت و نیاز به ابرکامپیوترهایی برای محاسبات می‌باشد. در نتیجه از روش‌های جایگزین برای بررسی توزیع جریان گاز در توده استفاده می‌شود. در دینامیک سیالات محاسباتی از کانال‌های موازی پر شده با محیط متخلخل برای شبیه‌سازی توزیع جریان در توده استفاده می‌شود [۲۴-۲۶]. ضرایب مربوط به محیط متخلخل باید به گونه‌ای محاسبه گردند که افت فشار ایجاد شده در توده معادل افت فشار کانال‌های جریان پیل سوختی گردد.

بدتوزیعی جریان در منیفولد کاتد توده شدیدتر بوده [۱۱] و کاهش بدتوزیعی در بخش کاتد از اهمیت بیشتری برخوردار است. در این مقاله، بدتوزیعی جریان در بخش کاتد توده پیل سوختی ۵۲ سلولی مورد بررسی قرار می‌گیرد. در شبیه‌سازی توده از شرایط عملکردی یک توده پیل سوختی حقیقی استفاده شده است. در ابتدا توده به صورت تکفاز شبیه‌سازی می‌گردد و کاهش ارتفاع تدریجی منیفولد به عنوان راهکاری برای بهبود بدتوزیعی بررسی می‌گردد. سپس جریان گاز درون منیفولد توده به صورت دوفازی شبیه‌سازی می‌گردد تا نقش تغییر فاز بخار آب موجود در گاز واکنش‌دهنده بر توزیع جریان گاز در توده مطالعه گردد. در انتها راهکاری برای تخلیه آب مایع درون منیفولد پیشنهاد می‌گردد تا از ورود آب مایع به درون سلول‌های سوختی جلوگیری شود.

۲- معادلات حاکم

معادلات حاکم برای شبیه‌سازی جریان دوفازی در منیفولد بخش کاتد توده پیل سوختی پلیمری، شامل معادلات پیوستگی، اندازه حرکت، انرژی، کسر جرمی و بقای گونه‌ها و آشفستگی می‌باشد [۲۶]. معادلات پیوستگی و اندازه حرکت به صورت زیر می‌باشند:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial (\rho U)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U U) = -\nabla P + \rho g + \nabla \cdot \tau + F \quad (2)$$

در معادلات فوق ρ ، U ، p و τ به ترتیب چگالی،

بردار سرعت، فشار و تانسور تنش می‌باشند. چگالی با استفاده از کسر حجمی فازهای مختلف بدست می‌آید:

$$\rho = \alpha_1 \rho_1 + \alpha_2 \rho_2 \quad (3)$$

چگالی مخلوط اکسیژن و بخار آب از روابط گاز ایده‌آل محاسبه می‌شود:

$$\rho_2 = \frac{PM_{mix}}{RT} \quad (4)$$

عبارت آخر معادله اندازه حرکت، تاثیرات نیروی کشش سطحی و محیط متخلخل را نشان می‌دهد. برای بدست آوردن نیروی کشش سطحی از مدل نیروی سطحی پیوسته [27] استفاده می‌شود. این نیرو به صورت زیر محاسبه می‌گردد:

$$f = \sigma \kappa \nabla \alpha_1 \quad (5)$$

که در آن κ انحناى سطح و σ ضریب کشش سطحی می‌باشد. ضریب کشش سطحی آب مایع ثابت در نظر گرفته شده و انحناى سطح از رابطه زیر محاسبه می‌گردد:

$$\kappa = \nabla \cdot \bar{n} \quad (6)$$

در رابطه فوق، \bar{n} بردار یکه عمود بر سطح مشترک فازهای مایع و گاز بوده و به صورت زیر محاسبه می‌گردد:

$$\bar{n} = \frac{\nabla \alpha_1}{|\nabla \alpha_1|} \quad (7)$$

چسبندگی مایع به سطح دیوارها بر انحناى سطح مشترک فازها در نزدیک دیوار تاثیر می‌گذارد. بردار یکه در مجاورت دیوار و براساس زاویه تماس استاتیک از رابطه زیر محاسبه می‌گردد:

$$\bar{n} = \bar{n}_w \cos(\theta_w) + \bar{t}_w \sin(\theta_w) \quad (8)$$

که در رابطه فوق \bar{n}_w و \bar{t}_w به ترتیب بردارهای عمود و هم‌راستا با دیوار می‌باشند. θ_w زاویه تماس استاتیک بوده و به صورت زاویه بین دیوار و مماس سطح مشترک مایع-گاز بر روی دیوار تعیین می‌گردد. در مرجع [28]، کانال‌های جریان یک پیل سوختی به تنهایی شبیه‌سازی شده و افت فشار ناشی از عبور گاز از یک پیل سوختی محاسبه شده است. در این مطالعه از کانال‌های مستقیم پر شده از

مواد متخلخل برای ایجاد افت فشاری معادل با افت فشار محاسبه شده در مرجع [28] استفاده می‌گردد. محیط متخلخل در معادله ممتوم با اضافه شدن ترم زیر تعریف می‌گردد:

$$s = -\frac{\mu}{g} U \quad (9)$$

در رابطه فوق ضریب g به گونه‌ای باید محاسبه گردد تا افت فشاری معادل با عبور گاز از کانال‌های جریان یک پیل سوختی ایجاد کند. عبارت F در معادله اندازه حرکت مجموع روابط 5 و 9 می‌باشد.

در ورودی توده، عدد رینولدز جریان بیش از 17000 می‌باشد که بیانگر جریان آشفته در مینیولده می‌باشد و به همین منظور از مدل $k-\epsilon$ استاندارد برای شبیه‌سازی جریان آشفته استفاده شده است [29]:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U k) = \nabla \cdot \left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \nabla k \right) + P_k - \rho \epsilon \quad (10)$$

$$\frac{\partial(\rho \epsilon)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U \epsilon) = \nabla \cdot \left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \nabla \epsilon \right) \quad (11)$$

$$+ \frac{\epsilon}{k} (C_{\epsilon 1} P_k - C_{\epsilon 2} \rho \epsilon)$$

فشار اشباع آب موجود در اکسیژن ورودی به دما وابسته بوده و حتی تغییرات اندک دما نقشی موثر در چگالش یا تبخیر آب در فازهای گازی و مایع دارد. همچنین به دیوار مینیولده شرط انتقال حرارت جابه‌جایی اعمال شده که موجب می‌گردد دمای گاز درون مینیولده کاهش پیدا کند. معادله انرژی به صورت زیر می‌باشد:

$$\frac{\partial(\rho C_p T)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho C_p U T) = \nabla \cdot \left((K + C_p \frac{\mu_t}{Pr_t}) \nabla T \right) + \dot{m} h_{fg} \quad (12)$$

که در آن μ_t و Pr_t به ترتیب ویسکوزیته و عدد پراتل توربولانس می‌باشند [30]. عبارت انتهایی ناشی از اختلاف آنتالپی آب در حالت بخار و مایع می‌باشد. این مقدار برای چگالش به صورت مثبت و برای تبخیر منفی خواهد بود. در معادله بالا خواهیم داشت [31]:

$$\rho C_p = \rho_1 C_{p1} \alpha_1 + \rho_2 C_{p2} \alpha_2 \quad (13)$$

$$K = K_1 \alpha_1 + K_2 \alpha_2 \quad (14)$$

نظر گرفته می‌شود تا از انتشار عددی جلوگیری کند [۳۳]. سرعت فشرده‌گی در سطح هر سلول محاسباتی با استفاده از سرعت بیشینه در سطح مشترک و گرادینان کسر حجمی بدست می‌آید [۳۴]:

$$U_r = \min[C_a |U|, \max(|U|)] \frac{\nabla \alpha_1}{|\nabla \alpha_1|} \quad (19)$$

در رابطه فوق ضریب C_a می‌تواند مقداری بین ۱ تا ۴ داشته باشد [۳۴]. این ضریب در تحقیق حاضر ۱ در نظر گرفته می‌شود. گاز **ورودی** شامل اکسیژن و بخار آب می‌باشد و با حل معادله بقای گونه برای بخار آب، کسر جرمی **بخار آب** بدست می‌آید:

$$\frac{\partial(\rho y_i)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U y_i) = \nabla \cdot ((\rho D_i + \frac{\mu_t}{Sc_i}) \nabla y_i) - S_i \quad (20)$$

در رابطه بالا y_i کسر جرمی و D_i ضریب نفوذ گونه i ام در مخلوط گازها می‌باشد و ترم چشمه برابر با نرخ چگالش یا تبخیر خواهد بود. ضریب نفوذ برای مخلوط اکسیژن و بخار آب از رابطه زیر بدست آمده است:

$$D_i = \frac{a}{P} \left(\frac{T}{T_{c,1} T_{c,2}} \right)^b (P_{c,1} P_{c,2})^{1/3} (T_{c,1} T_{c,2})^{5/12} \left(\frac{1}{M_1} + \frac{1}{M_2} \right)^{1/2} \quad (21)$$

ضرایب a و b برای بخار آب ۰/۰۰۰۳۶۴ و ۲/۳۳۴ و برای اکسیژن ۰/۰۰۰۲۷۴۵ و ۱/۸۳۲ می‌باشند [۱]. ویسکوزیته و ضریب انتقال حرارت هدایتی فاز گاز براساس روابط مخلوط گاز ایده‌آل محاسبه می‌گردد [۳۱]:

$$\mu_{mix} = \frac{\sum_i x_i \mu_i}{\sum_j x_j \phi_{ij}} \quad (22)$$

$$k_{mix} = \frac{\sum_i x_i k_i}{\sum_j x_j \phi_{ij}} \quad (23)$$

$$\phi_{ij} = \frac{\left[1 + \left(\frac{\mu_i}{\mu_j} \right)^{0.5} \left(\frac{M_j}{M_i} \right)^{0.25} \right]^2}{\left[8 \left(1 + \frac{M_i}{M_j} \right)^{0.5} \right]} \quad (24)$$

خواص فیزیکی سیالات مورد استفاده در این مطالعه در جدول ۱ گردآوری شده است.

در معادله انرژی \dot{m} نرخ جرمی آب تغییر فاز دهنده و h_{fg} اختلاف آنتالپی آب در حالت بخار و مایع می‌باشد. مقدار جرمی که دچار تغییر فاز خواهد شد از رابطه زیر بدست خواهد آمد [۳۱]:

$$\dot{m} = \begin{cases} \frac{k_{cond}(1-\alpha_1)M_g^{H_2O}}{RT} P(x_g^{H_2O} - x_{sat}^{H_2O}) & x_g^{H_2O} \geq x_{sat}^{H_2O} \\ k_{evap} \alpha_1 \rho_1 P(x_g^{H_2O} - x_{sat}^{H_2O}) & x_g^{H_2O} < x_{sat}^{H_2O} \end{cases} \quad (15)$$

در رابطه فوق k_{cond} و k_{evap} ضرایب تجربی هستند که مقادیر آنها برای جریان درون پیل سوختی در مرجع [۳۱] بیان شده است. برای بدست آوردن فشار اشباع بخار آب، از جدول ترمودینامیکی در محدوده دمایی ۲۷۳ تا ۳۷۳ درجه کلوین، رابطه‌ای برای فشار بخار آب برحسب دما به صورت زیر استخراج شده است [۳۱]:

$$P_{sat} = -2846.4 + 411.24(T - 273.15) - 10.554(T - 273.15)^2 + 0.166636(T - 273.15)^3 \quad (16)$$

همچنین گرمای نهان آب برای محدوده دمایی ۲۷۳ تا ۳۷۳ کلوین با رابطه زیر و با دقت قابل قبولی تقریب زده می‌شود [۳۱]:

$$h_{fg} = 307090(647.15 - T)^{0.35549} \quad (17)$$

برای شبیه‌سازی جریان دوفازی از روش کسر حجمی [۳۲] استفاده شده است. در روش کسر حجمی از یک معادله انتقال اضافی برای مشخص کردن میزان حجم هر یک از فازها در حجم کنترل استفاده می‌شود. اساس روش بر این استوار است که متغیری نشان‌دهنده نسبت حجم یکی از فازها به حجم کل است. برای مثال $\alpha_1 = 1$ نشان‌دهنده پر بودن حجم کنترل از مایع و $\alpha_1 = 0$ بیانگر پر بودن حجم کنترل از گاز خواهد بود. معادله کسر حجمی در فرآیند تغییر فاز به صورت زیر تعریف می‌گردد [۳۳]:

$$\frac{\partial \alpha_1}{\partial t} + \nabla \cdot (U \alpha_1) + \nabla \cdot (U_r \alpha_1 (1 - \alpha_1)) = -\dot{m} \left(\frac{1}{\rho_1} - \alpha_1 \left(\frac{1}{\rho_1} - \frac{1}{\rho_2} \right) \right) \quad (18)$$

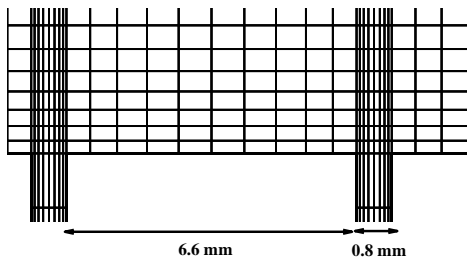
در رابطه فوق U_r سرعت فشرده‌گی نامیده می‌شود که در ناحیه سطح مشترک دو فاز و در جهت عمود بر آن در

جدول ۱: خواص فیزیکی سیالات [۳۵،۳۶]

خاصیت	واحد	اکسیژن	بخار آب	آب مایع
C_p	$J. kg^{-1}. K^{-1}$	۲۰۱۴	۹۱۹/۳۱	۴۱۸۰
M	$g. mol^{-1}$	۳۲	۱۸	۱۸
\bar{R}	$J. kg^{-1}. K^{-1}$	۲۵۹/۸	۴۶۱/۸۹	-
μ	$Pa. s$	$1/9 \times 10^{-10}$	$1/3 \times 10^{-10}$	$4/1 \times 10^{-10}$
K	$W. m^{-1}. K^{-1}$	۰/۰۲۴۶	۰/۰۲۶۱	۰/۵۸
T_c	K	۱۵۴	۶۴۷/۳	-
P_c	atm	۴۹/۸	۲۱۸	-

ضرایب محیط متخلخل، یک کانال با ارتفاع ۵۶/۶ میلی‌متر و دبی میانگین گذرنده از سلول‌ها شبیه‌سازی شده و با روش سعی و خطا، ضریب نفوذپذیری محیط متخلخل به‌گونه‌ای محاسبه می‌گردد تا افت فشاری معادل با افت فشار ناشی از عبور جریان از کانال صفحات دوقطبی بدست آمده در مرجع [۲۸] در کانال ۵۶/۶ میلی‌متری ایجاد گردد. مینفولد خروجی به مقدار ۵۰ میلی‌متر ادامه یافته تا از ورود جریان برگشتی به درون توده جلوگیری گردد.

بخشی از شکل ۱ که به صورت خط‌چین و به رنگ سبز مشخص شده، در شکل ۲ بزرگنمایی شده است. از مش سازمان‌یافته برای شبکه‌بندی فضای محاسباتی استفاده شده و در نزدیک دیوارها شبکه تراکم بیشتری دارد. عرض هر کانال ۰/۸ میلی‌متر و فاصله بین دو کانال ۶/۶ میلی‌متر می‌باشد.

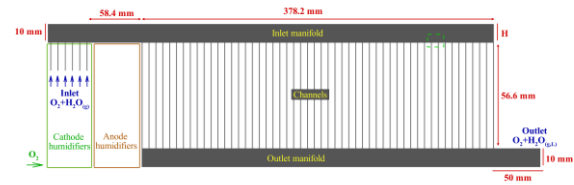


شکل ۲- بزرگنمایی شبکه بندی فضای محاسباتی

دبی جریان جرمی ورودی به مینفولد براساس سطح فعال سلول، استوکیومتری، جریان الکتریکی، ثابت فارادی، تعداد سلول‌ها و شرایط عملکردی توده بدست می‌آید. جریان اکسیژن با دبی ۸۳/۲۱۸ استاندارد لیتر بر دقیقه و در دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد وارد رطوبت‌زن‌ها شده و پس از افزایش رطوبت نسبی، به‌صورت اشباع وارد مینفولد می‌گردد. فرض می‌شود در ورودی، سیال به‌صورت گاز بوده و فاقد قطرات آب باشد ($\alpha_1 = 0$). کسر جرمی بخار آب در ورودی نیز با توجه به دما و فشار عملکردی توده تعیین می‌گردد. بر دیوارها شرایط عدم لغزش اعمال شده است. دمای دیوار کانال‌ها برابر با دمای عملکردی توده است. بر دیوارهای مینفولد شرط مرزی انتقال حرارت جابه‌جایی با هوای محیط اعمال شده است. در خروجی

۳- تعریف مسئله

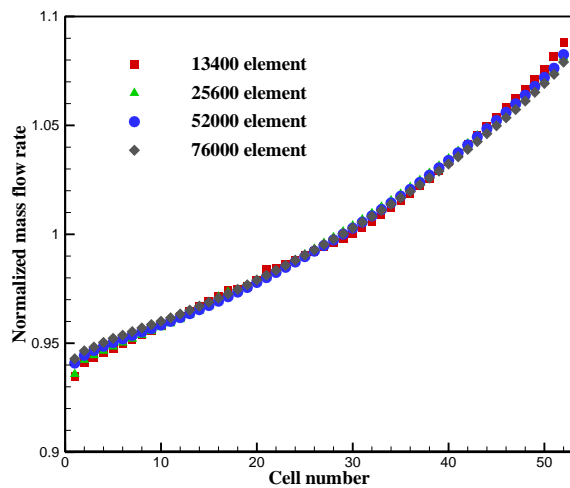
در این مطالعه، مینفولد بخش کاتد یک توده پیل سوختی پلیمری با ۵۲ سلول به صورت دوفازی شبیه‌سازی می‌شود. در شکل ۱، فضای محاسباتی مورد مطالعه ترسیم شده است.



شکل ۱- فضای محاسباتی

فضای محاسباتی شامل ۶ ورودی جریان، مینفولد ورودی، کانال‌های جریان و مینفولد خروجی می‌باشد. در توده مورد مطالعه از رطوبت‌زن‌های تخت غشایی برای افزایش رطوبت نسبی گاز ورودی استفاده می‌گردد. همان‌طور که در شکل ۱ نمایش داده شده است، ابتدا ۶ رطوبت‌زن‌های آند و سپس ۶ رطوبت‌زن کاتد به توده متصل می‌شوند. فرض می‌شود که گاز اکسیژن از منبع تغذیه وارد رطوبت‌زن‌های کاتد شده و به صورت اشباع وارد مینفولد ورودی گردد. به‌همین جهت رطوبت‌زن‌ها شبیه‌سازی نشده و فقط ۶ ورودی با شرایط مرزی دبی جرمی ثابت و در حالت اشباع در نظر گرفته می‌شوند. ارتفاع مینفولدهای ورودی و خروجی ۱۰ میلی‌متر می‌باشد. کانال‌های جریان صفحات دوقطبی با کانال‌های موازی با ارتفاع ۵۶/۶ میلی‌متر جایگزین شده و برای ایجاد افت فشار معادل، از مواد متخلخل استفاده شده است. برای محاسبه

گاز میان سلول‌های سوختی توده، توسط چهار شبکه متفاوت شبیه‌سازی شده و نمودار دبی جرمی بی‌بعد گذرنده از هر سلول در شکل ۳ آورده شده است. محور افقی در نمودارهای مقاله نشان دهنده شماره سلول سوختی در توده می‌باشد. سلول شماره ۱ نزدیک‌ترین سلول به ورودی توده و سلول شماره ۵۲ نزدیک‌ترین سلول به خروجی توده می‌باشد. دبی جرمی در هر سلول سوختی با استفاده از میانگین دبی جرمی گذرنده از تمام سلول‌ها بی‌بعد شده است تا میزان اختلاف دبی دریافتی توسط هر سلول از مقدار میانگین مشخص گردد.



شکل ۳- بررسی استقلال نتایج از شبکه محاسباتی.

تفاوت مقدار دبی جرمی گذرنده از اولین سلول سوختی برای شبکه‌هایی با تعداد ۵۲ و ۷۶ هزار سلول محاسباتی کمتر از ۰/۲ درصد می‌باشد. در نتیجه از هندسه با تعداد ۵۲ هزار سلول محاسباتی برای ادامه تحقیق استفاده شده است.

۵- نتایج

برای بررسی میزان بدتوزیعی جریان سیال بین سلول‌های توده از دو پارامتر استفاده می‌شود. پارامتر اول ضریب غیریکنواختی جریان [۳۹] است که با استفاده از بیشترین و کمترین جریان جرمی عبوری از سلول‌های توده محاسبه می‌گردد:

فشار برابر با فشار عملکردی سیستم در نظر گرفته شده است و گرادیان متغیرهای دیگر برابر با صفر تعیین شده است. زاویه تماس قطره آب با دیوارهای کانال و دیوار منیفولد به ترتیب ۱۳۵ و ۴۵ تعیین شده است [۳۷،۳۸].

برای حل معادلات حاکم در نرم‌افزار اپن‌فوم (OpenFoam) از الگوریتم پیرو استفاده می‌گردد. برای گسسته‌سازی عبارات جابه‌جایی از روش ون‌لیر و برای گسسته‌سازی عبارت زمانی از روش اولر استفاده می‌شود. در هر گام زمانی، میزان باقی‌مانده برای تمام معادلات مقدار 10^{-6} قرار داده شد. مقادیر پارامترهای مورد استفاده در معادلات حاکم و شرایط مرزی در جدول ۲ درج شده است.

جدول ۲: پارامترهای موجود در معادلات حاکم و شرایط مرزی

[۳۰،۳۱]

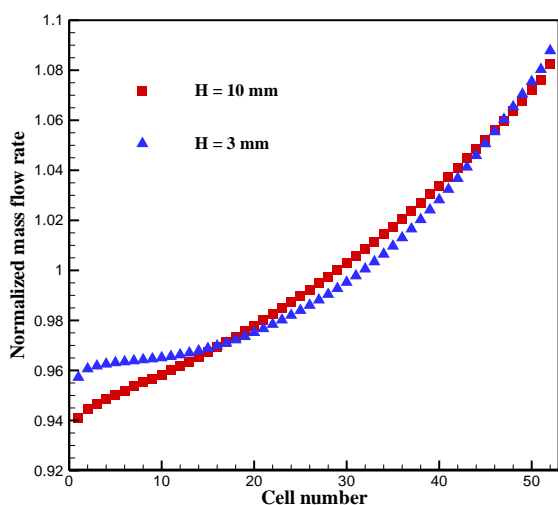
پارامتر	واحد اندازه‌گیری	مقدار
کشش سطحی (σ)	kg.s^{-2}	۰/۷
پرانتل آشفتنگی (Pr_t)	-	۰/۸۵
اشمیت آشفتنگی (Sc_t)	-	۰/۷
ضریب چگالش (k_{cond})	s^{-1}	۱۰۰
ضریب تبخیر (k_{evap})	$\text{Pa}^{-1}.\text{s}^{-1}$	9.18×10^{-10}
دمای محیط (T_∞)	K	۲۹۸
ضریب هدایت حرارتی (h_m)	$\text{W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$	۱۰۰
دمای عملکردی (T_{op})	K	۳۴۳
فشار عملکردی (P_{op})	bar	۲
نفوذپذیری محیط متخلخل (ϕ)	m^2	5.15×10^{-10}

۴- حل مستقل از شبکه

برای شبیه‌سازی جریان دوفازی بخش کاتد در این تحقیق، نیاز به توسعه کدهای موجود در نرم‌افزار متن‌باز اپن‌فوم می‌باشد. اعتبار کد مورد استفاده برای شبیه‌سازی جریان دوفازی در منیفولد کاتد توده پیل سوختی، در مرجع [۲۸] بررسی شده و برای پرهیز از تکرار، نتایج مربوط به اعتبارسنجی در این تحقیق ارائه نمی‌گردد.

برای دستیابی به حل مستقل از شبکه، توزیع جریان

ورود به منیفولد بیشینه است و با پیشروی در توده از سرعت آن کاسته شده و بر فشار استاتیک افزوده می‌شود. در انتهای منیفولد، فشار استاتیک به بیشترین مقدار خود می‌رسد و دبی بیشتری از سلول‌های انتهایی می‌گذرد. کاهش تدریجی ارتفاع منیفولد موجب می‌گردد سرعت محلی جریان در طول منیفولد افزایش یابد و توزیع فشار استاتیک نسبت به حالت اولیه بهبود یابد. بهبود توزیع فشار موجب می‌گردد که دبی جرمی ورودی به سلول‌های ابتدایی افزایش یابد.



شکل ۴- توزیع جریان در توده پیل سوختی به صورت تکفاز دبی بی‌بعد گذرنده از سلول اول از ۰/۹۴۱ در حالت اولیه H=10 mm به مقدار ۰/۹۵۷ در حالت H=3 mm رسیده است. در جدول ۳ پارامترهای توزیع جریان برای شکل ۴ محاسبه شده است. با توجه به جدول ۳، ضریب غیریکنواختی و انحراف معیار به ترتیب ۸/۴ و ۶/۹ درصد بهبود یافتند.

جدول ۳: پارامترهای توزیع جریان در شبیه‌سازی تکفاز

انحراف معیار	ضریب غیریکنواختی	ارتفاع انتهای منیفولد
۰/۰۴۰۶	۰/۱۳۱	H = 10 mm
۰/۰۳۷۸	۰/۱۲۰	H = 3 mm

۲-۵- شبیه‌سازی دوفازی توده با ارتفاع ثابت منیفولد در این بخش نقش تغییر فاز بخار آب بر توزیع جریان گاز مورد بررسی قرار می‌گیرد. هنگامی که گاز ورودی به

$$F_1 = \frac{\max(\dot{m}_1 \dots \dot{m}_{52}) - \min(\dot{m}_1 \dots \dot{m}_{52})}{\max(\dot{m}_1 \dots \dot{m}_{52})} \quad (25)$$

پارامتر دوم انحراف معیار استاندارد می‌باشد که که با در نظر گرفتن اختلاف دبی گذرنده از هر سلول با مقدار میانگین (مقدار ایده‌آل) از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$F_2 = \sqrt{\frac{\sum (\dot{m}_i - \dot{m}_{ave})^2}{N-1}} \quad (26)$$

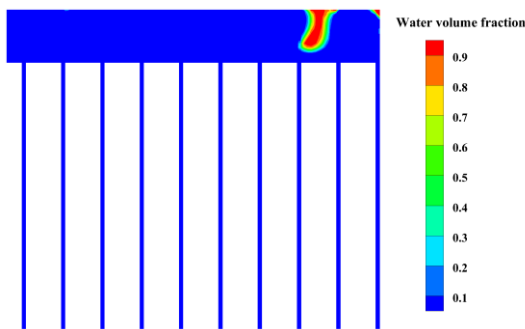
مقادیر کوچک‌تر این دو پارامتر به معنای توزیع بهتر جریان می‌باشد.

۱-۵- شبیه‌سازی تکفاز توده

در ابتدا، توزیع جریان اکسیژن میان سلول‌های سوختی به صورت تکفاز شبیه‌سازی شده و یکی از راهکارهای پیشنهادی در مطالعات پیشین برای بهبود توزیع جریان گاز میان سلول‌های سوختی توده مورد مطالعه قرار می‌گیرد. در بسیاری از مطالعات، جریان درون منیفولد به صورت تکفازی شبیه‌سازی می‌شود. با توجه به تغییرات کم دمای گاز در منیفولد، هنگامی که گاز به صورت خشک و یا با رطوبت نسبی پایین وارد توده گردد، تغییرات کم دما موجب چگالش بخار آب موجود در گاز ورودی نمی‌گردد. در این حالت می‌توان از نتایج شبیه‌سازی تکفاز استفاده کرد.

یکی از راهکارهای بهبود توزیع جریان میان سلول‌های سوختی در توده، کاهش تدریجی ارتفاع منیفولد ورودی می‌باشد. بدین صورت که ارتفاع منیفولد از سلول اول تا انتهای توده با شیب یکسان کاهش می‌یابد. در شکل ۱ ارتفاع انتهایی منیفولد با حرف H نمایش داده شده است. در این مقاله کاهش ۷۰ درصدی ارتفاع منیفولد بررسی می‌شود و فرض می‌شود که ارتفاع منیفولد از ۱۰ میلی‌متر در ابتدا تا ۳ میلی‌متر در انتها (H=3mm) کاهش یابد. در شکل ۴ توزیع جریان گاز میان سلول‌های سوختی در حالت تکفاز نمایش داده شده است. با توجه به شکل ۴، کاهش تدریجی ارتفاع منیفولد موجب افزایش دبی جرمی ورودی به سلول‌های ابتدایی می‌گردد. سرعت گاز در

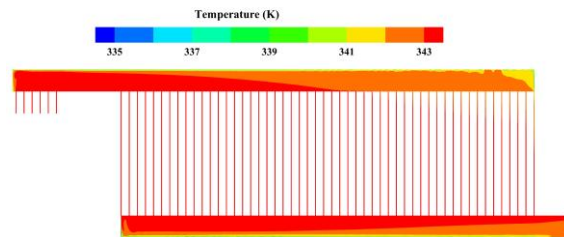
با توجه به شکل ۷ که کسر حجمی آب مایع را در زمان ۵۰/۵ ثانیه نشان می‌دهد، شعاع قطره شکل گرفته بر روی دیوار بالایی با پیوستن قطرات کوچک‌تر افزایش یافته تا جایی که نیروی وزن بر نیروی چسبندگی غلبه کند. آن‌گاه قطره از سطح دیوار بالایی منیفلود جدا می‌گردد. هنگامی که قطره آب در حال جدا شدن از سطح دیوار می‌باشد، بخش بزرگی از سطح منیفلود مسدود می‌گردد. نیروی وارد از گاز درون منیفلود، باعث تغییر شکل قطره می‌گردد.



شکل ۷- کانتور کسر حجمی در ثانیه ۵۰/۵

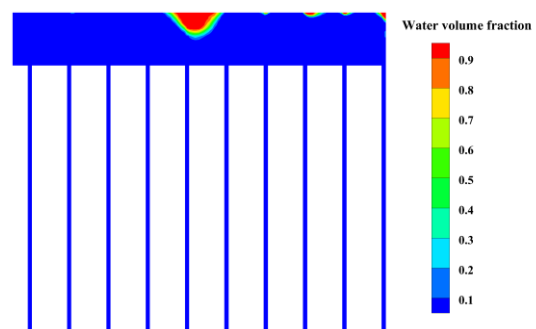
در شکل ۸ کانتور کسر حجمی آب مایع در زمان ۵۰/۶ ثانیه نشان داده شده است. نیروی جریان گاز موجب حرکت قطره به سمت انتهای منیفلود و نیروی وزن موجب حرکت قطره به سمت سلول‌ها می‌گردد. به همین دلیل انتهای قطره جدا شده از دیوار بالایی منیفلود به ورودی سلول ۵۱ برخورد کرده و بخش کوچکی از آن وارد سلول ۵۱ می‌شود. بخش اعظم آب مایع به همراه جریان گاز به انتهای منیفلود رسیده و پس از برخورد به دیوار انتهایی توده، به دلیل نیروی وزن به سمت سلول ۵۲ حرکت می‌کند. با توجه به اینکه شعاع قطره از عرض سلول‌ها بزرگ‌تر است، تمام آب مایع به یکباره وارد سلول انتهایی نمی‌شود که منجر به تجمع آب مایع در ورودی سلول ۵۲ می‌گردد. جریان گاز در کانال و وزن آب موجب تخلیه سریع آب از سلول انتهایی می‌شود.

منیفلود به صورت اشباع باشد، تغییرات ناچیز دما موجب چگالش بخشی از بخار آب موجود در مخلوط گاز ورودی می‌شود. در شکل ۵ کانتور دمای گاز در توده ترسیم شده است.

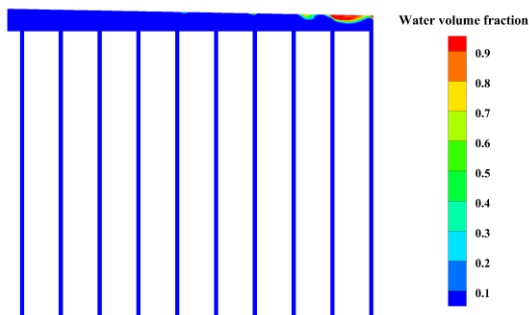


شکل ۵- کانتور دما در توده

در شکل ۵ مشخص است که کاهش دما در منیفلود ناچیز بوده و فرآیند چگالش به کندی صورت می‌گیرد. با توجه به انتقال حرارت از دیوار بالایی منیفلود، آب مایع نیز باید بر روی دیوار بالایی منیفلود تشکیل گردد. طول منیفلود که به تعداد سلول‌های سوختی در یک توده وابسته است نقش مهمی در تغییرات دمای گاز درون منیفلود دارد و توده‌های طولی‌تر انتقال حرارت بیشتر و تغییرات دمایی بیشتری دارند. شبیه‌سازی عددی نشان داد که نرخ چگالش آب مایع بر روی دیوار بالایی بسیار پایین بوده و تشکیل قطره آب بر روی دیوار زمان‌بر است. به دلیل اینکه سرعت جریان در ابتدای منیفلود زیادتر می‌باشد، آب مایع به سمت انتهای منیفلود هدایت می‌گردد. قطره‌های کوچک آب به هم پیوسته و قطراتی با شعاع بزرگ‌تر را تشکیل می‌دهند. در شکل ۶ کسر حجمی آب مایع و قطره آب تشکیل شده بر روی دیوار منیفلود پس از گذشت ۵۰/۲ ثانیه نشان داده شده است. برای نمایش بهتر، بخش انتهایی منیفلود بزرگنمایی شده است.

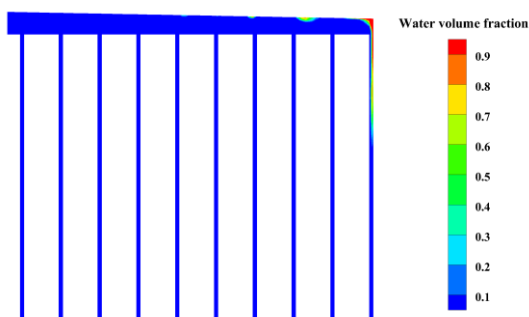


شکل ۶- کانتور کسر حجمی در ثانیه ۵۰/۲



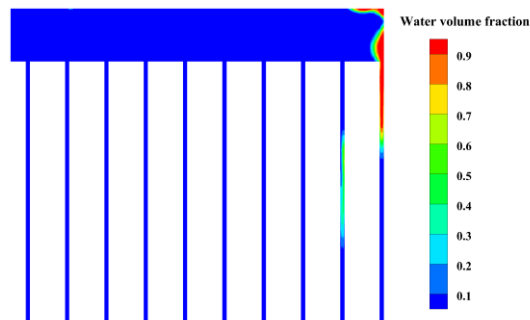
شکل ۹- کانتور کسر حجمی در ثانیه ۱۰/۹

در منیفولد مستطیلی، شعاع قطره تا حدی افزایش می‌یابد تا وزن آن بر نیروی چسبندگی غلبه کرده و قطره از دیوار بالایی منیفولد جدا شود. اما در منیفولد دوزنقه‌ای شعاع قطره رشد کمتری می‌کند، به دلیل اینکه سطح مقطع منیفولد تا ۷۰ درصد کاهش می‌یابد و جریان از فضای کوچک باقی‌مانده بین قطره و سلول‌ها باید وارد سلول انتهایی گردد. افزایش نیروی وارده از جریان گاز به قطره و همچنین کمک نیروی وزن موجب می‌گردد که قطره به آرامی به انتهای منیفولد رسیده و وارد سلول انتهایی گردد (شکل ۱۰).



شکل ۱۰- کانتور کسر حجمی در ثانیه ۱۱

در منیفولد مستطیلی، جدایش قطره آب موجب گردید که آب مایع وارد سلول ۵۱ و ۵۲ گردد اما در منیفولد دوزنقه‌ای، قطره آب به انتهای منیفولد رسیده و پس از برخورد با دیوار انتهایی **توده** فقط وارد سلول ۵۲ می‌گردد. انتگرال رابطه ۲۷ برای سلول ۵۲ در منیفولد دوزنقه‌ای در زمان‌های ۱۱/۱، ۱۵/۱ و ۲۲/۹ ثانیه به ترتیب ۸/۱، ۲/۹۳ و ۴/۴۵ محاسبه شده است. نتایج نشان می‌دهد در منیفولد دوزنقه‌ای شکل، آب مایع به مقدار کمتر اما در فواصل زمانی کوتاه‌تر وارد سلول انتهایی می‌گردد. در شکل ۱۱



شکل ۸- کانتور کسر حجمی در ثانیه ۵۰/۶

برای محاسبه آب مایع موجود در هر سلول از انتگرال زیر برای هر سلول سوختی استفاده می‌کنیم:

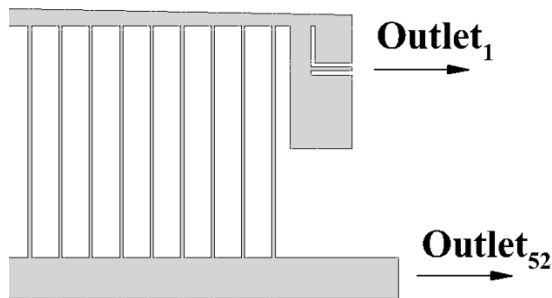
$$m = \int \rho dx dy \quad (27)$$

انتگرال فوق برای سلول ۵۲ در زمان ۵۰/۸ ثانیه برابر با ۲۶/۸۳ و برای سلول ۵۱ در زمان ۵۰/۶ ثانیه برابر با ۵/۱۲ محاسبه شده است. اختلاف ۰/۲ ثانیه در محاسبه انتگرال فوق برای سلول‌های ۵۱ و ۵۲ بدین دلیل می‌باشد که حجم آب ورودی به سلول ۵۲ بیشتر بوده و ۰/۲ ثانیه زمان لازم می‌باشد تا تمام آب مایع وارد کانال گردد.

۵-۳- شبیه‌سازی دوفازی توده با منیفولد دوزنقه‌ای

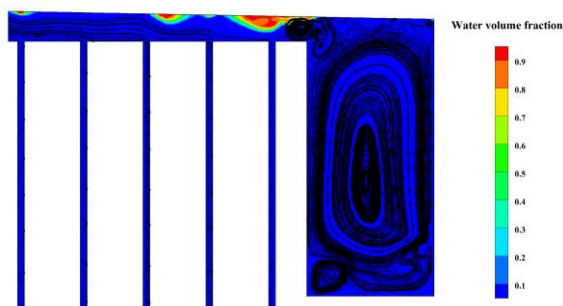
در شبیه‌سازی **تک‌فاز** نشان داده شد که کاهش تدریجی ارتفاع منیفولد می‌تواند باعث بهبود **توزیع** جریان گاز ورودی به سلول‌های **ابتدایی** شده و از بدتوزیعی بکاهد. کاهش ارتفاع منیفولد موجب افزایش سرعت جریان گاز در طول منیفولد و در نتیجه افزایش نیرو بر آب مایع تشکیل شده بر دیوار بالایی منیفولد می‌گردد. همچنین به دلیل شیب ایجاد شده، نیروی وزن نیز به حرکت آب مایع به سمت انتهای منیفولد کمک می‌کند و در نتیجه سرعت تشکیل قطره با شعاع بزرگ‌تر در انتهای منیفولد افزایش می‌یابد. در شکل ۹ کانتور کسر حجمی برای توده با منیفولد دوزنقه‌ای در زمان ۱۰/۹ ثانیه نمایش داده شده است. در منیفولد مستطیلی (H=10 mm) بیش از ۵۰ ثانیه زمان برای تشکیل قطره و جدایش زمان لازم بوده است اما در منیفولد دوزنقه‌ای در حدود ۱۱ ثانیه زمان برای شکل‌گیری قطره با حداکثر شعاع زمان لازم است.

مایع به مقدار مشخصی برسد فرآیند تخلیه آب صورت گیرد و از خروج گاز مورد نیاز برای واکنش‌های شیمیایی سلول‌ها از منیفولد جلوگیری شود.



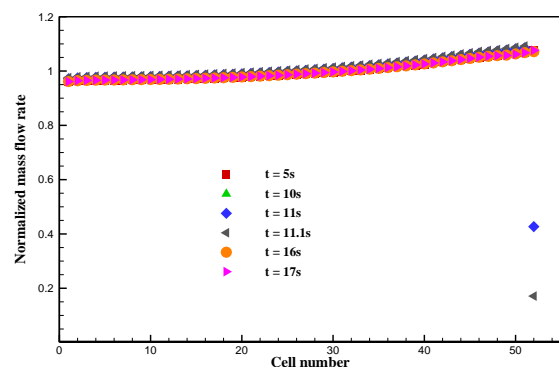
شکل ۱۲- هندسه پیشنهادی برای قسمت انتهایی منیفولد به منظور دفع آب مایع از منیفولد

در ابتدا فرض می‌شود که یک محفظه بسته در انتهای منیفولد تعبیه شود و خروجی با زیرنویس ۱ در شکل ۱۲ وجود نداشته باشد. هدف از طرح پیشنهادی، استفاده از نیروی وزن برای هدایت آب مایع به درون محفظه می‌باشد. در شکل ۱۳ کانتور کسر حجمی آب مایع و خطوط جریان در بخش انتهایی منیفولد پیشنهادی ترسیم شده است. به دلیل بسته بودن فضای محفظه، گردابه‌هایی در محفظه شکل می‌گیرد. همچنین به دلیل انسداد بخش بزرگتری از سطح مقطع منیفولد، قطره آب به صورت مانع عمل کرده و در پشت قطره آب نیز گردابه کوچکی تشکیل شده است. نیروی وارد شده از گردابه‌ی پشت قطره و همچنین نیروی چسبندگی بر نیروی وزن قطره غلبه کرده و مانع حرکت قطره آب به درون محفظه می‌گردد.



شکل ۱۳- خطوط جریان در انتهای منیفولد با محفظه نتایج عددی نشان داد که قطره آب در بالای سلول ۵۲ ساکن باقی می‌ماند. با گذشت زمان و به بهم پیوستن قطرات

دبی جرمی گذرنده از سلول‌های توده با منیفولد دوزنقه‌ای در زمان‌های مختلف ترسیم شده است. در زمان‌هایی که آب مایع وارد سلول انتهایی نشده است، توزیع گاز حالتی ثابت داشته و با زمان تغییر نمی‌کند و مشابه نتایج بدست آمده از حالت تکفاز می‌باشد. اما با ورود آب به سلول انتهایی، دبی گذرنده از سلول آخر کاهش قابل توجهی دارد و به دلیل بقای جرم، دبی گذرنده از بقیه سلول‌ها افزایش ناچیزی می‌یابد.



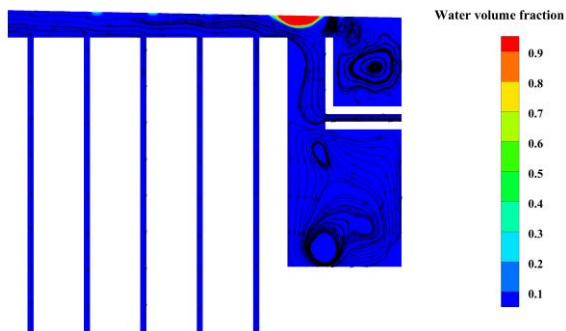
شکل ۱۱- دبی جرمی گذرنده از سلول‌های توده با منیفولد دوزنقه‌ای شکل

ورود آب مایع از منیفولد به سلول‌های یک توده می‌تواند موجب انسداد برخی کانال‌های جریان، کاهش جریان الکتریکی و یا غرق شدن سلول سوختی گردد. به همین جهت در ادامه راهکاری برای خروج آب مایع در منیفولد پیشنهاد می‌گردد.

۵-۴- منیفولد با محفظه جمع‌آوری آب مایع

در شکل ۱۲ هندسه پیشنهادی برای خروج آب مایع از منیفولد ورودی و جلوگیری از ورود آب به سلول انتهایی نمایش داده شده است. فرض می‌شود فضایی در انتهای توده برای جمع‌آوری و تخلیه آب مایع در نظر گرفته شود. این فضا می‌تواند در صفحه نگهدارنده انتهایی و یا جداساز تعبیه گردد. در برخی از توده‌ها، از جداساز متصل به توده برای تفکیک گاز و آب مایع خارج شده از منیفولد خروجی استفاده می‌کنند تا گاز اضافی خروجی از سلول‌ها دوباره مورد استفاده قرار گیرد. می‌توان در قسمت زیرین این محفظه یک شیر برقی قرار داد تا هنگامی که سطح آب

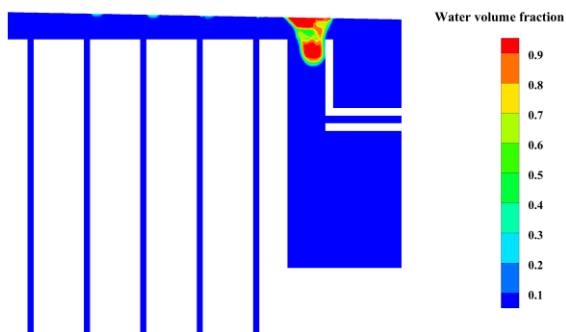
مقایسه با فشار عملکردی سیستم و افت فشار در سلول‌های سوختی قابل صرف نظر کردن می‌باشد. در شکل ۱۵ کانتور کسر حجمی و خطوط جریان در زمان ۱۰ ثانیه برای هندسه پیشنهادی ترسیم شده است. عبور خطوط جریان از زیر قطره آب و نیروی وارد بر آن موجب می‌گردد تا قطره از بالای سلول‌ها عبور کرده و به سمت محفظه حرکت کند.



شکل ۱۵- خطوط جریان در انتهای مینیفولد برای هندسه

نهایی در زمان ۱۰ ثانیه

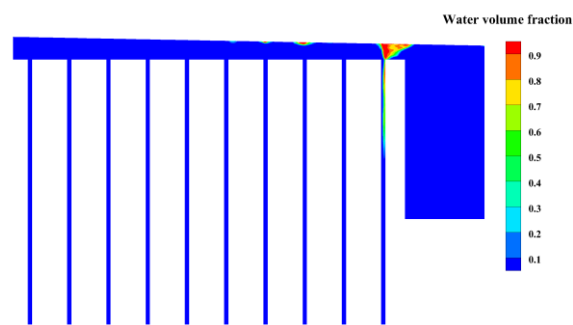
در شکل ۱۶ کانتور کسر حجمی آب مایع در زمان ۱۰/۵ ثانیه نمایش داده شده است. جریان گاز اضافی از خروجی تعبیه شده در بالای محفظه از توده خارج می‌گردد و به دلیل شکل‌گیری گردابه در قسمت انتهایی، قطره آب در بالای محفظه ثابت باقی مانده است. با افزایش شعاع قطره، قطره به ورودی محفظه برخورد می‌کند و باعث جدایش بخشی از قطره و ورود آن به درون محفظه می‌گردد. محل تشکیل قطره در بالای محفظه و محاسبه انتگرال ۲۷ برای سلول ۵۲ بیانگر عدم ورود آب مایع به سلول ۵۲ می‌باشد.



شکل ۱۶- جدایش قطره آب و ورود به محفظه

ادامه شبیه‌سازی نشان داد که با گذشت زمان ۱/۴ ثانیه

کوچک‌تر، شعاع قطره بزرگ‌تر شده تا زمانی که قطره به ورودی سلول برخورد کند و بخشی از آب مایع جدا شده و به سلول ۵۲ وارد شود. در شکل ۱۴ کسر حجمی آب در زمان ۱۰/۶ ثانیه نمایش داده شده است. همان‌گونه که در شکل ۱۴ قابل مشاهده است، هندسه پیشنهادی نتوانست مانع ورود آب مایع به سلول انتهایی گردد. با جدایش بخشی از آب مایع و ورود آن به سلول سوختی، از شعاع قطره کاسته می‌شود. با گذشت زمان و چگالش بخار آب در سطح مینیفولد، شعاع قطره بزرگ‌تر شده و دوباره به سلول انتهایی برخورد کرده و بخشی از آن وارد سلول انتهایی می‌گردد و این روند در فواصل زمانی مختلف تکرار می‌شود.

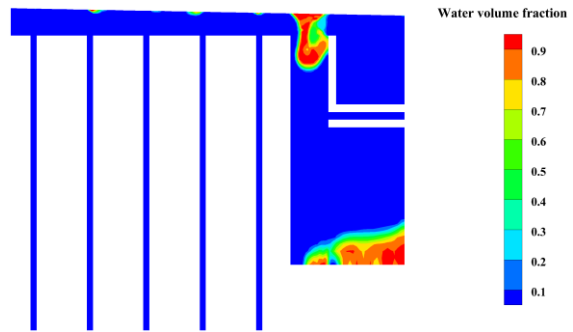


شکل ۱۴- کانتور کسر حجمی در مینیفولد با محفظه در زمان

۱۰/۶ ثانیه

برای جلوگیری از ورود آب مایع به سلول سوختی و هدایت آن به درون محفظه، فرض می‌شود که گاز ورودی به مینیفولد افزایش یابد. در این مقاله فرض می‌شود که گاز ورودی به توده به اندازه یک سلول سوختی افزایش یابد. بدان معنا که گاز مورد نیاز برای ۵۳ سلول سوختی وارد توده گردد. در محفظه یک خروجی تعبیه می‌گردد تا گاز اضافی وارد شده به توده توسط آن تخلیه گردد. با توجه به شکل ۱۲، گاز مورد نیاز برای واکنش ۵۲ سلول از میان کانال‌های جریان سلول‌های سوختی عبور کرده و پس از واکنش از خروجی Outlet₅₂ تخلیه می‌گردد. گاز اضافی که برای یک سلول بوده از خروجی Outlet₁ تخلیه می‌گردد. با توجه به اینکه گاز اضافی از کانال‌های جریان عبور نمی‌کند، فشار در ورودی توده افزایش چندانی ندارد و در

از ورود اولین قطره به درون محفظه، با بهم پیوستن قطرات کوچک در انتهای توده، شعاع قطره تشکیل شده بزرگتر شده و با برخورد با ورودی محفظه به درون آن چکه می کند (شکل ۱۷). فرآیند ورود آب مایع به درون محفظه با گذشت زمان ادامه خواهد داشت و همدسته پیشنهادی می تواند برای دفع آب مایع از درون مینیفولد توده پیل سوختی کاربردی باشد.



شکل ۱۷- ورود قطرات بعدی به محفظه

۶- نتیجه گیری

در این مقاله مینیفولد بخش کاتد یک توده پیل سوختی پلیمری شامل ۵۲ سلول سوختی به صورت تکفاز و دوفازی شبیه سازی شد تا نقش چگالش آب مایع در توزیع جریان گاز میان سلول های سوختی و همچنین راهکار دفع آن از مینیفولد توده بررسی گردد. کانال های جریان یک پیل سوختی در مطالعه قبلی ما [۲۸] شبیه سازی گردید و افت فشار در یک پیل سوختی محاسبه گردیده بود و از مواد متخلخل برای ایجاد افت فشار معادل استفاده گردید. مهم ترین نتایج بدست آمده از این مقاله را می توان به صورت زیر بیان کرد:

- شبیه سازی تکفاز نشان داد که کاهش تدریجی ارتفاع مینیفولد راهکاری مناسب برای بهبود توزیع جریان میان سلول های سوختی یک توده می باشد. با کاهش ۷۰ درصدی ارتفاع مینیفولد با شیب ثابت، ضریب غیریکناختی و انحراف معیار استاندارد به ترتیب $1/4$ و $6/9$ درصد بهبود یافتند.

- شبیه سازی دوفازی نشان داد در صورت استفاده از گاز اشباع، بخشی از بخار آب بر روی دیوار بالایی مینیفولد دچار چگالش می گردد. قطرات بسیار کوچک توسط جریان گاز به سمت انتهای مینیفولد هدایت می گردند. با تجمع قطرات کوچک، قطراتی با شعاع بزرگتر تشکیل می گیرد. در مینیفولد مستطیلی، زمانی که وزن قطره از نیروی چسبندگی بیشتر گردد، قطره از مینیفولد جدا شده و به سلول های سوختی وارد می گردد.

- در مینیفولد دوزنقه ای، افزایش سرعت جریان و مولفه وزن باعث می گردد که سرعت انتقال آب مایع به انتهای مینیفولد افزایش یابد. در مینیفولد دوزنقه ای، آب مایع در فواصل زمانی کوتاه تر و با حجم کم تر وارد سلول انتهایی می گردد.

- ایجاد یک محفظه در انتهای مینیفولد (در جداساز یا صفحه نگهدارنده انتهایی) می تواند محلی برای جمع آوری آب مایع باشد. نتایج عددی در مینیفولد دوزنقه ای نشان داد که آب مایع صرفاً به دلیل وزن خود نمی تواند وارد محفظه گردد. در نتیجه پیشنهاد گردید مقداری به دبی ورودی اضافه گردد. دبی اضافی در ورودی از محفظه تعبیه شده خارج می گردد و افت فشار در مینیفولد تغییرات زیادی نخواهد داشت. عبور جریان اضافی گاز از زیر قطره آب و ورود آن به محفظه موجب می گردد که نیروی لازم برای هدایت قطره به درون محفظه تامین گردد.

ρ	چگالی، kg/m^3
μ	ویسکوزیته، kg/(s.m)
θ	ضریب نفوذپذیری، $1/\text{m}^2$
σ	ضریب کشش سطحی، kg/s^2
κ	انحنای سطح، $1/\text{m}$
زیرنویس	
l	فاز مایع
2	فاز گاز
g	گاز
c	حالت بحرانی
i	گونه‌ای از ترکیب
sat	اشباع
بالانویس	
H_2O	آب

۷- فهرست علائم

A	سطح مقطع، m^2
C_p	گرمای ویژه در فشار ثابت، J/(kg.K)
D	ضریب پخش، $\text{m}^2.\text{s}$
F	مجموع نیروهای حجمی، kg/(s.m)
F_1	پارامتر غیریکنواختی جریان
g	شتاب گرانش، m/s^2
h	ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی، $\text{W/(m}^2.\text{K)}$
H_{fg}	گرمای نهان تبخیر، J/kg
K	ضریب هدایت حرارتی، W/(m.K)
k_{cond}	ضریب نرخ تقطیر، $1/\text{s}$
k_{evap}	ضریب نرخ تبخیر، $1/(\text{Pa.s})$
M	جرم مولکولی، kg.mol
\dot{m}	نرخ تغییر فاز، kg/(m.s)
m_2	ضریب مقاومت اینرسی، $1/\text{m}$
P	فشار، Pa
\bar{R}	ثابت جهانی گازها، J/(K.mol)
T	دما، K
t	زمان، s
U	بردار سرعت، m/s
x	کسر مولی هر جزء از ترکیب
y	کسر جرمی هر جزء از ترکیب
علائم یونانی	
α	کسر حجمی

۸- مراجع

- [1] Barbir, F., "PEM Fuel Cells", Elsevier. Inc., California, pp. 1–16, (2013).
- [2] Mench, M. M., "Introduction to Fuel Cells. Fuel Cell Engines, Hoboken", John Wiley & Sons. Inc., New Jersey, pp. 1–28, (2008).
- [3] Yu, X., Zhang, C., Fan, M., Deng, B., Huang, C., Xu, J., and et al. "Experimental study of dynamic performance of defective cell within a PEMFC stack", International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 47, pp. 8480–91, (2022).
- [4] Wang, J., Yan, J., Yuan, J., and Sundén, B., "On Flow Maldistribution in PEMFC Stacks", International Journal of Green Energy, Vol 8, pp.585–606, (2011).
- [5] Rashidi, S., Karimi, N., Sundén, B., Kim, K. C., Olabi, A. G., and Mahian, O., "Progress and challenges on the thermal management of electrochemical energy conversion and storage technologies: Fuel cells, electrolyzers, and supercapacitors", Progress in Energy and Combustion Science, Vol. 88, pp. 966-1011, (2022).
- [6] Guo, H., Zhao, Q., and Ye, F., "An experimental study on gas and liquid two-phase flow in orientated-type flow channels of proton exchange membrane fuel cells by using a side-view method", Renewable Energy, Vol. 188, pp. 603–18, (2022).

- [7] Huang, H., Liu, M., Li, X., Guo, X., Wang, T., Li, S., and et al., "Numerical simulation and visualization study of a new tapered-slope serpentine flow field in proton exchange membrane fuel cell". *Energy*, Vol. 246, 123406, (2022).
- [8] Kim, S.Y., and Kim, W.N., "Effect of cathode inlet manifold configuration on performance of 10-cell proton-exchange membrane fuel cell", *Journal of Power Sources*, Vol. 166, pp. 430-434, (2007).
- [9] Lebæk J., Bang M., Kær S.K., "Flow and Pressure Distribution in Fuel Cell Manifolds", *Journal of Fuel Cell Science and Technology*, Vol. 7, (2010).
- [10] Sajid, H. M., Shabani, B., and Cheung, C.P., "Enhanced gas flow uniformity across parallel channel cathode flow field of Proton Exchange Membrane fuel cells", *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 42, pp. 5272-5283, (2017).
- [11] Koh, J. H., Seo, H. K., Lee, C. G., Yoo, Y. S., and Lim, H. C., "Pressure and flow distribution in internal gas manifolds of a fuel-cell stack", *Journal of Power Sources*, Vol. 115, pp. 54-65, (2003).
- [12] Park, J., and Li, X., "Effect of flow and temperature distribution on the performance of a PEM fuel cell stack", *Journal of Power Sources*, Vol. 162, pp. 444-459, (2006).
- [13] Karimi, G., Baschuk, J. J., and Li, X., "Performance analysis and optimization of PEM fuel cell stacks using flow network approach", *Journal of Power Sources*, Vol. 147, pp. 162-177, (2005).
- [14] Qin, Y., Liu, G., Chang, Y., and Du, Q., "Modeling and design of PEM fuel cell stack based on a flow network method", *Applied Thermal Engineering*, Vol. 144, pp. 411-423, (2018).
- [15] Mustata, R., Valiño, L., Barreras, F., Gil, M. I., and Lozano, A., "Study of the distribution of air flow in a proton exchange membrane fuel cell stack", *Journal of Power Sources*, Vol. 192, pp. 185-189, (2009).
- [16] Chen, C. H., Jung, S. P., and Yen, S. C., "Flow distribution in the manifold of PEM fuel cell stack", *Journal of Power Sources*, Vol. 173, pp. 249-263, (2007).
- [17] Su, G., Yang, D., Xiao, Q., Dai, H., and Zhang C., "Effects of vortexes in feed header on air flow distribution of PEMFC stack: CFD simulation and optimization for better uniformity", *Renewable Energy*, Vol. 173, pp. 498-506, (2021).
- [18] Jackson, J. M., Hupert, M. L., and Soper, S. A., "Discrete geometry optimization for reducing flow non-uniformity, asymmetry, and parasitic minor loss pressure drops in Z-type configurations of fuel cells", *Journal of Power Sources*, Vol. 269, pp. 274-283, (2014).
- [19] Lim, B. H., Majlan, E. H., Daud, W. R. W., Rosli, M. I., and Husaini, T., "Numerical analysis of flow distribution behavior in a proton exchange membrane fuel cell", *Heliyon*, Vol. 4, pp. 845-856, (2018).
- [20] Tsukamoto, T., Aoki, T., Kanesaka, H., Taniguchi, T., Takayama, T., Motegi, H., and et al., "Three-dimensional numerical simulation of full-scale proton exchange membrane fuel cells at high current densities", *Journal of Power Sources*, Vol. 488, pp. 229412, (2021).
- [21] Chen, X., Fang, Y., Liu, Q., He, L., Zhao, Y., Huang, T., and et al., "Temperature and voltage dynamic control of PEMFC Stack using MPC method", *Energy Reports*, Vol. 8, pp. 798-808, (2022).
- [22] Yan, W. M., Lee, C. Y., Li C-H, Li, W. K., and Rashidi, S., "Study on heat and mass transfer of a planar membrane humidifier for PEM fuel cell", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 152, pp. 1195388, (2020).
- [23] Wilberforce, T., Ijaodola, O., Khatib, F.N., Ogungbemi, E.O., El-Hassan, Z., Thompson, J., and et al., "Effect of humidification of reactive gases on the performance of a proton exchange membrane fuel cell". *Science of The Total Environment*, Vol. 688, pp. 1016-1035, (2019).
- [24] Lebæk, J., Andreasen, M. B., Andresen, H. A., Bang, M., and Kær, S. K., "Particle Image Velocimetry and Computational Fluid Dynamics Analysis of Fuel Cell Manifold", *Journal of Fuel Cell Science and Technology*, Vol. 7, pp. 31001-310011, (2010).
- [25] Chen, W. H., Tsai, Z. L., Chang, M. H., You, S., and Kuo, P. C., "Geometry optimization and pressure analysis of a proton exchange membrane fuel cell stack", *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 46, pp. 16717-16733, (2021).
- [26] Huang, F., Qiu, D., Lan, S., Yi, P., and Peng, L., "Performance evaluation of commercial-size proton exchange membrane fuel cell stacks considering air flow distribution in the manifold", *Energy Conversion and Management*, Vol. 203, pp. 112256, (2020).
- [27] Brackbill, J., Kothe, D., and Zemach, C., A continuum method for modeling surface tension. *Journal of Computational Physics*, Vol. 100, pp. 335-354, (1992).
- [28] Sangtabi, A. R., Kianifar, A., and Alizadeh, E., "Effect of water vapor condensation on the flow distribution in a PEM fuel cell stack", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 151, pp.

- 119471, (2020).
- [29] Ryu, J. B., Jung, C. Y., Yi, S. C., "Three-dimensional simulation of humid-air dryer using computational fluid dynamics". *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, Vol. 19, pp. 1092-1098, (2013).
 - [30] Famileh, I. Z., Esfahani, J. A., and Vafai, K., "Effect of nanoparticles on condensation of humid air in vertical channels", *International Journal of Thermal Sciences*, Vol. 112, pp. 470-483, (2017).
 - [31] Jithesh, P. K., Bansode, A. S., Sundararajan, T., and Das S. K., "The effect of flow distributors on the liquid water distribution and performance of a PEM fuel cell", *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 37, pp. 17158-17171, (2012).
 - [32] Hirt, C., and Nichols, B., "Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries", *Journal of Computational Physics*, Vol. 39, pp. 201-225, (1981).
 - [33] Samkhaniani, N., and Ansari, M. R., "Numerical simulation of bubble condensation using CF-VOF", *Progress in Nuclear Energy*, Vol. 89, pp. 120-131, (2016).
 - [34] Marschall, H., Hinterberger, K., Schüler, C., Habla, F., and Hinrichsen, O., "Numerical simulation of species transfer across fluid interfaces in free-surface flows using OpenFOAM", *Chemical Engineering Science*, Vol. 78, pp. 111-127, (2012).
 - [35] Moran, M. J., Shapiro, H. N., Boettner, D. D., and Bailey, M. B., "Fundamentals of Engineering Thermodynamics", John Wiley & Sons, Inc, New Jersey, (2014).
 - [36] Borgnakke, C., and Sonntag, R. E. "Fundamentals of Thermodynamics", John Wiley & Sons, Inc, New Jersey, (2009).
 - [37] Ding, Y., Bi, H. T., and Wilkinson, D. P., "Three dimensional numerical simulation of gas–liquid two-phase flow patterns in a polymer–electrolyte membrane fuel cells gas flow channel", *Journal of Power Sources*, Vol. 196, pp. 6284-6292, (2011).
 - [38] Kim, J. H., Kim, W. T., "Numerical Investigation of Gas-Liquid Two-Phase Flow inside PEMFC Gas Channels with Rectangular and Trapezoidal Cross Sections", *Energies*, Vol. 11, pp. 1403, (2018).
 - [39] Maharudrayya, S., Jayanti, S., and Deshpande, A. P. "Flow distribution and pressure drop in parallel-channel configurations of planar fuel cells", *Journal of Power Sources*, Vol. 144, pp. 94-106, (2005).