

بهبود عملکرد و کاهش حجم سامانه خنک کاری در پیل‌های سوختی پلیمری دما پایین با استفاده از نانوسیال

مظاهر رحیمی اسبویی^۱، ابراهیم علیزاده^۲، سید مجید رهگشای^۳، مجید خورشیدیان^۴، سید حسین مسروری سعادت^۵

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

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۰۷/۰۲؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۰۹/۲۹)

چکیده

مدیریت صحیح گرما یکی از معضلات اساسی در پیل‌های سوختی بوده که باید به‌نحوی مرتفع گردد. عملکرد پیل در دماهای بالا باعث خشک‌شدن غشاء، افزایش مقاومت اهمی پیل، انقباض و گسیختگی غشاء و در دماهای پایین باعث کاهش نرخ واکنش‌ها، ولتاژ، راندمان، توان خروجی و همچنین باعث میعان آب و وقوع پدیده غرقابگی در سمت کاتد می‌گردد. افزایش توان در پیل‌های سوختی با افزایش تعداد پیل‌ها در یک استک پیل سوختی همراه است. با افزایش توان، گرمای تولیدشده در استک افزایش می‌یابد که نیازمند دبی بالای سیال خنک‌کاری برای دفع حرارت تولید شده است. افزایش دبی با افزایش حجم سامانه خنک‌کاری، افزایش توان مصرفی پارازیتی و در نتیجه کاهش راندمان در استک همراه است. در این مقاله استفاده از نانوسیال به‌عنوان راه‌کاری برای حل این مشکل معرفی می‌شود و اثر آن بر کاهش توان پارازیتی مورد بررسی قرار می‌گیرد. نتایج نشان داده است که با استفاده از مخلوط آب و ۲٪ نانوذره اکسید آلومینیم در رینولدز ۶۰۰۰ خواهیم توانست اختلاف دمای تمامی نقاط را نسبت به ورودی کمتر از ۵ درجه نگه داریم. این درحالی است که برای سیال پایه حداقل رینولدز جریان باید به ۹۰۰۰ برسد تا این اختلاف دما برقرار باشد.

واژه‌های کلیدی: میدان خنک‌کاری، نانو سیال، مدیریت حرارت، پیل سوختی پلیمری، ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی

Improving Performance and Decreasing of Cooling System Volume in Low Temperature PEM Fuel Cell Using Nanofluid

M. Rahimi-Esbo, E. Alizadeh, S.M. Rahgoshay, M. Khorshidian and S.H.M. Saadat

Fuel Cell Technology Research Laboratory, Malek Ashtar University of Technology, Fereydunkenar, Iran

(Received: 24/September/2017 ; Accepted: 20/December/2017)

ABSTRACT

Correct heat management is one of the major problems in fuel cells that should be somehow solved. The performance of the cell at high temperatures causes the membranes to dry, increasing ohmic resistance of cell, shrinking and rupture of membranes and at low temperatures decrease the reaction rate, voltage, efficiency, output power, as well as condensation of water and occurrence of flooding at the cathode side. Increasing power in fuel cells associated with increasing the number of cells in a fuel cell stack. By increasing power, high flow rate of the cooling fluid is required to dissipate more generated heat. Increasing cooling flow rate increases the volume of the cooling system, parasitic power and reduces the efficiency of the stack. In this paper, using of nanofluids as an approach to solving this problem is presented and its effect on reducing the parasitic power is investigated. The results showed with using mixture of water and 2% volume fraction of Al_2O_3 , at $Re=6000$ the temperature difference of all parts of flow field compare to inlet is smaller than $5^\circ C$. At the case that base fluid is used, this goal achieved at $Re=9000$.

Keywords: Cooling Flow Field, Nanofluid, Heat Management, PEM Fuel Cell, Convective Heat Transfer Coefficient

۱- استادیار: mrahimi@mut.ac.ir

۲- دانشیار (نویسنده پاسخگو): fccenter@mut.ac.ir

۳- کارشناس ارشد: rahgoshay@mut.ac.ir

۴- کارشناس ارشد: khorshidian@mut.ac.ir

۵- کارشناس ارشد: hsaadat@mut.ac.ir

۱- مقدمه

خواص حرارتی ممکن با حداقل کسر حجمی ($1\% \leq \phi$) در سیال پایه می‌باشد.

در زمینه جریان و انتقال حرارت نانوسیال تحقیقات تجربی و عددی مختلفی صورت گرفته است. از مطالعات انجام شده بر می‌آید که هیچ فرمول تئوری تا به حال نتوانسته رفتار نانوسیال را با در نظر گرفتن ذرات تشکیل دهنده‌اش پیش‌بینی کند. محققان زیادی نانوذرات را به‌عنوان عاملی برای افزایش نرخ انتقال حرارت مورد توجه قرار دادند. پخش ذرات جامد در داخل سیال یکی از روش‌های بهبود انتقال حرارت در سیالات می‌باشد که قدمتی بیش از صد دارد. اولین کارهای تئوری در این زمینه توسط ماکسول [۲] انجام شده است. این روش به‌دلیل مشکلاتی نظیر گرفتگی مجاری، ته‌نشینی و خوردگی مجاری انتقال سیال نتوانست، به‌طور موثر در کاربردهای عملی انتقال حرارت مورد استفاده قرار گیرد.

با پیشرفت فناوری تولید ذرات جامد در اندازه‌های بسیار ریز در مقیاس نانو فراهم گردید. با اضافه کردن این نانوذرات به سیال پایه سیال جدیدی حاصل می‌گردد که چوی [۳] برای اولین بار در سال ۱۹۹۵ در آزمایشگاه ملی آرگون مورد استفاده قرار داد و آن را "نانوسیال" نامید. چوی و همکاران با اضافه کردن مقدار کم این ذرات به سیال پایه بهبود چشمگیر ضریب انتقال حرارت رسانایی این نوع سیال را نسبت به سیال پایه گزارش کردند. پس از معرفی نانوسیال کارهایی به‌منظور تعیین خواص ترموفیزیکی آن و بررسی عملکرد آن برای انتقال حرارت در رژیم‌های مختلف جریان و شرایط کاری مختلف انجام گرفت.

برای تشریح افزایش غیرعادی ضریب هدایت گرمایی کبیلنسکی و همکارانش [۴] چهار مکانیزم احتمالی را در نظر گرفتند که عبارتند از:

- ۱- حرکت تصادفی نانوذرات
- ۲- تشکیل ساختار لایه‌ای مولکولی با ضریب هدایت گرمایی خیلی زیاد در سطح مشترک مایع و نانو ذره
- ۳- ماهیت انتقال گرما در نانوذرات
- ۴- اثر خوشه‌ای یا جمع شدن نانوذرات

وانگ و همکاران [۵] نشان دادند که ضریب هدایت گرمایی به حرکت میکروسکوپی (حرکت براونی و نیروهای داخلی ذره) و ساختار ذرات وابسته است. ژوان و لی [۶] در

پیل سوختی در مقایسه با دیگر منابع تولید توان همچون باتری‌ها و موتورهای احتراق داخلی دارای مزایای متعددی است. از مزیت‌های پیل سوختی نسبت به باتری‌ها در پهنادهای می‌توان به مدت زمان پرواز بیشتر و مسافت طی شده بیشتر اشاره کرد. همچنین در مقایسه با موتورهای احتراق داخلی پیل‌های سوختی دارای کاهش صدا، نویز، درجه حرارت و وزن می‌باشد و از طرفی بازده بالاتری نیز دارد. یکی از معضلات اساسی در پیل‌های سوختی پلیمری دفع حرارت تولیدی در آن می‌باشد. میدان جریان خنک‌کاری باید به‌نحوی طراحی گردد که گرمای تولیدی در ولتاژهای کاری مختلف را دفع کند. هرچند که با توجه به اصول انتقال حرارت، ایجاد توزیع یکنواخت دما در یک سامانه دینامیک امکان‌پذیر نمی‌باشد. همچنین افت فشار سیال خنک‌کننده در کانال‌های خنک‌کاری از ورودی تا خروجی باید حداقل گردد تا مصرف توان پمپ سیرکولاسیون سیال خنک‌کاری حداقل شود. در سال‌های اخیر افزودن ذرات جامد به سیال به‌دلیل بهبود خواص حرارتی سیال و در نتیجه افزایش انتقال حرارت، مورد توجه بسیاری از محققین قرار گرفته است. تحقیقات نشان می‌دهد که افزودن مقدار کمی نانوذره باعث افزایش 20% در ضریب انتقال حرارت هدایتی سیال می‌شود [۱]. با توجه به نیاز فراوان به بهبود ضریب انتقال حرارت سیال در صنایع امروزی، پتانسیل زیادی برای پژوهش در این زمینه و به‌طور کلی در زمینه بهبود انتقال حرارت وجود دارد.

نانوسیال مخلوطی از نانو ذراتی به ابعاد $100-1$ نانومتر و سیال پایه (نانوذرات معلق در سیال) می‌باشد، که این اصطلاح اولین بار توسط چوی در سال ۱۹۹۵ در آزمایشگاه ملی آرگون مورد استفاده قرار گرفت. نانوذره در مقایسه با ذرات در اندازه میکرو دارای سطح نسبی وسیع‌تر، مومنتم ذره کم‌تر، تحرک بالاتر، پایداری تعلیق بهتر و در نتیجه هدایت حرارتی بیشتر می‌باشد. این باعث می‌شود تا نانوسیال نوید کارهای خوبی در زمینه‌های خنک‌کاری، روان‌کاری، سیالات هیدرولیکی برش فلزات و ... را بدهد. به‌علاوه، افت فشار کم و سایش مکانیکی ناچیز آن‌ها موجب شد که محققان تصدیق کنند که نانوسیال باعث گسترش نسل جدیدی از مبدل‌های حرارتی کوچک خواهد شد. هدف اصلی استفاده از نانوسیال، رسیدن به بهترین

با نسبت حجمی ۱٫۶٪ نانوذره نشان می‌دهد. همچنین طول ناحیه توسعه یافته برای نانوسیال بیشتر از مقدار آن برای سیال خالص بوده، که با افزایش درصد حجمی نانوسیال افزایش می‌یابد. پدیده مهاجرت ذرات که باعث پخش غیریکنواخت رسانایی حرارتی و ویسکوزیته شده و سبب کاهش لایه مرزی حرارتی می‌گردد برهانی بود که توسط آن‌ها برای توجیه این بهبود پیشنهاد شد. هریس و همکاران [۱۲] اثر نانوسیال اکسیدمس-آب و اکسیدآلومینیوم-آب رادر لوله تحت دمای دیواره ثابت مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که میزان انتقال حرارت و تنش برشی دیواره نسبت به سیالات پایه زیادتر بوده و افزایش نسبت حجمی نانوذره سبب افزایش این مقادیر می‌گردد. افزایش انتقال حرارت ناشی از حضور نانوسیال بیشتر از مقداری است که توسط روابط سیال تک‌فازی برای انتقال حرارت به دست می‌آید. آن‌ها همچنین بهبود انتقال حرارت نانوسیال اکسیدآلومینیوم آب را بیشتر از نانوسیال مس-آب گزارش کردند. روی و همکاران [۱۳] جریان آرام شعاعی نانوسیالات اکسیدآلومینیوم در آب، اتیلن گلیکول و روغن در اندازه‌های مختلف نانوذره را بررسی کردند. بیشتر بودن ویسکوزیته و کمتر بودن ضریب انتقال حرارت نانوسیالات با ذرات بزرگتر نسبت به نانوسیالات ریزتر توسط آن‌ها گزارش گردید. همچنین آن‌ها رابطه مستقیمی را بین انتقال حرارت و تنش بر روی دیواره با عدد رینولدز و درصد حجمی نانوذرات گزارش کردند. ژوان و لی [۱۴] یک الگو برای تولید نانوسیال ارائه داده و چند نانوسیال را به این روش تولید کردند. آن‌ها همچنین یک مدل برای توصیف کارایی حرارتی جریان نانوسیال در درون یک لوله ارائه دادند که پخش نانوذرات را نیز در نظر می‌گرفت. نتایج آن‌ها نشان داد که افزودن نانوذرات باعث افزایش ضریب هدایت حرارتی سیال می‌شود. به‌عنوان مثال افزایش کسر حجمی از ۲/۵٪ به ۷/۵٪ باعث افزایش نسبت ضریب هدایت حرارتی نانوسیال به سیال پایه از ۱/۲۴ به ۱/۷۸ می‌شود.

استفاده از نانوسیال برای بهبود نرخ خنک‌کاری و کاهش حجم و اندازه سامانه‌های خنک‌کاری در پیل‌های سوختی پلیمری از سال ۲۰۱۵ مورد توجه محققین قرار گرفته است. تعداد مقالاتی که در این زمینه به چاپ رسیده بسیار محدود بوده و افراد کمی در این زمینه فعالیت کردند. ذکریا و همکاران [۱۵] میزان افزایش انتقال حرارت و جریان نانو سیال

مورد پنج دلیل احتمالی برای بهبود ضریب هدایت گرمایی نانو ذره بحث کردند: ۱. افزایش مساحت سطح به‌علت نانو ذرات معلق، ۲. افزایش ضریب هدایت گرمایی سیال، ۳. واکنش و برخورد میان نانوذرات، ۴. نوسان شدید مخلوط و آشفتگی سیال و ۵. پخش و پراکندگی نانو ذرات.

برخی مؤلفان مانند دانگسونگسوک و سومچای [۷] تفاوت بین مقادیر خواص ترموفیزیکی سیال به‌دست‌آمده از معادلاتی که برای نانوسیال وجود دارد و مقادیر تجربی را بررسی کردند. لی و همکارانش [۸] ضریب رسانش سوسپانسیون نانوذرات اکسیدمس و اکسیدآلومینیوم در آب و اتیلن گلیکول را به‌صورت تجربی مورد بررسی قرار دادند. نتایج آن‌ها نشان داد که نانوسیال‌ها در مقایسه با سیال‌های پایه خود دارای ضریب انتقال حرارت رسانایی بسیار بالاتری هستند. آن‌ها ضریب رسانایی موثر نانوسیال را به‌صورت تابعی از ضریب رسانایی سیال پایه و نانوذرات و نسبت حجمی آن به‌دست آوردند. آن‌ها همچنین افزایش تقریباً خطی ضریب رسانایی نانوسیال را با افزایش نسبت حجمی نانوذره گزارش کردند. آن‌ها ضریب انتقال حرارت رسانایی اکسیدمس-اتیلن گلیکول را ۲۰٪ بیشتر از سیال پایه در نسبت حجمی ۴٪ نانوذره گزارش کردند. ژای و همکاران [۹] به بررسی ضریب رسانایی نانوسیال‌ها شامل نانوذرات آلومینا و اکسیدمس در سیال‌های پایه، نظیر آب، اتیلن گلیکول، روغن پمپ خلاء و روغن موتور پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد که همه نانوسیال‌ها دارای ضریب انتقال حرارت بیشتری نسبت به سیال پایه خود هستند. همچنین با افزایش نسبت حجمی نانوذره ضریب رسانایی نانوسیال افزایش می‌یابد، که درصد این افزایش برای نانوسیالات مختلف متفاوت می‌باشد. داس و همکاران [۱۰] به بررسی تجربی اثر دما بر ضریب انتقال حرارت رسانایی نانوسیال پرداختند. آن‌ها دو تا سه برابر شدن این ضریب با افزایش دما در یک محدوده دمایی ۳۱ تا ۵۱ درجه سانتی‌گراد را گزارش کردند. همچنین مقایسه نتایج به‌دست‌آمده با روابط ماکسول و همیلتن-کروسر نشان داد که این روابط ضریب نانوسیال را کمتر از مقدار واقعی آن پیش‌بینی می‌کنند.

ون و دینگ [۱۱] انتقال حرارت جابجایی آرام نانوسیال اکسیدآلومینیوم-آب را در ناحیه ورودی لوله مورد بررسی قرار دادند. نتایج آن‌ها افزایش ۴۹٪ را برای عدد ناسلت نانوسیال

۲- معادلات حاکم

همچنین معادلات حاکم بر جریان شامل معادلات پیوستگی، مومنتم، انرژی و معادلات توربولانسی در جدول ۱ لیست شده‌اند.

جدول (۱): معادلات حاکم بر جریان.

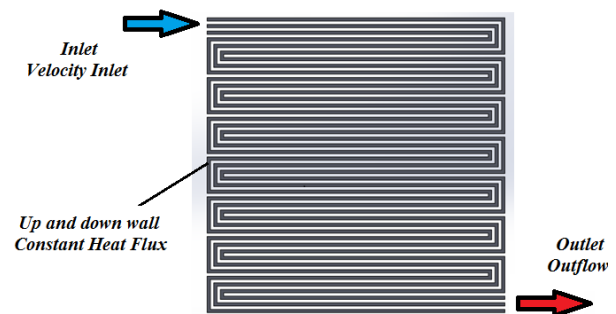
	نمایش ریاضی اندیسی
معادله پیوستگی	$\frac{\partial}{\partial x_i} (\rho_{nf} u_i) = 0$
معادله مومنتم	$\frac{\partial}{\partial x_j} (\rho_{nf} u_i u_j) = -\partial p / \partial x_i + \frac{\partial}{\partial x_j} [\mu (\partial u_i / \partial x_j + \partial u_j / \partial x_i)] + \frac{\partial}{\partial x_j} (-\rho_{nf} \overline{u_i' u_j'})$
معادله انرژی	$\frac{\partial}{\partial x_i} (\rho_{nf} u_i T) = \frac{\partial}{\partial x_j} ((\Gamma + \Gamma_t) \frac{\partial T}{\partial x_j})$ $\Gamma = \mu_{nf} / Pr_{nf} \quad , \quad \Gamma_t = \mu_t / Pr_t$
تنش‌های رینولدز	$\rho_{nf} \overline{u_i' u_j'} = \mu_t (\partial u_i / \partial x_j + \partial u_j / \partial x_i)$
ویسکوزیته توربولانس	$\mu_t = \rho_{nf} c_\mu k^2 / \varepsilon$
معادله انتقال k	$\frac{\partial}{\partial x_i} (\rho_{nf} k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu_{nf} + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k - \rho_{nf} \varepsilon + S_k$
معادله انتقال ε	$\frac{\partial}{\partial x_i} (\rho_{nf} \varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu_{nf} + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} G_k + C_{2\varepsilon} \rho_{nf} \frac{\varepsilon^2}{k} + S_\varepsilon$
نرخ تولید انرژی سینیتیک توربولانس	$G_k = -\rho_{nf} \overline{u_i' u_j'} \frac{\partial u_j}{\partial x_i}$

Al₂O₃ را در مخلوط ۵۰٪ آب و ۵۰٪ اتیلن گلیکول با درصد حجمی ۱/۰٪ و ۵/۰٪ به روش عددی انجام دادند. نتایج نشان داد که ضریب انتقال حرارت هم با افزایش درصد حجمی و هم با افزایش عدد رینولدز افزایش می‌یابد. اگر چه این افزایش میزان انتقال حرارت همراه با افزایش میزان توان پمپاژ نسبت به سیال پایه می‌باشد. همچنین ذکریا و همکاران [۱۶] در یک کار تجربی، انتقال حرارت و کارایی جریان نانو سیال Al₂O₃ در مخلوط ۵۰-۵۰ آب و اتیلن گلیکول را در یک تک صفحه خنک کننده در پیل سوختی غشاء پلیمری بررسی کردند. نتایج نشان داد که در مقایسه با سیال پایه، نانوسیال Al₂O₃ در مخلوط ۵۰-۵۰ آب و اتیلن گلیکول عملکرد حرارتی بهتری را داشته است. این عملکرد هم در افزایش ضریب انتقال حرارت و هم در افزایش عدد ناسلت نمود پیدا کرد. همچنین آن‌ها گزارش کردند افزایش توان پمپ برای یک صفحه تنها در مقایسه با میزان افزایش انتقال حرارت کوچک بوده و قابل صرف نظر کردن است. این گروه در سال ۲۰۱۶ مقاله جامعی را در این زمینه منتشر کردند. ذکریا و همکاران [۱۷] به صورت تجربی، انتقال حرارت و کارایی جریان سیال Al₂O₃ در سیال پایه آب و EG با نسبت ۵۰٪ آب، ۵۰٪ اتیلن گلیکول و ۶۰٪ آب و ۴۰٪ اتیلن گلیکول را در یک تک صفحه خنک کننده یک پیل سوختی غشاء پلیمری بررسی کردند. نتایج نشان داد که نانوسیال Al₂O₃ در آب و اتیلن گلیکول با نسبت‌های ۵۰-۵۰ و ۴۰-۶۰ عملکرد حرارتی بهتری را نسبت به سیال پایه داشتند.

در این مقاله با استفاده از مدل‌های وابسته به سرعت و دما اثر نانوذرات بر افزایش میزان انتقال حرارت و افت فشار در میدان خنک کاری پیل سوختی پلیمری بررسی شده است. تمامی خواص نانوسیال که وابسته به دما، سرعت و دیگر خصوصیات سیال پایه و نانوذرات بود از طریق کدنویسی با استفاده توابع تعریفی کاربر به نرم افزار فلونت، اضافه شد. اثر قطر نانوذرات، نوع سیال پایه و عدد رینولدز بر میزان افزایش افت فشار و انتقال حرارت بررسی شد. همچنین میزان افزایش توان پمپاژ و درصد افزایش انتقال حرارت و افت فشار به صورت عددی بررسی شده است. برای این که اثر نانوسیال بر میزان افزایش انتقال حرارت و افت فشار به طور توامان در نظر گرفته شود ضریب جدیدی تعریف شد و مورد تحلیل قرار گرفت.

۳- هندسه مساله

هندسه مسئله در شکل ۱ نشان داده شده است. رژیم جریان سیال درهم بوده و از مدل تک‌فاز برای مدل‌کردن جریان استفاده شده است. دیواره‌ها تحت شرایط شار ثابت می‌باشند. گستره عدد رینولدز، براساس قطر هیدرولیکی کانال، بین ۲۰۰۰ تا ۱۰۰۰۰ می‌باشد. همچنین خواص نانوسیال به‌کار رفته از جمله ضریب انتقال حرارت هدایتی، ویسکوزیته و عدد پراتل به‌صورت تابعی از دما در نظر گرفته شده‌اند.



شکل (۱): هندسه مسئله.

۴- تعیین خواص نانوسیال

یکی از زمینه‌های مرتبط با نانوسیال که محققان زیادی را به سمت خود جلب کرده است، تعیین خواص تغییر یافته سیال در اثر حضور نانوذرات است [۱۸]. در جدول ۲ خواص برخی سیال‌ها و نانوذرات آورده شده است. در این مقاله از نانوذره Al_2O_3 استفاده شده است. با توجه به تغییر غیرطبیعی خواص نانوسیال، به‌خصوص ضریب انتقال حرارت هدایتی و لزجت دینامیکی، تلاش‌های زیادی در جهت شناخت مکانیزم‌هایی که باعث این اختلاف‌ها می‌شوند و دستیابی به رابطه مناسب برای تعیین این خصوصیات صورت گرفته است.

جدول (۲): خصوصیات سیال پایه و نانوذره.

خواصیت	فاز مایع (آب)	فاز مایع (اتیلن گلیکول)	فاز جامد (Al_2O_3)
C_p (J/kgK)	۴۱۷۹	۲۴۷۰	۷۶۵
ρ (kg/m ³)	۹۹۷/۱	۱۱۱۰	۳۹۷۰
k (W/mK)	۰/۶	۰/۲۵۸	۳۶
$\beta \times 10^{-5}$ (1/K)	۲۱	۰/۶۳	-
$\mu \times 10^{-4}$ (kg/ms)	۸/۹	۰/۱۵۵	-

۱-۴- چگالی و گرمای ویژه

برای محاسبه چگالی و گرمای ویژه مخلوط از مدل پک و چو [۱۹] مطابق با روابط استفاده شده است.

$$(\rho)_{nf} = (1-\phi)\rho_f + \phi\rho_p \quad (۱)$$

$$C_{p_{nf}} = \frac{(1-\phi)(\rho C_p)_f + \phi(\rho C_p)_p}{\rho_{nf}} \quad (۲)$$

۲-۴- ضریب هدایت حرارتی

در این مقاله برای مدل‌سازی ضریب انتقال حرارت هدایتی مدل چون و همکاران [۲۰] که توسط مینستا و همکاران [۲۱] مورد تأیید قرار گرفته است، استفاده شده است.

$$\frac{k_{nf}}{k_f} = 1 + 64.7 \phi^{0.746} (df / dp)^{0.369} \times \quad (۳)$$

$$(kp / kf)^{0.7476} Pr_f^{0.9955} Re_p^{1.2321}$$

در معادلات فوق، d_p و d_f قطر ملکول‌های سیال پایه و قطر متوسط نانوذرات هستند. $pr = \frac{\mu_f}{\rho_f \alpha_f}$ و $Re = \frac{\rho_f k_b T}{3 \pi \mu_f^2 \lambda_f}$ به ترتیب اعداد پراتل و رینولدز بوده و α_f ضریب پخش حرارتی، k_b ثابت بولتزمن و λ_f مسافت آزاد میانگین ملکول‌های آب است که در این مقاله طبق پیشنهاد چون و همکاران [۲۰] ۱۷ nm در نظر گرفته شد.

۳-۴- لزجت دینامیکی

مدل‌های مختلفی برای محاسبه ویسکوزیته نانوسیال ارائه شده است [۲۲]. معصومی و همکاران [۲۳] یک مدل جدید برای لزجت دینامیکی نانوسیال ارائه دادند که اثر حرکت براونی، دما و قطر نانوذره را در نظر می‌گرفت:

$$\frac{\mu_{nf}}{\mu_f} = 1 + \frac{\rho_p V_b d_p^2}{72N\delta} \quad (۴)$$

که در آن، $\delta = \sqrt{\frac{\pi d_p}{6\phi}}$ فاصله بین مرکز نانوذرات از یکدیگر

است، $V_b = \frac{1}{d_p} \sqrt{\frac{18k_b T}{\pi \rho_p d_p}}$ سرعت براونی بوده و k_b ثابت بولتزمن

می‌باشد. N در معادله فوق، تابعی از قطر نانوذره و دما می‌باشد که معادله زیر برای آن پیشنهاد شده است:

$$N = (c_1 \phi + c_2) d_p + (c_3 \phi + c_4) \quad (۵)$$

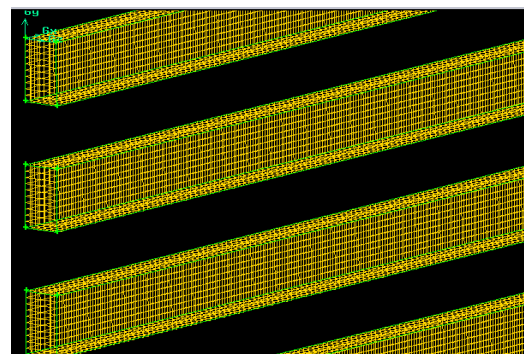
مقادیر زیر با برازش منحنی‌های تجربی استخراج شده است:

$$c_2 = -2.771e^{-6}, \quad c_1 = -1.133e^{-6} \quad (۶)$$

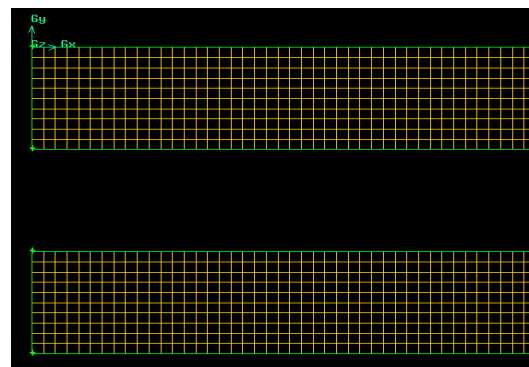
$$c_4 = -3.93e^{-7} \quad \text{و} \quad c_3 = -9.0e^{-8}$$

۵- شبکه‌بندی مساله

لازمه حل عددی تقسیم کردن ناحیه حل به حجم کنترل‌های بسیار کوچک است، که می‌توان خصوصیات سیال را در آن‌ها ثابت فرض کرد. این شبکه می‌تواند دارای ساختار منظم (شبکه‌های با سازمان که در آن هر نقطه از فضا فیزیکی حل با چهار نقطه مشابه دارای مرز مشترک است) و یا ساختار تصادفی (شبکه‌های بی سازمان) باشد. در این مقاله از شبکه با سازمان استفاده شده است. شبکه‌های منظم یا با سازمان شامل مجموعه‌ای از خطوط شبکه هستند که دارای این خصوصیت هستند که هر سلول با سلول‌های مجاور خود دارای یک تقاطع می‌باشند. این ویژگی باعث می‌شود که خطوط شبکه بتوانند به‌طور متوالی شماره‌گذاری شوند و در نتیجه مکان هر نقطه از شبکه یا حجم کنترل در هندسه مساله با مجموعه‌ای از این شماره‌ها مشخص گردد. شبکه‌بندی مورد استفاده دارای ساختار ۶ وجهی مکعبی شکل برای پایداری حل می‌باشد. در شکل ۲ شبکه‌بندی مورد استفاده در این مقاله نشان داده شده است.



(الف)

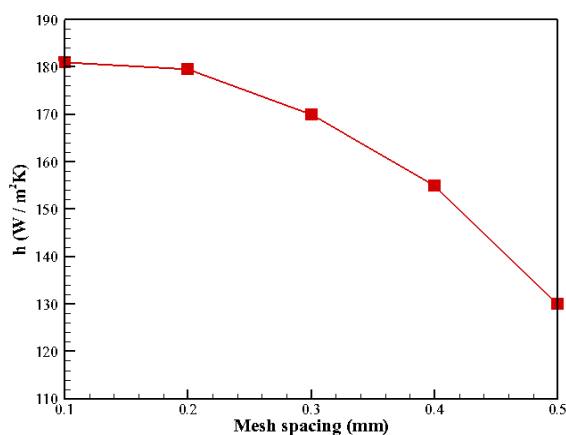


(ب)

شکل (۲): شبکه‌بندی مورد استفاده (الف) نمای سه‌بعدی (ب) نما نزدیک از شبکه منظم استفاده شده.

۶- حل مستقل از شبکه

برای این که نتایج حاصل از شبیه‌سازی به تعداد شبکه وابسته نباشد لازم است تا حل مستقل از شبکه انجام شود. در این تحقیق ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی در رینولدز ۱۰۰۰۰ با کسر حجمی نانوذره اکسید آلومینیم به اندازه ۱٪ برای حل مستقل از شبکه انتخاب گردید. نتایج نشان می‌دهد حداکثر فاصله ممکن بین مش‌ها برای این که حل به شبکه وابسته نباشد ۰/۲ mm است. این امر در شکل ۳ نشان داده شده است.



شکل (۳): ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی در رینولدز ۱۰۰۰۰، کسر حجمی ۱٪، قطر نانوذره ۵۰ نانومتر.

۷- اعتبارسنجی

برای اطمینان از صحت نتایج، آن‌ها را با نتایج تجربی بایبک و همکاران [۲۴] مقایسه کردیم. این مقایسه برای اختلاف فشار در میدان و اختلاف دما بیشینه در میدان انجام شد. در هر دو مورد سازگاری قابل قبول بین نتایج حاصل شد. نتایج مقایسه در جداول ۳ و ۴ و همچنین شکل ۴ نشان داده شده است.

جدول (۳): مقایسه افت فشار و درصد خطا کار حاضر و مقاله بایبک و همکاران [۲۴].

Q(m ³ /s) ×10 ⁶	ΔP(kPa) Present work	ΔP(kPa) Baek et al.[۲۴]	Error (%)
۲	۱۲/۵	۱۳/۱	۴/۵۸
۴	۳۹/۹	۳۲/۵	۴/۹۲
۶	۵۵/۲	۵۸	۴/۸۲۷

الکتریسیته یا گرما تبدیل می‌شود که مطابق با رابطه زیر نشان داده می‌شود [۲۵]:

$$\frac{I}{2F} H_{HHV} = Q_{gen} + IV_{cell} \quad (7)$$

لذا گرما تولیدی برابر خواهد بود با:

$$Q_{gen} = (1.482 - V_{cell})I \quad (8)$$

در معادله (۸)، فرض شده است که تمام آب تولیدی به صورت مایع در دمای 25°C پیل سوختی را ترک می‌کند. اگر تمام آب تولیدی پیل سوختی را به صورت بخار ترک کند، آن‌گاه نرخ حرارت تولیدی در یک پیل سوختی مطابق با رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$Q = P \times ((1.25/V) - 1) \quad (9)$$

که در آن، P توان تولیدی برحسب وات و V ولتاژ پیل برحسب ولت است. ضریب $1/25$ مربوط به حداکثر ولتاژ مدار باز تئوری در یک پیل سوختی است.

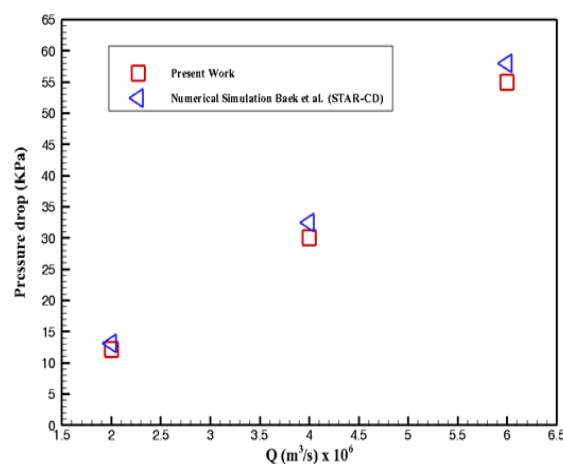
برای یک میدان با مساحت سطح 324 cm^2 و با ولتاژ 0.7 V و چگالی جریان تقریبی 1400 mA/cm^2 ، توان تولیدی پیل سوختی 325 W خواهد شد. برای نسبت عرض ریب به عرض کانال برابر مساحت انتقال دهنده حرارت و مساحت سطحی که جریان در آن برقرار است برابر می‌باشد. از طرفی انتقال حرارت از هر دو سمت صفحه انجام می‌شود و لذا میزان حرارت برای اعمال در شرایط مرزی دیواره‌های بالا و پایین برابر 10030 W/m^2 خواهد بود. اگر میزان مجاز اختلاف دما بین ورودی و خروجی میدان خنک کاری 5°C باشد، میزان دبی مورد نیاز سیال پایه محاسبه خواهد شد. از رابطه زیر برای محاسبه دبی مورد نیاز استفاده می‌شود:

با توجه به ظرفیت گرمایی ویژه آب که 4182 J/kgK می‌باشد و اختلاف دما 5°C ، دبی مورد نیاز محاسبه می‌شود.

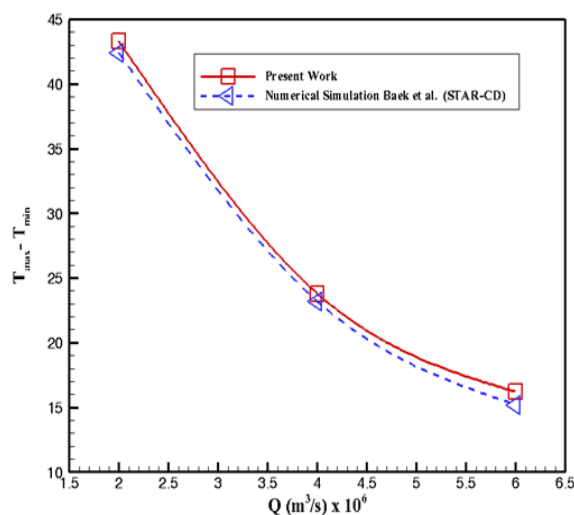
در شکل ۵ ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی برای کسر حجمی‌های مختلف به تصویر کشیده شده است. با توجه به شکل واضح است که با افزایش کسر حجمی ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی افزایش می‌یابد. همان‌طور که می‌دانیم ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی به گرادیان دما، ضریب هدایت گرمایی

جدول (۴): مقایسه اختلاف دما و درصد خطا کار حاضر و مقاله بایک و همکاران [۲۴].

$Q(\text{m}^3/\text{s}) \times 10^6$	$\Delta T(\text{K})$ Present work	$\Delta T(\text{K})$ Baek et al.[۲۴]	Error (%)
۲	۴۳/۳	۴۲/۴	۲/۱۲۳
۴	۲۳/۸	۲۳/۲	۲/۵۸۶
۶	۱۵/۹	۱۵/۲	۴/۶۰۵



(الف)



(ب)

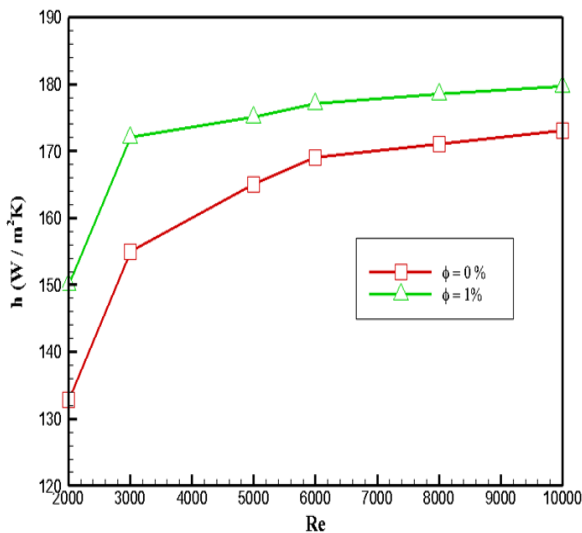
شکل (۴): (الف) مقایسه افت فشار

(ب) مقایسه اختلاف دما بیشینه

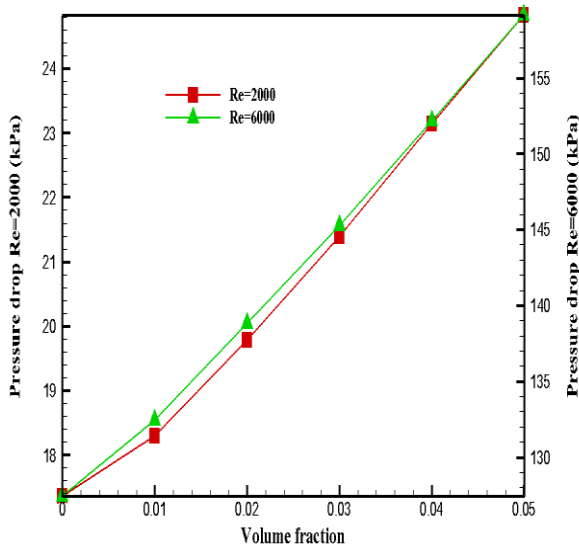
۸- نتایج و بحث

روش‌های متفاوتی برای موازنه انرژی در یک پیل سوختی وجود دارد. در کل، انرژی سوخت (ارزش حرارتی بالا) به

می‌یابد. با افزایش کسر حجمی از ۰ به ۵٪ در رینولدز ۲۰۰۰، ۴۷٪ افزایش افت فشار و در رینولدز ۶۰۰۰، ۲۳٪ افزایش افت فشار مشاهده شده است.



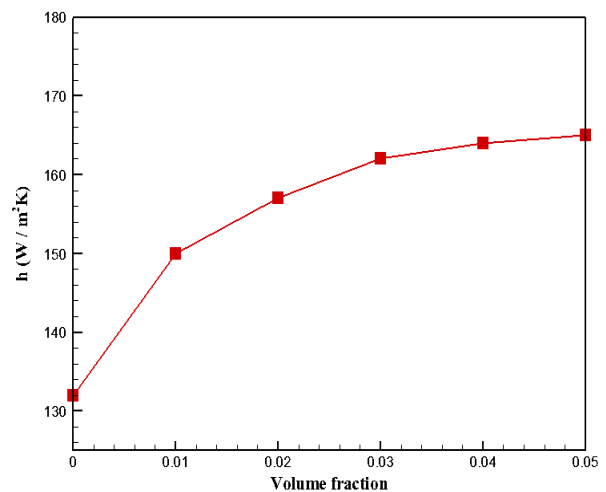
شکل (۶): تاثیر هم‌زمان کسر حجمی و عدد رینولدز در افزایش ضریب انتقال حرارت جابجایی در قطر نانوذره ۵۰ نانومتر.



شکل (۷): افت فشار در رینولدز مختلف و کسر حجمی‌های متفاوت و قطر نانوذره ۵۰ نانومتر.

در شکل ۸ تاثیر قطر نانوذرات بر میزان انتقال حرارت نشان داده شده است. با افزایش قطر نانوذرات ضریب انتقال حرارت هدایتی کاهش یافته و به تبع آن ضریب انتقال حرارتی نانوسیال نیز کاهش خواهد یافت. البته افزایش قطر احتمال

و مقدار دما توده‌ای سیال وابسته است. تاثیر کسر حجمی روی مقدار دما ناچیز است اما از تاثیر مستقیم آن روی افزایش گرادیان دما و ضریب هدایت گرمایی نمی‌توان صرف‌نظر کرد. افزایش کسر حجمی موجب افزایش چگالی سیال و به تبع آن افزایش نیرو اینرسی و گرادیان دما می‌شود. از طرفی با افزایش کسر حجمی ضریب هدایت گرمایی نانوسیال افزایش می‌یابد. در شکل ۵ افزایش ضریب انتقال حرارت جابجایی با کسر حجمی نشان داده شده است.



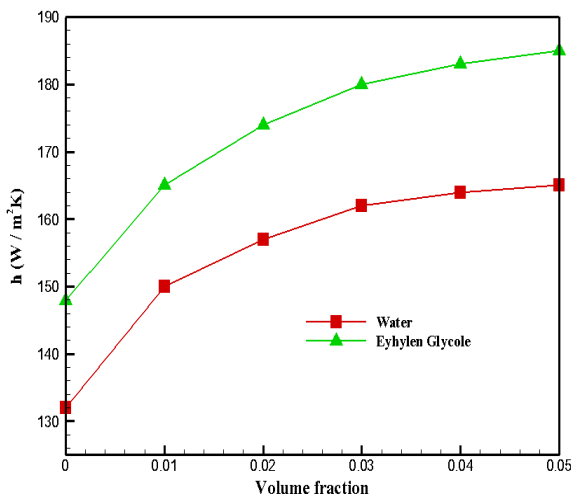
شکل (۵): مقدار ضریب انتقال حرارت جابجایی برای نانوسیال آب روی دیواره بالا برای کسر حجمی‌های مختلف در رینولدز ۲۰۰۰ و قطر نانوذره ۵۰ نانومتر.

در شکل ۶ ضریب انتقال حرارت جابجایی متوسط برای اعداد رینولدز مختلف در دو حالت سیال پایه و مخلوط سیال پایه به همراه ۱٪ کسر حجمی اکسید آلومینیم نشان داده شده است. دو نکته از این شکل قابل استنباط است. اول این‌که با افزایش عدد رینولدز نرخ افزایش ضریب انتقال حرارت جابجایی کاهش می‌یابد و دوم این‌که در رینولدزهای بالا اثر افزایش ناشی از نانوذرات کاهش می‌یابد. به عبارتی دیگر اگر افت فشار را هم در نظر بگیریم به صرفه نیست که در رینولدزهای بالای ۸۰۰۰ از نانوذره استفاده کنیم.

در شکل ۷ اختلاف فشار در رینولدزها و کسر حجمی‌های مختلف رسم شده است. این اختلاف فشار برابر میانگین فشار خروجی منهای فشار ورودی است. همان‌طور که انتظار می‌رود با افزایش کسر حجمی و عدد رینولدز افت فشار افزایش

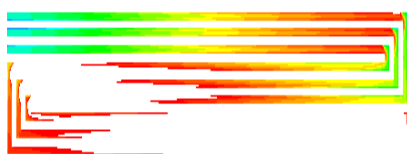
سرعت بیشتر برای یک دبی جرمی مشخص، ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی را افزایش خواهد داد.

شکل توزیع دما در رینولدزهای مختلف برای سیال پایه در شکل ۱۰ نشان داده شده است. برای هر میدان دو شکل نشان داده شده است. در شکل اول نقاطی از میدان که اختلاف دما آن با ورودی بیشتر از ۵ درجه شده است حذف گردیده و در مورد دوم نقاطی که اختلاف دما آن با ورودی بیشتر از ۱۰ درجه شده است حذف گردیده است.



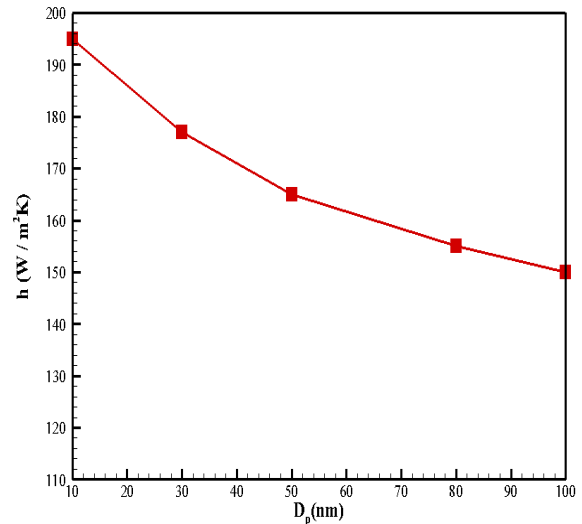
شکل (۹): ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی در دو نانوسیال مختلف و رینولدز ۲۰۰۰.

شکل توزیع دما در کسر حجمی‌های مختلف برای سیال پایه در شکل ۱۱ نشان داده شده است. برای هر میدان دو شکل نشان داده شده است. در شکل اول نقاطی از میدان که اختلاف دما آن با ورودی بیشتر از ۵ درجه شده است حذف گردیده و در مورد دوم نقاطی که اختلاف دما آن با ورودی بیشتر از ۱۰ درجه شده است حذف گردیده است.



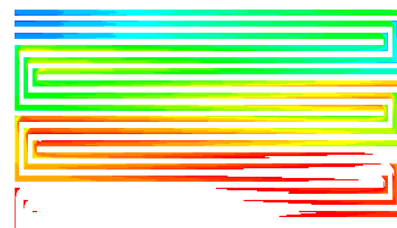
ب) رینولدز ۲۰۰۰، ۵ درجه بیشتر از ورودی

ته‌نشینی را نیز افزایش می‌دهد. مطابق با نتایج به‌دست‌آمده افزایش قطر نانوذرات از ۱۰ به ۱۰۰ نانومتر ۲۱٪ ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی را کاهش می‌دهد.

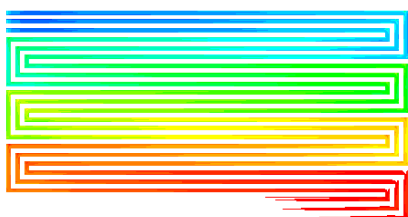


شکل (۸): ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی در قطر نانوذرات مختلف و رینولدز ۲۰۰۰ و کسر حجمی ۵٪.

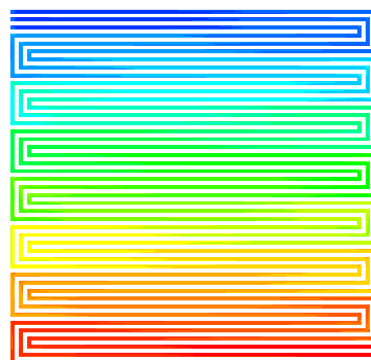
همچنین در این مقاله اثر نوع سیال پایه بر میزان انتقال حرارت بررسی شده است. در شکل ۹ ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی در رینولدز ۲۰۰۰ و در کسر حجمی‌های مختلف برای دو سیال پایه آب و اتیلن گلیکول نشان داده شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی در نانوسیال اتیلن گلیکول بیشتر از نانوسیال آب می‌باشد. به‌عنوان نمونه در کسر حجمی ۳٪ میزان انتقال حرارت جابه‌جایی در نانوسیال اتیلن گلیکول ۱۱٪ بیشتر است. با توجه به این‌که وسکوزیته دینامیکی آب تقریباً ۴ برابر اتیلن گلیکول است، افت فشار ایجاد شده در حالتی که از اتیلن گلیکول استفاده می‌شود بسیار کمتر است و با ایجاد



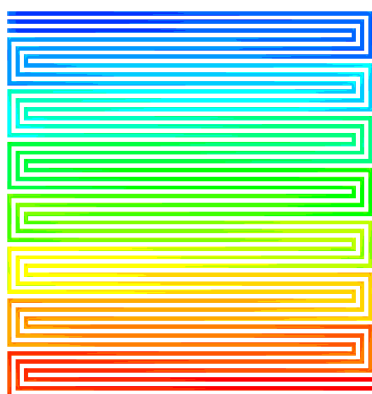
الف) رینولدز ۲۰۰۰، ۱۰ درجه بیشتر از ورودی



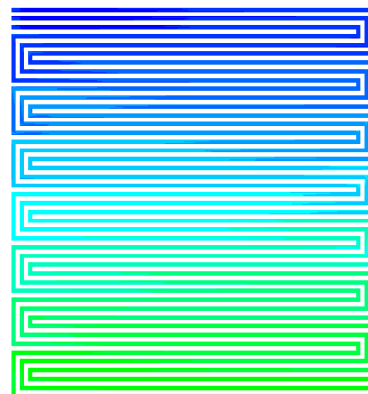
(ب) رینولدز ۵۰۰۰، ۵ درجه بیشتر از ورودی



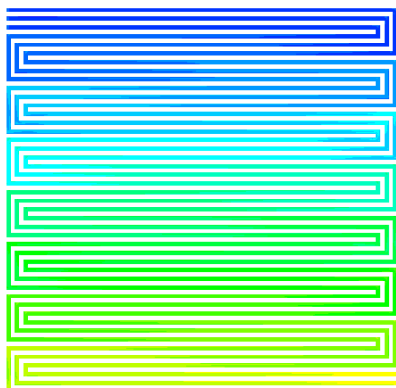
(پ) رینولدز ۱۰۵۰۰، ۱۰ درجه بیشتر از ورودی



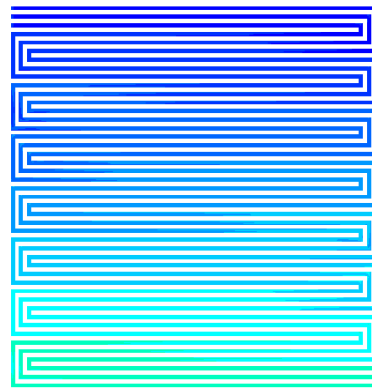
(ج) رینولدز ۵۱۰۰۰، ۵ درجه بیشتر از ورودی



(ث) رینولدز ۱۰۱۰۰۰، ۱۰ درجه بیشتر از ورودی



(ح) رینولدز ۵۱۵۰۰۰، ۵ درجه بیشتر از ورودی



(چ) رینولدز ۱۰۱۵۰۰۰، ۱۰ درجه بیشتر از ورودی

3.48e+02
3.48e+02
3.48e+02
3.47e+02
3.47e+02
3.47e+02
3.47e+02
3.46e+02
3.46e+02
3.46e+02
3.46e+02
3.45e+02
3.45e+02
3.45e+02
3.45e+02
3.44e+02
3.44e+02
3.44e+02
3.44e+02
3.43e+02
3.43e+02



(د) راهنما شکل مربوط به اختلاف دما ۵ درجه

3.53e+02
3.53e+02
3.52e+02
3.52e+02
3.51e+02
3.51e+02
3.50e+02
3.50e+02
3.49e+02
3.49e+02
3.49e+02
3.48e+02
3.48e+02
3.47e+02
3.47e+02
3.46e+02
3.46e+02
3.45e+02
3.45e+02
3.44e+02
3.44e+02
3.43e+02

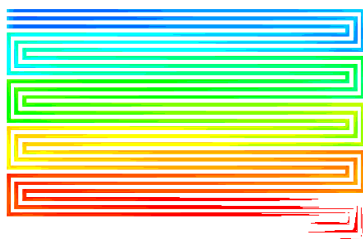


(خ) راهنما شکل مربوط به اختلاف دما ۱۰ درجه

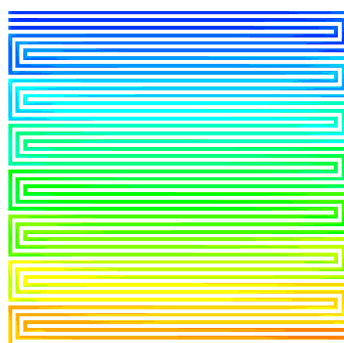
شکل (۱۰): توزیع دما در رینولدزهای مختلف و برای دو حالت اختلاف دمای بزرگتر از ۵ و ۱۰ درجه.

نگه داریم. این در حالی است که برای سیال پایه حداقل باید رینولدز جریان به ۹۰۰۰ برسد. به عبارتی ۳۳٪ از دبی جرمی ورودی کاسته شده است.

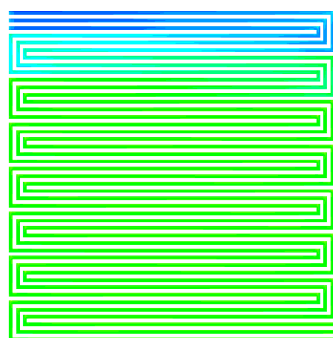
نتایج نشان داده است که با استفاده از مخلوط آب و ۲٪ نانو ذره اکسید آلومینیم در رینولدز ۶۰۰۰ خواهیم توانست اختلاف دما تمامی نقاط را نسبت به ورودی کمتر از ۵ درجه



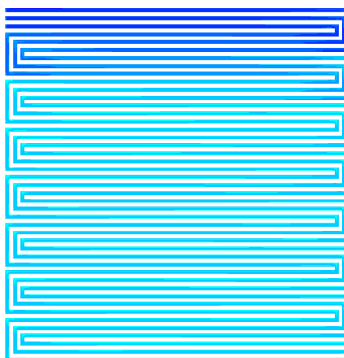
ب) کسر حجمی ۰٪، ۵ درجه بیشتر از ورودی



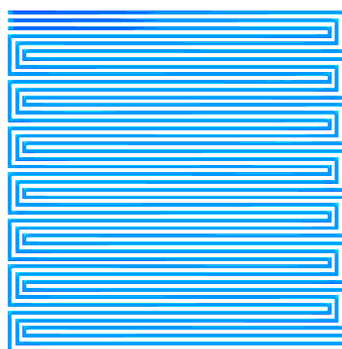
الف) کسر حجمی ۰٪، ۱۰ درجه بیشتر از ورودی



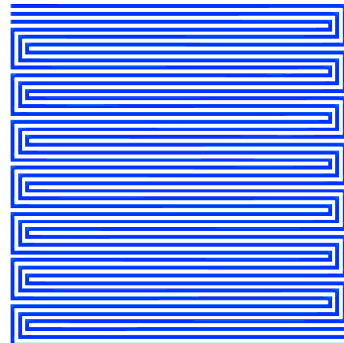
ت) کسر حجمی ۲٪، ۵ درجه بیشتر از ورودی



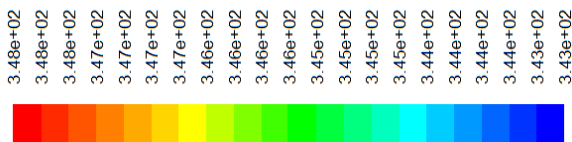
پ) کسر حجمی ۲٪، ۱۰ درجه بیشتر از ورودی



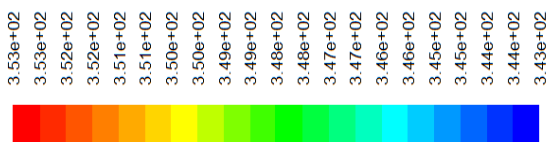
ج) کسر حجمی ۵٪، ۵ درجه بیشتر از ورودی



ث) کسر حجمی ۵٪، ۱۰ درجه بیشتر از ورودی



ج) راهنما شکل مربوط به اختلاف دما ۵ درجه

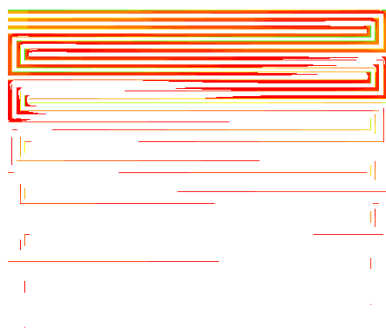


چ) راهنما شکل مربوط به اختلاف دما ۱۰ درجه

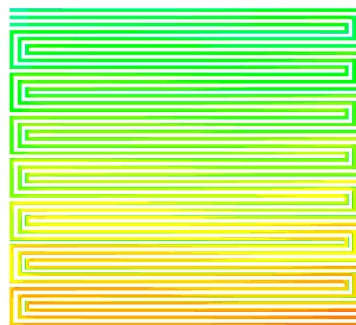
شکل (۱۱): توزیع دما در کسر حجمی‌های مختلف و رینولدز ۶۰۰۰ و برای دو حالت اختلاف دما بزرگتر از ۵ و ۱۰ درجه.

با ورودی بیشتر از ۱۰ درجه شده است حذف گردیده است. همان‌گونه که پیداست با افزایش کسر حجمی مساحت ناحیه با اختلاف دما بزرگتر از ۵ درجه نسبت به ورودی، مدام در حال کاهش است.

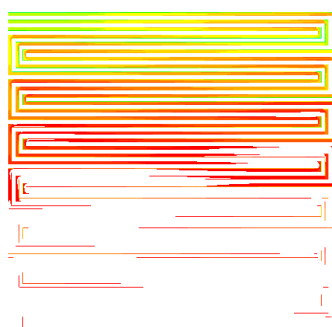
شکل توزیع دما در کسر حجمی‌های مختلف برای سیال پایه اتیلن‌گلیکول در شکل ۱۲ نشان داده شده است. برای هر میدان دو شکل نشان داده شده است. در شکل اول نقاطی از میدان که اختلاف دما آن با ورودی بیشتر از ۵ درجه شده است حذف گردیده و در مورد شکل دوم نقاطی که اختلاف دما آن



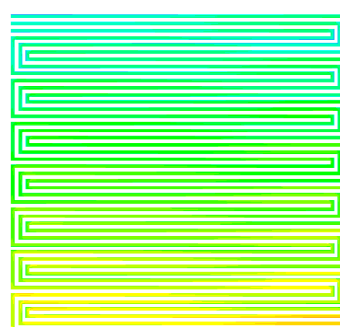
ب) کسر حجمی ۰.۰۵، ۵ درجه بیشتر از ورودی



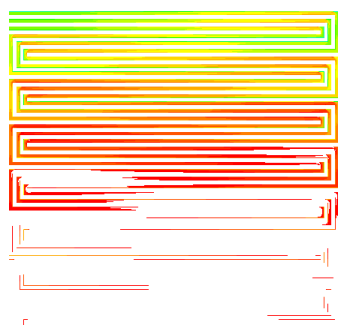
الف) کسر حجمی ۰.۱۰، ۱۰ درجه بیشتر از ورودی



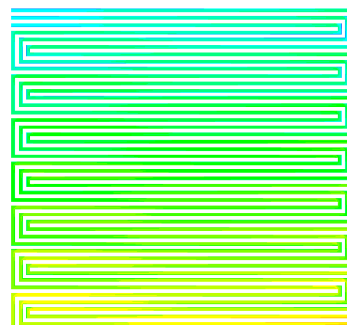
ت) کسر حجمی ۰.۰۲، ۵ درجه بیشتر از ورودی



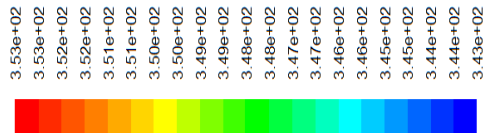
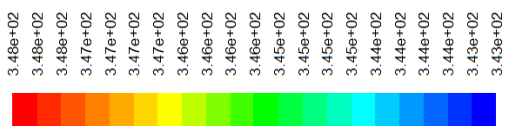
پ) کسر حجمی ۰.۰۲، ۱۰ درجه بیشتر از ورودی



ج) کسر حجمی ۰.۰۵، ۵ درجه بیشتر از ورودی



ث) کسر حجمی ۰.۰۵، ۱۰ درجه بیشتر از ورودی



ح) راهنما شکل مربوط به اختلاف دما ۵ درجه

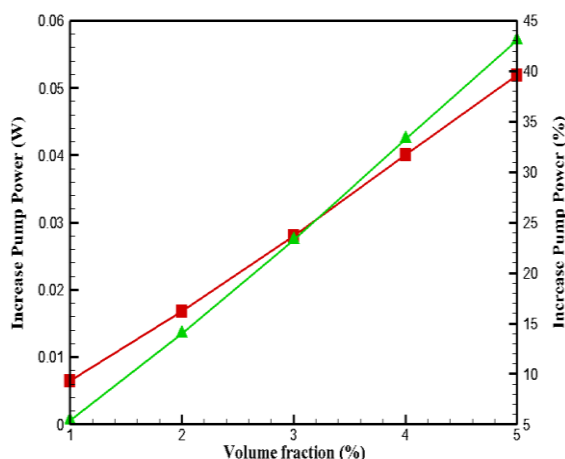
چ) راهنما شکل مربوط به اختلاف دما ۱۰ درجه

شکل (۱۲): توزیع دما در کسر حجمی‌های مختلف و رینولدز ۲۰۰۰ و برای دو حالت اختلاف دما بزرگتر از ۵ و ۱۰ درجه.

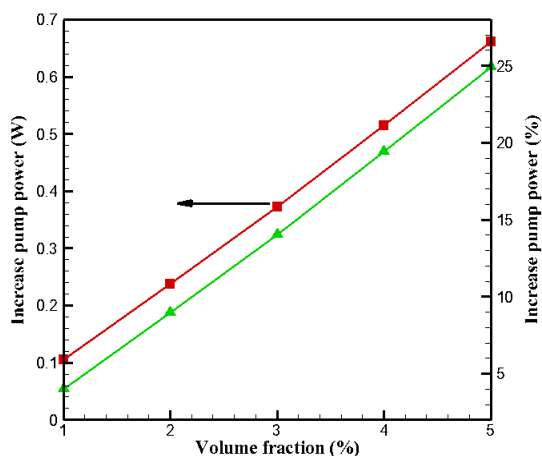
۹- نقش نانوسیال در پیکره‌بندی میدان شارش
 برای این که نقش کلی و موثر نانوسیال را در کسر حجمی‌های مختلف بدانیم، ضریبی به‌نام ضریب فایده

(Factor Advantage) تعریف کردیم. این ضریب نسبت درصد افزایش انتقال حرارت به درصد افزایش افت فشار را نشان می‌دهد. در صورتی که این نسبت بزرگتر از ۱ باشد

نانوسیال با درصد حجمی ۵٪ استفاده می‌شود را حساب کنیم، عددی معادل با ۴۰ وات به دست خواهد آمد که در مقابل کاهش چشمگیر حجم و اندازه سامانه خنک‌کاری بسیار ناچیز است.



شکل (۱۴): افت فشار و درصد افزایش آن در کسر حجمی‌های مختلف در رینولدز ۲۰۰۰، (سیمبل ■ درصد افزایش افت فشار، و سیمبل ▲ درصد افزایش توان پمپ را نشان می‌دهد).

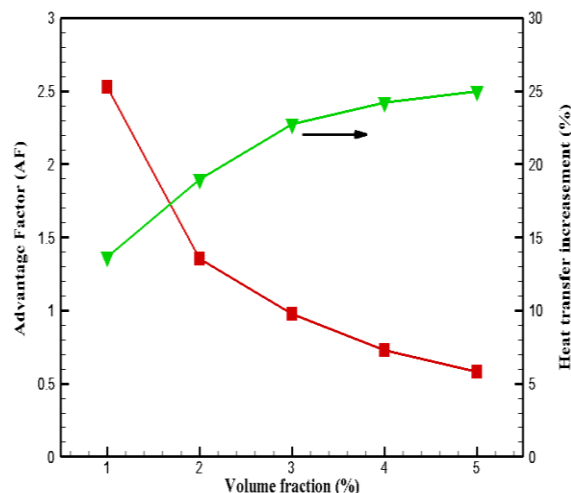


شکل (۱۵): افت فشار و درصد افزایش آن در کسر حجمی‌های مختلف در رینولدز ۶۰۰۰.

۱۰- نتیجه‌گیری

همیشه خنک‌کاری پیل سوختی به‌عنوان چالشی برای خودروسازانی که از تکنولوژی پیل سوختی استفاده می‌کنند برجسته و مطرح بوده است. با وجود این که پیل‌های سوختی بازده بالایی را در تبدیل انرژی دارند، میزان قابل توجهی گرما تولید می‌کنند. در مقایسه با موتورهای احتراق داخلی، اختلاف

استفاده از نانو سیال توجیه منطقی خواهد داشت. همان‌طور که از شکل ۱۳ پیداست تا کسر حجمی ۳٪ این ضریب بزرگتر از ۱ است و بعد از آن روند نزولی پیدا می‌کند.



شکل (۱۳): ضریب فایده و درصد افزایش انتقال حرارت در کسر حجمی‌های مختلف.

افزایش انتقال حرارت در دو پارامتر تاثیرگذار می‌باشد. ۱- سطح انتقال حرارت ۲- دبی جرمی ورودی مورد نیاز. در مورد گزینه کاهش سطح انتقال حرارت با توجه به این که میدان خنک‌کاری در یک استک^۱ با بقیه اجزاء سری و یکپارچه می‌باشد نمی‌توان مساحت انتقال حرارت را کاهش داد و تنها می‌توان با افزایش نسبت عرض ریب^۲ به عرض کانال در میدان، شارش مقاومت تماسی را کاهش داد. اما می‌توان حجم سامانه‌های خنک‌کاری مورد نیاز برای خنک کردن آب خروجی از استک که شامل مبدل‌های حرارتی، رادپاتورها و دیونایزرها می‌باشد را تا حدود زیادی کاهش داد. در مورد گزینه کاهش دبی جرمی ورودی نیز می‌توان با کوچک کردن پمپ مورد نیاز برای سامانه خنک‌کاری توان پارازیتی را کاهش داد و از طرفی با کم کردن سرعت سیال آثار ناشی از جت شدن جریان و بدتوزیعی ناشی از آن را به شدت کاهش داد. در شکل‌های ۱۴ و ۱۵ میزان افزایش قدرت پمپ و درصد افزایش آن در رینولدزهای ۲۰۰۰ و ۶۰۰۰ نشان داده شده است. مشاهده می‌شود، میزان افزایش لازم برای پمپاژ در برابر توان تولیدی پیل سوختی ناچیز است. به‌عنوان نمونه اگر بخواهیم افزایش توان مورد نیاز در یک استک ۱۶ کیلووات را برای زمانی که از

رینولدز جریان به ۹۰۰۰ برسد. به عبارتی ۳۳٪ از دبی جرمی ورودی کاسته شده است.

❖ افزایش انتقال حرارت در دو پارامتر تاثیرگذار می باشد
۱- سطح انتقال حرارت ۲- دبی جرمی ورودی مورد نیاز. در مورد گزینه کاهش سطح انتقال حرارت با توجه به این که میدان خنک کاری در یک استک با بقیه اجزاء سری و یک پارچه می باشد، نمی توان مساحت انتقال حرارت را کاهش داد و تنها می توان با افزایش نسبت عرض ریب به عرض کانال در میدان شارش مقاومت تماسی را کاهش داد. اما می توان حجم سامانه های خنک کاری مورد نیاز برای خنک کردن آب خروجی از استک، که شامل مبدل های حرارتی، رادیاتورها و دیونایزرها می باشد را تا حدود زیادی کاهش داد. در مورد گزینه کاهش دبی جرمی ورودی نیز می توان با کوچک کردن پمپ مورد نیاز برای سامانه خنک کاری توان پارازیتی را کاهش داد و از طرفی با کم کردن سرعت سیال آثار ناشی از جت شدن جریان و بدتوزیعی ناشی از آن را به شدت کاهش داد.

❖ میزان افزایش لازم برای پمپاژ در برابر توان تولیدی پیل سوختی ناچیز است. به عنوان نمونه اگر بخواهیم افزایش توان مورد نیاز در یک استک ۱۶ کیلووات را برای زمانی که از نانوسیال با درصد حجمی ۵٪ استفاده می شود را حساب کنیم، عددی معادل با ۴۰ وات به دست می آید که در مقابل کاهش چشم گیر حجم و اندازه سامانه خنک کاری بسیار ناچیز است.

۱۱- مراجع

1. Islam, M. R., Shabani, B., and Rosengarten, G. "Nanofluids to improve the performance of PEM fuel cell cooling systems: A theoretical approach", APPL. ENERG, Vol. 178, pp. 660-671, 2016.
2. Maxwell, J. C. "Treatise on Electricity and Magnetism", 2th edition Clarendon Press, Oxford, UK, 1881.
3. Choi, S. U. S., Siginer, D. A., and Wang, H. P. "Enhancing Thermal Conductivity of Fluids with Nanoparticles, Developments and Applications of Non-Newtonian Flows", The American Society of Mechanical Engineers, New York, FED-Vol. 231 / MD-Vol.66, pp. 99-105, 1995.
4. Keblinski, P.P., Choi, S.U.S. and Eastman, J. A. "Mechanisms of heat flow in suspensions of nano-sized particles (nanofluids)", INT. J. HEAT. MASS. TRAN, Vol. 45, pp.855-863, 2002.

دما کارکرد پیل سوختی (۸۰-۶۰ درجه سانتی گراد) و محیط اطراف (۳۰-۲۰ درجه سانتی گراد) نسبتاً کوچک می باشد. این اختلاف دما در اقلیم های گرم مانند صحراها که دما به ۵۰ درجه و بیشتر می رسد، کمتر می باشد. این اختلاف دمای بسیار کم موجب می شود تا طراحی سبک و کوچک سامانه خنک کننده که بتواند کارایی های مورد نیاز را نیز داشته باشد بسیار چالش برانگیز باشد. تا الان ثابت شده است که نانوسیال ها برای خنک کاری و کارایی گرمایی بسیار مناسب تر از سیال های قدیمی مرسوم که برای انتقال حرارت استفاده می شدند عمل می کنند. با توجه به بالاتر بودن بازده نانوسیال ها، برای دفع مقدار حرارت یکسان، میزان سیال کمتری مورد نیاز است که در نتیجه امکان استفاده از مبدل های حرارتی کوچکتر و جاگیری بهتر این مبدل ها در اتومبیل ها را برای ما ممکن می سازد.

نتایج و دستاوردهای حاصل از این بررسی شامل موارد زیر است:

❖ ضریب انتقال حرارت جابجایی در نانوسیال اتیلن گلیکول بیشتر از نانوسیال آب می باشد. به عنوان نمونه در کسر حجمی ۳٪، میزان انتقال حرارت جابجایی در نانوسیال اتیلن-گلیکول ۱۱٪ بیشتر است.

❖ با افزایش کسر حجمی و عدد رینولدز افت فشار افزایش می یابد. با افزایش کسر حجمی از ۰ به ۵٪ در رینولدز ۲۰۰۰، ۴۷٪ افزایش افت فشار و در رینولدز ۶۰۰۰، ۲۳٪ افزایش افت فشار مشاهده شده است.

❖ با افزایش عدد رینولدز نرخ افزایش ضریب انتقال حرارت جابه جایی کاهش می یابد و در رینولدزهای بالا اثر افزایش ناشی از نانوذرات کاهش می یابد.

❖ با افزایش قطر نانوذرات ضریب انتقال حرارت هدایتی کاهش یافته و به تبع آن ضریب انتقال حرارتی نانوسیال نیز کاهش یافته است. البته افزایش قطر، احتمال ته نشینی را نیز افزایش می دهد. مطابق با نتایج به دست آمده افزایش قطر نانوذرات از ۱۰ به ۱۰۰ نانومتر، ۲۱٪ ضریب انتقال حرارت جابه جایی را کاهش می دهد.

❖ نتایج نشان داده است که با استفاده از مخلوط آب و ۲٪ نانوذره اکسید آلومینیم در رینولدز ۶۰۰۰، خواهیم توانست اختلاف دما تمامی نقاط را نسبت به ورودی کمتر از ۵ درجه نگه داریم. این درحالی است که برای سیال پایه حداقل باید

16. Zakaria, I., Mohamed, W.A.N.W., Bin Mamat, A.M.I., Saidur, W.H., Rizalman, M., Tali, S.F.A. "Experimental Investigation of Al₂O₃ - Water Ethylene Glycol Mixture Nanofluid Thermal Behaviour in a Single Cooling Plate for PEM Fuel Cell Application", ENRGY. PROCED, Vol. 79, pp. 252 – 258, 2015.
17. Zakaria, I., Azmi, W.H., Mamat, A.M.I., Rizalman M., Saidur, R., Abu Talib, S.F., Mohamed, W.A.N.W. "Thermal analysis of Al₂O₃water ethylene glycol mixture nanofluid for single PEM fuel cell cooling plate: An experimental study", INT. J. HYDROGEN. ENERG, Vol. 41, No. 9, pp. 5096-5112, 2016.
18. M. Hemmat Esfe and S. Saedodin, S.S Mir-Talebi, Influence of Variable Properties Nanofluid on Combined Convection Heat Transfer in a Two Sided Lid-Driven Enclosure with Sinusoidal Temperature Profile, Aerospace Mechanical Journal, Vol. 10, No.2, pp. 51-63, 2012 (In Persian).
19. Pak, B. C., and Cho, Y. I. "Hydrodynamic and heat transfer study of dispersed fluids with submicron metallic oxide particles", EXP. HEAT. TRANSFER, Vol. 11, pp.151–170, 1998.
20. Chon, C. H., and Kihm, K. D. "Thermal Conductivity Enhancement of Nanofluids by Brownian Motion", J. HEAT. TRANSF, Vol. 127, No.8, pp. 810, 2005.
21. Mintsa, H. A., Roy, G., Nguyen, C. T., and Doucet, D. "New Temperature Dependent Thermal Conductivity Data for Water-Based Nanofluids", INT. J. THERM. SCI, Vol. 48, No. 2, pp. 363-371, 2009.
22. A. Shateri and M.M. Zarei Kurdshouli, V. Zarei, Calculation of the Viscosity of Nanofluid Water SPC Model in Molecular Dynamics, Aerospace Mechanical Journal, Vol. 6, No.1, pp. 67-78, 2017 (In Persian).
23. Masoumi, N., Sohrabi, N., and Behzadmehr, A. "A new model for calculating the effective viscosity of nanofluids", J. PHYS. D. APPL. PHYS, Vol. 42, pp. 055-501, 2009.
24. Baek, S.M., Yu, S.H., Nam, J.H., Kim, C. "A numerical study on uniform cooling of large-scale PEMFCs with different coolant flow field designs", APPL. THERM. ENG, Vol. 31, pp.1427-1434, 2011.
25. Frano Barbir, "PEM Fuel Cells: Theory and Practice", 2nd Edition, 2012.
5. Wang, X., Xu, X. and Choi, S. U. S. "Thermal conductivity of nanoparticle-fluid mixture", J. THERMOPHYS. HEAT. TR, Vol. 13, pp. 474–480, 1999.
6. Xuan, Y., and Li, Q. "Heat transfer enhancement of nanofluids", INT. J. HEAT. MASS. TRAN, Vol. 21, pp.58–64, 2000.
7. Duangthongsuk, W., and Wongwise, S. "Comparison of the effects of measured and computed thermophysical properties of nanofluids on heat transfer performance", EXP. THERM. FLUID. SCI, Vol. 34, pp. 616–624, 2010.
8. Lee, S. Choi, S. U .S., Li, S. and Eastman, J. "Measuring thermal conductivity of fluids containing oxide nanoparticles", ASME, pp. 280–289,1999.
9. Xie, H., Wang, J., Xi, T., Liu, Y., Ai, F., and Wu, Q. "Thermal conductivity enhancement of suspensions containingnanosized alumina particles". J. APPL. PHYS, pp. 4568–4572, 2002.
10. Das, S.K. Putra, N. Thiesen, P. and W.Roetzel, "Temperature dependence of thermal conductivity enhancement fornanofluids", ASME, pp. 567–574,2003.
11. Wen, D., and Ding, Y. "Experimental investigation into convective heat transfer ofnanofluids at the entrance region under laminar flow conditions", INT. J. HEAT. MASS. TRAN, Vol. 47, pp. 5181–5188,2004.
12. Heris, S. Z., Etemad, S. G., and Esfahany, M. N. "Experimental investigation of oxide nanofluids laminar flow convective heat transfer", INT. COMMUN. HEAT. MASS, Vol. 33, pp. 529–535, 2006.
13. Roy, G. C., Nguyen, T., and Lajoie, P. R. "Numerical investigation of laminar flow and heat transfer in a radialflow cooling system with the use of nanofluids", SUPERLATTICE. MICROST, Vol.35, pp. 497–511, 2004.
14. Xuan, Y., and Li, Q. "Heat Transfer Enhancement of Nanofluids", INT. J. HEAT. FLUID. FL, Vol. 21, pp. 58-64, 2000.
15. Zakaria, I., Mohamed, W.A.N.W., Bin Mamat, A.M.I., Azmi, W.H., Mamat, R., Sainan, K.I., Ismail, H. "Thermal Analysis of Heat Transfer Enhancement for Low Concentration of Al₂O₃ Water - Ethylene Glycol Mixture Nanofluid in a Single PEMFC Cooling Plate", ENRGY. PROCED, Vol. 79, pp. 259 – 264, 2015.

