

مطالعه تجربی اثر نانوسیالات پایه روغن بر مشخصه‌های انتقال حرارت در آرایش‌های مختلف میکروکانال‌های موجی

فاطمه مرادی^۱ - مرتضی خیاط^{۲*} - محمد حسن نوبختی^۳

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مکانیک، برق و کامپیوتر (دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات)

^{۲*} استادیار، دانشکده مکانیک، برق و کامپیوتر (دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات)

^۳ استادیار، دانشکده مکانیک، برق و کامپیوتر (دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات)

Iamfatemehmoradi@gmail.com
mkhayat@srbiau.ac.ir Corresponding author:
m.nobakhti@srbiau.ac.ir

چکیده

هدف از این پژوهش بررسی تجربی مشخصه‌های انتقال حرارت نانوسیالات پایه روغن درون میکروکانال‌های موجی با چینش سری و موازی می‌باشد. آزمایشات بر روی سیال پایه روغن حاوی نانوذرات فلزی و غیرفلزی TiO_2 و SiO_2 در غلظت‌های حجمی ۰.۰۵٪ و ۰.۱٪ در سه دبی مختلف ۰.۵، ۱ و ۱.۵ لیتر بر دقیقه و چهار دمای ورودی ۴۰، ۴۵، ۵۰ و ۵۵ درجه سانتی‌گراد انجام گرفت. نتایج نشان‌دهنده افزایش عدد ناسلت سیال پایه تا ۴۱.۸٪ در چینش سری و کاهش دمای سطح در چینش سری نسبت به موازی می‌باشد. همچنین نانوسیالات TiO_2 و SiO_2 با غلظت حجمی ۰.۱٪ به ترتیب بیشترین میزان افزایش انتقال حرارت را تا ۵۶٪ و ۵۲.۷٪ در چینش موازی و ۴۵.۸٪ و ۴۲٪ در چینش سری نسبت به سیال پایه داشته‌اند. نهایتاً افت فشار مقطع تست در چینش سری ۸۲.۱٪ بیشتر از چینش موازی ثبت گردید.

واژه‌های کلیدی

میکروکانال، نانوسیال پایه روغن، انتقال حرارت جابجایی، عدد ناسلت، جریان آرام، افت فشار

Experimental study of the effect of oil-based nanofluid on heat transfer characteristics in different arrangements of wavy microchannels

Fatemeh Moradi: Ms.c student, Faculty of Mechanics, Electricity and Computer (Islamic Azad University of Science and Research)

Morteza Khayat* : Assistant Professor, Faculty of Mechanics, Electricity and Computer (Islamic Azad University of Science and Research)

Mohammad Hasan Nobakhti: Assistant Professor, Faculty of Mechanics, Electricity and Computer (Islamic Azad University of Science and Research)

lamfatemehmoradi@gmail.com
mkhayat@srbiau.ac.ir Corresponding author:
m.nobakhti@srbiau.ac.ir

Abstract

The development of microchannel manufacturing technology has led to a growing interest in using them as heat exchangers. Microchannels are used to control the temperature of equipment and components that generate a high amount of heat flux. Heat transfer can be further increased by dispersing particles (nano-sized particles) with a low volume fraction into the base fluid (nanofluid). A nanofluid can change the thermophysical properties of a base fluid and improve its thermal performance. The purpose of this study was to examine the heat transfer characteristics of oil-based nanofluid within wavy microchannels in series and parallel arrangements of microchannels. In order to examine the performance of each microchannel separately and to make it easier to draw their diagrams, they are named 1 and 2. Experiments were performed on TiO_2 and SiO_2 oil-based nanofluids in volume fractions of 0.05 and 0.1, flow rates of 0.5, 1.0 and 1.5 lit/min and inlet temperatures of 40°C, 45°C, 50°C, 55°C. The results show an increase in the Nusselt number of the base fluid up to 41.8% in the series arrangement and also a decrease in the surface temperature in the series arrangement compared to the parallel arrangement. Also, TiO_2 and SiO_2 nanofluids with volume fraction of 0.1 caused the highest increase in heat transfer up to 56% and 52.7% in parallel arrangement and up to 45.8% and 42% in series arrangement compared to the base fluid, respectively. The pressure drop of the test section in series arrangement was up to 82.1% higher than parallel.

Keywords: microchannel, oil-based nanofluid, convective heat transfer, Nusselt number, laminar flow, pressure drop

با پیشرفت تکنولوژی در زمینه‌های مختلف از جمله الکترونیک، ابزار نوری، راکتورهای هسته‌ای، سیستم‌های ماکروویو با فرکانس بالا و میکروپروسورها، نیاز به خنک کردن موثر این ابزار با نرخ گرمایی بالا وجود دارد که به علت تولید حرارت زیاد هنگام کار توسط این قطعات ایجاد می‌شود. گرم شدن قطعات سبب پایین آمدن توان و بازده دستگاه، خرابی و از کارافتادگی آن می‌گردد. بنابراین یکی از مهم‌ترین مسائل در صنعت، دفع این گرما از دستگاه‌ها می‌باشد که به کارکرد مناسب دستگاه در دمای پایین و مطلوب کمک می‌کند. بر گلز و همکاران [۱] روش‌های بهبود انتقال حرارت را به دو دسته‌ی فعال و غیرفعال تقسیم کردند. روش‌های فعال شامل استفاده از توان خارجی جهت ایجاد اختلاط مکانیکی، ارتعاش سطح و سیال، لرزش، مکش، تزریق و القای میدان الکترواستاتیکی یا مغناطیسی می‌باشد که به علت هزینه‌های سنگین و پیچیدگی‌های بسیار در طراحی عمدتاً غیرقابل استفاده هستند. از روش‌های غیرفعال می‌توان به اضافه نمودن افزودنی‌ها به سیال پایه و کاهش ابعاد کانال اشاره کرد. در این پژوهش از روش غیرفعال (استفاده توام از مبدل میکروکانالی و افزودن نانوذرات به سیال پایه) استفاده شده است.

میکروکانال با افزایش تاثیر رسانش و گرادیان دما در قطعه، نقش به‌سزایی در بهبود عملکرد قطعات گرمازا دارد. از دیگر ویژگی‌های آن می‌توان به فشردگی و افزایش نسبت سطح به حجم، کارایی بالای گرمایی و وزن کم اشاره کرد. میکروکانال‌هایی که در زمینه‌ی خنک‌سازی قطعات و ابزارهای گوناگون کاربرد دارند را اصطلاحاً چاه گرمایی میکروکانالی^۱ می‌نامند. ایده‌ی استفاده از میکروکانال‌ها اولین بار توسط تاگرمین و پیس [۲] مطرح شد. آن‌ها از یک میکروکانال مستطیلی به همراه یک زیرلایه‌ی سیلیکونی به ابعاد $1 \times 1 \text{ cm}^2$ استفاده کردند و با استفاده از آب به عنوان سیال خنک‌کننده و میکروکانال طراحی شده توانستند میزان $790 \frac{W}{\text{cm}^2}$ شار حرارتی را جذب کنند. گایکواد و نالواوه [۳] در یک مطالعه تجربی به بررسی مشخصه‌های انتقال حرارت آب درون میکروکانال‌های مستقیم و موجی پرداختند. تمامی آزمایشات در محدوده رینولدزهای ۱۰۰ تا ۱۰۰۰ صورت گرفت. نتایج پژوهش آن‌ها نشان داد که میکروکانال موجی افزایش چشم‌گیری در میزان انتقال حرارت نسبت به میکروکانال مستقیم داشته است. آن‌ها همچنین گزارش کردند که افزایش ۵۸ الی ۸۸ درصدی انتقال حرارت

درون میکروکانال موجی، با افزایش ۲۲ تا ۳۵ درصدی میزان افت فشار نیز همراه بوده است. کونگ و همکاران [۴] در مطالعه‌ای آزمایشگاهی به بررسی یک چاه گرمایی منیفولد میکروکانالی ساخته شده به‌وسیله پرینت سه بعدی پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد که چاه گرمایی مذکور قابلیت دفع شار گرمایی تا $240 \frac{W}{\text{cm}^2}$ با نرخ جریان جرمی $395 \frac{gr}{\text{min}}$ را دارا می‌باشد و تنها 1.7 kpa افت فشار ایجاد می‌کند. اسپیزچینو و همکاران [۵] در یک مطالعه آزمایشگاهی به بررسی رفتار ترمو-هیدرودینامیکی یک میکروکانال مارپیچی با سطح مقطع مربعی و یک میکروکانال موجی سینوسی پرداختند و نتایج آزمایشات خود را با یک میکروکانال موازی مستقیم مقایسه نمودند. محدوده رینولدز مورد بررسی آن‌ها ۱۵۰۰-۵۰ و در رژیم جریان آرام بود. نتایج نشان داد عملکرد حرارتی میکروکانال موجی سینوسی بهتر از مدل مارپیچی و عملکرد مدل مارپیچی بهتر از گونه موازی مستقیم بوده است. زنگ و همکاران [۶] طی یک آزمایش تجربی به بهینه سازی عملکرد حرارتی-هیدرولیکی مبدل‌های میکروکانالی زیگزاگی با استفاده از هندسه نامتقارن پرداختند. در این پژوهش، میکروکانالی با کانال‌های زیگزاگی نامتقارن به همراه دیواره‌های سرد و گرم بررسی گردید و سیال عامل مورد استفاده آب بود. در مقایسه با بخش سرد، قطر هیدرولیکی کانال‌های بخش گرم، بزرگ‌تر طراحی شدند که این امر منجر به افزایش سطح انتقال حرارت گردید و عملکرد حرارتی میکروکانال با ساختارهای نامتقارن و متقارن مقایسه گردیدند. نتایج نشان داد که میکروکانال نامتقارن از نظر حجم، وزن و اثربخشی سطح نسبت به میکروکانال متقارن بهتر است و هرچه دمای کاری بالاتر باشد، این برتری افزایش می‌یابد.

پنگ و همکاران [۷] طی یک مطالعه تجربی به بررسی عملکرد حرارتی میکروکانال مارپیچی-زیگزاگی پرداختند. سیال عامل مورد استفاده آن‌ها آب دیونیزه بود. نتایج نشان داد میکروکانال مارپیچی-زیگزاگی در مقایسه با میکروکانال ساده عملکرد حرارتی بهتری دارد. ژو و همکاران [۸] در یک مطالعه آزمایشگاهی به بررسی عملکرد حرارتی-هیدرولیکی میکروکانال زیگزاگی با هندسه متقارن پرداختند. نتایج تحقیق نشان داد که به دلیل ساختار صفحه یکسان، انتقال حرارت سمت سرد و گرم مبدل حرارتی میکروکانالی یکسان است. دای و همکاران [۹] در یک مطالعه تجربی به بررسی خصوصیات هیدرودینامیکی و انتقال حرارت آب از طریق میکروکانال موج‌دار و زیگزاگ شکل برای محدوده رینولدز ۵۰-۹۰۰ پرداختند. نتایج پژوهش آن‌ها

نشان داد که افزایش انتقال حرارت قابل توجهی در کانال‌های موج‌دار و زیگزاک در مقایسه با کانال مستقیم حاصل می‌شود اما باعث تشدید افت فشار نیز خواهد شد. در پی مطالعات اولیه بر روی میکروکانال‌ها، برخی از محققین در تلاش بوده‌اند تا با استفاده از نانوسیالات انتقال حرارت را بهبود بخشند. از کاربردهای نانوسیالات می‌توان به استفاده از آن‌ها در سرمایش (رادپاتور خودرو، مبدل‌های صنعتی، راکتورهای هسته‌ای، قطعات الکترونیکی، پره‌های توربین)، گرمایش (فرآیند خشک کردن)، انرژی‌های تجدیدپذیر (کلکتورهای خورشیدی، آبگرم‌کن و پنل‌های خورشیدی)، پزشکی (رساندن دارو به نقطه خاصی از بدن و درمان سرطان) و... اشاره کرد [۱۰]. پس از پیدایش نانوذرات، محققین بسیاری به بررسی عملکرد حرارتی آن‌ها درون میکروکانال‌ها با درصدهای حجمی متفاوت، سیالات پایه‌ی گوناگون و میکروکانال‌هایی با هندسه‌های متفاوت پرداختند. بلاچی و همکاران [۱۱] در یک مطالعه آزمایشگاهی به بررسی انتقال حرارت چاه حرارتی میکروکانال با نانوسیالات پایه گرافن محلول در آب پرداختند. آن‌ها اثر غلظت و دبی جرمی را بر پارامترهایی مانند ضریب انتقال حرارت جابجایی، افت دما، عدد ناسلت و افت فشار بررسی کردند. نتایج نشان داد که نانوسیالات پایه گرافن دمای چاه حرارتی را تا 10°C کاهش و ضریب انتقال حرارت و عدد ناسلت را به ترتیب 71% و 60% افزایش می‌دهد. این نتایج همراه با افزایش افت فشار به میزان 12% نسبت به آزمایشات سیال پایه می‌باشد. دینگ و همکاران [۱۲] در مطالعه‌ای تجربی به بررسی انتقال حرارت نانوسیال پایه آب TiO_2 در داخل میکروکانال پرداختند. نتایج نشان داد در غلظت حجمی 1% نانوسیال، عدد ناسلت به میزان 19% تا 41% افزایش یافته است. همچنین تنها 8% افت فشار در پی استفاده از نانوسیال مشاهده شده است. لی و همکاران [۱۳] در مطالعه‌ای تجربی به بررسی انتقال حرارت نانوسیال پایه آب آلومینا با غلظت حجمی 0.1% تا 0.5% درون میکروکانال ماریچی پرداختند. محدوده رینولدز مورد بررسی آن‌ها $1000-124$ بود. نتایج نشان داد که عدد ناسلت نانوسیالات $1.66-1.12$ برابر سیال پایه بود که بیانگر مناسب‌تر بودن انتقال حرارت نانوسیالات نسبت به سیال پایه است. همچنین بهترین عملکرد حرارتی متعلق به نانوسیال با غلظت حجمی 0.4% بوده است. الشایچی و همکاران [۱۴] طی یک مطالعه تجربی به ارزیابی اثربخشی انتقال حرارت نانوسیال الماس-آب درون میکروکانال پرداختند. نانوسیالات به روش دو مرحله‌ای و در 6 کسر حجمی مختلف تهیه شدند. میزان هدایت حرارتی سیال پایه با افزودن نانوذره الماس 25% افزایش داشته است. همچنین نتایج نشان داد که نانوسیال الماس منجر

به افزایش انتقال حرارت تا 30% در بیشترین غلظت حجمی می‌گردد. سیمسک و همکاران [۱۵] در پژوهشی تجربی به بررسی متغیرهای انتقال حرارت و افت فشار در نانوسیال آب-نانوسیم نقره داخل میکروکانال مستطیلی پرداختند. محدوده عدد رینولدز مورد بررسی آن‌ها $71-20$ بود. نتایج این بررسی بر روی سه میکروکانال با سطوح مقطع مختلف نشان داد که انتقال حرارت نانوسیال در مقایسه با سیال پایه به میزان 56% افزایش یافته است. باورز و همکاران [۱۶] در مطالعه‌ای تجربی به بررسی جریان و انتقال حرارت نانوسیال آب-سیلیکا و آب-آلومینا در داخل میکروکانال پرداختند. نتایج بیان‌گر افزایش انتقال حرارت جابجایی نانوسیال در مقایسه با سیال پایه حتی در غلظتهای حجمی پایین بود. همچنین نتایج آن‌ها نشان داد که افزایش عدد رینولدز در میکروکانال سبب بهبود انتقال حرارت جابجایی می‌گردد. سرافراز و همکاران [۱۷] در مطالعه‌ای تجربی به بررسی متغیرهای افت فشار، ضریب اصطکاک، انتقال حرارت و مقاومت گرمایی در جریان نانوسیال آب-نقره با غلظتهای حجمی 0.1% ، 0.5% و 1.0% داخل میکروکانال مستطیلی پرداختند. نتایج نشان داد که انتقال حرارت میکروکانال با استفاده از نانوسیال در مقایسه با سیال پایه افزایش یافته و همین‌طور افزایش کمی در میزان افت فشار، ضریب اصطکاک و مقاومت گرمایی رخ می‌دهد. با افزایش دبی جریان در میکروکانال و افزایش غلظت حجمی نانوسیال، افزایش در میزان انتقال حرارت و افت فشار مشاهده می‌شود. همچنین بیشترین میزان انتقال حرارت و مقاومت گرمایی در بیشترین غلظت حجمی اتفاق می‌افتد.

هدف از تحقیق حاضر، بالا بردن ضریب رسانایی حرارتی و افزایش میزان انتقال حرارت سیال پایه روغن هیدرولیک به کمک افزودن نانوذرات در غلظتهای حجمی مختلف و همچنین بررسی تاثیر ترکیب میکروکانال‌های موجی از جنس مس به صورت سری و موازی بر مشخصه‌های انتقال حرارت و افت فشار می‌باشد. مطالعات قبلی بیشتر در زمینه استفاده تنها از میکروکانال‌ها (بدون نانوذرات) با سیال پایه آب و اتیلن گلیکول یا استفاده از نانوسیال پایه آب و اتیلن گلیکول درون میکروکانال بوده است و هیچگونه مطالعه‌ای بر روی استفاده ترکیبی از میکروکانال‌های موجی (سری - موازی) به همراه نانوذرات در سیال پایه روغن انجام نپذیرفته است.

۲- شرح انجام آزمایشات و روابط حاکم

۲-۱- بیان مسئله

ذرات به یکدیگر، تشکیل ذرات بزرگتر (به اندازه میکرومتر) و در نهایت رسوب آن‌ها در کانال، مخزن، لوله، پمپ و سایر تجهیزات حرارتی می‌شود. در ابتدای مرحله ساخت نانوسیال می‌بایست جرم نانوذره‌ی مورد نیاز (با توجه به غلظت حجمی آن در سیال پایه) توسط رابطه (۱) محاسبه و به کمک ترازوی دیجیتال اندازه‌گیری شود. در جدول ۳ محاسبات جرم نانوذرات مورد استفاده در این پژوهش ارائه شده است.

$$m = \frac{\rho_{nf} \times V_{nf} \times (\phi \times 10^{-2})}{(1 - \phi \times 10^{-2})} \quad (1)$$

جدول ۳- جرم نانوذرات مورد استفاده در پژوهش حاضر

جرم SiO ₂ (gr)	جرم TiO ₂ (gr)	درصد غلظت حجمی
۳.۹۷۶	۶.۳۴۸	۰.۰۵
۷.۹۵۷	۱۲.۷۰۲	۰.۱

در ادامه از همزن مغناطیسی به مدت دو ساعت (جهت توزیع ذرات درون سیال پایه)، دستگاه پراب اولتراسونیک به مدت دو ساعت (جهت از بین بردن کلوخه‌های احتمالی) و در نهایت از حمام اولتراسونیک به مدت دو ساعت (جهت همگن و پایدارسازی محلول) استفاده شده است. پس از ساخت نانوسیال، جهت روئیت بصری پایداری آن، عکس‌برداری در زمان ساخت، یک هفته پس از ساخت و ۳۰ روز پس از ساخت انجام گرفته است. همان‌طور که در شکل‌های ۱ و ۲ قابل مشاهده است، نانوسیالات SiO₂ پس از ۳۰ روز همچنان از پایداری مناسبی برخوردار بوده‌اند اما نانوسیال TiO₂ به مقدار کم شروع به ته‌نشینی کرده‌اند.

جهت بررسی ابعاد ذرات و هم‌چنین پایداری نانوسیالات، با استفاده از دستگاه میکروسکوپ الکترونی عبوری، تصاویر TEM از نانوسیالات با غلظت حجمی ۰.۰۵٪ در مقیاس ۱۰۰ نانومتر تهیه شده است. با بررسی این تصاویر در شکل‌های ۳ و ۴ مشاهده می‌شود که ابعاد گزارش شده در تصویر با ابعاد اعلام شده توسط شرکت سازنده از تطابق خوبی برخوردار بوده و نانوسیالات نیز از پایداری مناسبی برخوردار هستند.

در تحقیق حاضر به منظور بررسی مورفولوژی سطح، تصویر برداری توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) از سطح میکروکانال بعد از انجام آزمایش صورت پذیرفته و به عنوان نمونه تصویر SEM نانوسیال TiO₂ با غلظت حجمی ۰.۱٪ در شکل ۵ نشان داده شده است. این تصویر پس از گذشت ۴۵ روز پس از انجام آخرین آزمایش به ثبت رسیده است و همان‌طور که قابل

در پژوهش حاضر به بررسی مشخصه‌های انتقال حرارت و افت فشار نانوسیال پایه روغن درون میکروکانال‌های موجی پرداخته شده است. به‌منظور بررسی مجزای عملکرد هر کدام از میکروکانال‌ها و همچنین سهولت در ترسیم نمودارهای آن‌ها، دو میکروکانال به صورت ۱ و ۲ نام‌گذاری گردیده‌اند. سیال پایه روغن هیدرولیک ۶۸ حاوی نانوذرات اکسید فلزی و غیرفلزی TiO₂ و SiO₂ با غلظت‌های حجمی ۰.۰۵٪ و ۰.۱٪ درون میکروکانال‌های موجی با آرایش سری و موازی مورد آزمایش قرار گرفته است. آزمایشات در سه دبی مختلف ۰.۵، ۱ و ۱.۵ لیتر بر دقیقه و چهار دمای ورودی ۴۰، ۴۵، ۵۰ و ۵۵ درجه سانتی‌گراد صورت گرفته‌اند. آزمایشات در حالت جریان دائم، تراکم ناپذیر و شار حرارتی ثابت انجام گردیدند. ناحیه مورد مطالعه، ناحیه توسعه یافته هیدرودینامیکی و در حال توسعه حرارتی و رژیم جریان نیز از نوع آرام می‌باشد. جدول‌های ۱ و ۲ به ترتیب مشخصات روغن پایه و نانوذرات را ارائه می‌دهند.

جدول ۱- مشخصات روغن H68 در ۴۰°C

چگالی (kg/m ³)	۸۷۹.۲
ویسکوزیته سینماتیکی (mm ² /s)	۶۸.۸
ظرفیت گرمایی ویژه (J/kg.K)	۲۰۷۰
ضریب هدایت حرارتی (w/m.K)	۰.۱۳

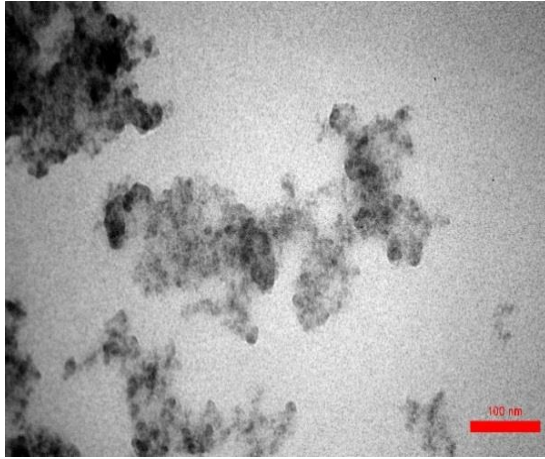
جدول ۲- مشخصات نانوذرات SiO₂ و TiO₂

نوع نانوذره	TiO ₂	SiO ₂
چگالی (kg/m ³)	۴۲۳۰	۲۶۵۰
ضریب هدایت حرارتی (w/m.K)	۸.۴	۱.۵
ظرفیت گرمایی ویژه (J/kg.K)	۶۹۲	۷۳۰
قطر متوسط (nm)	۲۰	۲۰
رنگ	سفید	سفید
برند	Npyekta Arminano	

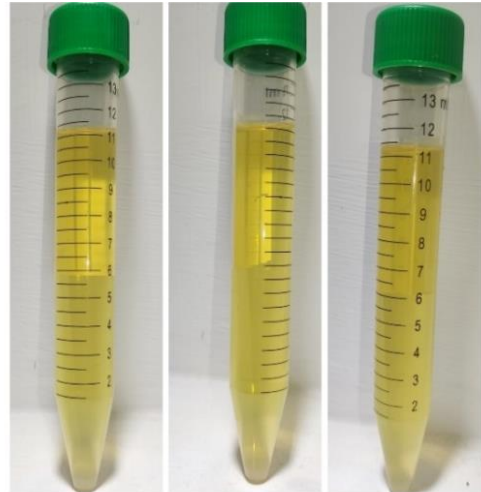
۲-۲- نحوه آماده سازی نانوسیال

اولین گام مهم در این مطالعه، آماده سازی نانوسیال می‌باشد. تهیه‌ی یک نانوسیال پایدار شده در انتقال حرارت نانوسیالات از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است؛ زیرا نانوسیالات تهیه شده به روش نامناسب منجر به انتقال حرارت دوفازی (جامد-مایع)، چسبیدن

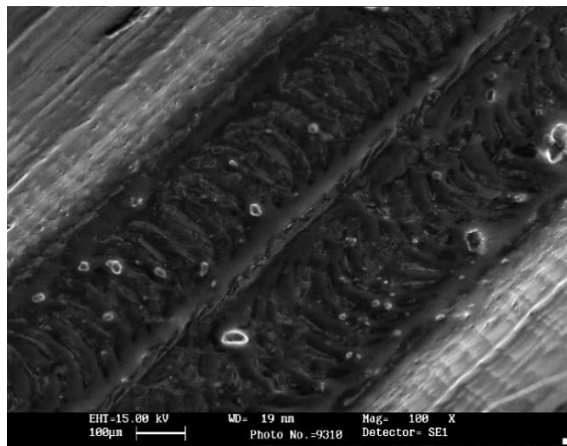
مشاهده است، مقدار بسیار کمی از نانوذرات TiO_2 درون میکروکانال‌ها رسوب کرده است.



شکل ۴- تصویر TEM نمونه‌ی TiO_2



شکل ۱- پایداری نانوسیال SiO_2 در بازه‌های زمانی متفاوت روز اول روز هفتم روز سی ام



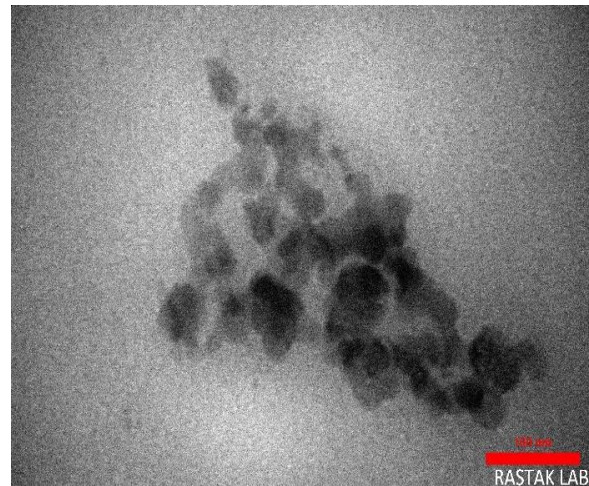
شکل ۵- تصویر SEM کانال به همراه نانوذرات TiO_2 ۰.۱٪



شکل ۲- پایداری نانوسیال TiO_2 در بازه‌های زمانی متفاوت روز اول روز هفتم روز سی ام

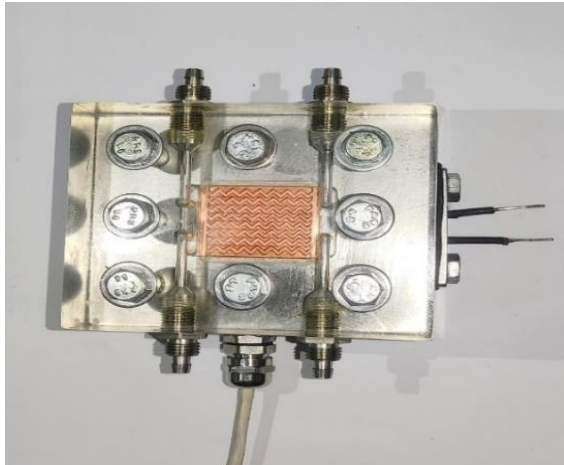
۲-۲- دستگاه آزمایشگاه

دستگاه آزمایش پژوهش حاضر شامل سه بخش اصلی سیستم نگهداری و انتقال سیال (پمپاژ)، تجهیزات آزمایشگاهی و چاه گرمایی می‌باشد. در شکل‌های ۶ و ۷ شماتیک مدار آزمایش به ترتیب در چینش‌های موازی و سری نشان داده شده است. سیستم نگهداری و انتقال سیال شامل مخزن آهنی به حجم ۵ لیتر و پمپ دنده‌ای جهت پمپاژ سیال به درون سیکل می‌باشد. برخی از تجهیزات آزمایشگاهی نیز شامل فلومتر مدرج روغنی جهت اندازه‌گیری و تنظیم دبی مورد آزمایش، مانومترهای روغنی جهت اندازه‌گیری افت فشار، شیر هواگیری اتومات جهت از بین بردن حباب‌های احتمالی موجود در سیکل، سنسورهای $PT100$ جهت قرائت دمای سطح، سیال ورودی به میکروکانال و خروجی از آن، کنترلر دما جهت نمایش و کنترل دمای اندازه‌گیری شده توسط سنسورها و کنتاکتور به منظور تنظیم و ثابت نگه داشتن دما بر روی مقدار مشخص می‌باشد.



شکل ۳- تصویر TEM نمونه‌ی SiO_2

تصویر میکروکانال پژوهش حاضر در شکل ۹ نشان داده شده است.



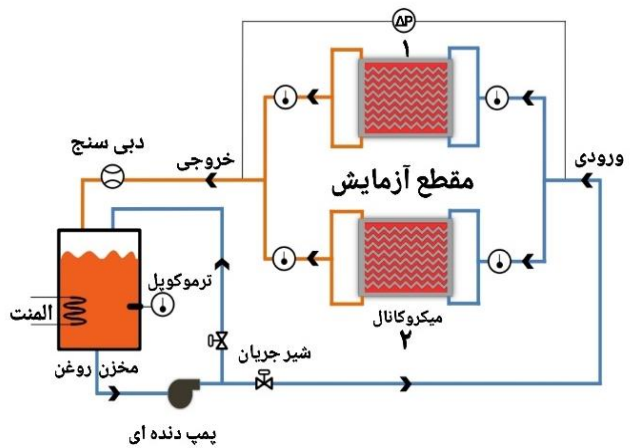
شکل ۸- تصویر چاه گرمایی پژوهش حاضر



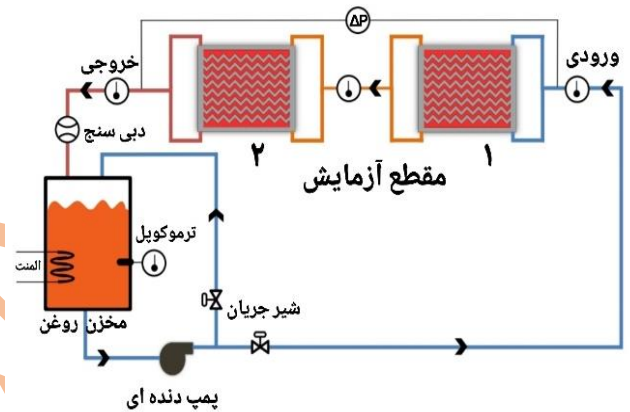
شکل ۹- تصویر میکروکانال مسی پژوهش حاضر

۴-۲- روش انجام آزمایشات

پیش از شروع آزمایش به منظور جلوگیری از انسداد کانال‌ها توسط ذرات معلق معلق احتمالی، تمامی تجهیزات، اتصالات و همچنین مخزن روغن به خوبی شسته شده و سپس مخزن تا حجم ۳ لیتر از روغن پر می‌شود. پس از راه‌اندازی پمپ، به مدت یک ساعت سیال در سیکل جریان می‌یابد تا هم حباب‌های احتمالی موجود در سیکل از بین رفته و هم سیستم به حالت پایا برسد. حالت پایا زمانی برقرار می‌شود که تغییرات قابل توجهی در درجه حرارت و افت فشار بالک سیال رخ ندهد. پس از رسیدن به حالت پایا، دبی جریان سیال به کمک فلومتر و با استفاده از شیر بای‌پس تنظیم می‌گردد. جهت تنظیم دمای سیال ورودی به کمک کنترلر دما و کنتاکتور، دمای سیال بر روی مقدار مورد نظر تنظیم و ثابت نگه‌داشته می‌شود. قابل ذکر است دمای سیال ورودی به کمک هیتر تعبیه شده در کف مخزن روغن افزایش



شکل ۶- شماتیک مدار آزمایش در آرایش موازی

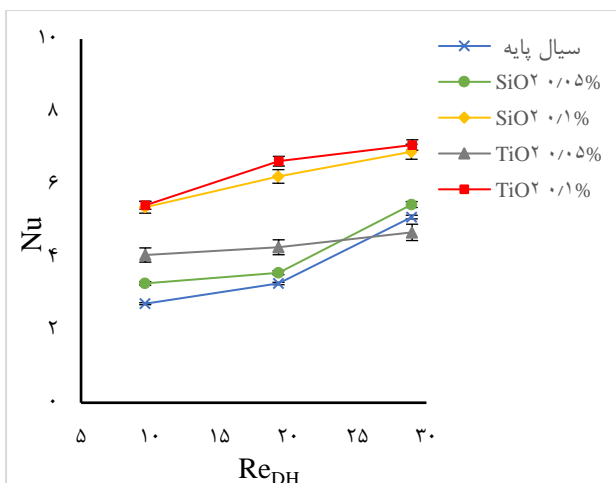


شکل ۷- شماتیک مدار آزمایش در آرایش سری

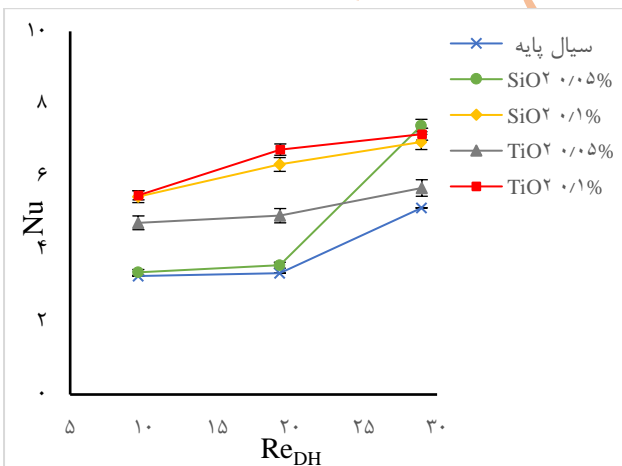
چاه گرمایی پژوهش حاضر که در شکل ۸ نشان داده شده است، شامل بلوک زیرین، بلوک فوقانی، میکروکانال مسی، المنت گرمایی و سنسورهای $PT100$ جهت قرائت دمای سطح میکروکانال می‌باشد. بلوک زیرین از جنس استیل ضد زنگ در ابعاد $75 \times 95 \text{ mm}^2$ می‌باشد. به منظور مشاهده‌ی جریان سیال درون کانال‌ها، بلوک فوقانی از جنس پلکسی گلاس شفاف انتخاب شده است. جهت اطمینان از جریان یافتن سیال درون تمامی کانال‌ها، دو ورودی در طرفین بلوک و جهت تخلیه سیال نیز دو خروجی تعبیه شده است. همچنین جهت حصول اطمینان بیشتر از یکنواختی و مساوی بودن جریان سیال درون تمامی کانال‌ها، فضایی کلکتور شکل درون بلوک در نظر گرفته شده است.

معمولاً میکروکانال‌ها از جنس‌های متنوعی از قبیل فولاد ضد زنگ، شیشه، پلیمر، سیلیکون و فلزات مختلف مانند آلومینیوم، مس و غیره ساخته می‌شوند. میکروکانال مورد استفاده در این پژوهش از جنس مس با ضخامت 2 mm ، قطر هیدرولیکی 1 mm و به ابعاد $28 \times 33 \text{ mm}^2$ می‌باشد که با استفاده از دستگاه فرز پانتوگراف و با دقت 0.1 mm ساخته شده است.

تمامی آزمایشات پژوهش حاضر چهار دمای ورودی ۴۰، ۴۵، ۵۰ و ۵۵ درجه سانتی‌گراد صورت گرفته‌اند اما با توجه به اینکه یافته‌ها در تمامی دماهای ورودی رفتار نسبتاً یکسانی داشته‌اند، لذا به‌عنوان نمونه تمامی نمودارها تنها برای دمای ۴۰ درجه سانتی‌گراد ترسیم گردیده‌اند. در شکل‌های ۱۱ و ۱۲ تغییرات عدد ناسلت بر حسب عدد رینولدز در آرایش موازی میکروکانال‌ها به ترتیب برای بلوک ۱ و بلوک ۲ نشان داده شده است. این تغییرات برای سیال پایه و نانوسیالات TiO_2 و SiO_2 در غلظت‌های حجمی ۰.۰۵٪ و ۰.۱٪ در سه دبی مختلف ۰.۵، ۱ و ۱.۵ لیتر بر دقیقه گزارش شده است.



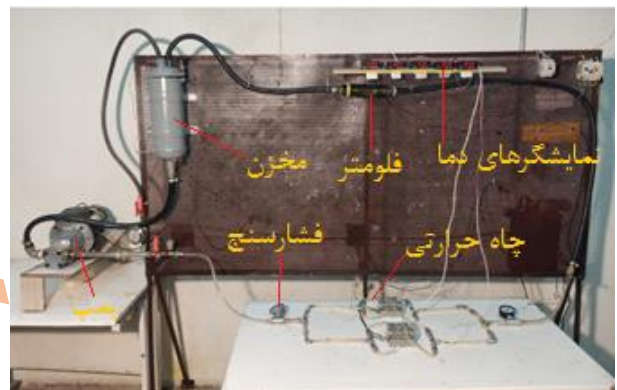
شکل ۱۱- تغییرات عدد ناسلت بر حسب عدد رینولدز در دمای ۴۰°C برای بلوک ۱ در آرایش موازی میکروکانال‌ها



شکل ۱۲- تغییرات عدد ناسلت بر حسب عدد رینولدز در دمای ۴۰°C برای بلوک ۲ در آرایش موازی میکروکانال‌ها

در این نمودارها، با افزایش مقدار عدد رینولدز، عدد ناسلت افزایش یافته است؛ به عبارتی با توجه به رابطه عدد رینولدز $(Re = \frac{4Q}{\pi Dv})$ و همچنین دبی حجمی $(Q = VA)$ می‌توان دریافت که با افزایش میزان نرخ جریان و همچنین افزایش سرعت جریان، انتقال حرارت بهبود می‌یابد.

یافته و به مقدار مشخص می‌رسد. مقدار شار حرارتی المنت میکروکانال‌ها به وسیله‌ی یک دیمر تنظیم می‌گردد و تا پایان انجام آزمایشات ثابت باقی می‌ماند. همچنین جهت اطلاع از مقدار تغییرات دمای ایجاد شده توسط المنت میکروکانال‌ها و اطمینان از عملکرد صحیح آن‌ها در حین آزمایش، داده‌ها هم در حالت المنت خاموش و هم در حالت المنت روشن به ثبت رسیده‌اند. پس از رسیدن شرایط به حالت پایا، مقدار دماهای ورودی، خروجی و دمای سطح میکروکانال‌ها و همچنین فشارهای ورودی و خروجی ثبت می‌گردند. در شکل ۱۰ تصویر دستگاه آزمایش پژوهش حاضر به همراه نام تجهیزات نشان داده شده است.



شکل ۱۰- تصویر دستگاه آزمایش پژوهش حاضر

۲-۵- روابط حاکم

برای محاسبه نرخ انتقال حرارت نانوسیالات از رابطه‌ی (۲) استفاده می‌شود.

$$\dot{Q}_{nf} = \dot{m}_{nf} C_{p_{nf}} (T_{out} - T_{in})_{nf} \quad (2)$$

نرخ گرمای منتقل شده از هیتر گرمایی به میکروکانال از رابطه (۳) قابل محاسبه است.

$$\dot{Q} = V \times I \quad (3)$$

ضریب انتقال حرارت جابجایی، دمای بالک و عدد ناسلت نانوسیال به ترتیب از روابط (۴)، (۵) و (۶) محاسبه می‌شوند.

$$h_{nf} = \frac{\dot{Q}_{nf}}{A_{HS}(T_s - T_{nf})} \quad (4)$$

$$T_{nf} = \frac{T_{out} + T_{in}}{2} \quad (5)$$

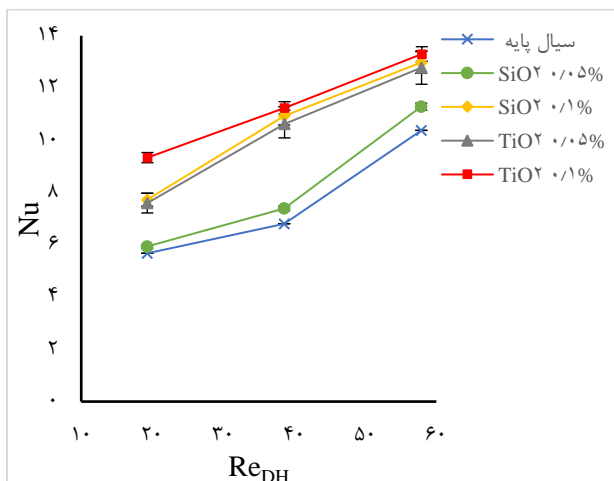
$$Nu_{nf} = \frac{h_{nf} D_H}{K_{nf}} \quad (6)$$

در رابطه ۴ T_s دمای سطح میکروکانال است که توسط سنسورهای PT۱۰۰ تعبیه شده در زیر آن قرائت می‌گردد.

۳- نتایج

۳-۱- عدد ناسلت حالت موازی

نانوذرات بر بهبود عملکرد حرارتی سیال پایه به خوبی قابل مشاهده است.



شکل ۱۴- تغییرات عدد ناسلت بر حسب عدد رینولدز در دمای ۴۰°C برای بلوک ۲ در آرایش سری میکروکانالها

۳-۳ مقایسه عملکرد حرارتی سیال پایه در آرایش سری موازی

در جدول ۴ به منظور مقایسه عملکرد حرارتی سیال پایه در آرایش موازی و سری میکروکانالها، مقادیر عدد ناسلت این دو چیدمان برای سیال پایه چهار دمای ورودی ۴۰، ۴۵، ۵۰ و ۵۵ درجه سانتی گراد، در عدد رینولدز مشترک ۱۹.۲۹ حالت سری و موازی و برای دو بلوک ۱ و ۲ ارائه شده است.

جدول ۴- عدد ناسلت سیال پایه در آرایش موازی و سری میکروکانالها

دمای ورودی °C	عدد رینولدز	عدد ناسلت سیال پایه		آرایش سری	
		آرایش موازی ۱ بلوک	آرایش موازی ۲ بلوک	۱ بلوک	۲ بلوک
۴۰	۱۹.۲۹	۳.۲۷	۳.۳۳	۳.۲۹	۵.۶۷
۴۵	۱۹.۲۹	۳.۵۷	۳.۷۲	۳.۵۹	۶.۴۰
۵۰	۱۹.۲۹	۳.۶۴	۴.۰۸	۳.۶۶	۶.۶۹
۵۵	۱۹.۲۹	۴.۰۶	۵.۵۱	۴.۱۱	۷.۱۲

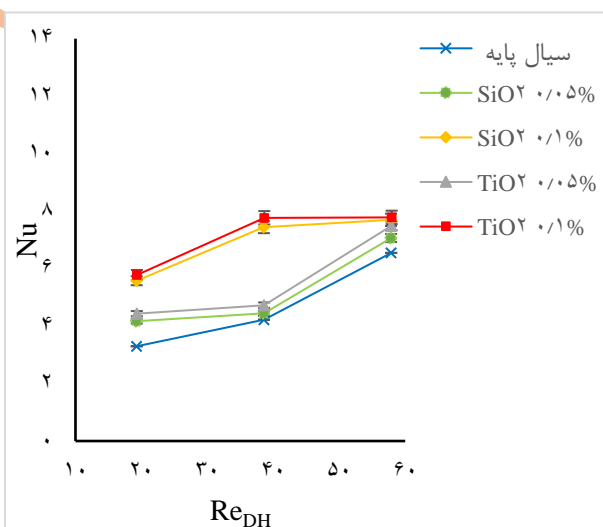
همان طور که مشاهده می شود، عدد ناسلت سیال پایه در عدد رینولدز ثابت در بلوک ۱ در حالت سری و موازی تقریباً برابر است اما در بلوک ۲ حالت سری مقدار بیشتری نسبت به حالت موازی دارد؛ به عبارتی در حالت سری میزان انتقال حرارت بلوک ۲ تا ۴۱.۸٪ بیشتر از حالت موازی می باشد که این موضوع بیانگر مناسب تر بودن چینش سری میکروکانالها نسبت به موازی است.

۳-۴ دمای سطح حالت موازی

همان گونه که مشاهده می شود، نانوذرات TiO₂ و SiO₂ با غلظت حجمی ۰.۱٪ در تمامی رینولدزها بیشترین میزان انتقال حرارت را به خود اختصاص داده اند. با این وجود نانوذره TiO₂ با فاصله در صدر این نمودار قابل مشاهده است که علت آن بالاتر بودن میزان ضریب هدایت حرارتی این ذرات نسبت به ذرات SiO₂ می باشد. به عبارتی نانوسیال TiO₂ و SiO₂ با غلظت حجمی ۰.۱٪، به ترتیب ۵۶٪ و ۵۲.۷٪ در بلوک ۱ و ۵۵.۸٪ و ۴۲.۴٪ در بلوک ۲ نسبت به سیال پایه افزایش انتقال حرارت داشته اند. استفاده از نانوذرات TiO₂ و SiO₂ با غلظت حجمی ۰.۰۵٪ نیز در افزایش انتقال حرارت موثر بوده است؛ به طوری که به ترتیب به میزان ۴۸.۶٪ و ۲۲.۵٪ در بلوک ۱ و ۳۲.۸٪ و ۳۲.۳٪ در بلوک ۲ انتقال حرارت سیال پایه را بهبود بخشیده است. بدین ترتیب اثر مثبت افزایش غلظت نانوذرات بر بهبود عملکرد حرارتی سیال پایه به خوبی قابل مشاهده است.

۳-۲ عدد ناسلت حالت سری

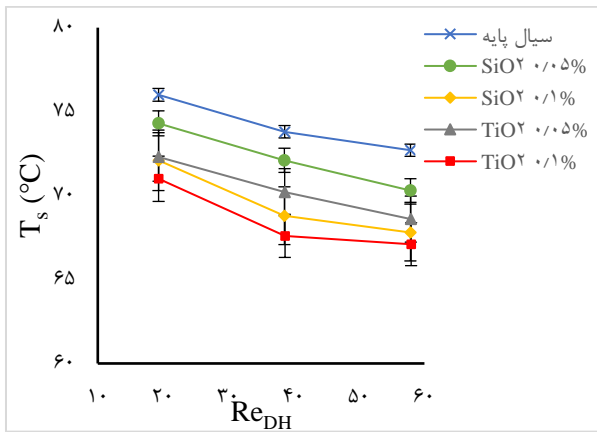
در شکل های ۱۳ و ۱۴ تغییرات عدد ناسلت بر حسب عدد رینولدز در آرایش سری میکروکانالها نشان داده شده است.



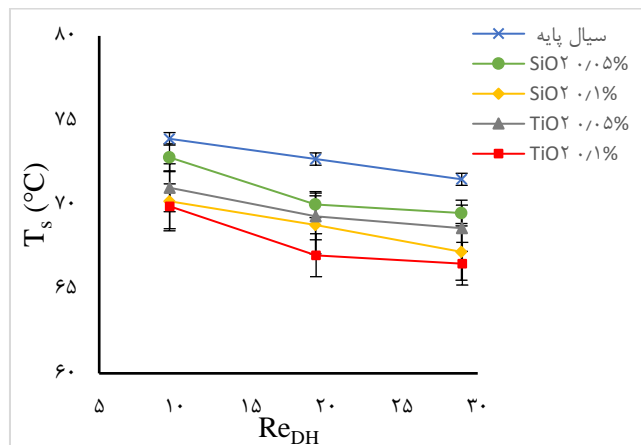
شکل ۱۳- تغییرات عدد ناسلت بر حسب عدد رینولدز در دمای ۴۰°C برای بلوک ۱ در آرایش سری میکروکانالها

نانوسیالات TiO₂ و SiO₂ با غلظت حجمی ۰.۱٪ به ترتیب ۴۵.۸٪ و ۴۲٪ در بلوک ۱ و ۴۵.۵٪ و ۲۸.۱٪ در بلوک ۲ نسبت به سیال پایه افزایش انتقال حرارت داشته اند. نانوسیالات TiO₂ و SiO₂ با غلظت حجمی ۰.۰۵٪ نیز در افزایش انتقال حرارت موثر بوده اند؛ به طوری که به ترتیب به میزان ۴۵٪ و ۳۶.۹٪ در بلوک ۱ و ۲۱.۶٪ و ۱۷٪ در بلوک ۲ انتقال حرارت سیال پایه را بهبود بخشیده است. همچنین تاثیر مثبت افزایش غلظت

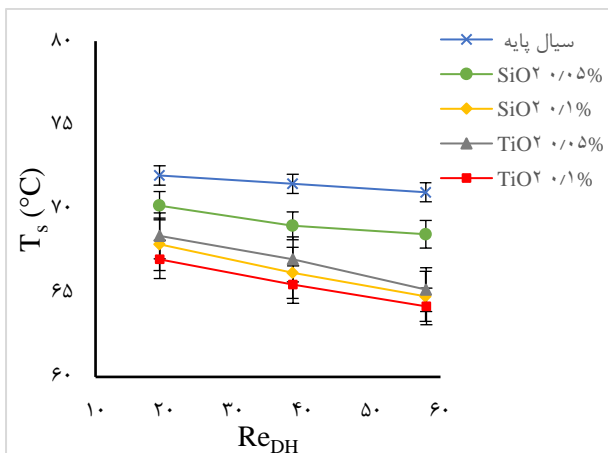
در شکل‌های ۱۵ و ۱۶ تغییرات دمای سطح بر حسب عدد رینولدز در آرایش موازی میکروکانال‌ها به ترتیب برای بلوک ۱ و بلوک ۲ نشان داده شده است.



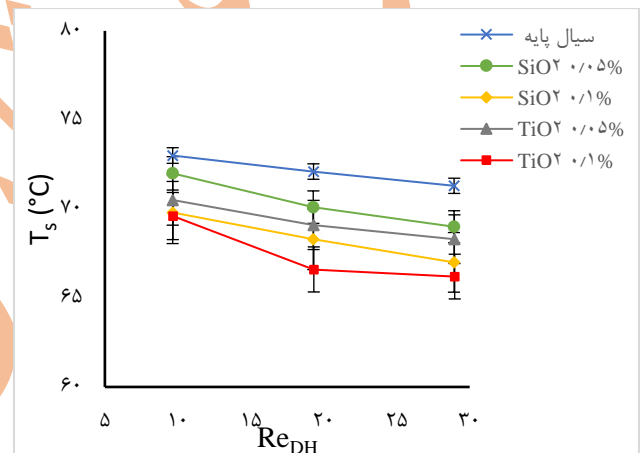
شکل ۱۷- تغییرات دمای سطح بر حسب عدد رینولدز در دمای ۴۰°C برای بلوک ۱ در آرایش سری میکروکانال‌ها



شکل ۱۵- تغییرات دمای سطح بر حسب عدد رینولدز در دمای ۴۰°C برای بلوک ۱ در آرایش موازی میکروکانال‌ها



شکل ۱۸- تغییرات دمای سطح بر حسب عدد رینولدز در دمای ۴۰°C برای بلوک ۲ در آرایش سری میکروکانال‌ها



شکل ۱۶- تغییرات دمای سطح بر حسب عدد رینولدز در دمای ۴۰°C برای بلوک ۲ در آرایش موازی میکروکانال‌ها

نانوسیال TiO_2 و SiO_2 با درصد حجمی ۰/۱ به ترتیب ۸/۷۴٪ و ۶/۲٪ در بلوک ۱ و ۹/۵٪ و ۸/۵٪ در بلوک ۲ نسبت به سیال پایه منجر به کاهش دمای سطح گشته‌اند. نانوسیالات TiO_2 و SiO_2 با درصد حجمی ۰/۰۵ نیز به میزان ۶/۷٪ و ۴/۵٪ در بلوک ۱ و ۷/۵٪ و ۳/۶٪ در بلوک ۲ در کاهش دما موثر بوده‌اند.

با مقایسه میزان گرمای دفع شده از سطح میکروکانال‌های سری و موازی می‌توان نتیجه گرفت که چینش سری میکروکانال‌ها در خنک کاری سطح آن‌ها عملکرد مناسب‌تری داشته است که از دلایل این پدیده می‌توان به دو برابر بودن دبی جریان عبوری در چینش سری نسبت به موازی اشاره کرد.

۳-۶ صحت‌سنجی داده‌های هیدرودینامیکی

به منظور صحت‌سنجی داده‌های آزمایش، مقادیر افت فشار اندازه‌گیری شده در این پژوهش با داده‌های به دست آمده از معادله دارسی-ویسباخ مطابق رابطه‌ی (۷) مقایسه و نتایج آن در جدول ۵ ارائه شده است.

همان‌طور که در این دو نمودار مشاهده می‌شود و مطابق رابطه $\dot{Q} = \rho Q C_p \Delta T$ می‌توان دریافت که با افزایش دبی جریان دمای سطح کاهش می‌یابد. نانوسیال TiO_2 و SiO_2 با درصد حجمی ۰/۱ به ترتیب ۹/۸۶٪ و ۷/۱٪ در بلوک ۱ و ۹/۷٪ و ۷/۳٪ در بلوک ۲ نسبت به سیال پایه منجر به کاهش دمای سطح گشته‌اند. نانوسیالات TiO_2 و SiO_2 با درصد حجمی ۰/۰۵ نیز به میزان ۴/۶٪ و ۳/۶۶٪ در بلوک ۱ و ۳/۲٪ و ۳٪ در بلوک ۲ در کاهش دما موثر بوده‌اند.

۳-۵ دمای سطح حالت سری

در شکل‌های ۱۷ و ۱۸ تغییرات دمای سطح بر حسب عدد رینولدز در آرایش سری میکروکانال‌ها به ترتیب برای بلوک ۱ و بلوک ۲ گزارش شده است.

این داده‌ها، افت فشار چینش سری میکروکانال‌ها بین ۷۶.۷٪ تا ۸۲.۱٪ بیشتر از چینش موازی می‌باشد که این امر منجر به ورود فشار بیش از حد به پمپ و ایجاد خلل در عملکرد صحیح پمپ در تامین هد مورد نیاز می‌گردد و بدین ترتیب انتخاب پمپ مورد نیاز را با هزینه و چالش‌های جدیدی روبرو می‌کند. با افزایش غلظت نانوسیال، افزایش افت فشار به مقدار کم در درصد حجمی بالای نانوسیالات نیز رخ می‌دهد که این پدیده از دیگر ویژگی‌های قابل ذکر نانوسیالات یعنی بهبود انتقال حرارت به همراه مقدار کمی افت فشار می‌باشد.

۸-۳ صحت‌سنجی داده‌های حرارتی

در پژوهش حاضر، پس از اندازه‌گیری شدت جریان و اختلاف پتانسیل دو سر المنت توسط مولتی متر، نرخ گرمای منتقل شده از المنت به هر کانال به کمک رابطه $\dot{Q} = V \times I$ محاسبه گردیده است که برابر با 1.73 J/s می‌باشد. اختلاف دمای سیال ورودی و خروجی میکروکانال از رابطه‌ی (۱۰) قابل محاسبه است.

$$\Delta T = \frac{\dot{Q}}{\dot{m}C_p} \quad (10)$$

در جدول ۷ به منظور صحت‌سنجی داده‌های انتقال حرارت، مقادیر ΔT قرائت شده در آزمایش با مقادیر ΔT محاسبه شده به کمک رابطه‌ی (۱۰) مقایسه گردیده است. این اختلاف دما برای سیال پایه در آرایش سری و برای بلوک ۱ ارائه شده است.

جدول ۷- اختلاف دمای سیال ورودی و خروجی میکروکانال بلوک ۱

اختلاف دمای سیال ورودی و خروجی میکروکانال (°C)						
دمای ورودی (°C)	دبی ۰.۵ (lit / min)		دبی ۱ (lit / min)		دبی ۱.۵ (lit / min)	
	تجربی	تئوری	تجربی	تئوری	تجربی	تئوری
۴۰	۰.۳	۰.۹۱	۰.۲	۰.۴۵	۰.۲	۰.۳
۴۵	۰.۳	۰.۹۱	۰.۲	۰.۴۵	۰.۲	۰.۳
۵۰	۰.۳	۰.۹۱	۰.۲	۰.۴۵	۰.۲	۰.۳
۵۵	۰.۳	۰.۹۱	۰.۲	۰.۴۵	۰.۲	۰.۳

همان‌طور که مشاهده می‌شود داده‌های تجربی و تئوری از مطابقت مناسبی برخوردار هستند. در محاسبات پژوهش حاضر، غیر از کف کانال، دیواره‌های کانال به علت تقارن و ایجاد گرادیان دمای صفر، عایق در نظر گرفته شده‌اند؛ در حالی که در واقعیت اندکی تبادل حرارتی دارند و این علت اختلاف دمای تئوریک و

$$\Delta P = f \frac{L}{D} \frac{\bar{V}^2}{2} \rho \quad (7)$$

پارک و پانچ [۱۸] ضریب اصطکاک جریان آرام توسعه یافته درون میکروکانال را از رابطه‌ی (۸) محاسبه نموده‌اند که در آن G از رابطه‌ی (۹) بدست می‌آید.

$$f \text{ Re} = 4.7 + 19.64G \quad (8)$$

$$G = \frac{\alpha^2 + 1}{(\alpha + 1)^2} \quad (9)$$

در رابطه‌ی (۹)، α نسبت ارتفاع به عرض میکروکانال می‌باشد.

جدول ۵- مقایسه افت فشار تجربی و تئوری مقطع آزمایش

درصد خطا (%)	افت فشار تئوری (bar)	افت فشار تجربی (bar)	عدد رینولدز
۱۴.۱	۱.۳۴	۱.۱۵	۱۹.۲۹
۱۲.۳	۲.۷۶	۲.۴۲	۳۸.۵۸
۱۲.۵	۳.۶۶	۳.۲۰	۵۷.۸۷

این جدول مربوط به آرایش سری میکروکانال‌ها، در دمای 40°C و در اعداد رینولدز مختلف می‌باشد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، داده‌های تجربی این پژوهش از تطابق خوبی با داده‌های تئوری برخوردار هستند.

۷-۳ مقایسه میزان افت فشار سیال در آرایش سری و موازی

در جدول ۶ مقایسه میزان افت فشار سیال پایه در آرایش سری و موازی میکروکانال‌ها در دمای 40°C آورده شده است.

جدول ۶- مقایسه افت فشار سیال پایه در آرایش سری و موازی میکروکانال‌ها

افت فشار سیال پایه (bar)		
دبی (lit / min)	سیال پایه سری	موازی
۰.۵	۱.۱۵	۰.۲
۱	۲.۴۲	۰.۶
۱.۵	۳.۲۰	۱

همان‌طور که از جدول ۶ مشاهده می‌شود، با افزایش دبی جریان، میزان افت فشار در مسیر جریان نیز افزایش می‌یابد. بر اساس

- شرایط محیطی آزمایشگاه که به منظور اطمینان از دقت نتایج، آزمایشات در دو هفته‌ی متفاوت جهت بررسی آزمون تکرارپذیری انجام شده است.
 - خطای مانومتر در نمایش دقیق فشار
 - غلظت حجمی نانوسیال (حین ساخت نانوسیال پس از وزن کردن جرم نانوذره عاملی که ممکن است ایجاد خطا کند، چسبیدن نانوذره به صفحه آزمایشگاهی و یا پخش شدن مقدار کمی از نانوذره در هوا و طبیعتاً کم شدن جرم اندازه‌گیری شده می‌باشد).
- در جدول ۸ عدم قطعیت تجهیزات مورد استفاده در پژوهش حاضر ارائه شده است.

جدول ۸- عدم قطعیت تجهیزات پژوهش حاضر

نوع تجهیز	عدم قطعیت
سنسور PT ۱۰۰	$\pm 0.1 \text{ }^\circ\text{C}$
مانومتر	$\pm 0.1 \text{ bar}$
فلومتر	$\pm 2.5\%$
ماشین کاری	$\pm 0.1 \text{ mm}$
کولیس (قطر کانال)	$\pm 0.2 \text{ mm}$

۳-۹-۲ خطای محاسبات

با استفاده از تئوری روش موافق از روابط (۱۱)، (۱۲)، (۱۳) و (۱۴) به ترتیب عدم قطعیت عدد رینولدز، عدد ناسلت، شار حرارتی و ضریب انتقال حرارت جابجایی محاسبه شده است:

$$U_{Re} = \left[\left(\frac{VD}{\mu} U_p \right)^2 + \left(\frac{\rho D}{\mu} U_v \right)^2 + \left(\frac{\rho V}{\mu} U_D \right)^2 + \left(-\frac{\rho VD}{\mu^2} U_\mu \right)^2 \right]^{1/2} \quad (11)$$

$$U_{Nu} = \left[\left(\frac{h}{k} U_D \right)^2 + \left(\frac{D}{K} U_h \right)^2 + \left(-\frac{hD}{k^2} U_k \right)^2 \right]^{1/2} \quad (12)$$

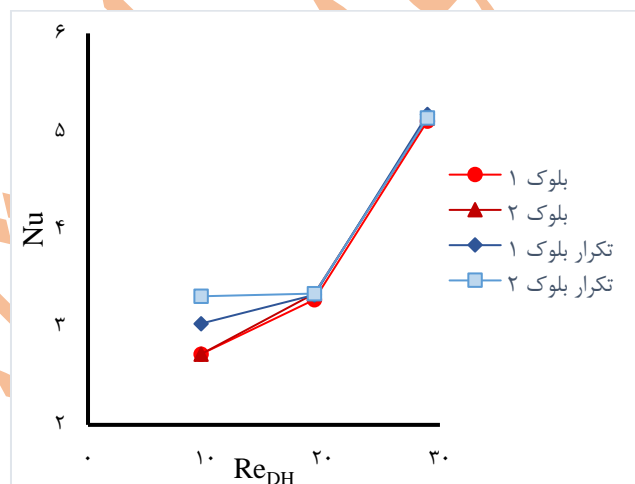
$$U_{q'} = \left[\left(\dot{m} C_p U_{\Delta T} \right)^2 + \left(\dot{m} \Delta T U_{C_p} \right)^2 + \left(C_p \Delta T U_m \right)^2 \right]^{1/2} \quad (13)$$

$$U_h = \left[\left(q'' U_{\Delta T} \right)^2 + \left(\Delta T U_{q''} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (14)$$

در جدول ۹ عدم قطعیت پارامترهای محاسبه شده در پژوهش حاضر ارائه شده‌اند.

تجربی می‌باشد. از طرفی باتوجه به کاملاً عایق نبودن بلوک زیرین، بخشی از حرارت تولید شده توسط المنت صرف گرمایش بلوک و بخشی به صورت اتلاف حرارتی به محیط نیز منتقل می‌گردد.

به منظور بررسی دقت داده‌های اندازه‌گیری شده، آزمون تکرارپذیری برای کلیه آزمایش‌های پژوهش حاضر در دو هفته متوالی صورت گرفته است که به عنوان نمونه، نمودار تکرارپذیری آزمایشات سیال پایه برای آرایش موازی میکروکانال‌ها در دمای 40°C در شکل ۱۹ نشان داده شده است. حداکثر میزان خطا ۱۱٪ بوده است که تنها در دبی پایین و شروع انجام آزمایشات رخ داده است.



شکل ۱۹- نمودار تکرارپذیری سیال پایه در دمای 40°C در آرایش موازی

۳-۹-۳ آنالیز خطای داده‌ها

به طور کلی دو نوع خطا باعث فاصله گرفتن نتایج داده‌های آزمایش با مقادیر واقعی آن می‌شود: نوع اول خطای ناشی از کالیبره نبودن دستگاه‌ها و تجهیزات اندازه‌گیری و نوع دوم ناشی از خطای انسانی است که حتی در صورت طراحی آزمایش‌های بسیار دقیق نیز به وجود می‌آید. در تحقیق حاضر سعی شده تمامی خطاهای اندازه‌گیری به حداقل برسند تا داده‌های حاصل از آزمایشات قابل استناد باشند. همچنین به منظور محاسبه عدم قطعیت و خطاها، از روش موافق بهره گرفته شده است [۱۹].

۳-۹-۱ خطای تجهیزات

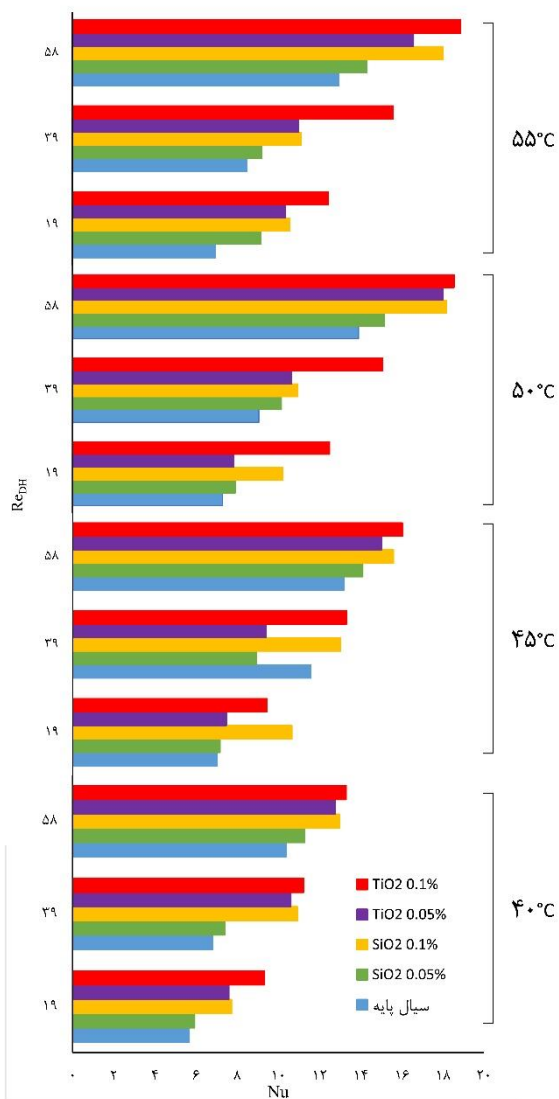
خطای تجهیزات پژوهش حاضر شامل موارد زیر می‌باشد:

- خطای سنسورها در خواندن درجه حرارت که به منظور به حداقل رساندن آن، کالیبراسیون سنسور به همراه نمایشگرها انجام شده است.
- خطای دبی‌سنج در تنظیم دبی که به منظور اطمینان از دقت آن، دبی‌سنج کالیبره گردید.

جدول ۹- عدم قطعیت پارامترهای محاسبه شده در پژوهش حاضر

مقدار خطا	کمیت
$\pm 6.7\%$	عدد رینولدز
$\pm 8.2\%$	عدد ناسلت
$\pm 4.5\%$	شار حرارتی

در شکل‌های ۲۰ و ۲۱ به ترتیب مقادیر عدد ناسلت در بلوک ۲ آرایش موازی و سری میکروکانال‌ها در تمامی دماهای مورد آزمایش (۴۰، ۴۵، ۵۰، ۵۵ درجه سانتی‌گراد) و سه دبی ۰.۵، ۱ و ۱.۵ لیتر بر دقیقه برای سیال پایه و نانوسیالات TiO_2 و SiO_2 با غلظت‌های حجمی ۰.۰۵٪ و ۰.۱٪ گزارش شده است.

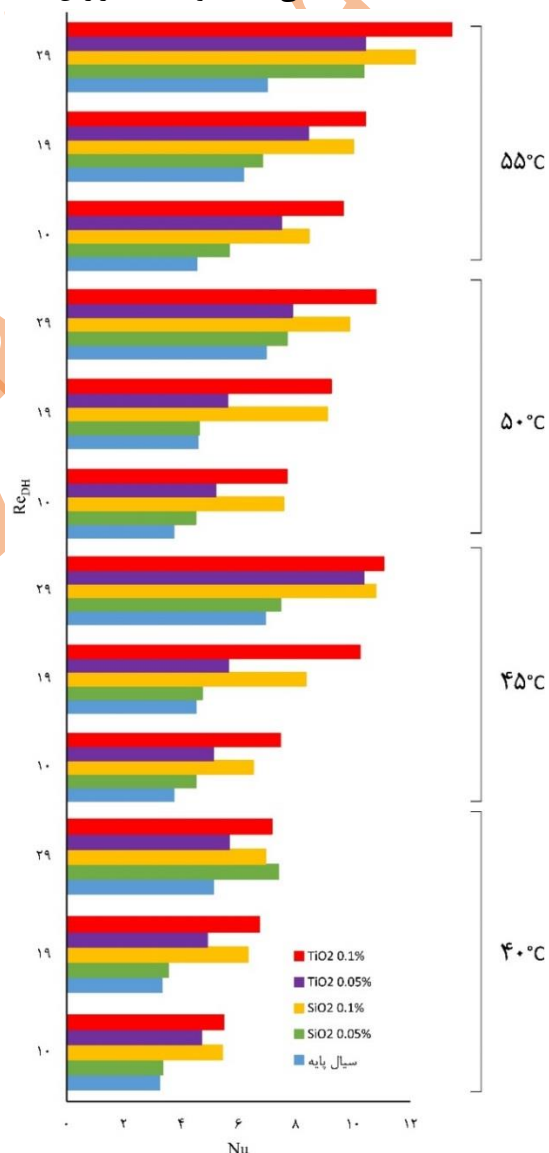


شکل ۲۲- تغییرات عدد ناسلت بر حسب عدد رینولدز در تمامی دماهای مورد آزمایش برای بلوک ۲ در آرایش سری میکروکانال‌ها

۴- نتیجه گیری

در این مطالعه سعی بر این بوده است تا به روش آزمایشگاهی با ترکیب نانوذرات در سیال پایه روغن و استفاده از آن‌ها در میکروکانال‌های موازی و سری، تاثیر آن‌ها بر مشخصه‌های انتقال حرارت و افت فشار بررسی گردد. در واقع اثر دو مکانیزم میکروکانال و نانوسیالات بصورت توأم مورد بررسی قرار گرفته است. نانوذرات TiO_2 و SiO_2 با غلظت‌های حجمی ۰.۰۵٪ و ۰.۱٪ محلول در روغن هیدرولیک ۶۸ به عنوان سیال عامل انتخاب گردیدند. همچنین تمامی آزمایشات در سه دبی ۰.۵، ۱ و ۱.۵ لیتر بر دقیقه و چهار دمای ۴۰، ۴۵، ۵۰ و ۵۵ درجه سانتی‌گراد صورت گرفتند.

نتایج به دست آمده از این پژوهش به شرح زیر می‌باشد:



شکل ۲۰- تغییرات عدد ناسلت بر حسب عدد رینولدز در تمامی دماهای مورد آزمایش برای بلوک ۲ در آرایش موازی میکروکانال‌ها

دمای سطح ($^{\circ}\text{C}$)	T_s
دمای ورودی ($^{\circ}\text{C}$)	T_{in}
دمای خروجی ($^{\circ}\text{C}$)	T_{out}
نرخ انتقال گرما (J/s)	\dot{Q}
ظرفیت حرارتی در فشار ثابت (J/kg.K)	C_p
ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی ($\frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}}$)	h
فشار (bar)	P
ضریب هدایت حرارتی (W/m.K)	k
سطح مقطع (m^2)	A_{HS}
قطر هیدرولیکی (m)	D_H
سرعت متوسط (m/s)	\bar{V}
ضریب اصطکاک	f
علائم یونانی	
چگالی (kg/m^3)	ρ
ویسکوزیته دینامیکی (N.s/m^2)	μ
ویسکوزیته سینماتیکی (m^2/s)	ν
درصد حجمی	ϕ
اندیس	n
نانوسیال	nf
مخفف‌ها	
عدد رینولدز	Re
عدد ناسلت	Nu
میکروسکوپ الکترونی عبوری	TEM
میکروسکوپ الکترونی روبشی	SEM

مراجع و منابع

- [1] Bergles, A., *Techniques to enhance heat transfer*. Handbook of heat transfer, 1998. 3: p. 11.1-11.76.
- [2] Tuckerman, D.B. and R.F.W. Pease, *High-performance heat sinking for VLSI*. IEEE Electron device letters, ۱۹۸۱. ۲(۵): p. ۱۲۶-۱۲۹.
- [3] Gaikwad, S.M. and M. Nalawade, *Investigation of heat transfer and fluid flow characteristics in straight and zigzag microchannels with water as working medium*. International Journal of Ambient Energy, 2021: p. 1-7.
- [4] Kong, D., et al., *An additively manufactured manifold-microchannel heat sink for high-heat flux cooling*.

- با افزایش دبی جریان و در نتیجه افزایش عدد رینولدز، انتقال حرارت (عدد ناسلت) افزایش می‌یابد که در تمامی حالات آزمایش‌ها این موضوع برقرار است.
- افزودن نانوذره TiO_2 با غلظت‌های حجمی ۰.۰۵٪ و ۰.۱٪ به سیال پایه به ترتیب موجب افزایش انتقال حرارت تا ۴۸.۳٪ و ۵۶٪ در آرایش موازی و تا ۴۵٪ و ۴۵.۸٪ در آرایش سری شده‌است.
- افزودن نانوذره SiO_2 با غلظت‌های حجمی ۰.۰۵٪ و ۰.۱٪ به سیال پایه به ترتیب موجب افزایش انتقال حرارت تا ۳۲.۳٪ و ۵۲.۷٪ در آرایش موازی و تا ۳۶.۹٪ و ۴۲٪ در آرایش سری شده‌است.
- افزایش کسر حجمی نانوذرات درون سیال پایه نقش مثبتی در افزایش انتقال حرارت سیال عامل دارد.
- همراه با افزایش انتقال حرارت در پی افزودن نانوذرات درون سیال پایه، افزایش ناچیزی در افت فشار به میزان ۰.۹٪ هم مشاهده می‌شود.
- نانوذره TiO_2 با غلظت حجمی ۰.۱٪ تا ۲۱.۱٪ عملکرد حرارتی بهتری نسبت به نانوذره SiO_2 با غلظت حجمی ۰.۱٪ نشان داده است که علت این موضوع، بالاتر بودن ضریب هدایت حرارتی TiO_2 نسبت به SiO_2 می‌باشد.
- چینش سری میکروکانال‌ها به دو دلیل نسبت به چینش موازی ارجحیت دارد؛ اول: عدد ناسلت سیال پایه در حالت سری تا ۴۱.۸٪ بیشتر از حالت موازی می‌باشد. دوم: دمای سطح در حالت سری خنک‌تر از حالت موازی می‌باشد. از دلایل این پدیده می‌توان به کمتر بودن دبی جریان عبوری از میکروکانال‌ها در چینش موازی نسبت به چینش سری اشاره کرد، زیرا در چینش موازی، جریان سیال عبوری میان دو میکروکانال تقسیم شده و نصف چینش سری میکروکانال‌ها می‌باشد.
- چینش سری با وجود عملکرد مناسب‌تر حرارتی نسبت به موازی، به علت افزایش میزان افت فشار تا ۸۲.۱۱٪ نسبت به موازی دارای ضعف می‌باشد و باید این موضوع هنگام خرید و انتخاب پمپ مورد استفاده، در نظر گرفته شود.

فهرست علائم

علائم انگلیسی

$$q'' \quad \text{شار حرارتی} \quad \left(\frac{\text{W}}{\text{m}^2}\right)$$

- of water-based alumina nanofluids in microchannels. Case Studies in Thermal Engineering*, 2020. **22**: p. 100746.
- [14] Alshayji, A., A. Asadi, and I.M. Alarifi, *On the heat transfer effectiveness and pumping power assessment of a diamond-water nanofluid based on thermophysical properties: An experimental study. Powder Technology*, 2020. **373**: p. 397-410.
- [15] E. Şimşek, S. Coskun, T. Okutucu-Özyurt and H.E. Unalan, *Heat transfer enhancement by silver nanowire suspensions in microchannel heat sinks. International Journal of Thermal Sciences*, 2018. **123**: p. 1-13.
- [16] Bowers, J., et al., *Flow and heat transfer behaviour of nanofluids in microchannels. Progress in Natural Science: Materials International*, 2018. **28**(2): p. 225-234.
- [17] M.M. Sarafraz, V. Nikkhah, M. Nakhjavani and A. Arya, *Thermal performance of a heat sink microchannel working with biologically produced silver-water nanofluid: experimental assessment. Experimental Thermal and Fluid Science*, 2018. **91**: p. 509-519.
- [18] Park, H.S. and J. Punch, *Friction factor and heat transfer in multiple microchannels with uniform flow distribution. International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2008. **51**(17-18): p. 4535-4543.
- [19] Moffat, R.J., *Describing the uncertainties in experimental results. Experimental thermal and fluid science*, 1988. **1**(1): p. 3-17.
- [5] Spizzichino, M., G. Sinibaldi, and G.P. Romano, *Experimental investigation on fluid mechanics of micro-channel heat transfer devices. Experimental Thermal and Fluid Science*, 2020. **118**: p. 110141.
- [6] Zeng, C., et al., *Optimization of the thermal-hydraulic performance of zigzag-type microchannel heat exchangers using asymmetric geometry. Applied Thermal Engineering*, 2022. **217**: p. 119216.
- [7] Peng, Y., et al., *The experimental study of the heat transfer performance of a zigzag-serpentine microchannel heat sink. International journal of thermal sciences*, 2021. **163**: p. 106831.
- [8] Zhou, X., et al., *Experimental study on heat transfer and flow resistance performance of a microchannel heat exchanger with zigzag flow channels. Progress in Nuclear Energy*, 2022. **147**: p. 104190.
- [9] Dai, Z., D.F. Fletcher, and B.S. Haynes, *Impact of tortuous geometry on laminar flow heat transfer in microchannels. International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2015. **83**: p. 382-398.
- [10] A.J. Chamkha, M. Molana, A. Rahnama, F. Ghadami, *On the nanofluids applications in microchannels: A comprehensive review. Powder Technology*, 2018. **332**: p. 287-322.
- [11] T. Balaji, C.Selvam, D.M. Lal and S. Harish, *Enhanced heat transport behavior of micro channel heat sink with graphene based nanofluids. International Communications in Heat and Mass Transfer*, 2020. **117**: p. 104716.
- [12] Ding, M., C. Liu, and Z. Rao, *Experimental investigation on heat transfer characteristic of TiO₂-H₂O nanofluid in microchannel for thermal energy storage. Applied Thermal Engineering*, 2019. **160**: p. 114024.
- [13] C. Li, J. Huang, Y. Shang and H. Huang, *Study on the flow and heat dissipation*