



شبیه‌سازی عددی انتقال حرارت جابه‌جایی اجباری فلزات مایع در یک چاه گرمایی میکروکانال تحت میدان مغناطیسی

احمدرضا رحمتی^{۱*}، عباس ملایی^۲

^۱ دانشیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه کاشان، کاشان، ایران

^۲ کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه کاشان، کاشان، ایران

مقاله مستقل، تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۵/۱۷؛ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۲/۰۹/۲۹؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۱۲/۲۵

چکیده

افزایش نرخ انتقال حرارت در صنایع مختلف به جهت بهبود کارایی تجهیزات، جلوگیری از آسیب به قطعات و کاهش هزینه، از بحث‌های ضروری در صنعت است. از جمله راه‌حل‌های افزایش انتقال حرارت، استفاده از چاه‌های حرارتی فعال است. در این پژوهش از یک چاه حرارتی فعال با سیال فلز مایع گالینستن استفاده شده و گسسته‌سازی معادلات ناویراستوکس به روش حجم محدود مرتبه دوم بالادست انجام شده است. اثر اعمال میدان مغناطیسی در جهت Y (عمود بر محور جریان) به چاه حرارتی، سبب به وجود آمدن نیرویی در خلاف جهت حرکت جریان به نام نیروی لورنتز شده که توزیع سرعت M شکل را باعث شده است. باتوجه به شرط مرزی شار ثابت، افزایش سرعت جریان در مجاورت دیواره‌ها سبب کاهش دمای سطوح و بهبود انتقال حرارت شده است. نتایج نشان دادند، اثر اعمال میدان مغناطیسی خارجی یکنواخت در دو راستای Y و X با عدد هارتمن ۵۱۷، عدد ناسلت را به ترتیب ۳۸ و ۱۳ درصد نسبت به عدد هارتمن صفر بهبود بخشیده است. اثر اعمال میدان مغناطیسی در جهت Y به چاه حرارتی با عدد هارتمن ۵۱۷، ۳۸ درصد، عدد هارتمن ۲۵۸، ۲۲ درصد و عدد هارتمن ۱۲۹، ۱۳ درصد انتقال حرارت را بهبود داده است.

کلمات کلیدی: انتقال حرارت جابه‌جایی اجباری؛ میدان مغناطیسی؛ فلز مایع، چاه حرارتی؛ میکروکانال.

Numerical simulation of forced heat transfer of liquid metals in a microchannel heat sink under a magnetic field

Ahmad Reza Rahmati^{1,*}, Abbas Molaie²

¹ Assoc. Prof., Department of Mechanical Engineering, University of Kashan, Kashan, Iran

² MSc student, Department of Mechanical Engineering, University of Kashan, Kashan, Iran

Abstract

Increasing the heat transfer rate in various industries in order to improve the efficiency of equipment, prevent damage to parts and reduce costs is one of the essential discussions in the industry. One of the solutions to increase heat transfer is the use of active heat sink. In this research, an active heat sink with Galinsten liquid metal fluid was used and the discretization of Navier-stokes equations was done using the second order upstream finite volume method. The effect of applying the magnetic field in the Y direction (perpendicular to the flow axis) to the heat sink has caused the creation of a force against the flow direction called the Lorentz force, which has caused the M-shaped velocity distribution. According to the constant flux boundary condition, increasing the flow velocity in the vicinity of the walls has caused the surface temperature to decrease and the heat transfer to improve. The results showed that the effect of applying a uniform external magnetic field in both Y and X directions with a Hartmann number of 517 improved the Nusselt number by 38% and 13%, respectively, compared to a Hartmann number of zero. The effect of applying a magnetic field in the Y direction to the heat well with a Hartmann number of 517, 38%, Hartmann number of 258, 22% and Hartmann number of 129, 13% has improved the heat transfer..

Keywords: Forced convection heat transfer; magnetic field; liquid metal; heat sink; microchannel.

۱- مقدمه

خنک کاری یکی از دغدغه های اصلی در بسیاری از صنایع مختلف است، به عنوان مثال، دستگاه های الکترونیکی، ابزارهای بخار شیمیایی، کلکتورهای انرژی خورشیدی و بسیاری موارد دیگر. برای جلوگیری از ایجاد نقاط داغ که طول عمر دستگاه های مکانیکی یا حتی آسیب دائمی قطعات الکترونیکی را کاهش می دهد، دمای قطعات باید کاهش یابد؛ بنابراین، یک تکنیک خنک کننده مؤثر برای از بین بردن بار حرارتی روی سیستم و حفظ بیشینه عملکرد در همه شرایط ضروری است. چاه گرمایی یک وسیله تبادل حرارت است که با استفاده از مایعات کاری مختلف، گرم را از محیط اطراف از طریق پدیده انتقال حرارت جذب می کند. استفاده اصلی آن ها برای دفع شار حرارتی بالا از منابع حرارتی با توان بالا در یک فضای محدود می باشد. نوع سیال عامل نیز عامل مهمی برای عملکرد چاه های گرمایی میکروکانالی است. رسانایی حرارتی فلزات مایع معمولاً ۲۰ تا ۳۰ برابر بیشتر از آب است. با اعمال میدان مغناطیسی بر روی یک سیال رسانای الکتریکی و فرو سیال ها، دو پدیده مگنتوهیدرودینامیک و فروهیدرودینامیک می توانند به ترتیب رخ دهند که به یک زمینه فعال در خنک سازی الکترونیکی تبدیل شده است.

از زمان اولین کار توسط تاگرمین و پیس [۱] تحقیقات زیادی برای مطالعه عملکرد حرارتی و ویژگی های هیدرولیکی چاه های حرارتی میکروکانالی انجام شده است. کو و موداوار [۲] یک میکروکانال مسی ساختند و آن را در شارهای حرارتی مختلف آزمایش کردند. چاه گرمایی از مس بدون اکسیژن ساخته شده بود و با یک صفحه پوشش پلاستیکی پلی کربنات ثابت شده بود. از آب دیونیزه به عنوان مایع خنک کننده استفاده شد و مقادیر شار حرارتی مختلف ۱۰۰ و ۲۰۰ وات بر سانتی متر مربع مورد بررسی قرار گرفت. نتایج آنها نشان داد که اعداد رینولدز بالا، هم در کاهش دمای خروجی آب و هم دمای داخل چاه حرارتی سودمند است؛ اما این موضوع به قیمت افت فشار بیشتر محقق می شود.

گوناگاران و همکاران [۳] جریان و ویژگی های انتقال حرارت همرفتی آب را در میکروکانال های مستطیلی، دوزنقه ای و مثلثی بررسی کردند. در مطالعه آن ها، اثر پارامترهای هندسی بر جریان آب و ویژگی های انتقال حرارت در میکروکانال ها به صورت عددی برای محدوده اعداد رینولدز ۱۰۰-۱۰۰۰

بررسی شده است. معادلات سه بعدی ثابت، جریان آرام و انتقال حرارت حاکم با استفاده از روش حجم محدود و الگوریتم سیمپل حل شده است. نتایج آن ها نشان داد چاه حرارتی با کمترین قطر هیدرولیکی از نظر افت فشار و ضریب اصطکاک در بین سایر چاه حرارتی های مورد مطالعه، عملکرد بهتری دارد. زاخار و همکاران [۴] افزایش انتقال حرارت پایدار در مبدل های حرارتی لوله ای پیچ خورده را مورد مطالعه قرار دادند. سیم پیچ های مبدل حرارتی با پیچربندی دیواره راه راه به میزان ۸۰ تا ۱۰۰ درصد افزایش میزان انتقال حرارت را به دلیل حرکت چرخشی که ایجاد می کند، در پی دارد. در حالی که افت فشار نسبی ۱۰ تا ۶۰۰ درصد بیشتر از مبدل های حرارتی معمولی با مارپیچ است.

سپهرنیا و رحمتی [۵] جریان لغزش گاز هلیوم در یک چاه گرمایی میکروکانالی سه بعدی با ۱۱ میکروکانال و ۱۰ پره مستطیلی را بررسی کردند. جریان گاز هلیوم ایدنال و غیر قابل تراکم در نظر گرفته شد. برای انجام محاسبات از روش حجم محدود با استفاده از الگوریتم کوپل شده استفاده شده است. نتایج آنها نشان داد که در طول میکروکانال، عدد نادسن محلی کاهش می یابد. همچنین مقاومت حرارتی با افزایش عدد نادسن از ۰/۰۰۶ به ۰/۰۴۸ به طور مداوم افزایش می یابد.

کومار و همکاران [۶] کارهایی را با تمرکز بر تأثیر ترتیبات ورودی و خروجی بر عملکرد حرارتی و هیدرولیکی انجام دادند. شبیه سازی عددی چاه حرارتی میکروکانالی موازی مسی، متشکل از بیست و پنج کانال برای طراحی معمولی و طرح پیشنهادی توسط نرم افزار انسیس فلونت صورت گرفت. مشاهده شد که طرح پیشنهادی، توزیع جریان را تا ۹۳/۷ درصد کاهش می دهد که خنک سازی یکنواخت مؤثر در کل منطقه پیش بینی شده میکروکانال را تسهیل می کند.

لی و همکاران [۷] عملکرد حرارتی و ویژگی های جریان پنج طرح چاه گرمایی، از جمله دنده های متخلخل تک لایه، دنده جامد تک لایه، دنده جامد دولایه، دنده متخلخل دولایه و مخلوط دولایه را مقایسه کردند. مشخص شد که چاه حرارتی میکروکانالی دولایه، ترکیبی از افت فشار کم و عملکرد حرارتی بالا را پردازش می کند.

شمالی و رحمتی [۸] روش شبکه بولتزمن آبشاری را با شرط مرزی لغزشی مرتبه دوم برای بررسی جریان های گازی در یک میکروکانال در رژیم های جریان لغزشی و انتقال، با طیف

محلول و سوسپانسیون توسط محققان پیشنهاد شده است. چین و هوانگ [۱۲] به بررسی عملکرد گرمایی جریان نانوسیال‌های مختلف استفاده شده در میکروکانال‌ها و با دو هندسه متفاوت به صورت عددی و تجربی پرداختند. نانوسیال مورد استفاده در مدل‌سازی‌های عددی به صورت تک‌فاز در نظر گرفته شده بود. در نتایج آن‌ها ذکر شده است که عملکرد هر دو هندسه موقع استفاده از نانوسیال‌ها به‌عنوان سیال خنک‌کننده، بهبود یافته و همچنین عدم ایجاد افت فشار اضافی به دلیل کوچک بودن اندازه ذرات و کسر حجمی کم نانوذرات در سیال پایه نیز مشاهده شده است.

درزی و همکاران [۱۳] با استفاده از روش دوفازی یک بار میزان انتقال حرارت آشفته نانوسیال آب-آلومینا و یک بار هم میزان انتقال حرارت آشفته آب خالص را در داخل لوله راه راه گرم شده را بررسی کردند. نتایج آن‌ها حاکی از افزایش ۲۱ و ۵۸ درصدی میزان انتقال حرارت در نانوسیال آب-آلومینا با کسر حجمی ۲ و ۴ درصد نسبت به سیال پایه (آب) بود.

سوهل و همکاران [۱۴] به طور تجربی عملکرد حرارتی یک چاه حرارتی میکروکانال را برای خنک کردن وسایل الکترونیکی با استفاده از خنک‌کننده نانوسیال به جای آب خالص بررسی کردند. نانوسیال آب - آلومینیوم اکسید شامل کسر حجمی از ۱۰/۰ تا ۲۵/۰ درصد به‌عنوان خنک‌کننده استفاده شد. نتایج تجربی بهبود بیشتر عملکرد حرارتی با استفاده از نانوسیال به جای آب مقطر خالص را نشان داد. ضریب انتقال حرارت با موفقیت تا ۱۸ درصد افزایش یافت.

هو و همکاران [۱۵] به مطالعه جابه‌جایی اجباری حرارتی نانوسیال آب-اکسید آلومینیوم (به صورت تجربی) در یک چاه حرارتی میکروکانالی پرداختند. آن‌ها آزمایش خود را در محدوده اعداد رینولدز ۲۲۶ تا ۱۶۷۶ انجام دادند. در نهایت، آن‌ها توانستند به این نتیجه برسند که استفاده از نانوسیال، باعث افزایش میانگین انتقال حرارت در چاه حرارتی می‌شود. قاسمی و همکاران [۱۶] میزان انتقال حرارت نانوسیال آب-آلومینا مورد استفاده در یک چاه حرارتی میکروکانالی را به صورت عددی مطالعه کردند. آن‌ها مشاهده کردند که ضرایب انتقال حرارت و اصطکاک با افزایش غلظت نانوذرات افزایش و مقاومت حرارتی با افزایش غلظت نانوذرات کاهش می‌یابد.

تیموری و همکاران [۱۷] جابجایی ترکیبی درون یک کویتی مربعی بسته را مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان می‌دهد که

وسعی از اعداد نادسن توسعه دادند. روش شبکه بولتزمن آبشاری پیشنهادی نشان‌دهنده بهبود واضحی در پیش‌بینی رفتار جریان‌های گازی در میکروکانال‌ها برای روش‌های کلاسیک قبلی و شبکه بولتزمن آبشاری بود.

وانگ و همکاران [۹] یک چاه حرارتی میکروکانال موج‌دار دولایه جدید به همراه دنده‌های متخلخل پیشنهاد کردند. آن‌ها دریافتند که دنده‌های متخلخل برتری آشکاری را در قدرت پمپاژ پایین از خود نشان می‌دهند.

حمیدی و همکاران [۱۰] شبیه‌سازی جریان و انتقال حرارت همرفتی اجباری به روش شبکه بولتزمن بر روی توموگرافی سه بعدی میکرو اشعه ایکس چاه حرارتی فوم فلزی را انجام دادند. انتقال حرارت جابه‌جایی اجباری سه بعدی در پنج نمونه فوم فلزی با چگالی منافذ مختلف (۵، ۱۰، ۲۰، ۶۰ و ۸۰ پیکسل در هر اینچ) و همچنین تخلخل‌های مختلف (۷۳/۶۹-۹۲/۳۷) در محدوده اعداد رینولدز ۵۰-۱۰۰۰ با در نظر گرفتن سیالات مختلف، با اعداد پرانتل ۰/۷ و ۷ تجزیه و تحلیل می‌شوند. نتایج آن‌ها نشان داد که خواص نمونه‌های فوم به تغییرات تخلخل بیشتر از چگالی منافذ پاسخ می‌دهند. برعکس، پروفیل سرعت و عدد ناسلت محلی به طور مستقیم تحت تأثیر چگالی منافذ هستند.

کشاورز و همکاران [۱۱] جهت افزایش انتقال حرارت در یک میکروکانال مستطیلی تعدادی مولد گردابه بکار بردند. مولدهای گردابه‌ای در نظر گرفته شده شامل پین‌های مکعبی هستند که دارای تیغه‌هایی منعطف مجهز به وصله‌های پیزوالکتریک می‌باشند. اثرات هیدرولیکی-حرارتی تعدادی مولد گردابه‌ای، سفتی تیغه‌ها در نتایج، نشان دهنده این واقعیت هستند که مجهز شدن کانال به مولدهای پیزوالکتریک اثر قابل توجهی در افزایش نرخ انتقال حرارت دارد و می‌توان با افزایش ۳۳ درصدی توان مورد نیاز پمپاژ، به میزان ۱۴۰ درصد نرخ انتقال حرارت را نسبت به کانال بدون مبدل گردابه، بهبود بخشید.

علاوه بر پارامترهای هندسی، انتخاب مناسب نوع سیال عامل نیز عامل مهمی برای عملکرد چاه‌های گرمایی میکروکانالی است. مایعات خنک‌کننده معمولی، مانند آب، به دلیل هدایت حرارتی کم، نمی‌توانند تقاضای فزاینده اتلاف حرارت با چگالی بالا را برآورده کنند. به‌منظور افزایش هدایت حرارتی موثر، روش افزودن نانوذرات فلزی رسانا مانند مس یا آلومینیوم به

عددی، عملکرد جریان و انتقال حرارت چاه گرمایی مبتنی بر فلز مایع با انواع مختلف سیال کاری، شکل های مقطع میکروکانال متنوع و سرعت های ورودی مختلف مورد بررسی قرار دادند. برای چهار نوع سطح مقطع میکروکانال در نظر گرفته شده (مستطیل، دایره، ذوزنقه و متوازی الاضلاع)، استفاده از مقطع میکروکانال دایره ای ضریب انتقال حرارت متوسط بالاتری را به دست آورد، در حالی که استفاده از متوازی الاضلاع کمترین افت فشار را داشت. علاوه بر این، سرعت ورودی تأثیر زیادی بر عملکرد جریان و انتقال حرارت داشت. از ۱ متر بر ثانیه به ۹ متر بر ثانیه، افت فشار تا ۶۵ برابر زیاد شد و ضریب انتقال حرارت حدود ۷۴/۳۵ درصد افزایش یافت.

وانگ و همکاران [۲۴] یک چاه حرارتی دولایه میکروکانالی با دنده های نیمه متخلخل را با مدل سیال - جامد سه بعدی همراه با الگوریتم ژنتیک چند هدفه بهینه کردند. تحقیقات آنها بهبود قابل توجهی را در عملکرد خنک کننده و به دنبال آن کاهش قابل توجهی در قدرت پمپاژ نشان داد. شی و همکاران [۲۵] پارامترهای هندسی یک چاه حرارتی میکروکانالی را بهینه کردند. متغیرهای طراحی شامل نسبت عرض کانال ثانویه به عرض میکروکانال، نسبت نیم گام کانال ثانویه به عرض میکروکانال، و مقدار زاویه کانال ثانویه بود. آنها به ترتیب ۲۸/۷ و ۲۲/۹ درصد کاهش مقاومت حرارتی و قدرت پمپاژ را از طریق فرآیند بهینه سازی به دست آوردند.

در سال های اخیر اثرات میدان مغناطیسی بر روی سیال های رسانا، توجه محققان را به خود جلب کرده است. اعمال میدان مغناطیسی به سیالات رسانا به جهت افزایش ضریب انتقال حرارت جابه جایی و عدد ناسلت حائز اهمیت است.

وانگ و همکاران [۲۶] انتقال حرارت همرفت طبیعی خارجی فلز مایع تحت تأثیر میدان مغناطیسی مورد مطالعه قرار دادند. اختلاف دمای زیادی که در فلز مایع با دمای بالا ایجاد می شود منجر به همرفت طبیعی خارجی در دیواره اول می شود. تحت تأثیر میدان مغناطیسی، ضخامت لایه مرزی سرعت ابتدا افزایش و سپس کاهش می یابد، در حالی که ضخامت لایه مرزی حرارتی به طور کلی افزایش می یابد.

حاج محمدی و همکاران [۲۷] یک مطالعه عددی برای بررسی اثرات یک میدان مغناطیسی یکنواخت و غیریکنواخت خارجی بر هندسه بهینه شده و عملکرد حرارتی یک چاه حرارتی میکروکانال انجام دادند. فرآیند بهینه سازی برای سه مورد

برای یک عدد رینولدز و ریچاردسون ثابت، افزودن نانو ذره به سیال پایه می تواند منجر به افزایش عدد ناسلت تا ۲۰٪ شود. همچنین با افزایش میزان کجی کویتی از صفر درجه تا ۹۰ درجه نیز افزایش حدود ۳۰٪ در عدد بی بعد ناسلت مشاهده می شود.

کومار و همکاران [۱۸] تجزیه و تحلیل حرارتی میکروکانال های چاه گرمایی موج دار منشعب و خنک شده با نانوسیال آب- آلومینیوم اکسید را با استفاده از روش عددی انجام دادند. نتایج آن ها نشان داد که جدای از اختلال در لایه مرزی و شروع مجدد آن، گردابه هایی در نزدیکی کانال ثانویه تشکیل می شد که عملکرد حرارتی را بهبود بخشید و ضریب انتقال حرارت با افزایش غلظت نانوسیال برای هر عدد رینولدز بررسی شده افزایش یافت.

خنک کننده فلز مایع مزایای بالقوه قابل توجهی نسبت به مایعات خنک کننده معمولی دارد. در واقع فلزات مایع مانند سدیم، آلیاژ سدیم پتاسیم و لیتیوم برای مدت طولانی به عنوان خنک کننده در مهندسی هسته ای مورد استفاده قرار گرفته اند. امروزه خنک کننده فلزات مایع به طور گسترده ای در نیروگاه های هسته ای مورد استفاده قرار گرفته است و فلزات مختلفی آزمایش شده اند.

مایر و گوشال [۱۹] کار تحلیلی و تجربی را بر روی جریان فلز مایع در یک لوله انجام دادند. نتایج آنها نشان داد که انتقال حرارت در هر دو رژیم آرام و آشفته با استفاده از خنک کننده فلز مایع افزایش می یابد. هودس و همکاران [۲۰] هندسه بهینه را برای چاه های حرارتی مبتنی بر آب و گالینستن از نظر کمینه مقاومت حرارتی مورد مطالعه قرار داد. نشان داده شد که در پیکربندی های بهینه، گالینستن به عنوان یک فلز مایع می تواند مقاومت حرارتی کلی را تا حدود ۴۰ درصد در مقایسه با آب کاهش دهد. زی و همکاران [۲۱] پیش بینی عددی جریان و عملکرد حرارتی چاه های حرارتی تک لایه و دولایه موج دار با آب خنک شونده را مورد مطالعه قرار دادند. نتایج آن ها نشان داد که برای حذف یک بار گرمایی یکسان، مقاومت حرارتی کلی چاه حرارتی تک لایه موج دار میکروکانال با افزایش سرعت جریان حجمی کاهش می یابد، اما افت فشار به شدت افزایش می یابد. ژانگ و همکاران [۲۲] نشان دادند که فلز مایع می تواند انتقال حرارت همرفتی را به دلیل خواص ترموفیزیکی برتر افزایش دهد. ویو و همکاران [۲۳] با استفاده از یک روش

میدان دما در جابه‌جایی آزاد متلاطم درون یک محفظهٔ دوبعدی حاوی فلز مایع با اعداد پرانتل ۰/۰۱۱ و ۰/۰۲۲ و ۰/۰۵۴ پرداخته‌اند. در اعداد رایلی و پرانتل ثابت، عدد ناسلت متوسط بر روی دیوارهٔ گرم با افزایش عدد هارتمن کاهش می‌یابد. سینگ و گوئیل [۳۳] به بررسی عددی جریان فلز مایع و انتقال حرارت در محفظه چندمرحله‌ای در حضور میدان مغناطیسی پرداختند نتایج عددی به‌دست‌آمده نشان می‌دهد که استفاده میدان مغناطیسی باعث کاهش گردهاها در جریان شده و به فلز مایع اجازه می‌دهد تا دامنه کامل را اشغال کند که پس از آن تغییرات دمایی یکنواخت را در عدد هارتمن بالاتر نشان می‌دهد. حافظ احمد و همکاران [۳۴] اثرات هدایت حرارتی بر جریان جابه‌جایی ترکیبی سیال رسانای الکتریکی در امتداد یک صفحه مغناطیسی عمودی در محیط متخلخل را بررسی کردند. برای کاهش گرمای بیش از حد، میدان مغناطیسی تراز شده مانند یک ماده پوششی عمل می‌کند تا گرما را عایق کند که مکانیزم بسیار مهمی در فناوری‌های مدرن است. وانگ و همکاران [۳۵] به بررسی انتقال حرارت جابه‌جایی ترکیبی فلز مایع تحت میدان مغناطیسی پرداختند. یک میکروکانال عمودی با یک سطح گرم با اعمال میدان مغناطیسی ثابت بررسی شده است. شدت میدان مغناطیسی ۰ تا ۰/۱ تسلا بررسی شده است. نتایج نشان می‌دهد اثر اعمال میدان مغناطیسی با افزایش عدد هارتمن، علاوه بر افزایش ۳۲ درصدی انتقال حرارت جابه‌جایی، افت فشار و ضریب اصطکاک چاه حرارتی را به‌شدت افزایشی می‌کند.

اگرچه محققان به طور گسترده مطالعات روی چاه‌گرمایی میکروکانالی را انجام داده‌اند، اما تحقیقات در مورد چاه‌های حرارتی میکروکانالی با استفاده از فلز مایع به‌عنوان سیال کار بسیار کم، کار شده است. اولین نوع آوری این پژوهش استفاده از خنک‌کننده فلز مایع گالینستن به‌عنوان سیال کار است که خواص ترموفیزیکی برتری نسبت به مایعات خنک‌کننده معمولی دارد. نوآوری دوم، به‌منظور تحقق انتقال حرارت کارآمد و پربازده فلز مایع، لازم است به بررسی اثرات میدان مغناطیسی روی فلز مایع در خصوص افزایش انتقال حرارت پرداخته شود و نوآوری سوم، بررسی اثرات اعمال میدان مغناطیسی در سه جهت متفاوت X و Y و Z به چاه حرارتی است.

استفاده گردید: ۱- در غیاب میدان مغناطیسی ۲- در حضور یک میدان مغناطیسی یکنواخت ۳- در حضور یک میدان مغناطیسی غیریکنواخت تولید شده توسط یک سیم حامل جریان. نتایج آن‌ها نشان داد که برای آزمایش‌های هندسی خارج از طراحی (غیر بهینه)، اعمال میدان مغناطیسی یکنواخت مقاومت حرارتی را تا ۲۱٪ کاهش می‌دهد و عملکرد چاه حرارتی را بهبود می‌بخشد.

آباده و همکاران [۲۸] به طور تجربی اثرات میدان‌های مغناطیسی خارجی را بر ضریب انتقال حرارت و افت فشار فروسیال آب-اکسید آهن در جریان آرام در یک لوله مستقیم دایره‌ای مورد مطالعه قرار دادند. مشخص شد که عدد ناسلت با استفاده از یک میدان مغناطیسی جایگزین با فرکانس ۱۰ و ۱۰۰ هرتز به ترتیب ۱۱/۸۵ و ۱۴/۸ درصد افزایش می‌یابد. در حالی که افزایش بیشتر فرکانس (بالاتر از ۱۰۰ هرتز تا ۱۰۰۰) به نتیجه مثبت منجر نمی‌شود.

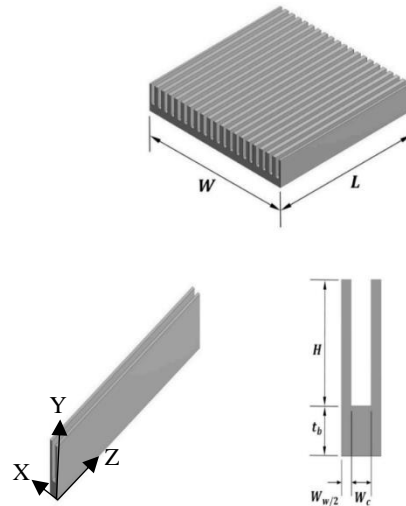
لی و همکاران [۲۹] یک روش بهینه‌سازی سریع با بازسازی هندسه و شبیه‌سازی چاه حرارتی‌های میکروکانالی پیشنهاد کرد. در مقایسه با نمونه اولیه، نتایج نشان می‌دهد که بیشینه افزایش نسبی عملکرد حرارتی مدل ۳۴/۶۳ درصد است که در عدد رینولدز ۲۰۰ به دست آمده است. و یکنواختی دما نیز در این مورد بهبود یافته است.

چن و همکاران [۳۰] به‌منظور غلبه بر کمبود مقاومت بالای جریان فلز مایع، بهینه‌سازی ساختاری میکروکانال در این مطالعه بررسی شده است. نتایج نشان داد که کمترین مقاومت جریان در میکروکانال کامپوزیت به دست می‌آید و قدرت پمپاژ ۵۴/۹ درصد کمتر از کانال سنتی با تنها ۰/۷ درصد افزایش مقاومت حرارتی کل است.

کننتی و همکاران [۳۱] مقایسه جریان سیال و ویژگی‌های انتقال حرارت در داخل یک محفظه مربع با آب و گالیم مایع به‌عنوان سیال، تحت همرفت طبیعی به‌صورت عددی در رژیم جریان آرام مورد مطالعه قرار دادند. یک مسئله دوبعدی در نظر گرفته می‌شود و عبارت شناوری در معادله تکانه با تقریب بوسینسک نشان داده می‌شود. نتایج نشان می‌دهد که مکانیسم انتشار در مقایسه با همرفت در گالیوم مایع برای عدد گراششف ۱۰۴ غالب است؛ اما پدیده همرفت برای آب مایع برای تمامی اعداد گراششف غالب است. شیخ‌زاده و همکاران [۳۲] به بررسی تأثیر اعمال یک میدان مغناطیسی ثابت بر میدان جریان و

۲- هندسه مسئله و معادلات حاکم

در این پژوهش تاثیر میدان مغناطیسی خارجی یکنواخت بر میدان جریان و انتقال حرارت فلز مایع در سه جهت متفاوت X و Y و Z با هندسه شکل ۱ مورد بررسی قرار گرفته است. از یک چاه حرارتی میکروکانال مشابه کار سارووار [۳۶] استفاده شده است. چاه حرارتی از ۲۰ کانال مستطیلی یکسان تشکیل شده است که در شکل ۱ نشان داده شده است. پارامترهای هندسی زیر در مطالعه مقایسه بین مواد بستر و خنک کننده استفاده شد: ارتفاع کانال H=5mm، عرض کانال W_c=1mm، ضخامت دیواره کانال W_w=1mm و ضخامت پایه t_b=2mm و با ابعاد W×L=4cm×4cm.



شکل ۱- نمای سه بعدی کامل و تک میکروکانال

معادلات اصلی حاکم بر رفتار سیال باتوجه به فرضیات زیر نوشته می شود:

(۱) باتوجه به هندسه یکسان همه کانال های مستطیلی، تمامی کانال ها خواص انتقال گرما و جرم یکسانی را نشان می دهند. به همین می توان یک کانال واحد را برای تجزیه و تحلیل انتخاب کرد.

(۲) جریان سیال آرام است.

(۳) جریان دایم است.

(۴) سیال تراکم ناپذیر نیوتنی است.

(۵) نیروهای حجمی در نظر گرفته شده، نیروی گرانش و لورنتز است.

(۶) از اثرات اتلاف ویسکوز و انتقال حرارت تشعشی و گرمای ژول نیز صرف نظر شده است.

معادلات حاکم بر میدان جریان و انتقال حرارت به صورت سه بعدی به شکل زیر است:

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

$$\begin{aligned} r(u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z}) = \\ - \frac{\partial p}{\partial x} + \mu [(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2}) + (\frac{\partial^2 u}{\partial y^2}) + (\frac{\partial^2 u}{\partial z^2})] \\ - s B_0^2 u \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} r(u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z}) = \\ - \frac{\partial p}{\partial y} + \mu [(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2}) + (\frac{\partial^2 v}{\partial y^2}) + (\frac{\partial^2 v}{\partial z^2})] \\ - s B_0^2 v - r g_y \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} r(u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z}) = \\ - \frac{\partial p}{\partial z} + \mu [(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2}) + (\frac{\partial^2 w}{\partial y^2}) + (\frac{\partial^2 w}{\partial z^2})] \\ - s B_0^2 w \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} r[u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} + w \frac{\partial T}{\partial z}] = \\ \frac{k}{c_p} [(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2}) + (\frac{\partial^2 T}{\partial y^2}) + (\frac{\partial^2 T}{\partial z^2})] \end{aligned} \quad (5)$$

$$a = \frac{k_f}{r c_p} \quad (6)$$

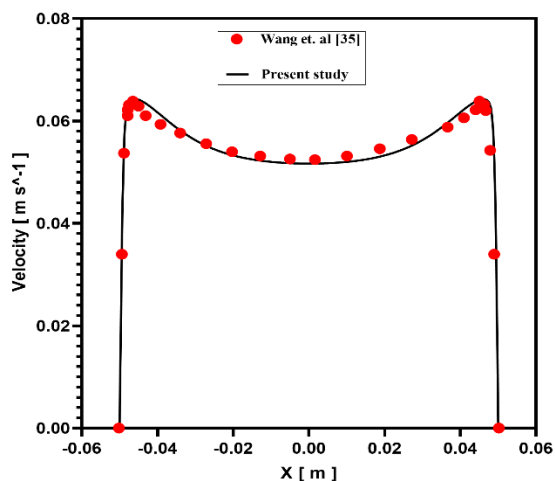
$$Ha = B_0 L \sqrt{\frac{s}{\mu}} \quad (7)$$

سرعت جریان در خط مرکز میکروکانال شده است که نشان دهنده جریان هانت [۳۷، ۳۸] است. شکل ۳ مقایسه توزیع دمای به دست آمده با نتایج وانگ و همکاران را نشان داده است. باتوجه به نتایج به دست آمده و خطای اعتبارسنجی در جدول ۲، مشخص است که نتایج حاصل از شبیه سازی چاه حرارتی از اعتبار لازم برخوردار است.

جهت استقلال حل از شبکه مقدار سرعت بیشینه و ضریب انتقال حرارت جابه جایی در تعداد نقاط متفاوت بررسی شده است و شبکه مناسب جهت بررسی میدان جریان و انتقال حرارت انتخاب گردیده است. شکل ۴ شبکه بندی هندسه را نشان داده است. شبکه ناحیه سیال جهت بالابردن دقت نتایج ریزتر لحاظ شده و نتایج به دست آمده در جدول ۳ در شبکه بندی با تعداد نقاط ۴۴۰۰۰۰ و ۹۱۲۰۰۰ و ۲۲۹۰۰۰۰ و سرعت جریان ورودی ۰/۴ متر بر ثانیه و مقدار شار حرارتی ۱۰ وات بر سانتی متر مربع مقایسه شده اند. با توجه به نتایج به دست آمده، انتخاب شبکه با تعداد نقاط ۹۱۲۰۰۰ مناسب است.

جدول ۲- مقدار خطای مطالعه حاضر با وانگ و همکاران [۳۵]

مقدار خطای حداکثر	مقدار خطای متوسط	مقدار خطای حداقل
۱/۴۶	% ۱/۰۷	۰



شکل ۲- نمودار توزیع سرعت در مقطع $Y=0.01$ m جهت اعتبارسنجی با مطالعه وانگ و همکاران

$$Nu = f(Re, Pr) \quad (۸)$$

$$Re = \frac{r u_f D}{m} \quad (۹)$$

$$Pr = \frac{n}{a} \quad (۱۰)$$

$$h = \frac{Q}{A_w (T_w - T_m)} \quad (۱۱)$$

$$Q = q \phi A_b \quad (۱۲)$$

$$Nu = \frac{h D}{k_f} \quad (۱۳)$$

$$F_L = s B^2 \bar{V} \quad (۱۴)$$

$$4c_f \frac{x}{D} = \frac{Dp}{\frac{1}{2} r u_{in}^2} \quad (۱۵)$$

در جدول ۱ خواص فلز مایع گالینستن در دمای ۲۹۰ کلوین آورده شده است.

جدول ۱- خواص ترموفیزیکی سیال گالینستن در دمای ۲۹۰ کلوین

خواص	واحدها	Ga68%In20%Sn12%
چگالی	kg/m ³	۶۳۶۰
گرمای ویژه	J/kg.K	۳۶۵/۸
لزجت دینامیکی	Pa.s	۰/۰۰۲۲
هدایت گرمایی	W/m.K	۱۶/۵
رسانایی الکتریکی	s/m	۳۳۱۰۰۰۰

۳- اعتبار سنجی و استقلال حل از شبکه

به منظور اعتبارسنجی نتایج این مطالعه، شبیه سازی عددی برای حالت سیال فلز مایع تحت میدان مغناطیسی با شدت ۰/۱ و ۰/۰۶ تسلا با نتایج وانگ و همکاران [۳۵] در یک میکروکانال با سطح مقطع مستطیل و شرط مرزی دما ثابت با دیواره های رسانای الکتریکی بررسی شده است. باتوجه به نمودار شکل ۲ واضح است که اثر اعمال میدان مغناطیسی سبب افزایش سرعت جریان در نزدیکی دیواره ها و کاهش شدن

۴- تشریح شرایط مرزی و نرم افزار

در شبیه سازی انجام شده، برای شرایط مرزی، شار حرارتی ثابت به کف چاه حرارتی اعمال خواهد شد و دیواره های اطراف چاه حرارتی عایق در نظر گرفته شده اند و سیال با دمای T_f و سرعت U_f وارد میکروکانال می گردد. برای خروجی، شرط مرزی فشار خروجی و با اعمال میدان مغناطیسی، تمامی دیواره های چاه حرارتی رسانا در نظر گرفته شده اند.

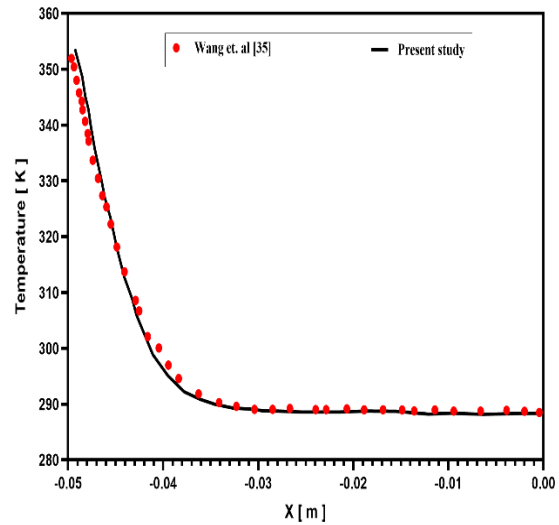
جهت شبیه سازی از نرم افزار انسیس فلونت استفاده شده است که با توجه به تراکم ناپذیری جریان، حلگر مبتنی بر فشار و الگوریتم حل SIMPLEC و معادلات حاکم به روش حجم محدود با گسسته سازی نوع مرتبه دوم انجام شده است. مگنتوهیدرودینامیک به فعل وانفعال بین میدان الکترومغناطیسی ایجاد شده و یک سیال رسانای الکتریکی اشاره دارد. مدل مگنتوهیدرودینامیک در انسیس فلونت رفتار جریان سیال رسانای الکتریکی تحت تأثیر میدان های الکترومغناطیسی ثابت یا نوسانی را تجزیه و تحلیل می کند. مدل مگنتوهیدرودینامیک با انتخاب توابع ساده داخلی فلونت به عنوان ماژول اضافه شونده در نرم افزار انسیس فلونت فعال می شود.

۵- بررسی میدان جریان تحت میدان مغناطیسی

در سه جهت متفاوت

ابتدا به بررسی اثرات میدان مغناطیسی خارجی یکنواخت در سه جهت متفاوت بر میدان جریان و دما پرداخته شده است. انتقال حرارت جابه جایی فلزات مایع در میکروکانال ها به خواص حرارتی فلزات مایع بستگی دارد. بر اساس تئوری انتقال حرارت جابه جایی، عدد ناسلت با عدد رینولدز و عدد پرانتل مرتبط است. خواص حرارتی فلزات مایع از جمله رسانایی گرمایی و ظرفیت گرمایی ویژه و لزجت منجر به عدد رینولدز و پرانتل متفاوتی می شود.

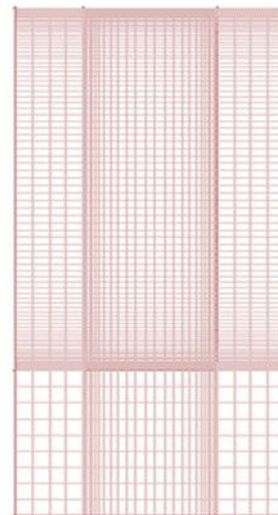
شکل ۵ توزیع سرعت جریان سیال در مقطع $Z=0.02$ m تحت اعمال میدان مغناطیسی در سه جهت X و Y و Z با عدد هارتمن ۵۱۷ را نشان داده است. اثر اعمال میدان مغناطیسی در جهت Y یک توزیع سرعت M شکل را باعث شده است و اثر اعمال میدان مغناطیسی در جهت X سبب تغییر توزیع سرعت از حالت یکنواخت به حالت تخت شده است. با اعمال میدان مغناطیسی در جهت Z ، تغییری در توزیع سرعت سیال



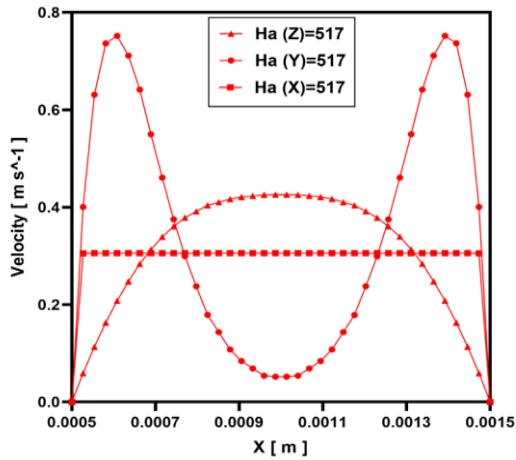
شکل ۳- نمودار تغییرات دما در مقطع $Y=0.01$ m جهت اعتبارسنجی با مطالعه وانگ و همکاران

جدول ۳- استقلال حل از شبکه

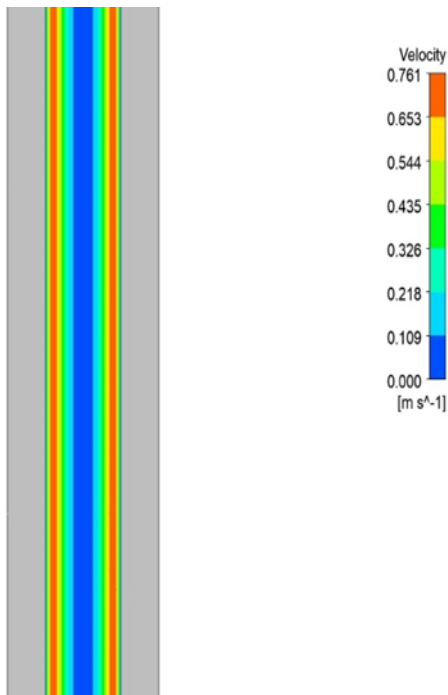
تعداد نقاط	سرعت بیشینه	$h(W/m^2k)$	اختلاف نسبی
۴۴۰۰۰۰	۰/۶۰۹	۵۶۱۳۴	۱
۹۱۲۰۰۰	۰/۶۲۶	۵۶۴۱۲	۰/۱/۵
۲۲۹۰۰۰۰	۰/۶۲۹	۵۶۴۶۵	۰/۱/۰۹



شکل ۴- شبکه بندی هندسه



شکل ۵- بررسی میدان جریان با اعمال میدان مغناطیسی در سه جهت متفاوت به چاه حرارتی در مقطع $Z=0.02$ m با سرعت ورودی 0.3 متر بر ثانیه



شکل ۶- کانتور میدان سرعت در مقطع $Y=0.0045$ m با سرعت ورودی 0.3 متر بر ثانیه

شکل نگرفته است، به این دلیل است که اثر اعمال میدان مغناطیسی با جهت جریان سیال موازی شده است و سبب صفر شدن نیروی لورنتز گردیده است و در واقع عبارت نیروی مغناطیسی حجمی از معادلات ناویراستوکس حذف شده است. اعمال میدان مغناطیسی در دو جهت X و Y (عمود بر محور جریان) به علت زاویه 90° درجه بین بردار میدان مغناطیسی و محور جریان سیال سبب اعمال حداکثری نیروی لورنتز شده است.

نیروی الکترومغناطیسی نیروی لورنتز است که باعث تغییر سرعت و تکانه در حرکت فلز مایع می‌شود، تغییر انرژی فلز مایع ناشی از نیروی الکترومغناطیسی گرمای ژول است، اما گرما بسیار کم است، بنابراین گرمای ژول اغلب در جریان و انتقال حرارت فلز مایع تحت تأثیر مغناطیس، نادیده گرفته می‌شود، بنابراین تأثیر نیروی لورنتز عمدتاً بر سرعت در معادله تکانه و معادله انرژی است.

شکل ۶ کانتور سرعت در مقطع $Y=0.0045$ m با سرعت جریان ورودی 0.3 متر بر ثانیه را نشان داده است. با اعمال میدان مغناطیسی، سرعت جریان در مجاورت دیواره‌ها افزایشی شده است.

شکل ۷- بررسی میدان جریان با اعمال میدان مغناطیسی عمود بر محور جریان به چاه حرارتی در مقطع $Z=0.02$ و با سرعت ورودی 1 متر بر ثانیه را نشان داده است. اثر میدان مغناطیسی با عدد هارتمن 517 در دو جهت X و Y و در حالت عدد هارتمن صفر بررسی شده است. با افزایش سرعت جریان ورودی از 0.3 به 1 متر بر ثانیه اثر میدان مغناطیسی بر جریان سیال کمتر شده است. در واقع اثر نیروی لورنتز که خلاف جهت جریان سیال اعمال شده است با افزایش سرعت جریان کاهش یافته است.

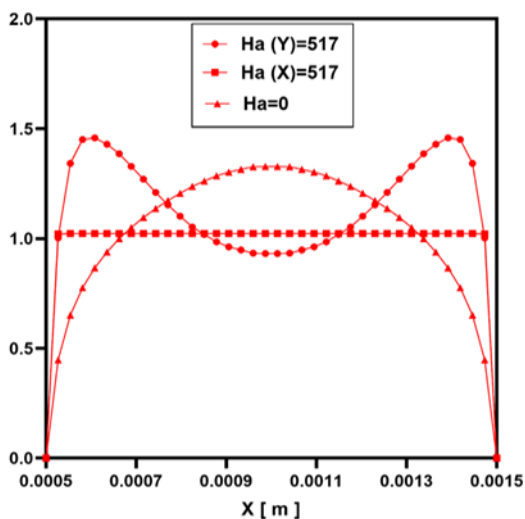
شکل ۸ کانتور میدان سرعت در مقطع $Y=0.0045$ m با سرعت ورودی 1 متر بر ثانیه را نشان داده است. بیشینه سرعت سیال در نزدیکی دیواره‌ها شکل گرفته است.

۶- بهبود انتقال حرارت جابه جایی با اعمال میدان مغناطیسی

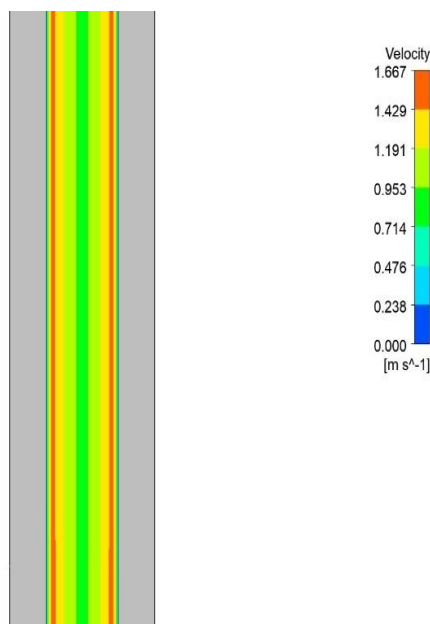
نتایج نشان دادند با اعمال میدان مغناطیسی در دو جهت Y و X به چاه حرارتی، سبب افزایش سرعت جریان در مجاورت دیواره‌ها می‌شود. با اعمال میدان مغناطیسی در جهت Y ، توزیع سرعت M شکل به دست آمد که باتوجه به شرط مرزی شار ثابت، افزایش سرعت جریان در نزدیکی دیواره‌ها سبب کاهش دمای سطوح و افزایش انتقال حرارت می‌گردد.

شکل ۹- نمودار تغییرات دما در اثر اعمال میدان مغناطیسی در سه جهت X و Y و Z با سرعت جریان ورودی 0.3 متر بر ثانیه را نشان داده است. اثر اعمال میدان مغناطیسی در جهت Y و X ، سبب کاهش دمای سطوح چاه حرارتی گردیده است، که بیشترین کاهش دما ابتدا با اعمال میدان مغناطیسی در جهت Y و سپس با اعمال میدان مغناطیسی در جهت X به دست آمده است؛ بنابراین بیشترین بازدهی در خصوص کاهش دمای سطوح چاه حرارتی زمانی شکل خواهد گرفت که میدان مغناطیسی در جهت Y به چاه حرارتی اعمال گردد.

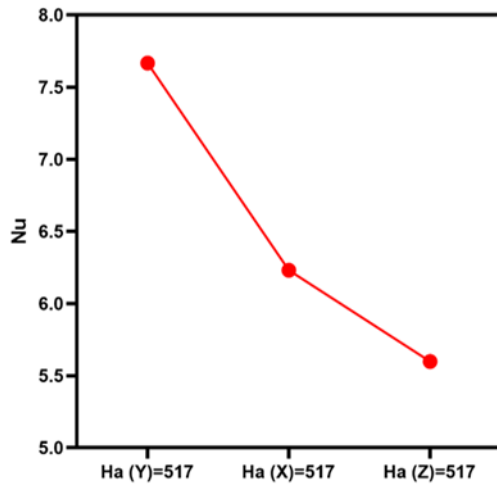
شکل ۱۰ و ۱۱ نمودار ضریب انتقال حرارت جابه جایی و عدد ناسلت با اعمال میدان مغناطیسی در سه جهت X و Y و Z نشان داده است. با اعمال میدان مغناطیسی عمود بر محور جریان، ضریب انتقال حرارت جابه جایی و عدد ناسلت افزایشی و در نتیجه انتقال حرارت بهبود می‌بخشد. بیشترین افزایش ضریب انتقال حرارت جابه جایی ابتدا مربوط به اعمال میدان مغناطیسی در جهت Y ، 38% و سپس با اعمال میدان مغناطیسی در جهت X ، 13% نسبت به عدم حضور میدان مغناطیسی به دست آمده است.



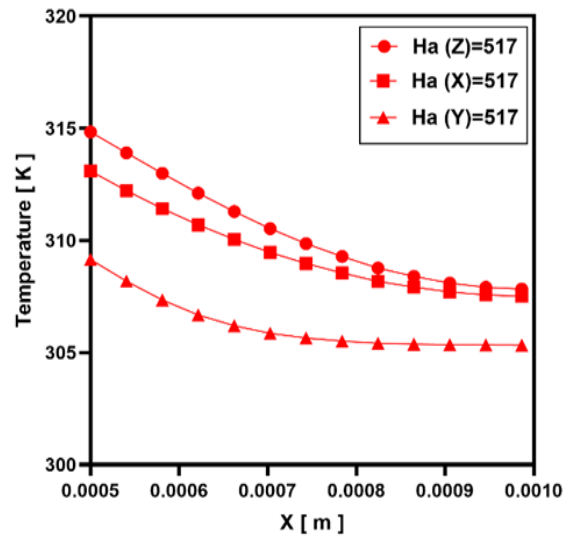
شکل ۷- بررسی میدان جریان با اعمال میدان مغناطیسی عمود بر محور جریان و عدد هارتمن صفر، مقطع $Z=0.02$ m با سرعت ورودی 1 متر بر ثانیه



شکل ۸- کانتور میدان سرعت در مقطع $Y=0.0045$ و با سرعت ورودی 1 متر بر ثانیه



شکل ۱۱- نمودار تغییرات عدد ناسلت با اعمال میدان مغناطیسی در سه جهت متفاوت با سرعت ۰/۳ متر بر ثانیه



شکل ۹- نمودار تغییرات دما با اعمال میدان مغناطیسی در سه جهت متفاوت با سرعت ۰/۳ متر بر ثانیه در مقطع $Z=0.02$ m

۷- اعمال میدان مغناطیسی خارجی یکنواخت در جهت Y به چاه حرارتی

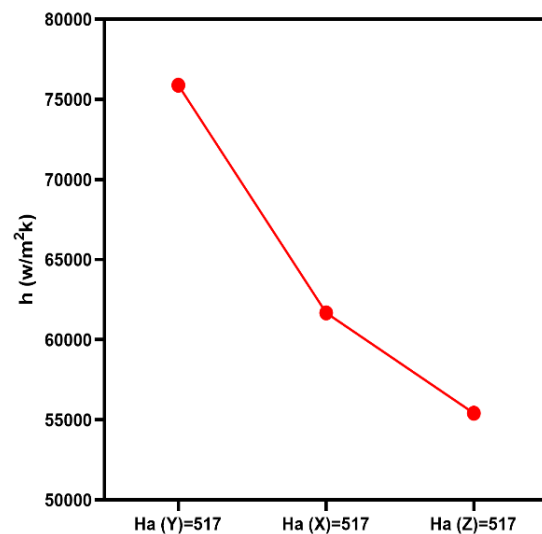
در این پژوهش مشخص شد که بهترین عملکرد در زمینه انتقال حرارت برای هندسه مربوطه را، اعمال میدان مغناطیسی در جهت Y به خود اختصاص داده است.

شکل ۱۲ نمودار توزیع سرعت سیال در مقطع $Z=0.02$ متر با عدد های هارتمن متفاوت را نشان داده است. مشخص است که با افزایش عدد هارتمن سرعت جریان در مجاورت دیواره ها افزایش یافته است؛ یعنی با افزایش عدد هارتمن لایه مرزی سرعت کوچک تر شده است. بیشینه سرعت جریان در نزدیکی دیواره ها و کمینه سرعت جریان در مرکز میکروکانال شکل گرفته است.

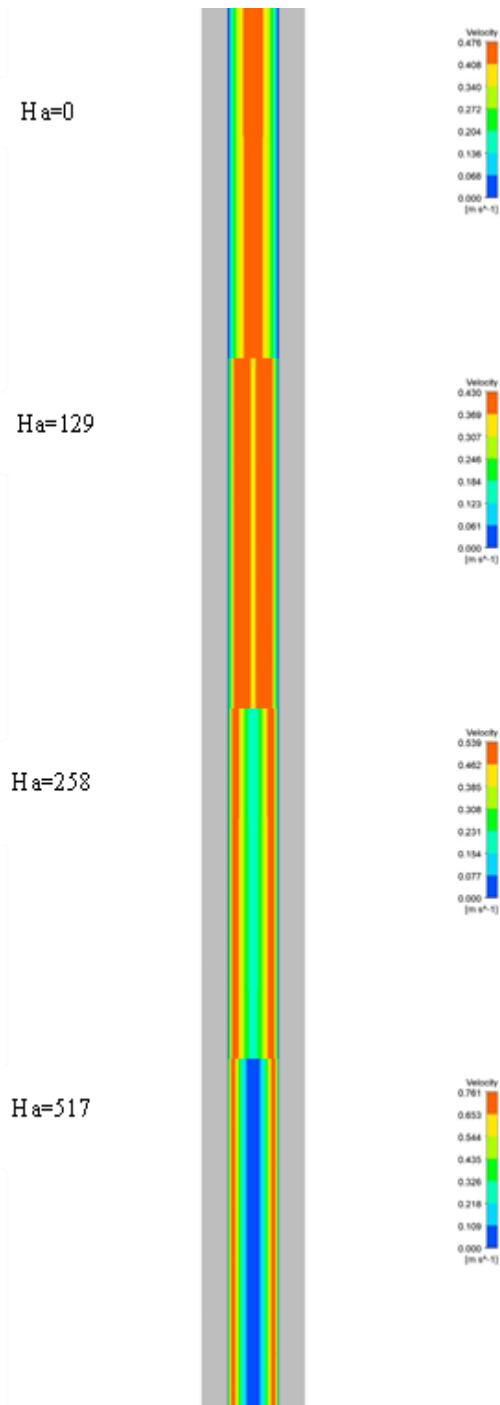
شکل ۱۳ نمودار تغییرات دما با افزایش عدد هارتمن را نشان داده است. با افزایش عدد هارتمن دمای سطوح مشترک بین سیال و جامد کاهشی شده است.

شکل ۱۴ کانتور سرعت با اعمال میدان مغناطیسی در جهت Y با افزایش عدد هارتمن سرعت جریان در نزدیکی دیواره ها نسبت به خط مرکزی میکروکانال افزایشی شده است.

شکل ۱۵ و ۱۶ نمودار تغییرات ضریب انتقال حرارت جابه جایی و عدد ناسلت با اعمال میدان مغناطیسی در جهت Y و افزایش عدد هارتمن را نشان داده است. نتایج نشان می دهد که افزایش

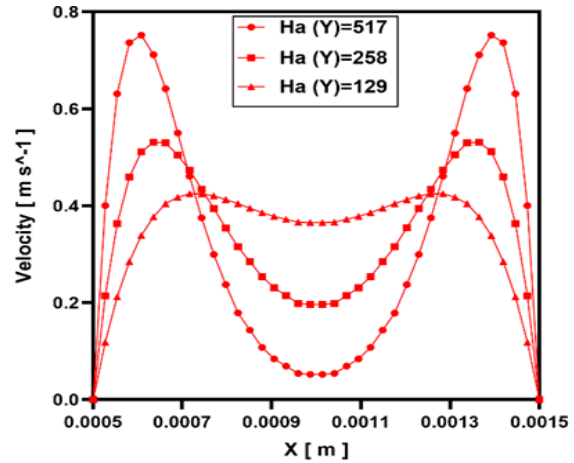


شکل ۱۰- نمودار تغییرات ضریب انتقال حرارت جابه جایی با اعمال میدان مغناطیسی در سه جهت متفاوت با سرعت ۰/۳ متر بر ثانیه

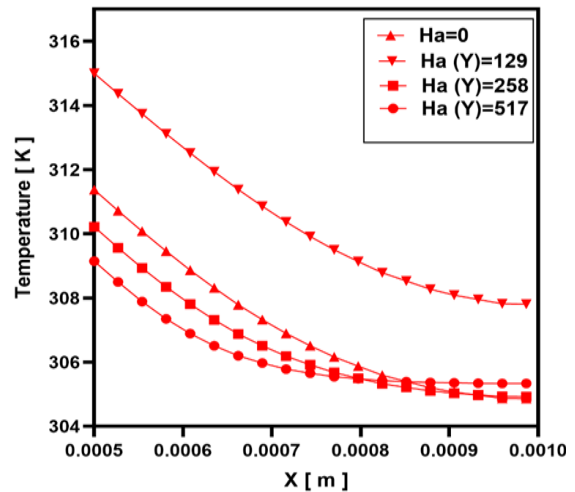


شکل ۱۴- کانتور سرعت با افزایش عدد هارتمن، اعمال میدان مغناطیسی در جهت Y

سرعت جریان حاصل از نیروی لورنتز در نزدیکی دیواره‌ها، سبب بهبود انتقال حرارت شده است. اثر اعمال میدان مغناطیسی در راستای Y به چاه حرارتی با عدد هارتمن ۵۱۷، ۳۸ درصد، عدد هارتمن ۲۵۸، ۲۲ درصد و با عدد هارتمن ۱۲۹، ۱۳ درصد ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی را نسبت به عدد هارتمن صفر بهبود داده است.



شکل ۱۲- نمودار توزیع سرعت با افزایش عدد هارتمن، اعمال میدان مغناطیسی در جهت Y، سرعت ورودی ۰/۳ متر بر ثانیه



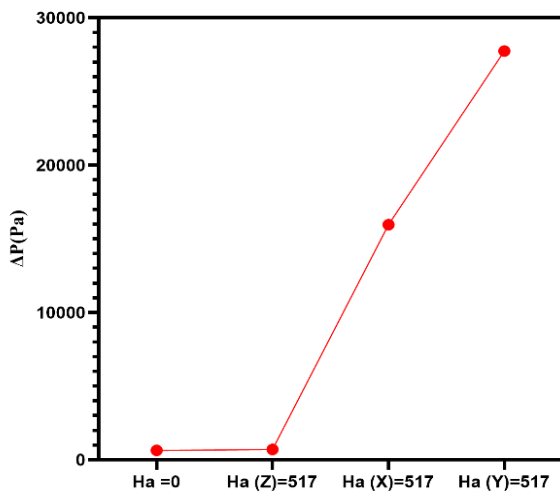
شکل ۱۳- نمودار تغییرات دما با افزایش عدد هارتمن، سرعت ورودی ۰/۳ متر بر ثانیه، مقطع $Z=0.02$ m

سیال در نزدیکی دیواره‌ها، نشان‌دهنده افزایش گرادیان سرعت می‌باشد.

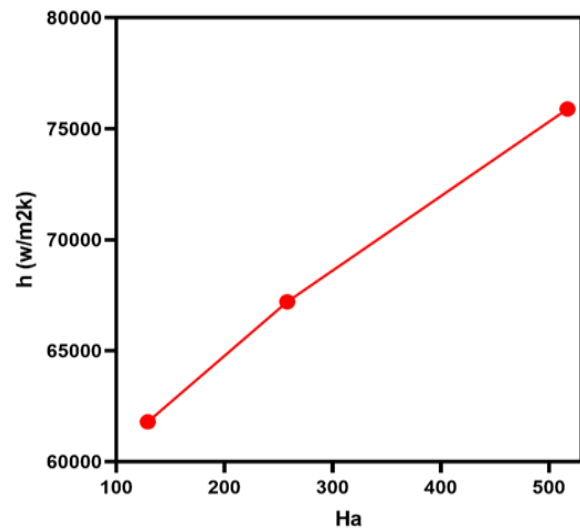
شکل ۱۷ تغییرات افت فشار را در سه حالت اعمال میدان مغناطیسی در جهت X و Y و Z و یک حالت عدد هارتمن صفر نشان داده است. با توجه به افزایش گرادیان سرعت در دو حالت اعمال میدان مغناطیسی X و Y، افت فشار افزایشی شده است. با توجه به رابطه مستقیم افت فشار و ضریب اصطکاک، با افزایش افت فشار، ضریب اصطکاک نیز افزایشی شده است که نمودار شکل ۱۸ نشان می‌دهد.

بنابراین، بیشترین افت فشار و ضریب اصطکاک چاه حرارتی ابتدا با اعمال میدان مغناطیسی در جهت Y و سپس با اعمال میدان مغناطیسی در جهت X به‌دست‌آمده است.

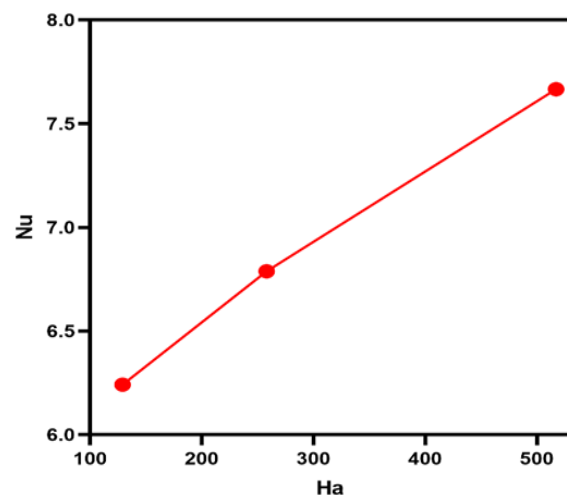
شکل ۱۹ و ۲۰ تغییرات افت فشار و ضریب اصطکاک با اعمال میدان مغناطیسی در جهت Y با افزایش عدد هارتمن را نشان داده است. در نتایج قبلی مشاهده شد که افزایش عدد هارتمن سبب افزایش سرعت در ناحیه لایه مرزی شده است که این نشانه افزایش گرادیان سرعت است؛ در نتیجه می‌توان نتیجه گرفت که افزایش عدد هارتمن سبب افزایش افت فشار چاه حرارتی و ضریب اصطکاک دیواره‌ها شده است.



شکل ۱۷- تغییرات افت فشار چاه حرارتی با اعمال میدان مغناطیسی در سه جهت متفاوت، عدد هارتمن ۵۱۷ و صفر



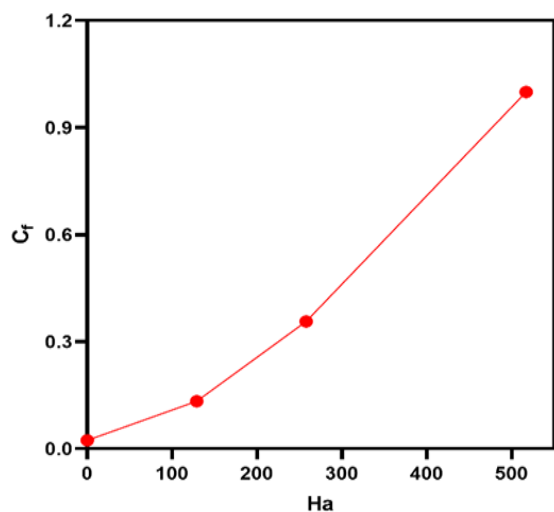
شکل ۱۵- تغییرات ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی با افزایش عدد هارتمن تحت میدان مغناطیسی در جهت Y



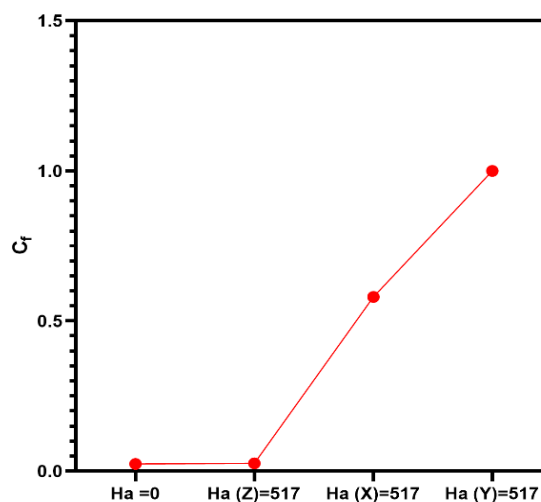
شکل ۱۶- تغییرات عدد ناسلت با افزایش عدد هارتمن تحت میدان مغناطیسی در جهت Y

۸- بررسی افت فشار و ضریب اصطکاک با اعمال

میدان مغناطیسی خارجی یکنواخت به چاه حرارتی با اعمال میدان مغناطیسی خارجی یکنواخت به چاه حرارتی در دو جهت متفاوت X و Y مشخص شد که سرعت جریان در نزدیکی دیواره‌ها افزایشی شده است. با توجه به حاکم بودن شرط عدم لغزش در این پژوهش و وجود ناحیه بیشینه سرعت



شکل ۲۰- تغییرات ضریب اصطکاک چاه حرارتی با افزایش عدد هارتمن، اعمال میدان مغناطیسی در جهت Y



شکل ۱۸- تغییرات ضریب اصطکاک چاه حرارتی با اعمال میدان مغناطیسی در سه جهت متفاوت، عدد هارتمن ۵۱۷ و صفر

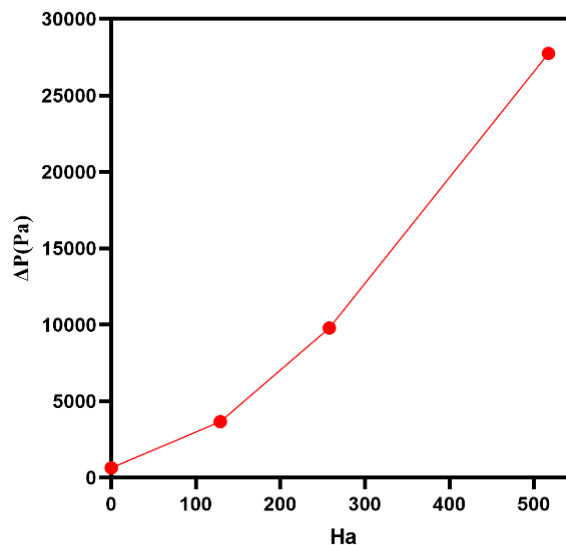
۹- جمع بندی و نتیجه گیری

نتایج به دست آمده را می توان به صورت زیر دسته بندی کرد:

(۱) مشخص شد که جهت اعمال میدان مغناطیسی به چاه حرارتی بسیار حائز اهمیت است. اثر اعمال میدان مغناطیسی در جهت Y (عمود بر محور جریان) توزیع سرعت M شکل را باعث شده است.

(۲) اثر اعمال میدان مغناطیسی در دو جهت Y و X، ضریب انتقال حرارت جابه جایی را به ترتیب ۳۸ و ۱۳ درصد نسبت به عدد هارتمن صفر بهبود بخشیده است.

(۳) اثر اعمال میدان مغناطیسی در جهت Y به چاه حرارتی با عدد هارتمن ۵۱۷، ۳۸ درصد، عدد هارتمن ۲۵۸، ۲۲ درصد و عدد هارتمن ۱۲۹، ۱۳ درصد عدد ناسلت را نسبت به عدد هارتمن صفر بهبود داده است.



شکل ۱۹- تغییرات افت فشار چاه حرارتی با افزایش عدد هارتمن، اعمال میدان مغناطیسی در جهت Y

		(۴) بیشترین ضریب اصطکاک و افت فشار چاه حرارتی
مساحت انتقال حرارت بین سیال و دیواره	A_w	ابتدا با اعمال میدان مغناطیسی در جهت Y و سپس
ها، m^2		با اعمال میدان مغناطیسی در جهت X به دست
مساحت کف میکروکانال، m^2	A_b	آورده شد.
قطر هیدرولیکی، m	D	(۵) با اعمال میدان مغناطیسی در جهت Y به چاه
ضریب هدایت حرارتی، w/m.K	K_f	حرارتی و افزایش عدد هارتمن، سرعت جریان در
دمای میانگین، K	T_m	مجاورت دیوارهها افزایشی و در خط مرکزی
دمای میانگین دیوارهها، K	T_w	میکروکانال کاهش شد و سبب کوچک شدن ناحیه
ضریب انتقال حرارت جابهجایی، w/m^2K	h	لایه مرزی گردید.
عدد هارتمن	Ha	(۶) مشخص شد با سرعت ورودی ۰/۳ متر بر ثانیه
میدان مغناطیسی در جهت X	Ha(X)	تحت اعمال میدان مغناطیسی در جهت Y با عدد
میدان مغناطیسی در جهت Y	Ha(Y)	هارتمن ۵۱۷ ضریب انتقال حرارت جابهجایی ۳۸
میدان مغناطیسی در جهت Z	Ha(Z)	درصد و با افزایش سرعت ورودی سیال به ۱ متر
عدد ناسلت	Nu	برثانیه، ضریب انتقال حرارت جابهجایی ۲۵ درصد
فشار، pa	P	نسبت به عدد هارتمن صفر افزایش یافت، که این
عدد پرانتل	Pr	نشانه کاهش شد اثرات نیروی مغناطیسی در
شار حرارتی، w/m^2	q	سرعت‌های بالاتر است.
انتقال حرارت، w	Q	در انتها انتظار می‌رود در پژوهش‌های آینده، راهکارهایی
عدد رینولدز	Re	علمی جهت کاهش افت فشار حاصل از اعمال میدان
دمای ورودی، K	T_f	مغناطیسی، علاوه بر افزایش انتقال حرارت، ارائه گردد.
سرعت ورودی جریان، m/s	U_f	بررسی میدان مغناطیسی غیریکنواخت بر جریان فلزات
مؤلفه سرعت در جهت X	u	مایع نیز از موضوعات جدید است که نیاز هست به صورت
مؤلفه سرعت در جهت y	v	علمی بررسی و به‌عنوان پژوهش جدید به دنیا ارائه گردد.
مؤلفه سرعت در جهت Z	w	
شدت میدان مغناطیسی، T	B_0	
طول مشخصه، m	L	
ضریب اصطکاک	C_f	
ظرفیت گرمایی ویژه، J/kg.K	C_p	
نیروی لورنتز در حالت مستقیم، N/m^3	F_L	
	علائم یونانی	
لزجت سینماتیکی، m^2/s	ϑ	
پخش حرارتی، m^2/s	α	
رسانایی الکتریکی، s/m	σ	
چگالی، kg/m^3	ρ	
لزجت دینامیکی، Pa.s	μ	

- [12] Chein, R., & Huang, G. (2005). Analysis of microchannel heat sink performance using nanofluids. *Appl. Therm. Eng.*, 25(17-18), 3104-3114.
- [13] Darzi, A. R., Farhadi, M., Sedighi, K., Aallahyari, S., & Delavar, M. A. (2013). Turbulent heat transfer of Al₂O₃-water nanofluid inside helically corrugated tubes: numerical study. *Int. Commun. Heat Mass Transf.*, 41, 68-75.
- [14] Sohel, M. R., Khaleduzzaman, S. S., Saidur, R., Hepbasli, A., Sabri, M. F. M., & Mahbubul, I. M. (2014). An Experimental investigation of heat transfer enhancement of a minichannel heat sink using Al₂O₃-H₂O nanofluid. *Int. J. Heat Mass Transf.*, 74, 164-172.
- [15] Ho, C. J., Wei, L. C., & Li, Z. W. (2010). An Experimental investigation of forced convective cooling performance of a microchannel heat sink with Al₂O₃/water nanofluid. *Appl. Therm. Eng.*, 30(2-3), 96-103.
- [16] Ghasemi, S. E., Ranjbar, A. A., & Hosseini, M. J. (2017). Thermal and hydrodynamic characteristics of water-based suspensions of Al₂O₃ nanoparticles in a novel minichannel heat sink. *J. Mol. Liq.*, 230, 550-556.
- [17] Teimouri, A., Nejati, V., Zahmatkesh, I., & Saleh, S. R. (2023). Numerical investigation of two-phase nanofluid flow in square cavity with inclined wall under different magnetic field. *J. Solid Fluid Mech.*, 13(1), 125-136.
- [18] Kumar, R., Tiwary, B., & Singh, P. K. (2022). Thermofluidic analysis of Al₂O₃-water nanofluid cooled branched wavy heat sink. *Appl. Therm. Eng.*, 201, 117787.
- [19] Miner, A., & Ghoshal, U. (2004). Cooling of high-power-density microdevices using liquid metal coolants. *Appl. Phys. Lett.*, 85(3), 506-508.
- [20] Hodes, M., Zhang, R., Lam, L. S., Wilcoxon, R., & Lower, N. (2013). On the potential of galinstan-based minichannel and minigap cooling. *IEEE Trans. Compon. Packag. Manuf. Technol.*, 4(1), 46-56.
- [21] Xie, G., Chen, Z., Sunden, B., & Zhang, W. (2013). Numerical predictions of the flow and thermal performance of water-cooled single-layer and double-layer wavy microchannel heat sinks. *Numer. Heat Transf., Part A: Applications*, 63(3), 201-225.
- [22] Zhang, R., Hodes, M., Lower, N., & Wilcoxon, R. (2015). Water-Based Microchannel and Galinstan-Based Minichannel Cooling Beyond 1 kW/cm²
- [1] Tuckerman, D. B., & Pease, R. F. W. (1981). High-performance heat sinking for VLSI. *IEEE Electron dev. Lett.*, 2(5), 126-129.
- [2] Qu, W., & Mudawar, I. (2002). Experimental and numerical study of pressure drop and heat transfer in a single-phase micro-channel heat sink. *Int. J. Heat Mass Transf.*, 45(12), 2549-2565. *Int. J. Heat Mass Transf.*
- [3] Gunnasegaran, P., Mohammed, H. A., Shuaib, N. H., & Saidur, R. (2010). The effect of geometrical parameters on heat transfer characteristics of microchannels heat sink with different shapes. *Int. Commun. Heat Mass Transf.*, 37(8), 1078-1086.
- [4] Guo, Y., Zhu, C. Y., Gong, L., & Zhang, Z. B. (2023). Numerical simulation of flow boiling heat transfer in microchannel with surface roughness. *Int. J. Heat Mass Transf.*, 204, 123830.
- [5] Sepehrnia, M., & Rahmati, A. (2018). Numerical investigating the gas slip flow in the microchannel heat sink using different materials. *Chall. Nano Micro Scale Sci.*, 6(Special Issue), 44-50.
- [6] Kumar, R., Singh, G., & Mikielawicz, D. (2018). A new approach for the mitigating of flow maldistribution in parallel microchannel heat sink. *J. Heat Transf.*, 140(7), 072401.
- [7] Li, X. Y., Wang, S. L., Wang, X. D., & Wang, T. H. (2019). Selected porous-ribs design for performance improvement in double-layered microchannel heat sinks. *Int. J. Therm. Sci.*, 137, 616-626.
- [8] Shomali, M., & Rahmati, A. (2020). Numerical analysis of gas flows in a microchannel using the Cascaded Lattice Boltzmann Method with varying Boshanquet parameter. *J. Heat Mass Transf. Res.*, 7(1), 25-38.
- [9] Wang, S. L., Chen, L. Y., Zhang, B. X., Yang, Y. R., & Wang, X. D. (2020). A new design of double-layered microchannel heat sinks with wavy microchannels and porous-ribs. *J. Therm. Anal. Calorim.*, 141, 547-558.
- [10] Hamidi, E., Ganesan, P., Muniandy, S. V., & Hassan, M. A. (2022). Lattice Boltzmann Method simulation of flow and forced convective heat transfer on 3D micro X-ray tomography of metal foam heat sink. *Int. J. Therm. Sci.*, 172, 107240.
- [11] Keshavarz, M., Habibi, S., & Amini, Y. (2023). Heat transfer enhancement in a microchannel using active vibrating piezoelectric vortex generator. *J. Solid Fluid Mech.*, 12(6), 191-204.

- Chen, Z., Qian, P., Huang, Z., Zhang, W., & Liu, M. (2023). Study on flow and heat transfer of liquid metal in the microchannel heat sink. *Int. J. Therm. Sci.*, 183, 107840.
- [30] Koneti, L., & Venkatasubbaiah, K. (2023). A comparative heat transfer study of water and liquid gallium in a square enclosure under natural convection. *Int. J. Fluid Mech. Res.*, 50(3).
- [31] SheikhZadeh, G., Alanchari, A., Mehradasl, A., & Pirmohammadi, M. (2023). Numerical study of turbulent natural convection in the presence of a constant magnetic field in a square enclosure. *Energy Eng. Manag.* 1(2), 49-55.
- [32] Singh, R. J., & Gohil, T. B. (2023, May). Numerical investigation on the liquid metal flow and heat transfer in the multi-step enclosure in the existence of magnetic field. In *AIP Conference Proceedings* (Vol. 2584, No. 1). AIP Publishing.
- [33] Ullah, Z., Ahmad, H., Khan, A. A., Aldhabani, M. S., & Alsulami, S. H. (2023). Thermal conductivity effects on mixed convection flow of electrically conducting fluid along vertical magnetized plate embedded in porous medium with convective boundary condition. *Mater. Today Commun.*, 35, 105892.
- [34] Wang, Z. H., & Lei, T. Y. (2020). Liquid metal MHD effect and heat transfer research in a rectangular duct with micro-channels under a magnetic field. *Int. J. Therm. Sci.*, 155, 106411.
- [35] Sarowar, M. T. (2021) Numerical analysis of a liquid metal cooled mini channel heat sink with five different ceramic substrates. *Ceram. Int.*, 47(1), 214-225
- [36] Hunt, J. C. R. (1965). Magnetohydrodynamic flow in rectangular ducts. *J. Fluid Mech.*, 21(4), 577-590.
- [37] Hunt, J. C. R., & Stewartson, K. (1965). Magnetohydrodynamic flow in rectangular ducts. II. *J. Fluid Mech.*, 23(3), 563-581.
- Heat FluX. , *IEEE Trans. Compon., Packag. Manuf. Technol.*, 5(6), 762-770.
- [23] Wu, T., Wang, L., Tang, Y., Yin, C., & Li, X. (2022). Flow and heat transfer performances of liquid metal based microchannel heat sinks under high temperature conditions. *Micromachines*, 13(1), 95.
- [24] Wang, Z. H., & Zhou, Z. K. (2019). External natural convection heat transfer of liquid metal under the influence of the magnetic field. *Int. J. Heat Mass Transf.*, 134, 175-184.
- [25] Shi, X., Li, S., Mu, Y., & Yin, B. (2019). Geometry parameters optimization for a microchannel heat sink with secondary flow channel. *Int. Commun. Heat Mass Transf.*, 104, 89-100.
- [26] Wang, T. H., Wu, H. C., Meng, J. H., & Yan, W. M. (2020). Optimization of a double-layered microchannel heat sink with semi-porous-ribs by multi-objective genetic algorithm. *Int. J. Heat Mass Transf.*, 149, 119217.
- [27] Hajmohammadi, M. R., Gholamrezaie, S., Ahmadpour, A., & Mansoori, Z. (2020). Effects of applying uniform and non-uniform external magnetic fields on the optimal design of microchannel heat sinks. *Int. J. Mech. Sci.*, 186, 105886.
- [28] Abadeh, A., Sardarabadi, M., Abedi, M., Pourramezan, M., Passandideh-Fard, M., & Maghrebi, M. J. (2020). Experimental characterization of magnetic field effects on heat transfer coefficient and pressure drop for a ferrofluid flow in a circular tube. *J. Mol. Liq.*, 299, 112206.
- [29] Li, P., Guo, D., & Huang, X. (2020). Heat transfer enhancement in microchannel heat sinks with dual split-cylinder and its intelligent algorithm based fast optimization. *Appl. Therm. Eng.*, 171, 115060.