



نقش تغییر فاز در توزیع جریان در منی فولد استک پیل سوختی

احمد رضایی سنگتایی^۱، علی کیانی فر^{۱*}، ابراهیم علیزاده^۲، مظاهر رحیمی^۲، سید حسین مسروری سعادت^۲

^۱ دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران.

^۲ آزمایشگاه تحقیقاتی فناوری پیل سوختی، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، فریدونکنار، ایران.

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۷/۰۷/۲۳

بازنگری: ۱۳۹۷/۰۹/۲۵

پذیرش: ۱۳۹۷/۱۲/۲۰

ارائه آنلاین: ۱۳۹۸/۰۱/۲۱

کلمات کلیدی:

جریان دوفازی

تغییر فاز

استک پیل سوختی

توزیع جریان

کسر حجمی

خلاصه: در این مقاله از دینامیک سیالات محاسباتی برای بررسی تاثیر تغییر فاز بخار آب در توزیع جریان گاز اکسیژن در بخش کاتد یک استک پیل سوختی پلیمری با ۲۶ سلول استفاده شده است. به همین منظور، کدی در نرم افزار اپن فوم توسعه داده شده و با استفاده از داده های آزمایشگاهی برای توزیع جریان تک فاز اعتبارسنجی شده است. سه شرط مرزی متفاوت به دیوار منی فولد اعمال شده است: دما ثابت، انتقال حرارت جابه جایی آزاد و اجباری. نتایج نشان می دهد که آب تولیدی از چگالش بر روی دیوار پایین منی فولد ورودی، وارد سلول اول می شود. همچنین تجمع آب در این منطقه باعث کاهش سرعت جریان در ناحیه ورودی سلول اول می گردد. بخار آب چگالیده شده بر روی دیوار بالایی منی فولد ورودی به سمت انتهای استک حرکت می کند. بخشی از آب وارد چهار سلول انتهایی شده و بخشی دیگر به دلیل گرذابه بوجود آمده در انتهای استک به درون منی فولد بازمی گردد. بنابراین سلول اول و چهار سلول آخر مقدار کمتری واکنش دهنده دریافت می کنند. پارامتر توزیع غیر یکنواخت جریان در حالت استفاده از اکسیژن اشباع و تحت شرایط جابه جایی اجباری ۱۴۲۵ درصد افزایش می یابد.

۱- مقدمه

گرمای ناشی از واکنش سوخت و اکسیدکننده در موتورهای گرمایی، توسط چندین فرآیند مکانیکی به صورت کار مفید در دسترس قرار می گیرد. اما در پیل سوختی، آنتالپی واکنش به وسیله فرآیند اکسیداسیون به طور مستقیم به جریان الکتریکی تبدیل می شود. تبدیل مستقیم انرژی و عدم استفاده از عضو متحرک باعث افزایش بازده پیل های سوختی نسبت به موتورهای گرمایی شده است [۱]. در میان انواع پیل های سوختی، پیل سوختی پلیمری به دلیل داشتن چگالی توان بالا، الکترولیت جامد، دمای کارکرد پایین و قابلیت حمل دارای اهمیت فراوان بوده و می تواند جایگزینی برای موتورهای احتراق داخلی باشد.

یک سلول تنهای پیل سوختی، ولتاژی در محدوده ۱-۰/۶ ولت تولید می کند. برای دستیابی به ولتاژی کاربردی چندین سلول به صورت سری بهم متصل می شوند و یک استک پیل سوختی را ایجاد می کنند.

* نویسنده عهده دار مکاتبات: a-kiani@um.ac.ir

گازهای واکنش دهنده (سوخت و اکسیدکننده) بوسیله منی فولدهای ورودی استک و کانال های تعبیه شده در صفحات الکتروود هر سلول سوختی، به سلول ها تزریق می شود. منی فولد استک و کانال های جریان یک شبکه جریان پیچیده را تشکیل می دهند. بعد از اینکه سوخت و اکسیدکننده از درون هر سلول عبور می کنند، دو منی فولد خروجی گازهای استفاده شده و آب تولیدی در سلول های سوختی را جمع آوری می کنند. جریان اصلی گاز در منی فولد به جریان های کوچک تر تقسیم شده و سلول ها را تغذیه می کند. یک پیش شرط برای داشتن پیل سوختی کارآمد، توزیع یکسان واکنش دهنده ها در هر سلول از استک است. می توان استدلال نمود که توزیع جریان درون منی فولد استک از اهمیت بالاتری نسبت به توزیع جریان در هر سلول برخوردار است [۲]. طراحی منی فولد تاثیر بسزایی در توزیع جریان در تک تک سلول های سوختی دارد. در استک، واکنش دهنده ها به طور یکسان از منی فولد به درون سلول ها توزیع نمی شوند و با افزایش تعداد



سلول‌ها، بدتوزیعی^۱ شدیدتر خواهد شد. به دلیل این‌که تمام سلول‌ها در استک از نظر الکتریکی به صورت سری بهم متصل هستند، قابلیت اطمینان به استک وابسته به عملکرد صحیح تمام سلول‌ها می‌باشد. یکی از تاثیرات مخرب بدتوزیعی، آبگرفتگی یا خشکی غشا است که باعث کاهش پتانسیل سلول می‌شود.

به دلیل پیچیدگی مسئله بدتوزیعی جریان در استک و همچنین نبود تکنیک‌های آزمایشگاهی برای اندازه‌گیری توزیع جریان لحظه‌ای، مطالعات زیادی در مورد بدتوزیعی جریان در پیل سوختی وجود ندارد. در تحقیقات انجام شده در این زمینه، محققان روش‌های مختلفی برای مطالعه بدتوزیعی جریان در استک به کار گرفتند و نتایج بدست آمده مختص شرایط مورد آزمایش بوده و در مواردی متناقض هستند. که و همکاران [۳] با استفاده از قانون داری [۴] به آنالیز تحلیلی توزیع فشار و جریان درون منیفولد استکی شامل ۱۰۰ سلول سوختی پرداختند. آن‌ها دریافتند که افزایش عدد رینولدز جریان می‌تواند بدتوزیعی را در استک افزایش دهد. مقایسه توزیع جریان در منیفولد کاتد و آند نشان داد که بدتوزیعی جریان در منیفولد کاتد شدیدتر از منیفولد آند است، مخصوصاً زمانی که از هوا به عنوان اکسیدکننده استفاده شود. باسچوک و لی [۵] از آنالیز شبکه هیدرولیکی برای بررسی عملکرد استک پیل سوختی پلیمری با ۵۰ سلول استفاده کردند. مقایسه ولتاژ خروجی از تک سلول سوختی با مجموعه‌ای از سلول‌های متصل در استک نشان داد که ولتاژ خروجی از سلول هنگامی که به صورت منفرد مورد استفاده قرار گیرد از میانگین ولتاژ خروجی هر سلول استک بیشتر است. این اختلاف هنگام استفاده از هوا و سوختی غیر از هیدروژن خالص افزایش یافت. آن‌ها برای توزیع یکنواخت‌تر جریان در استک پیشنهاد دادند که سایز منیفولد و تعداد کانال‌های جریان در صفحات دو قطبی به ترتیب افزایش و کاهش یابد. تاثیر توزیع جریان سیال و دما بر عملکرد استک پیل سوختی پلیمری با ۶۱ سلول توسط پارک و لی [۶] و با استفاده از مدل شبکه جریان مورد مطالعه قرار گرفت. آن‌ها بیان کردند برای داشتن توزیع ولتاژ مطلوب در میان سلول‌های استک، می‌توان از منیفولدی با ابعاد بزرگ‌تر و کانال‌های جریان با قطر کوچکتر استفاده کرد.

چن و همکاران [۷] توزیع فشار و جریان درون استک منیفولد پیل سوختی با ۷۲ سلول را به صورت دوبعدی و با استفاده از دینامیک

سیالات محاسباتی شبیه‌سازی کردند. آن‌ها برای ساده‌سازی مسئله، واکنش‌های شیمیایی و انتقال جرم و حرارت را نادیده گرفتند و از محیط متخلخل برای ایجاد افت فشار در صفحات دو قطبی استفاده کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که افزایش عرض منیفولد و مقاومت کانال‌ها و کاهش نرخ دبی جرمی می‌تواند توزیع جریان را یکنواخت‌تر کند. حسین و همکاران [۸] با استفاده از روابط تحلیلی بیان شده توسط ماهارودرایا و همکاران [۹] نشان دادند که حدود ۸۰ درصد جریان کلی گاز از ۲۰ درصد کانال‌های انتهایی استک می‌گذرد. سپس با استفاده از نرم‌افزار فلونت به شبیه‌سازی دوبعدی جریان هوای درون استکی با ۳۳ سلول پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد که سرعت زیاد جریان در لحظه ورود به منیفولد باعث هدایت جریان به قسمت انتهایی استک می‌گردد. آن‌ها برای توزیع بهتر جریان بین سلول‌ها پیشنهاد دادند که جریان جمع‌آوری شده در منیفولد خروجی از مرکز استک خارج گردد. آنالیز انجام شده توسط ایتو و همکاران [۱۰] نشان داد که ضریب اصطکاک کانال سلول‌ها می‌تواند بدتوزیعی جریان را به شدت تحت تاثیر قرار دهد به‌خصوص زمانی که رژیم جریان از حالت آرام به آشسته تغییر کند. آن‌ها اشاره کردند صفحات دو قطبی با تعداد کمتر کانال جریان می‌تواند بدتوزیعی و نرخ چگالش آب در سلول‌ها را بهبود بخشد.

استک پیل‌های سوختی پلیمری معمولاً از یک منیفولد مستطیل شکل استفاده می‌کند که دارای ورودی دایروی به منظور اتصال لوله جریان گاز می‌باشد. لیبیک و همکاران [۲] به صورت تجربی، تاثیر هندسه ورودی جریان بر توزیع همگن هوا در استکی با ۷۰ سلول را مورد مطالعه قرار دادند. آن‌ها بیان کردند که گذر جریان از هندسه دایروی به مستطیلی باید به آرامی صورت بگیرد، در غیر این صورت یک توزیع جریان غیریکنواخت در سلول‌ها اتفاق می‌افتد. آن‌ها پیشنهاد دادند از یک پخش‌کننده^۲ جریان در ورودی استک استفاده شود. انبومیناکشی و تانسخار [۱۱] به صورت تجربی به بررسی ورود جریان به منیفولد به صورت موازی یا عمود بر منیفولد پرداختند. نتایج نشان داد برخلاف ورود جریان به صورت موازی با استک که باعث بوجود آمدن جت جریان درون استک می‌گردد، اگر جریان به صورت عمود وارد منیفولد شود به دیواره منیفولد برخورد می‌کند و از تکانه آن کم خواهد شد و توزیع بهتری از جریان در استک پدید می‌آید. لیبیک و

2 Diffuser

1 Maldistribution

بررسی جریان در کانال‌های صفحات دوقطبی یک سلول بررسی شده است. به دلیل هزینه بالای طراحی، ساخت و نگهداری یک استک پیل سوختی و طول عمر بالای آن، هر عاملی که باعث بهبود یا تخریب هرچند جزئی در عملکرد کلی استک شود از اهمیت برخوردار است. در تحقیقات صورت گرفته تاکنون به دلیل کاهش زمان و هزینه محاسبات، جریان سیال در منیفرول استک به صورت تک‌فاز و تک‌دما شبیه‌سازی شده که با آنچه در استک پیل سوختی رخ می‌دهد متفاوت است. در این مقاله برای اولین بار جریان درون منیفرول به صورت دوفازی شبیه‌سازی شده و نقش تغییر فاز بخار آب موجود در گازهای واکنش‌دهنده در توزیع جریان گاز در منیفرول استک پیل سوختی پلیمری مورد بررسی قرار گرفته است. تغییر فاز و ورود آب تولیدی به برخی از سلول‌ها می‌تواند باعث کاهش ورود گاز واکنش‌دهنده به سلول گردد و با کاهش ولتاژ یک سلول، راندمان کلی استک را کاهش دهد. همچنین در موارد بحرانی، با افزایش ورود آب به سلول می‌تواند باعث انسداد و غرق‌شدگی سلول شود. به همین منظور کدی در نرم‌افزار اپن‌فوم^۱ برای شبیه‌سازی جریان دوفازی با مدل تغییر فاز مناسب توسعه یافته و با داده‌های آزمایشگاهی مقایسه شده است. با توجه به وابستگی فشار بخار آب به دما، تغییرات دما می‌تواند نقش کلیدی در چگالش بخار آب موجود در گازهای واکنش‌دهنده داشته باشد. به همین دلیل سه شرط مرزی دما ثابت، انتقال حرارت جابه‌جایی آزاد و اجباری بر سطح منیفرول اعمال شده و تاثیر تغییر فاز بر میزان بدتوزیعی مورد مطالعه گرفته است.

۲- معادلات و روابط حاکم

معادلات حاکم برای شبیه‌سازی جریان دوفازی در منیفرول استک پیل سوختی پلیمری شامل معادلات پیوستگی، اندازه حرکت، انرژی، کسر جرمی و بقای گونه‌ها می‌باشد. در این مطالعه از مدل جریان دوفاز همگن برای شبیه‌سازی استفاده شده است و در نتیجه سرعت فازهای گاز و مایع با هم برابر است. همچنین از واکنش‌های شیمیایی انجام شده در سلول‌ها صرف‌نظر شده است و تغییر فاز ناشی از تغییرات دما و فشار درون منیفرول می‌باشد.

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

همکاران [۱۲] به صورت عددی توزیع جریان در استکی با ۷۰ سلول را شبیه‌سازی کردند. آن‌ها از مدل‌های آشفتگی متفاوت استفاده کرده و نتایج حاصل از شبیه‌سازی با دقت مرتبه اول و دوم را با داده‌های تجربی مقایسه کردند. مقایسه نتایج شبیه‌سازی و تجربی نشان داد که حل با دقت مرتبه اول نتایج نزدیک‌تری به داده‌های آزمایشگاهی دارد. در مطالعه آن‌ها، شبیه‌سازی حالت دائم حتی با ضرایب تخفیف بسیار پایین نیز همگرا نشد که دلیل آن را ماهیت گذرا و آشفتگی جریان بیان کردند. روداتر و همکاران [۱۳] مطالعات تجربی بر روی یک پیل سوختی پلیمری با توان ۶ کیلووات و تعداد ۱۰۰ سلول انجام دادند. آن‌ها توزیع غیریکنواخت جریان واکنش‌دهنده‌ها، توزیع غیریکنواخت دما در استک و تفرانس فرآیند ساخت سلول را از عوامل مهم در غیرهمسان بودن ولتاژ سلول‌های یک استک عنوان کردند. دانگ و همکاران [۱۴] برای توزیع یکسان جریان در بین سلول‌ها، طراحی جدیدی برای منیفرول براساس کانال‌های چندمرحله‌ای معرفی کردند. در طراحی آن‌ها، قطر هیدرولیک هر مرحله براساس کمینه کردن تولید آنتروپی محاسبه گردید. روش آن‌ها فقط برای استک‌هایی با ۱۶، ۳۲، ۶۴ و ... سلول کاربرد داشت که استفاده از آن را با محدودیت‌هایی مواجه می‌سازد. جریان دوفازی در یک سلول منفرد پیل سوختی پلیمری توسط محققان بسیاری شبیه‌سازی شده است [۱۵-۱۷]. هدف این تحقیقات بررسی برهم‌کنش فازهای مایع و گاز، چگونگی تخلیه آب از کانال‌های جریان، توزیع جریان الکتریکی و دما در سطح سلول و ... بوده است. به دلیل سرعت پایین گاز در کانال‌های آند پیل سوختی، تخلیه آب از کانال‌های آند نسبت به کاتد با دشواری بیشتر همراه است. در نتیجه در شبیه‌سازی جریان دوفازی و به‌ویژه بررسی چگونگی تخلیه آب از کانال‌های یک سلول سوختی، معمولاً از کانال‌های آند استفاده می‌شود [۱۸]. درحالی‌که در شبیه‌سازی بدتوزیعی جریان در منیفرول یک استک پیل سوختی، منیفرول کاتد به دلیل شدت بدتوزیعی معمولاً مورد مطالعه قرار می‌گیرد. در مطالعات تحلیلی صورت گرفته فرضیاتی نظیر یک‌بعدی بودن جریان، نبود انتقال حرارت، ثابت ماندن خواص گاز و استفاده از تقریب‌هایی برای معادل‌سازی جریان در کانال‌های صفحات دوقطبی باعث نتایج نه چندان دقیق این مطالعات شده است. در تحقیقات انجام شده بوسیله دینامیک سیالات محاسباتی نیز جریان سیال در منیفرول به صورت تک‌فاز شبیه‌سازی شده و نقش تغییر فاز فقط در

معادله انرژی برای تعیین توزیع دما در منی فولد و محاسبه فشار اشباع به صورت رابطه (۸) خواهد بود:

$$\frac{\partial(\rho C_p T)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho C_p U T) = \nabla \cdot (K \nabla T) + \dot{m} H_{fg} \quad (8)$$

در رابطه بالا C_p ، T ، K ، \square و H_{fg} به ترتیب ظرفیت گرمایی، دما، ضریب هدایت حرارتی، جرم تغییر فاز داده شده و گرمای نهان آب می‌باشند. ظرفیت گرمایی و ضریب هدایت حرارتی با استفاده از روابط (۹) و (۱۰) تعیین می‌گردد:

$$\rho C_p = \rho_1 C_{p1} \alpha_1 + \rho_2 C_{p2} \alpha_2 \quad (9)$$

$$K = K_1 \alpha_1 + K_2 \alpha_2 \quad (10)$$

گرمای نهان آب نیز با رابطه زیر تخمین زده خواهد شد [۲۰]:

$$H_{fg} = 307090(647.15 - T)^{0.35549} \quad (11)$$

مقدار آب تغییر فاز دهنده در فرآیندهای چگالش و تبخیر از رابطه (۱۲) بدست می‌آید:

$$\dot{m} = \begin{cases} k_{cond} (1 - \alpha_1) \frac{M_g^{H_2O}}{RT} P (x_g^{H_2O} - x_{sat}^{H_2O}) & x_g^{H_2O} \geq x_{sat}^{H_2O} \\ k_{evap} \alpha_1 \rho_1 P (x_g^{H_2O} - x_{sat}^{H_2O}) & x_g^{H_2O} < x_{sat}^{H_2O} \end{cases} \quad (12)$$

در رابطه فوق k_{cond} و k_{evap} ضرایب چگالش و تبخیر می‌باشند. معادله بقای گونه‌ها به صورت رابطه (۱۳) است:

$$\frac{\partial(\rho y_i)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U y_i) = \nabla \cdot (\rho D_i \nabla y_i) - S_i \quad (13)$$

در رابطه بالا y_i کسر جرمی گونه و D_i ضریب نفوذ گونه i ام در مخلوط گازها می‌باشد. در صورت حل معادله کسر جرمی برای بخار آب، عبارت چشمه برابر با جرم تغییر فاز داده شده می‌باشد. ضریب نفوذ برای مخلوط اکسیژن و بخار آب از رابطه (۱۴) بدست آمده است:

$$\rho = \alpha_1 \rho_1 + \alpha_2 \rho_2 \quad (2)$$

در تمامی روابط زیر نویس ۱ نشان‌دهنده فاز مایع و زیر نویس ۲ نشان‌دهنده فاز گاز است. در روابط (۱) و (۲) ρ و α به ترتیب بیانگر چگالی و کسر حجمی می‌باشند. معادله اندازه حرکت شامل عباراتی برای در نظر گرفتن نیروی گرانش، کشش سطحی و محیط متخلخل است.

$$\frac{\partial(\rho U)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U U) = -\nabla P + \rho g + \nabla \cdot (\mu(\nabla U + (\nabla U)^T)) + F \quad (3)$$

در رابطه (۳) F بیانگر مجموع نیروهای حجمی می‌باشد. یکی از نیروهای حجمی، نیروی کشش سطحی است که برای بدست آوردن آن از مدل نیروی سطحی پیوسته^۱ [۱۹] استفاده شده است:

$$f = \sigma \kappa \nabla \alpha_1 \quad (4)$$

که در آن σ ضریب کشش سطحی و κ انحنای سطح می‌باشد. انحنای سطح از رابطه (۵) بدست خواهد آمد:

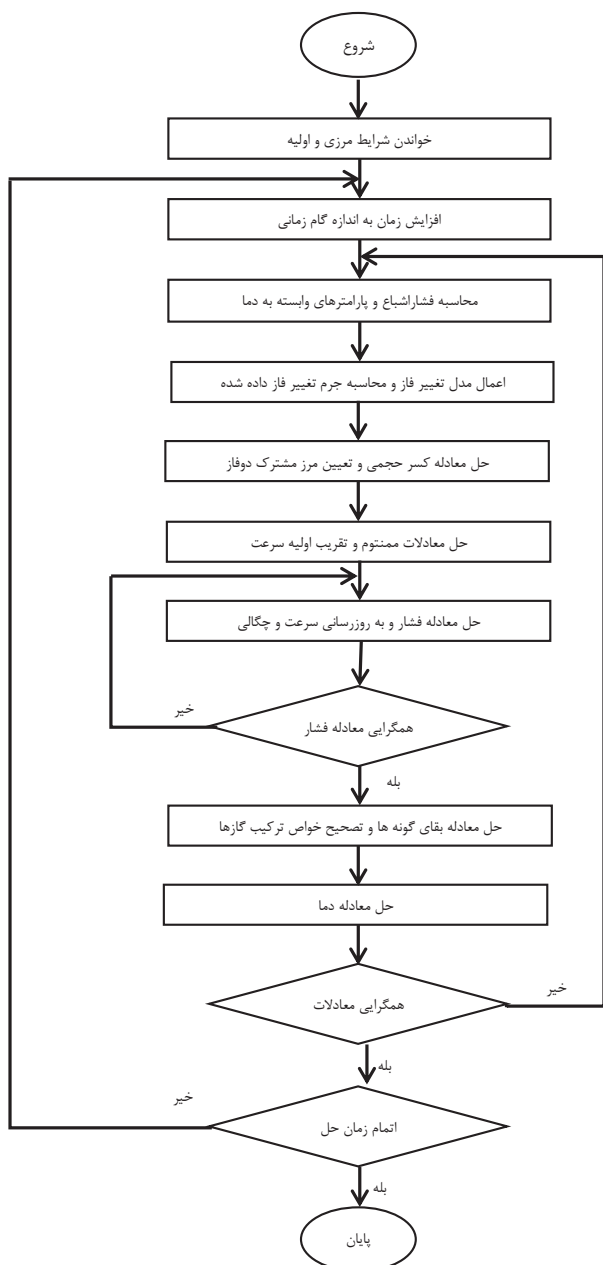
$$\kappa = -\nabla \cdot \left(\frac{\nabla \alpha_1}{|\nabla \alpha_1|} \right) \quad (5)$$

به منظور معادل‌سازی افت فشار در کانال‌های جریان، از محیط متخلخل استفاده می‌گردد. محیط متخلخل به صورت عبارت چشمه در معادله مومنتوم ظاهر شده است:

$$s = -\left(\frac{\mu}{g} U + \frac{1}{2} m_2 \rho U |U| \right) \quad (6)$$

در رابطه (۶) مقادیر θ و m_2 به ترتیب برابر 5×10^{-9} و صفر قرار داده شده است. فشار اشباع آب موجود در اکسیژن تابعی از دما بوده و تغییرات اندک دما نقشی موثر در چگالش یا تبخیر آب خواهد داشت. فشار اشباع آب برای محدوده دمایی ۲۷۳ تا ۳۷۳ کلون از جداول ترمودینامیک و با استفاده از رابطه (۷) تخمین زده می‌شود [۲۰]:

$$P_{sat} = -2846.4 + 411.24(T - 273.15) - 10.554(T - 273.15)^2 + 0.166636(T - 273.15)^3 \quad (7)$$



شکل ۱: فلوچارت فرآیند شبیه‌سازی

Fig. 1. Flow chart of the simulation process

در شکل ۲ نمایش داده شده است. همانطور که مشخص است نزدیک دیوار و سلول‌های شبکه تراکم بیشتری دارد. فضای محاسباتی به صورت دوبعدی و شامل منیفولد ورودی و خروجی و ۲۶ سلول سوختی است. عرض هر کانال جریان و فاصله هر سلول تا سلول بعدی به ترتیب ۰/۸ و ۲/۵۶ میلی‌متر می‌باشند. به دلیل فراهم نمودن شرایط جریان کاملاً توسعه‌یافته و عدم جریان برگشتی در منیفولد

$$D_i = \frac{a}{P} \left(\frac{T}{T_{c,1} T_{c,2}} \right)^b (P_{c,1} P_{c,2})^{1/3} (T_{c,1} T_{c,2})^{5/12} \left(\frac{1}{M_1} + \frac{1}{M_2} \right)^{1/2} \quad (14)$$

ضرایب a و b برای بخار آب ۰/۰۰۰۳۶۴ و ۲/۳۳۴ و برای اکسیژن ۰/۰۰۰۲۷۴۵ و ۱/۸۳۲ می‌باشند [۱]. اگر در معادله بالا کسر جرمی بخار آب مورد استفاده قرار گیرد، عبارت چشمه معادل جرم تغییر فاز به دهنده است. معادله کسر حجمی با در نظر گرفتن فرآیند تغییر فاز به صورت زیر است [۲۱]:

$$\frac{\partial \alpha_1}{\partial t} + \nabla \cdot (U \alpha_1) + \nabla \cdot (U_r \alpha_1 (1 - \alpha_1)) = -\dot{m} \left(\frac{1}{\rho_1} - \alpha_1 \left(\frac{1}{\rho_1} - \frac{1}{\rho_2} \right) \right) \quad (15)$$

در رابطه فوق U_r سرعت فشرده‌گی نام دارد و در ناحیه سطح مشترک دوفاز و در جهت عمود بر آن تعریف می‌گردد تا از انتشار عددی جلوگیری کند [۲۱]. چگالی، جرم مولکولی، کسر مولی و ظرفیت گرمایی گاز ورودی با روابط ترکیب گازها محاسبه می‌شود (روابط (۱۶) تا (۱۹)):

$$\rho_2 = \frac{PM_2}{RT} \quad (16)$$

$$M_2 = \left(\sum_i \frac{y_i^g}{M_i^g} \right)^{-1} \quad (17)$$

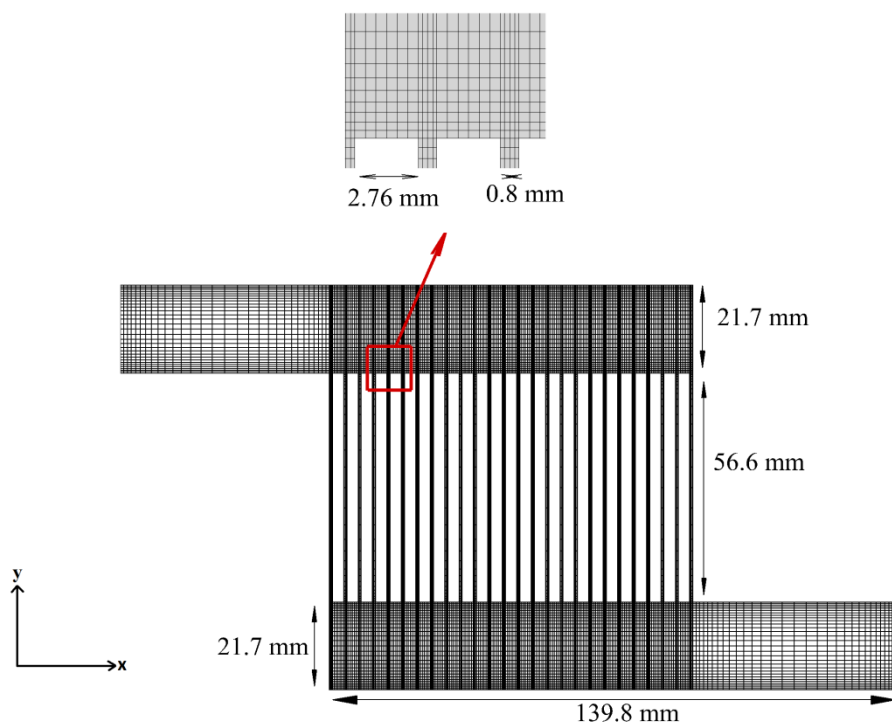
$$x_i = y_i \frac{M_g}{M_i} \quad (18)$$

$$C_{p2} = \sum_i y_i C_{p,i} \quad (19)$$

روابط فوق در نرم‌افزار متن‌باز اپن‌فوم گسسته‌سازی و حل شده‌اند. برای گسسته‌سازی عبارات زمانی از طرح اویلر با دقت مرتبه اول و از طرح اختلاف مرکزی با دقت مرتبه دوم برای گسسته‌سازی عبارات مکانی استفاده شده است. از الگوریتم پیزو طبق شکل ۱ در فرآیند مدل‌سازی برای ارتباط معادلات فشار و سرعت استفاده شده است.

۳- شرایط مرزی و فضای محاسباتی

هندسه مورد مطالعه و شبکه‌بندی با تعداد ۲۰ هزار سلول محاسباتی



شکل ۲: فضای محاسباتی

Fig. 2. Computational domain

$$y_{in} = y_{H_2O}^g, U_{in} = \frac{\dot{m}}{\rho A_{in}}, \alpha_{1,in} = 0, T_{in} = 343.15 K, \frac{\partial P}{\partial x} = 0. \quad (20)$$

در خروجی استک فشار برابر با فشار اتمسفر بوده و بقیه متغیرها از درون فضای محاسباتی درونیابی می‌شوند. شرط عدم لغزش بر روی تمام دیوارها در نظر گرفته شده و بر دیوار سلول‌ها شرط دما ثابت و به دیوار منیفولد سه شرط مرزی دما ثابت، جابه‌جایی آزاد و اجباری به صورت زیر اعمال شده است:

$$\begin{cases} T = T_{cell} \\ -K \frac{\partial T}{\partial n} = h(T - T_{am}) \end{cases} \quad (21)$$

در رابطه فوق h ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی محیط و K ضریب هدایت حرارتی گاز درون استک می‌باشد. در رابطه فوق T_{cell} به دمای سلول اشاره دارد که توسط سیستم مدیریت دمای استک در دمای ۶۵ درجه سانتی‌گراد ثابت نگه داشته می‌شود. مشخصات عملکردی پیل‌سوختی مورد مطالعه در جدول ۱ آورده شده است.

خروجی، منیفولدهای ورودی و خروجی طولی‌تر انتخاب شده‌اند. ارتفاع کانال‌های جریان ۵۶/۶ میلی‌متر در نظر گرفته و با اعمال شرایط محیط متخلخل بر کانال‌های جریان، افت فشار ناشی از وجود کانال‌های جریان در صفحات دو قطبی معادل‌سازی شده است.

تجمیع آب ناشی از تغییر فاز با آب تولیدی در واکنش‌های شیمیایی پیل‌سوختی پلیمری در کانال‌های صفحات دو قطبی می‌تواند باعث کاهش ورود گاز واکنش‌دهنده و یا آب‌گرفتگی سلول شود. همچنین مطابق نتایج که و همکاران [۳]، بدتوزیعی جریان در کاتد نسبت به آند بیشتر است. به همین دلایل در این تحقیق تنها بخش کاتد یک پیل‌سوختی پلیمری مورد بررسی قرار گرفته است.

جریان اشباع اکسیژن با دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد وارد منیفولد شده و به دلیل انتقال حرارت با محیط اطراف، بخشی از بخار آب دچار چگالش می‌شود. عبور جریان از محیط متخلخل باعث افت فشار جریان شده و جریان با فشار اتمسفر به خارج استک تخلیه می‌شود. شرایط مرزی در ورودی استک به صورت زیر است:

آزمایشگاهی و عددی کیم و کیم [۲۲] برای اعتبارسنجی کد توسعه یافته استفاده شده است. در آزمایش آن‌ها هوا با دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد، فشار و رطوبت محیط به استکی با ۱۰ سلول وارد شده و پس از عبور از کانال‌های جریان به محیط اتمسفر تخلیه گردید. آن‌ها سرعت لحظه‌ای جریان هوا را هنگام عبور از سلول‌ها اندازه‌گیری کردند. سپس، نتایج بدست آمده را با نتایج شبیه‌سازی جریان تک‌فاز در نرم‌افزار تجاری فلوئنت مقایسه کردند. اگرچه در آزمایش آن‌ها به دلیل رطوبت کم هوا تغییر فاز مشاهده نشده و سیال تک‌فاز در نظر گرفته شد اما به دلیل ایجاد گردابه در منیفولد و انشعاب جریان اصلی به کانال‌های جریان، می‌تواند مرجعی مناسب برای اعتبارسنجی کد توسعه یافته باشد. در شکل ۳ نتایج بدست آمده از تحقیق حاضر با نتایج عددی و آزمایشگاهی کیم و کیم مقایسه شده است.

برای بررسی عدم وابستگی نتایج به شبکه‌بندی، چهار شبکه سازمان‌یافته با تعداد ۲۰، ۴۰، ۶۰ و ۸۰ هزار سلول محاسباتی مورد استفاده قرار گرفته است. در شکل ۴ سرعت جریان در مراکز سلول‌ها

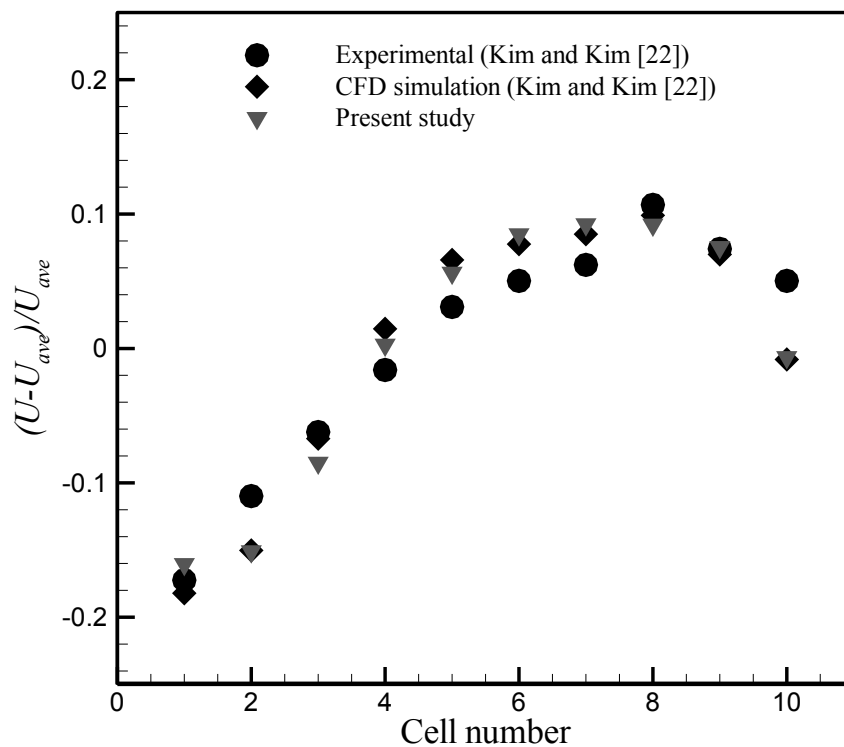
Table 1. Operating conditions of the fuel cell

جدول ۱: مشخصات عملکردی پیل سوختی

اندازه	واحد	پارامتر
۵۰۰	cm ²	سطح فعال
۱/۵	A/cm ²	شدت جریان
۰/۶	V	ولتاژ
۳۴۳/۱۵	K	دمای ورودی اکسیژن
۱۰۰	%	درصد رطوبت
۱/۴	-	استوکیومتری
۲/۲۶۷	gr/s	دبی جرمی اکسیژن

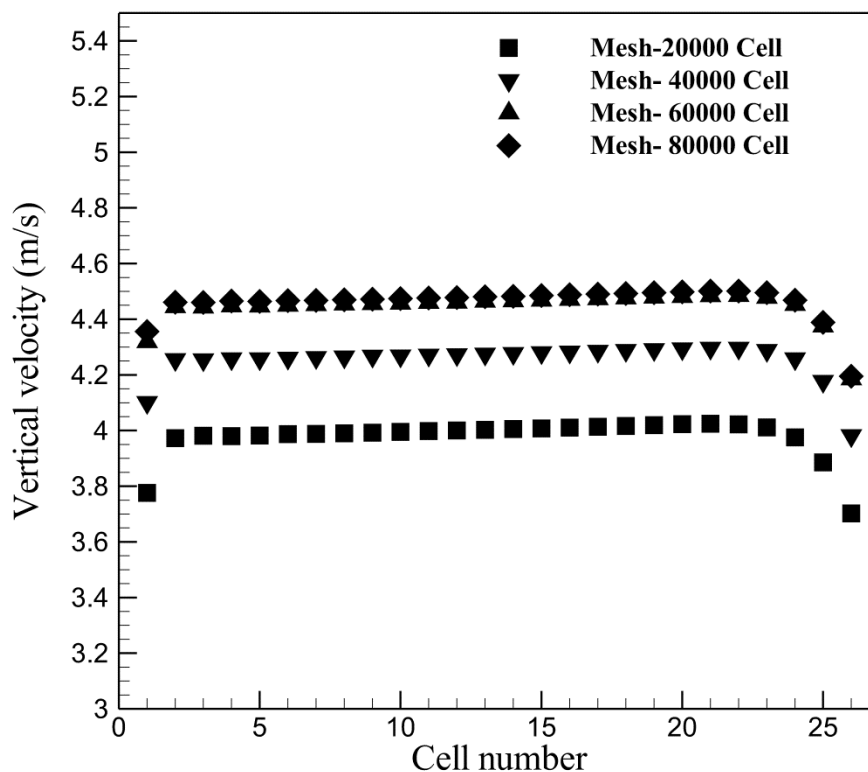
۴- اعتبارسنجی

تاکنون بررسی توزیع جریان دوفازی میان سلول‌های استک پیل سوختی به صورت تجربی و عددی انجام نشده است. به همین دلیل از نتایج



شکل ۳: مقایسه نتایج بدست آمده از شبیه‌سازی عددی با داده‌های آزمایشگاهی

Fig. 3. Comparison between simulation results with experimental data



شکل ۴: بررسی استقلال از شبکه براساس سرعت محوری گاز در مرکز سلول‌ها

Fig. 4. Grid independence study based on the gas vertical velocity at the center of cells

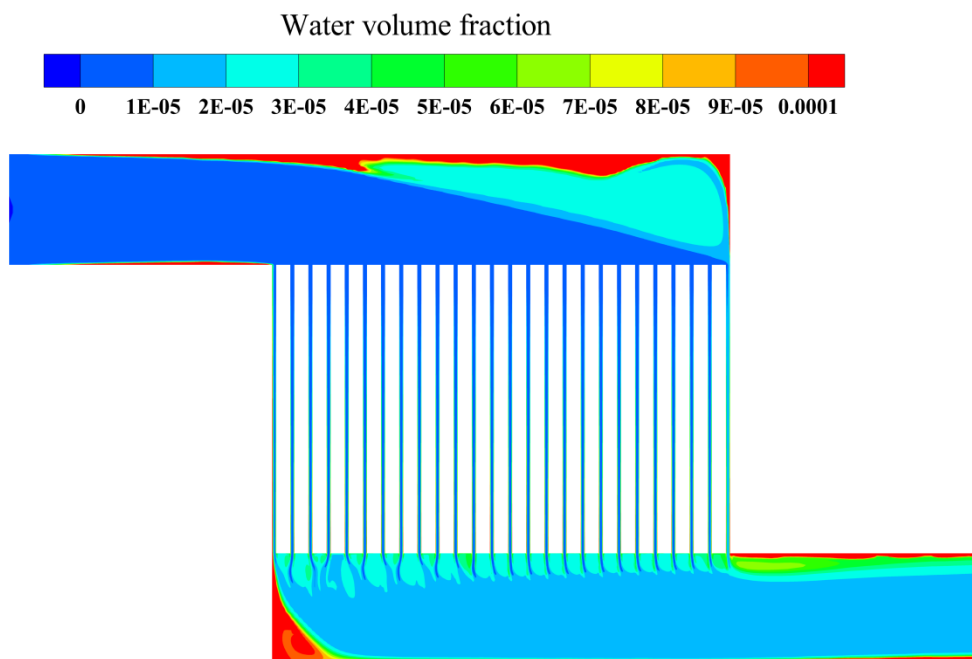
درجه سانتی‌گراد ثابت خواهند ماند. در تمام شبیه‌سازی‌ها منظور از جابه‌جایی آزاد و اجباری، انتقال حرارت دیوار خارجی منیفلود با محیط و ضریب انتقال حرارت ۱۰ و ۵۰ وات بر مترمربع-کلوین بوده و منظور از دما ثابت، ثابت بودن دمای دیوار خارجی منیفلود در دمای ۶۵ درجه سانتی‌گراد است.

با ورود جریان اشباع اکسیژن به منیفلود، بخشی از بخار آب به دلیل انتقال حرارت با محیط و سیستم خنک‌کننده پیل سوختی در مجاورت دیوار منیفلود و سلول‌ها تغییر فاز می‌دهد. شکل ۵ کانتور کسر حجمی آب مایع را نشان می‌دهد زمانی که دیوار منیفلود با محیط انتقال حرارت به صورت جابه‌جایی اجباری داشته باشد. جریان اکسیژن اشباع پس از ورود به استک در معرض انتقال حرارت با دیوار منیفلود قرار می‌گیرد و بیشترین تغییر فاز در فاصله ناچیز از ورودی استک اتفاق می‌افتد. میزان بخار آب موجود در اکسیژن با دما رابطه نمایی داشته [۲۳] و در دماهای بالاتر با کاهش هر درجه از دمای اکسیژن جرم بیشتری از بخار آب تغییر فاز خواهد داد. گاز در ورود به استک دمای بیشینه دارد و با پیش‌روی در منیفلود از دمای گاز

برای چهار شبکه‌بندی نشان داده شده است. شرایط شبیه‌سازی برای بررسی استقلال نتایج از شبکه بدین‌گونه است که اکسیژن اشباع با دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد به منیفلود استک وارد می‌شود. دیوار خارجی استک با هوای اطراف با دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد و به صورت جابه‌جایی آزاد با ضریب انتقال حرارت ۱۰ وات بر مترمربع-کلوین انتقال حرارت داشته و دیوار سلول‌ها در دمای ثابت ۶۵ درجه سانتی‌گراد قرار دارند. مطابق شکل، نتایج بدست آمده از شبکه‌های ۶۰ و ۸۰ هزار سلول محاسباتی به هم نزدیک بوده و بیشینه اختلاف بین نتایج ۰/۸۷ درصد و میانگین خطای ۲۶ سلول ۰/۴ درصد می‌باشد. در نتیجه از شبکه با ۶۰ هزار سلول محاسباتی در ادامه تحقیق استفاده شده است.

۵- نتایج

در این بخش نقش تاثیر تغییر فاز در توزیع جریان اکسیژن در میان سلول‌های استک مورد بررسی قرار می‌گیرد. فرض شده است که دیوارهای سلول با سیستم مدیریت دمای پیل سوختی در دمای ۶۵



شکل ۵: کانتور کسر حجمی آب مایع

Fig. 5. Contour of liquid water volume fraction

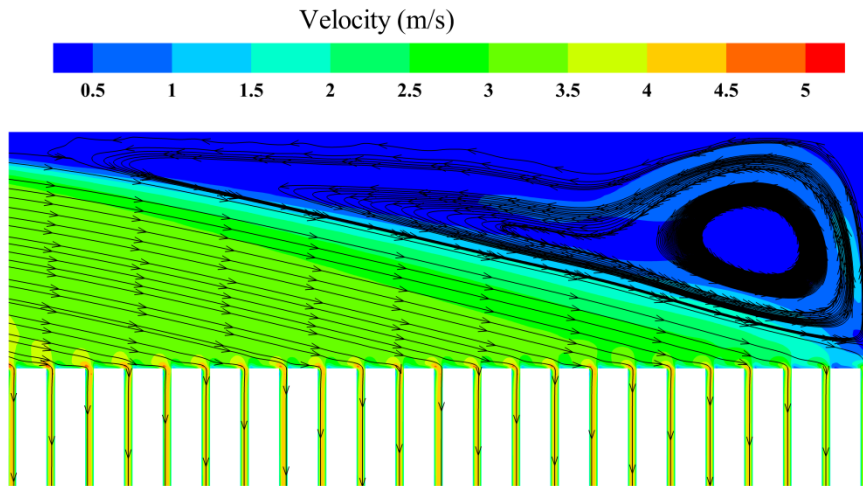
لایه مایع تا انتهای منیفولد ادامه نخواهد داشت. گردابه شکل گرفته در انتهای منیفولد در شکل ۶ بزرگ‌نمایی شده است. در نبود گردابه و خط جریانی بودن هندسه، انتظار می‌رفت آب تولیدی بر روی سطح فوقانی به سلول آخر ورود کند، اما همان‌طور که از شکل‌های ۵ و ۶ مشخص است، گردابه با ورود به لایه مایع شکل گرفته بر روی دیوار فوقانی و انتهایی منیفولد ورودی، بخشی از آب مایع را به درون منیفولد می‌کشاند و مانع از ورود تمامی آب تولیدی به سلول آخر می‌شود.

در شکل ۷ کانتور کسر حجمی آب مایع در انتهای منیفولد برای سه زمان از شبیه‌سازی با فاصله زمانی ۰/۵ ثانیه نمایش داده شده است. همان‌طور که در تصاویر مشخص است در زمان ۶۲/۳ ثانیه، ضخامت لایه مایع در سلول انتهایی بیشتر بوده و در فضای گردابه نیز مقدار آب بیشتری موجود است. با انتقال مقداری از این آب به درون منیفولد در ۶۲/۸ ثانیه، هم لایه شکل گرفته بر روی دیوار انتهایی منیفولد کاهش می‌یابد و هم کاهش مقدار آب در گردابه مشهود است. با افزایش زمان به ۶۳/۳ ثانیه، مقدار آب بازگردانده شده به درون منیفولد توسط گردابه به مقدار کمتری کاهش خواهد یافت و گردابه مقدار کمتری از آب را حمل می‌کند.

به دلیل انتقال حرارت کاسته خواهد شد. در نتیجه در بخش ورودی استک که اختلاف دمای گاز ورودی و دمای محیط بیشینه است، بیشترین انتقال حرارت بین گاز ورودی و محیط اطراف اتفاق افتاده و بخار آب بیشتری به آب مایع تبدیل خواهد شد.

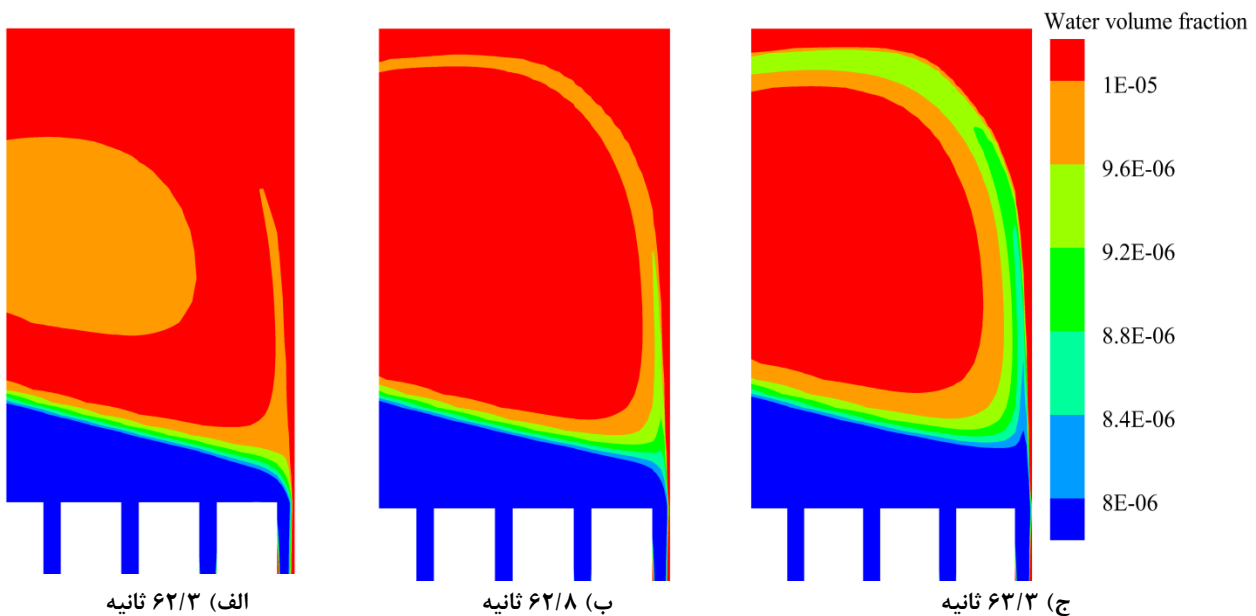
آب تولیدشده از تغییر فاز در قسمت پایینی منیفولد به اولین سلول نفوذ می‌کند. در خروجی سلول اول، بیشترین میزان آب مایع خارج شده از یک سلول مشاهده می‌شود. می‌توان این‌طور توضیح داد که جریان گاز پس از عبور از کانال سلول‌ها به سمت خروجی استک حرکت می‌کند و یک ناحیه با سرعت کم در کنج پایینی استک شکل می‌گیرد. این ناحیه زمان بیشتری برای انتقال حرارت داشته و تجمع آب ناشی از تغییر فاز در این ناحیه با آب ورودی به سلول اول باعث می‌شود که میزان آب مایع در این ناحیه افزایش یابد.

آب تولیدی در بخش فوقانی منیفولد به انتهای استک انتقال می‌یابد. اگرچه بیشترین مقدار تغییر فاز در بخش ورودی استک اتفاق می‌افتد اما به دلیل تکانه سیال، آب تولیدی بر دیوار فوقانی در مجاورت دیوار به سمت انتهای استک هدایت می‌شود و با تجمع آب تولیدی در سطح منیفولد ضخامت لایه مایع افزایش خواهد یافت. اما به دلیل گردابه ایجاد شده در کنج بالایی منیفولد استک، افزایش ضخامت



شکل ۶: شکل‌گیری گردابه در انتهای منیفولد

Fig. 6. Vortex formation at the end of the manifold

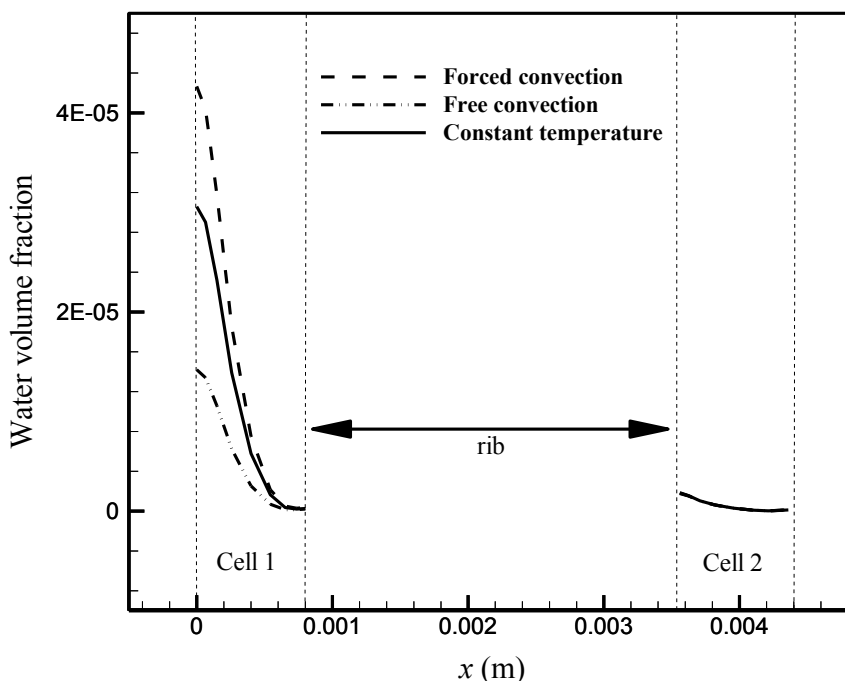


شکل ۷: تاثیر گردابه بر ورود آب به سلول انتهایی

Fig. 7. Effect of the vortex on the water entering the last cell

نمودار کسر حجمی آب ورودی به دو سلول ابتدایی در فاصله ۰/۲۵ میلی‌متر از ورودی سلول نمایش داده شده است. اشاره شده است که آب تولیدی از تغییر فاز بر روی دیوار پایینی منیفولد ورودی به سلول اول وارد می‌شود. در نتیجه، ناحیه سمت چپ سلول اول به دلیل ورود آب مایع از منیفولد دارای بیشترین کسر حجمی می‌باشد. همانطور

همان‌طور که بیان شده، مقدار آب ورودی به هر سلول از اهمیت بالایی برخوردار است و می‌تواند در عملکرد پیل سوختی اختلال ایجاد کند. با توجه به کانتور رسم شده در شکل ۵، سلول‌های ابتدایی و انتهایی بیشترین مقدار آب را دریافت می‌کنند و در این بخش میزان آب ورودی به این سلول‌ها را مورد بررسی قرار خواهیم داد. در شکل ۸



شکل ۸: کسر حجمی آب ورودی به سلول اول و دوم

Fig. 8. The volume fraction of water entering the first and second cells

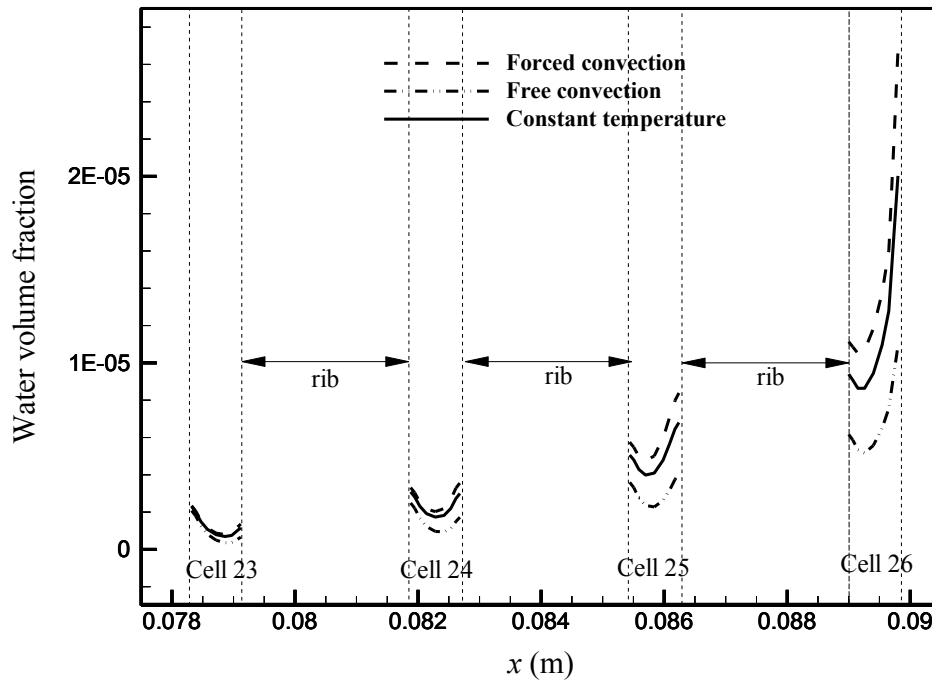
نمودار دبی جرمی گاز گذرنده از مرکز هر سلول برای حالت تکفاز (اکسیژن خالص) و دوفاز (اکسیژن اشباع) با سه شرایط مرزی متفاوت دیوار منی فولد نمایش داده شده است. در حالت استفاده از اکسیژن خالص، مقدار اکسیژن گذرنده از هر سلول با فاصله گرفتن از ورودی منی فولد افزایش می‌یابد. اما در حالت دوفاز به دلیل تغییر فاز رخ داده در مجاورت دیوار منی فولد، سلول اول و سلول‌های انتهایی به دلیل ورود آب مایع، جریان کمتری از واکنش‌دهنده را دریافت می‌کنند. در شکل کاملاً مشخص است که هنگامی که منی فولد استک به صورت جابه‌جایی اجباری با محیط اطراف انتقال حرارت دارد، سلول‌های ابتدایی و انتهایی کمترین مقدار گاز را نسبت به حالت‌های دیگر دریافت می‌کنند. تفاوت میانگین جرم گذرنده از سلول‌های استک در حالت تکفاز و دوفازی به دلیل اضافه شدن جرم بخار آب به اکسیژن در حالت دوفازی می‌باشد. در موارد بحرانی تجمع آب تولیدی از تغییر فاز و واکنش‌های شیمیایی در کانال پیل سوختی می‌تواند موجب آب‌گرفتی و کاهش ولتاژ سلول سوختی شود.

در نتایج بخش‌های قبلی در مورد شکل‌گیری گردابه و نقش آن در توزیع جریان در سلول‌های انتهایی بحث شده است. در این قسمت

که در شکل مشهود است، انتقال حرارت جابه‌جایی اجباری و آزاد به ترتیب باعث بیشترین و کمترین مقدار آب ورودی به سلول اول می‌باشند. سلول دوم تحت تاثیر تغییر فاز ناحیه ابتدایی قرار نگرفته و کسر حجمی آب مایع ورودی به سلول دوم برای سه شرایط مرزی نزدیک به هم خواهد بود.

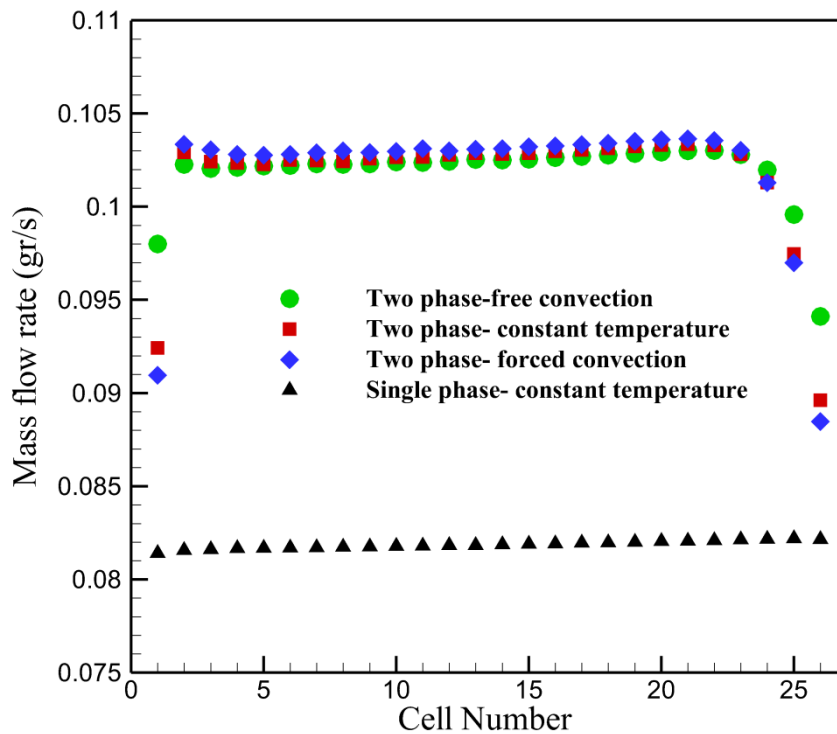
در شکل ۹ نمودار تغییرات کسر حجمی برای چهار سلول انتهایی ترسیم شده است. با توجه به شکل‌های ۸ و ۹، در فاصله بین یک سلول تا سلول بعدی در سلول‌های ۲ تا ۲۳، جریان تنها با دیوار سلول‌ها انتقال حرارت داشته و مستقل از شرایط مرزی دیوار خارجی منی فولد بوده و آب مایع تولیدی به کانال‌های جریان صفحات دوقطبی نفوذ می‌کند. در نتیجه، میزان آب مایع در مجاورت دیوار سمت چپ کانال جریان بیشتر می‌باشد. اما سه سلول انتهایی تحت تاثیر آب تولیدی در قسمت فوقانی و گردابه شکل گرفته در انتهای منی فولد قرار گرفته و میزان آب مایع ورودی به سلول‌ها در سمت راست دیوار کانال‌ها افزایش می‌یابد.

افزایش مقدار آب ورودی به کانال‌های جریان می‌تواند توزیع جریان واکنش‌دهنده میان سلول‌های استک را تحت تاثیر قرار دهد. در شکل ۱۰



شکل ۹: کسر حجمی آب ورودی چهار سلول انتهایی

Fig. 9. The volume fraction of water entering the last four cells



شکل ۱۰: دبی جرمی جریان گاز در مرکز سلول‌های سوختی

Fig. 10. Gas mass flow rate at the center of fuel cells

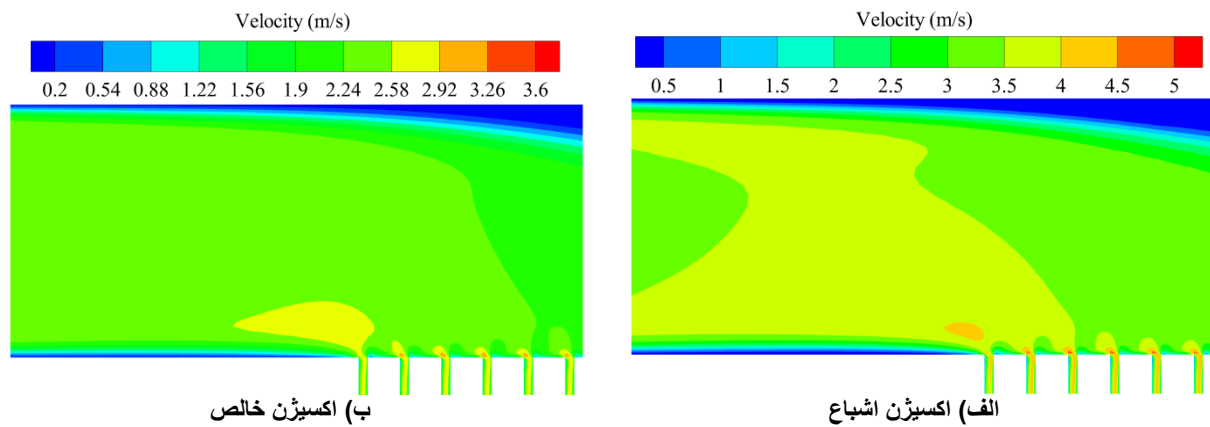
مقدار صفر برای این پارامتر به معنای توزیع یکسان گاز واکنش‌دهنده در میان سلول‌ها و مقدار یک نشان‌دهنده عدم عبور جریان گاز از یک سلول می‌باشد. بدیهی است که هرچه قدر این پارامتر کوچک‌تر باشد، توزیع جریان در میان سلول‌های یک پیل سوختی یکنواخت‌تر است. این پارامتر برای حالت‌های مختلف شبیه‌سازی شده در این تحقیق محاسبه و در جدول شماره ۲ آورده شده است.

با در نظر گرفتن تغییر فاز در شبیه‌سازی‌های جریان درون منی‌فولد، میزان بدتوزیعی جریان افزایش قابل توجهی داشته است. در حالتی که منی‌فولد استک تحت جابه‌جایی اجباری قرار گیرد پارامتر بدتوزیعی ۱۴۲۵ درصد رشد کرده است. همانطور که در جدول مشخص است این پارامتر با مقدار جرم تغییر فاز داده شده رابطه مستقیم دارد و در حالت جابه‌جایی آزاد نسبت به دو حالت دیگر کمتر است.

نتایج نشان از نقش مهم تغییر فاز در توزیع جریان واکنش‌دهنده در میان سلول‌های استک پیل سوختی پلیمری دارد. مهم‌ترین عامل تغییر فاز بخار آب موجود در گاز واکنش‌دهنده، تغییرات دمای گاز

نقش تغییر فاز در میزان گاز ورودی به سلول ابتدایی مورد بررسی دقیق‌تر قرار خواهد گرفت. در شکل ۱۱ کانتور سرعت در مجاورت سلول‌های ابتدایی استک برای دو حالت اکسیژن خالص و اشباع نمایش داده شده است. به دلیل تشکیل آب مایع روی دیوار پایین منی‌فولد در حالت استفاده از اکسیژن اشباع، ناحیه بیشتری تحت تاثیر دیوار قرار می‌گیرد و ضخامت لایه مرزی شکل گرفته در مجاورت سلول اول افزایش می‌یابد. افزایش ضخامت لایه مرزی ایجاد شده در ورودی سلول اول باعث کاهش جریان ورودی به سلول اول می‌شود. برای بررسی شدت توزیع نابرابر جریان واکنش‌دهنده میان سلول‌های یک استک پیل سوختی، جکسون و همکاران [۲۴] از پارامتری براساس اختلاف بین بیشینه و کمینه دبی جرمی گذرنده از سلول‌ها به صورت زیر استفاده کردند:

$$F_1 = \frac{\max(\dot{m}_1 \dots \dot{m}_n) - \min(\dot{m}_1 \dots \dot{m}_n)}{\max(\dot{m}_1 \dots \dot{m}_n)} \quad (22)$$



شکل ۱۱: کانتور سرعت گاز در ورودی منی‌فولد

Fig. 11. Contours of gas flow velocity at the manifold inlet

Table 2. Variation of the non-uniform flow distribution parameter with different boundary conditions

جدول ۲: تغییرات پارامتر توزیع غیریکنواخت جریان با شرایط مختلف مرزی

جابه‌جایی اجباری	جابه‌جایی آزاد	منی‌فولد دما ثابت	اکسیژن خالص	
۰/۱۴۶۴	۰/۰۸۶۴	۰/۱۳۲۹	۰/۰۰۹۶	پارامتر توزیع غیریکنواخت جریان
۱۴۲۵	۸۰۰	۱۲۸۴	-	درصد افزایش نسبت به اکسیژن خالص

شبیه‌سازی جریان تک‌فاز افزایش داشت. عدم توجه به میزان آب تولیدی و تجمع آن با آب‌های بدست آمده از واکنش‌های شیمیایی می‌تواند باعث کاهش کارایی سیستم و حتی آب‌گرفتی سلول شود. در نتایج مشهود است که با ورود آب به هر سلول میزان ورود اکسیژن به آن کاهش می‌یابد و از آنجایی که عملکرد تمام سلول‌ها در بازده کلی استک تاثیرگذار است، با ورود آب به سلول‌ها بازده کلی استک دچار افت می‌شود.

۷- فهرست علائم

علائم انگلیسی

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

علائم یونانی

α	کسر حجمی
ρ	چگالی، kg/m^3
μ	ویسکوزیته، $kg/(s.m)$
ϑ	ضریب نفوذپذیری، $1/m^2$
σ	ضریب کشش سطحی، kg/s^2
κ	انحنای سطح، $1/m$

پس از ورود به منیفولد استک می‌باشد. ورود گاز واکنش‌دهنده به منیفولد با رطوبتی کمتر از حالت اشباع می‌تواند تا حدود زیادی از مشکلات تغییر فاز بخار آب بکاهد اما باید توجه داشت که رسانایی غشا پروتونی پیل‌سوختی به رطوبت وابسته بوده و با کاهش رطوبت از میزان رسانایی غشا کاسته شده و عملکرد پیل‌سوختی تحت تاثیر قرار می‌گیرد. همچنین به دلیل قابلیت حمل و جابه‌جایی استک پیل‌سوختی پلیمری و کاربردهایی نظیر نیروی محرکه خودرو، باید طراحی منیفولد به‌گونه‌ای باشد که شرایط آب‌وهوایی و تغییرات دما نیز در عملکرد سیستم پیل‌سوختی لحاظ گردد. در نتیجه، طراحی سیستمی برای جمع‌آوری آب ناشی از تغییر فاز می‌تواند در بهبود عملکرد استک پیل‌سوختی کارآمد باشد.

۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله نقش تغییر فاز در توزیع جریان اکسیژن اشباع میان سلول‌های کاتد یک استک پیل‌سوختی مورد بررسی قرار گرفت. برای شبیه‌سازی جریان دوفازی همراه با مدل تغییر فاز بر پایه فشار جزئی بخار آب، کدی در نرم‌افزار متن‌باز این‌فوم توسعه یافت. به دلیل نبود مطالعه عددی و تجربی توزیع جریان دوفازی در میان سلول‌های استک پیل‌سوختی، از سرعت لحظه‌ای جریان تک‌فاز برای اعتبارسنجی کد توسعه‌یافته استفاده شد. فشار اشباع بخار آب موجود در اکسیژن به دما وابسته بوده و با کاهش دما تغییر فاز رخ می‌دهد. به همین منظور، سه شرط مرزی دما ثابت، انتقال حرارت جابه‌جایی آزاد و اجباری را بر روی منیفولد استک پیل‌سوختی اعمال شده در حالی که دمای دیوارهای سلول با توجه به سیستم مدیریت دمای پیل‌سوختی در دمای ثابت قرار داشتند. نتایج نشان داد که آب تولیدی از تغییر فاز بر روی دیوار پایینی منیفولد به سلول اول ورود می‌کند و سلول اول بیشترین میزان آب مایع را دریافت می‌کند. آب ناشی از تغییر فاز بخار آب بر روی دیوار بالایی منیفولد به انتهای منیفولد هدایت می‌شود. بخشی از آن به دلیل گردابه شکل گرفته در انتهای منیفولد به جریان درون منیفولد انتقال می‌یابد و بخشی دیگر از سلول‌های انتهایی عبور می‌کند. برای بررسی میزان بدتوزیعی جریان در میان سلول‌های استک پیل‌سوختی، از پارامتر توزیع غیریکنواخت جریان استفاده شده است. این پارامتر برای شبیه‌سازی جریان دوفازی و شرایط انتقال حرارت جابه‌جایی اجباری ۱۴۲۵ درصد نسبت به

International Journal of Hydrogen Energy, 42(8) (2017) 5272-5283.

- [9] S. Maharudrayya, S. Jayanti, A.P. Deshpande, Flow distribution and pressure drop in parallel-channel configurations of planar fuel cells, Journal of Power Sources, 144(1) (2005) 94-106.
- [10] T. Ito, J. Yuan, B. Sundén, Influence of Pressure Drop in PEM Fuel Cell Stack on the Heat and Mass Balances in 100 kW Systems, (42754) (2007) 15-24.
- [11] C. Anbumeenakshi, M.R. Thansekhar, Experimental investigation of header shape and inlet configuration on flow maldistribution in microchannel, Experimental Thermal and Fluid Science, 75 (2016) 156-161.
- [12] J. Lebak, M.B. Andreasen, H.A. Andresen, M. Bang, S.K. Kær, Particle Image Velocimetry and Computational Fluid Dynamics Analysis of Fuel Cell Manifold, Journal of Fuel Cell Science and Technology, 7(3) (2010) 031001-031010.
- [13] P. Rodatz, F. Büchi, C. Onder, L. Guzzella, Operational aspects of a large PEFC stack under practical conditions, Journal of Power Sources, 128(2) (2004) 208-217.
- [14] J. Dong, X. Xu, B. Xu, CFD analysis of a novel modular manifold with multi-stage channels for uniform air distribution in a fuel cell stack, Applied Thermal Engineering, 124 (2017) 286-293.
- [15] M. Ashrafi, H. Kanani, M. Shams, Numerical and experimental study of two-phase flow uniformity in channels of parallel PEM fuel cells with modified Z-type flow-fields, Energy, 147 (2018) 317-328.
- [16] Y. Cai, Z. Fang, B. Chen, T. Yang, Z. Tu, Numerical study on a novel 3D cathode flow field and evaluation criteria for the PEM fuel cell design, Energy, 161 (2018) 28-37.

زیرنویس

فاز مایع	<i>l</i>
فاز گاز	<i>g</i>
گاز	<i>g</i>
حالت بحرانی	<i>c</i>
گونه‌های از ترکیب	<i>i</i>
اشباع	<i>sat</i>
بالانویس	
آب	H ₂ O

مراجع

- [1] F. Barbir, PEM Fuel Cells, Academic Press, Boston, 2013.
- [2] J. Lebak, M. Bang, S.K. Kær, Flow and Pressure Distribution in Fuel Cell Manifolds, Journal of Fuel Cell Science and Technology, 7(6) (2010) 061001-061008.
- [3] J.-H. Koh, H.-K. Seo, C.G. Lee, Y.-S. Yoo, H.C. Lim, Pressure and flow distribution in internal gas manifolds of a fuel-cell stack, Journal of Power Sources, 115(1) (2003) 54-65.
- [4] F. White, Fluid Mechanics, 8th Edition ed., McGraw-Hill Education, New York, 2016.
- [5] J.J. Baschuk, X. Li, Modelling of polymer electrolyte membrane fuel cell stacks based on a hydraulic network approach, International Journal of Energy Research, 28(8) (2004) 697-724.
- [6] J. Park, X. Li, Effect of flow and temperature distribution on the performance of a PEM fuel cell stack, Journal of Power Sources, 162(1) (2006) 444-459.
- [7] C.-H. Chen, S.-P. Jung, S.-C. Yen, Flow distribution in the manifold of PEM fuel cell stack, Journal of Power Sources, 173(1) (2007) 249-263.
- [8] M. Sajid Hossain, B. Shabani, C.P. Cheung, Enhanced gas flow uniformity across parallel channel cathode flow field of Proton Exchange Membrane fuel cells,

- [21] N. Samkhaniani, M.R. Ansari, Numerical simulation of bubble condensation using CF-VOF, *Progress in Nuclear Energy*, 89 (2016) 120-131.
- [22] S.Y. Kim, W.N. Kim, Effect of cathode inlet manifold configuration on performance of 10-cell proton-exchange membrane fuel cell, *Journal of Power Sources*, 166(2) (2007) 430-434.
- [23] R.E. Sonntag, C. Borgnakke, Gordon J. Van Wylen, and Gordon J. Van Wylen, *Fundamentals of Thermodynamics*, Wiley, New York, 1998.
- [24] J.M. Jackson, M.L. Hupert, S.A. Soper, 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*, 269 (2014) 274-283.
- [17] Y. Kerkoub, A. Benzaoui, F. Haddad, Y.K. Ziari, Channel to rib width ratio influence with various flow field designs on performance of PEM fuel cell, *Energy Conversion and Management*, 174 (2018) 260-275.
- [18] H.J. Kim, T.W. Kim, Numerical Investigation of Gas-Liquid Two-Phase Flow inside PEMFC Gas Channels with Rectangular and Trapezoidal Cross Sections, *Energies*, 11(6) (2018).
- [19] J.U. Brackbill, D.B. Kothe, C. Zemach, A continuum method for modeling surface tension, *Journal of Computational Physics*, 100(2) (1992) 335-354.
- [20] P.K. Jithesh, A.S. Bansode, T. Sundararajan, S.K. Das, The effect of flow distributors on the liquid water distribution and performance of a PEM fuel cell, *International Journal of Hydrogen Energy*, 37(22) (2012) 17158-17171.