

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

احمدرضا رحمتی^{۱*} و حامد نوروزی^۲

۱- دانشیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه کاشان، کاشان

۲- کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه کاشان، کاشان

چکیده - در سال‌های اخیر مطالعات زیادی پیرامون چاه گرمایی میکروکانالی انجام شده است. چاه گرمایی میکروکانالی حرارت را از تجهیزات جذب می‌کند و با بیشینه نمودن سطح تماس با سیال اطرافش، حرارت را به آن سیال منتقل می‌کنند. در کار حاضر به شبیه سازی سه بعدی جریان آب، نانوسیال و نانوسیال هیبریدی در یک چاه گرمایی با فین های با آرایش مثلثی و سطح مقطع دایره با ارتفاع ۱.۵ میلی متر و شارحرارتی یکنواخت پرداخته می شود. شبیه سازی به کمک نرم افزار تجاری انسیس فلوئنت 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 ۰/۰۴-۰/۰۲-۰/۰۱ مورد بررسی می‌گیرد. در این تحقیق 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.

Investigation of the Effect of Changing the Type of Fluid on the Hydrodynamic and Thermal Characteristics of the Flow in a Thermal Micro-Heatsink

A. R. Rahmati* and H. noroozi

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

Abstract: In recent years many studies have been done on the field of microchannels' sinks. The microchannel sink absorbs heat from other equipment and transfers it to the fluid by maximising 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 commercial Ansys fluent software. In the simulation process the constant and uniform heat flux boundary condition

*: مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: ar_rahmati@kashanu.ac.ir

has been applied to the bottom of the heat sink's wall. The influence of variables like the nanoparticles volume fraction, nanoparticles types and Reynolds values on the hydrodynamic performance and heat sink will be checked out. 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 in the first step pressure drops and heat transfer will be examined and after that the best nanofluid will be defined by consider coefficient of thermal performance. The simulations show that the heat transfer decrease with increasing volume fraction in the water-aluminium oxide nanofluid but in the other hand, the heat transfer increase with raising the volume fraction in the water-copper nanofluid. Also in the water-oxide aluminium-copper hybrid nanofluid the heat transfer rise up in the 0.04 volume fraction in range of 400 and above values for Reynolds.

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

فهرست علائم

A	مساحت	k	هدایت حرارتی (W/m ² K)
D_h	قطر هیدرولیکی	ρ	چگالی (kg/m ³)
f	ضریب اصطکاک داری و یسباخ	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

انتقال حرارت اضافه کردن ذرات با ابعاد نانو به سیال پایه می باشد. قطر ذرات مورد استفاده در نانو سیالات از ۱ نانومتر تا ۱۰۰ نانومتر می باشد. 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 می روند 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 می شوند که این پارامتر یکی از پارامترهای مهم انتقال حرارت محسوب می شود. همچنین استفاده از نانو سیالات هیبریدی در سال های اخیر مورد توجه بسیاری از پژوهشگران قرار گرفته است. نانو سیالات هیبریدی دسته جدیدی از سیالات عامل مورد استفاده

در طی چهار دهه گذشته، افزایش انتقال حرارت هم زمان 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 روش های انتقال حرارت، میکروکانال های تبادل انتقال حرارت و انتقال جرم مطلوب به نظر می رسند. میکروکانال ها میتوانند جریان را به خوبی در میان کانال ها تقسیم نمایند و طول مسیر جریان را کاهش دهند همچنین جریان آرام را به شکلی در کانال ها تثبیت نمایند که ضرایب انتقال حرارت بالایی حاصل گردد. همچنین یکی دیگر از راه های افزایش

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

تا ۱۵۰ کیلووات بر متر مربع برای گرم کردن میکرو کانال تامین می‌شود، همچنین سیال خنک کننده آب می‌باشد. 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 باله‌های 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 چاه‌حرارتی با ارتفاع باله ۱/۵ میلی‌متر حدود ۷۵ تا ۸۰ درصد عملکرد حرارتی بهتری نسبت به چاه‌حرارتی با ارتفاع باله ۲ میلی‌متر دارد و همچنین سرعت انتقال حرارت آن ۵ تا ۱۰ درصد بیشتر است.

لی و همکاران [۳] اثر تغییرات دما و غلظت را روی ضریب هدایت حرارتی نانوسیالات شامل نانوذرات اکسید مس (۲۹ نانومتری) و اکسید آلومینیوم (۳۶ نانومتری) 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 نانوسیالات دارند. به عنوان مثال با افزایش دما از ۲۷ درجه سلسیوس تا ۳۴ درجه

هستند. نانوسیالات 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 نانوذرات جامد که برای تهیه نانوسیال هیبریدی استفاده می‌شوند. هر نانوذره‌ای دارای خواص مخصوص به خود را دارد. به عنوان مثال، نانوذرات اکسید فلز مانند اکسید آلومینیوم، که پس از اضافه شدن به سیال پایه، ثبات و نفوذ شیمیایی قابل توجهی را از خود نشان می‌دهند بنابراین گزینه مناسبی برای بهبود خواص حرارتی مانند هدایت حرارتی نمی‌باشند. این درحالی است که نانوذرات فلزی مانند آلومینیوم، نقره و مس خواص حرارتی را به طرز قابل توجهی بهبود می‌بخشند، اما این فلزات گزینه مناسبی برای دستیابی به نانوسیال پایدار نیستند. به همین خاطر با ترکیب نانوذرات فلز با نانوذرات اکسید فلز و نانوذرات سرامیک، یک محلول 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 همکارش [۲] به بررسی عددی ویژگی‌های انتقال حرارت و جریان سیال در چاه‌حرارتی با باله‌های 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

سلسیوس در نانوسیال آب - اکسید آلومینیوم، ضریب هدایت حرارتی ۳ برابر شد.

ژی و همکارانش [۴] برای اولین بار تاثیر شکل نانو ذرات را در هدایت حرارتی نانوسیال 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، نانوسیال اکسید آلومینیوم - آب را بررسی کردند. نتایج آن‌ها نشان داد عدد ناسلت در کسر حجمی ۱/۶ درصد حدود ۳۸ درصد افزایش می‌یابد.

مارشد 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 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 خنک کاری 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 کانال مستطیل شکل موازی به طول ۵ 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.

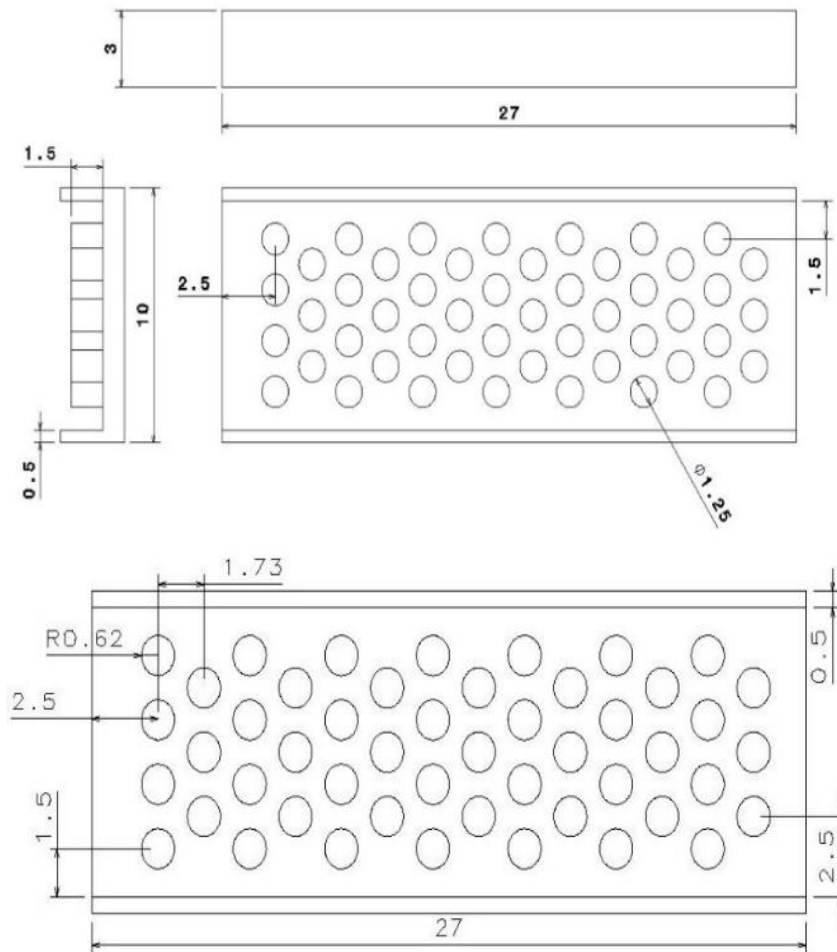
چاندر سکر و همکاران [۱۰] انتقال حرارت درون لوله‌ای با دیواره حرارتی ثابت در جریان کاملاً توسعه یافته آرام و درهم با نانو سیال آب-اکسید آلومینیوم را مورد بررسی و پژوهش قرار دادند. نتایج آن‌ها نشان داد که حرکت نانو ذره در طول گردابه‌ها در ناحیه درهم مکانیزم نفوذ در زیر لایه آرام، دلیل افزایش انتقال حرارت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

انوپ و همکاران [۱۱] اثر نرخ جریان بر انتقال حرارت جابه جایی 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 ۰/۲٪، ۰/۵٪ و ۱٪ استفاده کردند و نشان دادند که عملکرد حرارتی نانوسیال در نرخ جریان پایین تر، نسبت به 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 همکارانش [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. نتایج آن‌ها نشان داد که 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



شکل ۱- نمای کلی هندسه

سمت راست خارج می‌گردد. همچنین از کف این چاه حرارتی شار گرمایی یکنواختی به سیال وارد می‌شود. ابعاد و مشخصات این چاه حرارتی در **Error! Reference source not found.** آورده شده است.

محل اعمال شار حرارتی کف چاه گرمایی و معادل $150 (Kw/m^2)$ می‌باشد. شار حرارتی یکنواخت و به صورت عمودی و رو به بالا وارد می‌شود. سیال خنک کننده با عبور از موانع حرارت تولید شده را می‌زداید

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° درجه کلون می‌باشد. لذا خواص ترموفیزیکی سیال پایه و ذرات

نانوسیال‌های هیبریدی بسیار بیشتر از نانوسیال‌های منفرد است. تاکر و همکارانش [۱۵] یک میکروچاه حرارتی را با استفاده از پنج نوع میکروکانال با سطح مقطع‌های مختلف (مثلی، مستطیلی، دوزنقه‌ای، نیم دایره و دایروی) با استفاده از نانوسیال آب-اکسید آلومینیوم در محدود رینولدز 22° تا 55° 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 مثلی کمترین عملکرد انتقال حرارت را دارد.

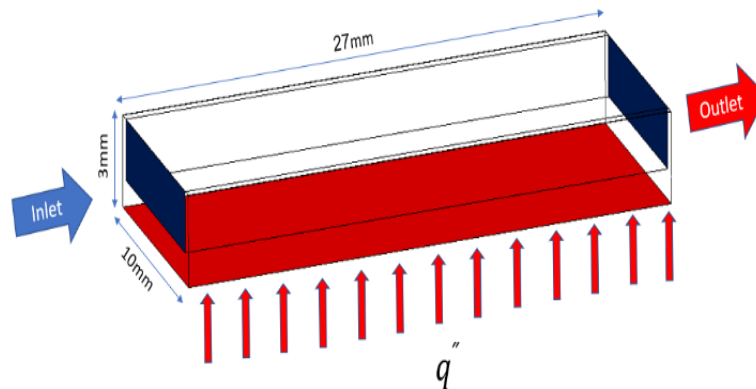
۲- هندسه مسئله

هندسه مسئله از یک چاه حرارتی همراه با موانع بین شکل با سطح مقطع دایروی می‌باشد که جریان سیال از سمت چپ وارد و از

نانوسیال در جدول ۳ آورده شده است.

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·k))	۷۶۵	۳۸۵	۴۱۸۲
۴	ضریب لزجت دینامیکی (μ (kg/ms))	-	-	۰/۰۰۱۰۰۳

۳- اخواص حرارتی سیال پایه

خواص حرارتی سیال تابع دما می باشد. برای محاسبه چگالی، ظرفیت گرمایی ویژه، ضریب هدایت حرارتی و ضریب لزجت

آب مایع تک فاز به عنوان سیال پایه انتخاب شده است.

دینامیکی از روابط ۱، ۲، ۳ و ۴ که تابعی از دما هستند می توان استفاده کرد [۲].

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

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

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

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

$$\times \left[\frac{(\phi_{Al_2O_3} K_{Al_2O_3} + \phi_{Cu} K_{Cu})}{\phi} + \right.$$

$$\left. 2K_{bf} - (\phi_{Al_2O_3} K_{Al_2O_3} + \phi_{Cu} K_{Cu}) + \phi K_{bf} \right]^{-1}$$

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:

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

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].

$$\nabla \cdot (\rho \bar{u}) = 0 \quad \text{معادله بقای جرم: (۱۳)}$$

$$\nabla \cdot (\rho \bar{u} \cdot \nabla \bar{u}) = -\nabla p \quad \text{معادله تراز مومنتم}$$

$$+\nabla \cdot \mu \left[\left(\nabla \bar{u} + \nabla \bar{u}^t \right) - 2/3 \nabla \cdot \bar{u} \right] + \rho \bar{g} \quad \text{خطی: (۱۴)}$$

$$\nabla \cdot (\rho c_p (\bar{u} \nabla T)) = \nabla \cdot (K \nabla T) \quad \text{معادله بقای انرژی: (۱۵)}$$

در معادلات فوق، u ماتریس سرعت، P فشار و T دما است. برای بستر جامد، معادله پیوستگی به $u=0$ ساده شده است و

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

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

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

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

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

۳-۲- خواص حرارتی نانوسیال

برای محاسبه چگالی در نانوسیالات معمولاً 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.

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

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

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

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

۳-۲- خواص حرارتی نانوسیال هیبریدی

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

معادله انرژی تبدیل می شود به:

$$k_s \nabla^2 T = 0$$

۴- روش حل عددی و محاسبه نتایج

برای حل این مسئله از نرم افزار انسیس فلونت ۱۹ استفاده شده است. پس از تولید هندسه، شبکه بندی و ارزیابی بر روی آن انجام می گیرد. سپس با اعمال شرایط ورود، خروج، شرایط مرزی حرارتی و آدیاباتیک و روابط سیال پایه و نانوسیال شبیه سازی کامل می شود. 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 می شود [۲].

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

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

در رابطه ۱۶ بالا q_{eff} شار حرارتی موثر می باشد که مطابق رابطه ۱۸ محاسبه می گردد. $T_{bulk,l}$ 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 چاه حرارتی وجود دارد، D_h قطر هیدرولیکی پلنوم ورودی که مطابق رابطه ۱۹ محاسبه می گردد، k ضریب هدایت حرارتی سیال، A_{bw} و A_{cw} به ترتیب سطح دیواره پایین چاه حرارتی و سطح تماس مایع جامد می باشد [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 می گردد.

$$Re = \frac{\rho_l U_{in} D_h}{\mu_l} \quad (20)$$

افت فشار یکی از مهم ترین پارامترهای جریان های داخلی است، زیرا که به وسیله ی آن توان مورد نیاز پمپ یا فن تعیین می گردد. برای تعیین افت فشار از ضریب اصطکاک مودی استفاده می شود. این ضریب به صورت بی بعد می باشد و مطابق رابطه ۲۱

محاسبه می شود [۲۲].

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

در این رابطه f ضریب اصطکاک داری و L طول چاه حرارتی می باشد. پس از محاسبه عدد ناسلت و افت فشارها مطابق فرمول های بالا می توانیم ضریب عملکرد حرارتی را محاسبه کنیم.

۴-۱- ضریب عملکرد حرارتی

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

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

که در آن به ترتیب Nu^* و f^* عدد ناسلت و افت فشار چاه حرارتی همراه با مانع و Nu و f عدد ناسلت و افت فشار چاه حرارتی بدون مانع می باشد.

۴-۲- فرضیات حل مسئله

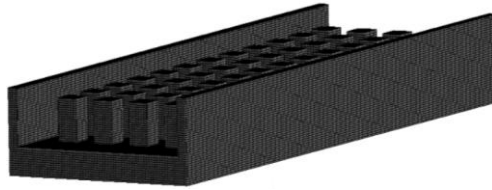
مانند هر پژوهش عددی دیگری، در این پژوهش نیز فرضیاتی صورت گرفته است که در زیر به آنها اشاره شده است:

۱. مایع نیوتونی و غیر قابل فشردگی
۲. جریان آرام و پایا
۳. شرایط مرزی بدون لغزش در سطح دیوار
۴. خواص حرارتی-فیزیکی بستر مس ثابت می ماند
۵. دیواره خارجی شرایط آدیاباتیک را نگه می دارد

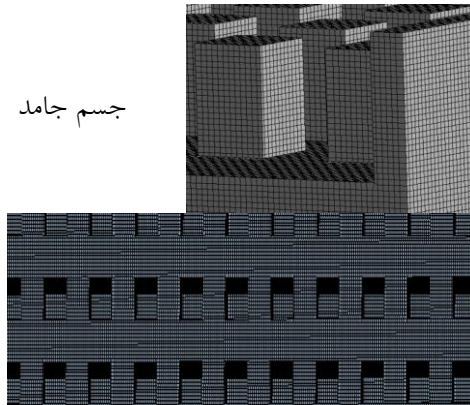
۴-۳- شرایط مرزی

شار حرارتی یکنواختی در سطح پایین چاه حرارتی وارد می شود. دیواره های خارجی باقی مانده دارای شرایط مرزی آدیاباتیک هستند. ورودی میکروکانال با مشخصات سرعت یکنواخت و مقدار ثابت دمای خنک کننده $300^\circ K$ می باشد. از شرط مرز فشار در خروجی کانال استفاده می شود که در آن مقدار فشار معادل شرایط اتمسفر همچنان ادامه دارد. از آنجا که حداکثر

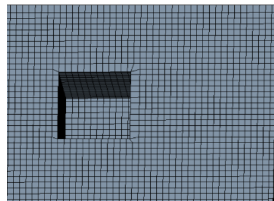
مقدار عدد رینولدز ۸۰۰ می‌باشد، بنابراین شبیه سازی فقط برای



جسم جامد



سیال



شکل ۳- نمایی از شبکه بندی چاه حرارتی

حرکت و انرژی مطابق با معیار همگرایی در پژوهش بهندری و پراجاپاتی [۲] در نظر گرفته شده است.

برای معادله پیوستگی 10^{-4}

برای معادله حرکت 10^{-6}

برای معادله انرژی 10^{-7}

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.

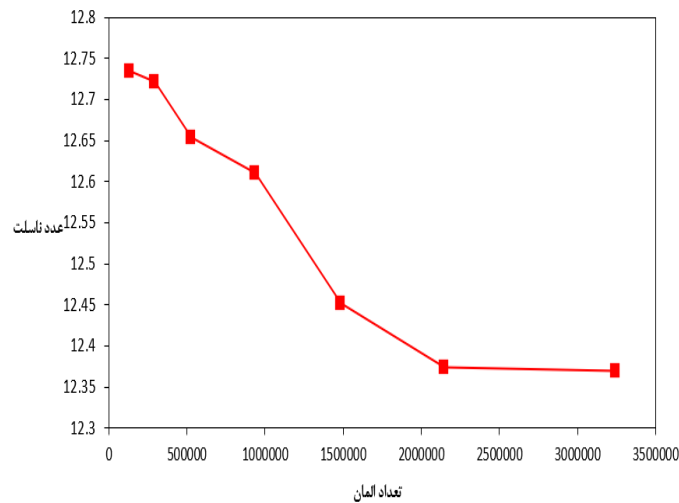
جریان آرام انجام شده است. از طرح بالادست مرتبه دوم (آپویند مرتبه دوم) برای گسسته سازی معادلات حرکت و انرژی استفاده شد. الگوریتم ساده برای حل اتصال سرعت فشار اجرا شد. سیستم حاصل از معادلات جبری با استفاده از روش تکرار شونده گاوس- سیدل حل شده است. منطقه جامد چاه حرارتی انتقال حرارت را حفظ می کند، در حالی 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،

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



شکل ۴- استقلال نتایج از شبکه

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

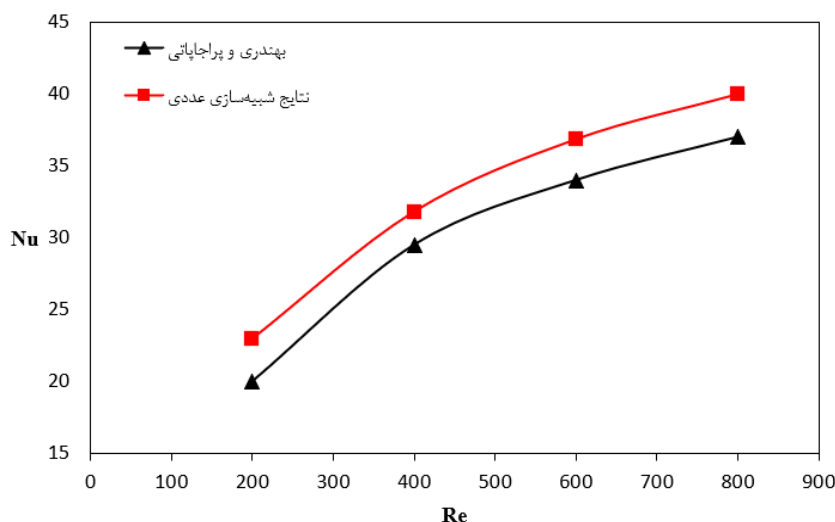
ردیف	اندازه شبکه (میلی متر)	تعداد شبکه	عدد نسلت
۱	۰/۲	۱۳۶۰۰۰	۱۲/۷۳۴
۲	۰/۱۵	۲۹۳۰۴۰	۱۲/۷۲۱
۳	۰/۱۲	۵۲۷۵۹۰	۱۲/۶۵۴
۴	۰/۱	۹۳۸۷۴۴	۱۲/۶۱۱
۵	۰/۰۸۵	۱۴۸۷۷۲۱	۱۲/۴۵۲
۶	۰/۰۷۵	۲۱۵۰۰۲۰	۱۲/۳۷
۷	۰/۰۶۵	۳۲۴۵۶۶۴	۱۲/۳۷

(چاه حرارتی با ابعاد $27 \times 10 \times 3$ 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 نسلت شبیه سازی به طور میانگین حدود $9/6\%$ بیشتر از نتایج بهندری و پراجاپاتی [۲] می باشد. 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.

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 و آورده شده است. براساس زمان محاسبات و دقت حل، شبکه ای سازمان یافته کارترین مکعبی با سایز $0/075$ میلی متر با تعداد شبکه 2150020 به عنوان شبکه بهینه انتخاب شده است.

۲-۵- اعتبارسنجی

پس از شبکه بندی و تعیین اندازه شبکه، با اعمال شرایط مرزی و روابط خواص سیال در نرم افزار، شبیه سازی برای مدل



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

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

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

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

نانوسیال آب-اکسید آلومینیوم و آب-مس و همچنین یک نوع نانوسیال هیبریدی آب-اکسید آلومینیوم-مس در سه نوع کسر حجمی ۰/۰۴-۰/۰۲-۰/۰۱ و چهار عدد رینولدز ۶۰۰-۸۰۰-۴۰۰ 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 ۰/۰۴-۰/۰۲-۰/۰۱ 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

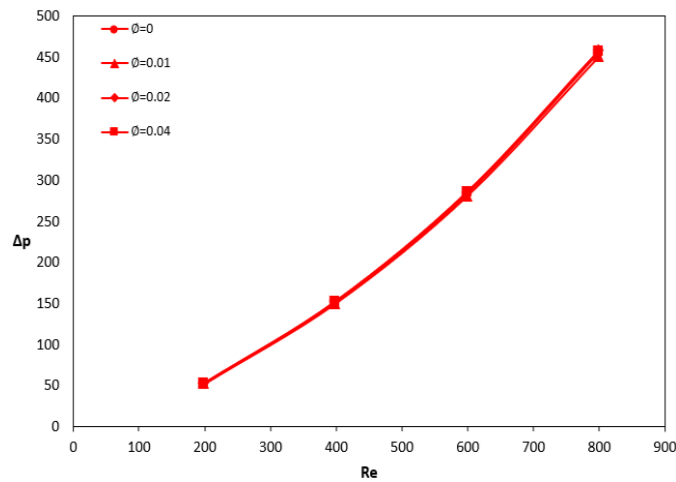
۶-۲- بررسی عدد ناسلت در نانوسیال و نانوسیال هیبریدی در

چاه‌حرارتی با کسرهای حجمی مختلف

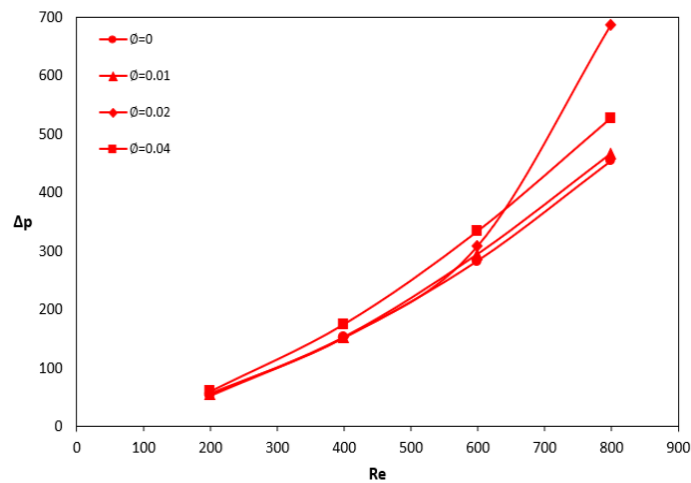
عدد ناسلت نانوسیال آب-اکسید آلومینیوم، آب-مس و همچنین نانوسیال هیبریدی آب-اکسید آلومینیوم-مس در کسرهای حجمی ۰/۰۴-۰/۰۲-۰/۰۱ با آب خالص مقایسه شده است. نتایج نشان می‌دهد که مطابق شکل ۹ نانوسیال آب-

همچنین مطابق شکل ۱۰ نانوسیال آب-مس تاثیر خوبی بر روی عدد ناسلت داشته است که چشم گیرترین آن در کسر حجمی

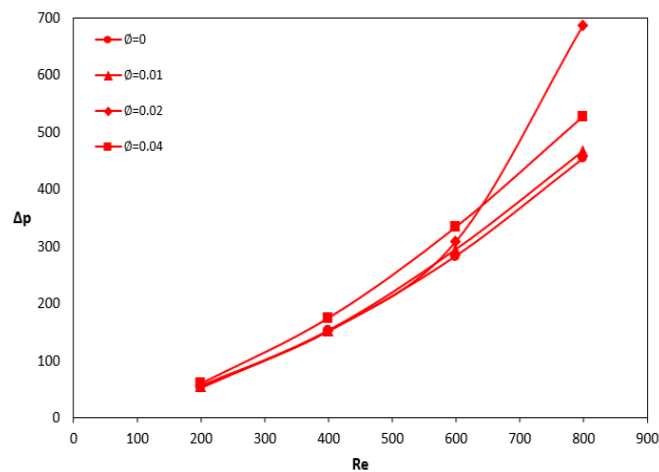
اکسید آلومینیوم تاثیر مثبتی بر روی عدد ناسلت داشته است و در کسر حجمی ۰/۰۴ حدود ۲/۳٪ عدد ناسلت را افزایش می دهد



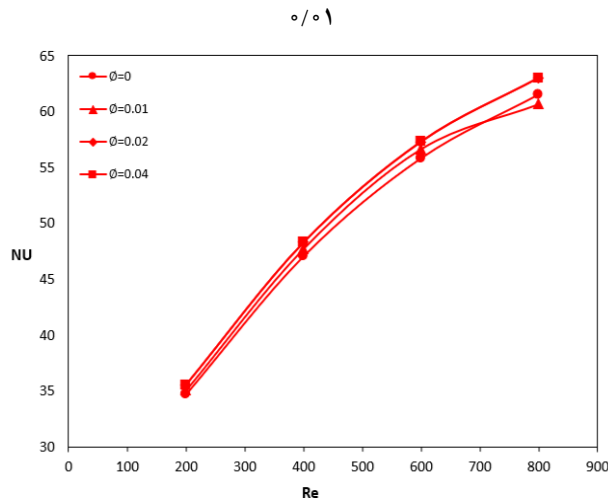
شکل ۶- افت فشار نانوسیال آب-اکسید آلومینیوم بر حسب عدد رینولدز در چاه حرارتی با کسرهای حجمی ۰/۰۱-۰/۰۲-۰/۰۴



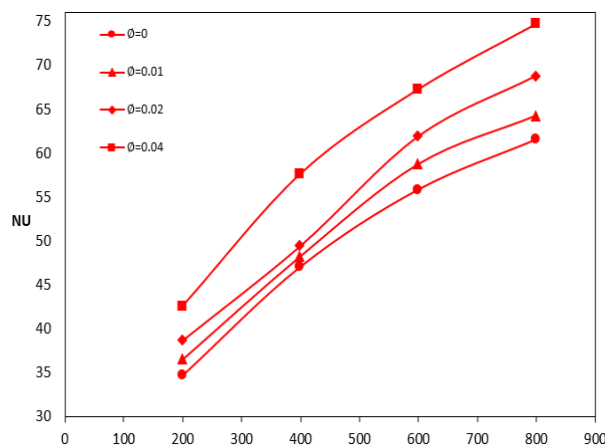
شکل ۷- افت فشار نانوسیال آب-مس بر حسب عدد رینولدز در چاه حرارتی با کسرهای حجمی ۰/۰۱-۰/۰۲-۰/۰۴



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



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



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

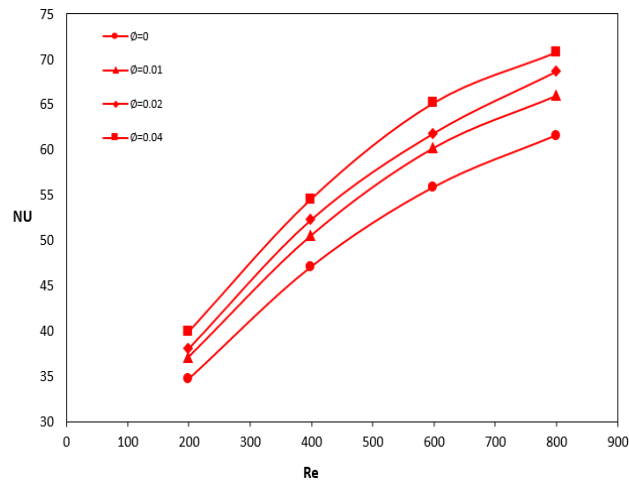
۰/۰۴-۰/۰۲-۰/۰۱

ضریب عملکرد حرارتی نانوسیال آب-اکسید آلومینیوم، آب-مس و همچنین نانوسیال هیبریدی آب-اکسید آلومینیوم-مس در کسرهای حجمی ۰/۰۴-۰/۰۲-۰/۰۱ با آب خالص مقایسه شده است. همانگونه که در شکل ۱۲ مشاهده می شود 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 می دهد. اما مطابق شکل ۱۳ نانوسیال آب-مس اثر بهتری بر روی ضریب عملکرد حرارتی داشته است و

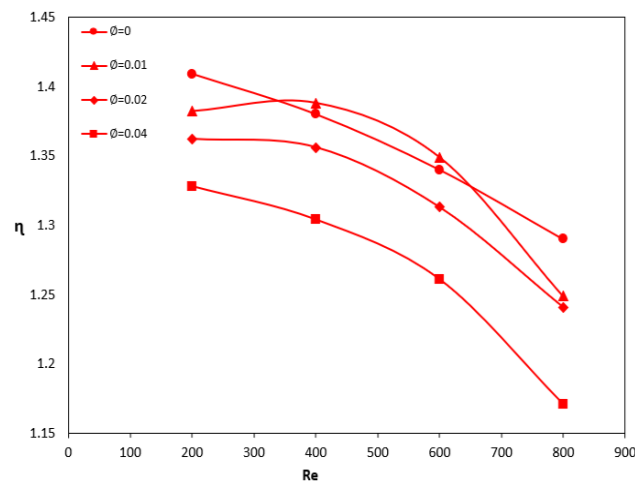
۰/۰۴ می باشد که ۲۲.۴۲٪ عددناسلت را افزایش می دهد و نیز مطابق شکل ۱۱ نانوسیال هیبریدی آب-اکسید آلومینیوم-مس تاثیر نسبتا خوبی بر روی عدد ناسلت داشته است که چشم گیرترین آن در کسر حجمی ۰/۰۴ می باشد و حدود ۱۵٪ عددناسلت را افزایش می دهد.

۳-۶- بررسی ضریب عملکرد حرارتی در نانوسیال و نانوسیال هیبریدی در چاه حرارتی با کسرهای حجمی مختلف

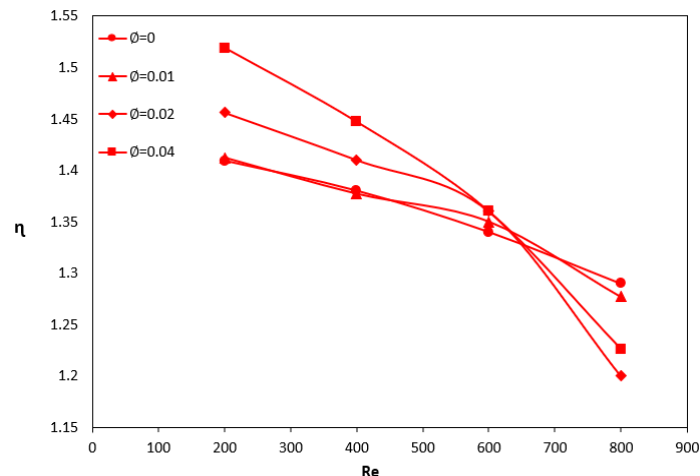
در کسر حجمی ۰/۰۴ حدود ۱/۴۹٪ الی ۷/۸۸٪ این بازدهی را آب-اکسید آلومینیوم-مس در کسرهای حجمی ۰/۰۴-۰/۰۲- افزایش می‌دهد. همچنین مطابق شکل ۱۴ نانوسیال هیبریدی ۰/۰۱ باعث کاهش این بازدهی می‌شود.



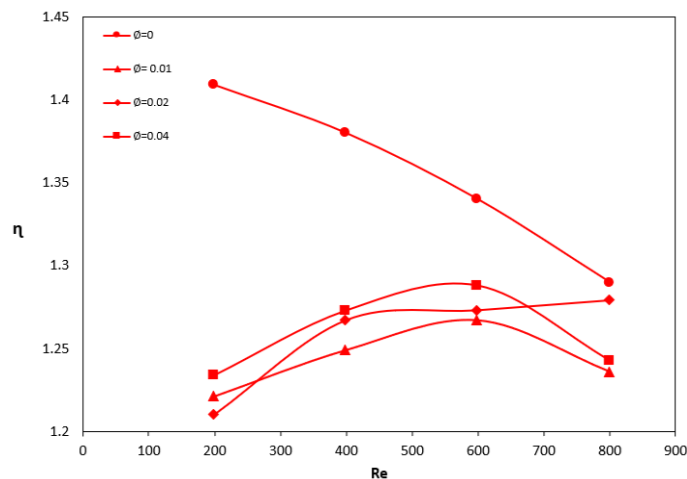
شکل ۱۱- عددناسلت نانوسیال هیبریدی آب-اکسید آلومینیوم-مس برحسب عدد رینولدز در چاه حرارتی با کسرهای حجمی ۰/۰۴-۰/۰۲- ۰/۰۱



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



شکل ۱۳- ضریب عملکرد حرارتی نانوسیال آب-مس برحسب عدد رینولدز درچاه حرارتی با کسرهای حجمی ۰/۰۱-۰/۰۲-۰/۰۴



شکل ۱۴- ضریب عملکرد حرارتی نانوسیال آب-اکسید آلومینیوم-مس برحسب عدد رینولدز درچاه حرارتی با کسرهای حجمی ۰/۰۱-۰/۰۲-۰/۰۴

۰/۰۱-۰/۰۲

بهتری نسبت به نانوسیال آب-اکسید آلومینیوم و نانوسیال هیبریدی آب-اکسید آلومینیوم-مس بر روی انتقال حرارت داشته است.

۷- نتیجه گیری

باتوجه به شکل ۶ الی شکل ۱۴ نانوسیال آب-مس تاثیر

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., et al., *Measuring Thermal Conductivity of Fluids Containing Oxide Nanoparticles*, 1999.
4. Xie, H., et al., "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., et al., "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., et al., "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. A., et al., "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. Shekhar Thakre , A.P., Prateek D. Malwe, "Heat transfer and Pressure Drop Analysis of a Microchannel Heat Sink Using Nanofluids for Energy Applications", *J*, Vol.?, No. ?, pp.?, 2023.
16. Bergman, T. L., et al., *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., et al., "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., et al., "Numerical Investigation Of Heat Transfer In Extended Surface Microchannels", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 93, pp. 612-622, 2016.