

Journal of Computational Methods in Engineering

Journal homepage: https://jcme.iut.ac.ir/

ISSN: 2228-7698



**Original Article** 

## 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\* D 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 raising 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.



Copyright © 2025 Isfahan University of Technology, Published by IUT press. This work is licensed under a Creative Commons Attribution-Noncommercial 4.0 International license (https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/). Non-commercial uses of the work are permitted, provided the original work is properly cited.



نشربه علمی ـ پروهنی انشربه علمی ـ پروهنی الله الله: //jcme.iut.ac.ir/ در مهندسی مفحه خانگی نشریه: //icme.iut.ac.ir منابع عددی در مهندسی مفحه خانگی نشریه: /۲۲۲۸–۲۲۲۲ شاپا: ۲۲۲۸–۲۲۲۲ شاپا الکترونیکی: ۲۴۲۹–۲۲۲۲

مقاله پژوهشی

بررسی اثر تغییر نوع سیال بر مشخصههای هیدرودینامیکی و حرارتی جريان در يک ميکروچاه حرارتي

احمدرضا رحمتی\*<sup>©</sup>و حامد نوروزی دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه کاشان، کاشان، ایران

چکیده- چاه گرمایی 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 فین-های با آرایش مثلثی و سطح مقطع دایره با ارتفاع ۱/۵میلیمتر و شارحرارتی یکنواخت پرداخته میشود. شبیهسازی 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 برروی عملکرد هیدرودینامیکی و حرارتی چاه حرارتی مورد بررسی قرار می گیرد. دو نوع نانوسیال و یک نوع نانو ذرات و عدد رینولدز برروی عملکرد هیدرودینامیکی و حرارتی مورد بررسی میگیرند. در ابتدا افت فشار و انتقال حرارت مورد بررسی قرار می گیرد سپس با تعریف ضریب عملکرد حرارتی بهترین نانوسیال مشخص میشود. شبیهسازیها نشان میدهد با افزایش کسر حجمی در نانوسیال آب- اکسیدآلومینیوم انتقال حرارت کاهش میابد اما در نانوسیال آب- مس با افزایش کسر حجمی انتقال حرارت افزایش مییابد. همچنین در نانوسیال هیبریدی آب ایسیال حرارت کاهش آلومینیوم - من در کسر حجمی ۲۰/۰ از بازه عدد رینولدز ۵۰۰ به بالا انتقال حرارت افزایش میابد.

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

دریافت مقاله: ۹-۹/۱۴۰۲، بازنگری: ۲-۴۰۳/۰۴/۰۱، پذیرش: ۱۴۰۳/۰۴/۱۸، اولین انتشار: ۱۴۰۳/۱۲/۲۲

\*: نويسنده مسئول، رايانامهar\_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 حیح به مقاله و با رعایت شرایط مندرج در آدرس زیر مجاز است:

Creative Commons Attribution-Noncommercial 4.0 International license (https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/).

А	مساحت	k	هدایت حرارتی (W/m°K)
$D_h$	قطرهيدروليكي	ρ	چگالی (kg/m <sup>3</sup> )
f	ضريب اصطكاك دارسي ويسباخ	μ	ضریب لزجت دینامیکی (kg/ms)
Nu	عدد ناسلت	$\eta$	ضريب عملكرد حرارتي
Р	فشار (Pa)	bw	سطح پایین
Re	عدد رينولدز	Bulk	حجم
u	بردار سرعت (m/s)	cw	همرفتي
Т	دما ( <sup>o</sup> K)	avg	ميانگين
L	طول (m)	in	ورودى
q"	شار گرمایی (W/m <sup>2</sup> )	р	نانو ذرات
с <sub>Р</sub>	ظرفیت گرمای ویژه $\left( { m J/kg^o K}  ight)$	s	جامد

#### فهرست علائم

#### ۱–مقدمه

در چهار دهه گذشته، افزایش انتقال حرارت همزمان با کاهش افت فشار، كاهش اندازه و حجم سيستم موضوعي است كه مورد یژوهش 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. درمیان روشهای انتقالحرارت، میکروکانالهای تبادل انتقالحرارت و انتقالجرم مطلوب به نظر میرسند. میکروکانال،ها میتوانند جریان را بهخوبی در میان کانال،ها تقسیم نمایند و طول مسیر جریان را کاهش دهند همچنین جریان آرام را به شکلی در کانالها تثبیت نمایند که ضرایب انتقالحرارت بالایی حاصل گردد. همچنین یکی دیگر از راههای افزایش انتقال حرارت اضافه كردن ذرات با ابعاد نانو به سيال پايه 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 وغيره يا اكسيد فلزي همچون ألومينيوم اكسيد، اكسيد مس و غيره 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 ضريب هدايتي شان با اضافه شدن به سيال پايه باعث افزايش

ضریب هدایت حرارتی سیال پایه می شوند که این پارامتر یکی از پارامترهای مهم انتقال حرارت محسوب می شود. همچنین استفاده از نانوسیالاتهیبریدی درسالهای اخیر مورد توجه بسیاری از پژوهشگران قرار گرفته است. نانوسیالاتهیبریدی دسته جدیدی از سیالات عامل مورد استفاده هستند. نانوسیالات هیبریدی با اضافه شدن دو یا سه ماده جامد به سیال پایه ای مانند آب، اتیلن گلیکول، مخلوط آب و اتیلن گلیکول، نفت سفید، روغن موتور، روغنهای گیاهی و روغن پارافین ایجاد می شوند. چندین مورد از نانوذرات جامد که برای تهییه نانوسیال هیبریدی استفاده می-شوند. 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 نیستند. این درحالی است که نانوذرات فلزي مانند آلومينيوم، نقره و مس خواص حرارتي را به طرز قابل توجهي بهبود ميبخشند، اما اين فلزات گزينه مناسبي برای دستیابی به نانوسیال پایدار نیستند. به همین خاطر با ترکیب نانوذرات فلز با نانوذرات اکسید فلز و نانوذراتسرامیک، یک

	ماره د.:	(* 11~
صريب (w/m K)	20 20 20 20 20 20 20 20 20 20 20 20 20 2	<u>u</u>
401	مس	حامدهاي فلزى
	آلومينيوم	
١۴٨	سيليكون	مراغ خراميا.
۴۰	اكسيدآلومينيوم	جامدهای عیر فلزی
VY/ <b>Y</b>	سديم	مايعات فلزي
۰/۶۱۳	آب	
۰/۲۵۳	اتيلن گلايكول	مايعات غيرفلزي
۰/۱۴۵	روغن صنعتى	

جدول ۱- ضریب رسانایی گرمایی فلزات ومایعات

محلول پایدار می توان بهدست آورد، در حالی که خواص حرارتی نیز بهبود یافته است [۱]. ضریب رسانایی گرمایی چند سیال و جامد را می توان در جدول ۱ مشاهده کرد.

در سال ۲۰۲۱ بهندری و پراجاپاتی [۲] به بررسی عددی ویژگی های 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 گرمکردن میکروکانال تامین مى شود، همچنين سيال خنك كننده آب است. تغيير ارتفاع باله باعث می شود که یک فضای بازی بین سطح بالایی باله و دیواره بالايي مخزن به وجود آيد. در اين مطالعه هفت نوع ارتفاع باله مختلف در محدوده ۵/۰ تا ۲ میلی متر هر بار با افزایش ارتفاع ۲۵/۰ میلیمتر، تجزیه و تحلیلهای صورت گرفته است. نتایج آنها نشان میدهد که افزایش ارتفاع باله باعث افزایش سرعت انتقال حرارت مي شود. اما اين افزايش فقط تا ارتفاع باله ١/٥ میلیمتر ادامه دارد و برای باله های ۱/۷۵ و ۲ میلیمتر شاهد اتلاف ظرفیت گرمایی بودهاند همچنین بالههای بین ۵/۰ تا ۱ میلی متر عملکرد حرارتی بسیار کمی دارند. در نهایت آن ها نشان دادند که چاهحرارتی با ارتفاع باله ۱/۵ میلیمتر حدود ۷۵ تا۸۰ درصد عملکرد حرارتی بهتری نسبت به چاه حرارتی 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 بهصورت 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 سلسیوس در نانوسیال آب – اکسید آلومینیوم، ضریب هدایت حرارتی سه برابر شد.

ژی و همکاران [۴] برای اولین بار تاثیر شکل نانو ذرات را در هدایت-رارتی نانوسیال سلیسیم کاربید مورد بررسی قرار دادند. در این آزمایش نانوذراتی به شکل کروی باقطر۲۶ نانومتر و استوانهای با قطر میانگین ۶۰۰ نانومتر استفاده کردند. نتایج آنها نشان داد که نسبت هدایت-رارتی 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

گرمایی به صورت غیر خطی تغییر میکند و زیاد می شود، همچنین قطر و شکل ذرات بر افزایش هدایت گرمایی اثر می گذارد. نتایج آن ها نشان داد که مطالعات و تلاش های بیشتری برای ایجاد یک مدل مناسب برای پیش بینی هدایت حرارتی نانوسیالات لازم است.

جانگ و چوی [۷] به صورت عددی نشان دادند که با اضافهکردن ذرات مس به سیال پایه آب یونیزه شده در یک جریان آرام و توسعهیافته 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 mm ۵۰ بود استفاده کردند. نتایج آنها نشان داد که ضریب انتقال حرارت در نانوسیال با غلظت حجمی ۱٪ نسبت به آب، حدودا ۷۰٪ افزایش یافته است.

چاندر سکر و سورش [۱۰] انتقال حرارت درون لولهای با دیواره حراراتی ثابت در جریان کاملا توسعهیافته آرام و درهم با نانو سیال آب-اکسیدآلومینیوم 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 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 می شود نسبت به زمانی که از ذراتی به شکل کروی استفاده می شود بیشتر است.

مروجی و همکاران [۱۳] به صورت عددی، ضریب انتقال حرارت جابجایی، افتفشار، 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.

تاکر و همکاران [۱۵] یک میکروچاه حرارتی را با استفاده از پنج نوع میکروکانال با سطح مقطعهای مختلف (مثلثی، مستطیلی، ذوزنقهای، نیم دایره و دایروی) با استفاده از نانوسیال آب– اکسیدآلومینیوم در محدود رینولدز ۲۲۰ تا ۵۵۰ را بررسی کردند . نتایج آنها نشان داد که میکروکانال با سطح مقطع دایروی بالاترین عملکرد در انتقالحرارت را داشته است و میکروکانال با سطح مقطح مثلثی کمترین عملکرد انتقالحرارت 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 می گردد. همچنین از کف این چاه حرارتی شار گرمایی یکنواختی به سیال وارد می شود. ابعاد و مشخصات این چاه حرارتی در جدول ۲ آمده است.



مقدار(میلیمتر)	پارامتر
۲۷	طول چاہحرارتی
١٠	عرض چاەحرارتى
٣	ارتفاع چاەحرارتى
• /۵	عرض ديوارەھاي جانبي
١	ضخامت ديواره كف
١/۵	ارتفاع موانع
٢	فاصله ورودي چاهحرارتي تا اولين پره
٢	فاصله خروجی چاہحرارتی تا آخرین پرہ
١	فاصله موانع از ديواره
١	فاصله موانع از يكديگر
• / • <b>\</b>	ضخامت كاور

جدول ۲- جزئیات هندسی مسئله



شکل ۲- نحوه اعمال شار حرارتی

[17 ,18]	سيال پايه	ِ ذرات و	خواص نانو	جدول ۳–
----------	-----------	----------	-----------	---------

آب(bf)	مس(Cu)	آلومينا (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	خواص	رديف
<b>٩٩</b> ٨/٢	۸۹۳۳	۳۹ <i>۷</i> •	چگالی (kg/m <sup>3</sup> )	١
•/9	401	۴۰	ضریب هدایت حرارتی (K(W/m°k	٢
4174	۳۸۵	V90	ظرفیت گرمای ویژه ( <sup>J</sup> /kg°k	٣
۰/۰۰۱۰۰ <b>۳</b>	_	-	ضریب لزجت دینامیکی (kg/ms	۴

محل اعمال شار حرارتی کف چاهگرمایی و معادل (*Kw/m<sup>2</sup>*) ۱۵۰ است. شارحرارتی یکنواخت و بهصورت 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 ۳۰۰ کلوین است. لذا خواص ترموفیزیکی سیال پایه و ذرات نانوسیال در جدول ۳ آمده است.

#### ۳-۱- خواص حرارتي سيال پايه

آب مایع تکفاز به عنوان سیالپایه 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].

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

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

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

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

روابط ارائه شده در محدوده دمایی K < T < ۳۶۸ K می-باشد.

#### ۳-۲- خواص حرارتی نانوسیال

برای محاسبه چگالی در نانوسیالات معمولا از رابطه پک و چو [۱۸]، برای ظرفیت گرمایی ویژه از رابطه ژوآن و روتزل [۱۹]، برای ویسکوزیته از رابطه برینکمن [۲۰] و برای هدایت حرارتی از رابطه ماکسول [۲۱] برای نانوسیالهای 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].

$$\nabla . \left( \rho \bar{\mathbf{u}} \right) = 0 \tag{17}$$

$$\nabla . \left( \rho \vec{u} . \nabla \vec{u} \right) = -\nabla p$$
  
+
$$\nabla . \mu \left[ \left( \nabla \vec{u} + \nabla \vec{u}^{T} \right) - 2/3 \nabla . \vec{u} \right] + \rho \vec{g}$$
(14)

$$\nabla \cdot \left(\rho c_{p}\left(\vec{u}\nabla T\right)\right) = \nabla \cdot \left(K \nabla T\right)$$
(10)

در معادلات فوق ، u ماتریس سرعت، P فشار و T دما است. برای بستر جامد، معادله پیوستگی به u=0 ساده شده است و معادله انرژی به <sub>ks</sub>∇<sup>2</sup>T=0 تبدیل میشود.

۴-روش حل عددی و محاسبه نتایج
برای حل این مسئله از نرم افزار انسیس فلوئنت ۱۹ استفاده

شده است. پس از تولید هندسه، شبکهبندی 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 شبیهسازی کامل می شود. برای شرط مرزی شارحرارتی ثابت ازنتایج به دست آمده ابتدا مطابق رابطه ۱۶ ضریب انتقال حرارت جابجایی و از رابطه ۱۷ عدد ناسلت محاسبه می شود [۲].

$$h = \frac{q_{eff}}{\left(T_{avg,cw} - T_{bulk,l}\right)}$$
(19)

$$Nu = \frac{hD_{h}}{K}$$
(1V)

۱۸ در رابطه ۱۶  $q_{eff}$  شار حرارتی موثر است که مطابق رابطه ۱۸ محاسبه می گردد.  $T_{avg,cw}$   $T_{avg,cw}$  محاسبه می گردد. 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

$$\rho_{\rm nf} = (1 - \phi) \rho_{\rm bf} + \phi \rho_{\rm p} \tag{(a)}$$

$$\left(\rho C_{p}\right)_{nf} = \left(1 - \phi\right) \left(\rho C_{p}\right)_{bf} + \phi \left(\rho C_{p}\right)_{p} \tag{9}$$

$$\mu_{\rm nf} = \frac{\mu_{\rm bf}}{\left(1 + f_{\rm p}\right)^{2/5}} \tag{V}$$

$$\mathbf{K}_{nf} = \mathbf{K}_{bf} \left[ \frac{\mathbf{K}_{p} + 2\mathbf{K}_{bf} - 2\phi \left(\mathbf{K}_{bf} - \mathbf{K}_{p}\right)}{\mathbf{K}_{p} + 2\mathbf{K}_{bf} + \phi \left(\mathbf{K}_{bf} - \mathbf{K}_{p}\right)} \right]$$
(A)

$$\rho_{\rm hnf} = (1-\phi)\rho_{\rm bf} + \phi_{\rm Al_2O_3}\rho_{\rm Al_2O_3} + \phi_{\rm Cu}\rho_{\rm Cu} \tag{4}$$

$$\left(\rho C_{p}\right)_{hnf} = (1-f)(\rho C_{p})_{bf} + f_{Al_2O_3}(\rho C_{p})_{Al_2O_3}$$

$$+ f_{Cu}(\rho C_{p})_{Cu}$$

$$(1 \circ)$$

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

#### 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 ۳۰۰ K است. 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 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 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، حرکت و انرژی مطابق با معیار همگرایی در پژوهش بهندری و پراجاپاتی[۲] برای معادله پیوستگی، <sup>۴-۱</sup>۰، برای معادله مومنتم، <sup>۶-۱</sup>۰، برای معادله انرژی، <sup>۷-۱</sup>۰، در نظر گرفته شده است.

$$q_{eff} = q \frac{A_{bw}}{A_{cw}}$$
(1A)

$$D_h = \frac{4A_c}{P} \tag{19}$$

عدد رینولدز نیز از رابطه ۲۰ محاسبه می گردد.

$$Re = \frac{\rho_l U_{in} D_h}{\mu_l} \tag{(Y \circ)}$$

افتفشار یکی از مهمترین پارامترهای جریانهای داخلی است، زیرا که بهوسیلهی آن توان مورد نیاز پمپ یا فن تعیین می گردد. برای تعیین افتفشار از ضریب اصطکاک مودی استفاده می شود. این ضریب به صورت بی بعد است و مطابق رابطه ۲۱ محاسبه می شود[۲۲].

$$f = \frac{2 \Delta P D_h}{\rho u^2 L}$$
(11)

f ضریب اصطکاک دارسی و L طول چاه حرارتی است. پس از محاسبه عددناسلت و افت فشارها مطابق روابط ۱۷ و ۲۱ می توان ضریب عملکرد حرارتی را محاسبه نمود.

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

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

### ۴-۲- فرضیات حل مسئله

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



#### ۵– شبکەبن*د*ی

در این پژوهش از نرمافزار انسیس مشینگ برای شبکهبندی چاه حرارتی استفاده شده است. در ادامه شبکهبندی مورد استفاده در دو حالت سیال و جامد در شکل ۳ ارائه شده است.

#### ۱–۵– استقلال نتایج از شبکه

به منظور دستیابی به تعداد شبکه بهینه برای محاسبه نتایج عددی قابل اعتماد، هندسه مورد نظر با استفاده از شبکههای 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، شبکهای سازمانیافته کارتزین مکعبی با اندازه ۷۵°/۰ میلی متر با تعداد شبکه ۲۱۵۰۰۲۰ به عنوان شبکه بهینه انتخاب شده است.

#### ۵–۲– اعتبار سنجي

پس از شبکهبندی و تعیین اندازه شبکه، با اعمال شرایط مرزی و روابط خواص سیال در نرم افزار، شبیهسازی برای مدل (چاه حرارتی با ابعاد ۲×۱۰×۲۷ میلی متر با موانعی با سطح مقطع مربع ۱×۱ میلی متر و ارتفاع ۱/۵ میلی متر) تکمیل می شود. به منظور اعتبار سنجی رویه عددی فعلی در چاه حرارتی، نتایج بد ست 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 ۹/۹٪ 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 چاهحرارتی با رینولدز ۲۰۰

عدد ناسلت	تعداد شبكه	اندازه شبكه(میلیمتر)	رديف
17/074	136000	۰ / ۲	١
17/71	793040	۰/۱۵	۲
17/804	۵۲۷۵۹ ۰	۰/۱۲	٣
17/811	9771744	۰ / ۱	۴
17/401	1440011	•/•AQ	۵
١٢/٣٧	7100070	•/•VQ	6
١٢/٣٧	2240554	•/• <i>9</i> D	٧



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

	عدد ناسلت (شبیهسازی عددی)	عدد ناسلت (بهندری و پراجاپاتی)	عدد رينولدز	رديف
	22/92	۲ ۰	7	١
	<b>m</b> 1/NA	۲٩/۵	400	۲
	٣٦/٨١	٣۴	9 • •	٣
	29/94	rv	$\wedge \circ \circ$	k

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



شکل ۶- افت فشار نانوسیال آب-اکسید آلومینیوم برحسب عدد رینولدز درچاهحرارتی با کسرهای حجمی ۴۰/۰-۲۰/۰۰ شکل ۶-

۶–نتايج

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 ۲۰۰۰، ۲۰/۰ و ۲۰/۰ 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 چاه حرارتی با کسرهای حجمی مختلف

افتفشار نانوسیال آب-اکسید آلومینیوم، آب-مس و همچنین نانوسیال هیبریدی آب-اکسید آلومینیوم-مس در کسرهای حجمی ۲۰/۰، ۲۰/۰ و ۲۰/۰ با آب خالص مقایسه شده است. نتایج نشان میدهد که مطابق شکل ۶ نانوسیال آب-

اکسید آلومینیوم تاثیری زیادی بر روی افت فشار نداشته است و حدود ۷۵/۰٪ افت فشار را افزایش می دهد و همچنین مطابق شکل ۷ نانوسیال آب-مس نیز افت فشار را افزایش می دهد به عنوان مثال در کسر حجمی ۵۰/۰ حدود ۱۶٪ افت فشار را افزایش می دهد و نیز مطابق شکل ۸ نانوسیال هیبریدی آب-اکسید آلومینیوم-مس در کسر حجمی ۵۰/۰ حدود ۸٪ افت فشار را افزایش می دهد.

# ۶-۲ بررسی عددناسلت در نانوسیال و نانوسیال هیبریدی در چاه حرارتی با کسرهای حجمی مختلف

عددناسلت نانوسیال آب⊣کسید آلومینیوم، آب– مس و همچنین نانوسیال هیبریدی آب⊣کسیدآلومینیوم– مس در کسرهای حجمی ۴۰/۰، ۲۰/۰ و ۱۰/۰ با آب خالص مقایسه شده



شکل ۷- افت فشار نانوسیال آب-مس برحسب عدد رینولدز درچاه حرارتی با کسرهای حجمی ۴۰/۰۰-۲۰/۰۰ م



شکل ۸- افت فشار نانوسیال هیبریدی آب-اکسید آلومینیوم-مس برحسب عددرینولدز در چاهحرارتی با کسرهای حجمی ۴۰/۰-۲۰/۰۰ شکل ۸

است. نتایج نشان میدهدکه مطابق شکل ۹ نانوسیال آب-اکسیدآلومینیوم تاثیر مثبتی بر روی عددناسلت داشته است و در کسر حجمی۴۰/۰ حدود ۲.۳٪ عددناسلت را افزایش میدهد همچنین مطابق شکل ۱۰ نانوسیال آب-مس تاثیر خوبی بر روی عدد ناسلت داشته است که چشم گیرترین آن در کسر حجمی ۴۰/است که ۲۲.۴۲٪ عددناسلت را افزایش میدهد و نیز مطابق شکل ۱۱ نانوسیال هیبریدی آب-اکسید آلومینیوم-مس تاثیر نسبتاً

خوبی بر روی عدد ناسلت داشته است که چشم گیرترین آن درکسر حجمی ۰۴/ ۱۹ست و حدود ۱۵٪ عددناسلت را افزایش میدهد.

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



شکل ۹- عددناسلت نانوسیال آب-اکسید آلومینیوم برحسب عددرینولدز در چاهحرارتی با کسرهای حجمی ۴۰/۰۰-۲۰/۰ ا



شکل ۱۰- عددناسلت نانوسیال آب-مس برحسب عددرینولدز در چاهحرارتی با آرایشمثلثی در سطح مقطع دایره با کسرهای حجمی ۴۰/۰، ۲۰/۰ و ۰/۱۱



شکل ۱۱– عددناسلت نانوسیال هیبریدی آب–اکسید آلومینیوم-مس برحسب عددرینولدز در چاهحرارتی با کسرحجمی ۴۰/۰، ۲۰/۰ و ۰۱/۰



شکل۱۲-ضریب عملکرد حرارتی نانوسیال آب-اکسید آلومینیوم برحسب عددرینولدز در چاهحرارتی با کسر حجمی ۴۰٪۰، ۲۰٪ و ۰۱٪



شکل ۱۳- ضریب عملکرد حرارتی نانوسیال آب-مس برحسب عددرینولدز در چاهحرارتی با کسر حجمی ۴۰/۰، ۲۰/۰ و ۰۱/۰



شکل ۱۴- ضریبعملکرد حرارتی نانوسیال آب-اکسیدآلومینیوم-مس برحسب عددرینولدز در چاهحرارتی با کسرحجمی ۴۰/۰، ۲۰/۰ و ۱۰/۰

مس و همچنین نانوسیال هیبریدی آب-اکسید آلومینیوم-مس در کسرهای حجمی ۵۰/۰، ۲۰/۰ و ۲۰/۰ 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 ۵۰/۰ حدود ۸۲/۵٪ الی ۲۲/۹٪ این بازدهی را کاهش می دهد. اما مطابق شکل ۱۳ نانوسیال آب-مس اثر بهتری بر روی ضریب عملکرد حرارتی داشته است و در کسر حجمی ۹۰/۰ حدود ۱/۴۹٪ الی ۸۸/۷٪ این بازدهی را افزایش می دهد. 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.

مس در کسرهای حجمی ۰/۰۴، ۲۰/۰ و ۰/۰۱ باعث کاهش این

باتوجه به شکل های ۶ تاشکل ۱۴ نانوسیال آب- مس تاثیر

بهتري نسبت به نانو سيال آب- اکسيد آلو مينيوم و نانو سيال هيبريدي

آب- اكسيد ألومينيوم- مس برروي انتقال حرارت داشته است.

بازدهی میشود.

۷-نتىچەگىرى

- 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
- Lee, S., Choi, S.S., Li, S.A., and Eastman, J.A., Measuring Thermal Conductivity of Fluids Containing Oxide Nanoparticles, pp. 280-289, 1999.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.

- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.

- 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.
- 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.
- 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.
- 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.

- 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.
- 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.
- 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.