



MECHANICS OF SMART STRUCTURES

Available Online at: <http://jmss.qut.ac.ir/>



Numerical Analysis of Heat Transfer and Pressure Drop Performance in a Microchannel Heat Sink Using a Water–Single-Walled Carbon Nanotube (SWCNT) Nanofluid

ARTICLE INFO

Article Type

Original Research

Authors

Arash Mirabdollah Lavasani*

Department of Mechanical Engineering,
CT.C., Islamic Azad University, Tehran,
Iran

Ehsan Abdi Elmi

Department of Mechanical Engineering,
CT.C., Islamic Azad University, Tehran,
Iran

Saeed Dinarvand

Department of Mechanical Engineering,
CT.C., Islamic Azad University, Tehran,
Iran

Mohammad Nimafar

Department of Mechanical Engineering,
CT.C., Islamic Azad University, Tehran,
Iran

*** Correspondence**

arashlavasani@iau.ac.ir

Article History

Received: 30 Dec, 2025

Accepted: 15 Jun, 2026

ePublished: 22 Jun 2026

ABSTRACT

Heat sinks play a crucial role in the cooling of electronic equipment. In this study, a novel approach is adopted by employing a commonly used microchannel heat sink containing a nanofluid. Single-walled carbon nanotube nanoparticles are homogeneously dispersed in the base fluid (water). Two heat sink models made of copper are investigated, including commercial copper with a lower thermal conductivity and high-thermal-conductivity copper. Numerical simulations are performed for Reynolds numbers of 250, 350, 450, and 550 and nanoparticle volume concentrations of 0.5, 1, 1.5, and 2%. The governing equations of continuity, momentum, energy, and the volume fraction of the particle phase are solved using the finite volume method. The results indicate that the best thermal performance is achieved at a Reynolds number of 550 and a nanoparticle concentration of 2%. Furthermore, the effect of changing the heat sink material shows that the difference in the Nusselt number between the two models is not significant.

Keywords: Nanofluid; Heat Sink; Heat Transfer; Pressure Drop.

تحلیل عددی عملکرد انتقال حرارت و افت فشار در چاه حرارتی میکروکانالی با نانوسیال آب-نانولوله کربنی تک دیواره

آرش میر عبداله لواسانی*

گروه مهندسی مکانیک، واحد تهران مرکز، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

احسان عبدی علمی

گروه مهندسی مکانیک، واحد تهران مرکز، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

سعید دیناروند

گروه مهندسی مکانیک، واحد تهران مرکز، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

محمد نیمافر

گروه مهندسی مکانیک، واحد تهران مرکز، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

چکیده

چاه‌های حرارتی همواره نقش مهمی در خنک‌سازی تجهیزات الکترونیکی ایفا می‌کنند. در این پژوهش، با رویکردی نوین، از یک چاه حرارتی پرکاربرد مجهز به میکروکانال و حاوی نانوسیال استفاده شده است. نانوذرات نانولوله کربنی تک‌دیواره به‌صورت همگن در سیال پایه آب پخش شده‌اند. در این مطالعه، دو مدل چاه حرارتی مسی شامل مس با ضریب هدایت حرارتی پایین (تجاری) و مس با ضریب هدایت حرارتی بالا مورد بررسی قرار

گرفته است. حل عددی برای اعداد رینولدز ۲۵۰، ۳۵۰، ۴۵۰ و ۵۵۰ و در غلظت‌های نانوذره ۰/۵، ۱، ۱/۵ و ۲ درصد انجام شده است. معادلات پیوستگی، مومنتوم، انرژی و کسر حجمی فاز ذرات با استفاده از روش حجم محدود حل شده‌اند. نتایج نشان می‌دهد که در عدد رینولدز ۵۵۰ و غلظت ۲ درصد نانوذره، بیشترین بهبود در انتقال حرارت حاصل می‌شود. همچنین بررسی تأثیر تغییر جنس چاه حرارتی نشان داد که اختلاف عدد ناسلت در دو مدل مورد مطالعه چندان قابل توجه نیست.

کلید واژه‌ها

نانوسیال، چاه حرارتی، انتقال حرارت، افت فشار

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۱۰/۰۹

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۳/۰۷

* نویسنده مسئول: arashlavasani@iau.ac.ir

۱ مقدمه

افزایش سرعت محاسبات و کاهش ابعاد چاه حرارتی منجر به ایجاد بار حرارتی فراتر از حد مجاز و در نتیجه کاهش طول عمر تجهیزات الکترونیکی می‌شود؛ ازاین‌رو، مدیریت حرارت نقش تعیین‌کننده‌ای در توسعه‌های آتی این سامانه‌ها ایفا می‌کند. با این حال، رشد سریع فناوری‌های نوین در حوزه خنک‌سازی قطعات الکترونیکی، نیازمند به‌کارگیری سامانه‌های خنک‌کننده کارآمدتر برای این تجهیزات است. در این راستا، استفاده از نانوسیال‌ها به‌عنوان یک راهکار نویدبخش جهت افزایش کارایی خنک‌کننده‌های مایع مطرح شده است. نانوسیال به‌طور کلی به تعلیق ذراتی با مقیاس نانو (تا حدود ۱۰۰ نانومتر) در یک سیال پایه اطلاق می‌شود. افزودن ذرات جامد به سیال مایع معمولاً موجب افزایش رسانایی حرارتی آن می‌گردد، چراکه این ذرات ذاتاً دارای ضریب هدایت حرارتی بالاتری هستند. از سوی دیگر، کوچک‌سازی چاه حرارتی به‌عنوان روشی مؤثر برای افزایش راندمان سامانه‌های خنک‌کننده شناخته می‌شود. از آنجا

که سیال‌های متداول مورد استفاده در انتقال حرارت دارای ضریب هدایت حرارتی پایینی هستند، به‌کارگیری روش‌های مناسب برای افزایش این ضریب می‌تواند نقش مؤثری در بهبود انتقال حرارت جابجایی طبیعی ایفا کند. با معرفی نانوسیال‌ها که عموماً از نانوذرات اکسیدی فلزی معلق در سیالات پایه‌ای نظیر آب، روغن و اتیلن گلیکول تشکیل شده‌اند، دستیابی به این هدف امکان‌پذیر شده است [۱]. پیش از معرفی نانوسیال‌ها، استفاده از ذراتی با ابعاد میلی‌متر و میکرومتر به‌منظور افزایش ضریب هدایت حرارتی سیال مورد توجه قرار گرفته بود. با این حال، بروز چالش‌هایی نظیر پایداری ضعیف، افت فشار قابل‌توجه و سایر مشکلات عملیاتی موجب شد که به‌کارگیری این روش از نظر کاربردی چندان عملی و مقرون‌به‌صرفه نباشد [۲]. طی دو دهه گذشته، مطالعات عددی، تحلیلی و تجربی محدودی در زمینه عملکرد نانوسیال‌هایی که در سینک‌های حرارتی کوچک برای خنک‌سازی تجهیزات الکترونیکی به‌کار می‌روند، انجام شده است [۳-۵]. نتایج این تحقیقات نشان می‌دهد که استفاده از نانوسیال‌ها در چاه‌های حرارتی مینی‌کانالی می‌تواند بهبود قابل‌توجهی در عملکرد خنک‌کنندگی سامانه‌های مورد استفاده در خنک‌سازی قطعات الکترونیکی ایجاد کند. در همین راستا، هو و چن در سال ۲۰۱۳ یک مطالعه آزمایشگاهی بر روی سینک حرارتی مینی‌کانالی با نانوسیال Al_2O_3 - H_2O انجام دادند. نتایج آن‌ها حاکی از افزایش چشمگیر ضرایب انتقال حرارت با به‌کارگیری نانوسیال در مقایسه با آب خالص بود [۶]. همچنین، تولیوس و بایزیتاوغلو تأثیر نانوسیال Al_2O_3 - H_2O را بر بهبود عملکرد انتقال حرارت یک سینک حرارتی مینی‌کانالی با ساختار باله دایره‌ای مورد بررسی قرار دادند [۷].

محمدپور و همکاران در سال ۲۰۲۱ فرآیند خنک‌سازی را به‌صورت عددی شبیه‌سازی کرده و اثرات بهینه نانوسیال اکسید آلومینیوم را در یک میکروکانال مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج آن‌ها نشان داد که با افزایش فرکانس تا ۵۶۰ هرتز، دمای متوسط داخل کانال کاهش می‌یابد. در این شبیه‌سازی، از مدل اولری-لاگرانژی برای توصیف رفتار جریان و ذرات استفاده شده است [۸].

اخیر، چاه‌های حرارتی مینی‌کانالی به یکی از موضوعات مورد توجه گسترده پژوهشگران تبدیل شده‌اند. در همین راستا، ویژگی‌های انتقال حرارت نانوسیال آب-اکسید تیتانیوم در یک کانال مستطیلی کوچک به‌صورت تجربی توسط نوفن و همکاران مورد بررسی قرار گرفت [۹]. همچنین، چن و همکاران عملکرد حرارتی چاه‌های حرارتی میکروکانالی با مقاطع مثلثی، مستطیلی و دوزنقه‌ای را با یکدیگر مقایسه کردند [۱۰].

علاوه بر این، منجور و همکاران در یک مطالعه عددی، سه هندسه نوین برای هیت‌سینک میکروکانالی (پلاس، شش‌پر و پیکانی) را همراه با نانوسیالات کربنی پیشرفته (MXene، MWCNT و SWCNT) و نانوذرات بوهیمیت در غلظت‌های ۰/۱ و ۱ درصد جرمی و اعداد رینولدز ۴۰۰ تا ۱۶۰۰ ارزیابی کردند. نتایج نشان داد MWCNT بهترین بهبود حرارتی را ایجاد کرده و کانال پلاس در رینولدز ۱۶۰۰ و غلظت ۱٪ افزایش ۱۶/۷۶٪ در ضریب انتقال حرارت و کاهش ۰/۶۴٪ در دمای دیواره نسبت به هندسه مثلثی بهینه قبلی داشته است. همچنین کانال شش‌پر افت فشار را حدود ۶/۲۶٪ کمتر از آرایش دایره‌ای ایده‌آل نشان داد، که اهمیت همزمان نوآوری هندسی و انتخاب نانوسیال را در مدیریت حرارتی برجسته می‌کند [۱۱]. محمدپور و همکاران در سال ۲۰۲۱ فرآیند خنک‌سازی را به‌صورت عددی شبیه‌سازی کرده و اثرات بهینه نانوسیال اکسید آلومینیوم را در یک میکروکانال مورد ارزیابی قرار دادند. آن‌ها نشان دادند که دمای متوسط داخل کانال با افزایش فرکانس تا ۵۶۰ هرتز کاهش می‌یابد. در این شبیه‌سازی، از مدل اولری-لاگرانژی برای توصیف رفتار جریان و ذرات استفاده شد [۸]. بهره‌گیری از چاه‌های حرارتی مینی‌کانالی در طراحی سامانه‌های خنک‌کاری مدرن، در سال‌های اخیر به مبحثی کلیدی در مجامع علمی و صنعتی بدل شده است. در همین راستا، ویژگی‌های انتقال حرارت نانوسیال آب-اکسید تیتانیوم در یک کانال مستطیلی کوچک به‌صورت تجربی توسط نوفن و همکاران مورد بررسی قرار گرفت [۹]. چن و همکاران عملکرد چاه‌های حرارتی میکروکانالی با مقاطع مثلثی، مستطیلی و دوزنقه‌ای را با

یکدیگر مقایسه کردند [۱۰]. همچنین، لئون و همکاران یک مطالعه عددی بر روی چاه حرارتی مجهز به ریب‌های خنک‌کننده با شکل آیرودینامیکی انجام دادند. در مطالعه‌ای دیگر در زمینه شکل ریب‌ها، ناوایی و همکاران [۱۲] تأثیر سه نوع باله با اشکال نیم‌دایره‌ای، دوزنقه‌ای و مستطیلی را بر انتقال حرارت درون چاه حرارتی با استفاده از نانوسیال‌ها بررسی کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که ریب‌های با شکل نیم‌دایره‌ای بالاترین عدد ناسلت را ارائه می‌دهند. همچنین، در یک تحقیق مشابه چن هونگ‌تائو و همکاران [۱۳] اثر سه نوع هندسه کانال چاه حرارتی شامل مقطع مثلثی، دوزنقه‌ای و مستطیلی را مورد مطالعه قرار دادند که نتایج نشان داد شکل میکروکانال تأثیر قابل توجهی بر انتقال حرارت و رفتار جریان در چاه حرارتی دارد. افزون بر این، عبدعمار و همکاران [۱۴] چهار پیکربندی مختلف از میکروکانال‌ها درون چاه حرارتی (بدون شیار، دارای دو شیار، چهار شیار و شش شیار) را بررسی کرده و گزارش کردند که بیشترین ضریب انتقال حرارت و عدد ناسلت مربوط به کانال‌های دارای دو شیار بوده است.

در کنار رویکردهای مبتنی بر چاه‌های حرارتی میکرو/مینی‌کانالی و نانوسیالات، توسعه سامانه‌های خنک‌کاری برای CPU با مبدل‌های حرارتی نوین نیز مورد توجه بوده است. در این زمینه، هادی کلایی و همکاران با استفاده از شبیه‌سازی CFD یک روش خنک‌کاری ترکیبی را بررسی کردند که در آن از نانوسیال CNT/H₂O به همراه هیت‌سینک باله‌موج‌دار دارای فرورفتگی (dimple) استفاده شده است [۱۵]. نتایج نشان داد به‌کارگیری نانوسیال‌های MWCNT و به‌ویژه SWCNT باعث کاهش دمای سطح CPU تا حدود ۱۳.۱ و ۱۴.۳۴ کلوین) و بهبود راندمان حرارتی می‌شود؛ بهترین حالت مربوط به SWCNT با غلظت ۲٪ و سه ردیف dimple روی هر باله است که عملکرد هیت‌سینک را در Re=1500 و ۲۰۰۰ حدود ۸.۵٪ و ۸.۸٪ افزایش می‌دهد. با این حال، افزایش تعداد dimple‌ها افت فشار و توان پمپاژ موردنیاز را بیشتر می‌کند، بنابراین طراحی بهینه نیازمند موازنه بین بهبود انتقال حرارت و هزینه هیدرولیکی است.

همچنین، حسین و همکاران در یک شبیه‌سازی دو فازی عملکرد حرارتی، افت فشار و شاخص شایستگی (FOM) نانوسیال هیبریدی پایه آب با ذرات آلومینوم - مس در یک هیت‌سینک میکروکانالی سه‌بعدی تحت شار حرارتی ثابت ۱ MW/m² و در بازه رینولدز ۴۰۰-۱۲۰۰ و غلظت‌های ۰/۵ تا ۳ درصد حجمی بررسی کردند. نتایج (با اعتبارسنجی آزمایشگاهی مناسب) نشان داد افزایش سهم نسبی نانوذرات مس باعث بهبود بیشتر انتقال حرارت و FOM می‌شود. همچنین بیشینه FOM برای رینولدز ۴۰۰ در غلظت ۰.۷۵% vol Cu و برای رینولدز ۱۶۰۰ در غلظت ۰/۷۵% Cu گزارش شد [۱۶].

از سوی دیگر، عبدی و همکاران در یک مطالعه آزمایشگاهی درباره بهبود انتقال حرارت در سیستم خنک‌کاری CPU با استفاده از هیت‌پایپ U شکل پره‌دار گزارش کردند که به‌کارگیری نانوسیال CuO/H₂O نسبت به سیال‌های متداول موجب افزایش انتقال حرارت و کاهش مقاومت حرارتی می‌شود؛ از این‌رو، نانوسیالات می‌توانند گزینه‌ای مؤثر برای ارتقای عملکرد سامانه‌های خنک‌کاری الکترونیکی باشند [۱۷].

روش‌های دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) به‌عنوان ابزارهایی قدرتمند برای شبیه‌سازی جریان سیال و پدیده‌های انتقال حرارت و جرم وابسته به آن شناخته می‌شوند که با حل عددی معادلات ریاضی حاکم بر این فرآیندها و بهره‌گیری از پیشرفت‌های سریع و مستمر در سخت‌افزارهای رایانه‌ای و تکنیک‌های محاسباتی به کار گرفته می‌شوند. نتایج شبیه‌سازی‌های CFD در حوزه‌هایی نظیر تحلیل جامع و دقیق، مطالعات مفهومی برای طراحی مجدد و ارائه طرح‌های نوین، تحقیق و توسعه عمیق محصولات و نیز عیب‌یابی سامانه‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد [۱۸]. با این حال، از آنجا که خواص ترموفیزیکی نانوسیال‌ها با خواص آب خالص متفاوت است، تحلیل عملکرد یک میکروکانال صرفاً بر اساس عدد رینولدز و بسته به غلظت نانوذرات معلق انجام می‌گیرد. شایان ذکر است که بر

چاه حرارتی مورد بررسی در شکل ۱ نشان داده شده است. نانوسیال مورد استفاده همزمان در هر دو جنس چاه حرارتی در سرعت‌های مختلف مورد بررسی قرار گرفته شده است. ابعاد هندسی مربوطه به چاه حرارتی و پارامترهای مختلف نانوسیال به کار رفته در این شبیه سازی در جدول ۱ آمده است [۲۱-۲۲].

جدول ۱ مشخصات چاه حرارتی و نانوسیال [۱۷، ۱۸]

مشخصات	مطالعه حاضر
نانوسیال	SWCNT-H2O
کسر حجمی نانوذره	۰/۵، ۱/۰، ۱/۵، ۲/۰
ابعاد چاه حرارتی (میلی متر)	۵۰×۵۰×۱۰
تعداد کانال	۴
نرخ جریان سیال (لیتر / دقیقه)	۰/۵- ۱/۲۵
شار حرارتی (وات)	۴۰۰
چگالی نانوذره (کیلوگرم / مترمکعب)	۲۶۰۰
ضریب انتقال حرارت هدایتی نانوذره (وات/متر در کلوین)	۶۶۰۰
ظرفیت گرمایی ویژه نانوذره (ژول / کیلوگرم در کلوین)	۴۲۵
ظرفیت گرمایی ویژه چاه حرارتی مسی با ضریب هدایت حرارتی متوسط (ژول / کیلوگرم در کلوین)	۳۸۱
ظرفیت گرمایی ویژه چاه حرارتی مسی با ضریب هدایت حرارتی بالا (ژول / کیلوگرم در کلوین)	۳۸۵
ضریب انتقال حرارت هدایتی چاه حرارتی مسی با ضریب هدایت حرارتی متوسط (وات/متر در کلوین)	۳۸۷/۶
ضریب انتقال حرارت هدایتی چاه حرارتی مسی با ضریب هدایت حرارتی بالا (وات/متر در کلوین)	۳۹۴

اساس برخی مطالعات پیشین، استفاده از نانوسیال‌ها همواره منجر به بهبود عملکرد سینک حرارتی میکروکانالی نمی‌شود [۱۹-۲۰]. برخلاف بسیاری از مطالعات پیشین که عمدتاً بر یک نانوسیال رایج، یک هندسه ساده، یا صرفاً شاخص‌های حرارتی تمرکز داشته‌اند، پژوهش حاضر به‌صورت همزمان اثرات انتقال حرارت، افت فشار و مقاومت حرارتی را در بازه‌ای از اعداد رینولدز ۲۵۰ تا ۵۵۰ و کسر حجمی ۰/۵ تا ۲ درصد بررسی کرده است. این رویکرد باعث می‌شود که تحلیل ارائه شده صرفاً محدود به افزایش عدد ناسلت نباشد، بلکه توازن میان بهبود عملکرد حرارتی و هزینه هیدرولیکی نیز روشن شود.

از منظر تحلیلی، یکی از نکات مهم و قابل توجه مقاله این است که تفاوت هدایت حرارتی دو بدنه‌ی مسی، اثر چشمگیری بر عدد ناسلت نداشته است؛ این نتیجه نشان می‌دهد که در مقیاس میکرو، رفتار همرفتی نانوسیال و شرایط جریان نقش غالب‌تری نسبت به تغییرات رسانشی دیواره دارند. بنابراین، مطالعه حاضر تنها یک بررسی عددی ساده نیست، بلکه به‌صورت ضمنی نشان می‌دهد که بهینه‌سازی عملکرد میکروکانال‌ها بیش از آنکه وابسته به تغییر جزئی جنس بدنه باشد، به انتخاب نانوسیال مناسب و شرایط جریان وابسته است. در این پژوهش، جریان نانوسیال آب حاوی نانولوله‌های کربنی تک‌جداره و انتقال حرارت هدایتی در یک چاه حرارتی مسی با ضریب هدایت حرارتی بالا و متوسط به‌صورت عددی شبیه‌سازی شده است.

۲ شبیه سازی عددی

۲-۱ هندسه

مدل ارائه شده سه بعدی، پایا، تک فاز، همگن در نظر گرفته شده است. شبیه سازی حاضر در دو حالت مورد بررسی قرار گرفته است:

حالت (۱) چاه حرارتی مسی با ضریب هدایت حرارتی متوسط

حالت (۲) چاه حرارتی مسی با ضریب هدایت حرارتی بالا

و انرژی از روش مرتبه اول استفاده شده است. برای همگرایی معادلات پیوستگی، ممنوم و انرژی به ترتیب 10^{-5} و 10^{-8} و 10^{-8} استفاده شده است. همگرایی برای معادلات پیوستگی و ممنوم و همچنین برای معادله انرژی تا دستیابی به معیار همگرایی مورد نظر ادامه یافته است.

۳-۲ شرایط مرزی

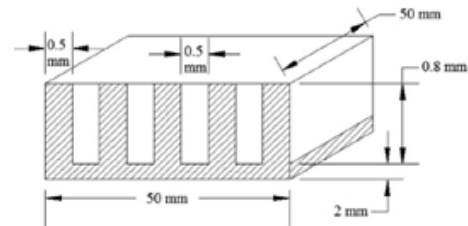
در شبیه سازی های انجام شده، شار حرارتی ثابت از قسمتی از کف چاه حرارتی به آن وارد شده و بقیه دیواره های خارجی چاه حرارتی عایق در نظر گرفته شده اند. شبیه سازی به صورت سه بعدی، تراکم ناپذیر، پایا، و جریان آرام فرض شده است. و از آنجایی که مقدار انتقال حرارت با هوای اطراف بسیار پایین است، اثر تشعشع نادیده گرفته می شود. به دلیل تقارن موجود در هندسه فقط یک کانال چاه حرارتی مورد بررسی قرار گرفته شده و از شرط تقارن جهت شبیه سازی استفاده می شود.

$$\frac{\partial q}{\partial t} = \text{const} = 400 \text{ W} \quad 1$$

$$P_{\text{outlet}} = P_{\text{atm}}, T_{\text{in}} = 303 \text{ K} \quad 2$$

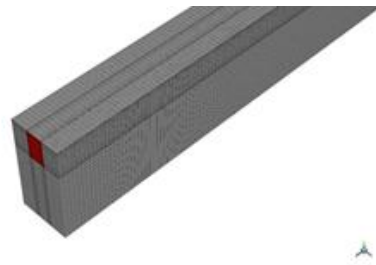
با توجه به پراکندگی یکنواخت نانولوله های کربنی تک دیواره در سیال پایه، نانوسیال مورد بررسی به صورت پایدار فرض شده و اثرات احتمالی ناشی از تجمع ذرات و ناپایداری زمانی در مدل سازی منظور نشده است. این فرض بر پایه مطالعات پیشین درباره پایداری نانوسیال های حاوی SWCNT و گزارش های تجربی موجود در ادبیات موضوع اتخاذ شده است. [۲۳].

در این پژوهش اثر نانولوله کربنی تک دیواره (SWCNT) در این مسئله، به صورت نانوسیال آب SWCNT- و در چارچوب یک مدل تک فاز، همگن و پایا وارد شده است. یعنی SWCNT ها به عنوان فاز جداگانه حل نشده اند، بلکه در سیال پایه آب پخش یکنواخت فرض



شکل ۱ هندسه مسئله

با توجه به دامنه محاسباتی و تنظیمات شبیه سازی ساختار متقارن و متناوب چاه حرارتی ها، تنها یک گذر جریان بررسی شده است. دامنه محاسباتی به کار گرفته شده در شکل ۲ نشان داده شده است.



شکل (۲). دامنه هندسه محاسباتی

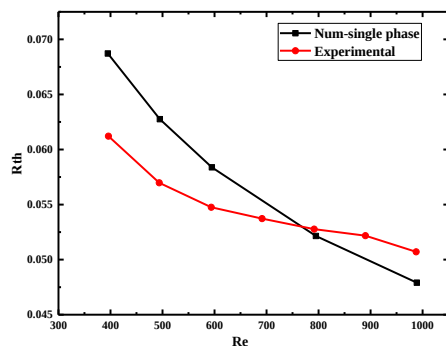
۲-۲ روش شبیه سازی عددی

جهت ایجاد هندسه و شبکه بندی از نرم افزار تجاری انسیس-فلوئنت^۱ در محیط انسیس ورک^۲ بنچ استفاده شده است. معادلات حاکم با استفاده از روش حجم محدود^۳ و به کمک نرم افزار انسیس-فلوئنت نسخه ۲۰۲۳ ورژن (R2) حل شده اند. به منظور کوپل معادلات فشار و سرعت از روش ضمنی فشار همراه با جداسازی عملگرها استفاده شده است. برای گسسته سازی معادلات ممنوم

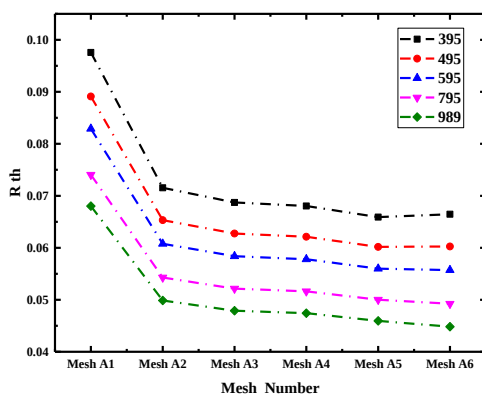
³ Finite volume method

¹Ansys Fluent

² Ansys work Bench



شکل ۳ اعتبار سنجی مطالعه آزمایشگاهی با مطالعه حاضر [۱۹]



شکل ۴ استقلال از شبکه از حل مش

جدول ۲ تعداد سلول‌های مورد بررسی

۱ مش	۲۱۰۰۰۰
۲ مش	۲۸۰۰۰۰
۳ مش	۳۲۵۰۰۰
۴ مش	۳۸۰۰۰۰
۵ مش	۴۱۶۰۰۰
۶ مش	۷۵۰۰۰۰

شده‌اند و اثرشان از طریق خواص مؤثر نانوسیال در معادلات حاکم لحاظ شده است.

۳- صحت سنجی

به منظور اعتبارسنجی مدل عددی، از مدل چاه حرارتی ارائه شده توسط سوהל و همکاران استفاده شده است [۲۴]. نتایج شبیه‌سازی برای اعداد رینولدز در بازه ۲۵۰ تا ۵۵۰ استخراج شده‌اند. به طور کلی، به منظور کاهش خطا، نفوذ ناحیه نزدیک دیواره در نظر گرفته شده و شبکه‌های ظریف‌تری در این نواحی ایجاد شده‌اند. همان‌گونه که در شکل ۳ نشان داده شده است، بیشترین انحراف میان نتایج شبیه‌سازی عددی و داده‌های آزمایشگاهی در حدود ۷ درصد گزارش می‌شود. این اختلاف میان نتایج عددی و تجربی می‌تواند ناشی از صرف نظر کردن از تغییرات خواص سیال با دما و همچنین نادیده گرفتن انتقال حرارت تشعشعی بین چاه حرارتی و محیط اطراف باشد. با این حال، این اختلاف قابل توجه نبوده و در نتیجه می‌توان نتایج عددی حاضر را قابل قبول و معقول تلقی کرد. حوزه محاسباتی به کاررفته در شبیه‌سازی‌ها در شکل ۴ نمایش داده شده است. جنس چاه حرارتی مسی با دو مقدار ضریب هدایت حرارتی (معمولی و بالا) مورد بررسی قرار گرفته است. برای آزمایش استقلال شبکه، از چاه حرارتی با جنس مس تجاری در ۶ مدل مش استفاده شده است. تعداد مش‌های مورد مطالعه در جدول ۲ نشان داده شده است. استقلال شبکه در پنج عدد رینولدز ۳۹۵، ۴۹۵، ۵۹۵، ۷۹۵ و ۹۸۹ انجام شده است. از شبکه چهارم به بعد تغییرات مقاومت حرارتی حالت پایایی پیدا کرده و نتایج تحت تاثیر تعداد شبکه‌های محاسباتی قرار نمی‌گیرد. در این پژوهش از مش شماره پنجم به تعداد ۴۱۶۰۰۰ استفاده شده است. تعداد مش‌های مورد بررسی در جدول ۲ نشان داده شده است.

۴ معادلات

$$h_{avg} = \frac{q''}{T_w - T_{nf}} \quad ۱۱$$

$$T_{nf} = \frac{T_{inlet} + T_{outlet}}{2} \quad ۱۲$$

که در روابط بالا h_{avg} ضریب انتقال حرارت متوسط، T_w و T_{nf} میانگین دمای سطح چاه حرارتی و نانوسیال می باشد.

جهت بررسی دقیق تر خنک سازی چاه حرارتی از پارامتر R_{th} در رابطه ۹ استفاده شده است:

$$R_{th} = \frac{T_{max} - T_{in}}{q_w A_w} \quad ۱۳$$

جهت بررسی افت فشار سیال ورودی به چاه حرارتی از رابطه زیر استفاده شده است [۲۷]:

$$f = \frac{\Delta P \cdot D_h}{2 \rho_{nf} U_0^2 L} \quad ۱۲$$

فرآیند خنک سازی تحت بررسی تحت تأثیر تغییرات در خواص ترمو فیزیکی سیال خنک کننده است. این سیال به دلیل افزودن نانوذرات کربنی تک جداره دستخوش تغییرات ترمو فیزیکی شده است. برای محاسبه تغییرات در خواص سیال جدید از فرمول های زیر استفاده شده است [۲۸-۳۰]:

$$\mu_{nf} = \mu_f (1 + 2.5\phi + 6.5\phi^2) \quad ۱۳$$

$$(\rho C_p)_{nf} = (\rho C_p)_f (1 - \phi) + (\rho C_p)_s \phi \quad ۱۴$$

$$\alpha_{nf} = \frac{k_{nf}}{(\rho C_p)_{nf}} \quad (۱۳)$$

$$(\rho C_p)_{nf} = (1 - \phi)(\rho C_p)_f + \phi(\rho C_p)_s \quad (۱۴)$$

$$\frac{k_{nf}}{k_f} = \frac{(1 - \phi) + 2\phi \frac{k_s}{k_s - k_f} \ln \frac{k_s + k_f}{2k_f}}{(1 - \phi) + 2\phi \frac{k_f}{k_s - k_f} \ln \frac{k_s + k_f}{2k_f}} \quad (۱۵)$$

که در آن (ϕ) کسر حجمی نانوذرات کربن و (ρ_{nf}) نشان دهنده چگالی نانوسیال خنک کننده است. اصطلاحات (K_{nf}) و (α_{nf}) به ترتیب بیانگر شرایط هدایت حرارتی و ضریب نفوذپذیری حرارتی هستند و عبارت (μ_{nf}) نیز ویسکوزیته دینامیکی نانوسیال ها را نشان می دهد. در اینجا تعریف ما از تغییرات فشار، تفاوت بین فشار ورودی و خروجی کانال داخلی مازول است.

۵ بحث و نتایج

جریان سیال در این بررسی سه بعدی، آرام، پایا، غیر قابل تراکم و ویسکوز در نظر گرفته شده است. شرط عدم لغزش در دیواره در نظر گرفته شده است. با توجه به اختلاف اندک سرعت و دما بین ذره و سیال اطراف آن، و کوچک بودن اندازه و غلظت نانوذرات، مدل مخلوط به مدل تک فازي همگن تبدیل شده است. با توجه به فرضیات در نظر گرفته شده معادلات، پیوستگی مومنتوم انرژی و کسر حجمی به صورت زیر خواهند بود [۲۵].

معادله پیوستگی:

$$\nabla \cdot (\rho \vec{V}) = 0 \quad ۳$$

معادله مومنتوم:

$$\rho_{nf} (\nabla \vec{V}) \vec{V} = -\nabla P + \mu_{nf} \nabla^2 \vec{V} \quad ۴$$

معادله انرژی:

$$\vec{V} \nabla T = \alpha_{nf} \nabla^2 T \quad ۵$$

لازم بذکر است با توجه به فرض عایق بودن دیواره های چاه حرارتی، انتقال حرارت از سطح چاه حرارتی به صورت زیر می باشد:

$$\nabla \cdot (k_m \nabla T) = 0 \quad ۶$$

اعداد رینولدز (Re) عدد پراتل (Pr) و قطر هیدرولیک (D_h) به صورت زیر محاسبه شده است:

$$Re = \frac{U_0 D_h}{\nu_f} \quad ۷$$

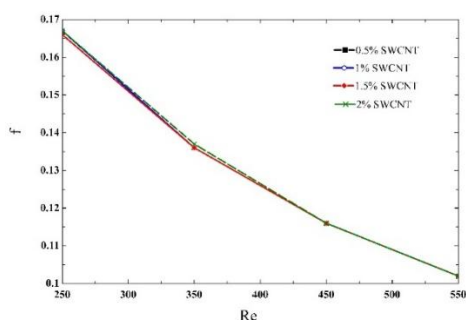
$$Pr = \frac{\mu C_p}{k} \quad ۸$$

$$D_h = \frac{4S}{P} \quad ۹$$

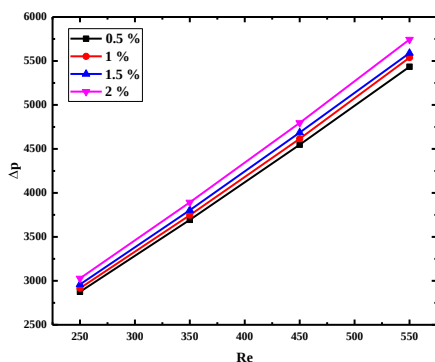
U_0 سرعت ورودی سیال، ν_f ویسکوزیته سینماتیکی سیال، S و P به ترتیب مساحت و محیط سطح مقطع ورودی سیال می باشد. جهت بدست آوردن عدد ناسلت میانگین از رابط زیر استفاده شده است [۲۶]:

$$Nu_{avg} = \frac{h_{avg} D_h}{k} \quad ۱۰$$

مساله و مقدار نیاز انتقال حرارت یک تناسب بین پمپاژ سیال و میزان انتقال حرارت بدست آید. بر اساس نتایج بدست آمده اختلاف فشار در هنگام استفاده از نانوذره با ۲ درصد افزایش کسر حجمی نسبت به ۰/۵ و ۱/۵ درصد افزایش نانوذره بترتیب برای همه رینولدزهای ۲۵۰، ۳۵۰، ۴۵۰ و ۵۵۰ به ترتیب حدوداً ۳، ۵ و ۲ درصد می باشد.



شکل ۵ نمودار افت فشار در درصدهای مختلف نانوذره



شکل ۶ نمودار افت فشار نانوسیال در درصدهای مختلف نانوذره

۵-۲ عدد ناسلت

در این چاه حرارتی معین، بدلیل خواص ثابت جنس چاه حرارتی، ابعاد فیزیکی معین و منبع انتقال گرمای ثابت همواره انتقال حرارت ثابت است. اما انتقال حرارت جابجایی (همرفتی) با خواص سیال و جریان سیستم خنک کننده تغییر می کند. عدد ناسلت نشان دهنده عملکرد همرفتی این سیستم است. در واقع در این

علاوه بر بررسی پارامترهای حرارتی و هیدرولیکی به صورت جداگانه، جهت ارزیابی جامع تر و تعیین نقطه بهینه در طراحی میکروکانال، استفاده از یک معیار واحد ضروری است. بدین منظور، شاخص عملکرد حرارتی-هیدرولیکی (PF) به عنوان معیاری برای سنجش توازن میان بهبود نرخ انتقال حرارت و مقاومت هیدرولیکی ناشی از افزایش افت فشار تعریف می شود:

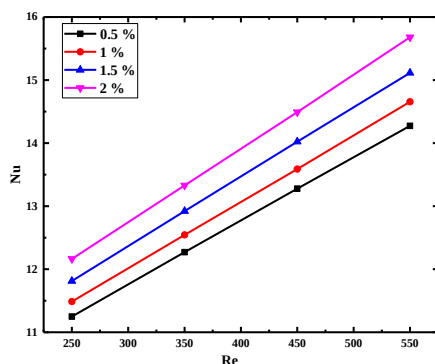
$PF = \frac{Nu/Nu_0}{\Delta p/\Delta p_0}$	۱۱
--	----

در این رابطه، Nu و ΔP نشان دهنده عدد ناسلت و افت فشار در کسر حجمی نانوسیال موردنظر، و Nu_0 و ΔP_0 مقادیر مرجع مربوط به حالت پایه (۰/۵٪) هستند. در این معیار، مقادیر $PF > 1$ بیانگر آن است که بهبود حاصل در انتقال حرارت، بر افزایش توان پمپاژ غلبه کرده و پیکربندی سیستم از نظر مهندسی توجیه پذیر است.

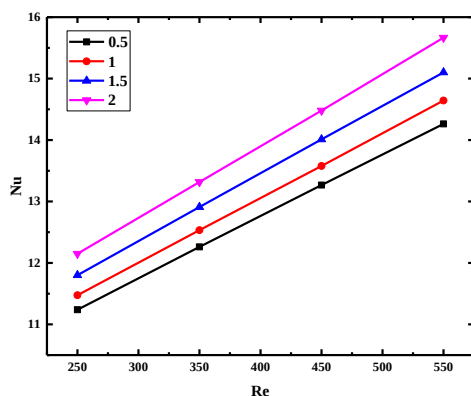
در این بخش، نتایج شبیه سازی عددی چاه حرارتی و تأثیر افزودن نانوذرات به سیال پایه و تغییر جنس چاه حرارتی مورد بررسی قرار گرفته است.

۵-۱ افت فشار نانوسیال در میکروکانال

هنگامی که مایع خنک کننده از میکروکلنال درون چاه حرارتی عبور می کند، افت فشار رخ می دهد. برای غلبه بر این افت فشار، سیستم به مقداری قدرت پمپاژ اضافی نیاز دارد. در شکل های ۵ و ۶ ضریب افت فشار سیال و اختلاف فشار نانوسیال در درصدهای مختلف نانوذره نشان داده شده است. همانطور که در رابطه ۱۴ مشاهده می شود ضریب افت فشار و اختلاف فشار به وجود آمده در کانال رابطه مستقیم دارد. افزایش غلظت نانوذرات باعث افزایش چگالی نانوسیال می شود. به همین دلیل افت فشار در کانال به وجود می آید. در ۰/۵ درصد نانوذره کمترین افت فشار و ۲ درصد بیشترین افت فشار در سیستم خنک کاری بوجود آمده است. در شکل ۶ افزایش قدرت پمپاژ را با توجه به بوجود آمدن اختلاف فشار در ورودی و خروجی سیال مشاهده می شود. افزایش سرعت جریان در درصدهای مختلف نانوذره نشان داده شده است. افزایش ویسکوزیته یکی دیگر از دلایل اختلاف فشار نانوسیال می باشد. به همین دلیل باید با توجه به شرایط موجود



شکل ۷ نمودار ناسلت چاه حرارتی (مس با هدایت حرارتی بالا) نسبت تغییرات رینولدز



شکل ۸ نمودار ناسلت چاه حرارتی (مس تجاری) نسبت تغییرات رینولدز

۳-۵ مقاومت حرارتی

در شکل ۶های ۹ و ۱۰ تغییرات مقاومت حرارتی نسبت به اعداد رینولدز ۲۵۰، ۳۵۰، ۴۵۰، ۵۵۰ نشان داده شده است. همانطور که نشان داده شده است، در عدد رینولدز بالا مقاومت حرارتی کمتر است. همچنین افزایش غلظت حجمی نانوذره روند کاهشی را برای کاهش مقاومت حرارتی همرفتی نشان می‌دهد. افزایش کسر حجمی نانوذره، ضریب انتقال حرارت همرفتی و پراکندگی حرارتی

بررسی، عدد ناسلت محاسبه شده بر اساس دمای میانگین دیواره^۴ بررسی شده است. تا امکان تحلیل همزمان انتقال حرارت جابجایی و هدایت دیواره^۵ فراهم گردد.

علاوه بر این عدد رینولدز نیز عملکرد همرفتی و ویژگی‌های جریان (جریان آرام یا جریان آشفته) را نشان می‌دهد. با توجه به عدد رینولدز زیر ۲۵۰۰ در این مساله، جریان سیال آرام می‌باشد. تغییرات عدد ناسلت نسبت به عدد رینولدز عدد در کسر حجمی ۰/۵ تا ۲ درصد برای نانوسیال نانو لوله کربنی تک جداره در شکل‌های ۷ و ۸ نشان داده شده است. در نانوسیال با درصد حجمی نانوذره بالا به دلیل بالا رفتن ضریب هدایت حرارتی نانوسیال و همچنین با افزایش سرعت سیال در رینولدز بالا، انتقال حرارت به بیشترین حد خود خواهد رسید. در مطالعه حاضر عدد ناسلت برای تمامی کسر حجمی‌های نانوذره بررسی شده است. در چاه حرارتی مسی با ضریب هدایتی بالا، افزایش عدد ناسلت در دصدهای مختلف نانوذره نسبت به کسر حجمی ۰/۵٪ در درصدهای ۱، ۱/۵ و ۲، بترتیب ۳/۳۳٪، ۶/۴۸٪، ۸/۹۹٪ می‌باشد. اما برای چاه حرارتی از جنس مس با هدایت حرارتی متوسط این افزایش عدد ناسلت بترتیب ۳/۲۴، ۶/۴۷، ۸/۹۷ ارائه شد. از طرفی با افزایش عدد رینولدز عدد ناسلت افزایش می‌یابد. در واقع، عدد رینولدز بالاتر به معنای سرعت ورودی بالاتر است. با افزایش سرعت نانوسیال، حرکت نانوذرات یا برخورد بین آنها افزایش می‌یابد که به طور موثر انتقال حرارت را افزایش می‌دهد. علاوه بر این همان‌طور که در نمودارهای ۷ و ۸ مشاهده می‌شود، با تغییر جنس دیواره‌های میکروکانال، تغییرات محسوسی در عدد ناسلت ایجاد نشده است. علیرغم تفاوت در ضریب هدایت حرارتی مواد سازنده، اختلاف ناچیز در عدد ناسلت به دست آمده را می‌توان به ماهیت جریان در مقیاس میکرو نسبت داد؛ جایی که به دلیل غلبه‌ی مکانیزم انتقال حرارت جابجایی نانوسیال بر هدایت حرارتی دیواره، تأثیر تغییرات جزئی در ویژگی‌های رسانشی بدنه در برابر شدت جریان همرفتی در میکروکانال، عملاً ناچیز است.

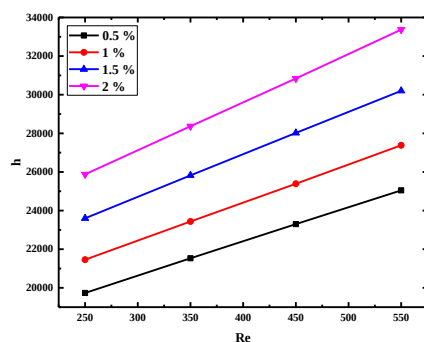
⁵Conjugate Heat Transfer

⁴ Average Wall Temperature

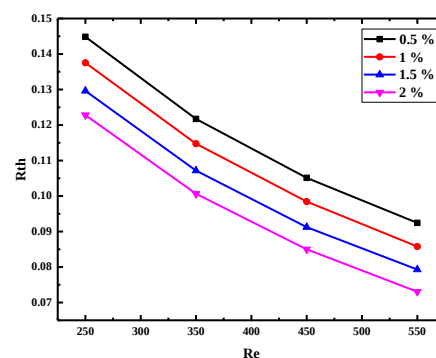
شکل ۱۰ نمودار مقاومت حرارتی چاه حرارتی (مس تجاری) نسبت تغییرات رینولدز

۴-۵ ضریب انتقال حرارت:

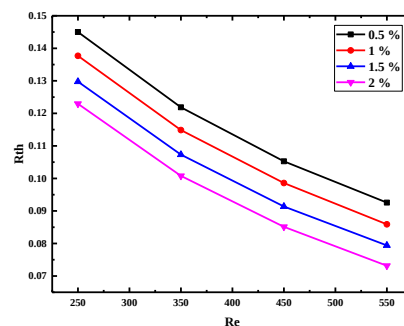
عملکرد حرارتی نانوسیال ها به ضریب انتقال حرارت همرفتی بستگی دارد. اثرات عدد رینولدز و درصد حجمی نانو لوله کربنی تک جداره بر ضریب انتقال حرارت در شکل های ۱۱ و ۱۲ نشان داده شده است. ضریب انتقال حرارت بر اساس میانگین دمای پایه و اختلاف دمای ورودی و خروجی محاسبه می شود. با توجه نمودارهای زیر افزایش موثر ضریب انتقال حرارت در محدوده عدد رینولدز از ۲۵۰ تا ۵۵۰ و همچنین با افزایش کسر حجمی از ۰/۵ تا ۲ درصد مشاهده می شود. در بالاترین کسر حجمی (۲ درصد)، نانوسیال با نانو لوله کربنی تک جداره برای هر دو چاه حرارتی با جنس مس (با هدایت حرارتی بالا و معمولی) حدود ۳۲ و ۳۲/۲ درصد ضریب انتقال حرارت همرفتی بالاتری نسبت به کسر حجمی ۰/۵ درصد ارائه می شود. افزودن غلظت حجمی بیشتر نانوذرات به سیال پایه به بهبود هدایت حرارتی و براونی کمک می کند. افزودن غلظت حجمی بیشتر نانوذرات به سیال پایه به بهبود هدایت حرارتی و حرکت براونی کمک می کند که مستقیماً باعث افزایش عملکرد حرارتی نانوسیال بر روی آب مقطر خالص هستند. علاوه بر این، افزایش عدد رینولدز همچنین نشان دهنده بهبود ظرفیت انتقال حرارت همرفتی مایع خنک کننده بوده و کاهش دمای پایه سینک حرارتی را به بیشترین مقدار می رساند.



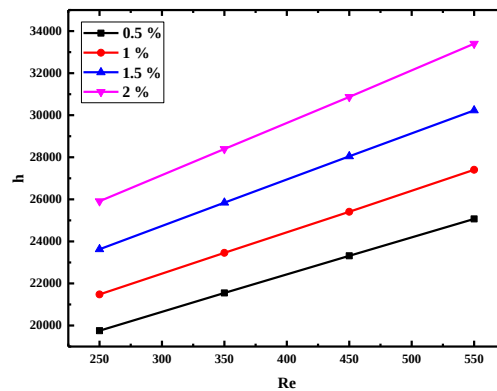
را افزایش می دهد. در این پژوهش در بالاترین غلظت حجمی (۲ درصد حجمی) و عدد رینولدز ۵۵۰، حداکثر کاهش حدود ۱۷/۸ و ۱۷/۶۸ درصد در مقاومت حرارتی همرفتی نسبت به ۰/۵ درصد کسر حجمی برای هر دو چاه حرارتی (مس با هدایت حرارتی بالا و مس معمولی) مشاهده شد. در عدد رینولدز بالاتر، حرکت براونی ذره با افزایش سرعت نانوسیال افزایش می یابد و در نتیجه انتقال حرارتی نانوسیال نیز افزایش می یابد. بهبود در حرکت نانوذرات ضریب انتقال حرارت همرفتی را افزایش می دهد که رابطه معکوس با مقاومت حرارتی همرفتی دارد. در واقع، افزایش ضریب انتقال حرارت همرفتی در نهایت باعث کاهش مقاومت حرارتی نانوسیال می شود.



شکل ۹ نمودار مقاومت حرارتی چاه حرارتی (مس با هدایت حرارتی بالا) نسبت تغییرات رینولدز



شکل ۱۱ نمودار ضریب انتقال حرارت جابجایی چاه حرارتی (مس با هدایت حرارتی بالا) نسبت تغییرات رینولدز



شکل ۱۲ نمودار ضریب انتقال حرارت جابجایی چاه حرارتی (مس تجاری) نسبت تغییرات رینولدز

۵-۵ ضریب انتقال حرارت:

همان‌طور که در جدول بالا مشاهده می‌شود، شاخص عملکرد (PF) برای هر دو نوع چاه حرارتی در کسر حجمی ۲۰٪، مقداری نزدیک به ۱.۹ را نشان می‌دهد. این بدان معناست که نرخ انتقال حرارت در این کسر حجمی تقریباً دو برابر حالت پایه است، در حالی که افزایش در هزینه‌های توان پمپاژ (افت فشار) تنها حدود ۵٪ می‌باشد. بنابراین، از دیدگاه مهندسی، با توجه به اینکه $PF \gg 1$ است، افزایش کسر حجمی تا ۲۰٪ نه تنها از نظر حرارتی سودمند است، بلکه از نظر کارایی کلی سیستم نیز کاملاً توجیه‌پذیر بوده و نشان‌دهنده یک عملکرد بهینه در مقیاس میکرو است.

جدول ۳ ضریب عملکرد

شاخص عملکرد (PF)	افزایش نسبی افت فشار ($\Delta P/\Delta P_0$)	بهبود نسبی عدد ناسلت (Nu/Nu_0)	کسر حجمی نانوذره	جنس دیواره چاه حرارتی
۱	۱	۱	۰/۵	مس (هدایت بالا)
۱/۹	۱/۰۵	۱/۸۹۹	۲	مس (هدایت بالا)
۱	۱	۱	۰/۵	مس (هدایت متوسط)
۱/۸۸	۱/۰۵	۱/۹۷۸	۲	مس (هدایت متوسط)

۶- نتیجه گیری

افزایش سرعت محاسبات و کاهش اندازه چاه حرارتی باعث به وجود آمدن بار حرارتی بیش‌ازحد مجاز و کاهش طول عمر در این تجهیزات می‌شود؛ لذا مدیریت حرارت نقش مهمی در توسعه‌های آینده خواهد داشت. در این کار عددی، عملکرد انتقال حرارت یک سینک حرارتی میکرو کانال مستطیلی با استفاده از نانوسیال با نانو

Communications in Heat and Mass Transfer. 2012;39(604-1595):(10).

[5]. Salman B, Mohammed H, Kherbeet AS. Heat transfer enhancement of nanofluids flow in microtube with constant heat flux. International Communications in Heat and Mass Transfer. 2012;39(8):1195-204.

[6]. Ho C-J, Chen W. An experimental study on thermal performance of Al2O3/water nanofluid in a minichannel heat sink. Applied Thermal Engineering. 2013;50(1):516-22.

[7]. Tullius J, Bayazitoglu Y. Effect of Al2O3/H2O nanofluid on MWNT circular fin structures in a minichannel. International Journal of Heat and Mass Transfer. 2013;60:523-30.

[8]. Mohammadpour J, Lee A, Mozafari M, Zargarabadi MR, Mujumdar AS. Evaluation of Al2O3-Water nanofluid in a microchannel equipped with a synthetic jet using single-phase and Eulerian-Lagrangian models. International Journal of Thermal Sciences. 2021;161:106705.

[9]. Naphon P, Nakharin L. Heat transfer of nanofluids in the mini-rectangular fin heat sinks. International Communications in Heat and Mass Transfer. 2013;40:25-31.

[10]. Chen Y, Zhang C, Shi M, Wu J. Three-dimensional numerical simulation of heat and fluid flow in noncircular microchannel heat sinks. International Communications in Heat and Mass Transfer. 2009;36(9):917-20.

[11] Manjur, M. S. B., Liakat, F., Islam, N., Haque, M. R., & Hossan, M. A. (2025). Numerical investigation of microchannel heat sinks thermal performance enhancement employing innovative channel cross section with CNT and MXene nanofluids. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 150(14), 11367-11386. doi:10.1007/s10973-025-14422-2

[12] Navaei A, et al. Heat transfer enhancement of turbulent nanofluid flow over various types of internally corrugated channels. Powder Technol. 2015;286:332-41.

[13] Wang H, Chen Z, Gao J. Influence of geometric parameters on flow and heat transfer performance of micro-channel heat sinks. Appl Therm Eng. 2016;107:870-9.

لوله کربنی تک-جداره در کسرهای حجمی و اعداد رینولدز مختلف مورد بررسی قرار گرفت. خلاصه نتایج به شرح زیر می باشد.

- عملکرد عالی استفاده از نانو لوله کربنی تک جداره در خنک کنندگی و حفظ دمای پایه چاه حرارتی
- بهبود قابل توجه در ضریب انتقال حرارت در حدود $32/2$ و 32 درصد (کسر حجمی 2 درصد) در نسبت به کسر حجمی $0/5$ درصد برای نانو لوله کربنی تک جداره برای هر دو مدل چاه حرارتی در تمامی رینولدزها
- افزایش ضریب انتقال حرارت سیال به دلیل استفاده از نانولوله کربنی تک جداره، باعث افزایش عدد ناسلت در تمامی درصدهای حجمی نانوذره در تمامی اعداد رینولدز شده است.
- در رینولدزهای بالا و درصد حجمی 2 درصد مقاومت حرارتی همرفتی بطور قابل توجهی به حداقل رسیده است. بر اساس نتایج، حداقل مقاومت حرارتی همرفتی در کسر حجمی 2 درصد در حدود 17 درصد کمتر از نانوسیال با $0/5$ درصد حجمی ثبت شد.
- با توجه به شرایط مساله و کاربرد چاه حرارتی باید یک مقدار بهینه از درصد نانوذره و توان پمپاژ سیال در نظر گرفته شود.

۱-۱ مراجع

[1]. Choi SU, Eastman JA. Enhancing thermal conductivity of fluids with nanoparticles. Argonne National Lab.(ANL), Argonne, IL (United States); 1995.

[2]. Das SK, Putra N, Thiesen P, Roetzel W. Temperature Dependence of Thermal Conductivity Enhancement for Nanofluids. Journal of Heat Transfer. 2003;125(4):567-74.

[3].Sohel M, Saidur R, Sabri MFM, Kamalisarvestani M, Elias M, Ijam A. Investigating the heat transfer performance and thermophysical properties of nanofluids in a circular micro-channel. International Communications in Heat and Mass Transfer. 2013;42:75-81.

[4]. Tokit EM, Mohammed H, Yusoff MZ. Thermal performance of optimized interrupted microchannel heat sink (IMCHS) using nanofluids. International

- [21]. Al-Asadi MT, editor Evaluation of nanofluids performance with vortex generators for enhanced micro-channel heat transfer. ICTEA: International Conference on Thermal Engineering; 2018.
- [22]. Gholinia M, Ranjbar A, Javidan M, Hosseinpour A. Employing a new micro-spray model and (MWCNTs-SWCNTs)-H₂O nanofluid on Si-IGBT power module for energy storage: A numerical simulation. *Energy Reports*. 2021;7:6844-53.
- [23] Xuan Y, Roetzel W. Conceptions for heat transfer correlation of nanofluids. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2000;43(19):3701-7.
- [23]. Sohel M, Khaleduzzaman S, Saidur R, Hepbasli A, Sabri M, Mahbulul I. An experimental investigation of heat transfer enhancement of a minichannel heat sink using Al₂O₃-H₂O nanofluid. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2014;74:164-72.
- [25]. Moraveji MK, Ardehali RM, Ijam A. CFD investigation of nanofluid effects (cooling performance and pressure drop) in mini-channel heat sink. *International Communications in Heat and Mass Transfer*. 2013;40:58-66.
- [26]. Xie G, Li S, Sunden B, Zhang W, Li H. A numerical study of the thermal performance of microchannel heat sinks with multiple length bifurcation in laminar liquid flow. *Numerical Heat Transfer, Part A: Applications*. 2014;65(2):107-26.
- [27]. Chai L, Wang L, Bai X. Thermohydraulic performance of microchannel heat sinks with triangular ribs on sidewalls-Part 2: Average fluid flow and heat transfer characteristics. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2019;128:634-48.
- [28]. Pak BC, Cho YI. Hydrodynamic and heat transfer study of dispersed fluids with submicron metallic oxide particles. *Experimental Heat Transfer an International Journal*. 1998;11(2):151-70.
- [29]. Xuan Y, Roetzel W. Conceptions for heat transfer correlation of nanofluids. *International Journal of heat and Mass transfer*. 2000;43(19):3701-7.
- [30]. Corcione M. Rayleigh-Bénard convection heat transfer in nanoparticle suspensions. *International Journal of Heat and Fluid Flow*. 2011;32(1):65-77.
- [14] Abed AA, Khalil WH. A numerical study of the heat transfer and fluid flow in different shapes of microchannels. *Al-Nahrain J Eng Sci*. 2016;19(1):66-75.
- [15] Siahchehrehghadikolaei, S., S. Ghadikolaei, S., Gholinia, M., & Ahmadi, G. (2025). Application of CNTs/H₂O nanofluid and the wavy fin with dimples in thermal management of CPU: A numerical modeling of hybrid passive cooling. *Numerical Heat Transfer, Part A: Applications*, 86(18), 6545-6562. doi:10.1080/10407782.2024.2343591
- [16] Omosehin, O. S., Adelaja, A. O., Olakoyejo, O. T., & Oyekeye, M. O. (2022). Numerical study of the thermal performance and pressure drops of water-based Al₂O₃ - Cu hybrid nanofluids of different compositions in a microchannel heat sink. *Microfluidics and Nanofluidics*, 26(7), 49. doi:10.1007/s10404-022-02550-2
- [17] abdi elmi, e., & Uosofvand, H. (2019). Experimental Investigation of Heat Transfer Enhancement in a Finned U-Shaped Heat Pipe of CPU Cooling System Using Different Fluids %J Challenges in Nano and Micro Scale Science and Technology. 7(1), 72-79. doi:10.22111/tpnms.2018.15466.1095
- [18]. Al-Baghdadi MAS. A CFD analysis of transport phenomena and electrochemical reactions in a tubular-shaped ambient air-breathing PEM micro fuel cell. *HKIE Transactions*. 2010;17(2):1-8.
- [19]. Wang X-D, An B, Xu J-L. Optimal geometric structure for nanofluid-cooled microchannel heat sink under various constraint conditions. *Energy conversion and management*. 2013;65:528-38.
- [20]. Alkasmoul FS, Al-Asadi M, Myers T, Thompson H, Wilson M. A practical evaluation of the performance of Al₂O₃-water, TiO₂-water and CuO-water nanofluids for convective cooling. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2018;126:639-51.