



Semnan University

Journal of Modeling in Engineering

Journal homepage: <https://modelling.semnan.ac.ir/>

ISSN: 2783-2538



Research Article

Improving the pressure drop and heat transfer of forced convection of liquid metal by applying direct and alternating magnetic fields

Ahmad Reza Rahmati ^{a,*}, Abbas molaei ^a

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

PAPER INFO

Paper history:

Received:

Revised:

Accepted:

Keywords:

Forced convection heat transfer;

liquid metal;

direct and alternating

magnetic;

heat sink.

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 and passive heat sink. In this research, an active heat sink and gallinsten liquid metal is considered as the working fluid. The discretization of Navirastox equations has been done by the upstream second-order finite volume method. The effect of applying the magnetic field in the Y direction (perpendicular to the flow axis) to the thermal well has caused the creation of a force against the flow direction called the Lorentz force, which has caused the M-shaped velocity distribution. This type of velocity distribution has caused an increase in the flow velocity in the vicinity of the walls and a decrease in the flow velocity in the central line of the microchannel. By applying an alternating magnetic field in the X direction to the thermal well, the velocity distribution has become flat. The results showed that the effect of direct and alternating magnetic field has improved the Nusselt number. By applying an alternating magnetic field in the Y direction, the Nusselt number is improved by 38% and by applying a magnetic field in the X direction, the Nusselt number is improved by 11.62%. The increase in the speed gradient resulting from the application of direct and alternating magnetic field has also increased the friction coefficient. In this research, by examining the phase difference of magnetic and electric fields from zero to 90 degrees, it was shown that the pressure drop and the friction coefficient resulting from the magnetic field have decreased.

DOI: <https://doi.org/10.22075/jme.2024.31282.2495>

© 2024 Published by Semnan University Press.

This is an open access article under the CC-BY 4.0 license.(<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

* Corresponding author.

E-mail address: ar_rahmati@kashanu.ac.ir

How to cite this article:

مقاله پژوهشی

بهبود افت فشار و انتقال حرارت جابه‌جایی اجباری فلز مایع در اثر اعمال میدان مغناطیسی ثابت و متناوب

احمد رضا رحمتی^{۱*}، عباس ملایی^۱

اطلاعات مقاله	چکیده
دریافت مقاله: بازنگری مقاله: پذیرش مقاله:	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 و غیرفعال است. در این پژوهش از یک چاه حرارتی فعال و فلز مایع گالینستن به عنوان سیال عامل در نظر گرفته شده است. 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. این نوع توزیع سرعت، سبب افزایش سرعت جریان در مجاورت دیواره‌ها و کاهش سرعت جریان در خط مرکزی میکروکانال شده است. با اعمال میدان مغناطیسی متناوب در جهت X به چاه حرارتی، توزیع سرعت به حالت تخت درآمده است. نتایج نشان داد اثر اعمال میدان مغناطیسی مستقیم و متناوب عدد ناسلت را بهبود داده است. با اعمال میدان مغناطیسی متناوب در جهت Y، عدد ناسلت ۳۸ درصد و با اعمال میدان مغناطیسی در جهت X، عدد ناسلت ۱۱/۶۲ درصد بهبود یافته است. افزایش گرادیان سرعت حاصل از اعمال میدان مغناطیسی مستقیم و متناوب سبب افزایش ضریب اصطکاک نیز شده است. در این پژوهش با بررسی اختلاف فاز میدان‌های مغناطیسی و الکتریکی از صفر تا ۹۰ درجه نشان داده شد که افت فشار و ضریب اصطکاک حاصل از میدان مغناطیسی، کاهشی شده است.
واژگان کلیدی: انتقال حرارت جابه‌جایی اجباری، فلز مایع، میدان مغناطیسی مستقیم و متناوب، چاه حرارتی.	

DOI: <https://doi.org/10.22075/jme.2024.31282.2495>

© 2024 Published by Semnan University Press.

This is an open access article under the CC-BY 4.0 license. (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

۱- مقدمه

دارند، بنابراین در خصوص افزایش انتقال حرارت از منبع گرم کارآمدتر هستند. اثر اعمال میدان مغناطیسی بر جریان فلز مایع به دلیل بالابودن ضریب رسانایی الکتریکی آن، سبب تغییر در رفتار جریان می‌شود. اعمال میدان مغناطیسی باتوجه به نوع انتقال حرارت جابه‌جایی (طبیعی، اجباری، ترکیبی)، اثرات متفاوتی بر ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی و افت فشار می‌گذارد.

تحولات سریع در صنایع کامپیوتری چالش‌های بزرگی را در مکانیسم‌های خنک‌کنندگی قطعات الکترونیکی به وجود آورده است. عملکرد این مکانیسم‌ها تا حد زیادی تحت تأثیر فناوری‌های خنک‌کننده مرتبط با آن‌ها قرار می‌گیرد. در این مورد، چاه‌های حرارتی میکروکانالی مبتنی بر فلز مایع، گزینه‌های مناسبی هستند. چاه حرارتی میکروکانالی یک مبدل حرارتی کوچک است که می‌تواند مقدار زیادی شار حرارتی را از یک سطح کوچک حذف کند. فلزات مایع نسبت به سیال‌های معمولی، ضریب رسانش حرارتی بالاتری

تاکرمن و پیس [۱] نخستین مطالعات در زمینه عملکرد حرارتی چاه‌های حرارتی میکروکانالی را انجام دادند. نتایج آن‌ها مبنای اولیه‌ای برای بررسی این حوزه فراهم کرد. کو

نشان داد که نانوسیال‌ها عملکرد حرارتی را بهبود می‌دهند بدون اینکه افت فشار قابل توجهی ایجاد شود. چین و هوانگ [۱۲] عملکرد حرارتی جریان نانوسیال‌های مختلف در دو هندسه متفاوت میکروکانال را به صورت عددی و تجربی بررسی کردند. نانوسیال‌ها در مدل‌سازی عددی به صورت تک‌فاز در نظر گرفته شدند. نتایج آن‌ها نشان داد که استفاده از نانوسیال‌ها عملکرد حرارتی هر دو هندسه را بهبود بخشیده و به دلیل کوچک بودن اندازه ذرات و کسر حجمی پایین نانوذرات، افت فشار اضافی ایجاد نمی‌شود.

درزی و همکاران [۱۳] با روش دوفازی انتقال حرارت نانوسیال آب آلومینا و آب خالص در لوله راه‌راه گرم شده را بررسی کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که نانوسیال با کسر حجمی ۲ و ۴ درصد به ترتیب ۲۱ و ۵۸ درصد انتقال حرارت بیشتری نسبت به آب پایه دارد.

سوهل و همکاران [۱۴] به صورت تجربی عملکرد حرارتی چاه حرارتی میکروکانال با نانوسیال را بررسی کردند. نتایج آن‌ها بهبود ضریب انتقال حرارت تا ۱۸ درصد و کاهش دمای پایه تا حدود ۲.۷ درجه سانتی‌گراد و کاهش ۱۵.۷۲ درصدی مقاومت حرارتی را نشان داد. هو و همکاران [۱۵] با آزمایش تجربی در چاه حرارتی میکروکانال دریافتند که نانوسیال آب-اکسید آلومینیوم میانگین انتقال حرارت را افزایش می‌دهد. تیموری و همکاران [۱۶] در بررسی جابه‌جایی ترکیبی در حفره مربعی نشان دادند که افزودن نانوذره به سیال پایه باعث افزایش عدد ناسلت تا ۲۰ درصد و افزایش آن تا حدود ۳۰ درصد با افزایش کجی حفره می‌شود. قاسمی و همکاران [۱۷] به صورت عددی مطالعه‌ای بر انتقال حرارت نانوسیال آب/آلومینا انجام دادند و نتایج نشان داد که افزایش غلظت نانوذرات موجب افزایش ضرایب انتقال حرارت و اصطکاک و کاهش مقاومت حرارتی می‌شود. کومار و همکاران [۱۸] نیز با شبیه‌سازی میکروکانال‌های موج‌دار منشعب خنک‌شده با نانوسیال، نشان دادند که افزایش غلظت نانوسیال منجر به افزایش ضریب انتقال حرارت برای تمام اعداد رینولدز مورد بررسی شده است و گردابه‌های ایجادشده عملکرد حرارتی را بهبود می‌بخشند.

مایر و گوشال [۱۹] نشان دادند که انتقال حرارت در هر دو رژیم آرام و آشفته با خنک‌کننده فلز مایع افزایش می‌یابد. هودس و همکاران [۲۰] نتایج خود را ارائه کردند

و موداوار [۲] ویژگی‌های افت فشار و انتقال حرارت در چاه حرارتی تک‌فاز را به صورت تجربی و عددی بررسی کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که افزایش عدد رینولدز موجب کاهش دمای خروجی و داخلی می‌شود، اما افت فشار را افزایش می‌دهد. گوناسگاران و همکاران [۳] با بررسی میکروکانال‌هایی با مقاطع مختلف دریافتند که چاه‌های حرارتی با قطر هیدرولیکی کمتر، عملکرد حرارتی و هیدرولیکی بهتری دارند. نتایج آن‌ها نشان داد که این چاه‌ها توزیع دما و ضریب انتقال حرارت یکنواخت‌تری دارند. لیانگ و همکاران [۴] اثر زبری سطح بر انتقال حرارت جریان جوشان را شبیه‌سازی کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که زبری سطح ابتدا عدد ناسلت را افزایش و سپس کاهش می‌دهد و سطوح ناهموار عملکرد بهتری نسبت به سطوح صاف دارند. سپهرنیا و رحمتی [۵] جریان لغزشی گاز هلیوم را در چاه حرارتی سه‌بعدی مطالعه کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که با افزایش عدد ناسن، مقاومت حرارتی افزایش می‌یابد و عملکرد حرارتی به جنس چاه وابسته است. کومار و همکاران [۶] با طراحی میکروکانال‌های عرض متغیر، توزیع جریان را بهبود بخشیدند. نتایج آن‌ها نشان داد که این طرح توزیع جریان را تا ۹۳.۷٪ بهبود داده و نوسان دمای سطح را کاهش می‌دهد. لی و همکاران [۷] پنج نوع چاه حرارتی مختلف را بررسی کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که چاه حرارتی دولایه ترکیبی از عملکرد حرارتی بالا و افت فشار کم دارد. شمالی و رحمتی [۸] روش شبکه بولتزمن آبشاری بهبودیافته را برای شبیه‌سازی جریان گاز در میکروکانال‌ها توسعه دادند. نتایج آن‌ها دقت بالاتری نسبت به روش‌های کلاسیک نشان داد. وانگ و همکاران [۹] یک چاه حرارتی موج‌دار دولایه با دنده‌های متخلخل طراحی کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که این چاه عملکرد حرارتی بالا با توان پمپاژ پایین دارد و طراحی بهینه موجب کاهش مقاومت حرارتی می‌شود. حمیدی و همکاران [۱۰] شبیه‌سازی جریان و انتقال حرارت در چاه‌های فوم فلزی را با هندسه واقعی انجام دادند. نتایج آن‌ها نشان داد که چگالی منافذ و تخلخل تأثیر مهمی بر انتقال حرارت دارند. کشاورز و همکاران [۱۱] از مولدهای گردابه‌ای پیزوالکتریک برای افزایش انتقال حرارت در میکروکانال‌ها استفاده کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که این مولدها باعث افزایش قابل توجه نرخ انتقال حرارت می‌شوند. چین و هوانگ [۱۲] عملکرد حرارتی میکروکانال‌ها با نانوسیال‌ها را بررسی کردند. نتایج آن‌ها

نشان دادند که افزایش عدد هارتمن باعث کاهش عدد ناسلت متوسط و تضعیف لایه‌های حرارتی می‌شود. وانگ و همکاران [۳۵] گزارش کردند که افزایش عدد هارتمن تحت میدان مغناطیسی باعث افزایش ۳۲ درصدی انتقال حرارت جابه‌جایی می‌شود اما افت فشار و ضریب اصطکاک چاه حرارتی را به شدت افزایش می‌دهد.

پن و همکاران [۳۶] به بررسی جریان‌های مگنتوهیدرودینامیک آرام لایه نازک فلز مایع در یک کانال باز تحت تأثیر میدان مغناطیسی عرضی پرداخته‌اند. در این مطالعات، تأثیرات میدان مغناطیسی، رسانایی و ابعاد کانال بر توزیع جریان و سرعت جریان مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است. با استفاده از روش‌های مدل‌سازی فیزیکی و شبیه‌سازی عددی، قانون مقیاس‌بندی برای تعیین ضخامت لایه نازک و مکانیسم‌های سبب‌دهی تکامل جریان مغناطیسی مطرح شده است. نتایج این تحقیقات، که با داده‌های تجربی نیز تطبیق یافته‌اند، نقش مهم میدان مغناطیسی قوی در ایجاد گرداب جدایی لورنتز و بی‌ثباتی لایه نازک جریان را نشان داده‌اند. این مطالعات زمینه‌ساز طراحی بهینه اجزای مواجهه با پلاسمای فلز مایع در راکتورهای همجوشی توکامک می‌باشند.

هارت و همکاران [۳۷] به بررسی راهکارهای نوین انتقال حرارت برای ماهواره‌های مکعبی (CubeSats) پرداخته‌اند که با چالش‌های جدی در زمینه مدیریت حرارتی به دلیل ابعاد کوچک و بارهای حرارتی بالا مواجه هستند. در این پژوهش، یک حلقه انتقال حرارت مبتنی بر پمپ مگنتوهیدرودینامیکی (MHD) معرفی شده که از نیروی لورنتس برای هدایت فلز مایع به عنوان سیال عامل بهره می‌گیرد. این روش، با حذف قطعات متحرک مکانیکی، پایداری عملکرد را افزایش داده و احتمال خرابی را کاهش می‌دهد. مزایای این حلقه MHD در مقایسه با فناوری‌های مرسوم شامل توانایی در مدیریت منابع حرارتی متعدد، تحمل شارهای حرارتی بالا و سازگاری الکتریکی با سیستم‌های استاندارد ماهواره‌های مکعبی است. نتایج آزمایشگاهی نیز نشان می‌دهند که این سیستم می‌تواند نرخ‌های انتقال حرارت قابل توجهی را با جرم کم و کارایی بالا تأمین کند، که آن را به گزینه‌ای مناسب برای سامانه‌های فضایی کوچک با نیاز حرارتی بالا تبدیل می‌کند.

که گالینستن به عنوان فلز مایع می‌تواند مقاومت حرارتی کلی چاه حرارتی را تا حدود ۴۰ درصد نسبت به آب کاهش دهد. زی و همکاران [۲۱] نشان دادند که افزایش سرعت جریان حجمی باعث کاهش مقاومت حرارتی در چاه حرارتی تک‌لایه موج‌دار می‌شود اما افت فشار به شدت افزایش می‌یابد. ژانگ و همکاران [۲۲] بهبود انتقال حرارت همرفتی با استفاده از فلز مایع به دلیل خواص ترموفیزیکی بهتر را گزارش کردند. ویو و همکاران [۲۳] دریافتند که لیتیوم به عنوان سیال عامل مناسب‌ترین انتخاب است زیرا بیشترین انتقال حرارت و کمترین افت فشار را دارد، همچنین سطح مقطع دایره‌ای برای میکروکانال بهترین عملکرد انتقال حرارت را ارائه می‌دهد. وانگ و همکاران [۲۴] با بهینه‌سازی چاه حرارتی دو لایه میکروکانالی کاهش قابل توجهی در مقاومت حرارتی (۲۸.۷ درصد) و قدرت پمپاژ (۲۲.۹ درصد) به دست آوردند. شی و همکاران [۲۵] پارامترهای هندسی چاه حرارتی را بهینه کردند.

مطالعات مرتبط با اثرات میدان مغناطیسی نیز نتایج قابل توجهی داشتند؛ وانگ و همکاران [۲۶] نشان دادند که میدان مغناطیسی باعث تغییر ضخامت لایه مرزی سرعت و افزایش کلی ضخامت لایه مرزی حرارتی می‌شود. حاج‌محمدی و همکاران [۲۷] گزارش کردند که اعمال میدان مغناطیسی یکنواخت می‌تواند مقاومت حرارتی را تا ۲۱ درصد کاهش دهد. آبا‌ده و همکاران [۲۸] دریافتند که میدان مغناطیسی متناوب باعث افزایش ۱۱.۸۵ و ۱۴.۸ درصدی عدد ناسلت فروسیال در فرکانس‌های ۱۰ و ۱۰۰ هرتز می‌شود. لی و همکاران [۲۹] با روش بهینه‌سازی سریع، افزایش ۳۴.۶۳ درصدی عملکرد حرارتی چاه‌های میکروکانالی را نشان دادند. نوری و همکاران [۳۰] گزارش کردند که اعمال میدان مغناطیسی عمود بر کانال باعث افزایش عدد ناسلت می‌شود. کارگر شریف‌آبادی [۳۱] نشان داد که افزایش فرکانس میدان مغناطیسی و کسر حجمی نانوذرات منجر به افزایش بهتر انتقال حرارت می‌شود.

چن و همکاران [۳۲] دریافتند که ساختار کامپوزیتی میکروکانال کمترین مقاومت جریان و کاهش ۵۴.۹ درصدی قدرت پمپاژ را با افزایش اندک مقاومت حرارتی ارائه می‌دهد. کننتی و همکاران [۳۳] نشان دادند که در گالیم مایع مکانیسم انتشار در مقابل همرفت غالب است، در حالی که برای آب همرفت غالب است. شیخ‌زاده و همکاران [۳۴]

با توجه به اهمیت بهبود عملکرد چاه‌های حرارتی میکروکانالی و محدودیت‌های موجود در استفاده از سیال‌های خنک‌کننده رایج، این پژوهش تلاش دارد با ارائه رویکردهای نوآورانه، گامی مؤثر در ارتقاء انتقال حرارت و کاهش افت فشار بردارد. در این راستا، نوآوری‌های متعددی در زمینه استفاده از فلز مایع، تاثیر میدان‌های مغناطیسی و بهینه‌سازی شرایط عملیاتی مطرح شده است که در ادامه به تفصیل بیان می‌گردد.

اگرچه مطالعات گسترده‌ای بر روی چاه‌های حرارتی میکروکانالی انجام شده است، اما تحقیقات درباره استفاده از فلز مایع به عنوان سیال کار در این سیستم‌ها بسیار محدود است. اولین نوآوری این پژوهش، به‌کارگیری خنک‌کننده فلز مایع به عنوان سیال کار می‌باشد که مزایای قابل‌توجهی نسبت به مایعات خنک‌کننده معمولی ارائه می‌دهد. نوآوری دوم، تمرکز بر بررسی اثرات میدان مغناطیسی ثابت و متناوب بر فلز مایع است، که هدف آن افزایش انتقال حرارت کارآمد و پر بازده می‌باشد. نوآوری سوم، مطالعه اثرات اعمال میدان مغناطیسی در جهت‌های عمود بر محور جریان است که می‌تواند رفتار جریان و انتقال حرارت را بهبود بخشد. نوآوری چهارم، با توجه به تحقیقات پیشین که نشان داده‌اند اعمال میدان مغناطیسی سبب افزایش افت فشار و ضریب اصطکاک چاه حرارتی می‌شود، به بررسی نقش اختلاف فاز بین میدان مغناطیسی و الکتریکی در کاهش ضریب اصطکاک و افت فشار پرداخته شده است. این رویکرد نوین می‌تواند به بهبود عملکرد کلی سیستم و کاهش هزینه‌های عملیاتی کمک کند.

۲- هندسه و معادلات آن

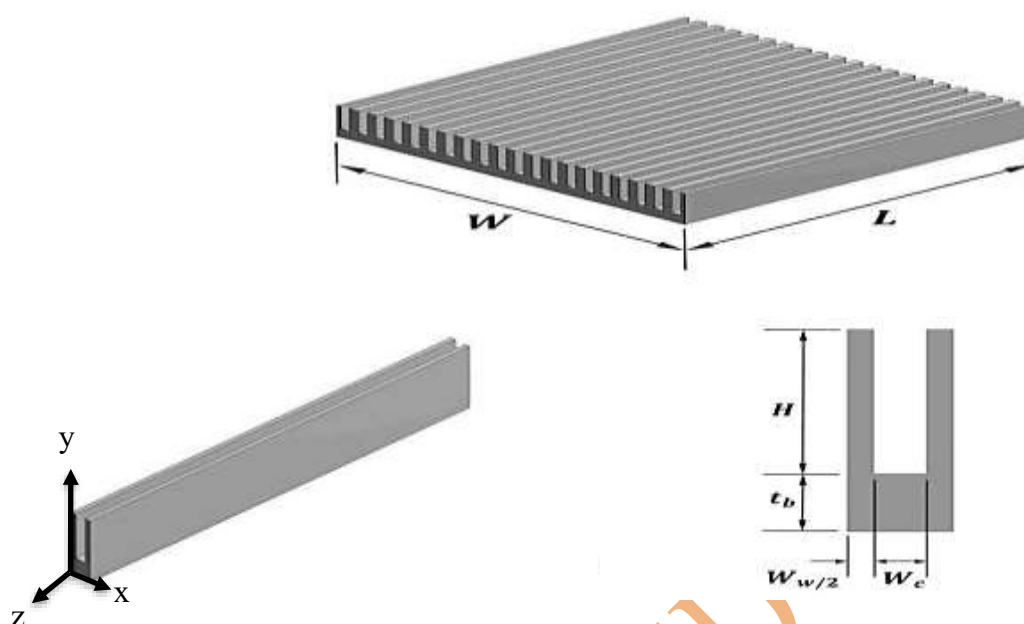
در این پژوهش تأثیر میدان مغناطیسی خارجی مستقیم و متناوب بر میدان جریان و انتقال حرارت فلز مایع در سه جهت متفاوت x و y و z با هندسه شکل ۱ مورد بررسی قرار گرفته است. از یک چاه حرارتی میکروکانال مشابه کار سارووار و همکاران [۳۶] استفاده می‌شود. چاه حرارتی از ۲۰ کانال مستطیلی یکسان تشکیل شده است. همه کانال‌ها خواص انتقال گرما و جرم یکسانی را نشان می‌دهند به‌همین دلیل، تنها یک کانال واحد برای تجزیه و تحلیل استفاده شده است. پارامترهای هندسی زیر در مطالعه مقایسه بین مواد بستر و خنک‌کننده استفاده شد: ارتفاع کانال $H=5\text{mm}$ ، عرض کانال $W_c=1\text{mm}$ ، ضخامت دیواره کانال

وانگ و همکاران [۳۸] به بررسی همرفت طبیعی فلز مایع تحت میدان مغناطیسی افقی پرداخته‌اند. نتایج نشان می‌دهد که نیروی لورنتس ناشی از میدان مغناطیسی باعث انتقال ساختار جریان از سه‌بعدی به دوبعدی می‌شود. همچنین وجود یک شدت بهینه از میدان مغناطیسی شناسایی شده که در آن عدد ناسلت و رینولدز ابتدا افزایش و سپس کاهش می‌یابد. رابطه بین عدد هارتمن و راندمان انتقال حرارت استخراج شده و نقش کلیدی توده‌های حرارتی و نیروی برشی در بهبود انتقال حرارت مورد تأکید قرار گرفته است. در فلزات مایع با عدد پرانتل پایین نیز نشان داده شده که لایه مرزی حرارتی کنترل‌کننده اصلی راندمان انتقال حرارت است.

شائو و همکاران [۳۹] نویسندگان به بررسی عددی تولید برق مگنتوهیدرودینامیکی با استفاده از فلز مایع تحت شرایط مختلف سرعت ورودی پرداخته‌اند. نتایج نشان می‌دهد که در مقایسه با ورودی یکنواخت، استفاده از ورودی سرعت غیر یکنواخت منجر به کاهش افت فشار و توان ورودی، و همزمان افزایش انرژی جنبشی آشفتگی، چگالی جریان، توان خروجی و راندمان تولید برق می‌شود؛ به‌طوری که راندمان تا ۱۷.۷۷٪ بهبود یافته است. همچنین تأثیر سرعت جریان، قدرت میدان مغناطیسی و ارتفاع کانال بر عملکرد سیستم بررسی شده و مشخص شده است که با افزایش شدت میدان مغناطیسی، چگالی جریان افزایش می‌یابد، ولی راندمان در حدود ۵۱٪ تثبیت می‌شود.

وانگ و همکاران [۴۰] نویسندگان به بررسی عددی افزایش انتقال حرارت در جریان مگنتوهیدرودینامیکی اطراف یک استوانه نزدیک دیواره در یک مجرا پرداخته‌اند. تحلیل نتایج نشان می‌دهد که سه عامل اصلی شامل ریزش گردابه، شناوری حرارتی، و اثرات جفت‌شده آن‌ها بر همرفت مختلط تأثیرگذار هستند. میدان مغناطیسی قوی باعث سرکوب ناپایداری جریان شده و سه الگوی مختلف جریان را به وجود می‌آورد. همچنین مشخص شده است که موقعیت استوانه نسبت به دیواره داغ به صورت غیرخطی بر راندمان انتقال حرارت تأثیر می‌گذارد؛ به‌طوری که نزدیکی بهینه موجب تقویت انتقال حرارت از طریق تقویت تبادل بین لایه مرزی حرارتی و ناحیه جریان اصلی می‌شود، در حالی که نزدیکی بیش از حد موجب اختلال در الگوی جریان و کاهش عملکرد حرارتی می‌گردد.

$W_w=1\text{mm}$ و ضخامت پایه $t_b=2\text{mm}$ و با ابعاد
 $W \times L=4\text{cm} \times 4\text{cm}$



شکل ۱- هندسه سه بعدی کامل و تک میکروکانال [۴۱]

خواص ترموفیزیکی سیال گالینستن برای انجام شبیه سازی طبق جدول ۱ است.

جدول ۱- خواص ترموفیزیکی سیال گالینستن در دمای ۲۹۰ کلوین [۳۵]

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

(۶) معادلات حاکم برای اعمال میدان مغناطیسی متناوب به صورت گذرا و در حالت ثابت به صورت پایا بررسی شده است.

(۷) با توجه به یکنواخت بودن اعمال میدان مغناطیسی، از ترم فرومغناطیس صرف نظر شده است.

(۸) میدان های الکتریکی و مغناطیسی به صورت متناوب در معادلات (۱۵) و (۱۶) در نظر گرفته شده است.

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

(۱) هم جریان سیال و هم انتقال حرارت پایا هستند.

(۲) جریان سیال تراکم ناپذیر و تک فاز است.

(۳) هیچ لغزشی بین سیال و دیواره ها وجود ندارد.

(۴) نیروی حجمی، نیروی گرانش و نیروی لورنتز است.

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

معادله پیوستگی

$$Ha = B_0 L \sqrt{\frac{\sigma}{\mu}} \quad (۷)$$

با توجه به حضور میدان مغناطیسی از Ha عدد هارتمن (بی‌بعد) استفاده شده است که B_0 شدت میدان مغناطیسی (T)، L طول مشخصه (m)، رسانایی الکتریکی سیال (S/m) و μ ویسکوزیته دینامیکی سیال ($Pa \cdot s$) است.

عدد رینولدز

$$Re = \frac{\rho U_f D_h}{\mu} \quad (۸)$$

در این رابطه، Re عدد رینولدز (بی‌بعد)، ρ چگالی سیال (kg/m^3)، U_f سرعت ورودی سیال (m/s)، D_h قطر هیدرولیکی (m)، و μ ویسکوزیته دینامیکی سیال ($Pa \cdot s$) است.

ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی

$$h = \frac{Q}{A_w (T_w - T_m)} \quad (۹)$$

در این رابطه، h ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی ($W/m^2 \cdot K$)، Q نرخ انتقال حرارت (W)، A_w سطح دیواره انتقال حرارت (m^2)، T_w دمای دیواره و T_m دمای میانگین سیال هستند که هر دو بر حسب کلوین (K) می‌باشند.

نرخ انتقال حرارت

$$Q = q A_b \quad (۱۰)$$

در این رابطه، Q نرخ انتقال حرارت (W)، q نرخ انتقال حرارت سطحی یا شار حرارتی (W/m^2) و A_b سطح کف چاه حرارتی (m^2) است.

عدد ناسلت میانگین

$$Nu_{Avg} = \frac{1}{L} \int_0^L Nu_x dx \quad (۱۱)$$

در این رابطه، Nu_{Avg} میانگین عدد نوسلت (بی‌بعد)، L طول مشخصه (m) و Nu_x عدد نوسلت موضعی (بی‌بعد) است که از 0 تا L انتگرال‌گیری شده است.

عدد پرانتل

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (۱)$$

معادله ممتوم در راستای X

$$\rho \left[\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right] = - \frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left[\left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \right) + \left(\frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) + \left(\frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) \right] + F_{Lx} \quad (۲)$$

معادله ممتوم در راستای Y

$$\rho \left[\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right] = - \frac{\partial p}{\partial y} + \mu \left[\left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} \right) + \left(\frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) + \left(\frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) \right] + F_{Ly} - \rho g_y \quad (۳)$$

معادله ممتوم در راستای Z

$$\rho \left[\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right] = - \frac{\partial p}{\partial z} + \mu \left[\left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right) + \left(\frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right) + \left(\frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) \right] + F_{Lz} \quad (۴)$$

معادله انرژی

$$\rho \left[\frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} + w \frac{\partial T}{\partial z} \right] = \frac{k}{c_p} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \right) + \frac{k}{c_p} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) + \frac{k}{c_p} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \quad (۵)$$

ضریب نفوذ حرارتی

$$\alpha = \frac{K}{\rho c_p} \quad (۶)$$

α ضریب نفوذ حرارتی (m^2/s)، K رسانایی گرمایی ($W/m \cdot K$)، ρ چگالی (kg/m^3) و c_p گرمای ویژه در فشار ثابت ($J/kg \cdot K$) است.

عدد هارتمن

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 و شکل ۵ کانتور سرعت مربوط به شرایط نمودار شکل ۲ در طول و عرض میکروکانال واضح است که اثر اعمال میدان مغناطیسی سبب افزایش سرعت جریان در نزدیکی دیواره ها و کاهشی شدن سرعت جریان در مرکز میکروکانال شده است که نشان دهنده جریان هانت [۳۸]، [۳۷] می باشد. شکل ۳ مقایسه توزیع دمای به دست آمده با نتایج وانگ و همکاران را نشان داده است. باتوجه به نتایج به دست آمده، مشخص است که نتایج حاصل از شبیه سازی چاه حرارتی از اعتبار لازم برخوردار است. طبق جدول ۲ استقلال حل از شبکه انجام شد و شبکه مناسب با تعداد سلول ۹۱۲۰۰۰ جهت انجام شبیه سازی انتخاب شد. در شکل ۴، نحوه شبکه بندی هندسه مورد بررسی نمایش داده شده است. به منظور افزایش دقت شبیه سازی، در ناحیه سیال از شبکه بندی با جزئیات بالاتر استفاده شده است. مقایسه نتایج حاصل از سه شبکه با تعداد المان های ۴۴۰,۰۰۰، ۹۱۲,۰۰۰ و ۲,۲۹۰,۰۰۰ در جدول ۲ ارائه شده است. این مقایسه تحت شرایط یکسان شامل سرعت ورودی ۰.۴ متر بر ثانیه و شار حرارتی ۱۰ وات بر سانتی متر مربع انجام گرفته است. بر اساس این بررسی، شبکه با ۹۱۲,۰۰۰ المان به عنوان گزینه بهینه انتخاب شده است.

$$Pr = \frac{9}{\alpha} \quad (12)$$

Pr عدد پرانتل (بی بعد)، ν ویسکوزیته سینماتیکی (m^2/s) و α ضریب نفوذ حرارتی (m^2/s) هستند.

$$Nu = f(Re, Pr) \quad (13)$$

برای انتقال حرارت جابه جایی اجباری، عدد ناسلت تابعی از عدد رینولدز و عدد پرانتل است.

$$\vec{J} = \sigma(\vec{E} + \vec{V} \times \vec{B}) \quad (14)$$

این معادله برای محاسبه چگالی جریان الکتریکی در سیال هادی تحت تأثیر میدان های الکتریکی و مغناطیسی استفاده شده است و نقش مهمی در تحلیل نیروهای الکترومغناطیسی وارد بر سیال و مدل سازی رفتار جریان دارد. $\vec{J}$ چگالی جریان الکتریکی (A/m^2)، σ رسانایی الکتریکی (S/m)، $\vec{E}$ میدان الکتریکی (V/m)، $\vec{V}$ سرعت سیال (m/s) و $\vec{B}$ میدان مغناطیسی (T) هستند.

$$\vec{E} = E \sin(\omega t + \varphi) \quad (15)$$

در این رابطه، E میدان الکتریکی متغیر با زمان (V/m)، E دامنه میدان الکتریکی (V/m)، ω فرکانس زاویه ای (rad/s)، t زمان (s) و φ اختلاف فاز نسبت به میدان مغناطیسی (درجه) هستند.

$$\vec{B} = B \sin(\omega t) \quad (16)$$

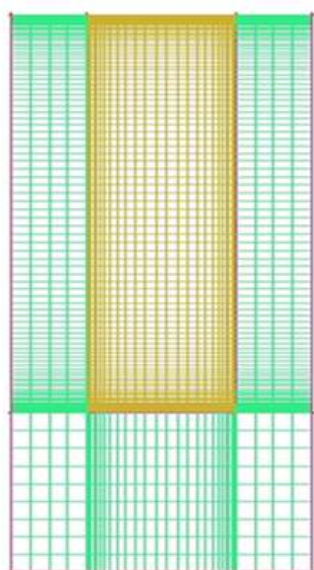
در این رابطه، B میدان مغناطیسی متغیر با زمان (T)، B دامنه میدان مغناطیسی (T)، ω فرکانس زاویه ای (رادیان بر ثانیه) و t زمان (s) هستند.

$$\vec{F}_L = \frac{\int_0^{2\pi} \vec{J} \times \vec{B} d\omega t}{2\pi} \quad (17)$$

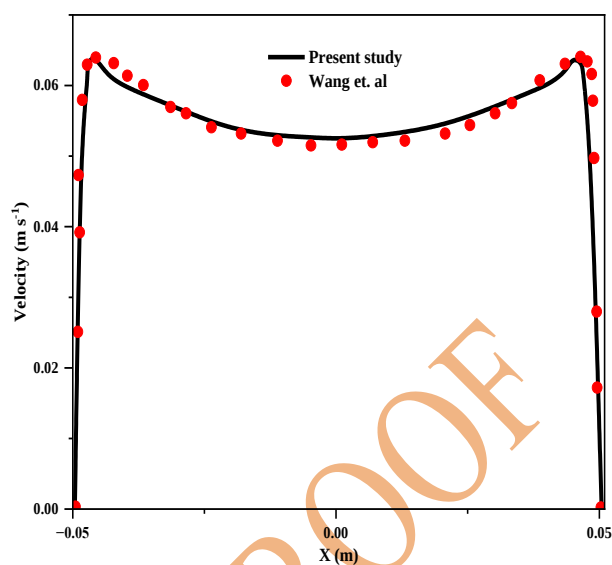
این فرمول میانگین زمانی نیروی لورنتز را در دوره تناوب کامل نشان می دهد که از انتگرال گیری ضرب برداری چگالی جریان و میدان مغناطیسی نسبت به زمان زاویه ای به دست آمده است.

$$F_L = \sigma B^2 \vec{V} \quad (18)$$

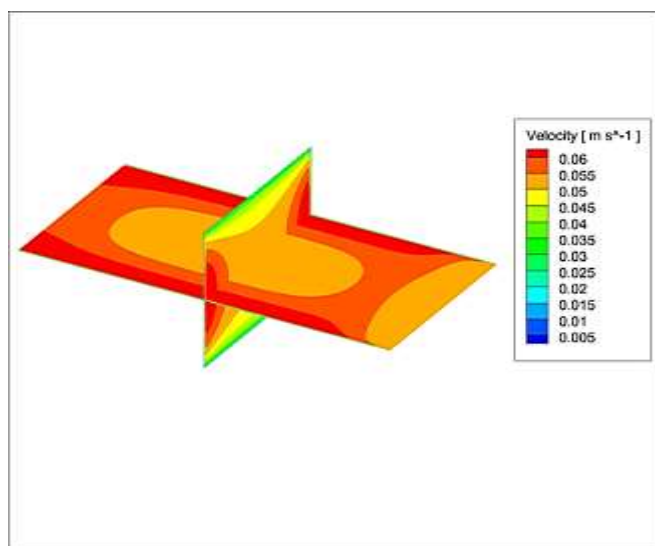
این رابطه نیروی لورنتز وارد بر سیال هادی را نشان می دهد که برابر با حاصل ضرب رسانایی الکتریکی، مربع شدت میدان مغناطیسی و سرعت سیال است.



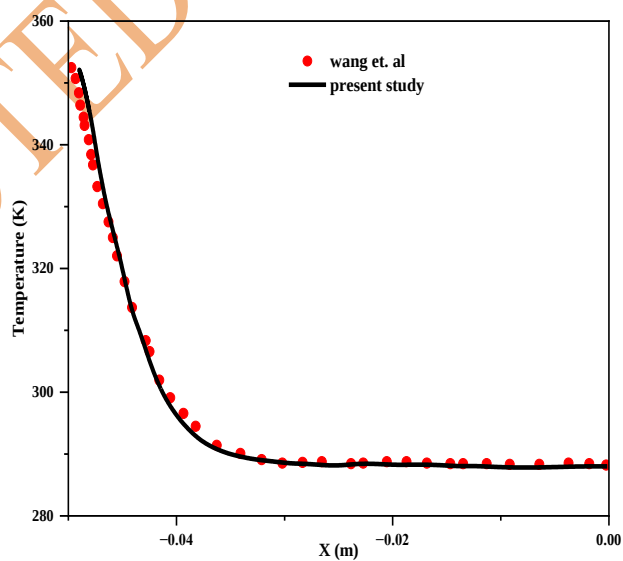
شکل ۴- شبکه بندی هندسه



شکل ۲- نمودار تغییرات سرعت در مقطع $y=0.01\text{ m}$ برای اعتبارسنجی با مطالعه وانگ و همکاران



شکل ۵ - کانتور سرعت مربوط به شرایط شکل ۲



شکل ۳- نمودار تغییرات دما در مقطع $y=0.01\text{ m}$ جهت اعتبارسنجی با مطالعه وانگ و همکاران

جدول ۲- استقلال حل از شبکه

اختلاف نسبی	$h(W/m^2k)$	سرعت ماکزیمم	تعداد نقاط
/	۵۶۱۳۴	۰/۶۰۹	۴۴۰۰۰
۰/۵٪	۵۶۴۱۲	۰/۶۲۶	۹۱۲۰۰
۰/۰۹٪	۵۶۴۶۵	۰/۶۲۹	۲۲۹۰۰۰

۴- تشریح شرایط مرزی و نرم افزار

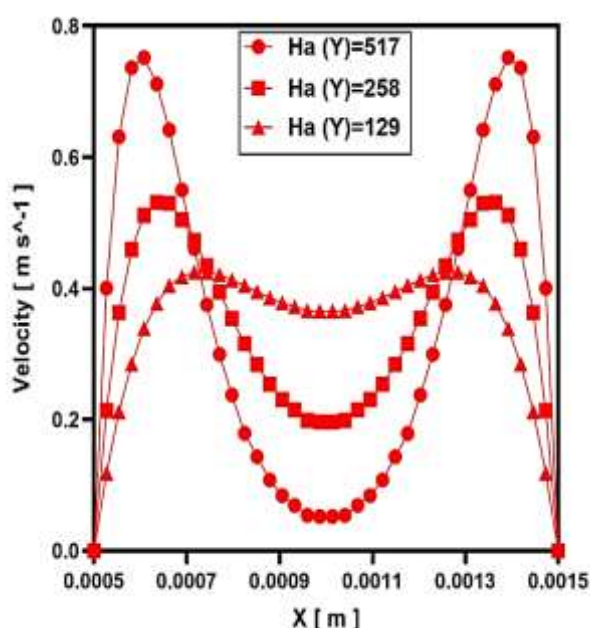
برای شرایط مرزی، شار حرارتی ثابت به کف چاه حرارتی اعمال شده است و دیواره‌های چاه حرارتی عایق در نظر گرفته شده‌اند. سیال با دمای T_f و سرعت U_f وارد میکروکانال شده و برای خروجی، شرط مرزی فشار خروجی و با اعمال میدان مغناطیسی، تمامی دیواره‌های چاه حرارتی رسانای الکتریکی در نظر گرفته شده‌اند.

جهت شبیه‌سازی از نرم‌افزار انسیس فلوئنت استفاده شده است که معادلات حاکم به روش حجم محدود حل شده‌اند و گسسته‌سازی معادله ممنتوم و انرژی از نوع مرتبه دوم است. مگنتوهیدرودینامیک به فعل‌وانفعال بین میدان الکترومغناطیسی ایجاد شده و یک سیال رسانای الکتریکی اشاره دارد. مدل مگنتوهیدرودینامیک در انسیس فلوئنت رفتار جریان سیال رسانای الکتریکی تحت تأثیر میدان‌های الکترومغناطیسی مستقیم یا نوسانی را تجزیه و تحلیل می‌کند. مدل مگنتوهیدرودینامیک با انتخاب توابع ساده داخلی فلوئنت به عنوان مازول اضافه شونده در نرم‌افزار انسیس فلوئنت فعال می‌شود.

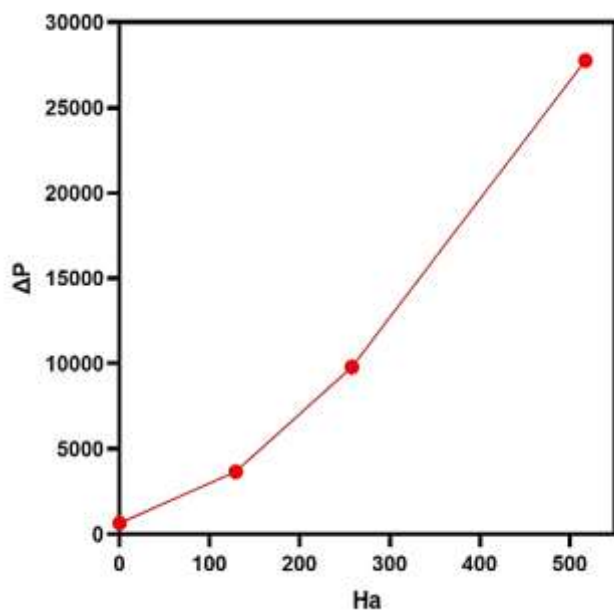
۵- بررسی میدان جریان و دمای فلز مایع تحت میدان مغناطیسی مستقیم

ابتدا به بررسی اثرات میدان مغناطیسی ثابت بر میدان جریان و دما پرداخته شده است. با اعمال میدان مغناطیسی عمود بر محور جریان، در جهت Y به چاه حرارتی، نیرویی خلاف جهت جریان به نام نیروی لورنتز اعمال می‌شود که با افزایش عدد هارتمن، توزیع سرعت M شکل را باعث شده است. شکل ۶ نمودار تغییرات سرعت با افزایش عدد هارتمن در مقطع $Z=0.02\text{ m}$ و سرعت جریان ورودی 0.3 متر بر ثانیه را نشان می‌دهد. با افزایش عدد هارتمن، توزیع سرعت از حالت یکنواخت خود خارج شده است و در مجاورت دیواره‌ها افزایشی و در خط مرکزی میکروکانال

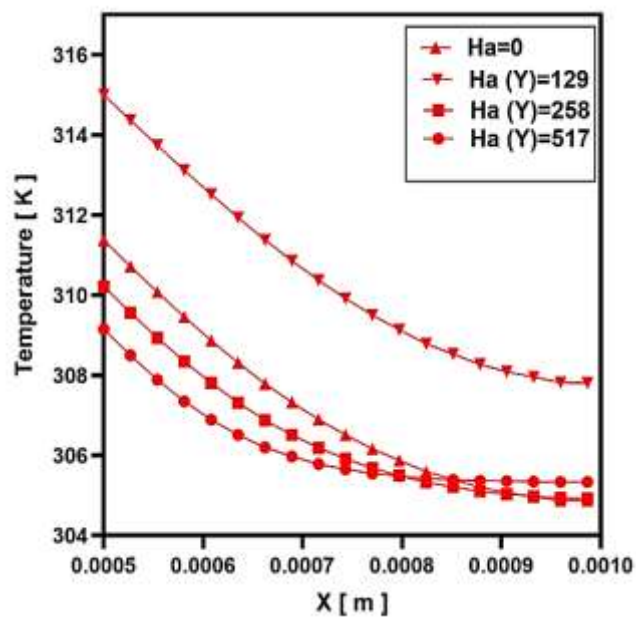
کاهش یافته است. شکل ۷ نمودار تغییرات دما با افزایش عدد هارتمن در مقطع $Z=0.02\text{ m}$ و سرعت جریان ورودی 0.3 متر بر ثانیه را نشان می‌دهد. باتوجه به شرط مرزی شار ثابت، با افزایش عدد هارتمن که سبب افزایش سرعت جریان در نزدیکی دیواره‌ها شده است، دمای سطوح چاه حرارتی کاهش یافته به دست آمده است. شکل ۸ نمودار تغییرات عدد ناسلت با افزایش عدد هارتمن و سرعت جریان ورودی 0.3 متر بر ثانیه را نشان داده است. اثر اعمال میدان مغناطیسی با افزایش عدد هارتمن سبب بهبود عدد ناسلت شده است. شکل ۹ نمودار تغییرات افت فشار با افزایش عدد هارتمن را نشان می‌دهد. همان‌طور که نتایج نشان دادند با اعمال میدان مغناطیسی در جهت Y به چاه حرارتی، بیشینه سرعت جریان در مجاورت دیواره‌ها به دست آمده است. باتوجه به حاکم بودن شرط عدم لغزش روی دیواره‌ها، افزایش عدد هارتمن سبب افزایش گرادیان سرعت شده، در نتیجه باعث افزایش افت فشار و ضریب اصطکاک دیواره‌ها شده است.



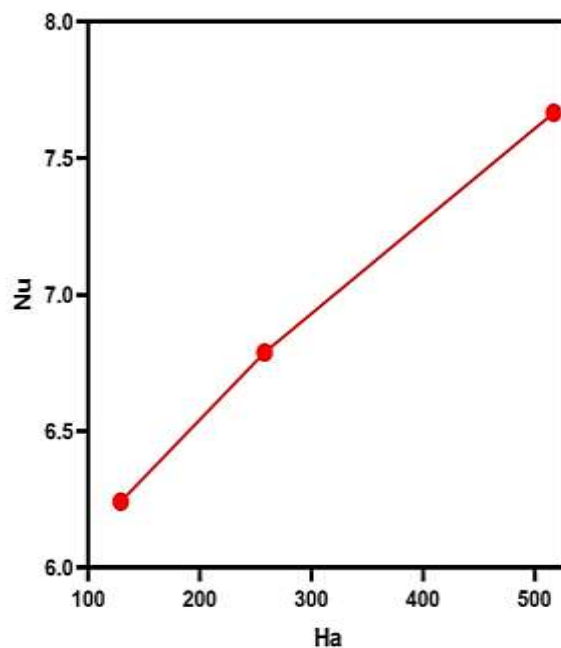
شکل ۶- نمودار توزیع سرعت جریان با افزایش عدد هارتمن، مقطع $Z=0.02\text{ m}$ ، سرعت جریان ورودی 0.3 متر بر ثانیه



شکل ۹- نمودار تغییرات افت فشار با افزایش عدد هارتمن، اعمال میدان مغناطیسی در جهت Y



شکل ۷- نمودار توزیع دما با افزایش عدد هارتمن، مقطع $Z=0.02$ m، سرعت جریان ورودی 0.3 متر بر ثانیه



شکل ۸- نمودار تغییرات عدد ناسلت با افزایش عدد هارتمن، سرعت جریان ورودی 0.3 متر بر ثانیه

۶- بررسی میدان جریان فلز مایع تحت میدان مغناطیسی متناوب

میدان مغناطیسی و الکتریکی، اثر نیروی لورنتز بر جریان سیال کاهشی شده است.

شکل ۱۲ و شکل ۱۳ نیز نشان دهنده توزیع سرعت با اعمال میدان مغناطیسی در دو جهت Y و X (عمود بر محور جریان) تحت اختلاف فازهای متفاوت را نشان می دهد. سرعت جریان ورودی 0.3 متر بر ثانیه لحاظ شده است.

شکل ۱۴ کانتور سرعت با اعمال میدان مغناطیسی متناوب تحت اختلاف فازهای مختلف را نشان می دهد. با افزایش اختلاف فاز میدان مغناطیسی و الکتریکی تا 90° درجه، توزیع سرعت جریان به حالت یکنواخت خود بر می گردد.

اعمال همزمان میدان های الکتریکی و مغناطیسی متناوب بر جریان فلزات مایع، رفتار زمانی این دو میدان نقش مهمی در شکل گیری نیروی لورنتز ایفا می کند. در صورتی که اختلاف فاز بین میدان مغناطیسی و الکتریکی صفر باشد، بیشینه و کمینه این دو میدان به طور همزمان رخ می دهد. به عبارت دیگر، زمانی که میدان الکتریکی به بیشینه خود می رسد، میدان مغناطیسی نیز در همان لحظه در بیشینه مقدار خود قرار دارد و بالعکس. این هماهنگی زمانی، موجب تقویت اثر متقابل دو میدان شده و در نتیجه، نیروی لورنتز حاصل، بیشترین مقدار ممکن را خواهد داشت. چنین حالتی باعث افزایش قابل توجه تأثیر میدان ها بر جریان سیال، تغییرات واضح در توزیع سرعت و بهبود انتقال حرارت می گردد.

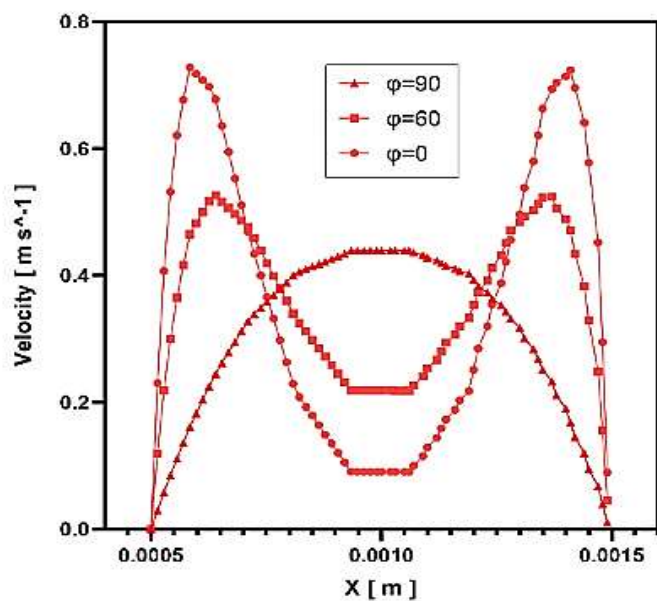
اما با افزایش اختلاف فاز بین میدان های الکتریکی و مغناطیسی، تطابق زمانی بین بیشینه و کمینه مقادیر آن ها کاهش می یابد. به ویژه در حالتی که اختلاف فاز به 90° درجه می رسد، زمانی که یکی از میدان ها در بیشینه مقدار خود قرار دارد، میدان دیگر در کمینه مقدار خود است. این ناهماهنگی زمانی باعث می شود که نیروی لورنتز حاصل در بازه زمانی نوسانات میدان ها به طور میانگین به صفر میل کند. بنابراین، در چنین شرایطی تأثیر ترکیبی میدان ها بر جریان سیال بسیار کاهش یافته و به تبع آن، توزیع سرعت و انتقال حرارت نیز تغییر چشم گیری نخواهد داشت.

انتقال حرارت جابه جایی فلزات مایع در میکروکانال ها به خواص حرارتی فلزات مایع بستگی دارد. بر اساس تئوری انتقال حرارت جابه جایی اجباری، عدد ناسلت با عدد رینولدز (Re) و عدد پرانتل (Pr) 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. نتایج اعمال میدان مغناطیسی مستقیم نشان داد که توزیع سرعت M شکل حاصل از اعمال نیروی لورنتز، علاوه بر بهبود انتقال حرارت سبب افزایش ضریب اصطکاک نیز شده است. در ادامه پژوهش نتایج نشان داده است که با اعمال میدان مغناطیسی متناوب و بررسی اختلاف فاز بین میدان مغناطیسی و الکتریکی، افت فشار و ضریب اصطکاک چاه حرارتی کاهشی شده است.

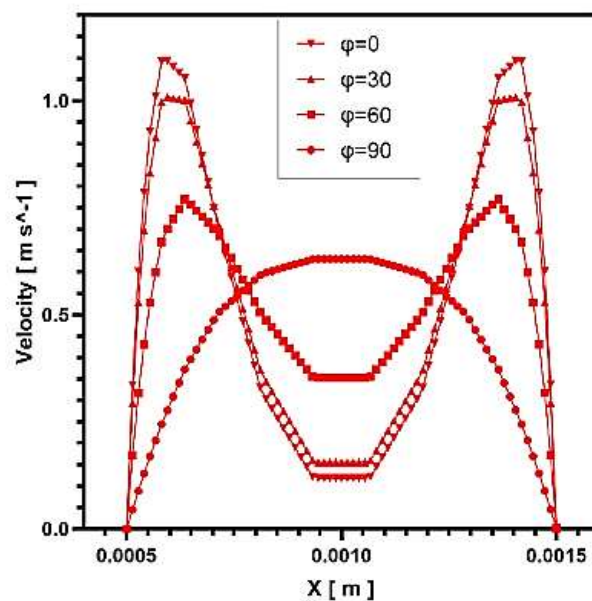
بررسی اختلاف فاز بین میدان های مغناطیسی و الکتریکی، نقش بسزایی در بهبود انتقال حرارت و ضریب اصطکاک را ایفا می کند. هنگامی که اختلاف فاز بین دو میدان مغناطیسی و الکتریکی صفر باشد اثرات نیروی لورنتز بر جریان سیال بیشتر شده و با افزایش اختلاف فاز، اثرات نیروی لورنتز بر میدان جریان سیال کاهشی می گردد.

شکل ۱۰ توزیع سرعت جریان فلز مایع با اعمال میدان مغناطیسی متناوب در جهت Y به چاه حرارتی و عدد هارتمن 517 تحت اختلاف فازهای صفر، 30° ، 60° و 90° درجه را نشان می دهد. سرعت جریان ورودی 0.45 متر بر ثانیه لحاظ شده است. اثر اعمال میدان مغناطیسی متناوب عمود بر محور جریان، توزیع سرعت M شکل را باعث شده است. با افزایش اختلاف فاز دو میدان مغناطیسی و الکتریکی تا 90° درجه، میانگین زمانی نیروی لورنتز صفر می شود و اثری بر جریان سیال نمی گذارد.

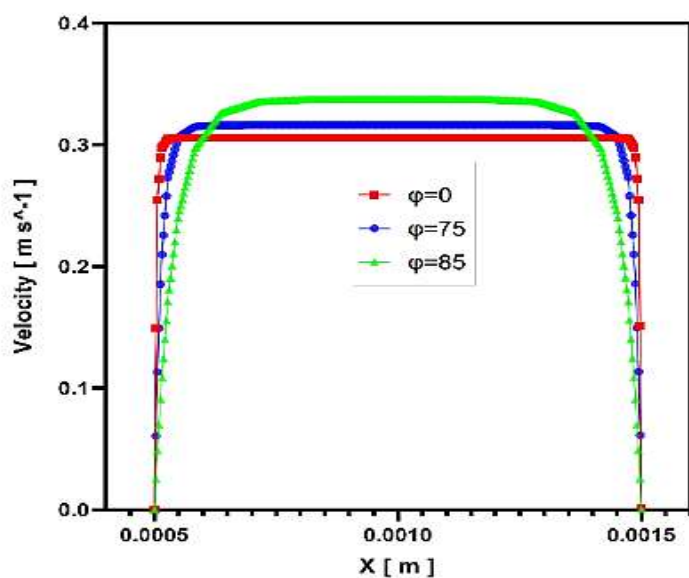
شکل ۱۱ توزیع سرعت با اعمال میدان مغناطیسی در جهت X به چاه حرارتی و عدد هارتمن 517 تحت اختلاف فازهای صفر، 20° ، 40° ، 60° ، 80° درجه را نشان می دهد. سرعت جریان ورودی 0.45 متر بر ثانیه لحاظ شده است. اثر اعمال میدان مغناطیسی سبب تغییر توزیع سرعت جریان از حالت یکنواخت به حالت تخت شده است. با افزایش اختلاف فاز دو



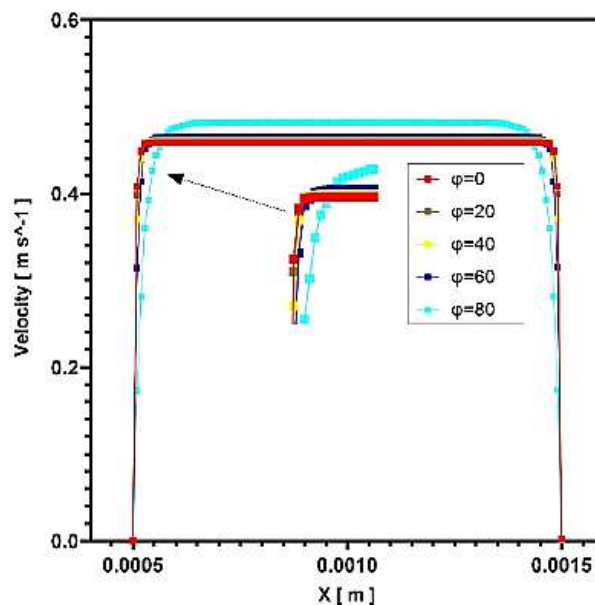
شکل ۱۲- توزیع سرعت جریان تحت اعمال میدان مغناطیسی در جهت Y با اختلاف فازهای متفاوت، سرعت ورودی ۰/۳ متر بر ثانیه



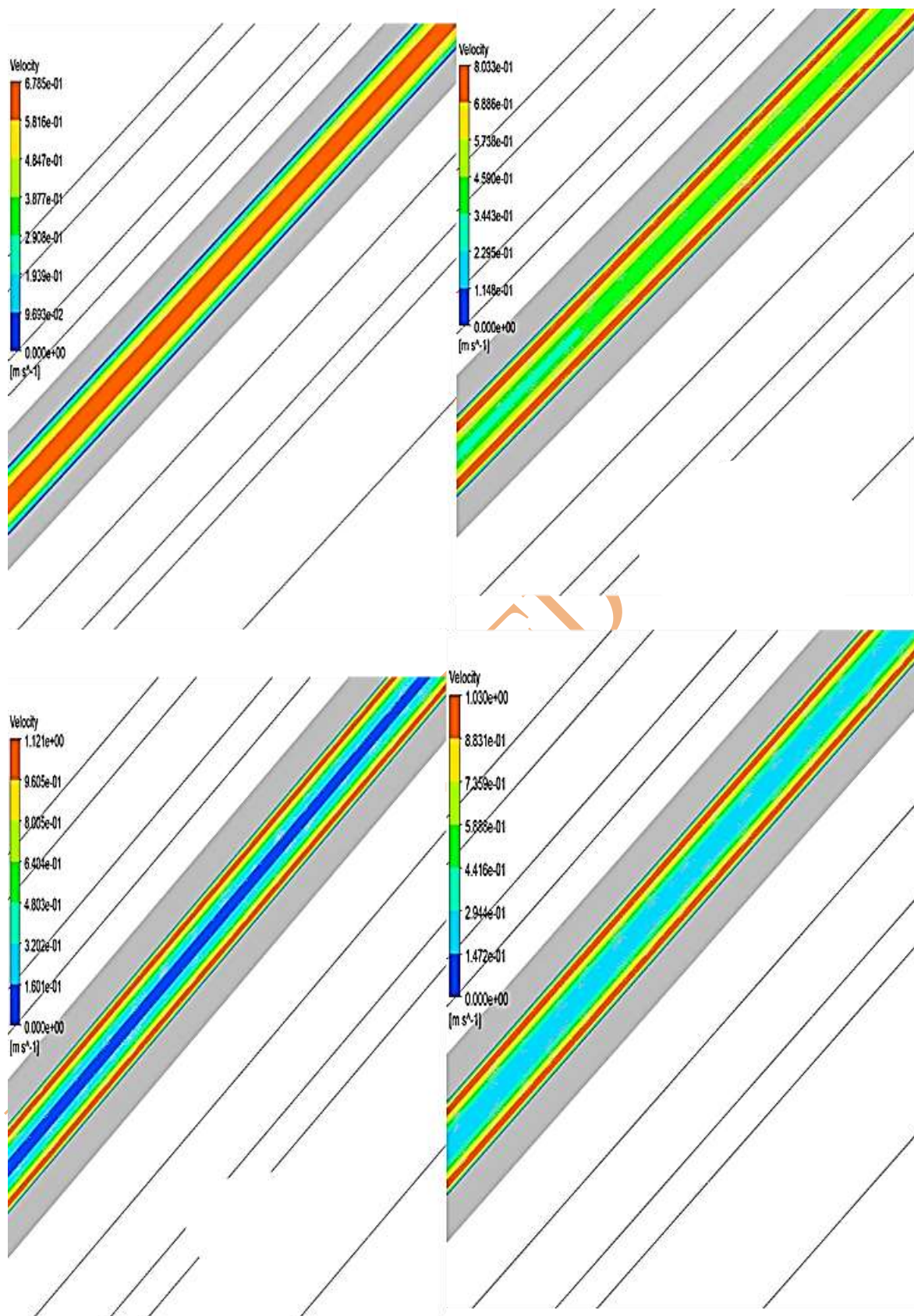
شکل ۱۰- توزیع سرعت جریان تحت اعمال میدان مغناطیسی در جهت Y با اختلاف فازهای متفاوت، سرعت ورودی ۰/۴۵ متر بر ثانیه



شکل ۱۳- توزیع سرعت جریان تحت اعمال میدان مغناطیسی در جهت X با اختلاف فازهای متفاوت، سرعت ورودی ۰/۳ متر بر ثانیه



شکل ۱۱- توزیع سرعت جریان تحت اعمال میدان مغناطیسی در جهت X با اختلاف فازهای متفاوت، سرعت ورودی ۰/۴۵ متر بر ثانیه

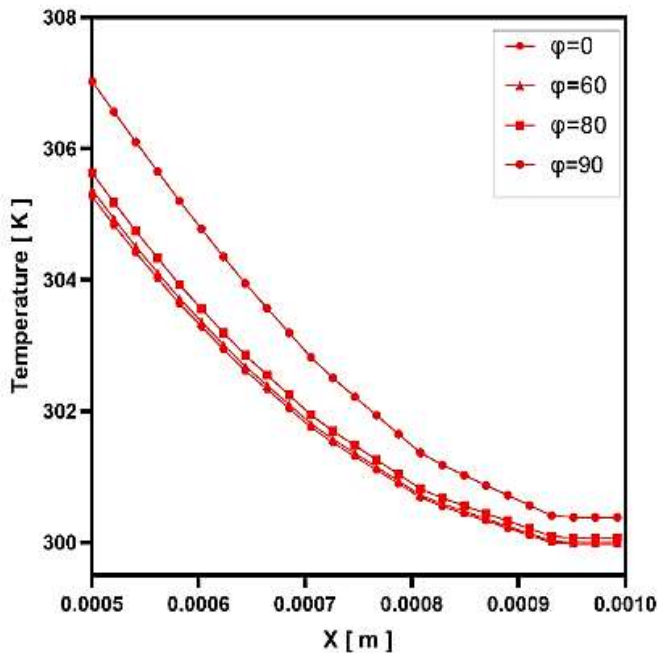


شکل ۱۴- کانتور سرعت جریان تحت اعمال میدان مغناطیسی در جهت Y و افزایش اختلاف فاز

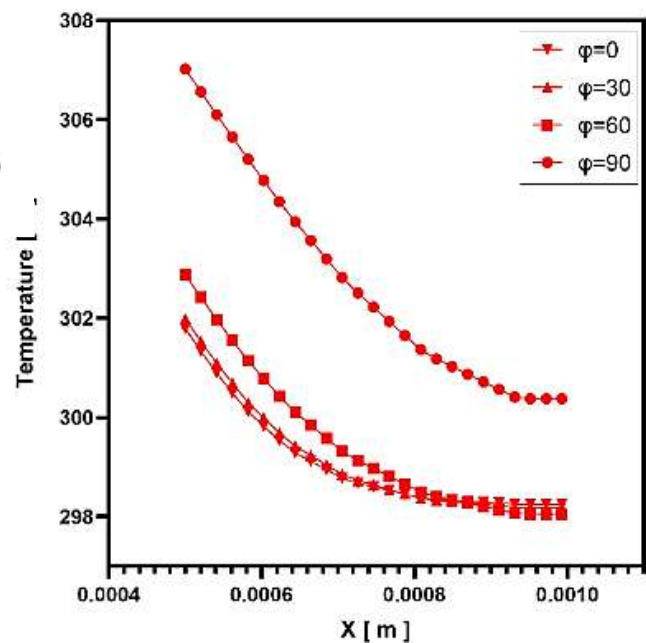
۷- بررسی میدان دمای فلز مایع تحت میدان مغناطیسی متناوب

با اعمال میدان مغناطیسی متناوب عمود بر محور جریان، نیروی لورنتز سبب تغییر در توزیع سرعت شده است. با اعمال میدان مغناطیسی در جهت Y ، جت جریان در نزدیکی دیواره‌ها شکل گرفته است. باتوجه به شرط مرزی شار ثابت، جت سرعت نزدیک به دیواره‌ها سبب کاهش دمای دیواره‌های چاه حرارتی می‌شود.

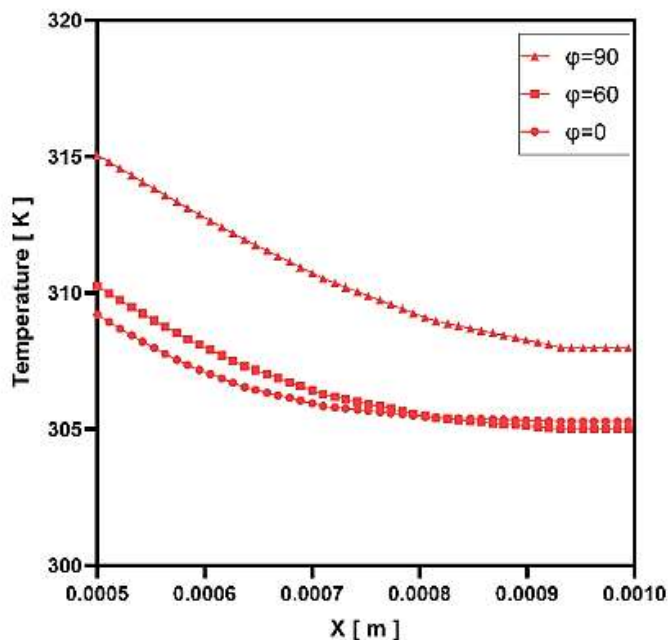
شکل ۱۵ و ۱۶ و ۱۷ و ۱۸ کاهش دمای سطوح چاه حرارتی را تحت میدان مغناطیسی متناوب با اختلاف‌های متفاوت را نشان می‌دهند.



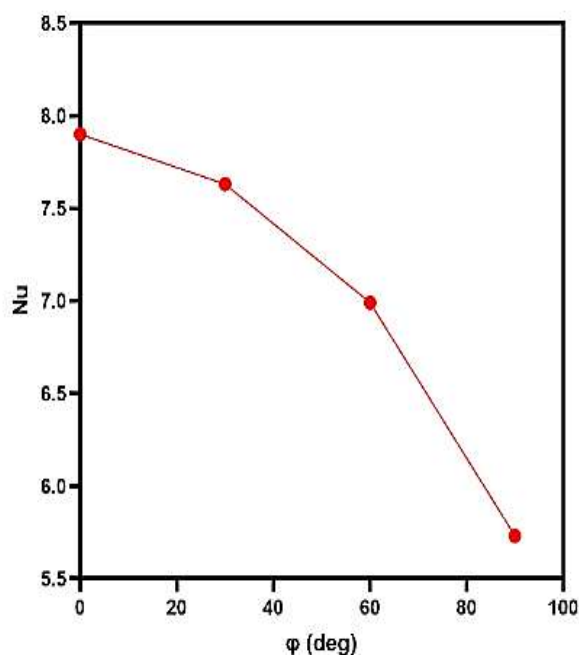
شکل ۱۶- نمودار تغییرات دما تحت اعمال میدان مغناطیسی در جهت X با اختلاف‌های متفاوت، سرعت 0.45 متر بر ثانیه



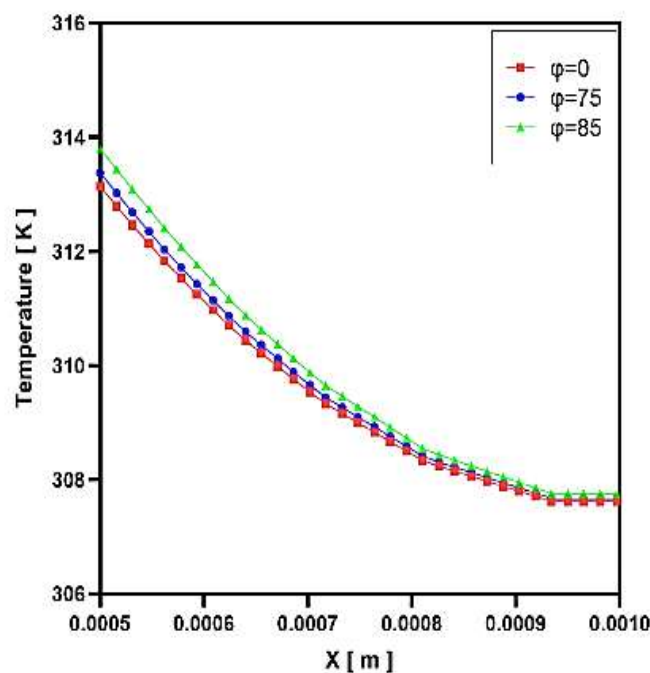
شکل ۱۵- نمودار تغییرات دما تحت اعمال میدان مغناطیسی در جهت Y با اختلاف‌های متفاوت، سرعت 0.45 متر بر ثانیه



شکل ۱۷- نمودار تغییرات دما تحت اعمال میدان مغناطیسی در جهت Y با اختلاف‌های متفاوت، سرعت 0.3 متر بر ثانیه



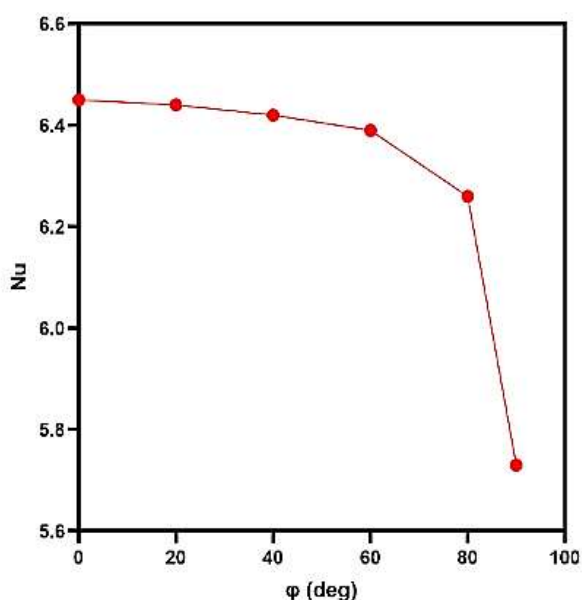
شکل ۱۹- نمودار تغییرات عدد ناسلت با افزایش اختلاف فاز، تحت اعمال میدان مغناطیسی در جهت Y، سرعت ۰/۴۵ متر برثانیه



شکل ۱۸- نمودار تغییرات دما تحت اعمال میدان مغناطیسی در جهت X با اختلاف فازهای متفاوت، سرعت ۰/۳ متر برثانیه

۸- بررسی انتقال حرارت با اعمال میدان مغناطیسی متناوب

نتایج نشان دادند که با اعمال میدان مغناطیسی متناوب عمود بر محور جریان، دمای سطوح کاهشی شده است. شکل ۱۸ نمودار تغییرات عدد ناسلت با افزایش اختلاف فاز تحت اعمال میدان مغناطیسی در جهت Y را نشان می‌دهد. با افزایش اختلاف فاز بین میدان‌های مغناطیسی و الکتریکی، اثرات نیروی لورنتز کاهشی شده و توزیع سرعت از حالت M شکل به یکنواخت خود بر می‌گردد یعنی با توجه به حاکم بودن شرط عدم لغزش، سرعت لایه چسبیده به دیواره‌ها (صفر) دیواره‌ها ثابت هستند و بیشینه سرعت جریان در خط مرکزی میکروکانال به دست آمده است. شکل ۲۰ نمودار تغییرات عدد ناسلت با افزایش اختلاف فاز تحت میدان مغناطیسی در جهت X را نشان می‌دهد. تغییرات عدد ناسلت تا اختلاف فاز ۶۰ درجه کم می‌باشد و بیشترین تغییر مربوط به اختلاف فاز ۹۰ درجه می‌باشد. با توجه به شکل ۱۹ و ۲۰، عدد ناسلت با افزایش اختلاف فاز تا ۹۰ درجه، کاهشی شده است.

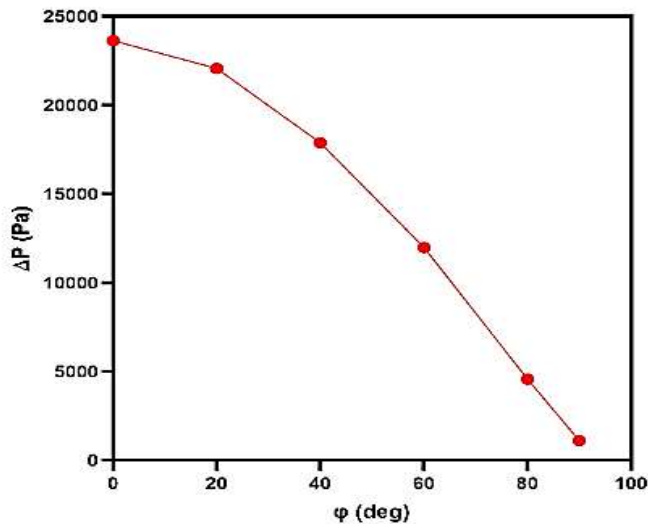


شکل ۲۰- نمودار تغییرات عدد ناسلت با افزایش اختلاف فاز، تحت اعمال میدان مغناطیسی در جهت X، سرعت ۰/۴۵ متر برثانیه

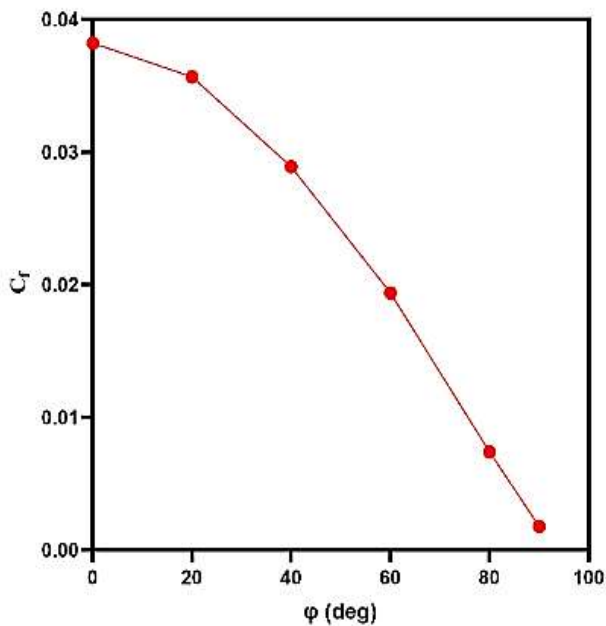
۹- بررسی افت فشار و ضریب اصطکاک چاه حرارتی

توضیح داده شد که اعمال میدان مغناطیسی سبب تغییر توزیع سرعت جریان می شود. افزایش سرعت جریان در نزدیکی دیواره ها سبب افزایش گرادیان سرعت می گردد، در نتیجه ضریب اصطکاک دیواره ها افزایش می شود. شکل ۲۱ و ۲۲ نمودار تغییرات افت فشار و ضریب اصطکاک را با افزایش اختلاف فاز تحت اعمال میدان مغناطیسی در جهت X نشان می دهند. راهکار ارائه شده در این پژوهش جهت کاهش ضریب اصطکاک، بررسی اختلاف فاز بین میدان های الکتریکی و مغناطیسی می باشد. با افزایش اختلاف فاز میدان های مغناطیسی و الکتریکی، به علت کاهش اثرات نیروی لورنتز، افت فشار و ضریب اصطکاک کاهش می گردد. با اعمال میدان مغناطیسی در جهت X به چاه حرارتی مشاهده شد که با افزایش اختلاف فاز تا ۶۰ درجه، عدد ناسلت کاهش چشمگیری نداشته است اما افت فشار چاه حرارتی به شدت کاهش یافته است به طوریکه مقدار کاهش افت فشار چاه حرارتی، ۴۹ درصد به دست آمده است.

شکل ۲۳ و ۲۴ نمودار تغییرات افت فشار و ضریب اصطکاک با افزایش اختلاف فاز تحت اعمال میدان مغناطیسی در جهت Y را نشان می دهند. با افزایش اختلاف فاز، افت فشار و ضریب اصطکاک چاه حرارتی، کاهش یافته است، به طوریکه با افزایش اختلاف فاز تا ۶۰ درجه افت فشار چاه حرارتی ۶۴ درصد کاهش یافته است.



شکل ۲۱- نمودار تغییرات افت فشار با افزایش اختلاف فاز، تحت اعمال میدان مغناطیسی در جهت X



شکل ۲۲- نمودار تغییرات ضریب اصطکاک با افزایش اختلاف فاز، تحت میدان مغناطیسی در جهت X

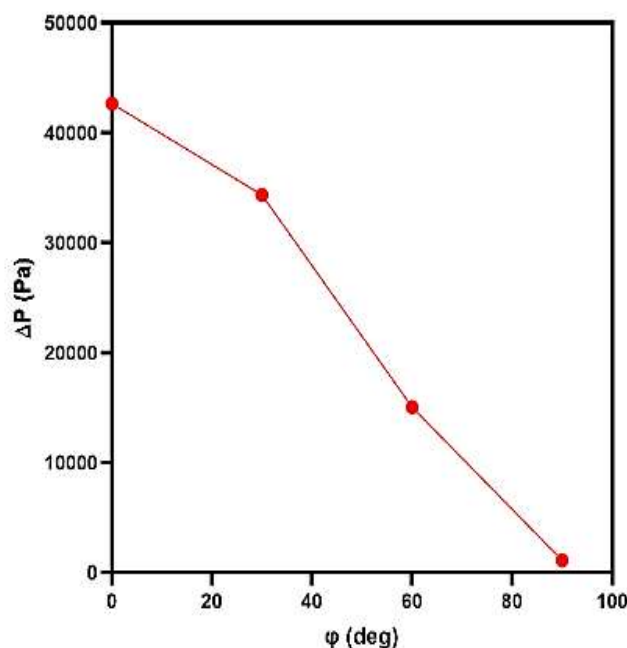
شده است. این الگوی جریان نشان‌دهنده تشکیل دو منطقه‌ی جریان با سرعت بالا در نزدیکی دیواره‌ها و یک منطقه با سرعت کمتر در مرکز کانال است. در مقابل، اعمال میدان مغناطیسی متناوب در جهت X منجر به یکنواخت‌تر شدن توزیع سرعت و تخت شدن منحنی سرعت شده است که این امر باعث بهبود انتقال حرارت می‌گردد. با توجه به شرط مرزی شار حرارتی ثابت، افزایش سرعت جریان سیال در نواحی نزدیک به دیواره‌ها موجب افزایش انتقال حرارت و کاهش دمای سطح چاه حرارتی شده است. این موضوع بهبود عملکرد خنک‌کنندگی را تضمین می‌کند. نتایج نشان داد که با اعمال میدان مغناطیسی متناوب در جهت Y و با عدد هارتمن برابر ۵۱۷، عدد ناسلت تا ۳۸ درصد نسبت به حالت بدون میدان بهبود یافته است که این افزایش قابل توجه نشان‌دهنده اثر مثبت میدان مغناطیسی متناوب در ارتقاء انتقال حرارت جابه‌جایی اجباری فلز مایع می‌باشد.

۲) اعمال میدان مغناطیسی متناوب در جهت X به چاه حرارتی، باعث یکنواخت شدن توزیع سرعت و تخت شدن منحنی سرعت شد که این امر منجر به بهبود قابل توجهی در انتقال حرارت گردید. نتایج نشان داد که با اعمال این میدان، عدد ناسلت تا ۱۱.۶۲ درصد افزایش یافته است، که بیانگر بهبود عملکرد خنک‌کنندگی و افزایش راندمان انتقال حرارت بود.

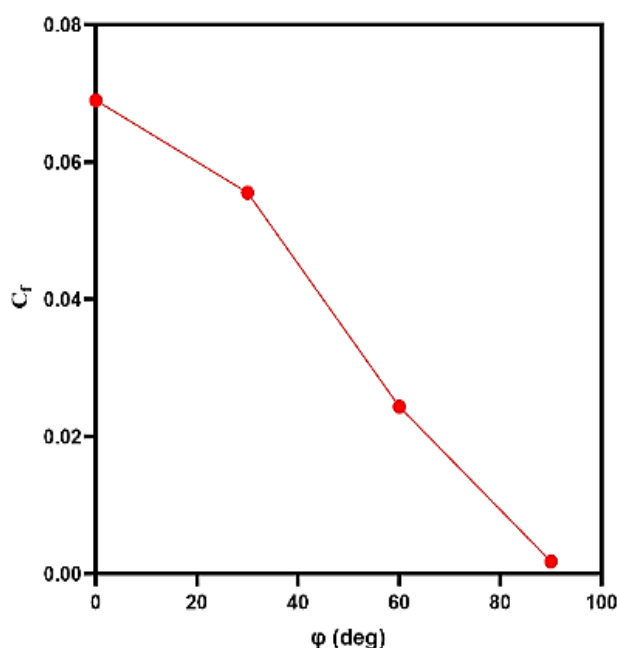
۳) با اعمال میدان مغناطیسی متناوب و افزایش اختلاف فاز بین میدان‌های مغناطیسی و الکتریکی تا ۹۰ درجه، افت فشار و ضریب اصطکاک کاهش یافته‌اند. این کاهش ناشی از تغییر رفتار جریان سیال است؛ با افزایش اختلاف فاز، گردایان سرعت در نزدیکی دیواره‌ها کاهش یافته و جریان به سمت آرام‌تر شدن حرکت می‌کند. کاهش این گردایان باعث کاهش مقاومت جریان و در نتیجه کاهش افت فشار می‌شود. این پدیده به بهبود کارایی سیستم انتقال حرارت و کاهش مصرف انرژی پمپ‌ها کمک می‌کند.

۴) با اعمال میدان مغناطیسی متناوب در جهت Y به چاه حرارتی، اختلاف فاز بین میدان‌های مغناطیسی و الکتریکی به صورت بهینه در ۶۰ درجه تنظیم شد که منجر به کاهش ۶۴ درصدی افت فشار گردید. این مقدار اختلاف فاز، بهترین تاثیر را در کاهش گردایان سرعت جریان در نزدیکی دیواره‌ها را داشته است و در نتیجه باعث کاهش مقاومت جریان و بهبود عملکرد سیستم شده است.

۵) با اعمال میدان مغناطیسی متناوب در جهت X به چاه حرارتی و تنظیم اختلاف فاز بین میدان‌های مغناطیسی و الکتریکی در مقدار بهینه ۶۰ درجه، مقدار افت فشار تا ۴۹ درصد کاهش یافته است. این کاهش افت فشار ناشی از آرام‌تر شدن جریان و کاهش



شکل ۲۳- نمودار تغییرات افت فشار با افزایش اختلاف فاز، تحت میدان مغناطیسی در جهت Y



شکل ۲۴- نمودار تغییرات ضریب اصطکاک با افزایش اختلاف فاز، تحت میدان مغناطیسی در جهت Y

۱۰- نتایج

۱) اعمال میدان مغناطیسی مستقیم و متناوب در جهت Y به چاه حرارتی باعث شکل‌گیری توزیع سرعت به صورت M شکل

گردایان سرعت در نزدیکی دیواره‌ها است که مقاومت جریان را کاهش می‌دهد و عملکرد سیستم انتقال حرارت را بهبود می‌بخشد.

اثر اعمال میدان مغناطیسی مستقیم علاوه بر بهبود انتقال حرارت، سبب افزایش ضریب اصطکاک نیز شده است. با بررسی میدان مغناطیسی متناوب و افزایش اختلاف فاز بین میدان‌های مغناطیسی و الکتریکی از صفر تا ۹۰ درجه، مشاهده شد که علاوه بر کاهش جزئی در انتقال حرارت نسبت به حالت اختلاف فاز صفر درجه، افت فشار و ضریب اصطکاک چاه حرارتی کاهش یافته است. بیشترین کاهش افت فشار در اختلاف فاز بهینه ۶۰ درجه شکل گرفت، زیرا افت فشار را به شدت کاهشی کرده و سبب کاهش جزیی عدد ناسلت شده است که این تعادل باعث بهبود عملکرد کلی سیستم و کاهش مصرف انرژی شده است.

با توجه به پیشرفت‌های روزافزون علمی و اهمیت بهینه‌سازی عملکرد سیستم‌های انتقال حرارت، ضروری است در پژوهش‌های آینده راهکارهای نوین و جامع‌تری برای کاهش افت فشار ناشی از اعمال میدان مغناطیسی مورد بررسی قرار گیرد. چنین رویکردهایی باید به گونه‌ای طراحی شوند که علاوه بر بهره‌برداری حداکثری از افزایش انتقال حرارت، کاهش قابل توجه افت فشار را نیز به همراه داشته و در نهایت هزینه‌های پیاده‌سازی و نگهداری پروژه‌های مرتبط را کاهش دهند. این روند، گامی موثر در جهت ارتقاء کارایی، پایداری و مقرون‌به‌صرفه بودن سیستم‌های حرارتی خواهد بود.

۱۱- فهرست علائم

A_w	مساحت انتقال حرارت بین سیال و دیواره‌ها، m^2
A_b	مساحت کف میکروکانال، m^2
C_f	ضریب اصطکاک فانیگ
D_h	قطر هیدرولیکی، m
K_f	ضریب رسانش حرارتی سیال، w/mk
T_m	دمای میانگین سیال، k
T_w	دمای میانگین دیواره‌ها، k
h	ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی، w/m^2K
Ha	عدد هارتمن

تعارض منافع

نویسندگان اعلام می‌کنند که در مورد انتشار این مقاله تعارض منافع وجود ندارد.

تاییدیه اخلاقی

نویسندگان متعهد می‌شوند که مطالب این مقاله را در هیچ مجله دیگری به چاپ نرسانده‌اند.

مشارکت‌های نویسندگان

عباس ملایی: تحقیق و گردآوری داده‌ها، نرم افزار و شبیه‌سازی، آنالیز و تحلیل نتایج، نگارش و تهیه پیش‌نویس اصلی.

احمد رضا رحمتی: بررسی و تحلیل، بازبینی.

منابع مالی

در این تحقیق، کمک مالی خاصی از هیچ سازمانی دریافت نشده است.

مراجع

- [1] Tuckerman, David B., and Roger Fabian W. Pease. "High-performance heat sinking for VLSI." IEEE Electron device letters 2, no. 5 (1981): 126-129.
- [2] Qu, Weilin, and Issam Mudawar. "Experimental and numerical study of pressure drop and heat transfer in a single-phase micro-channel heat sink." International journal of heat and mass transfer 45, no. 12 (2002): 2549-2565.
- [3] Gunnasegaran, Prem, H. A. Mohammed, N. H. Shuaib, and Rahman Saidur. "The effect of geometrical parameters on heat transfer characteristics of microchannels heat sink with different shapes." International communications in heat and mass transfer 37, no. 8 (2010): 1078-1086.
- [4] Guo, Yong, Chuan-Yong Zhu, Liang Gong, and Zong-Bo Zhang. "Numerical simulation of flow boiling heat transfer in microchannel with surface roughness." International Journal of Heat and Mass Transfer 204 (2023): 123830.
- [5] Sepehrnia, Mojtaba, and AhmadReza Rahmati. "Numerical investigating the gas slip flow in the microchannel heat sink using different materials." Challenges in Nano and Micro Scale Science and Technology 6, no. Special Issue (2018): 44-50.
- [6] Kumar, Ritunesh, Gurjeet Singh, and Dariusz Mikieliewicz. "A new approach for the mitigating of flow maldistribution in parallel microchannel heat sink." Journal of Heat Transfer 140, no. 7 (2018): 072401.
- [7] Li, Xian-Yang, Shuo-Lin Wang, Xiao-Dong Wang, and Tian-Hu Wang. "Selected porous-ribs design for performance improvement in double-layered microchannel heat sinks." International Journal of Thermal Sciences 137 (2019): 616-626.
- [8] Shomali, M., and AhmadReza Rahmati. "Numerical analysis of gas flows in a microchannel using the Cascaded Lattice Boltzmann Method with varying Bosanquet parameter." Journal of Heat and Mass Transfer Research 7, no. 1 (2020): 25-38.
- [9] Wang, Shuo-Lin, Liu-Yi Chen, Ben-Xi Zhang, Yan-Ru Yang, and Xiao-Dong Wang. "A new design of double-layered microchannel heat sinks with wavy microchannels and porous-ribs." Journal of Thermal Analysis and Calorimetry 141 (2020): 547-558.
- [10] Hamidi, E., P. Ganesan, S. V. Muniandy, and MH Amir Hassan. "Lattice Boltzmann Method simulation of flow and forced convective heat transfer on 3D micro X-ray tomography of metal foam heat sink." International Journal of Thermal Sciences 172 (2022): 107240.
- [11] Keshavarz, Maryam, Seyedehsan Habibi, and Yasser Amini. "Heat transfer enhancement in a microchannel using active vibrating pieZoelectric vortex generator." Journal of Solid and Fluid Mechanics 12, no. 6 (2023): 191-204.
- [12] Chein, Reiyu, and Guanming Huang. "Analysis of microchannel heat sink performance using nanofluids." Applied thermal engineering 25, no. 17-18 (2005): 3104-3114.
- [13] Darzi, AA Rabienataj, Mousa Farhadi, Kurosh Sedighi, Shahriar Aallahyari, and Mojtaba Aghajani Delavar. "Turbulent heat transfer of Al₂O₃–water nanofluid inside helically corrugated tubes: numerical study." International Communications in Heat and Mass Transfer 41 (2013): 68-75.
- [14] Sohel, M. R., S. S. Khaleduzzaman, R. Saidur, A. Hepbasli, M. F. M. Sabri, and I. M. Mahbubul. "An experimental investigation of heat transfer enhancement of a minichannel heat sink using Al₂O₃–H₂O nanofluid." International Journal of Heat and Mass Transfer 74 (2014): 164-172.
- [15] Ho, Ching-Jenq, L. C. Wei, and Z. W. Li. "An experimental investigation of forced convective cooling performance of a microchannel heat sink with Al₂O₃/water nanofluid." Applied Thermal Engineering 30, no. 2-3 (2010): 96-103.
- [16] Ghasemi, Seyed Ebrahim, A. A. Ranjbar, and M. J. Hosseini. "Thermal and hydrodynamic characteristics of water-based suspensions of Al₂O₃ nanoparticles in a novel minichannel heat sink." Journal of Molecular Liquids 230 (2017): 550-556.

- [17] Teimouri, Arash, Vahid Nejati, Iman Zahmatkesh, and Seied R. Saleh. "Numerical investigation of two-phase nanofluid flow in square cavity with inclined wall under different magnetic field." *Journal of Solid and Fluid Mechanics* 13, no. 1 (2023): 125-136.
- [18] Kumar, Ritesh, Badyanath Tiwary, and Pawan Kumar Singh. "Thermofluidic analysis of Al₂O₃-water nanofluid cooled branched wavy heat sink." *Applied Thermal Engineering* 201 (2022): 117787.
- [19] Miner, A., and U. Ghoshal. "Cooling of high-power-density microdevices using liquid metal coolants." *Applied physics letters* 85, no. 3 (2004): 506-508.
- [20] Hodes, Marc, Rui Zhang, Lisa Steigerwalt Lam, Ross Wilcoxon, and Nate Lower. "On the potential of galinstan-based minichannel and minigap cooling." *IEEE transactions on components, packaging and manufacturing technology* 4, no. 1 (2013): 46-56.
- [21] Xie, Gongnan, Zhiyong Chen, Bengt Sundén, and Weihong Zhang. "Numerical predictions of the flow and thermal performance of water-cooled single-layer and double-layer wavy microchannel heat sinks." *Numerical Heat Transfer, Part A: Applications* 63, no. 3 (2013): 201-225.
- [22] Zhang, Rui, Marc Hodes, Nathan Lower, and Ross Wilcoxon. "Water-based microchannel and galinstan-based minichannel cooling beyond 1 kW/cm² heat flux." *IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology* 5, no. 6 (2015): 762-770.
- [23] Wu, Tao, Lizhi Wang, Yicun Tang, Chao Yin, and Xiankai Li. "Flow and heat transfer performances of liquid metal based microchannel heat sinks under high temperature conditions." *Micromachines* 13, no. 1 (2022): 95.
- [24] Wang, Z. H., and Z. K. Zhou. "External natural convection heat transfer of liquid metal under the influence of the magnetic field." *International Journal of Heat and Mass Transfer* 134 (2019): 175-184.
- [25] Shi, Xiaojun, Shan Li, Yingjie Mu, and Bangtao Yin. "Geometry parameters optimization for a microchannel heat sink with secondary flow channel." *International Communications in Heat and Mass Transfer* 104 (2019): 89-100.
- [26] Wang, Tian-Hu, Hao-Chi Wu, Jing-Hui Meng, and Wei-Mon Yan. "Optimization of a double-layered microchannel heat sink with semi-porous-ribs by multi-objective genetic algorithm." *International Journal of Heat and Mass Transfer* 149 (2020): 119217.
- [27] Hajmohammadi, M. R., S. Gholamrezaie, A. Ahmadpour, and Z. Mansoori. "Effects of applying uniform and non-uniform external magnetic fields on the optimal design of microchannel heat sinks." *International Journal of Mechanical Sciences* 186 (2020): 105886.
- [28] Abadeh, Abazar, Mohammad Sardarabadi, Mehdi Abedi, Mahdi Pourramezan, Mohammad Passandideh-Fard, and Mohammad Javad Maghrebi. "Experimental characterization of magnetic field effects on heat transfer coefficient and pressure drop for a ferrofluid flow in a circular tube." *Journal of Molecular Liquids* 299 (2020): 112206.
- [29] Li, Ping, Dingzhang Guo, and Xinyue Huang. "Heat transfer enhancement in microchannel heat sinks with dual split-cylinder and its intelligent algorithm based fast optimization." *Applied Thermal Engineering* 171 (2020): 115060.
- [30] Nouri, Reza, Mofid Gorji-Bandpy, and Davood Domiri Ganji. "Numerical investigation of magnetic field effect on forced convection heat transfer of nanofluid in a sinusoidal channel." *Modares Mechanical Engineering* 13, no. 14 (2014): 43-55.
- [31] Kargar Sharifabad, Hadi, and M. Falsafi. "Numerical Modeling of Internal Convection Heat Transfer of Magnetic Fluid in the Pulse Magnetic Field and Different Time Frequencies." *Modares Mechanical Engineering* 15, no. 6 (2015): 91-98.
- [32] Chen, Zhiwei, Peng Qian, Zizhen Huang, Wenjing Zhang, and Minghou Liu. "Study on flow and heat transfer of liquid metal in the microchannel heat sink." *International Journal of Thermal Sciences* 183 (2023): 107840.
- [33] Koneti, Leelasagar, and K. Venkatasubbaiah. "A comparative heat transfer study of water and liquid gallium in a square enclosure under natural convection." *International Journal of Fluid Mechanics Research* 50, no. 3 (2023).

- [34] Sheikhzadeh, Ganbarali, Amir Alanchari, Afsaneh Mehradasl, and Mohsen Pirmohammadi. "Numerical study of turbulent natural convection in the presence of a constant magnetic field in a square enclosure." *Energy Engineering and Management* 1, no. 2 (2023): 49-55.
- [35] Wang, Z. H., and T. Y. Lei. "Liquid metal MHD effect and heat transfer research in a rectangular duct with micro-channels under a magnetic field." *International Journal of Thermal Sciences* 155 (2020): 106411.
- [36] Pan, Jun-Hua, and Ming-Jiu Ni. "Magnetohydrodynamic effects on liquid metal flows in an open channel for fusion plasma facing components with a transverse magnetic field." *Nuclear Fusion* 65, no. 4 (2025): 046015.
- [37] Hart, Samuel T., Conner Awald, E. Glenn Lightsey, and Álvaro Romero-Calvo. "Magnetohydrodynamically pumped liquid metal loops for CubeSat thermal control." *International Journal of Heat and Mass Transfer* 239 (2025): 126552.
- [38] Wang, Jin-Long, Yu-Wen Liu, Jin-Hong Yang, Li-Chen Zhang, Long Chen, and Ming-Jiu Ni. "Study on the mechanisms of flow and heat transfer in natural convection of liquid metal under a horizontal magnetic field." *Physics of Fluids* 37, no. 3 (2025).
- [39] Shao, Qianni, Peng Lu, Qingsong Wei, and Hulin Huang. "Numerical study on liquid metal magneto-hydro-dynamics power generation under non-uniform velocity inlet." *International Communications in Heat and Mass Transfer* 161 (2025): 108466.
- [40] Bao, Xing-Yu, Jie Wang, Zheng-Xiang Xu, Lei Chen, Song-Lin Liu, and Nian-Mei Zhang. "Heat transfer enhancement in magnetohydrodynamic mixed convection around a near-wall cylinder in a duct." *Physics of Fluids* 37, no. 1 (2025).
- [41] Sarowar, Md Tanbir. "Numerical analysis of a liquid metal cooled mini channel heat sink with five different ceramic substrates." *Ceramics International* 47, no. 1 (2021): 214-225.
- [42] Hunt, Jhon CR. "Magnetohydrodynamic flow in rectangular ducts." *Journal of fluid mechanics* 21, no. 4 (1965): 577-590.
- [43] Hunt, J. C. R., and K. Stewartson. "Magnetohydrodynamic flow in rectangular ducts. II." *Journal of fluid mechanics* 23, no. 3 (1965): 563-581.