



Investigation of the effect of changing the type of fluid on the hydrodynamic and thermal characteristics of the flow in a thermal micro-heatsink

Ahmad Reza Rahmati* and Hamed Noroozi

Department of Mechanical Engineering, University of Kashan, Kashan, Iran

Abstract: In recent years, many studies have been conducted on the field of microchannels' sinks. The microchannel sink absorbs heat from other equipments and transfers it to the fluid by maximizing the contact area. In the present research, three-dimensional water flow, nanofluid and hybrid nanofluid in heat sink with constant heat flux, have been studied. The simulation process have been done in the commercial software ANSYS fluent. In the simulation process, the constant and uniform heat flux boundary condition has been applied to the bottom of the heat sink's wall. The influence of variables such as the nanoparticles volume fraction, nanoparticles types and Reynolds values on the hydrodynamic performance and heat sink will be investigated. After this stage, two types of nanofluid and one type of hybrid nanofluid in 0.04, 0.02 and 0.01 volume fractions will be considered as well. In this paper, first the pressure drops and heat transfer will be examined, and then the best nanofluid will be defined by considering the coefficient of thermal performance. The simulations show that the heat transfer decreases with increasing the volume fraction in the water-aluminium oxide nanofluid. On the other hand, the heat transfer increases with raising the volume fraction in the water-copper nanofluid. Also in the water-aluminium oxide-copper hybrid nanofluid, the heat transfer rises up in the 0.04 volume fraction in the range of 400 and above values for the Reynolds number.

Keywords: Heat sink, Heat transfer, Nano fluid, Hybrid Nano fluid, Variable properties.

Received: Nov. 30, 2023; Revised: Jun. 22, 2024; Accepted: Jul. 8, 2024; Published Online: Mar. 12, 2025.

* Corresponding Author: ar_rahmati@kashanu.ac.ir

How to Cite: Rahmati Ahmad Reza and Noroozi Hamed, Investigation of the effect of changing the type of fluid on the hydrodynamic and thermal characteristics of the flow in a thermal micro-heatsink, Journal of Computational Methods in Engineering; 2025, 43(2), 51-67; doi.org/10.47176/jcme.43.2.1020.





بررسی اثر تغییر نوع سیال بر مشخصه‌های هیدرودینامیکی و حرارتی جریان در یک میکروچاه حرارتی

احمدرضا رحمتی*^{ID} و حامد نوروزی

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه کاشان، کاشان، ایران

چکیده - چاه‌گرمایی میکروکانالی حرارت را از تجهیزات جذب می‌کنند و با بیشینه‌نمودن سطح تماس با سیال اطرافش، حرارت را به آن سیال منتقل می‌کنند. در پژوهش حاضر به شبیه‌سازی سه بعدی جریان آب، نانوسیال و نانوسیال هیبریدی در یک چاه گرمایی با فین‌های با آرایش مثلثی و سطح مقطع دایره با ارتفاع ۱/۵ میلی‌متر و شارحرارتی یکنواخت پرداخته می‌شود. شبیه‌سازی به کمک نرم‌افزار تجاری انسیس فلونت ۲۰۱۹ انجام شده است. شرط مرزی شار حرارتی ثابت و یکنواخت بر دیواره پایین چاه حرارتی اعمال شده است. اثرات متغیرهای کسر حجمی نانوذرات، نوع نانو ذرات و عدد رینولدز بر روی عملکرد هیدرودینامیکی و حرارتی چاه حرارتی مورد بررسی قرار می‌گیرد. دو نوع نانوسیال و یک نوع نانوسیال هیبریدی در سه کسر حجمی ۰/۰۱، ۰/۰۲ و ۰/۰۴ مورد بررسی می‌گیرند. در ابتدا افت فشار و انتقال حرارت مورد بررسی قرار می‌گیرد سپس با تعریف ضریب عملکرد حرارتی بهترین نانوسیال مشخص می‌شود. شبیه‌سازی‌ها نشان می‌دهد با افزایش کسر حجمی در نانوسیال آب-اکسید آلومینیوم انتقال حرارت کاهش می‌یابد اما در نانوسیال آب-مس با افزایش کسر حجمی انتقال حرارت افزایش می‌یابد. همچنین در نانوسیال هیبریدی آب-اکسید آلومینیوم-مس در کسر حجمی ۰/۰۴ از بازه عدد رینولدز ۴۰۰ به بالا انتقال حرارت افزایش می‌یابد.

واژه‌های کلیدی: چاه گرمایی، انتقال حرارت، نانوسیال، نانوسیال هیبریدی، خواص متغیر.

دریافت مقاله: ۱۴۰۲/۰۹/۰۹، بازنگری: ۱۴۰۳/۰۴/۰۲، پذیرش: ۱۴۰۳/۰۴/۱۸، اولین انتشار: ۱۴۰۳/۱۲/۲۲

* نویسنده مسئول، رایانامه: ar_rahmati@kashanu.ac.ir

حق انتشار این مستند، متعلق به دانشگاه صنعتی اصفهان است. © ۱۴۰۳

این مقاله تحت گواهی زیر منتشر شده و هر نوع استفاده غیرتجاری از آن مشروط بر استناد صحیح به مقاله و با رعایت شرایط مندرج در



آدرس زیر مجاز است:

فهرست علائم

A	مساحت	k	هدایت حرارتی (W/m ² K)
D _h	قطر هیدرولیکی	ρ	چگالی (kg/m ³)
f	ضریب اصطکاک داریسی ویسباخ	μ	ضریب لزجت دینامیکی (kg/ms)
Nu	عدد ناسلت	η	ضریب عملکرد حرارتی
P	فشار (Pa)	bw	سطح پایین
Re	عدد رینولدز	Bulk	حجم
u	بردار سرعت (m/s)	cw	همرفتی
T	دما (°K)	avg	میانگین
L	طول (m)	in	ورودی
q	شار گرمایی (W/m ²)	p	نانو ذرات
C _p	ظرفیت گرمای ویژه (J/kg°K)	s	جامد

۱- مقدمه

در چهار دهه گذشته، افزایش انتقال حرارت هم‌زمان با کاهش افت فشار، کاهش اندازه و حجم سیستم موضوعی است که مورد پژوهش قرار گرفته است. اما افزایش تقاضای انرژی، کاهش فضای مورد نیاز برای وسایل، افزایش راندمان و سهولت استفاده از تجهیزات، انقلابی در تبادل انتقال حرارت و انتقال جرم به وجود آورده است. در میان روش‌های انتقال حرارت، میکروکانال‌های تبادل انتقال حرارت و انتقال جرم مطلوب به نظر می‌رسند. میکروکانال‌ها می‌توانند جریان را به خوبی در میان کانال‌ها تقسیم نمایند و طول مسیر جریان را کاهش دهند همچنین جریان آرام را به شکلی در کانال‌ها تثبیت نمایند که ضرایب انتقال حرارت بالایی حاصل گردد. همچنین یکی دیگر از راه‌های افزایش انتقال حرارت اضافه کردن ذرات با ابعاد نانو به سیال پایه است. قطر ذرات مورد استفاده در نانو سیالات از ۱ نانومتر تا ۱۰۰ نانومتر است. این ذرات از جنس ذرات فلزی هم چون مس، نقره و غیره یا اکسید فلزی همچون آلومینیوم اکسید، اکسید مس و غیره هستند. سیالاتی مانند آب که در زمینه انتقال حرارت به کار می‌روند ضریب هدایت حرارتی پایینی دارند. اما ذرات نانو به دلیل بالا بودن ضریب هدایتی شان با اضافه شدن به سیال پایه باعث افزایش

ضریب هدایت حرارتی سیال پایه می‌شوند که این پارامتر یکی از پارامترهای مهم انتقال حرارت محسوب می‌شود. همچنین استفاده از نانو سیالات هیبریدی در سال‌های اخیر مورد توجه بسیاری از پژوهشگران قرار گرفته است. نانو سیالات هیبریدی دسته جدیدی از سیالات عامل مورد استفاده هستند. نانو سیالات هیبریدی با اضافه شدن دو یا سه ماده جامد به سیال پایه‌ای مانند آب، اتیلن گلیکول، مخلوط آب و اتیلن گلیکول، نفت سفید، روغن موتور، روغن‌های گیاهی و روغن پارافین ایجاد می‌شوند. چندین مورد از نانو ذرات جامد که برای تهیه نانو سیال هیبریدی استفاده می‌شوند. هر نانو ذره‌ای دارای خواص مخصوص به خود را دارد. به عنوان مثال، نانو ذرات اکسید فلز مانند اکسید آلومینیوم، که پس از اضافه شدن به سیال پایه، ثابت و نفوذ شیمیایی قابل توجهی را از خود نشان می‌دهند بنابراین گزینه مناسبی برای بهبود خواص حرارتی مانند هدایت حرارتی نیستند. این در حالی است که نانو ذرات فلزی مانند آلومینیوم، نقره و مس خواص حرارتی را به طرز قابل توجهی بهبود می‌بخشند، اما این فلزات گزینه مناسبی برای دستیابی به نانو سیال پایدار نیستند. به همین خاطر با ترکیب نانو ذرات فلز با نانو ذرات اکسید فلز و نانو ذرات سرامیک، یک

جدول ۱- ضریب رسانایی گرمایی فلزات و مایعات

حالت	نوع ماده	ضریب رسانایی (W/m ² K)
جامدهای فلزی	مس	۴۰۱
	آلومینیوم	۲۳۷
جامدهای غیر فلزی	سیلیکون	۱۴۸
	اکسید آلومینیوم	۴۰
مایعات فلزی	سدیم	۷۲/۳
	آب	۰/۶۱۳
مایعات غیر فلزی	اتیلن گلیکول	۰/۲۵۳
	روغن صنعتی	۰/۱۴۵

درصد بیشتر است.

لی و همکاران [۳] اثر تغییرات دما و غلظت را روی ضریب هدایت حرارتی نانو سیالات شامل نانوذرات اکسید مس (۲۹ نانومتر) و اکسید آلومینیوم (۳۶ نانومتر) در آب به صورت آزمایشگاهی بررسی کردند. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که جنس، اندازه و غلظت نانوذرات و همچنین دمای سیال، اثرات بارزی بر روی ضریب هدایت حرارتی نانو سیالات دارند. به عنوان مثال با افزایش دما از ۲۷ درجه سلسیوس تا ۳۴ درجه سلسیوس در نانو سیال آب - اکسید آلومینیوم، ضریب هدایت حرارتی سه برابر شد.

ژی و همکاران [۴] برای اولین بار تاثیر شکل نانو ذرات را در هدایت حرارتی نانو سیال سلیسیم کاربرد مورد بررسی قرار دادند. در این آزمایش نانوذراتی به شکل کروی با قطر ۲۶ نانومتر و استوانه‌ای با قطر میانگین ۶۰۰ نانومتر استفاده کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که نسبت هدایت حرارتی در نانوذرات به شکل استوانه‌ای نسبت به کروی بیشتر است.

ون و دینگ [۵] برای افزایش انتقال حرارت، نانو سیال اکسید آلومینیوم - آب را بررسی کردند. نتایج آن‌ها نشان داد عدد ناسلت در کسر حجمی ۱/۶ درصد حدود ۳۸ درصد افزایش می‌یابد.

مرشد و همکاران [۶] نانوذرات تیتانیوم اکسید با شکل‌های استوانه‌ای و کروی را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها نشان دادند که با افزایش مقدار کسر حجمی نانوذرات، ضریب هدایت

محللول پایدار می‌توان به دست آورد، در حالی که خواص حرارتی نیز بهبود یافته است [۱]. ضریب رسانایی گرمایی چند سیال و جامد را می‌توان در جدول ۱ مشاهده کرد.

در سال ۲۰۲۱ بهندری و پراجاپاتی [۲] به بررسی عددی ویژگی‌های انتقال حرارت و جریان سیال در چاه حرارتی با باله - های مربع شکل با استفاده از تغییر ارتفاع باله پرداخته‌اند. آن‌ها جریان آرام در محدوده عدد رینولدز ۸۰۰-۲۰۰ را مورد مطالعه قرار دادند. در این مطالعه شار حرارتی یکنواختی در محدوده ۷۵ تا ۱۵۰ کیلووات بر متر مربع برای گرم کردن میکروکانال تامین می‌شود، همچنین سیال خنک کننده آب است. تغییر ارتفاع باله باعث می‌شود که یک فضای بازی بین سطح بالایی باله و دیواره بالایی مخزن به وجود آید. در این مطالعه هفت نوع ارتفاع باله مختلف در محدوده ۰/۵ تا ۲ میلی‌متر هر بار با افزایش ارتفاع ۰/۲۵ میلی‌متر، تجزیه و تحلیل‌های صورت گرفته است. نتایج آن‌ها نشان می‌دهد که افزایش ارتفاع باله باعث افزایش سرعت انتقال حرارت می‌شود. اما این افزایش فقط تا ارتفاع باله ۱/۵ میلی‌متر ادامه دارد و برای باله های ۱/۷۵ و ۲ میلی‌متر شاهد اتلاف ظرفیت گرمایی بوده‌اند همچنین باله‌های بین ۰/۵ تا ۱ میلی‌متر عملکرد حرارتی بسیار کمی دارند. در نهایت آن‌ها نشان دادند که چاه حرارتی با ارتفاع باله ۱/۵ میلی‌متر حدود ۷۵ تا ۸۰ درصد عملکرد حرارتی بهتری نسبت به چاه حرارتی با ارتفاع باله ۲ میلی‌متر دارد و همچنین سرعت انتقال حرارت آن ۵ تا ۱۰

آب بهتر است.

جونگ و همکاران [۱۲] نانوسیال روی-اکسید را در دو نوع شکل نانوذره، مستطیلی و کروی را بررسی کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که هدایت حرارتی نانوسیال هنگامی که از ذراتی به شکل مستطیلی استفاده می‌شود نسبت به زمانی که از ذراتی به شکل کروی استفاده می‌شود بیشتر است.

مروچی و همکاران [۱۳] به صورت عددی، ضریب انتقال حرارت جابجایی، افت فشار، دبی جرمی و همچنین توان پمپ را با استفاده از جریان نانوسیالات را درون چاه‌های حرارتی را بررسی کردند. آن‌ها با توجه به نتایج؛ روابطی جهت محاسبه عدد ناسلت، ضریب انتقال حرارت و ضریب اصطکاک برای محاسبات جریان نانوسیال در مینی چاه‌های حرارتی پیشنهاد دادند.

مهریان و همکاران [۱۴] انتقال حرارت جابجایی طبیعی را در یک محفظه‌ی پر از محیط متخلخل با نانوسیال هیبریدی آب-آلومینیوم اکسید - مس را مورد بررسی و پژوهش قرار دادند. نتایج آن‌ها نشان داد که در محیط متخلخل انتقال حرارت به وسیله‌ی نانوذرات کاهش می‌یابد که این کاهش برای نانوسیال‌های هیبریدی بسیار بیشتر از نانوسیال‌های منفرد است.

تاگر و همکاران [۱۵] یک میکروچاه حرارتی را با استفاده از پنج نوع میکروکانال با سطح مقطع‌های مختلف (مثلثی، مستطیلی، دوزنقه‌ای، نیم دایره و دایروی) با استفاده از نانوسیال آب-اکسید آلومینیوم در محدود رینولدز ۲۲۰ تا ۵۵۰ را بررسی کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که میکروکانال با سطح مقطع دایروی بالاترین عملکرد در انتقال حرارت را داشته است و میکروکانال با سطح مقطع مثلثی کمترین عملکرد انتقال حرارت را دارد.

۲- هندسه مسئله

هندسه مسئله از یک چاه حرارتی همراه با موانع پین شکل با سطح مقطع دایروی است که جریان سیال از سمت چپ وارد و از سمت راست خارج می‌گردد. همچنین از کف این چاه حرارتی شارگرایی یکنواختی به سیال وارد می‌شود. ابعاد و مشخصات این چاه حرارتی در جدول ۲ آمده است.

گرمایی به صورت غیر خطی تغییر می‌کند و زیاد می‌شود، همچنین قطر و شکل ذرات بر افزایش هدایت گرمایی اثر می‌گذارد. نتایج آن‌ها نشان داد که مطالعات و تلاش‌های بیشتری برای ایجاد یک مدل مناسب برای پیش‌بینی هدایت حرارتی نانوسیالات لازم است.

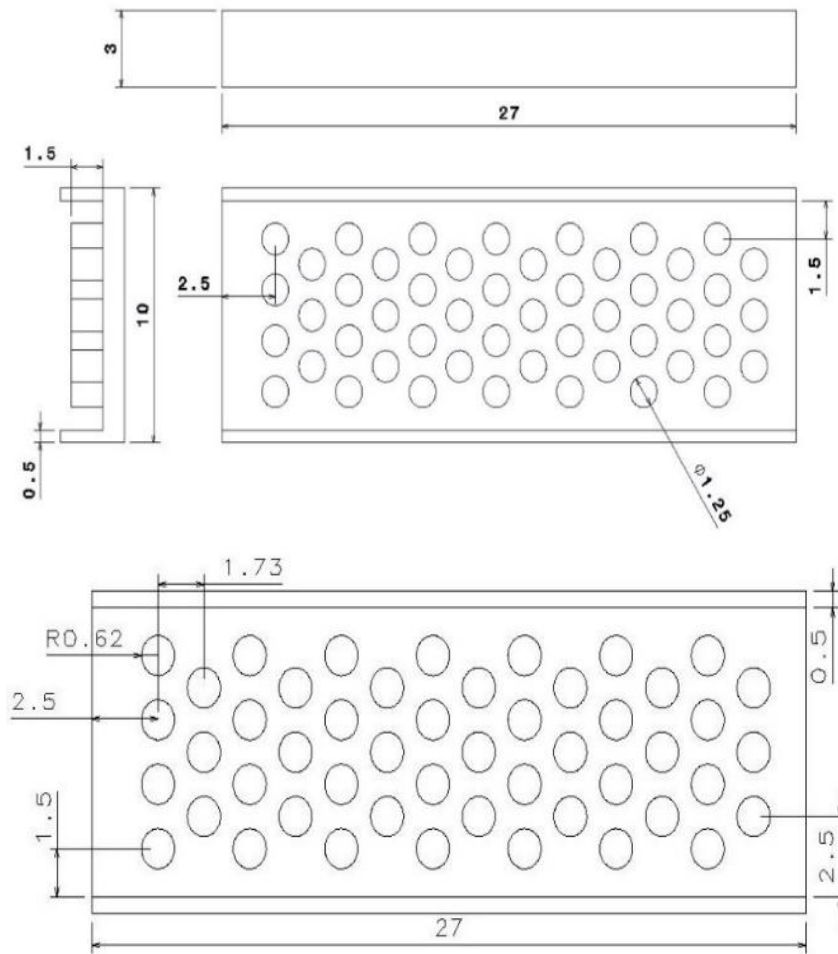
جانگ و چوی [۷] به صورت عددی نشان دادند که با اضافه کردن ذرات مس به سیال پایه آب یونیزه شده در یک جریان آرام و توسعه یافته هیدرودینامیکی و حرارتی، عملکرد خنک‌کاری چاه حرارتی میکروکانالی را افزایش می‌دهد.

پولیدوری و همکاران [۸] جابجایی آرام آزاد روی یک لبه گرم را به صورت عددی بررسی کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که با افزایش کسر حجمی، عدد ناسلت افزایش می‌یابد و همچنین مدل ضریب لزجت دینامیکی نقش کلیدی در انتقال گرما دارد.

هو و همکاران [۹] عملکرد چاه حرارتی با استفاده از نانوسیال آب-آلومینیوم اکسید را بررسی کردند. آن‌ها از میکروکانالی که دارای ۲۵ کانال مستطیل شکل موازی به طول ۵۰ mm بود استفاده کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که ضریب انتقال حرارت در نانوسیال با غلظت حجمی ۱٪ نسبت به آب، حدوداً ۷۰٪ افزایش یافته است.

چاندر سکر و سورش [۱۰] انتقال حرارت درون لوله‌ای با دیواره حرارتی ثابت در جریان کاملاً توسعه یافته آرام و درهم با نانو سیال آب-اکسید آلومینیوم را مورد بررسی و پژوهش قرار دادند. نتایج آن‌ها نشان داد که حرکت نانو ذره در طول گردابه‌ها در ناحیه درهم مکانیزم نفوذ در زیر لایه آرام، دلیل افزایش انتقال حرارت در جریان درهم است.

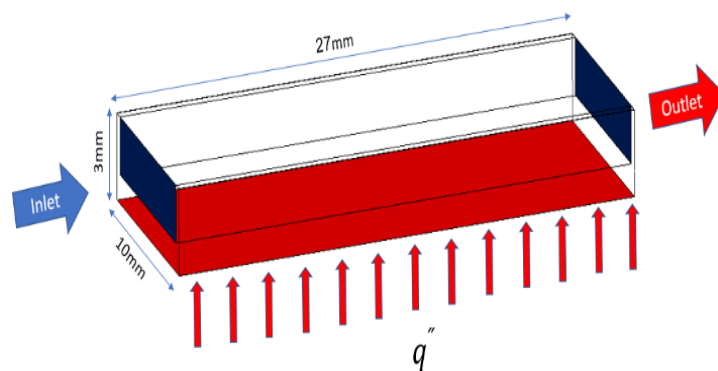
انوپ و همکاران [۱۱] اثر نرخ جریان بر انتقال حرارت جابجایی درون یک چاه حرارتی میکروکانالی با نانوسیال آب-سلیسیم اکسید به عنوان سیال عامل را بررسی کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که انتقال حرارت در هر دو سیال عامل آب و نانوسیال با افزایش نرخ جریان بهبود پیدا می‌کند. آن‌ها از نانوسیال در غلظت‌های جرمی ۲/۰٪، ۵/۰٪ و ۱۰٪ استفاده کردند و نشان دادند که عملکرد حرارتی نانوسیال در نرخ جریان پایین‌تر، نسبت به



شکل ۱- نمای کلی هندسه

جدول ۲- جزئیات هندسی مسئله

مقدار (میلی متر)	پارامتر
۲۷	طول چاه حرارتی
۱۰	عرض چاه حرارتی
۳	ارتفاع چاه حرارتی
۰/۵	عرض دیواره های جانبی
۱	ضخامت دیواره کف
۱/۵	ارتفاع موانع
۲	فاصله ورودی چاه حرارتی تا اولین پره
۲	فاصله خروجی چاه حرارتی تا آخرین پره
۱	فاصله موانع از دیواره
۱	فاصله موانع از یکدیگر
۰/۰۱	ضخامت کاور



شکل ۲- نحوه اعمال شار حرارتی

جدول ۳- خواص نانو ذرات و سیال پایه [۱۶، ۱۷]

ردیف	خواص	آلومینا (Al_2O_3)	مس (Cu)	آب (bf)
۱	چگالی (ρ (kg/m ³))	۳۹۷۰	۸۹۳۳	۹۹۸/۲
۲	ضریب هدایت حرارتی (K (W/m ² k))	۴۰	۴۰۱	۰/۶
۳	ظرفیت گرمایی ویژه (C_p (J/kg ² k))	۷۶۵	۳۸۵	۴۱۸۲
۴	ضریب لزجت دینامیکی (μ (kg/ms))	-	-	۰/۰۰۱۰۰۳

$$\rho(T) = 765.33 + 1.8142T - 0.0035T^2 \quad (1)$$

$$C_p(T) = 28070 - 281.7T + 1.25T^2 - (2.48 \times 10^{-3})T^3 + (1.857 \times 10^{-6})T^4 \quad (2)$$

$$K(T) = -0.5720 + (6.397 \times 10^{-3})T - (8.151 \times 10^{-6})T^2 \quad (3)$$

$$\mu(T) = (9.67 \times 10^{-2}) - (8.207 \times 10^{-4})T + (2.344 \times 10^{-6})T^2 - 2.244 \times 10^{-9}T^3 \quad (4)$$

روابط ارائه شده در محدوده دمایی $278 \text{ K} < T < 368 \text{ K}$ می-باشد.

محل اعمال شار حرارتی کف چاه گرمایی و معادل $150 \text{ (Kw/m}^2\text{)}$ است. شارحرارتی یکنواخت و به صورت عمودی و رو به بالا وارد می شود. سیال خنک کننده با عبور از موانع حرارت تولید شده را می زداید.

۳- خواص مواد

در این پژوهش از آب به عنوان سیال پایه استفاده شده است. دمای آب ورودی به سمت چاه حرارتی در تمامی موارد برابر 30° کلوین است. لذا خواص ترموفیزیکی سیال پایه و ذرات نانوسیال در جدول ۳ آمده است.

۳-۱- خواص حرارتی سیال پایه

آب مایع تک فاز به عنوان سیال پایه انتخاب شده است. خواص حرارتی سیال تابع دما است. برای محاسبه چگالی، ظرفیت گرمایی ویژه، ضریب هدایت حرارتی و ضریب لزجت دینامیکی از روابط ۱، ۲، ۳ و ۴ که تابعی از دما هستند می توان استفاده کرد [۲].

۳-۲- خواص حرارتی نانوسیال

برای محاسبه چگالی در نانوسیالات معمولا از رابطه پک و چو [۱۸]، برای ظرفیت گرمایی ویژه از رابطه ژوان و روتزل [۱۹]، برای ویسکوزیته از رابطه برینکمن [۲۰] و برای هدایت حرارتی از رابطه ماکسول [۲۱] برای نانوسیال های آب- اکسید آلومینیوم و آب-مس می توان استفاده کرد.

۳-۳- معادلات حاکم

در پژوهش حاضر از مدل تکفازی برای حل جریان سیال و نانوسیال استفاده شده است. برای جریان پایا که خواص فیزیکی سیال تابع دما است معادله بقای جرم، بقای مومنتم و بقای انرژی به صورت زیر خواهد بود [۲].

$$\nabla \cdot (\rho \bar{u}) = 0 \quad (13)$$

$$\nabla \cdot (\rho \bar{u} \cdot \nabla \bar{u}) = -\nabla p + \nabla \cdot \mu \left[\left(\nabla \bar{u} + \nabla \bar{u}^t \right) - 2/3 \nabla \cdot \bar{u} \right] + \rho \bar{g} \quad (14)$$

$$\nabla \cdot (\rho c_p (\bar{u} \nabla T)) = \nabla \cdot (K \nabla T) \quad (15)$$

در معادلات فوق، \bar{u} ماتریس سرعت، P فشار و T دما است. برای بستر جامد، معادله پیوستگی به $\bar{u}=0$ ساده شده است و معادله انرژی به $\kappa_s \nabla^2 T=0$ تبدیل می‌شود.

۴- روش حل عددی و محاسبه نتایج

برای حل این مسئله از نرم افزار انسیس فلونت ۱۹ استفاده شده است. پس از تولید هندسه، شبکه‌بندی و ارزیابی بر روی آن انجام می‌گیرد. سپس با اعمال شرایط ورود، خروج، شرایط مرزی حرارتی و آدیاباتیک و روابط سیال پایه و نانوسیال شبیه‌سازی کامل می‌شود. برای شرط مرزی شارحرارتی ثابت از نتایج به دست آمده ابتدا مطابق رابطه ۱۶ ضریب انتقال حرارت جابجایی و از رابطه ۱۷ عدد ناسلت محاسبه می‌شود [۲].

$$h = \frac{q_{eff}}{(T_{avg,cw} - T_{bulk,l})} \quad (16)$$

$$Nu = \frac{hD_h}{K} \quad (17)$$

در رابطه ۱۶ q_{eff} شار حرارتی موثر است که مطابق رابطه ۱۸ محاسبه می‌گردد. $T_{bulk,l}$ و $T_{avg,cw}$ به ترتیب دمای متوسط سطح تماس جامد و مایع و دمای متوسط برای کل دامنه سیال است که در هر لحظه در چاه‌حرارتی وجود دارد، D_h قطر هیدرولیکی پلنوم ورودی که مطابق رابطه ۱۹ محاسبه می‌گردد، k ضریب

$$\rho_{nf} = (1 - \phi) \rho_{bf} + \phi \rho_p \quad (5)$$

$$(\rho C_p)_{nf} = (1 - \phi) (\rho C_p)_{bf} + \phi (\rho C_p)_p \quad (6)$$

$$\mu_{nf} = \frac{\mu_{bf}}{(1 + \phi)^{2/5}} \quad (7)$$

$$K_{nf} = K_{bf} \left[\frac{K_p + 2K_{bf} - 2\phi(K_{bf} - K_p)}{K_p + 2K_{bf} + \phi(K_{bf} - K_p)} \right] \quad (8)$$

۳-۲- خواص حرارتی نانوسیال هیبریدی

خواص ترموفیزیکی نانوسیال هیبریدی آب-اکسید آلومینیوم-مس از طریق میانگین‌گیری جرمی وزنی به کمک معادلات ۹ الی ۱۲ محاسبه می‌گردد [۱۷].

$$\rho_{hnf} = (1 - \phi) \rho_{bf} + \phi_{Al_2O_3} \rho_{Al_2O_3} + \phi_{Cu} \rho_{Cu} \quad (9)$$

$$(\rho C_p)_{hnf} = (1 - f) (\rho C_p)_{bf} + f_{Al_2O_3} (\rho C_p)_{Al_2O_3} + f_{Cu} (\rho C_p)_{Cu} \quad (10)$$

$$\mu_{hnf} = \frac{\mu_{bf}}{\left[1 - \left(\phi_{Al_2O_3} + \phi_{Cu} \right) \right]^{2/5}} \quad (11)$$

$$K_{hnf} = K_{bf} \left[\frac{(\phi_{Al_2O_3} K_{Al_2O_3} + \phi_{Cu} K_{Cu})}{\phi} + 2K_{bf} \right] + 2(\phi_{Al_2O_3} K_{Al_2O_3} + \phi_{Cu} K_{Cu}) - 2\phi K_{bf} \quad (12)$$

که در آن به ترتیب ρ_{hnf} ، $C_{p,hnf}$ ، μ_{hnf} و K_{hnf} برابر با چگالی، ظرفیت گرمایی ویژه، ویسکوزیته دینامیکی و ضریب هدایت حرارتی نانوسیال هیبریدی است. مقدار ϕ در روابط بالا برابر است با:

$$\phi = \phi_{Al_2O_3} + \phi_{Cu}$$

۱. مایع نیوتونی و غیر قابل تراکم است.

۲. جریان آرام و پایا است.

۳. شرایط مرزی بدون لغزش در سطح دیوار است.

۴. خواص حرارتی-فیزیکی بستر مس ثابت می‌ماند.

۵. دیواره خارجی شرایط آدیاباتیک را حفظ می‌کند.

هدایت حرارتی سیال، A_{bw} و A_{cw} به ترتیب سطح دیواره پایین چاه‌حرارتی و سطح تماس مایع جامد است [۲].

$$q_{eff} = q \frac{A_{bw}}{A_{cw}} \quad (18)$$

$$D_h = \frac{4A_c}{P} \quad (19)$$

عدد رینولدز نیز از رابطه ۲۰ محاسبه می‌گردد.

$$Re = \frac{\rho_1 U_{in} D_h}{\mu_1} \quad (20)$$

افت فشار یکی از مهم‌ترین پارامترهای جریان‌های داخلی است، زیرا که به‌وسیله‌ی آن توان مورد نیاز پمپ یا فن تعیین می‌گردد. برای تعیین افت فشار از ضریب اصطکاک مودی استفاده می‌شود. این ضریب به صورت بی‌بعد است و مطابق رابطه ۲۱ محاسبه می‌شود [۲۲].

$$f = \frac{2 \Delta P D_h}{\rho u^2 L} \quad (21)$$

f ضریب اصطکاک داری و L طول چاه‌حرارتی است. پس از محاسبه عددناسلت و افت فشارها مطابق روابط ۱۷ و ۲۱ می‌توان ضریب عملکرد حرارتی را محاسبه نمود.

۴-۱- ضریب عملکرد حرارتی

برای محاسبه ضریب عملکرد حرارتی از رابطه ۲۲ استفاده می‌شود [۲۲].

$$\eta = \frac{(Nu^* / Nu)}{(f^* / f)^{1/3}} \quad (22)$$

که در آن به ترتیب Nu^* و f^* عددناسلت و افت فشار چاه‌حرارتی همراه با مانع و Nu و f عددناسلت و افت فشار چاه‌حرارتی بدون مانع است.

۴-۲- فرضیات حل مسئله

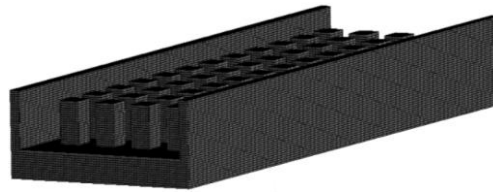
در این پژوهش فرضیات زیر در نظر صورت گرفته شده است:

۴-۳- شرایط مرزی

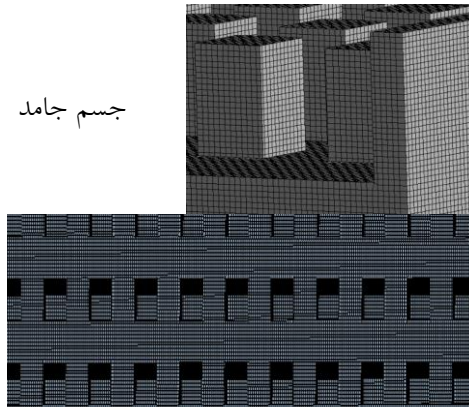
شار حرارتی یکنواختی در سطح پایین چاه حرارتی وارد می‌شود. دیواره‌های خارجی باقی‌مانده دارای شرایط مرزی آدیاباتیک هستند. ورودی میکروکانال با مشخصات سرعت یکنواخت و مقدار ثابت دمای خنک کننده 300 K است. از شرط مرز فشار در خروجی کانال استفاده می‌شود که در آن مقدار فشار معادل شرایط اتمسفر همچنان ادامه دارد. از آنجا که حداکثر مقدار عدد رینولدز 800 است، بنابراین شبیه‌سازی فقط برای جریان آرام انجام شده است. از طرح بالادست مرتبه دوم (آپویند مرتبه دوم) برای گسسته‌سازی معادلات حرکت و انرژی استفاده شد. الگوریتم ساده برای حل اتصال سرعت فشار اجرا شد. سیستم حاصل از معادلات جبری با استفاده از روش تکرارشونده گاوس-سیدل حل شده است. منطقه جامد چاه‌حرارتی انتقال حرارت را حفظ می‌کند، در حالی که حالت همرفت انتقال گرما در منطقه سیال و همچنین رابط جامد مایع حاکم است. از این رو، برای حل مسئله از روش مزدوج استفاده شده است. روش مشابه عددی توسط چندین محقق [۲۳ و ۲۴] برای حل مسائل مشابه انجام شده است.

۴-۴- معیار همگرایی

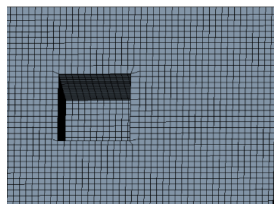
در این پژوهش معیار همگرایی برای معادله پیوستگی، حرکت و انرژی مطابق با معیار همگرایی در پژوهش بهندری و پراجاپاتی [۲] برای معادله پیوستگی، 10^{-4} ، برای معادله مومنتم، 10^{-6} ، برای معادله انرژی، 10^{-7} ، در نظر گرفته شده است.



جسم جامد



سیال



شکل ۳- نمایی از شبکه بندی چاه حرارتی

۵- شبکه بندی

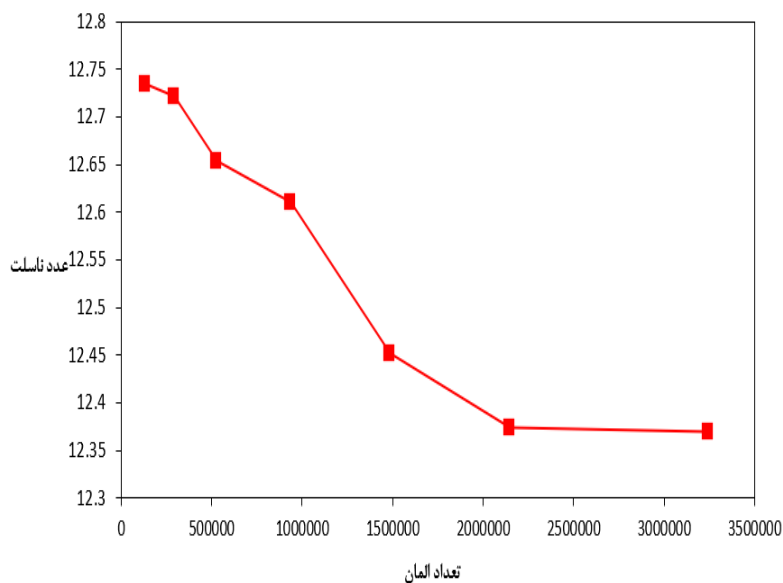
در این پژوهش از نرم افزار انسیس مشینگ برای شبکه بندی چاه حرارتی استفاده شده است. در ادامه شبکه بندی مورد استفاده در دو حالت سیال و جامد در شکل ۳ ارائه شده است.

۵-۱- استقلال نتایج از شبکه

به منظور دستیابی به تعداد شبکه بهینه برای محاسبه نتایج عددی قابل اعتماد، هندسه مورد نظر با استفاده از شبکه های مختلف مورد بررسی قرار گرفته است. هفت شبکه مختلف با سیال عامل آب خالص مورد بررسی قرار گرفته است و نتایج آن در جدول ۴ آمده است. براساس زمان محاسبات و دقت حل، شبکه ای سازمان یافته کارتزین مکعبی با اندازه 0.075 میلی متر با تعداد شبکه 2150020 به عنوان شبکه بهینه انتخاب شده است.

۵-۲- اعتبارسنجی

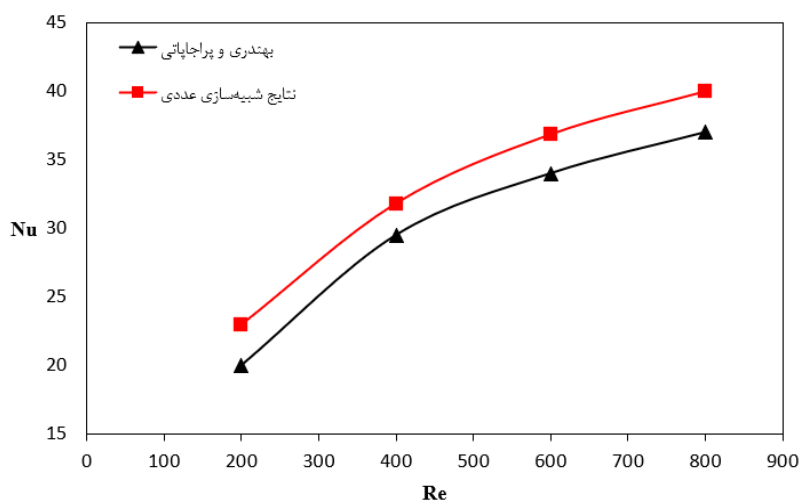
پس از شبکه بندی و تعیین اندازه شبکه، با اعمال شرایط مرزی و روابط خواص سیال در نرم افزار، شبیه سازی برای مدل (چاه حرارتی با ابعاد $3 \times 10 \times 27$ میلی متر با موانعی با سطح مقطع مربع 1×1 میلی متر و ارتفاع $1/5$ میلی متر) تکمیل می شود. به منظور اعتبارسنجی رویه عددی فعلی در چاه حرارتی، نتایج بدست آمده با داده های بهندری و پراجاپاتی مقایسه شده است. شکل ۵ و جدول ۵ نشان می دهد که عدد ناسلت شبیه سازی به طور میانگین حدود $9/6\%$ بیشتر از نتایج بهندری و پراجاپاتی [۲] است. بنابراین نتایج عددی تطابق خوبی با مقادیر عددی مقاله مرجع داشته و شبیه سازی عددی حاضر به خوبی مشخصه های هیدرودینامیکی و حرارتی جریان را پیش بینی می کند.



شکل ۴- استقلال نتایج از شبکه

جدول ۴- استقلال نتایج از شبکه برای چاه حرارتی با رینولدز ۲۰۰

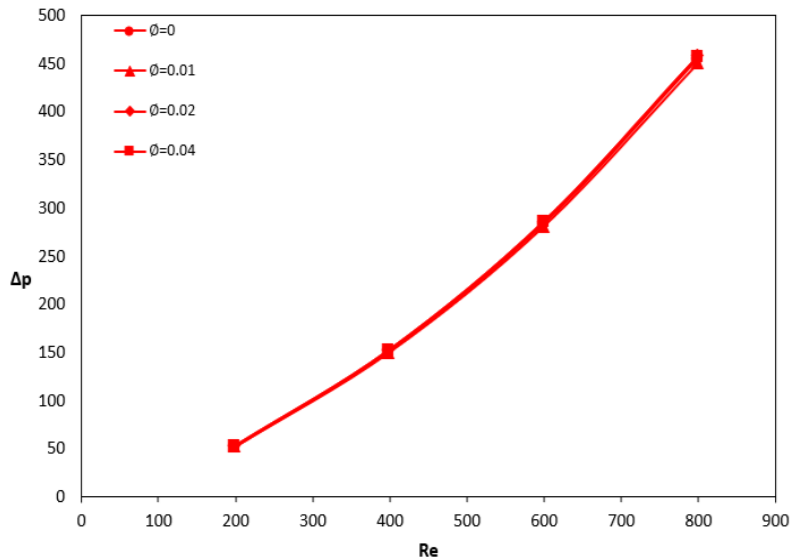
ردیف	اندازه شبکه (میلی متر)	تعداد شبکه	عدد ناسلت
۱	۰/۲	۱۳۶۰۰۰	۱۲/۷۳۴
۲	۰/۱۵	۲۹۳۰۴۰	۱۲/۷۲۱
۳	۰/۱۲	۵۲۷۵۹۰	۱۲/۶۵۴
۴	۰/۱	۹۳۸۷۴۴	۱۲/۶۱۱
۵	۰/۰۸۵	۱۴۸۷۷۲۱	۱۲/۴۵۲
۶	۰/۰۷۵	۲۱۵۰۰۲۰	۱۲/۳۷
۷	۰/۰۶۵	۳۲۴۵۶۶۴	۱۲/۳۷



شکل ۵- مقایسه مقادیر عدد ناسلت با مقادیر عدد ناسلت بهندری و پراجاپاتی [۲]

جدول ۵- مقایسه مقادیر عدد ناسلت با مقادیر عدد ناسلت بهندری و پراجاپاتی [۲]

ردیف	عدد رینولدز	عدد ناسلت (بهندری و پراجاپاتی)	عدد ناسلت (شبه‌سازی عددی)
۱	۲۰۰	۲۰	۲۲/۹۴
۲	۴۰۰	۲۹/۵	۳۱/۷۸
۳	۶۰۰	۳۴	۳۶/۸۱
۴	۸۰۰	۳۷	۳۹/۹۴



شکل ۶- افت فشار نانوسیال آب-اکسید آلومینیوم بر حسب عدد رینولدز در چاه‌حرارتی با کسرهای حجمی ۰/۰۱-۰/۰۲-۰/۰۴

۶-نتایج

افت فشار، عدد ناسلت و ضریب عملکرد حرارتی دو نوع نانوسیال آب-اکسید آلومینیوم و آب-مس و همچنین یک نوع نانوسیال هیبریدی آب-اکسید آلومینیوم-مس در سه نوع کسر حجمی ۰/۰۴، ۰/۰۲ و ۰/۰۱ و چهار عدد رینولدز ۸۰۰، ۶۰۰، ۴۰۰ و ۲۰۰ مورد بررسی قرار گرفته است.

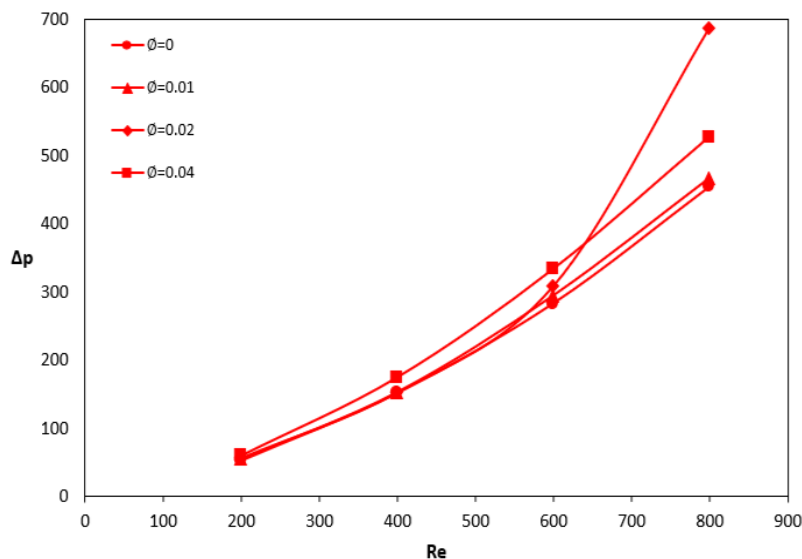
۶-۱- بررسی افت فشار در نانوسیال و نانوسیال هیبریدی در چاه‌حرارتی با کسرهای حجمی مختلف

افت فشار نانوسیال آب-اکسید آلومینیوم، آب-مس و همچنین نانوسیال هیبریدی آب-اکسید آلومینیوم-مس در کسرهای حجمی ۰/۰۴، ۰/۰۲ و ۰/۰۱ با آب خالص مقایسه شده است. نتایج نشان می‌دهد که مطابق شکل ۶ نانوسیال آب-

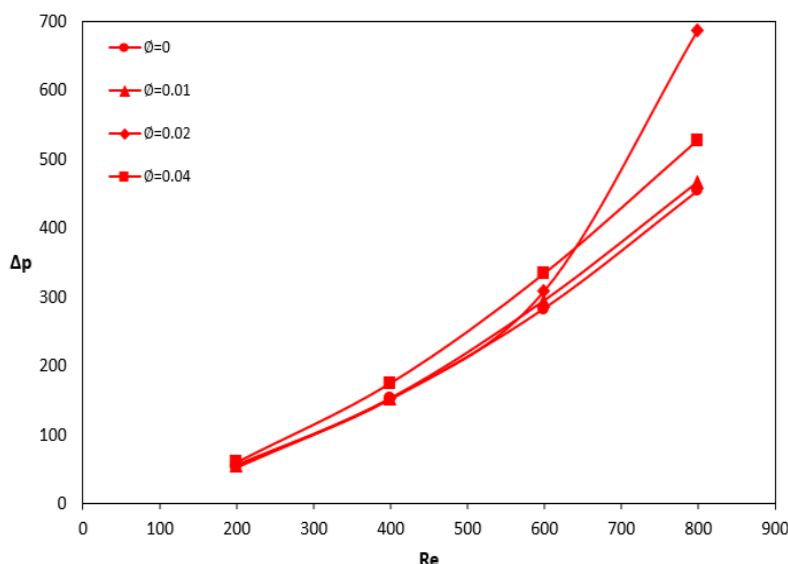
اکسید آلومینیوم تأثیری زیادی بر روی افت فشار نداشته است و حدود ۰/۷۵٪ افت فشار را افزایش می‌دهد و همچنین مطابق شکل ۷ نانوسیال آب-مس نیز افت فشار را افزایش می‌دهد به عنوان مثال در کسر حجمی ۰/۰۴ حدود ۱۶٪ افت فشار را افزایش می‌دهد و نیز مطابق شکل ۸ نانوسیال هیبریدی آب-اکسید آلومینیوم-مس در کسر حجمی ۰/۰۴ حدود ۸٪ افت فشار را افزایش می‌دهد.

۶-۲- بررسی عدد ناسلت در نانوسیال و نانوسیال هیبریدی در چاه‌حرارتی با کسرهای حجمی مختلف

عدد ناسلت نانوسیال آب-اکسید آلومینیوم، آب-مس و همچنین نانوسیال هیبریدی آب-اکسید آلومینیوم-مس در کسرهای حجمی ۰/۰۴، ۰/۰۲ و ۰/۰۱ با آب خالص مقایسه شده



شکل ۷- افت فشار نانوسیال آب-مس بر حسب عدد رینولدز در چاه‌حرارتی با کسرهای حجمی ۰/۰۱-۰/۰۲-۰/۰۴

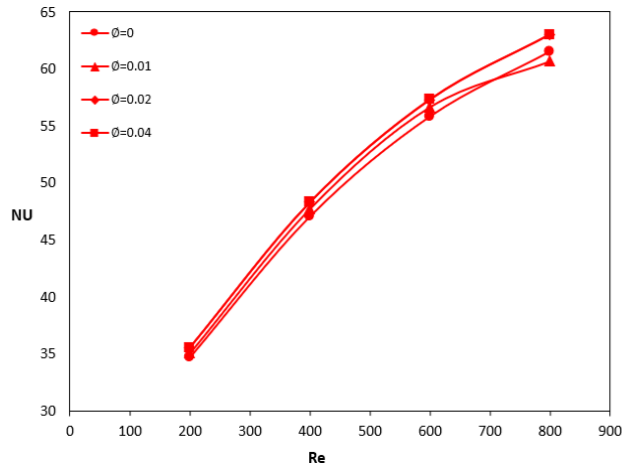


شکل ۸- افت فشار نانوسیال هیبریدی آب-اکسید آلومینیوم-مس بر حسب عدد رینولدز در چاه‌حرارتی با کسرهای حجمی ۰/۰۱-۰/۰۲-۰/۰۴

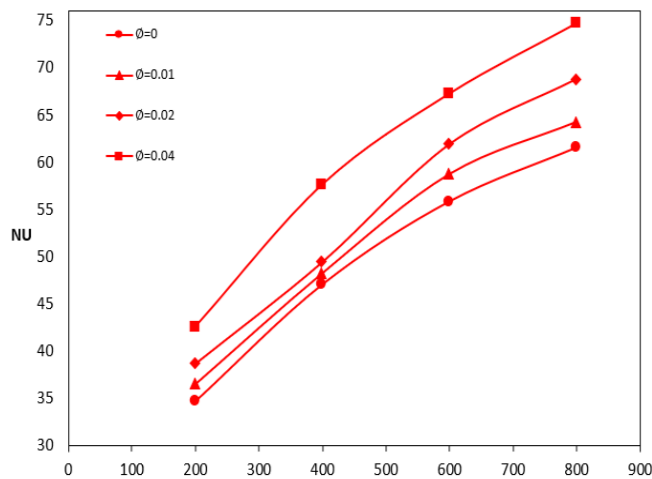
خوبی بر روی عدد ناسلت داشته است که چشم‌گیرترین آن در کسر حجمی ۰/۰۴ است و حدود ۱۵٪ عدد ناسلت را افزایش می‌دهد.

۳-۶- بررسی ضریب عملکرد حرارتی در نانوسیال و نانوسیال هیبریدی در چاه‌حرارتی با کسرهای حجمی مختلف
ضریب عملکرد حرارتی نانوسیال آب-اکسید آلومینیوم، آب-

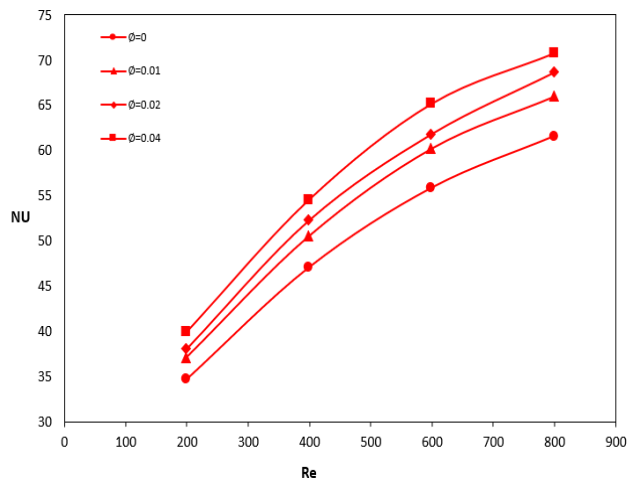
است. نتایج نشان می‌دهد که مطابق شکل ۹ نانوسیال آب-اکسید آلومینیوم تاثیر مثبتی بر روی عدد ناسلت داشته است و در کسر حجمی ۰/۰۴ حدود ۲۳٪ عدد ناسلت را افزایش می‌دهد همچنین مطابق شکل ۱۰ نانوسیال آب-مس تاثیر خوبی بر روی عدد ناسلت داشته است که چشم‌گیرترین آن در کسر حجمی ۰/۰۴ است که ۲۲٫۴۲٪ عدد ناسلت را افزایش می‌دهد و نیز مطابق شکل ۱۱ نانوسیال هیبریدی آب-اکسید آلومینیوم-مس تاثیر نسبتاً



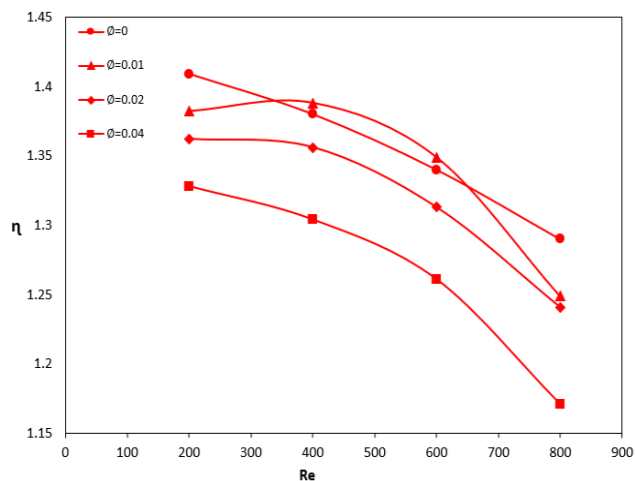
شکل ۹- عددناسلت نانوسیال آب-اکسید آلومینیوم برحسب عدد رینولدز در چاه حرارتی با کسرهای حجمی ۰/۰۱-۰/۰۲-۰/۰۴



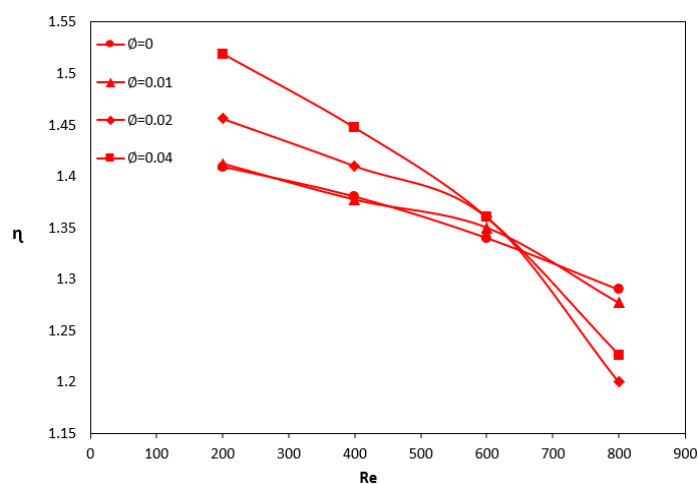
شکل ۱۰- عددناسلت نانوسیال آب-مس برحسب عدد رینولدز در چاه حرارتی با آرایش مثلثی در سطح مقطع دایره با کسرهای حجمی ۰/۰۱ و ۰/۰۲، ۰/۰۴



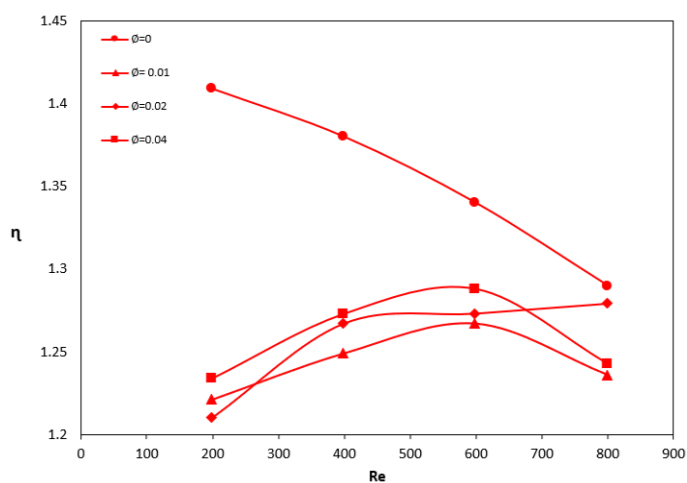
شکل ۱۱- عددناسلت نانوسیال هیبریدی آب-اکسید آلومینیوم-مس برحسب عدد رینولدز در چاه حرارتی با کسر حجمی ۰/۰۱ و ۰/۰۲، ۰/۰۴



شکل ۱۲- ضریب عملکرد حرارتی نانوسیال آب-اکسید آلومینیوم برحسب عدد رینولدز در چاه حرارتی با کسر حجمی ۰/۰۴، ۰/۰۲ و ۰/۰۱



شکل ۱۳- ضریب عملکرد حرارتی نانوسیال آب-مس برحسب عدد رینولدز در چاه حرارتی با کسر حجمی ۰/۰۴، ۰/۰۲ و ۰/۰۱



شکل ۱۴- ضریب عملکرد حرارتی نانوسیال آب-اکسید آلومینیوم-مس برحسب عدد رینولدز در چاه حرارتی با کسر حجمی ۰/۰۴، ۰/۰۲ و ۰/۰۱

۰/۰۱

مس در کسرهای حجمی ۰/۰۴، ۰/۰۲ و ۰/۰۱ باعث کاهش این بازدهی می‌شود.

۷- نتیجه گیری

باتوجه به شکل‌های ۶ تا شکل ۱۴ نانوسیال آب- مس تاثیر بهتری نسبت به نانوسیال آب- اکسید آلومینیوم و نانوسیال هیبریدی آب- اکسید آلومینیوم- مس بر روی انتقال حرارت داشته است.

مس و همچنین نانوسیال هیبریدی آب-اکسید آلومینیوم-مس در کسرهای حجمی ۰/۰۴، ۰/۰۲ و ۰/۰۱ با آب خالص مقایسه شده است. همانگونه که در شکل ۱۲ مشاهده می‌شود، نانوسیال آب-اکسید آلومینیوم اثر مطلوبی بر روی ضریب عملکرد حرارتی نداشته است و در کسر حجمی ۰/۰۴ حدود ۵/۸۲٪ الی ۹/۲۲٪ این بازدهی را کاهش می‌دهد. اما مطابق شکل ۱۳ نانوسیال آب-مس اثر بهتری بر روی ضریب عملکرد حرارتی داشته است و در کسر حجمی ۰/۰۴ حدود ۱/۴۹٪ الی ۷/۸۸٪ این بازدهی را افزایش می‌دهد. همچنین مطابق شکل ۱۴ نانوسیال هیبریدی آب-اکسید آلومینیوم-

مراجع

1. Esfe, M. H., Esfandeh, S., and Kamyab, M. H., *History and Introduction, Hybrid Nanofluids for Convection Heat Transfer*, Elsevier, pp. 1-48, 2020.
2. Bhandari, P., and Prajapati, Y. K., "Thermal Performance of Open Microchannel Heat Sink with Variable Pin Fin Height", *International Journal of Thermal Sciences*, Vol. 159, p. 106609, 2021
3. Lee, S., Choi, S.S., Li, S.A., and Eastman, J.A., *Measuring Thermal Conductivity of Fluids Containing Oxide Nanoparticles*, pp. 280-289, 1999.
4. Xie, H., Wang, J., Xi, T., Liu, Y., Ai, F., and Wu, Q., "Thermal conductivity Enhancement of Suspensions Containing Nanosized Alumina Particles" *Journal of Applied Physics*, Vol. 91, pp. 4568-4572, 2002.
5. Wen, D., and Ding, Y., "Experimental Investigation Into Convective Heat Transfer of Nanofluids at the Entrance Region under Laminar Flow Conditions", *International journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 47, No. 24, pp. 5181-5188, 2004.
6. Murshed, S., Leong, K., and Yang, C., "Enhanced Thermal Conductivity of TiO₂-water Based Nanofluids", *International Journal of Thermal Sciences*, Vol. 44, No. 4, pp. 367-373, 2005.
7. Jang, S. P., and Choi, S. U., "Cooling Performance of a Microchannel Heat Sink with Nanofluids", *Applied Thermal Engineering*, Vol. 26, No. 17-18, pp. 2457-2463, 2006.
8. Polidori, G., Fohanno, S., and Nguyen, C., "A note on heat transfer modelling of Newtonian nanofluids in laminar free convection", *International Journal of Thermal Sciences*, Vol. 46, No. 8, pp. 739-744, 2007.
9. Ho, C. J., Wei, L., and Li, Z., "An Experimental Investigation of Forced Convective Cooling Performance of a Microchannel Heat Sink with Al₂O₃/water Nanofluid", *Applied Thermal Engineering*, Vol. 30, No. 2-3, pp. 96-103, 2010.
10. Chandrasekar, M., and Suresh, S., "Experiments to Explore the Mechanisms of Heat Transfer in Nanocrystalline Alumina/Water Nanofluid Under Laminar and Turbulent Flow Conditions", *Experimental Heat Transfer*, Vol. 24, No. 3, pp. 234-256, 2011.
11. Anoop, K., Sadr, R., Yu, J., Kang, S., Jeon, S., and Banerjee, D., "Experimental Study of Forced Convective Heat Transfer of Nanofluids in a Microchannel", *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol. 39, No. 9, pp.1325-1330, 2012.
12. Jeong, J., Li, C., Kwon, Y., Lee, J. K., Kim, S. T., Yun, R., "Particle SHAPE Effect on the Viscosity and Thermal Conductivity of ZnO Nanofluids", *International journal of Refrigeration*, Vol. 36, No. 8, pp. 2233-2241, 2013.

13. Khoshvaght-Aliabadi, M., and Sahamiyan, M., "Performance of Nanofluid Flow in Corrugated Minichannels Heat Sink (CMCHS)", *Energy Conversion and Management*, Vol. 108, pp. 297-308, 2016.
14. Mehryan, S., Kashkooli, F. M., Ghalambaz, M., Chamkha, A. J., "Free Convection of Hybrid Al₂O₃-Cu Water Nanofluid in a differentially Heated Porous Cavity", *Advanced Powder Technology*, Vol. 28, No. 9, pp. 2295-2305, 2017.
15. Thakre, S., Pandhare, A., Malwe, P., Gupta, N., Kothare, C., Magade, P., Patel, A., Meena, R., Veza, I., Natrayan L. and Panchal, H., "Heat transfer and Pressure Drop Analysis of a Microchannel Heat Sink Using Nanofluids for Energy Applications", *Kerntechnik*, Vol.88, No. 5, pp. 543-555, 2023.
16. Incropera, F.P., DeWitt, D.P., Bergman, T.L., and Lavine, A., *Principles of heat and Mass Transfer*, John Wiley & Sons, 2013.
17. Kadhim, H. T., Jabbar, F. A., and Rona, A., "Cu-Al₂O₃ Hybrid Nanofluid Natural Convection in an Inclined Enclosure with Wavy Walls Partially Layered by Porous Medium", *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 186, pp. 105889, 2020.
18. Pak, B. C., and Cho, Y. I., "Hydrodynamic and Heat Transfer Study of Dispersed Fluids with Submicron Metallic Oxide Particles", *Experimental Heat Transfer* *an International Journal*, Vol. 11, No. 2, pp. 151-170, 1998.
19. Xuan, Y., and Roetzel, W., "Conceptions for Heat Transfer Correlation of Nanofluids" *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 43, No. 19, pp. 3701-3707, 2000.
20. Brinkman, H. C., "The Viscosity of Concentrated Suspensions and Solutions" *The Journal of Chemical Physics*, Vol. 20, No. 4, pp. 571-571, 1952.
21. Maxwell, J. C., *A Treatise ON Electricity and Magnetism: Pt. III. Magnetism. pt. IV. Electromagnetism*, Vol. 2, Clarendon press, 1881.
22. Maradiya, C., Vadher, J., and Agarwal, R., "The Heat Transfer Enhancement Techniques and Their Thermal Performance Factor" *Beni-Suef University Journal of Basic and Applied Sciences*, Vol. 7, No. 1, pp. 1-21, 2018.
23. Wang, Y., Zhu, K., Cui, Z., and Wei, J., "Effects of the location of the inlet and outlet on heat transfer performance in pin fin CPU heat sink" *Applied Thermal Engineering*, 2019. 151: p. 506-513.
24. Yadav, V., Baghel, K., Kumar, R., and Kadam S.T., "Numerical Investigation Of Heat Transfer In Extended Surface Microchannels", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 93, pp. 612-622, 2016.