

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

فاطمه مرادی (دانشجوی کارشناسی ارشد)

مرتضی خیاط* (استادیار)

محمدحسن نوبختی (استادیار)

دانشکده‌ی مهندسی مکانیک، برق و کامپیوتر، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات

مهندسی مکانیک شریف (بهار ۱۴۰۳)
دوره‌ی ۴۰، شماره‌ی ۱، ص. ۸۵-۹۶، (پژوهشی)

هدف از انجام پژوهش حاضر، بررسی تجربی مشخصه‌های انتقال حرارت نانوسیالات پایه روغن درون میکروکانال‌های موجی با چینش سری و موازی می‌باشد. آزمایش‌ها بر روی سیال پایه روغن حاوی نانوذرات فلزی و غیرفلزی TiO_2 و SiO_2 در غلظت‌های حجمی $1/5^\circ$ و $1^\circ/5$ در سه دبی مختلف $1^\circ/5$ ، 1° و $1/5$ لیتر بر دقیقه و چهار دمای ورودی 40° ، 45° ، 50° و 55° درجه سانتی‌گراد انجام گرفت. نتایج نشان‌دهنده افزایش عدد ناسلت سیال پایه تا $41/8$ درصد در چینش سری و کاهش دمای سطح در چینش سری نسبت به موازی می‌باشد. همچنین، نانوسیالات TiO_2 و SiO_2 با غلظت حجمی $1/8$ درصد به ترتیب بیشترین میزان افزایش انتقال حرارت را تا 56 و $52/7$ درصد در چینش موازی و $45/8$ و 42 درصد در چینش سری نسبت به سیال پایه داشته‌اند. در نهایت، افت فشار مقطع تست در چینش سری $82/1$ درصد بیشتر از چینش موازی ثبت گردید.

واژگان کلیدی: افت فشار، انتقال حرارت جابه‌جایی، جریان آرام، عدد ناسلت، میکروکانال، نانوسیال پایه روغن.

iamfat.emehmoradi@gmail.com
mkhayat@srbiau.ac.ir
m.nobakhti@srbiau.ac.ir

۱. مقدمه

با پیشرفت فناوری 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 به‌علت تولید حرارت زیاد هنگام کار توسط این قطعات ایجاد می‌شود. گرم شدن قطعات سبب پایین آمدن توان و بازده دستگاه، خرابی و از کار افتادگی آن می‌گردد. بنابراین، یکی از مهم‌ترین مسائل در صنعت، دفع این گرما از دستگاه‌ها می‌باشد که به‌کارکرد مناسب دستگاه در دمای پایین و مطلوب کمک می‌کند. برگاز و همکاران روش‌های بهبود انتقال حرارت را به دو دسته‌ی فعال و غیرفعال تقسیم کردند.^[۱] 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 به‌علت هزینه‌های سنگین و

پیشچیدگی‌های 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 تأثیر رسانش و گرادیان دما در قطعه، نقش به‌سزایی در بهبود عملکرد قطعات گرمازا دارد. از دیگر ویژگی‌های آن می‌توان به فشرده‌سازی 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 به‌اصطلاح چاه گرمایی میکروکانالی^۱ می‌نامند. ایده‌ی استفاده از میکروکانال‌ها اولین بار توسط تاگرمین و پیس مطرح شد.^[۱] آنها از یک میکروکانال مستطیلی به همراه یک زیرلایه‌ی سیلیکونی به ابعاد 1×1 سانتی‌متر مربع استفاده کردند و با استفاده از آب به‌عنوان سیال خنک‌کننده و میکروکانال طراحی شده توانستند میزان $79^\circ w/cm^2$ شار حرارتی را

* نویسنده مسئول
تاریخ: دریافت ۱۴۰۲/۲/۴، اصلاحیه ۱۴۰۲/۸/۷، پذیرش ۱۴۰۲/۸/۷.

استناد به این مقاله:

مرادی، فاطمه، خیاط، مرتضی و نوبختی، محمدحسن. ۱۴۰۳. مطالعه تجربی اثر نانوسیالات پایه روغن بر مشخصه‌های انتقال حرارت در آرایش‌های مختلف میکروکانال‌های موجی. مهندسی مکانیک شریف، ۴۰(۱)، صص. ۸۵-۹۶. DOI:10.24200/J40.2023.62014.1676

جذب کنند. گایکواد و نالواوه در مطالعه‌ای تجربی به بررسی مشخصه‌های انتقال حرارت آب درون میکروکانال‌های مستقیم و موجی پرداختند.^[۳] 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 در مطالعه‌ای آزمایشگاهی به بررسی یک چاه گرمایی منیفلد میکروکانالی ساخته شده به‌وسیله پرینت سه‌بعدی پرداختند. نتایج آنها نشان داد که چاه گرمایی مذکور قابلیت دفع شار گرمایی تا 240 w/cm^2 نرخ جریان جرمی 395 gr/min را دارا می‌باشد و تنها $1/7$ کیلوپاسکال افت فشار ایجاد می‌کند.^[۴] اسپیزچیچینو و همکاران در یک مطالعه آزمایشگاهی به بررسی رفتار ترموهیدرودینامیکی یک میکروکانال ماریچی با سطح مقطع مربعی و یک میکروکانال موجی سینوسی پرداختند و نتایج آزمایشات خود را با یک میکروکانال موازی مستقیم مقایسه نمودند.^[۵] محدوده رینولدز مورد بررسی آنها $150-50$ و در رژیم جریان آرام بود. نتایج نشان داد عملکرد حرارتی میکروکانال موجی سینوسی بهتر از مدل ماریچی و عملکرد مدل ماریچی بهتر از گونه موازی مستقیم بوده است. زنگ و همکاران طی یک آزمایش تجربی به بهینه‌سازی عملکرد حرارتی - هیدرولیکی میدل‌های میکروکانالی زیگزاگی با استفاده از هندسه نامتقارن پرداختند.^[۶] 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 اثر بخشی سطح نسبت به میکروکانال متقارن بهتر است و هرچه دمای کاری بالاتر باشد، این برتری افزایش می‌یابد.

پنگ و همکاران طی یک مطالعه تجربی به بررسی عملکرد حرارتی میکروکانال ماریچی - زیگزاگی پرداختند. سیال عامل مورد استفاده آنها آب دیونیزه بود.^[۷] نتایج نشان داد میکروکانال ماریچی - زیگزاگی در مقایسه با میکروکانال ساده عملکرد حرارتی بهتری دارد. ژو و همکاران 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 میدل حرارتی میکروکانالی یکسان است.^[۸] دای و همکاران در یک مطالعه تجربی به بررسی خصوصیات هیدرودینامیکی و انتقال حرارت آب از طریق میکروکانال موج‌دار و زیگزاگ شکل برای محدوده رینولدز $90-50$ پرداختند.^[۹] نتایج پژوهش آنها نشان داد که افزایش انتقال حرارت قابل توجهی در کانال‌های موج‌دار و زیگزاگ در مقایسه با کانال مستقیم حاصل می‌شود، اما موجب 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 (رادیا‌تور خودرو، مبدل‌های صنعتی، راکتورهای هسته‌ای، قطعات الکترونیکی، پره‌های توربین)، گرمایش (فرایند خشک کردن)، انرژی‌های تجدیدپذیر (کلکتورهای خورشیدی، آبگرم‌کن و پل‌های 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.

بلاجی و همکاران در یک مطالعه آزمایشگاهی به بررسی انتقال حرارت چاه حرارتی میکروکانال با نانوسیالات پایه گرافن محلول در آب پرداختند.^[۱۱] آنها اثر غلظت و دبی جرمی را بر پارامترهایی مانند ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی، 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 درصد افزایش می‌دهد. این نتایج همراه با افزایش افت فشار به میزان 12 درصد نسبت به آزمایشات سیال پایه می‌باشد. دینگ و همکاران در مطالعه‌ای تجربی به بررسی انتقال حرارت نانوسیال پایه آب TiO_2 در داخل میکروکانال پرداختند. نتایج نشان داد در غلظت حجمی 1 درصد نانوسیال، عدد ناسلت به میزان 19 الی 41 درصد افزایش یافته است.^[۱۲] همچنین، تنها 8 درصد افت فشار در پی استفاده از نانوسیال مشاهده شده است. لی و همکاران در مطالعه‌ای تجربی به بررسی انتقال حرارت نانوسیال پایه آب آلومینا با غلظت حجمی $1/5$ الی $5/5$ درصد درون میکروکانال ماریچی پرداختند.^[۱۳] 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 $4/5$ درصد بوده است. الشابیجی و همکاران طی یک مطالعه تجربی به ارزیابی اثر بخشی انتقال حرارت نانوسیال الماس - آب درون میکروکانال پرداختند. نانوسیالات به روش دو مرحله‌ای و در 6 کسر حجمی مختلف تهیه شدند.^[۱۴] میزان هدایت حرارتی سیال پایه با افزودن نانوذره الماس 25 درصد افزایش داشته است. همچنین، نتایج نشان داد که نانوسیال الماس منجر به افزایش انتقال حرارت تا 30 درصد در بیشترین غلظت حجمی می‌گردد. سیمسک و همکاران در پژوهشی تجربی به بررسی متغیرهای انتقال حرارت و افت فشار در نانوسیال آب - نانوسیم نقره داخل میکروکانال مستطیلی پرداختند.^[۱۵] 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 درصد افزایش یافته است. باورز و همکاران در مطالعه‌ای تجربی به بررسی جریان و انتقال حرارت نانوسیال آب - سیلیکا و آب - آلومینا در داخل میکروکانال پرداختند.^[۱۶] نتایج بیانگر افزایش انتقال حرارت جابه‌جایی 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 جابه‌جایی می‌گردد. سرافراز و همکاران در مطالعه‌ای تجربی به بررسی متغیرهای افت فشار، ضریب اصطکاک، انتقال حرارت و مقاومت گرمایی در جریان نانوسیال آب - نقره با غلظت‌های حجمی $1/5$ و $5/5$ درصد داخل میکروکانال مستطیلی پرداختند.^[۱۷] 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 تأثیر 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 اتیلان

اندازه‌گیری شود. در جدول ۳ محاسبات جرم نانوذرات مورد استفاده در این پژوهش ارائه شده است.

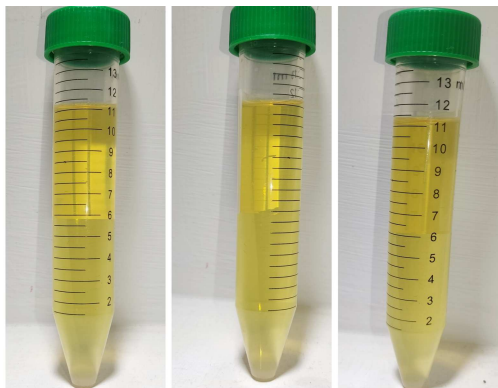
$$m = \frac{\rho_{nf} \times V_{nf} \times (\varphi \times 10^{-2})}{(1 - \varphi \times 10^{-2})} \quad (1)$$

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 رؤیت 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 ته‌نشین کردن.

جهت بررسی ابعاد ذرات و همچنین پایداری نانوسیالات، با استفاده از دستگاه میکروسکوپ الکترونی عبوری، تصاویر TEM از نانوسیالات با غلظت حجمی ۰/۵ درصد در مقیاس ۱۰۰ نانومتر تهیه شده است. با بررسی این تصاویر در

جدول ۳. جرم نانوذرات مورد استفاده در پژوهش حاضر.

جرم SiO ₂ (gr)	جرم TiO ₂ (gr)	درصد غلظت حجمی
۳/۹۷۶	۶/۳۴۸	۰/۵
۷/۹۵۷	۱۲/۷۰۲	۰/۱



شکل ۱. پایداری نانوسیال SiO₂ در بازه‌های زمانی متفاوت.



شکل ۲. پایداری نانوسیال TiO₂ در بازه‌های زمانی متفاوت.

گلیکول با 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

۱.۲. بیان مسئله

در پژوهش حاضر به بررسی مشخصه‌های انتقال حرارت و افت فشار نانوسیال پایه روغن درون میکروکانال‌های موجی پرداخته شده است. به منظور 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 ۰/۵ و ۰/۱ درصد 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، تراکم‌ناپذیر و شار حرارتی ثابت انجام گردیدند. ناحیه مورد مطالعه، ناحیه توسعه‌یافته 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.

۲.۲. نحوه آماده‌سازی نانوسیال

اولین گام مهم در این مطالعه، آماده سازی نانوسیال می‌باشد. تهیه 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 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

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.

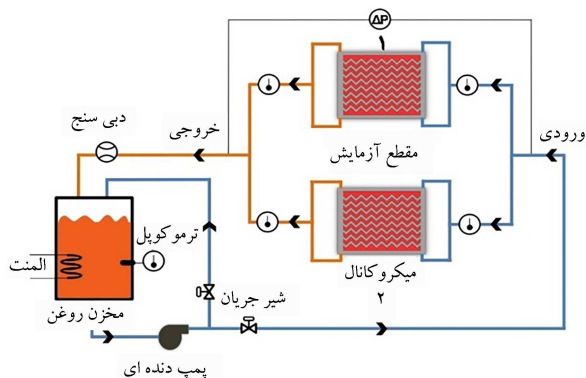
SiO ₂	TiO ₂	نوع نانوذره
۲۶۵۰	۴۲۳۰	چگالی (kg/m ³)
۱/۵	۸/۴	ضریب هدایت حرارتی (w/m.K)
۷۳۰	۶۹۲	ظرفیت گرمایی ویژه (J/kg.K)
۲۰	۲۰	قطر متوسط (nm)
سفید	سفید	رنگ
Arminano	Npyekta	برند

پس از انجام آخرین آزمایش به ثبت رسیده است و همان طور که قابل مشاهده است، مقدار بسیار کمی از نانوذرات TiO_2 درون میکروکانالها رسوب کرده است.

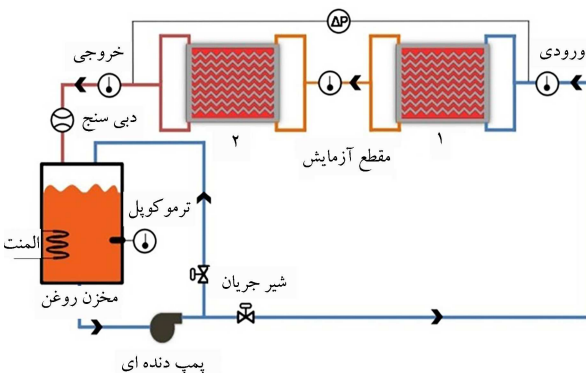
۳.۲. دستگاه آزمایشگاه

دستگاه آزمایش پژوهش حاضر شامل سه بخش اصلی سیستم نگهداری و انتقال سیال (پمپاژ)، تجهیزات آزمایشگاهی و چاه گرمایی می باشد. در شکل های ۶ و ۷ شماتیک مدار آزمایش به ترتیب در چینش های موازی و سری نشان داده شده است. سیستم نگهداری و انتقال سیال شامل مخزن آهنی به حجم ۵ لیتر و پمپ دنده ای جهت پمپاژ سیال به درون سیکل می باشد. برخی از تجهیزات آزمایشگاهی نیز شامل فلومتر مدرج روغنی جهت اندازه گیری و تنظیم دبی مورد آزمایش، مانومترهای روغنی جهت اندازه گیری افت فشار، شیر هواگیری و تنظیم اتومات جهت از بین بردن حباب های احتمالی موجود در سیکل، سنسورهای $PT 100$ جهت قرائت دمای سطح، سیال ورودی به میکروکانال و خروجی از آن، کنترلر دما جهت نمایش و کنترل دمای اندازه گیری شده توسط سنسورها و کنتاکتور به منظور تنظیم و ثابت نگه داشتن دما بر روی مقدار مشخص می باشد.

چاه گرمایی پژوهش حاضر که در شکل ۸ نشان داده شده است، شامل بلوک زیرین، بلوک فوقانی، میکروکانال مسی، المنت گرمایی و سنسورهای $PT 100$ جهت قرائت دمای سطح میکروکانال می باشد. بلوک زیرین از جنس استیل ضدزنگ در ابعاد می باشد. $75 \times 95 \text{ mm}^2$ به منظور مشاهده 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



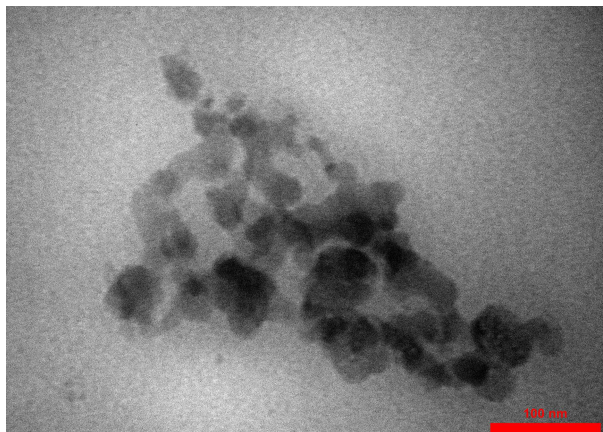
شکل ۶. شماتیک مدار آزمایش در آرایش موازی.



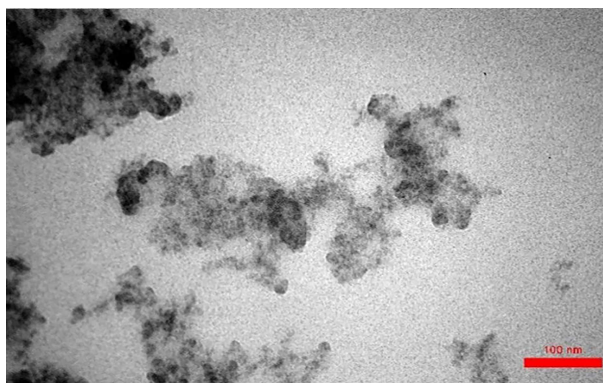
شکل ۷. شماتیک مدار آزمایش در آرایش سری.

شکل های ۳ و ۴ مشاهده می شود 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.

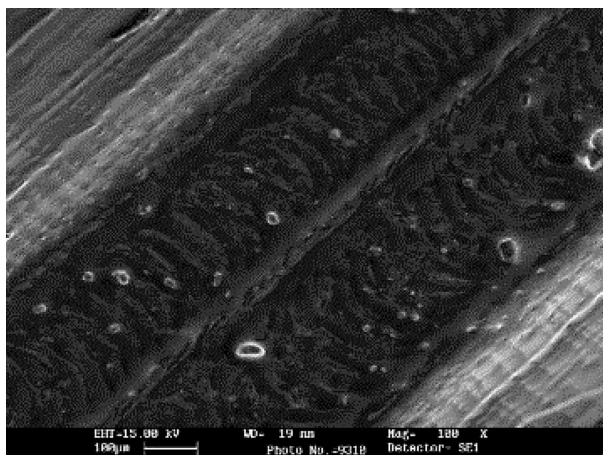
در تحقیق حاضر به منظور بررسی مورفولوژی سطح، تصویربرداری توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) از سطح میکروکانال پس از انجام آزمایش صورت پذیرفته و به عنوان نمونه تصویر SEM نانوسیال TiO_2 با غلظت حجمی $1/8$ درصد در شکل ۵ نشان داده شده است. این تصویر پس از گذشت ۴۵ روز



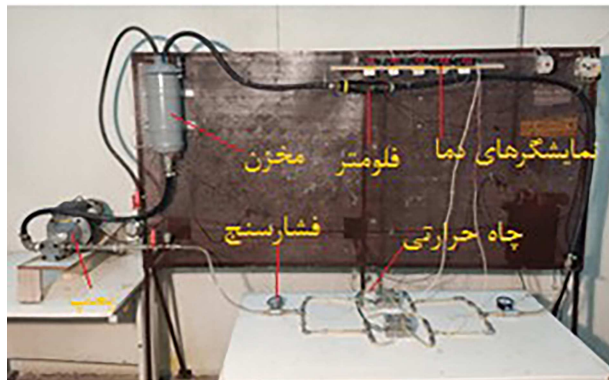
شکل ۳. تصویر TEM نمونه TiO_2 .



شکل ۴. تصویر SEM نمونه TiO_2 .



شکل ۵. تصویر SEM کانال به همراه نانوذرات TiO_2 $1/8$ درصد.



شکل ۱۰. تصویر دستگاه آزمایش پژوهش حاضر.

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 در حالت المنت خاموش و 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.

۵.۲. روابط حاکم

برای محاسبه نرخ انتقال حرارت نانوسیالات از رابطه 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 جابه‌جایی، دمای بالک و عدد ناسلت نانوسیال به ترتیب از روابط ۴، ۵، و ۶ محاسبه می‌شوند.

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

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

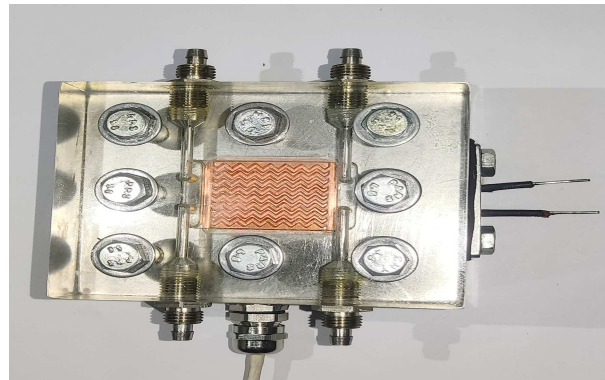
$$Nu_{nf} = \frac{h_{nf} DH}{K_{nf}} \quad (6)$$

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

۳. نتایج

۱.۳. عدد ناسلت حالت موازی

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، بنابراین به‌عنوان نمونه تمامی نمودارها تنها برای دمای ۴۰ درجه سانتی‌گراد ترسیم گردیده‌اند. در شکل‌های ۱۱ و ۱۲ تغییرات عدد ناسلت بر



شکل ۸. تصویر چاه گرمایی پژوهش حاضر.



شکل ۹. تصویر میکروکانال مسی پژوهش حاضر.

یکنواخت و مساوی بودن جریان سیال درون تمامی کانال‌ها، فضای کلکتور شکل درون بلوک در نظر گرفته شده است.

به‌طور معمول 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 ۲ میلی‌متر، قطر هیدرولیکی ۱ میلی‌متر و به ابعاد $28 \times 23 \text{ mm}^2$ می‌باشد که با استفاده از دستگاه فرز پانتوگراف و با دقت 0.1° میلی‌متر ساخته شده است. تصویر میکروکانال پژوهش حاضر در شکل ۹ نشان داده شده است.

۴.۲. روش انجام آزمایش‌ها

پیش از شروع آزمایش، به‌منظور جلوگیری از انسداد کانال‌ها توسط ذرات 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، سیال به مدت یک ساعت در سیکل جریان می‌یابد تا حباب‌های احتمالی موجود در سیکل از بین رفته و 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 که دمای سیال ورودی به کمک هیتر تعبیه شده در کف مخزن روغن افزایش یافته و به مقدار مشخص می‌رسد. مقدار شار حرارتی المنت میکروکانال‌ها به وسیله‌ی یک دیمتر تنظیم می‌گردد و تا پایان انجام آزمایشات

۲.۳. عدد ناسلت حالت سری

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

نانوسیالات TiO_2 و SiO_2 با غلظت حجمی ۰/۱ درصد به ترتیب ۴۵/۸ و ۴۲ درصد در بلوک ۱ و ۴۵/۵ و ۲۸/۱ درصد در بلوک ۲ نسبت به سیال پایه افزایش انتقال حرارت داشته‌اند. نانوسیالات TiO_2 و SiO_2 با غلظت حجمی ۰/۰۵ درصد نیز در افزایش انتقال حرارت موثر بوده‌اند، به طوری که به ترتیب به میزان ۴۵ و ۳۶/۹ درصد در بلوک ۱ و ۲۱/۶ و ۱۷ درصد در بلوک ۲، انتقال حرارت سیال پایه را بهبود بخشیده است. همچنین، تأثیر مثبت افزایش غلظت نانوذرات بر بهبود عملکرد حرارتی سیال پایه به خوبی قابل مشاهده است.

۳.۳. مقایسه عملکرد حرارتی سیال پایه در آرایش سری و موازی

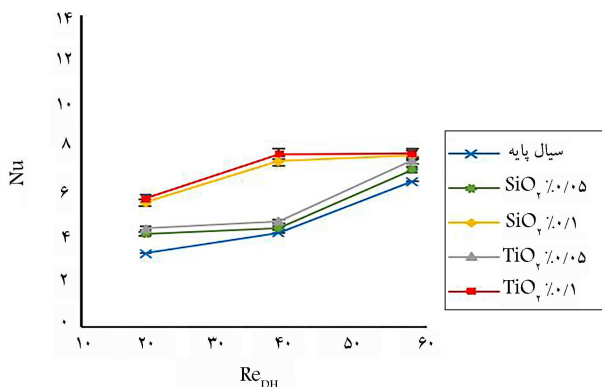
به منظور مقایسه عملکرد حرارتی سیال پایه در آرایش موازی و سری میکروکانال‌ها، مقادیر عدد ناسلت این دو چیدمان برای چهار دمای ورودی ۰، ۴۰، ۵۰ و ۵۵ درجه سانتی‌گراد در عدد رینولدز مشترک ۱۹/۲۹ حالت سری و موازی و برای دو بلوک ۱ و ۲ در جدول ۴ ارائه شده است.

همان‌طور که مشاهده می‌شود، 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 عبارت دیگر، در حالت سری، میزان انتقال

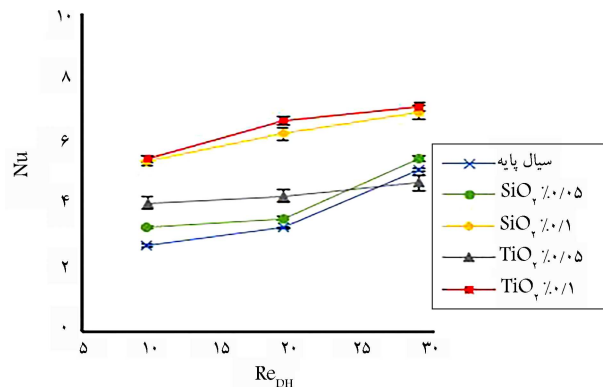
حساب عدد رینولدز در آرایش موازی میکروکانال‌ها به ترتیب برای بلوک ۱ و بلوک ۲ نشان داده شده است. این تغییرات برای سیال پایه و نانوسیالات TiO_2 و SiO_2 در غلظت‌های حجمی ۰/۰۵ و ۰/۱ درصد در سه دبی مختلف ۰/۵، ۱ و ۱/۵ لیتر بر دقیقه گزارش شده است.

در شکل‌های ۱۱ و ۱۲، با افزایش مقدار عدد رینولدز، عدد ناسلت افزایش یافته است. به عبارتی دیگر، با توجه به رابطه عدد رینولدز $(Re = \frac{\rho Q}{\pi D v})$ و همچنین دبی حجمی $(Q = VA)$ می‌توان دریافت که با افزایش میزان نرخ جریان و همچنین افزایش سرعت جریان، انتقال حرارت بهبود می‌یابد.

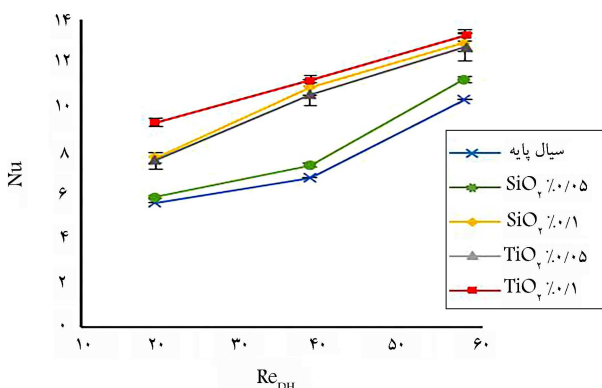
همان‌گونه که مشاهده می‌شود، نانوذرات TiO_2 و SiO_2 با غلظت حجمی ۰/۱ درصد در تمامی رینولدزها بیشترین میزان انتقال حرارت را به خود اختصاص داده‌اند. با این وجود، نانوذره TiO_2 با فاصله در صدر این نمودار قابل مشاهده است که علت آن بالاتر بودن میزان ضریب هدایت حرارتی این ذرات نسبت به ذرات SiO_2 می‌باشد. به عبارتی دیگر، نانوسیالات TiO_2 و SiO_2 با غلظت حجمی ۰/۱ درصد، به ترتیب ۵۶ و ۵۲/۷ درصد در بلوک ۱ و ۵۵/۸ و ۴۲/۴ درصد در بلوک ۲ نسبت به سیال پایه افزایش انتقال حرارت داشته‌اند. استفاده از نانوذرات TiO_2 و SiO_2 با غلظت حجمی ۰/۰۵ درصد نیز در افزایش انتقال حرارت موثر بوده است، به طوری که به ترتیب به میزان ۴۸/۶ و ۲۲/۵ درصد در بلوک ۱ و ۳۲/۸ و ۳۲/۳ درصد 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.



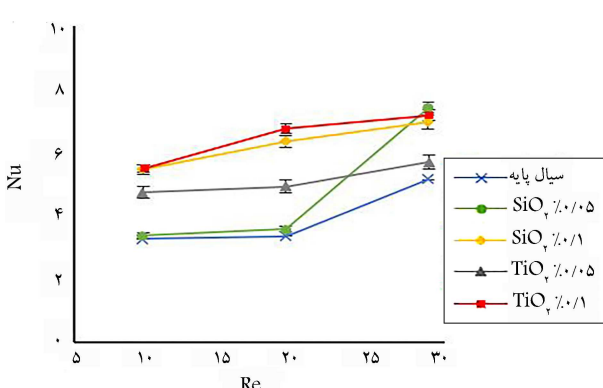
شکل ۱۳. تغییرات عدد ناسلت بر حسب عدد رینولدز در دمای ۴۰°C برای بلوک ۱ در آرایش سری میکروکانال‌ها.



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



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



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

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

عدد ناسلت سیال پایه				عدد رینولدز	دمای ورودی (°C)
آرایش سری		آرایش موازی			
بلوک ۱	بلوک ۲	بلوک ۱	بلوک ۲		
۳/۲۹	۵/۶۷	۳/۲۷	۳/۳۳	۱۹/۲۹	۴۰
۳/۵۹	۶/۴۰	۳/۵۷	۳/۷۲	۱۹/۲۹	۴۵
۳/۶۶	۶/۶۹	۳/۶۴	۴/۰۸	۱۹/۲۹	۵۰
۴/۱۱	۷/۱۲	۴/۰۶	۵/۵۱	۱۹/۲۹	۵۵

دمای سطح گشته‌اند. نانوسیالات TiO_2 و SiO_2 با درصد حجمی ۰/۰۵ نیز به میزان ۴/۶ و ۳/۶۶ درصد در بلوک ۱ و ۳/۲ و ۳ درصد در بلوک ۲ در کاهش دما موثر بوده‌اند.

حرارت بلوک ۲ تا ۴۱/۸ درصد بیشتر از حالت موازی می‌باشد که این موضوع بیانگر مناسب‌تر بودن چینش سری میکروکانال‌ها نسبت به موازی است.

۴.۳. دمای سطح حالت موازی

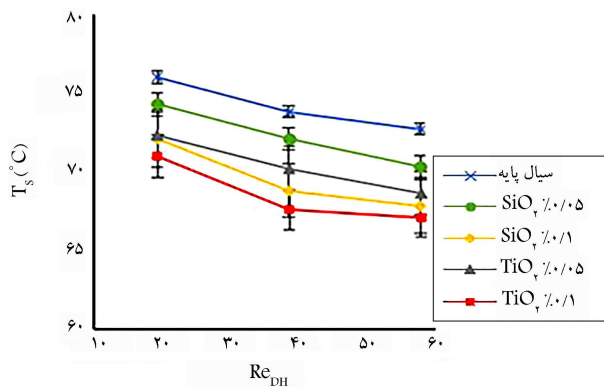
در شکل‌های ۱۵ و ۱۶ تغییرات دمای سطح بر حسب عدد رینولدز در آرایش موازی میکروکانال‌ها به ترتیب برای بلوک ۱ و ۲ نشان داده شده است.

همان‌طور که در این دو نمودار مشاهده می‌شود و مطابق با 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 درصد در بلوک ۱ و ۹/۷ و ۷/۳ درصد در بلوک ۲ نسبت به سیال پایه منجر به کاهش

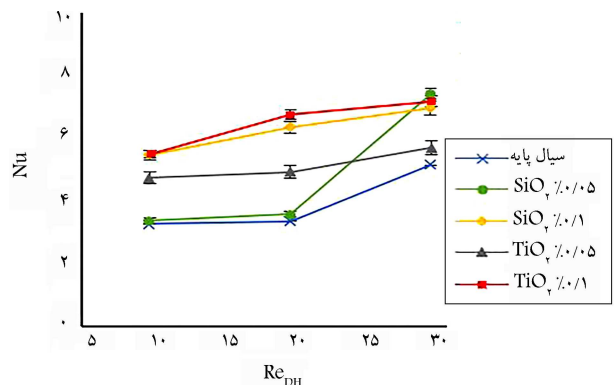
۵.۳. دمای سطح حالت سری

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

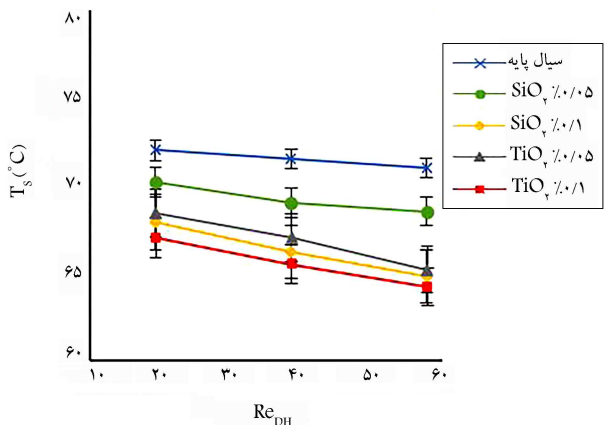
نانوسیال TiO_2 و SiO_2 با درصد حجمی ۰/۱ به ترتیب ۸/۷۴ و ۶/۲ درصد در بلوک ۱ و ۹/۵ و ۸/۵ درصد در بلوک ۲ نسبت به سیال پایه منجر به کاهش دمای



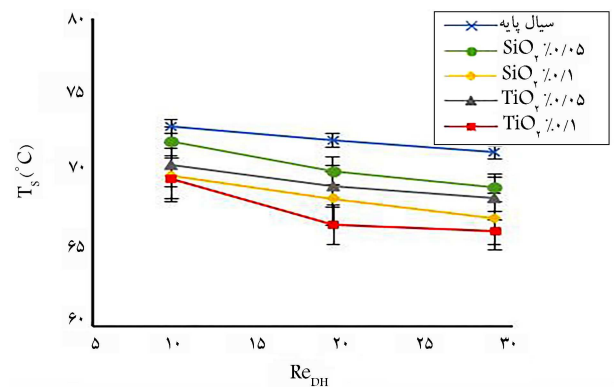
شکل ۱۷. تغییرات دمای سطح بر حسب عدد رینولدز در دمای ۴۰°C برای بلوک ۱ در آرایش سری میکروکانال‌ها.



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.

سطح گشته‌اند. نانوسیالات TiO_2 و SiO_2 با درصد حجمی ۵/۰٪ نیز به میزان ۶/۷ و ۴/۵ درصد در بلوک ۱ و ۷/۵ و ۳/۶ درصد 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 خنک‌کاری 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.

۶.۳. صحت‌سنجی داده‌های هیدرودینامیکی

به منظور صحت‌سنجی داده‌های آزمایش، مقادیر افت فشار اندازه‌گیری شده در این پژوهش با داده‌های به دست آمده از معادله داریسی - ویشباخ مطابق رابطه ۷ مقایسه و نتایج آن در جدول ۵ ارائه شده است.

پارک و پانچ، ضریب اصطکاک جریان آرام توسعه‌یافته درون میکروکانال را از رابطه ۸ محاسبه نموده‌اند که در آن G از رابطه ۹ به دست می‌آید.^[۱۸]

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

$$fRe = 4.77 + 19.764G \quad (8)$$

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

در رابطه ۹، α نسبت ارتفاع به عرض میکروکانال می‌باشد.

جدول ۵ 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.

همان‌طور که از جدول ۶ مشاهده می‌شود، با افزایش دبی جریان، میزان افت

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

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

دبی (lit/min)	افت فشار سیال پایه (bar)	
	سری	موازی
۰/۵	۱/۱۵	۰/۲
۱	۲/۴۲	۰/۶
۱/۵	۳/۲۰	۱

فشار در مسیر جریان نیز افزایش می‌یابد. بر اساس این داده‌ها، افت فشار چینش سری میکروکانال‌ها بین ۷/۶٪ 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

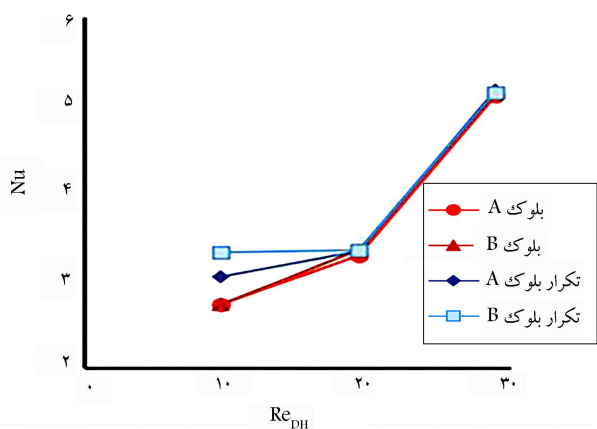
در پژوهش حاضر، پس از اندازه‌گیری شدت جریان و اختلاف پتانسیل دو سر المنت توسط مولتی‌متر، نرخ گرمای منتقل شده از المنت به هرکانال به کمک رابطه $\dot{Q} = V \times I$ محاسبه گردیده است که برابر با $1/73 \text{ J/s}$ می‌باشد. اختلاف دمای سیال ورودی و خروجی میکروکانال از رابطه ۱۰ قابل محاسبه است.

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

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

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 تجربی می‌باشد. از طرفی، با توجه به به‌طور کامل 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 به‌عنوان نمونه، نمودار تکرارپذیری آزمایشات سیال پایه برای آرایش موازی میکروکانال‌ها در دمای 40°C درجه سانتی‌گراد در شکل ۱۹ نشان داده شده است. حداکثر میزان خطا ۱۱ درصد 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.

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

اختلاف دمای سیال ورودی و خروجی میکروکانال ($^{\circ}C$).						
دبی ۱/۵		دبی ۱		دبی ۵/۰		دمای ورودی ($^{\circ}C$)
تجربی	تئوری	تجربی	تئوری	تجربی	تئوری	
۰/۳	۰/۲	۰/۴۵	۰/۲	۰/۹۱	۰/۳	۴۰
۰/۳	۰/۲	۰/۴۵	۰/۲	۰/۹۱	۰/۳	۴۵
۰/۳	۰/۲	۰/۴۵	۰/۲	۰/۹۱	۰/۳	۵۰
۰/۳	۰/۲	۰/۴۵	۰/۲	۰/۹۱	۰/۳	۵۵

جدول ۸. عدم قطعیت تجهیزات پژوهش حاضر.

نوع تجهیز	عدم قطعیت
سنسور $PT 100$	$\pm 0.1^{\circ}C$
مانومتر	$\pm 0.1 \text{ bar}$
فلومتر	$\pm 2.5\%$
ماشین کاری	$\pm 0.1 \text{ mm}$
کولیس (قطر کانال)	$\pm 0.2 \text{ mm}$

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 جدول ۹ عدم قطعیت پارامترهای محاسبه شده در پژوهش حاضر ارائه شده اند. در شکل های ۲۰ و ۲۱ به ترتیب مقادیر عدد ناسلت در بلوک ۲ آرایش موازی و سری میکروکانال ها در تمامی دماهای مورد آزمایش (۴۰، ۴۵، ۵۰ و ۵۵ درجه سانتیگراد) و سه دبی ۱/۵، ۱ و ۵/۰ لیتر بر دقیقه برای سیال پایه و نانوسیالات TiO_2 و SiO_2 با غلظت های حجمی ۵/۰ و ۱/۰ درصد گزارش شده است.

۴. نتیجه گیری

در این مطالعه سعی شده است با روش آزمایشگاهی و ترکیب نانوذرات در سیال پایه روغن و استفاده از آنها در میکروکانال های موازی و سری، تأثیر آنها بر مشخصه های انتقال حرارت و افت فشار بررسی شود. به عبارت دیگر، اثر دو مکانیزم میکروکانال و نانوسیالات به صورت همزمان مورد بررسی قرار گرفته است. نانوذرات TiO_2 و SiO_2 با غلظت های حجمی ۵/۰ و ۱/۰ درصد محلول در روغن هیدرولیک ۶۸ به عنوان سیال حامل انتخاب شدند. همچنین، تمامی آزمایش ها در سه دبی ۱/۵، ۱ و ۵/۰ لیتر بر دقیقه و چهار دمای ۴۰، ۴۵، ۵۰ و ۵۵ درجه سانتیگراد صورت گرفتند.

در زیر به نتایج به دست آمده از این پژوهش اشاره شده است:

۱. با افزایش دبی جریان و در نتیجه افزایش عدد رینولدز، انتقال حرارت (عدد ناسلت) افزایش می یابد که در تمامی حالات آزمایش ها این موضوع برقرار است؛
۲. افزودن نانوذره TiO_2 با غلظت های حجمی ۵/۰ و ۱/۰ درصد به سیال پایه

۹.۳. آنالیز خطای داده ها

به طور کلی دو نوع خطا موجب فاصله گرفتن نتایج داده های آزمایش با مقادیر واقعی آن می شود که نوع اول خطای ناشی از کالیبره نبودن دستگاه ها و تجهیزات اندازه گیری و نوع دوم ناشی از خطای انسانی است که در صورت طراحی آزمایش های بسیار دقیق نیز به طور کامل حذف نمی شود. در تحقیق حاضر سعی شده است تا تمامی خطاهای اندازه گیری به حداقل برسند تا داده های حاصل از آزمایش ها قابل استناد باشند. همچنین، به منظور محاسبه عدم قطعیت و خطاها، از روش موافت بهره گرفته شده است.^[۱۹]

۹.۳.۱. خطای تجهیزات

خطای تجهیزات پژوهش حاضر شامل موارد زیر می باشد:

- خطای سنسورها در خواندن درجه حرارت که به منظور به حداقل رساندن آن، کالیبراسیون سنسور به همراه نمایشگرها انجام شده است؛
- خطای دبی سنج در تنظیم دبی که به منظور اطمینان از دقت آن، دبی سنج کالیبره گردید؛
- شرایط محیطی آزمایشگاه که به منظور اطمینان از دقت نتایج، آزمایشات در دو هفته ای متفاوت جهت بررسی آزمون تکرار پذیری انجام شده است؛
- خطای مانومتر در نمایش دقیق فشار؛
- غلظت حجمی نانوسیال (هنگام 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 در نتیجه کم شدن جرم آن اندازه گیری شده است).

در جدول ۸ عدم قطعیت تجهیزات مورد استفاده در پژوهش حاضر ارائه شده است.

۹.۳.۲. خطای محاسبات

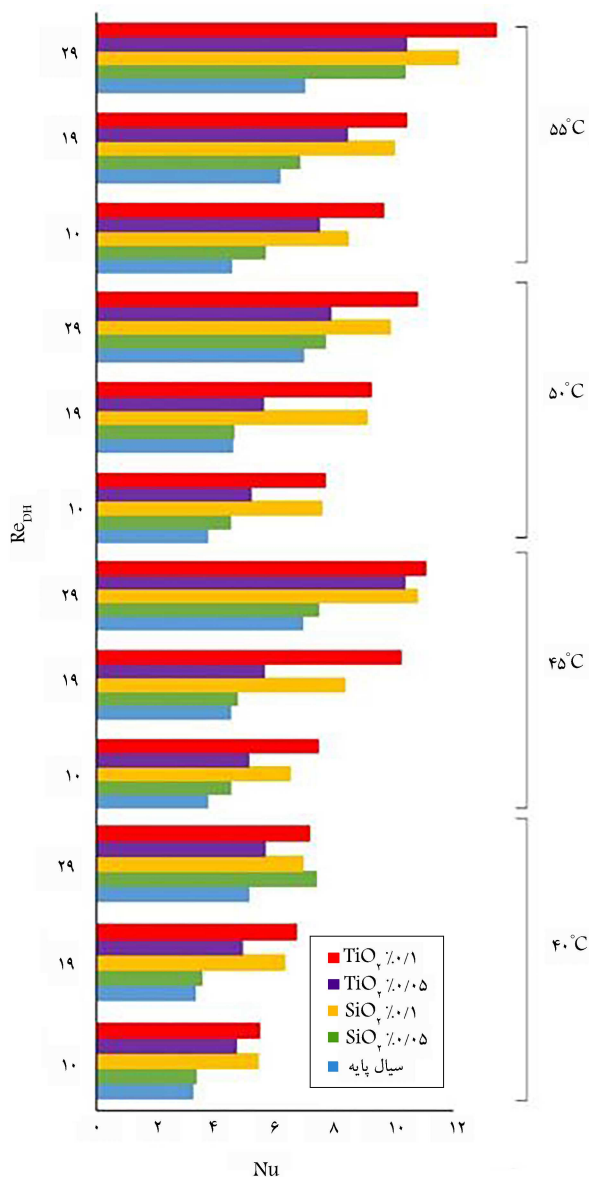
با استفاده از تئوری روش موافت، از روابط ۱۱ الی ۱۴ به ترتیب عدم قطعیت عدد رینولدز، عدد ناسلت، شار حرارتی و ضریب انتقال حرارت جابه جایی محاسبه شده است:

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

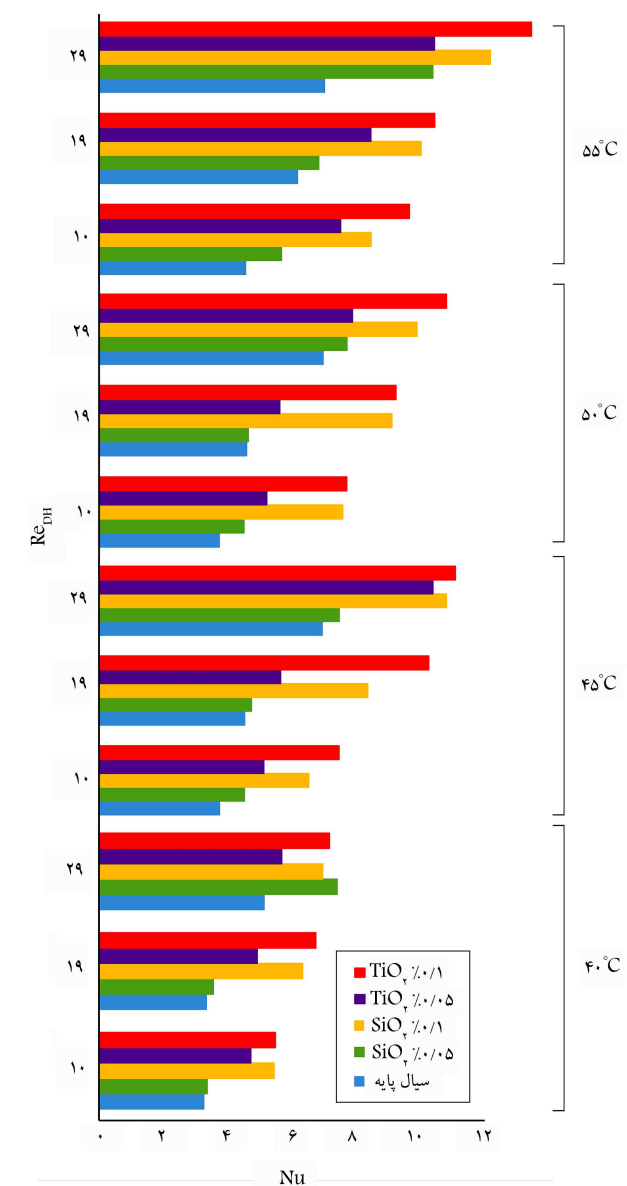
$$U_{Nu} = \left[\left(\frac{h}{k} U_D \right)^2 + \left(\frac{D}{K} U_h \right)^2 + \left(-\frac{hD}{k^2} U_k \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (12)$$

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

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



شکل ۲۱. تغییرات عدد ناسلت بر حسب عدد رینولدز در تمامی دماهای مورد آزمایش برای بلوک ۲ در آرایش سری میکروکانال‌ها.



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

علت این موضوع، بالاتر بودن ضریب هدایت حرارتی TiO₂ نسبت به SiO₂ می‌باشد؛

۷. چپش سری میکروکانال‌ها به دو دلیل نسبت به چپش موازی برتری دارد؛ اول: عدد ناسلت سیال پایه در حالت سری تا ۴۱/۸ درصد 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 چپش موازی نسبت به چپش سری اشاره کرد، زیرا در چپش موازی، جریان سیال عبوری میان دو میکروکانال تقسیم شده و نصف چپش سری میکروکانال‌ها می‌باشد؛

۸. چپش سری با وجود عملکرد مناسب‌تر حرارتی نسبت به موازی، به علت افزایش میزان افت فشار تا ۸۲/۱۱ درصد نسبت به موازی، دارای ضعف می‌باشد و باید این موضوع هنگام خرید و انتخاب پمپ مورد استفاده در نظر گرفته شود.

به ترتیب موجب افزایش انتقال حرارت تا ۴۸/۳ و ۵۶ درصد در آرایش موازی و تا ۴۵/۸ و ۴۵ درصد در آرایش سری شده است؛

۳. افزودن نانوذره SiO₂ با غلظت‌های حجمی ۰/۰۵ و ۰/۱ درصد به سیال پایه به ترتیب موجب افزایش انتقال حرارت تا ۳۲/۳ و ۵۲/۷ درصد در آرایش موازی و تا ۳۶/۹ و ۴۲ درصد در آرایش سری شده است؛

۴. افزایش کسر حجمی نانوذرات درون سیال پایه نقش مثبتی در افزایش انتقال حرارت سیال عامل دارد؛

۵. همراه با افزایش انتقال حرارت در پی افزودن نانوذرات درون سیال پایه، افزایش ناچیزی در افت فشار به میزان ۰/۹ درصد نیز مشاهده می‌شود؛

۶. نانوذره TiO₂ با غلظت حجمی ۰/۱ تا ۲۱/۱ درصد، عملکرد حرارتی بهتری نسبت به نانوذره SiO₂ با غلظت حجمی ۰/۱ درصد نشان داده است که

فهرست علائم

• علائم انگلیسی

- q : شار حرارتی ($\frac{w}{m^2}$)؛
- T_S : دمای سطح ($^{\circ}C$)؛
- T_{in} : دمای ورودی ($^{\circ}C$)؛
- T_{out} : دمای خروجی ($^{\circ}C$)؛
- \dot{Q} : نرخ انتقال گرما (J/s)؛
- C_p : ظرفیت حرارتی در فشار ثابت ($J/kg.K$)؛
- h : ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی ($w/m^2.k$)؛
- P : فشار (bar)؛
- k : ضریب هدایت حرارتی ($w/m.K$)؛
- A_{HS} : سطح مقطع (m^2)؛
- D_H : قطر هیدرولیکی (m)؛
- \bar{V} : سرعت متوسط (m/s)؛
- f : ضریب اصطکاک.

• علائم یونانی

- ρ : چگالی (kg/m^3)؛
- μ : ویسکوزیته دینامیکی ($N.s/m^2$)؛
- V : ویسکوزیته سینماتیکی (m^2/s)؛
- φ : درصد حجمی.

• اندیس

- nf : نانوسیال.

• مخفف‌ها

- Re : عدد رینولدز؛
- Nu : عدد ناسلت؛
- TEM : میکروسکوپ الکترونی عبوری؛
- SEM : میکروسکوپ الکترونی روبشی.

پانویس

1. Microchannel Heat Sink

منابع (References)

1. Bergles, A., 1998. *Techniques To enhance Heat Transfer*. Handbook of Heat Transfer, 3, pp.11.1-11.76.
2. Tuckerman, D.B. and Pease, R.F.W., 1981. High-performance heat sinking for VLSI. *IEEE Electron Device Letters*, 2, pp.126-129. <https://doi.org/10.1109/EDL.1981.25367>.
3. Gaikwad, S.M. and Nalawade, M., 2021. Investigation of heat transfer and fluid flow characteristics in straight and zigzag microchannels with water as working medium. *International Journal of Ambient Energy*, pp.1-7. <http://dx.doi.org/10.1080/01430750.2021.1924858>.
4. Kong, D., Jung, E., Kim, Y., Manepalli, V.V., Rah, K.J., Kim, H.S., Hong, Y., Choi, H.G., Agonafer, D. and Lee, H., 2023. An additively manufactured manifold-microchannel heat sink for high-heat flux cooling. *International Journal of Mechanical Sciences*, 248, 108228. <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2023.108228>.
5. Spizzichino, M., Simibaldi, G. and Romano, G.P., 2020. Experimental investigation on fluid mechanics of micro-channel heat transfer devices. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 118, p.110141. <https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2020.110141>.
6. Zeng, C., Song, Y., Zhou, X., Zhang, F., Chao, M., Jiao, M., Liu, M. and Gu, H., 2022. Optimization of the thermal-hydraulic performance of zigzag-type microchannel heat exchangers using asymmetric geometry. *Applied Thermal Engineering*, 217, p.119216. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2022.119216>.
7. Peng, Y., Li, Z., Li, S., Cao, B., Wu, X. and Zhao, X., 2021. The experimental study of the heat transfer performance of a zigzag-serpentine microchannel heat sink. *International Journal of Thermal Sciences*, 163, p.106831. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2008.02.009>.
8. Zhou, X., Zeng, C., Song, Y., Jiao, M., Zhang, F. and Liu, M., 2022. Experimental study on heat transfer and flow resistance performance of a microchannel heat exchanger with zigzag flow channels. *Progress in Nuclear Energy*, 147, p.104190. <http://dx.doi.org/10.1016/j.pnucene.2022.104190>.
9. Dai, Z., Fletcher, D.F. and Haynes, B.S., 2015. Impact of tortuous geometry on laminar flow heat transfer in microchannels. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 83, pp.382-398. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2014.12.019>.
10. Chamkha, A.J., Molana, M., Rahnama, A. and Ghadami, F., 2018. On the nanofluids applications in microchannels: A comprehensive review. *Powder Technology*, 332, pp.287-322. <http://dx.doi.org/10.1016/j.powtec.2018.03.044>.
11. Balaji, T., Selvam, C., Lal, D.M. and Harish, S., 2020. Enhanced heat transport behavior of micro channel heat sink with graphene based nanofluids. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 117, 104716.

- <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2020.104716>.
12. Ding, M., Liu, C. and Rao, Z., 2019. Experimental investigation on heat transfer characteristic of TiO₂-H₂O nanofluid in microchannel for thermal energy storage. *Applied Thermal Engineering*, 160, 114024. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2014.12.019>.
 13. Li, C., Huang, J., Shang, Y. and Huang, H., 2020. Study on the flow and heat dissipation of water-based alumina nanofluids in microchannels. *Case Studies in Thermal Engineering*, 22, p.100746.
 14. Alshayji, A., Asadi, A. and Alarifi, I.M., 2020. On the heat transfer effectiveness and pumping power assessment of a diamond-water nanofluid based on thermophysical properties: An experimental study. *Powder Technology*, 373, pp.397-410. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2020.06.068>.
 15. Şimşek, E., Coskun, S., Okutucu-Özyurt, T. and Unalan, H. E., 2018. Heat transfer enhancement by silver nanowire suspensions in microchannel heat sinks. *International Journal of Thermal Sciences*, 123, pp.1-13. <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2017.08.021>.
 16. Bowers, J., Cao, H., Qiao, G., Li, Q., Zhang, G., Mura, E. and Ding, Y., 2018. Flow and heat transfer behaviour of nanofluids in microchannels. *Progress in Natural Science: Materials International*, 28, pp.225-234. <http://dx.doi.org/10.1016/j.pnsc.2018.03.005>.
 17. Sarafraz, M., Nikkhah, V., Nakhjavani, M. and Arya, A., 2017. Fouling formation and thermal performance of aqueous carbon nanotube nanofluid in a heat sink with rectangular parallel microchannel. *Applied Thermal Engineering*, 123, pp.29-39. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.05.056>.
 18. Park, H.S. and Punch, J., 2008. Friction factor and heat transfer in multiple microchannels with uniform flow distribution. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 51, pp.4535-4543. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2008.02.009>.
 19. Moffat, R.J. 1988. Describing the uncertainties in experimental results. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 1, pp.3-17. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2020.100746>.