



مطالعه سه بعدی آثار دو آرایش ورودی/خروجی جریان و استفاده از نانوسیال بر عملکرد یک چاه گرمایی با میکروکانال های مثلثی

حسین خراسانی زاده^{1*}، مجتبی سپهرنیا²، رضا صادقی³

1- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه کاشان، کاشان

2- دانشجوی دکتری، مهندسی مکانیک، دانشگاه کاشان، کاشان

3- کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه کاشان، کاشان

* کاشان، کدپستی 873151167، khorasan@kashanu.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 11 شهریور 1395

پذیرش: 29 شهریور 1395

ارائه در سایت: 24 آبان 1395

کلید واژگان:

چاه گرمایی

میکروکانال مثلثی

نانوسیال

حرکت براونی

خواص متغیر

ورود و خروج افقی و عمودی

چکیده

در این تحقیق عددی جریان آرام نانوسیال، انتقال حرارت و سایر مشخصه های عملکردی یک چاه گرمایی، شامل هفت میکروکانال با مقطع مثلث متساوی الساقین، با لحاظ نمودن هدایت در قسمت های جامد به صورت سه بعدی بررسی شده اند. دو آرایش ورود و خروج افقی (آرایش A) و ورود و خروج عمودی (آرایش U) در نظر گرفته شده اند و شبیه سازی ها برای شار حرارتی ثابت 125 کیلووات بر مترمربع ورودی به کف چاه حرارتی انجام شده اند. در مطالعات پیشین مربوط به اثر آرایش ورود و خروج از جریان آب در میکروکانال های مستطیلی استفاده شده است، اما در این تحقیق از جریان نانوسیال آب-اکسید مس با کسر حجمی های از 0 تا 4 درصد در میکروکانال مثلثی استفاده شده است. همچنین خواص ترموفیزیکی نانوسیال با دما متغیر لحاظ شده اند و اثر حرکت براونی نانوذرات لحاظ و اهمیت استفاده از نانوسیال و در نظر گرفتن حرکت براونی مطالعه شده است. نتایج نشان می دهد برای هر دو آرایش با افزایش افت فشار عملکرد چاه گرمایی از نظر انتقال حرارت، مقاومت حرارتی و توزیع یکنواخت دما در کف چاه گرمایی بهبود می یابد. همچنین برای هر دو آرایش، افزایش کسر حجمی تا 2 درصد منجر به بهبود عملکرد حرارتی می شود، اما افزایش بیشتر آن منجر به افزایش مقاومت حرارتی و غیریکنواختی بیشتر دما در کف چاه گرمایی و ثابت ماندن ناسلت می شود. مقایسه نتایج این تحقیق با نتایج مطالعات پیشین در خصوص نقش آرایش ورود و خروج نشان می دهد که عملکرد حرارتی علاوه بر آرایش ورود و خروج به شکل و هندسه میکروکانال ها وابسته است و برای چاه گرمایی این تحقیق عملکرد آرایش A بهتر از آرایش U است.

Three dimensional investigations of inlet/outlet arrangements and nanofluid utilization effects on a triangular microchannel heat sink performance

Hossein Khorasanizadeh^{*}, Mojtaba Sepehrnia, Reza Sadeghi

Faculty of Mechanical Engineering, University of Kashan, Kashan, Iran

*Post code: 873151167 Kashan, Iran, khorasan@kashanu.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper

Received 01 September 2016

Accepted 19 September 2016

Available Online 14 November 2016

Keywords:

Heat sink

Triangular microchannel

Nanofluid

Brownian motion

Variable properties

Horizontal and vertical inlet/outlet

ABSTRACT

In this numerical study, three dimensional laminar flow, heat transfer and other thermal characteristics of a microchannel heat sink, consisting of seven isosceles triangular microchannels, have been investigated. For this purpose, conduction in the solid parts has been considered and two different horizontal inlet/outlet (I-type) and vertical inlet/outlet (U-type) arrangements have been considered. Simulations have been performed for a constant heat flux of 125 kWm^{-2} entering from the substrate. In previous studies flow of water in rectangular microchannels has been considered, but in this study CuO-water nanofluid has been utilized. The effects of the Brownian motion of nanoparticles and variation of thermophysical properties of the nanofluid with temperature have been considered and their importances studied. The results show that with increasing pressure drop, the heat sink performance in terms of heat transfer, thermal resistance and uniform temperature distribution at substrate improves for the two nominated arrangements. Also increasing the volume fraction to 2% improves the heat sink performance, but as it increases further the thermal resistance and the non-uniformity of temperature at the bottom plate enlarge with no heat transfer improvement. Making comparison with the results of the previous studies on the effect of inlet/outlet arrangement proves that the thermal performance is affected by both of the inlet/outlet arrangement as well as the shape and geometry of the microchannels. For the heat sink of this study with triangular microchannels the performance of the I-type arrangement is better than the U-type arrangement.

1- مقدمه

سطح شده است. از آنجایی که نیمه هادی های به کار برده شده در این تجهیزات باید در دمای نسبتاً پایین و ثابت نگهداری شوند انتخاب روشی مناسب برای خنک کاری بسیار با اهمیت است. استفاده از چاه گرمایی

امروزه پیشرفت صنایع الکترونیک موجب کاهش ابعاد تجهیزات الکترونیک و در عین حال افزایش توان آن ها و در نتیجه افزایش حرارت تولیدی بر واحد

Please cite this article using:

H. Khorasanizadeh, M. Sepehrnia, R. Sadeghi, Three dimensional investigations of inlet/outlet arrangements and nanofluid utilization effects on a triangular microchannel heat sink performance, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 16, No. 12, pp. 27-38, 2016 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

H. Khorasanizadeh, M. Sepehrnia, R. Sadeghi, Three dimensional investigations of inlet/outlet arrangements and nanofluid utilization effects on a triangular microchannel heat sink performance, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 16, No. 12, pp. 27-38, 2016 (in Persian)

میزان تاثیر حرکت براونی را بر مقاومت حرارتی چاه گرمایی و رسانایی نانوسیال بررسی نمودند. آن‌ها نشان دادند که برای کسر حجمی 6 درصد و قطر 29 نانومتر برای ذرات اکسید آلومینیوم، مقاومت حرارتی چاه گرمایی با در نظر گرفتن حرکت براونی حدود 1.93 درصد نسبت به شرایط در نظر نگرفتن آن کاهش می‌یابد. همچنین رسانایی نانوسیال بدون در نظر گرفتن حرکت براونی حدود 6.5 درصد کاهش پیدا می‌کند. آن‌ها همچنین نشان دادند که اثر حرکت براونی در قطرهای کوچک‌تر نانوذرات بیشتر است.

لئونگ و اونگ [7] تولید انتروپی نانوسیال اکسید آلومینیوم را در میکروکانال‌هایی با سطح مقطع دایره، مربع و مثلث متساوی الاضلاع بررسی نمودند. در تحقیق آن‌ها خواص نانوسیال ثابت در نظر گرفته شد و نتایج نشان داد که تولید انتروپی کل با افزایش کسر حجمی نانوذرات کاهش می‌یابد و هنگامی که دبی جرمی سیال و شار حرارتی اعمال شده به کانال افزایش می‌یابد، افزایش پیدا می‌کند. در بین هندسه‌های مطالعه شده، کانال دایروی کمترین تولید انتروپی کل را در مقایسه با شکل‌های دیگر داشت.

وینودهان و راجان [8] عملکرد یک چاه گرمایی میکروکانالی با میکروکانال‌های مستطیلی را با در نظر گرفتن آب با خواص ثابت به‌عنوان سیال خنک‌کننده به‌صورت عددی و سه بعدی بررسی نمودند. آن‌ها چهار آرایش مختلف جدید را، هر کدام دارای چهار ورودی و چهار خروجی با و بدون نواحی توزیع و جمع‌آوری بزرگ‌تر از خود درپه‌های ورودی و خروجی، در نظر گرفتند. نتایج آن‌ها نشان داد که در یک شار حرارتی ثابت، این چهار آرایش جدید نسبت به آرایش معمول (با یک ورودی و خروجی افقی) از نظر نرخ انتقال حرارت و مقاومت حرارتی دارای برتری است.

دوریودهان و همکاران [9] جریان آب مقطر در میکروکانال‌های دوزنقه‌ای همگرا و واگرا را به صورت عددی و تجربی بررسی نمودند. در تحقیق آن‌ها همگرایی و واگرایی در جهت جریان سیال و به صورت سه‌بعدی شبیه‌سازی شد. نتایج آن‌ها ضریب انتقال حرارت در میکروکانال همگرا را 35 درصد بزرگ‌تر از میکروکانال واگرا نشان داد. شار حرارتی در جهت جریان برای میکروکانال همگرا در مقایسه با میکروکانال واگرا یکنواخت‌تر بود. همچنین نسبت کار ورودی به مقاومت حرارتی بدون بعد بین 3 تا 5 مرتبه کم‌تر از مقدار آن در میکروکانال‌های با سطح مقطع یکنواخت مشاهده شد. بنابراین میکروکانال‌های همگرا-واگرا عملکرد ترموهیدرولیکی بهتری نسبت به میکروکانال‌های با سطح مقطع ثابت نشان می‌دهند. عدم انجام مقایسه با عملکرد نانوسیال‌ها کاستی این تحقیق است که می‌تواند به‌عنوان موضوع جدیدی مورد نظر محققین قرار گیرد.

فانی و همکاران [10] جایجایی اجباری آرام نانوسیال آب-اکسید مس را در یک چاه گرمایی میکروکانالی دوزنقه‌ای با در نظر گرفتن حرکت براونی با استفاده از روش دو فازی و به صورت دوبعدی بررسی نمودند. آن‌ها نشان دادند که پخش براونی با افزایش دما و کسر حجمی نانوذرات افزایش می‌یابد، اما با افزایش قطر نانوذرات کاهش می‌یابد. همچنین با در نظر گرفتن اتلاف لزج، قدرت ورودی و همچنین افت فشار اندکی افزایش می‌یابد.

دهقان و همکاران [11] انتقال حرارت در چاه‌های گرمایی میکروکانالی مستطیلی همگرا را به روش عددی و با استفاده از روش حجم محدود در جریان آرام آب با خواص ثابت بررسی نمودند. آن‌ها در چهار حالت مختلف از لحاظ ابعاد میکروکانال، مسیر جریان سیال را بررسی نمودند. نتایج آن‌ها نشان داد که عدد پویسوله با افزایش باریک شدن (همگرایی) افزایش یافت، در حالی که قدرت مورد نیاز برای پمپاژ ورودی کاهش و عدد ناسلت افزایش

میکروکانالی¹ یک روش موثر برای خنک‌کاری ریزتراشه‌ها است. با بهره‌گیری از میکروکانال‌ها به‌عنوان میدل‌های گرمایی با سطوح تغییر شکل یافته حرارت بالای ایجاد شده به‌وسیله جابجایی آزاد یا اجباری پراکنده می‌شود. در این قسمت به بررسی برخی مطالعات پیشین انجام شده در خصوص میکروکانال‌ها به ترتیب سال انجام آن‌ها پرداخته می‌شود.

وو و چنگ [1] ضریب اصطکاک جریان آب مقطر را در یک میکروکانال سیلیکونی با سطح مقطع دوزنقه‌ای با قطرهای هیدرولیکی در محدوده 25.9 تا 291 میکرومتر به صورت تجربی اندازه گرفتند. آن‌ها نشان دادند که ضریب اصطکاک این میکروکانال‌ها با نسبت منطری سطح مقطع تغییر می‌نماید. تسلیج و همکاران [2] جریان سیال و انتقال حرارت چاه گرمایی میکروکانالی مثلثی را هم با در نظر گرفتن یک کانال و شرط تقارن و هم با در نظر گرفتن تمام کانال‌ها به‌صورت سه بعدی و عددی بررسی نمودند. آن‌ها نشان دادند که تغییرات دمای سیال در طول میکروکانال و دیوار به صورت خطی نیست.

چین و هاوونگ [3] عملکرد چاه گرمایی میکروکانالی مستطیلی را با استفاده از نانوسیال آب-مس با کسرهای حجمی مختلف به روش عددی مورد مطالعه قرار دادند. در تحقیق آن‌ها از مدل‌های نانوسیال با خواص ثابت استفاده شد. آن‌ها نشان دادند که استفاده از نانوسیال، به‌عنوان خنک‌کننده، عملکرد چاه گرمایی میکروکانالی را در مقایسه با به کار بردن آب خالص افزایش می‌دهد، در شرایطی که فقط باعث افزایش افت فشار ناچیزی می‌شود. چین و چن [4] اثر نحوه قرار گرفتن ورود و خروج جریان را در یک چاه گرمایی میکروکانالی با میکروکانال‌های مستطیلی در حالت سه‌بعدی به صورت عددی بررسی نمودند. آن‌ها ابتدا یک آرایش مرسوم را با ورودی و خروجی مستقیم بررسی نمودند. سپس پنج نوع آرایش دیگر را انتخاب نمودند. ابعاد هندسه برای هر شش آرایش یکسان ولی محل ورود و خروج جریان در آن‌ها متفاوت بود. آن‌ها از آب به‌عنوان سیال خنک‌کننده استفاده نموده و نشان دادند که آرایش ورود و خروج می‌تواند منجر به بهبود عملکرد انتقال حرارت چاه گرمایی شود. برای آرایش‌های I ، D ، N ، S که در آن‌ها سیال به صورت افقی وارد چاه گرمایی می‌شد نابرابری توزیع سرعت در میکروکانال‌ها بیش از آرایش‌های V و U ، که سیال به صورت عمودی وارد می‌شد، به‌دست آمد. آن‌ها همچنین نشان دادند که از نظر کمترین مقاومت حرارتی، آرایش V بهترین عملکرد را برای انتقال حرارت دارد.

محمد و همکاران [5] به بررسی عملکرد شش نوع نانوسیال در خنک‌کاری چاه گرمایی میکروکانالی مثلثی به صورت عددی و سه بعدی پرداختند. این نانوسیال‌ها از افزودن شش نوع نانوذره شامل الماس، نقره، اکسید سیلیکون، اکسید مس، اکسید تیتانیوم و اکسید آلومینیوم به سیال آب به‌دست آمدند. نتایج آن‌ها نشان داد استفاده از نانوسیال نسبت به سیال پایه (آب) مقاومت حرارتی چاه گرمایی را کاهش می‌دهد و نانوسیال آب-الماس بهترین عملکرد را دارد. در نظر نگرفتن اثرات حرکت براونی برای نانوذرات و همچنین در نظر نگرفتن خواص متغیر با دما برای خواص ترموفیزیکی نانوسیال از کاستی‌های تحقیق آن‌ها می‌باشند.

سیف و نیک‌آیین [6] اثرات اندازه نانوذرات و حرکت براونی روی عملکرد حرارتی یک چاه گرمایی میکروکانالی مستطیل شکل را با استفاده از نانوذرات اکسید آلومینیوم، اکسید زینک و اکسید مس پراکنده شده در سیال پایه اتیلن‌گلیکول - آب به‌صورت عددی بررسی نمودند. به همین منظور آن‌ها

¹ Microchannel heat sink

یافت.

از یکدیگر جدا نموده‌اند در "شکل 2" نشان داده شده است. همان‌طور که در "شکل 2" مشاهده می‌شود میکروکانال‌ها دارای سطح مقطع مثلثی متساوی‌الساقین به ابعاد $W_{ch} = 400\mu m$ و $H_{ch} = 400\mu m$ و طول $L_{ch} = 10mm$ هستند. جنس پره‌ها و قسمت جامد چاه گرمایی، سیلیکون و سیال خنک‌کننده نانوسیال آب-اکسید مس است. همچنین همان‌گونه که در "شکل 2" دیده می‌شود برای سهولت انجام بحث میکروکانال‌ها از راست به چپ شماره‌گذاری شده‌اند.

نحوه ورود و خروج جریان در دو نوع چاه گرمایی میکروکانالی این تحقیق در "شکل 3" نشان داده شده است. در آرایش متداول I ورود و خروج جریان به صورت افقی است، اما در آرایش U ورود و خروج به صورت عمودی است. همان‌طور که در "شکل 3" نشان داده شده است در آرایش I ورودی و خروجی در مرکز دیوارهای شمالی و جنوبی واقع شده‌اند اما در آرایش U ورودی و خروجی به مرکز ناحیه توزیع و جمع‌آوری از سقف چاه گرمایی منتقل می‌شوند.

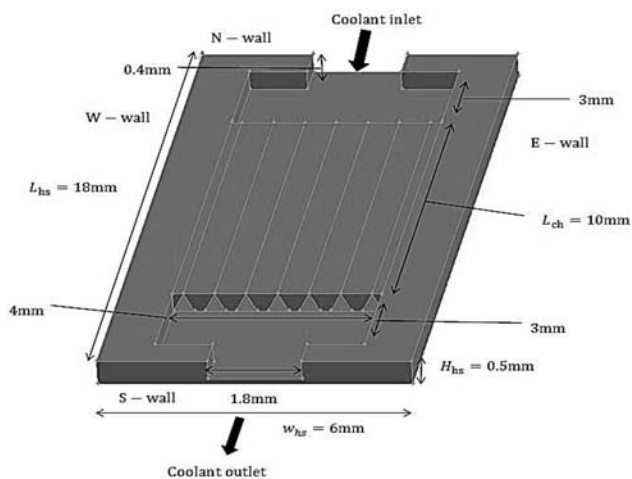


Fig. 1 Geometry of microchannel heat sink with direct inlet and outlet (I-type)

شکل 1 ساختار هندسی چاه گرمایی با ورودی و خروجی مستقیم (آرایش I)

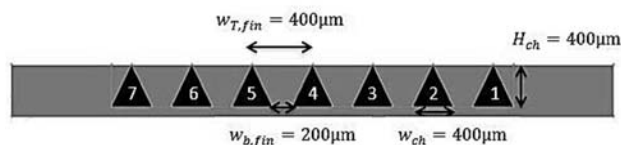


Fig. 2 Fin and microchannel dimensions

شکل 2 ابعاد میکروکانال‌ها و پره‌ها

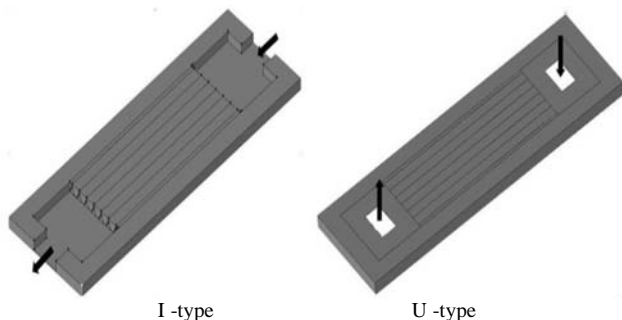


Fig. 3 The geometry showing the I and U-type inlet and outlet arrangements

شکل 3 نحوه ورود و خروج جریان در آرایش‌های نوع I و U

سلیمی‌گچوئی و همکاران [12] در یک مطالعه تجربی جابجایی نانوسیال آب-اکسیدآلومینیوم را درون میکروکانال‌های مستطیلی بررسی نمودند. یافته‌های آن‌ها نشان داد استفاده از نانوسیال نسبت به آب خالص موجب افزایش چشم‌گیر ضریب انتقال حرارت متوسط می‌شود. همچنین با افزایش عدد رینولدز و کسر حجمی ضریب انتقال حرارت بهبود می‌یابد. خراسانی‌زاده و سپهرنیا [13] به بررسی اثر چهار نوع آرایش ورود و خروج بر عملکرد چاه گرمایی میکروکانالی متخلخل با میکروکانال‌های دوزنقه‌ای به صورت عددی و سه بعدی پرداختند. در همه آرایش‌ها جریان سیال آب به صورت افقی وارد چاه گرمایی می‌شد. نتایج آن‌ها نشان داد آرایش‌هایی که ورودی و خروجی آن‌ها در راستای جریان عبوری از میکروکانال‌ها قرار داشتند نسبت به آرایش‌هایی که ورودی و خروجی جریان در طرفین چاه گرمایی بودند عملکرد بهتری از نظر عدد ناسلت متوسط، مقاومت حرارتی و نسبت بیشینه اختلاف دمای کف چاه گرمایی به شار حرارتی داشتند.

مطالعات پیشین مربوط به بررسی اثر آرایش‌های مختلف ورود و خروج جریان بر عملکرد چاه گرمایی غیرمتخلخل محدود به چاه گرمایی با میکروکانال‌های مستطیلی بوده و در آن‌ها از آب به عنوان سیال خنک‌کننده استفاده شده است. در این تحقیق برای چاه گرمایی با میکروکانال‌های مثلثی مقایسه عملکرد برای دو آرایش ورود و خروج جریان افقی و عمودی انجام می‌شود و بدین منظور از نانوسیال آب-اکسید مس به عنوان سیال خنک‌کننده استفاده می‌شود. زمانی که در میدان حل بیش از یک میکروکانال وجود داشته باشد، به منظور دستیابی به نتایج قابل اتکا شبیه‌سازی کل میکروکانال‌ها و بخش جامد چاه گرمایی لازم است. این موضوع قبلاً توسط تسلیج و همکاران [2] و هتسرونی و همکاران [14] بررسی و بر آن تاکید شده است. برخلاف کاستی‌های برخی تحقیقات قبلی از نظر انتخاب میدان حل، در تحقیق حاضر شبیه‌سازی‌ها به صورت سه بعدی برای کل چاه گرمایی شامل تمام میکروکانال‌ها و بخش جامد آن انجام شده‌اند. در بیشتر مطالعات انجام شده در زمینه میکروکانال‌ها وابستگی خواص بخش جامد و سیال به دما و همچنین اثر حرکت براونی نانوذرات لحاظ نشده‌اند. در این تحقیق رسانایی بخش جامد چاه گرمایی وابسته به دما در نظر گرفته شده است و همچنین خواص نانوسیال وابسته به دما و اثر حرکت براونی نانوذرات لحاظ و اهمیت آن‌ها مطالعه شده‌اند.

2- هندسه مسئله

ساختار هندسی چاه گرمایی میکروکانالی با ورودی و خروجی افقی، معروف به آرایش I که متداول است، در "شکل 1" نشان داده شده است. ابعاد مربوط به هندسه مورد نظر در این تحقیق برگرفته از طرح کلی هندسه چین و چن [4] است، که در یک سطح به ابعاد 18 در 6.2 میلی‌متر تعداد 11 میکروکانال مستطیلی وجود داشت. در کار حاضر برای سطحی به ابعاد 18 در 6 میلی‌متر تعداد 7 میکروکانال مثلثی در نظر گرفته شده است. در ابتدا و انتهای چاه گرمایی، دریچه‌های مستطیلی شکل به طول 1 میلی‌متر برای ورود و خروج جریان تعبیه شده‌اند. همچنین دو ناحیه با طول 3 میلی‌متر برای توزیع جریان سیال به داخل میکروکانال‌ها و جمع‌آوری جریان از میکروکانال‌ها، به ترتیب بعد از دهانه ورودی و قبل از دهانه خروجی، در نظر گرفته شده‌اند. عمق این نواحی و دریچه‌های ورود و خروج مثل عمق میکروکانال‌ها است. تراشه الکترونیکی که تولید کننده حرارت است در تماس مستقیم با کف چاه گرمایی است. ابعاد میکروکانال‌های مثلثی و پره‌های دوزنقه‌ای که آن‌ها را

3- فرضیات مسئله، معادلات حاکم و شرایط مرزی

برای حل معادلات مربوط به جریان سیال و انتقال حرارت، فرضیات زیر در نظر گرفته می‌شوند:

1. جریان سیال و انتقال حرارت سه بعدی و پایا است.
 2. جریان سیال آرام و تک فاز است.
 3. خواص ترموفیزیکی سیال و بخش جامد گرمایی وابسته به دما هستند.
 4. تمام سطوح خارجی چاه گرمایی شامل دیواره‌های جانبی و دیواره بالایی، که با محیط اطراف در تماس هستند، عایق هستند.
- با توجه به فرضیات لحاظ شده، معادلات حاکم بر مسئله به صورت زیر بیان می‌شوند:

معادله پیوستگی:

$$\frac{\partial}{\partial x}(\rho_{nf}u) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho_{nf}v) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho_{nf}w) = 0 \quad (1)$$

معادلات مومنوم:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x}(\rho_{nf}uu) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho_{nf}vu) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho_{nf}wu) \\ = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x}\left(\mu_{nf}\frac{\partial u}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\mu_{nf}\frac{\partial u}{\partial y}\right) \\ + \frac{\partial}{\partial z}\left(\mu_{nf}\frac{\partial u}{\partial z}\right) \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x}(\rho_{nf}uv) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho_{nf}vv) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho_{nf}vw) \\ = -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x}\left(\mu_{nf}\frac{\partial v}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\mu_{nf}\frac{\partial v}{\partial y}\right) \\ + \frac{\partial}{\partial z}\left(\mu_{nf}\frac{\partial v}{\partial z}\right) \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x}(\rho_{nf}uw) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho_{nf}vw) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho_{nf}ww) \\ = -\frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x}\left(\mu_{nf}\frac{\partial w}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\mu_{nf}\frac{\partial w}{\partial y}\right) \\ + \frac{\partial}{\partial z}\left(\mu_{nf}\frac{\partial w}{\partial z}\right) \end{aligned} \quad (4)$$

معادله انرژی در سیال:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x}(\rho_{nf}uT) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho_{nf}vT) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho_{nf}wT) \\ = \frac{\partial}{\partial x}\left(k\frac{\partial T}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(k\frac{\partial T}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(k\frac{\partial T}{\partial z}\right) \end{aligned} \quad (5)$$

معادله انرژی در قسمت جامد چاه گرمایی:

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(k_s\frac{\partial T}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(k_s\frac{\partial T}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(k_s\frac{\partial T}{\partial z}\right) = 0 \quad (6)$$

خواص ترموفیزیکی نانوسیال شامل چگالی و گرمای ویژه از روابط زیر محاسبه می‌شوند [15,16]:

$$\rho_{nf} = (1 - \varphi)\rho_f + \varphi\rho_{np} \quad (7)$$

$$(\rho C_p)_{nf} = (1 - \varphi)(\rho C_p)_f + \varphi(\rho C_p)_{np} \quad (8)$$

رسانایی و لزجت موثر نانوسیال شامل دو بخش استاتیکی و براونی هستند که به صورت زیر محاسبه می‌شوند [17-20]:

$$k_{eff} = k_{Static} + k_{Brownian} \quad (9)$$

$$k_{Static} = k_f \left(\frac{k_{np} + 2k_f}{k_{np} + 2k_f} + \varphi(k_f - k_{np}) \right) \quad (10)$$

$$k_{Brownian} = 5 \times 10^4 \beta \varphi \rho_f C_{p,f} \sqrt{\frac{\kappa_b T}{\rho_{np} d_{np}}} f(T, \varphi) \quad (11)$$

$$\mu_{eff} = \mu_{Static} + \mu_{Brownian} \quad (12)$$

$$\mu_{Static} = \mu_f / (1 - \varphi)^{2.5} \quad (13)$$

$$\mu_{Brownian} = 5 \times 10^4 \beta \varphi \rho_f \sqrt{\frac{\kappa_b T}{\rho_{np} d_{np}}} f(T, \varphi) \quad (14)$$

κ_b ثابت بولتزمن است که برابر $1.3807 \times 10^{-23} \text{ J/K}$ است. در محاسبه رسانایی و لزجت نانوسیال آب-اکسید مس از دو تابع f و β استفاده شده است که به ترتیب عبارتند از [17]:

$$f(T, \varphi) = (-6.04\varphi + 0.4705)T + (1722.3\varphi - 134.63) \quad (15)$$

$$\beta = 0.0011(100\varphi)^{-0.7272} \quad (16)$$

مدل ارائه شده در رابطه (15) برای دما در محدوده بین 300 تا 325 کلوین و برای کسر حجمی در محدوده بین 0 تا 4 درصد معتبر است. همچنین مدل ارائه شده در رابطه (16) برای کسر حجمی بزرگتر از 1 درصد معتبر است. برای خواص ترموفیزیکی آب با استفاده از اطلاعات جداول ترمودینامیکی روابط زیر به صورت تابعی از دما توسعه داده شده‌اند:

$$k_f = 0.324 \exp(0.00195T) - 0.00163 \quad (17)$$

$$\mu_f = 57.83 \exp(-0.0405T) + 0.01473 \exp(-0.01095T) \quad (18)$$

$$\rho_f = 1130 \exp(-0.0004173T) \quad (19)$$

$$C_{p,f} = 6.747 \times 10^8 \exp(-0.05862T) + 3989 \exp(0.0001428T) \quad (20)$$

همچنین رسانایی سیلیکون به صورت تابعی از دما عبارت است از [21]:

$$k_{Silicon} = 290 - 0.4T \quad (21)$$

خواص ترموفیزیکی آب و نانوذرات اکسید مس در دمای 300 کلوین در جدول 1 ارائه شده‌اند.

شرایط مرزی برای معادلات حاکم، وابسته به شرایط کاری چاه گرمایی هستند. در کاربردهای عملی چاه گرمایی به یک منبع تولید حرارت مانند تراشه الکترونیکی متصل می‌شود. سیال با یک دمای مشخص اولیه و با یک دبی جرمی ثابت به وسیله یک پمپ خارجی به ورودی چاه گرمایی میکروکانالی ارسال می‌شود. افت فشار در طول چاه گرمایی می‌تواند به وسیله فشارسنج‌های تعبیه شده در ورودی و خروجی چاه گرمایی اندازه‌گیری شود. از آنجایی که افت فشار به دبی جرمی وابسته است، هم دبی جرمی و هم افت فشار می‌توانند به عنوان داده‌های ورودی در شبیه‌سازی عددی مورد استفاده قرار گیرند. در این تحقیق مشابه با مطالعه لی و همکاران [22] افت فشار به عنوان داده ورودی انتخاب شده است.

شرایط مرزی عبارتند از:

در ورودی جریان:

$$P = P_{in}, \quad T = T_{in} \quad (22)$$

در خروجی جریان:

$$P = P_{out}, \quad \frac{\partial T}{\partial n} = 0 \quad (23)$$

برای سطوح مشترک جامد-سیال خنک‌کننده:

$$\vec{V} = 0, \quad T_f = T_s, \quad -k_s \frac{\partial T_s}{\partial n} = -k_f \frac{\partial T_f}{\partial n} \quad (24)$$

برای کف چاه گرمایی:

یکی از اهداف اصلی طراحی ساختارهای جدید برای چاه‌های گرمایی میکروکانالی، کاهش دمای کف چاه گرمایی است. یک بستر با خنک‌کاری یکنواخت دارای تفاوت کمتری بین حداکثر و حداقل دما خواهد بود. نسبت اختلاف حداکثر و حداقل دمای کف چاه گرمایی به شار حرارتی θ نامیده می‌شود و به صورت زیر بیان می‌شود:

$$\theta = \frac{T_{b,max} - T_{b,min}}{q_w} \quad (32)$$

از θ به عنوان معیاری برای سنجش غیریکنواختی دمای کف چاه گرمایی استفاده می‌شود و هرچه بزرگ‌تر باشد عدم یکنواختی دما بیشتر است.

5- روش حل عددی، استقلال نتایج از شبکه و اعتبارسنجی

به منظور حل معادلات حاکم از روش حجم محدود¹ و برای گسسته‌سازی آن‌ها از روش بالادست مرتبه دوم² استفاده شده است. شبیه‌سازی‌ها با استفاده از نرم‌افزار انسیس-سی اف اکس³ انجام شده است. در همه حالت‌ها، معیار همگرایی برای معادلات پیوستگی، مومنتوم و انرژی 10^{-6} در نظر گرفته شده است.

ایجاد شبکه‌بندی در رسیدن به جواب‌های مناسب از اهمیت بالایی برخوردار است و معیاری وجود دارد که با رعایت آن مسئله با سرعت بالاتر حل شده و جواب‌های دقیق‌تری به دست می‌آیند. مطابق این معیار باید از تولید شبکه‌های کشیده اجتناب شود و تا حد امکان شبکه‌ها طوری ایجاد شوند که نسبت ابعاد آن‌ها در حدود یک باشد. با توجه به این که هندسه مورد بررسی این تحقیق سه بعدی و شکل میکروکانال‌ها مثلثی و شکل پره‌ها دوزنقه‌ای است از مش‌های مکعبی زاویه‌دار، متناسب با زاویه دیوارهای غیرقائم، برای شبکه‌بندی استفاده شده است. به منظور یافتن شبکه مناسبی که منجر به استقلال نتایج از شبکه شود سه شبکه‌بندی بر میدان حل منطبق شده است. در جدول 2 مجموع المان‌های استفاده شده در کل میدان و همچنین تعداد المان‌های بخش جامد و سیال ارائه شده است. برای شرایط استفاده از نانوسیال با کسر حجمی 2 درصد در آرایش I، اختلاف فشار 10 کیلوپاسکال و شار حرارتی 125 کیلووات بر مترمربع شبیه‌سازی انجام شده و دما بر روی خطی در کف و وسط میکروکانال چهارم (مرز سیال و جامد)، که برای سه شبکه‌بندی به دست آمده، در "شکل 4" ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود دمای به دست آمده روی این خط برای شبکه با تعداد 871346 المان بسیار نزدیک به دمای به دست آمده برای شبکه با 1566206 المان است و لذا شبکه با 871346 المان مناسب است. در "شکل 5" شبکه‌های استفاده شده در مقطع هر میکروکانال مثلثی و یکی از پره‌ها نشان داده شده است. همان‌طور که دیده می‌شود شکل شبکه‌های تولید شده بسیار نزدیک به مکعب است و در میکروکانال‌ها سلول‌های نزدیک دیواره‌ها حتی‌المقدور عمود بر دیوار هستند. با توجه به آزمون تست شبکه‌ها در گمبیت، نسبت ابعاد بیش از 70 درصد شبکه‌ها در بازه 0.9 و 1 و مابقی در بازه 0.8 تا 0.9 است.

در حالت پایدار باید مقدار حرارت جذب شده با حرارت اعمال شده یکسان باشد و نباید اختلافی وجود داشته باشد. حرارت جذب شده توسط سیال عامل عبارت است از:

$$Q_{flow} = \dot{m}C_p(T_{out} - T_{in}) \quad (33)$$

\dot{m} دبی جرمی و T_{in} و T_{out} به ترتیب دمای خروجی و ورودی سیال کاری

$$q_w = -k_s \frac{\partial T_s}{\partial n} \quad (25)$$

در رابطه (22) به ترتیب فشار و دمای ورودی سیال و P_{in} و P_{out} در رابطه (23) به ترتیب فشار خروجی سیال و جهت عمود دیوار یا سطح خروجی است. لازم به ذکر است به دلیل این که در این تحقیق از نانوسیال با خواص متغیر استفاده شده است و از آنجایی که روابط مربوط به خواص نانوسیال برای محدوده دمایی بین 300 تا 325 کلون هستند شار اعمالی به کف چاه گرمایی 125 کیلووات بر مترمربع انتخاب شده است.

در جریان‌های داخلی، طول ورودی هیدرودینامیکی حائز اهمیت است. این طول به نوع جریان (آرام یا آشفته) بستگی دارد. همان‌طور که در فرضیات مسئله بیان شد جریان سیال در چاه گرمایی آرام است و در جریان آرام، طول ورودی هیدرودینامیکی از رابطه (26) به دست می‌آید:

$$X_{fd,h} = 0.05ReD_h \quad (26)$$

4- شاخص‌های عملکرد

برای بررسی عملکرد چاه گرمایی میکروکانالی از سه شاخص عدد ناسلت متوسط، مقاومت حرارتی و نسبت بیشینه اختلاف دمای کف چاه گرمایی به شارحرارتی استفاده می‌شود [8]. در زیربخش‌های بعدی این شاخص‌ها توضیح داده شده‌اند.

جدول 1 خواص ترموفیزیکی آب و اکسید مس در دمای 300 کلون [23]

Table 1 Thermo-physical properties of water and CuO at 300K [23]

ماده	ρ (kg m ⁻³)	c_p (J kg ⁻¹ K ⁻¹)	k (Wm ⁻¹ K ⁻¹)	μ (Pa s)
آب	997	4179	0.613	0.000855
اکسیدمس	6320	531.8	76.5	-

4-1- عدد ناسلت متوسط

عدد بدون بعد ناسلت متوسط به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$Nu = \frac{hD_h}{k_f} \quad (27)$$

h در رابطه (27) ضریب انتقال حرارت جابجایی متوسط است و با استفاده از قانون سرمایش نیوتون به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$q_w = h(T_{hs,avg} - T_{f,avg}) \quad (28)$$

لذا عدد ناسلت متوسط از رابطه (29) بدست می‌آید:

$$Nu = \frac{q_w D_h}{k_f(T_{hs,avg} - T_{f,avg})} \quad (29)$$

D_h قطر هیدرولیکی میکروکانال است و از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$D_h = \frac{4A}{p} \quad (30)$$

A مساحت مقطع میکروکانال و p محیط تر شده است.

4-2- مقاومت حرارتی

مقاومت حرارتی به عنوان دیگر شاخص عملکرد حرارتی از رابطه‌ی زیر بدست می‌آید:

$$R_{th} = \frac{T_{w,max} - T_{in}}{q_w W_{hs} L_{hs}} \quad (31)$$

$T_{w,max}$ در رابطه (31) بیشترین دمای کف چاه گرمایی است.

4-3- نسبت بیشینه اختلاف دمای کف چاه گرمایی به شار حرارتی

¹ Finite volume

² Second order upwind

³ Ansys CFX

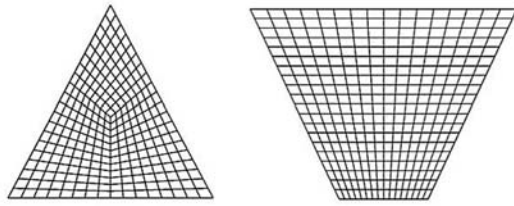


Fig. 5 The created grids in microchannel and fin sections

شکل 5 هندسه شبکه ایجاد شده در مقطع هر میکروکانال و هر پره

جدول 3 حرارت جذب شده توسط سیال و حرارت اعمال شده به دو نوع چاه گرمایی و اختلاف نسبی آن‌ها

Table 3 Heat absorbed by fluid and the relative difference between the absorbed and applied heats for two heat sink types

آرایش	تعداد	کسر حجمی	$Q_{Flow}(W)$	اختلاف نسبی (درصد)
I	871346	$\phi = 0$	13.22	2.08
		$\phi = 2$	13.23	2.02
		$\phi = 4$	13.25	1.83
U	857572	$\phi = 0$	13.37	0.94
		$\phi = 2$	13.39	0.83
		$\phi = 4$	13.41	0.66

اختلاف نسبی حرارت اعمال شده و جذب شده کمتر می‌شود، به گونه‌ای که برای هر دو آرایش حداقل اختلاف مربوط به کسر حجمی 4 درصد است. به منظور اطمینان از اعتبار روش عددی به کار گرفته شده و درستی نتایج تحقیق حاضر، شبیه‌سازی کار تجربی فیلیپس [24] انجام شد. همچنین برای اطمینان از امکان بازتولید نتایج عددی چین و چن [4]، شبیه‌سازی چاه گرمایی ایشان نیز انجام شد. در این دو تحقیق چاه گرمایی به کار گرفته شده شامل 11 میکروکانال مستطیلی بوده و شار حرارتی ثابت 1000 کیلووات بر مترمربع به کف چاه گرمایی اعمال و از آب به عنوان سیال کاری استفاده شده است. در جدول 4 و برای چند افت فشار مقادیر ناسلت متوسط در همه میکروکانال‌ها با نتایج عددی چین و چن [4] و در "شکل 6" برای افت فشار 50 کیلوپاسکال مقادیر ناسلت محلی فقط در میکروکانال پنجم با نتایج تجربی فیلیپس [24] مقایسه شده‌اند. اختلاف نسبی مقادیر در جدول 4 حداکثر 2.6 درصد و در "شکل 6" حدود 16 درصد است، لذا از صحت روش‌های به کار گرفته شده و نتایج به دست آمده اطمینان حاصل می‌شود.

6- بحث و نتایج

شبیه‌سازی‌ها برای چاه گرمایی شامل 7 میکروکانال مثلثی با استفاده از نانوسیال آب-اکسید مس با قطر نانوذرات 36 نانومتر و با لحاظ نمودن اثر حرکت براونی به ازای افت فشارهای 5، 10، 15 و 20 کیلوپاسکال، کسر حجمی‌های 0، 2 و 4 درصد و با اعمال شار حرارتی 125 کیلووات بر مترمربع به منظور مقایسه اثر دو آرایش ورود و خروج جریان، شامل ورود و خروج افقی (آرایش I) و ورود و خروج عمودی (آرایش U)، انجام شده‌اند. همچنین خواص جامد و سیال وابسته به دما در نظر گرفته شده‌اند. در این بخش ابتدا نتایج مربوط به سرعت و دمای متوسط سیال در میکروکانال‌ها، ناسلت متوسط، مقاومت حرارتی و نسبت بیشینه اختلاف دمای کف چاه گرمایی به شار حرارتی در افت فشارهای مختلف برای دو آرایش I و U ارائه، بحث و مقایسه می‌شوند. سپس اثر لحاظ نمودن حرکت براونی و همچنین استفاده از نانوسیال در مقایسه با سیال پایه (آب) بررسی می‌شود.

هستند. چین و چانگ [23] در مطالعه تجربی خود از تلفات حرارتی به محیط چشم‌پوشی و فرض نمودند که تمام حرارت تولید شده توسط سیال عامل جذب شده است. با این وجود در مطالعات عددی به دلیل تأثیر شبکه مورد استفاده مقداری تفاوت مشاهده می‌شود. در مطالعه عددی چین و چن [4] این موضوع بررسی و حداکثر اختلاف نسبی بین حرارت اعمال شده و جذب شده برای آرایش ورودی و خروجی مستقیم 5.4% به دست آمد. برای شناسایی آرایش بحرانی شبیه‌سازی برای هر دو آرایش I و U برای افت فشار 10 کیلوپاسکال با تعداد المان‌های تقریباً مساوی انجام شد. در جدول 3 اختلاف نسبی بین حرارت اعمال شده و جذب شده برای کسر حجمی‌های مختلف ارائه شده است. مقادیر اختلاف نسبی که در جدول 3 برحسب درصد ارائه شده به صورت زیر محاسبه شده‌اند:

$$\text{Rel. diff.} = \left| \frac{Q_{Flow} - q_w W_{hs} L_{hs}}{q_w W_{hs} L_{hs}} \right| \times 100\% \quad (34)$$

همان‌طور که در جدول 3 دیده می‌شود، برای آرایش I مقادیر اختلاف نسبی بیش‌تر و حداکثر آن حدود 2% است و نشان می‌دهد که آرایش I بحرانی‌تر است. بنابراین از صحت نتایج استقلال از شبکه، که برای آرایش I انجام شده است، برای هر دو آرایش مورد استفاده اطمینان حاصل می‌شود. لازم به ذکر است که اگر نتایج نشان از بحرانی بودن آرایش U داشت، استقلال نتایج از شبکه ابتدا باید برای آرایش U صورت می‌گرفت.

حرارت اعمال شده به کف چاه گرمایی در همه شبیه‌سازی‌ها یکسان است، اما به دلیل تغییر شرایط انتقال حرارت در مرز سیال و جامد از جمله رسانایی بیش‌تر نانوسیال و افزایش آن با کسر حجمی، نانوسیال حرارت بیشتری را جذب می‌کند. لذا برای هر دو آرایش با افزایش کسر حجمی،

جدول 2 تعداد المان‌های سه شبکه مختلف استفاده شده در آرایش I

Table 2 Number of elements for three utilized grids in the I-type

شبکه بندی	کل المان‌ها	المان‌های بخش جامد	المان‌های بخش سیال
Coarse	348866	240274	108592
Fine	871346	621120	250226
Very fine	1566206	1042000	524206

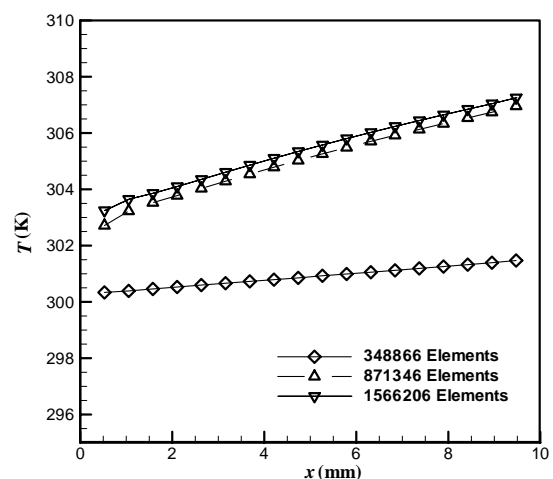


Fig. 4 Temperature along bottom center line in microchannel #4 of I-type heat sink using three different grids; $\phi=2\%$, $\Delta P = 10$ kPa and heat flux of 125 kW m^{-2}

شکل 4 تغییر دما بر روی خطی در وسط و کف میکروکانال چهارم چاه گرمایی آرایش I با سه شبکه بندی مختلف برای افت فشار 10 کیلوپاسکال و کسر حجمی 2 درصد و شار حرارتی 125 کیلووات بر متر مربع

جدول 4 ناسلت متوسط به دست آمده برای هندسه چین و چن [4] برای سه افت فشار 25، 35 و 50 کیلوپاسکال

Table 4 The average Nusselt number obtained for Chein and Chen geometry [4] for three pressure drops of 25, 35 and 50 kPa

$\Delta P = 50$	$\Delta P = 35$	$\Delta P = 25$	
9.64	9.01	8.35	مطالعه حاضر
9.9	9.13	8.45	چین و چن [4]
2.6	1.3	1.1	اختلاف نسبی به درصد

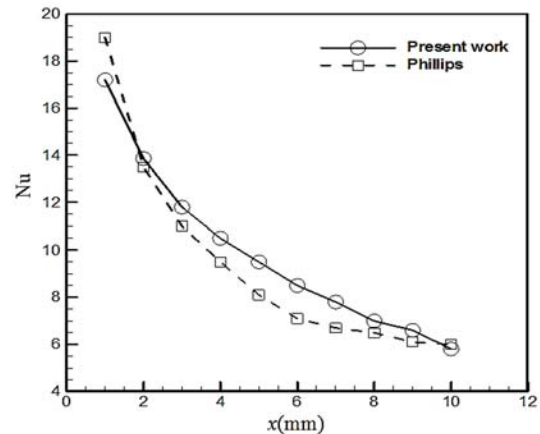


Fig. 6 Variation of local Nusselt number along microchannel #5 for the experimental study of Phillips [24] at $\Delta P = 50$ kPa

شکل 6 تغییرات عدد ناسلت محلی در طول میکروکانال پنجم برای کار فیلیپس [24] در افت فشار 50 کیلوپاسکال

افت فشار کلی سیال از محلی قبل از ورودی آن به دریچه ورودی تا پس از خروج آن از دریچه خروجی چاه گرمایی شامل جمع افت فشارها در دریچه ورودی، ناحیه توزیع جریان به میکروکانال‌ها، داخل خود میکروکانال‌ها، ناحیه جمع‌آوری و دریچه خروجی است. به منظور بررسی اثر افت فشار (فشار ورودی در مقایسه با فشار خروجی) بر میدان جریان و دما، مقدار سرعت متوسط در میکروکانال‌ها در افت فشارها و کسر حجمی‌های مختلف مطالعه شد. نمونه‌ای از نتایج برای نانوسیال آب-اکسید مس با کسر حجمی دو درصد در "شکل 7" ارائه شده است. با توجه به مقادیر حداقل و حداکثر سرعت در میکروکانال‌ها و براساس قطر هیدرولیکی میکروکانال‌ها عدد رینولدز در محدوده 196 تا 592 است و نشان می‌دهد که فرض آرام بودن جریان صحیح است. به طور کلی با افزایش افت فشار دبی جرمی ورودی به چاه گرمایی افزایش می‌یابد و به تبع آن دبی جرمی ورودی به میکروکانال‌ها نیز افزایش یافته و منجر به افزایش سرعت متوسط در تمام میکروکانال‌ها می‌شود.

همچنین به دلیل قرار گرفتن ورود و خروج در مرکز دیواره‌های شمالی و جنوبی در آرایش I و در مرکز ناحیه توزیع و جمع‌آوری در آرایش U مقدار سرعت متوسط در میکروکانال‌های واقع در سمت چپ و راست میکروکانال 4 برای هر دو آرایش متقارن است. با این وجود چنان‌که از "شکل 7" دیده می‌شود نحوه توزیع جریان جرم به میکروکانال‌های مختلف و به تبع آن نحوه توزیع سرعت متوسط در آن‌ها برای آرایش I مانند آرایش U نیست. همچنین برای یک افت فشار یکسان، سرعت در میکروکانال‌های مختلف برای آرایش U در مقایسه با آرایش I به طور کلی بیشتر است و نشان می‌دهد، به دلیل تفاوت در هندسه و جهت ورودی و خروجی، مجموع افت فشار نانوسیال در دریچه‌های ورودی و خروجی و نواحی توزیع و جمع‌آوری برای آرایش I بیش‌تر از آرایش U است. تفاوت مقادیر سرعت در میکروکانال‌های این دو

آرایش یکسان نیست و در میکروکانال‌های کناری (1 و 7) به حداکثر می‌رسد. بیش‌ترین تفاوت بین مقدار سرعت در آرایش U نسبت به آرایش I در افت فشار 5 کیلوپاسکال در میکروکانال‌های کناری بوده و به طور نسبی 13.85% است. کم‌ترین تفاوت نسبی نیز در افت فشار 20 کیلوپاسکال و در میکروکانال 5 به اندازه 1.25% است.

مقادیر دمای متوسط سیال در میکروکانال‌ها در افت فشارهای مختلف برای نانوسیال آب-اکسید مس با کسر حجمی دو درصد در "شکل 8" ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهد در هر دو آرایش با افزایش افت فشار، دما در تمام میکروکانال‌ها کاهش می‌یابد. افزایش افت فشار سرعت جریان را افزایش داده و به تبع آن دمای متوسط سیال کاهش می‌یابد. با این وجود در شرایط یکسان از نظر افت فشار، دمای متوسط سیال در تمامی میکروکانال‌ها برای آرایش I نسبت به آرایش U بیش‌تر است. این تفاوت دما با نحوه توزیع سرعت متوسط در میکروکانال‌ها (شکل 7) مطابقت دارد؛ در واقع هر چه سرعت متوسط نانوسیال افزایش یافته است دمای متوسط آن کاهش یافته است (و برعکس). همچنین در هر دو آرایش، دمای متوسط سیال در میکروکانال‌های نزدیک به دیواره‌های جانبی چاه گرمایی، به علت حرارت بیش‌تری که از دیواره‌های جانبی دریافت می‌کنند، نسبت به میکروکانال‌های مرکزی بیش‌تر است. برای هر افت فشار مقادیر سرعت در میکروکانال‌های مشابه از دو آرایش یکسان نیست، با این وجود تفاوت دمای متوسط آن‌ها بسیار ناچیز است. حداکثر تفاوت مقادیر دما در میکروکانال‌های مشابه کم‌تر از 0.5K است، که معادل تفاوت نسبی کمتر از 0.1 درصد است.

در "شکل 9" تغییرات عدد ناسلت متوسط برحسب افت فشار برای نانوسیال آب-اکسید مس با کسر حجمی‌های 0، 2 و 4 درصد برای آرایش‌های I و U نشان داده شده است. همان‌طور که دیده می‌شود برای هر دو آرایش عدد ناسلت متوسط با افزایش افت فشار در یک کسر حجمی ثابت افزایش می‌یابد. با افزایش اختلاف فشار، سرعت سیال افزایش می‌یابد و موجب افزایش دبی جرمی سیال خنک کننده و کاهش دمای متوسط سیال می‌شود. همچنین این افزایش سرعت باعث افزایش جابجایی و در نتیجه کاهش دمای متوسط جامد می‌شود. مطابق رابطه (29) کاهش این دو دما عدد ناسلت را افزایش می‌دهد. این نتایج با یافته‌های مطالعات عددی وینودهان و راجان [8] و چین و چن [4] مطابقت دارد.

همان‌طور که از "شکل 9" مشاهده می‌شود، در هر دو آرایش I و U، با افزایش کسر حجمی از 0 تا 2 درصد عدد ناسلت متوسط به طور قابل توجه افزایش می‌یابد. با افزایش کسر حجمی گرمایی ویژه نانوسیال کاهش می‌یابد و به طور کلی مطابق رابطه‌ی (33) برای یک افت فشار مشخص باعث افزایش دمای نانوسیال و به طور خاص افزایش دمای متوسط آن می‌شود. از طرف دیگر با افزایش کسر حجمی، به دلیل افزایش رسانایی نانوسیال، انتقال حرارت افزایش می‌یابد و در نتیجه باعث کاهش دمای متوسط جامد می‌شود. در مجموع افزایش اختلاف این دو دما باعث افزایش ناسلت می‌شود. با این وجود با افزایش کسر حجمی از 2 به 4 درصد در افت فشارهای کم‌تر از 10 کیلوپاسکال عدد ناسلت متوسط تقریباً ثابت مانده و در افت فشارهای بیش‌تر از 10 کیلوپاسکال فقط تغییر ناچیزی داشته است. توجه این رفتار در بحثی که در ادامه برای چگونگی تغییرات مقاومت حرارتی ارائه می‌شود انجام شده است. همچنین نتایج نشان می‌دهد که از نظر ناسلت متوسط آرایش I همواره عملکرد بهتری از آرایش U دارد. این در حالی است که چین و چن [4] در مطالعه عددی بر روی چاه گرمایی با میکروکانال‌های مستطیلی نشان دادند که آرایش با ورود و خروج عمودی از نظر انتقال حرارت عملکرد بهتری نسبت به

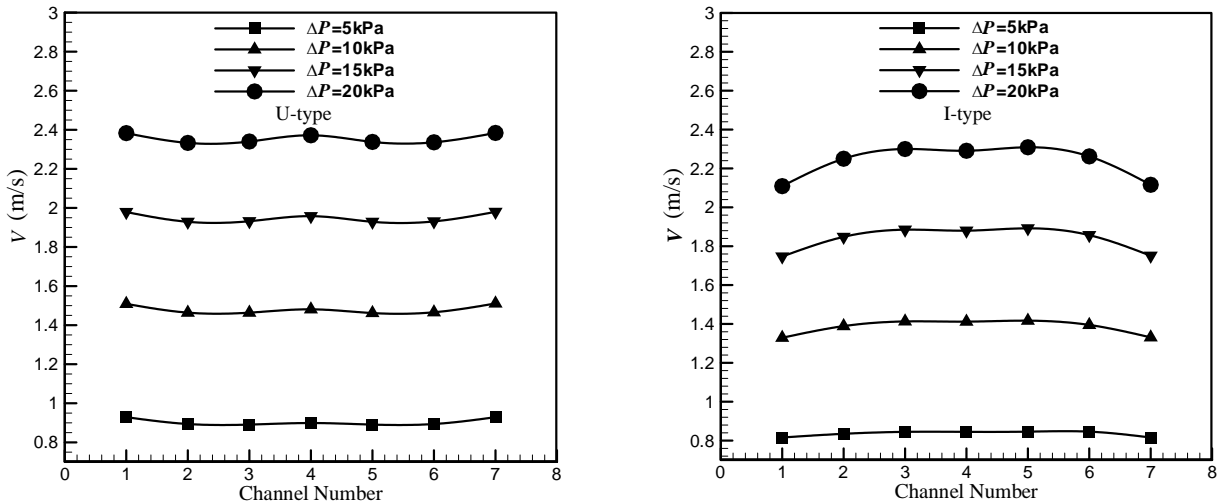


Fig. 7 Average velocity of CuO-water nanofluid with volume fraction of 2% in microchannels for different pressure drops

شکل 7 سرعت متوسط نانوسیال آب-اکسید مس با کسر حجمی 2 درصد در میکروکانال‌ها برای فشارهای مختلف

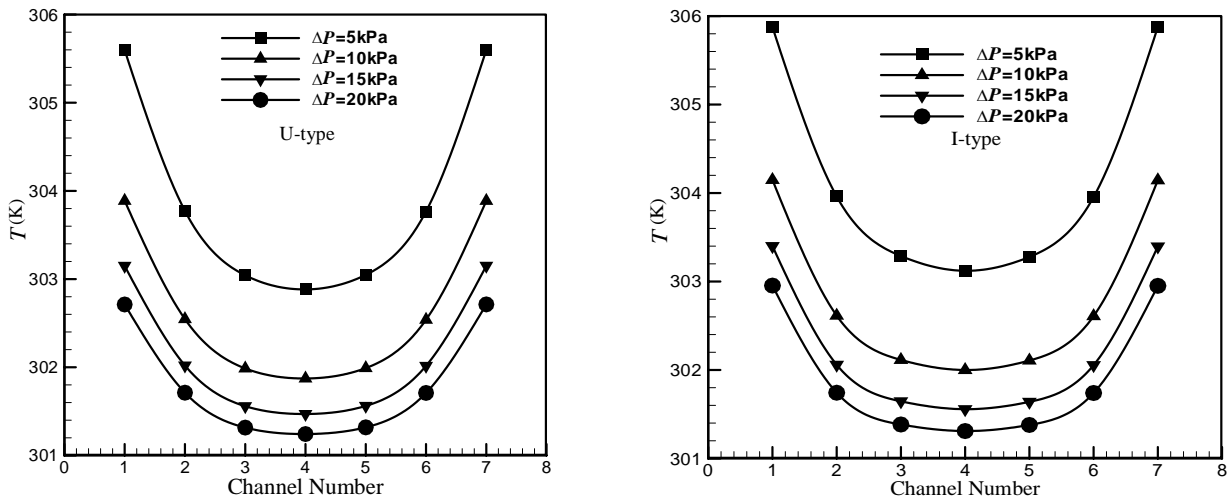


Fig. 8 Average temperature of CuO-water nanofluid with volume fraction of 2% in microchannels for different pressure drops

شکل 8 دمای متوسط نانوسیال آب-اکسید مس با کسر حجمی 2 درصد در میکروکانال‌ها برای فشارهای مختلف

پمپاژ مقاومت حرارتی چاه کاهش می‌یابد، موافقت دارد و نشان می‌دهد در افت فشارهای بالا مقاومت حرارتی کمتر میکروکانال‌ها قابل دست‌یابی است. همان‌طور که در "شکل 10" مشاهده می‌شود برای هر دو آرایش با افزایش کسر حجمی از 0 تا 2 درصد مقاومت حرارتی کاهش می‌یابد، اما با افزایش کسر حجمی از 2 تا 4 درصد افزایش می‌یابد. سیف و نیک‌آیین [6] نیز در مطالعه‌ی خود نشان دادند که تغییرات مقاومت حرارتی با افزایش کسر حجمی، وابسته به شرایط خاص هر مورد است. برای این که دلیل تغییرات نامنظم مقاومت حرارتی با افزایش کسر حجمی تحلیل شود بایستی اثرات استفاده از نانوذرات بر ضریب انتقال حرارت بررسی شود. استفاده از نانوذرات دو اثر مخالف بر ضریب انتقال حرارت و مقاومت حرارتی دارد. اثر نامطلوب مربوط به لزجت بالاتر در کسر حجمی‌های بالاتر نانوذرات است و اثر مطلوب مربوط به افزایش رسانایی با افزایش کسر حجمی نانوذرات است. افزایش رسانایی نانوسیال با افزایش کسر حجمی ضریب انتقال حرارت جابجایی را افزایش می‌دهد، ولی افزایش لزجت باعث کاهش سرعت و در نتیجه کاهش اثر جابجایی می‌شود و به تبع آن ضخامت لایه مرزی مجاور دیواره‌های میکروکانال افزایش می‌یابد. افزایش ضخامت لایه مرزی، باعث کاهش گرادینان دما در نزدیکی دیواره‌های میکروکانال می‌شود، که ضریب انتقال حرارت

آرایش با ورود و خروج افقی دارد. تغییر نوع میکروکانال‌های به کار رفته اولاً باعث تغییر نسبت حجم بخش جامد چاه گرمایی به حجم مجرای عبور سیال و ثانیاً باعث تغییر جزئیات مربوط به میدان سرعت و دما می‌شود. لذا برای یک نوع مشخص از آرایش ورود و خروج همیشه رفتار عملکردی یکسانی وجود نخواهد داشت. به عبارت دیگر شکل و هندسه میکروکانال‌ها یکی از عوامل تعیین‌کننده عملکرد چاه گرمایی است.

در "شکل 10" نمودار تغییرات مقاومت حرارتی برحسب اختلاف فشار برای نانوسیال آب-اکسید مس برای کسر حجمی‌های 0، 2 و 4 درصد برای دو آرایش I و U رسم شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود در یک کسر حجمی ثابت با افزایش اختلاف فشار مقاومت حرارتی برای هر دو آرایش کاهش می‌یابد. با افزایش افت فشار سرعت جریان سیال افزایش می‌یابد که باعث افزایش ضریب انتقال حرارت جابجایی و در نتیجه کاهش بیشینه دمای جامد می‌شود، لذا طبق رابطه (31) مقاومت حرارتی کاهش می‌یابد. به عبارت دیگر، همان‌طور که چای و همکاران [25] و چین و چن [4] نشان دادند، با افزایش افت فشار مقاومت جابجایی که یکی از ترم‌های مقاومت حرارتی کل است کاهش می‌یابد. نتایج تحقیق حاضر با مطالعات وینودهان و راجان [8]، جانگ و چوی [26] و هونگ و همکاران [27]، که نشان دادند با افزایش قدرت

جدول 5 مقادیر لزجت و رسانایی نانو سیال در دمای متوسط خود در چاه برای دو آرایش I و U در افت فشار 10 کیلو پاسکال

Table 5 The viscosity and conductivity of nanofluid at its average velocity in the MCHS of I- and U-types at pressure drop of 10 kPa

درصد اختلاف	رسانایی $(Wm^{-1}K^{-1})$	درصد اختلاف	لزجت $(Pa s)$	کسر حجمی ϕ	آرایش
-	0.61674	-	0.00079974	$\phi = 0$	I
17.27	0.72326	7.01	0.00085585	$\phi = 2$	
3.05	0.74535	4.45	0.00089398	$\phi = 4$	
-	0.61611	-	0.00080852	$\phi = 0$	U
16.93	0.72040	6.91	0.00086446	$\phi = 2$	
3.12	0.74288	4.49	0.00090327	$\phi = 4$	

می‌دهد در یک افت فشار ثابت بیشترین مقاومت حرارتی همواره برای آرایش U و سیال آب است و کمترین آن برای آرایش I و نانوسیال با کسر حجمی 2 درصد است. براساس نتایج ارائه شده در "شکل 10" مشاهده می‌شود که از نظر مقاومت حرارتی آرایش I همواره دارای عملکرد بهتری نسبت به آرایش U است. این در شرایطی است که نتایج عددی چین و چن [4] برای یک چاه گرمایی با میکروکانال‌های مستطیلی نشان داد آرایش با ورود و خروج عمودی مقاومت حرارتی پایین‌تری نسبت به آرایش با ورود و خروج افقی دارد. این عدم تطابق نشان‌دهنده تأثیر قابل ملاحظه شکل و سایر مشخصات هندسی میکروکانال‌های تعبیه شده در چاه گرمایی است.

تغییرات نسبت بیشینه اختلاف دمای کف چاه گرمایی به شار حرارتی برحسب افت فشار برای نانوسیال آب-اکسید مس به ازای کسر حجمی‌های 0، 2 و 4 درصد برای آرایش I و U در "شکل 11" نشان داده شده است. همان‌طور که از نمودارها مشاهده می‌شود برای هر دو آرایش در هر کسر حجمی ثابت با افزایش افت فشار نسبت بیشینه اختلاف دمای کف چاه گرمایی به شار حرارتی کاهش می‌یابد. با افزایش افت فشار، سرعت سیال خنک‌کننده افزایش می‌یابد و در اثر آن نرخ انتقال حرارت، به دلیل افزایش ضریب انتقال حرارت جابجایی، افزایش یافته و خنک‌کاری کف چاه گرمایی به نحو مطلوب‌تری انجام می‌شود. بنابراین در افت فشارهای بالاتر، مقادیر کم‌تر حداکثر دمای کف چاه گرمایی و یکنواختی دمایی بهتری قابل دستیابی است. نتایج تحقیق حاضر با نتایج عددی آلوارادو و همکاران [28]، که نشان دادند با افزایش قدرت پمپاژ نسبت بیشینه اختلاف دمای کف چاه گرمایی به شار حرارتی کاهش می‌یابد، موافقت دارد. نتایج ارائه شده در "شکل 11" نشان می‌دهد تغییر کسر حجمی تأثیر قابل توجهی بر میزان نسبت بیشینه اختلاف دمای کف چاه گرمایی به شار حرارتی، به ویژه در افت فشارهای تا 10 کیلو پاسکال، ندارد. در افت فشارهای بالاتر تغییر نسبت بیشینه اختلاف دمای کف چاه گرمایی به شار حرارتی با افزایش کسر حجمی روندی مشابه با تغییر مقاومت حرارتی با کسر حجمی دارد. به عبارت دیگر نسبت بیشینه اختلاف دمای کف چاه گرمایی به شار حرارتی با افزایش کسر حجمی ابتدا کاهش و سپس افزایش می‌یابد. دلیل این روند متفاوت کاهش یا افزایشی همان‌طور که بیان شد ناشی از اثرات مثبت و منفی افزایش کسر حجمی به ترتیب بر تغییر رسانایی و تغییر لزجت است. برای تمام شرایط مطالعه شده و از نظر خنک‌کاری کف چاه گرمایی آرایش I نسبت به آرایش U عملکرد بهتری از خود نشان داده است. تفاوت عملکرد این دو آرایش در خنک‌کاری کف چاه گرمایی ناشی از تفاوت در میدان سرعت و دما در بخش سیال و همچنین میدان دما در بخش جامد است.

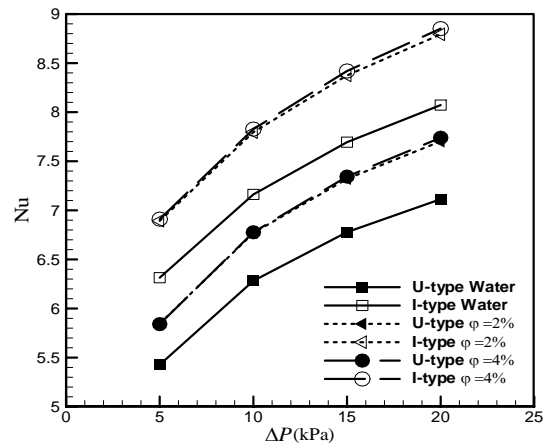


Fig. 9 Variation of average Nusselt number in terms of pressure drop for two inlet/outlet arrangements and volume fractions of 0, 2 and 4%
شکل 9 تغییرات عدد ناسلت متوسط بر حسب افت فشار برای دو آرایش ورود و خروج و کسر حجمی‌های 0، 2 و 4 درصد

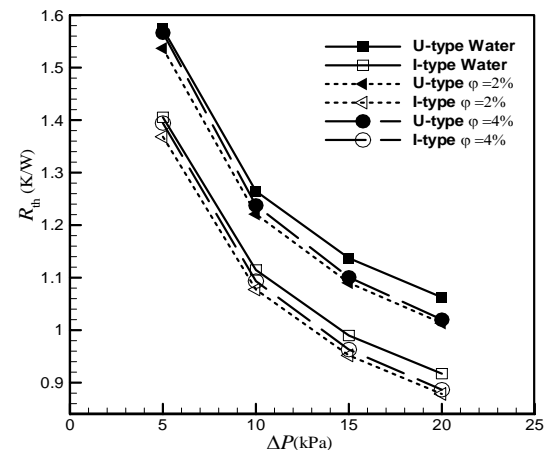


Fig. 10 Variation of thermal resistance in terms of pressure drop for two inlet/outlet arrangements and volume fractions of 0, 2 and 4%
شکل 10 تغییرات مقاومت حرارتی بر حسب افت فشار برای دو آرایش ورود و خروج و کسر حجمی‌های 0، 2 و 4 درصد

جابجایی را کاهش و مقاومت حرارتی را افزایش می‌دهد. کاهش مقاومت حرارتی با افزایش کسر حجمی از 0 تا 2 درصد بیان‌گر این است که در این بازه اثر مثبت افزایش رسانایی بیش از اثر منفی افزایش لزجت است، اما برای افزایش کسر حجمی از 2 تا 4 درصد اثر منفی افزایش لزجت بیش‌تر است. در جدول 5 مقادیر لزجت و رسانایی نانوسیال در دمای متوسط در کل چاه گرمایی برای دو آرایش I و U به عنوان نمونه در افت فشار 10 کیلو پاسکال ارائه شده است. همان‌طور که از جدول 5 مشاهده می‌شود، برای هر دو آرایش با افزایش کسر حجمی از 0 به 2 درصد، لزجت حدود 7 درصد و رسانایی حدود 17 درصد افزایش یافته‌اند. این در حالی است که با افزایش کسر حجمی از 2 به 4 درصد، به‌طور نسبی لزجت حدود 4.5 درصد و رسانایی فقط حدود 3 درصد افزایش یافته‌اند. بنابراین اثر مثبت افزایش رسانایی در بازه 0 تا 2 درصد بیش از اثر منفی افزایش لزجت است، که باعث کاهش مقاومت حرارتی شده است، اما اثر منفی افزایش لزجت در بازه 2 تا 4 درصد بیش از اثر مثبت افزایش رسانایی است که باعث افزایش مقاومت حرارتی شده است. روندی که در رابطه با چگونگی تغییرات ناسلت متوسط با افزایش کسر حجمی از 2 به 4 درصد مشاهده شد نیز به همین دلیل است. نتایج نشان

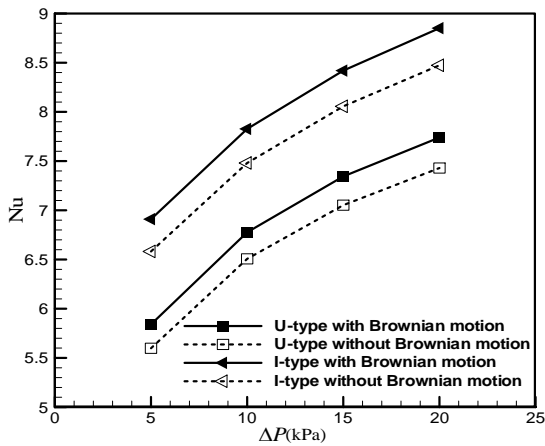


Fig. 12 Variation of average Nusselt number in terms of pressure drop for two inlet/outlet arrangements and volume fractions of 4% with/without considering Brownian motion

شکل 12 تغییرات عدد ناسلت متوسط بر حسب افت فشار برای دو آرایش ورود و خروج و کسر حجمی 4 درصد بایندون در نظر گرفتن حرکت براونی

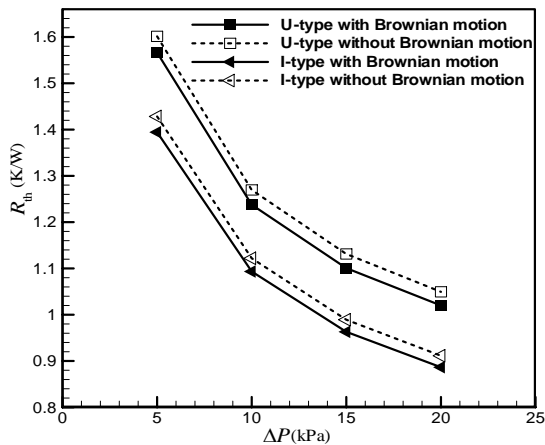


Fig. 13 Variation of thermal resistance in terms of pressure drop for two inlet/outlet arrangements and volume fractions of 4% with/without considering Brownian motion

شکل 13 تغییرات مقاومت حرارتی بر حسب افت فشار برای دو آرایش ورود و خروج و کسر حجمی 4 درصد بایندون در نظر گرفتن حرکت براونی

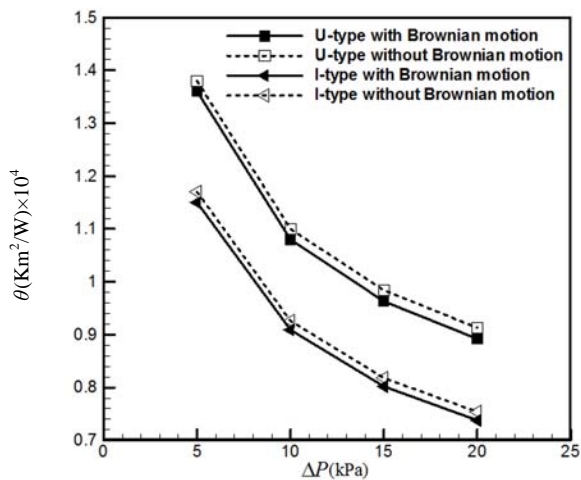


Fig. 14 Variation of theta in terms of pressure drop for two inlet/outlet arrangements and volume fractions of 4% with/without considering Brownian motion

شکل 14 تغییرات نسبت بیشینه اختلاف دمای کف چاه گرمایی با افت فشار برای دو آرایش ورود و خروج و کسر حجمی 4 درصد بایندون در نظر گرفتن حرکت براونی

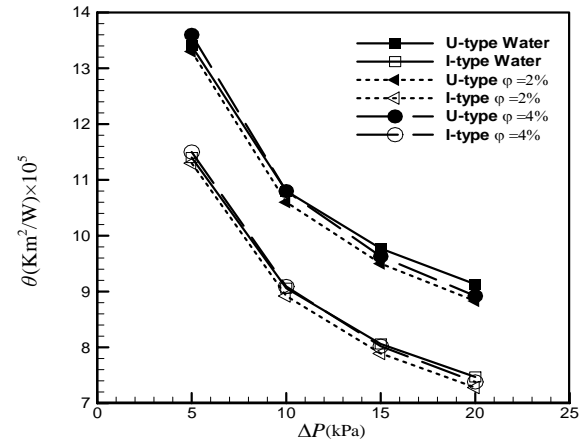


Fig. 11 Variation of theta in terms of pressure drop for two inlet/outlet arrangements and volume fractions of 0, 2 and 4%

شکل 11 تغییرات نسبت بیشینه اختلاف دمای کف چاه گرمایی بر حسب افت فشار برای دو آرایش ورود و خروج و کسر حجمی های 0، 2 و 4 درصد

سیف و نیک آیین [6] نشان دادند در نظر گرفتن حرکت براونی برای نانوذرات اکسید آلومینیوم موجب کاهش مقادیر مقاومت حرارتی می‌شود. به منظور نشان دادن اثرات حرکت براونی در پیش‌بینی سه شاخص عملکردی چاه گرمایی این تحقیق، در "شکل 12 تا 14" به ترتیب تغییر عدد ناسلت متوسط، مقاومت حرارتی و نسبت بیشینه اختلاف دمای کف چاه گرمایی به شار حرارتی با افت فشار برای نانوسیال آب-اکسید مس به ازای کسر حجمی 4 درصد، با و بدون در نظر گرفتن اثر حرکت براونی، ارائه شده‌اند. نتایج نشان می‌دهد در نظر گرفتن حرکت براونی نانوذرات موجب می‌شود عدد ناسلت متوسط افزایش اما مقاومت حرارتی و نسبت بیشینه اختلاف دمای کف چاه گرمایی به شار حرارتی کاهش یابد. در این خصوص عدد ناسلت متوسط بین 4 تا 5 درصد افزایش، مقاومت حرارتی بین 2 تا 3.5 درصد کاهش و نسبت بیشینه اختلاف دمای کف چاه گرمایی به شار حرارتی بین 1.5 تا 2.5 درصد کاهش یافته‌اند.

افزودن نانوذرات به سیال پایه یک اثر مثبت در افزایش ضریب انتقال حرارت جابجایی و یک اثر منفی در افزایش میزان افت فشار دارد که موجب افزایش قدرت پمپاژ موردنیاز می‌شود. برای آن‌که بتوان اثر بهبود عملکرد حرارتی را نسبت به افزایش توان پمپاژ موردنیاز مورد بررسی قرار داد از معیار شایستگی¹ برای بررسی اثر استفاده از نانوسیال در کاهش حداکثر دمای کف چاه گرمایی از پارامتر اثربخشی کنترل دما² استفاده می‌شود [29]. هو و چن [29] در یک تحقیق تجربی معیار شایستگی را برای یک چاه گرمایی مینی‌کانالی مستطیلی مطالعه و نشان دادند که اثر مثبت استفاده از نانوسیال آب-آلومینا در افزایش ضریب انتقال حرارت جابجایی نسبت به اثر منفی افزایش قدرت پمپاژ مورد نیاز برتری دارد. همچنین هو و چن [29] نشان دادند که استفاده از نانوسیال آب-آلومینا نسبت به سیال آب موجب کاهش دمای کف چاه گرمایی و بهبود خنک‌کاری کف مینی‌کانال می‌شود. به منظور مقایسه عملکرد نانوسیال نسبت به سیال معمولی (آب) در بهبود خنک‌کاری چاه گرمایی این تحقیق، دو پارامتر معیار شایستگی و اثربخشی کنترل دما محاسبه و مقادیر آن‌ها در جدول 6 ارائه شده‌اند. چنان‌که دیده می‌شود معیار شایستگی همیشه از یک بزرگتر است و از این نظر آرایش I بهتر از U است، اما در هر دو آرایش با افزایش کسر حجمی از 2 به 4 درصد معیار شایستگی

¹ Figure of Merit

² Temperature control effectiveness

جدول 6 معیار شایستگی و اثربخشی کنترل دما در افت فشارهای مختلف برای دو آرایش ورود و خروج و برای کسر حجمی 2 و 4 درصد

Table 6 Figure of merit and temperature control effectiveness variations for various arrangements in terms of pressure drop for two inlet/outlet arrangements and volume fractions of 2 and 4%

نوع آرایش	کسر حجمی (%)	افت فشار (kPa)	معیار شایستگی	اثر بخشی کنترل دما (%)	
I	2	5	1.07	2.63	
		10	1.07	3.34	
		15	1.07	3.83	
	4	20	1.07	4.21	
		5	1.06	0.78	
		10	1.06	1.90	
U	2	15	1.06	2.71	
		20	1.06	3.33	
		5	1.06	2.35	
	4	10	1.06	3.46	
		15	1.06	4.14	
		20	1.06	4.62	
	U	2	5	1.04	0.47
			10	1.04	2.14
			15	1.05	3.20
		4	20	1.05	3.99

از 2 تا 4 درصد افزایش ناچیزی دارد. همچنین در یک افت فشار ثابت، در هر دو آرایش I و U با افزایش کسر حجمی از 0 تا 2 درصد مقاومت حرارتی کاهش و با افزایش کسر حجمی از 2 تا 4 درصد افزایش می‌یابد. این روند به دلیل اثر افزایش غیر یکسان رسانایی و لزجت نانوسپال با افزایش کسر حجمی است.

4. برای هر دو آرایش I و U در افت فشارهای تا 10 کیلوپاسکال تغییرات کسر حجمی تأثیر چندانی بر نسبت بیشینه اختلاف دمای کف چاه گرمایی به شارحرارتی ندارد. در افت فشارهای بزرگ‌تر از 10 کیلوپاسکال، با افزایش کسر حجمی از 0 تا 2 درصد نسبت بیشینه اختلاف دمای کف چاه گرمایی به شار حرارتی کاهش و با افزایش کسر حجمی از 2 تا 4 درصد افزایش می‌یابد.

5. مقایسه نتایج این تحقیق با نتایج برخی مطالعات پیشین در خصوص اهمیت آرایش ورود و خروج نشان داد که عملکرد چاه گرمایی فقط وابسته به نوع آرایش ورودی و خروجی نیست و به هندسه میکروکانال‌ها از نظر شکل هندسی و نسبت بخش جامد به بخش سیال هم وابسته است.

6. برای چاه گرمایی این تحقیق با میکروکانال‌های مثلثی از نظر انتقال حرارت، مقاومت حرارتی و نسبت بیشینه اختلاف دمای کف چاه گرمایی به شار حرارتی آرایش I با ورود و خروج افقی نسبت به آرایش U با ورود و خروج عمودی عملکرد بهتری دارد.

7. با در نظر گرفتن اثرات حرکت براونی نانوذرات، ناسلت متوسط افزایش و مقاومت حرارتی و نسبت بیشینه اختلاف دمای کف چاه گرمایی به شار حرارتی کاهش می‌یابد.

8. معیار شایستگی مربوط به استفاده از نانوسپال در مقایسه با سیال پایه (آب) همیشه از یک بزرگ‌تر است و برای آرایش I بهتر از آرایش U است. البته با افزایش کسر حجمی از 2 به 4 درصد مقدار آن کاهش می‌یابد.

9. از نظر اثربخشی کنترل دما در افت فشار پایین (5 کیلوپاسکال) آرایش I عملکرد بهتری نسبت به آرایش U دارد اما در افت فشارهای بیش‌تر از 5 کیلوپاسکال آرایش U عملکرد بهتری دارد.

کاهش می‌یابد. همچنین استفاده از نانوسپال موجب کاهش دمای حداکثر کف چاه گرمایی می‌شود. در تحقیق حاضر آرایش I در افت فشار 5 کیلوپاسکال (برای کسر حجمی 2 و 4 درصد) در کاهش دمای حداکثر کف چاه گرمایی عملکرد بهتری نسبت به آرایش U دارد اما در افت فشار 10، 15 و 20 کیلوپاسکال آرایش U عملکرد بهتری دارد. در هر دو آرایش، اثربخشی کنترل دما با افزایش کسر حجمی کاهش و با افزایش افت فشار افزایش می‌یابد. نتایج نشان می‌دهد استفاده از نانوسپال موجب کاهش حداکثر دمای کف چاه گرمایی حداقل به اندازه 0.78 و حداکثر 4.62 درصد شده است.

7- نتیجه گیری

در این تحقیق عددی اثر دو آرایش مختلف با ورود و خروج افقی (آرایش I) و عمودی (آرایش U) بر میدان جریان و انتقال حرارت و سایر مشخصه‌های عملکردی چاه گرمایی، شامل هفت میکروکانال با مقطع مثلث متساوی‌الساقین، و با لحاظ نمودن هدایت در قسمت‌های جامد به صورت سه بعدی بررسی شده است. برای حل معادلات حاکم از روش حجم محدود استفاده شده است و شبیه‌سازی‌ها برای نانوسپال آب-اکسید مس به ازای کسر حجمی‌های 0، 2 و 4 درصد و برای افت فشار در محدوده 5 تا 20 کیلوپاسکال انجام شده‌اند. در شبیه‌سازی‌های انجام شده وابستگی خواص ترموفیزیکی سیال پایه و نانوسپال به دما و همچنین اثر حرکت براونی نانوذرات لحاظ شده است. شبیه‌سازی‌ها برای نانوسپال با قطر نانوذرات 36 نانومتر و با اعمال شارحرارتی 125 کیلووات بر مترمربع به کف چاه گرمایی انجام شده‌است. نتایج نشان می‌دهند که:

1. نحوه توزیع سرعت و دمای متوسط نانوسپال در میکروکانال‌ها وابسته به نوع آرایش ورود و خروج است. با این وجود در هر دو آرایش I و U توزیع سرعت و دمای متوسط در میکروکانال‌ها نسبت به میکروکانال میانی متقارن است.

2. با افزایش افت‌فشار در هر دو آرایش I و U عددناسلت متوسط افزایش می‌یابد، اما مقاومت حرارتی و نسبت بیشینه اختلاف دمای کف چاه گرمایی به شار حرارتی کاهش می‌یابد.

3. در یک افت فشار ثابت، در هر دو آرایش I و U با افزایش کسر حجمی از 0 تا 2 درصد عدد ناسلت متوسط افزایش چشم‌گیر و با افزایش کسر حجمی

8- فهرست علائم

A	سطح مقطع میکروکانال (m ²)
c	گرمای ویژه (Jkg ⁻¹ K ⁻¹)
D _n	قطر هیدرولیکی میکروکانال (m)
H	ارتفاع (m)
h	ضریب جابجایی حرارتی (Wm ⁻² K ⁻¹)
k	رسانایی (Wm ⁻¹ K ⁻¹)
L	طول (m)
m	دبی جرمی (kgs ⁻¹)
Nu	عدد ناسلت متوسط
P	فشار (kgm ⁻¹ s ⁻²)
p	محیط تر شده (m)
Q	حرارت جذب شده (W)
q	شار حرارتی (Wm ⁻²)
R _{th}	مقاومت حرارتی (KW ⁻¹)
T	دما (K)
u	مولفه سرعت در راستای x (ms ⁻¹)
v	مولفه سرعت در راستای y (ms ⁻¹)
w	مولفه سرعت در راستای z (ms ⁻¹)

- Management, Vol. 86, pp. 595-604, 2014.
- [9] V. Duryodhan, A. Singh, S. Singh, A. Agrawal, Convective heat transfer in diverging and converging microchannels, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 80, pp. 424-438, 2015.
- [10] B. Fani, M. Kalteh, A. Abbassi, Investigating the effect of Brownian motion and viscous dissipation on the nanofluid heat transfer in a trapezoidal microchannel heat sink, *Advanced Powder Technology*, Vol. 26, No. 1, pp. 83-90, 2015.
- [11] M. Dehghan, M. Daneshpour, M. S. Valipour, R. Rafee, S. Saedodin, Enhancing heat transfer in microchannel heat sinks using converging flow passages, *Energy Conversion and Management*, Vol. 92, pp. 244-250, 2015.
- [12] M. Salimi Gachuiee, S. M. Peyghambarzadeh, S. H. Hashemabadi, A. Chabi, Experimental investigation of convective heat transfer of Al_2O_3 /water nanofluid through the micro heat exchanger, *Modares Mechanical Engineering* Vol. 15, No. 2, pp. 270-280, 2015. (in Persian فارسی)
- [13] H. Khorasanizadeh, M. Sepehrnia, Effects of different inlet/outlet arrangements on performance of a trapezoidal porous microchannel heat sink, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 16, No. 8, pp. 269-280, 2016. (in Persian فارسی)
- [14] G. Hetsroni, A. Mosyak, Z. Segal, Nonuniform temperature distribution in electronic devices cooled by flow in parallel microchannels, *Components and Packaging Technologies, IEEE Transactions on*, Vol. 24, No. 1, pp. 16-23, 2001.
- [15] Y. Xuan, W. Roetzel, Conceptions for heat transfer correlation of nanofluids, *International Journal of heat and Mass transfer*, Vol. 43, No. 19, pp. 3701-3707, 2000.
- [16] K. Khanafer, K. Vafai, A critical synthesis of thermophysical characteristics of nanofluids, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 54, No. 19, pp. 4410-4428, 2011.
- [17] J. Koo, C. Kleinstreuer, A new thermal conductivity model for nanofluids, *Journal of Nanoparticle Research*, Vol. 6, No. 6, pp. 577-588, 2004.
- [18] H. Brinkman, The viscosity of concentrated suspensions and solutions, *The Journal of Chemical Physics*, Vol. 20, No. 4, pp. 571-571, 1952.
- [19] J. Koo, C. Kleinstreuer, Laminar nanofluid flow in microheat-sinks, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 48, No. 13, pp. 2652-2661, 2005.
- [20] S. J. Palm, G. Roy, C. T. Nguyen, Heat transfer enhancement with the use of nanofluids in radial flow cooling systems considering temperature-dependent properties, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 26, No. 17, pp. 2209-2218, 2006.
- [21] C. Glassbrenner, G. A. Slack, Thermal conductivity of silicon and germanium from 3 K to the melting point, *Physical Review*, Vol. 134, No. 4A, pp. A1058, 1964.
- [22] J. Li, G. Peterson, P. Cheng, Three-dimensional analysis of heat transfer in a micro-heat sink with single phase flow, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 47, No. 19, pp. 4215-4231, 2004.
- [23] R. Chein, J. Chuang, Experimental microchannel heat sink performance studies using nanofluids, *International Journal of Thermal Sciences*, Vol. 46, No. 1, pp. 57-66, 2007.
- [24] R. J. Phillips, Microchannel heat sinks, The Lincoln Laboratory Journal, Vol. 1, No. 1, pp. 31-48, 1988.
- [25] L. Chai, G. Xia, M. Zhou, J. Li, J. Qi, Optimum thermal design of interrupted microchannel heat sink with rectangular ribs in the transverse microchambers, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 51, No. 1, pp. 880-889, 2013.
- [26] S. P. Jang, S. U. Choi, Cooling performance of a microchannel heat sink with nanofluids, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 26, No. 17, pp. 2457-2463, 2006.
- [27] T.-C. Hung, Y.-X. Huang, W.-M. Yan, Thermal performance analysis of porous-microchannel heat sinks with different configuration designs, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 66, pp. 235-243, 2013.
- [28] B. Ramos-Alvarado, P. Li, H. Liu, A. Hernandez-Guerrero, CFD study of liquid-cooled heat sinks with microchannel flow field configurations for electronics, fuel cells, and concentrated solar cells, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 31, No. 14, pp. 2494-2507, 2011.
- [29] C. Ho, W. Chen, An experimental study on thermal performance of Al_2O_3 /water nanofluid in a minichannel heat sink, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 50, No. 1, pp. 516-522, 2013.

عرض (m)	W
طول ورودی هیدرودینامیکی (m)	$X_{fd,h}$
مؤلفه‌های مختصاتی	x, y, z
علایم یونانی	
کسر حجمی	ϕ
لزجت دینامیکی ($kgm^{-1}s^{-1}$)	μ
چگالی (kgm^{-3})	ρ
نسبت بیشینه اختلاف دمای کف چاه گرمایی به شارحرارتی	θ
	$(K m^2 W^{-1})$
زیرنویس‌ها	
مقدار متوسط	avg
کف چاه گرمایی	b
براونی	Brownian
کانال	ch
موثر	eff
سیال	f
جریان سیال	flow
چاه گرمایی	hs
ورودی	in
حداکثر	max
حداقل	min
نانوسیال	nf
نانوذره	np
خروجی	out
جامد	s
سیلیکون	Silicon
استاتیکی	Static
دیوار	w

9- مراجع

- [1] H. Wu, P. Cheng, Friction factors in smooth trapezoidal silicon microchannels with different aspect ratios, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 46, No. 14, pp. 2519-2525, 2003.
- [2] I. Tiselj, G. Hetsroni, B. Mavko, A. Mosyak, E. Pogrebnyak, Z. Segal, Effect of axial conduction on the heat transfer in microchannels, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 47, No. 12, pp. 2551-2565, 2004.
- [3] R. Chein, G. Huang, Analysis of microchannel heat sink performance using nanofluids, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 25, No. 17, pp. 3104-3114, 2005.
- [4] R. Chein, J. Chen, Numerical study of the inlet/outlet arrangement effect on microchannel heat sink performance, *International Journal of Thermal Sciences*, Vol. 48, No. 8, pp. 1627-1638, 2009.
- [5] H. Mohammed, P. Gunnasegaran, N. Shuaib, The impact of various nanofluid types on triangular microchannels heat sink cooling performance, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol. 38, No. 6, pp. 767-773, 2011.
- [6] H. R. Seyf, B. Nikaaein, Analysis of Brownian motion and particle size effects on the thermal behavior and cooling performance of microchannel heat sinks, *International Journal of Thermal Sciences*, Vol. 58, pp. 36-44, 2012.
- [7] K. Leong, H. C. Ong, Entropy generation analysis of nanofluids flow in various shapes of cross section ducts, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol. 57, pp. 72-78, 2014.
- [8] V. L. Vinodhan, K. Rajan, Computational analysis of new microchannel heat sink configurations, *Energy Conversion and*