



## بهبود انتقال حرارت جابه‌جایی ترکیبی فلز مایع در یک چاه حرارتی تک کانالی تحت میدان مغناطیسی خارجی یکنواخت

عباس ملایی<sup>۱\*</sup>، احمدرضا رحمتی<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup>دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه کاشان، کاشان، ایران

<sup>۲</sup>دانشیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه کاشان، کاشان، ایران

مقاله مستقل، تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۹/۳۰؛ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۰۱/۱۰؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۲/۲۵

### چکیده

بارزترین ویژگی چاه‌های حرارتی، قابلیت انتقال گرما و خاصیت خنک‌کنندگی آن‌ها است. در این پژوهش از یک چاه حرارتی فعال تک کانالی عمودی با سیال فلز مایع گالینستن استفاده شده و گسسته‌سازی معادلات ناویراستوکس به روش حجم محدود مرتبه دوم بالادست انجام شده است. بررسی انتقال حرارت جابه‌جایی ترکیبی با اعداد ریچاردسون ۰/۴۵ و ۱ و ۱۰ به دو صورت جهت جریان از بالا به پایین و جهت جریان از پایین به بالا صورت گرفته و به اثرات میدان مغناطیسی خارجی در دو جهت عمود بر محور جریان پرداخته شده است. نتایج نشان داد، جهت جریان از پایین به بالا با عدد ریچاردسون ۱۰ بدون حضور میدان مغناطیسی، عدد ناسلت را ۱۱/۳۰ درصد نسبت به جهت جریان از بالا به پایین بهبود داده است. با عدد ریچاردسون ۱ و جهت جریان از پایین به بالا، اثر اعمال میدان مغناطیسی در جهت Z (عمود بر محور جریان) با عدد هارتمن ۱۲۹، ۱۶۴/۵ و ۱۹۴ به ترتیب ۱۱/۲۹، ۱۳/۶۳ و ۱۵/۸۸ درصد عدد ناسلت را بهبود بخشیده است. با عدد ریچاردسون ۱ و جهت جریان از پایین به بالا، اثر اعمال میدان مغناطیسی در جهت X (عمود بر محور جریان) با عدد هارتمن ۶۴/۶، ۱۲۹ و ۱۹۴ به ترتیب ۷/۰۸، ۸/۲۸ و ۸/۷۶ درصد عدد ناسلت را بهبود بخشیده است.

**کلمات کلیدی:** میکروکانال؛ انتقال حرارت جابه‌جایی ترکیبی؛ فلز مایع؛ چاه حرارتی؛ میدان مغناطیسی.

## Improvement Mixed convection heat transfer of liquid metal in a single channel heat sink under uniform external magnetic field

Abbas Mollaei<sup>1\*</sup>, Ahmad Reza Rahmati<sup>2</sup>

<sup>1</sup> MSc student, Department of Mechanical Engineering, University of Kashan, Kashan, Iran

<sup>2</sup> Assoc. Prof., Department of Mechanical Engineering, University of Kashan, Kashan, Iran

### Abstract

The most obvious feature of heat sinks is their ability to transfer heat and their cooling properties. In this research, a vertical single-channel active heat sink with Galinstan liquid metal fluid was used and the discretization of Navier Stokes equations was done using the second-order upwind finite volume method. Investigation of Mixed Convection heat transfer with Richardson numbers 0.45, 1 and 10 has been done in both directions of flow from top to bottom and flow direction from bottom to top and the effects of external magnetic field in two directions perpendicular to the flow axis have been investigated. The results showed that the flow direction from bottom to top with a Richardson number of 10 without the presence of a magnetic field improved the Nusselt number by 11.30% compared to the flow direction from top to bottom. With the Richardson number of 1 and the flow direction from bottom to top, the effect of applying the magnetic field in the Z direction (perpendicular to the current axis) with the Hartmann number of 129, 164.5, and 194, respectively, is 11.29, 13.63, and 15.88 percent of the Nusselt number has been improved. With the Richardson number of 1 and the flow direction from the bottom to the top, the effect of applying the magnetic field in the X direction (perpendicular to the flow axis) with the Hartmann number of 64.6, 129 and 194, respectively, is 7.08, 8.28 and 8.76% of the Nusselt number has improved.

**Keywords:** Microchannel; Mixed convection heat transfer; liquid metal; heat sink; magnetic field.

\* نویسنده مسئول؛ تلفن: ۰۹۲۱۷۷۳۵۷۳۴

آدرس پست الکترونیک: [abbasmollaei9@gmail.com](mailto:abbasmollaei9@gmail.com)

## ۱- مقدمه

تحوالات سریع در صنایع کامپیوتری، چالش‌های بزرگی را در مکانیسم‌های خنک‌کنندگی قطعات الکترونیکی به وجود آورده است. عملکرد این مکانیسم‌ها تا حد زیادی تحت‌تأثیر 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 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 با توجه به نوع انتقال حرارت جابه‌جایی (طبیعی، اجباری، ترکیبی)، اثرات متفاوتی بر ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی و افت فشار می‌گذارد.

از زمان اولین کار توسط تاگرن و پیس [۱] تحقیقات زیادی جهت مطالعه عملکرد حرارتی و ویژگی‌های هیدرولیکی چاه‌های حرارتی میکروکانالی انجام شده است. کو و موداوار [۲] یک میکروکانال مسی ساختند و ویژگی‌های افت فشار و انتقال حرارت یک چاه حرارتی تک‌فاز میکروکانالی را به صورت تجربی و عددی مورد بررسی قرار دادند. نتایج آنها نشان داد که اعداد رینولدز بالا در کاهش دمای خروجی آب و دمای داخل چاه حرارتی سودمند هستند.

گوناسگار و همکاران [۳] جریان و ویژگی‌های انتقال حرارت همرفتی آب را در میکروکانال‌های مستطیلی، دوزنقه‌ای و مثلثی بررسی کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که یکنواختی بهتری در ضریب انتقال حرارت و دما در چاه‌های حرارتی با کمترین قطر هیدرولیکی به دست می‌آید.

لیانگ و همکاران [۴] شبیه‌سازی عددی انتقال حرارت جریان جوشش را در یک میکروکانال با زبری سطح بررسی کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که با افزایش زبری نسبی سطح، عدد ناسلت ابتدا افزایش و سپس کاهش می‌یابد.

سپهرنیا و رحمتی [۵] جریان لغزشی گاز هلیوم در یک چاه گرمایی میکروکانالی سه‌بعدی با ۱۱ میکروکانال و ۱۰ پره مستطیلی را بررسی کردند. نتایج آنها نشان داد که در طول میکروکانال، عدد ناسدن محلی کاهش می‌یابد؛ همچنین،

مقاومت حرارتی با افزایش عدد ناسدن از ۰/۰۰۶ به ۰/۰۴۸ به طور مداوم افزایش می‌یابد.

کومار و همکاران [۶] یک رویکرد جدید برای کاهش مشکل عدم توزیع جریان در میکروکانال‌های موازی با استفاده از میکروکانال‌های عرض متغیر پیشنهاد دادند. نتایج آن‌ها نشان داد که طرح پیشنهادی، توزیع جریان را تا ۹۳/۷ درصد کاهش می‌دهد، که خنک‌سازی یکنواخت مؤثری در کل منطقه پیش‌بینی شده میکروکانال به دست آورده است.

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

شمالی و رحمتی [۸] روش شبکه بولترمن آبشاری را با شرایط مرزی لغزشی مرتبه دوم برای بررسی جریان‌های گازی در یک میکروکانال در رژیم‌های جریان لغزشی و انتقال با طیف وسیعی از اعداد ناسدن توسعه دادند.

وانگ و همکاران [۹] یک چاه حرارتی میکروکانال موجدار دو لایه جدید به همراه دنده‌های متخلخل پیشنهاد کردند. نتایج آن‌ها نشان داد 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 بولترمن روی توموگرافی سه-بعدی میکرو اشعه ایکس چاه حرارتی فوم فلزی را انجام دادند که هندسه واقعی نمونه‌های فوم فلزی با اسکن توموگرافی کامپیوتری میکرو (میکرو سی تی) به دست آمده بود.

کشاورز و همکاران [۱۱] جهت افزایش انتقال حرارت در یک میکرو کانال مستطیلی، تعدادی مولد گردابه‌ای استفاده کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که مجهز شدن کانال به مولدهای پیزوالکتریک اثر قابل توجهی در افزایش نرخ انتقال حرارت می‌گذارد.

چین و هوانگ [۱۲] به بررسی عملکرد گرمایی جریان نانوسیال‌های مختلف استفاده شده در میکروکانال‌ها با دو هندسه متفاوت به صورت عددی و تجربی پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد که عملکرد هر دو هندسه موقع استفاده از نانوسیال‌ها به‌عنوان سیال خنک‌کننده، بهبود یافته و همچنین

مجدد آن، گردابه‌هایی در نزدیکی کانال ثانویه تشکیل می‌شود که عملکرد حرارتی را بهبود می‌بخشد.

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 خنک‌کننده فلز مایع افزایش می‌یابد. هودس و همکاران [۲۰] هندسه بهینه را برای چاه‌های حرارتی مبتنی بر آب و گالینستن از نظر کمینه مقاومت حرارتی، مورد مطالعه قرار دادند. نتایج آن‌ها نشان داد که در پیکربندی‌های بهینه، گالینستن به عنوان یک فلز مایع می‌تواند مقاومت حرارتی کلی را تا حدود ۴۰ درصد در مقایسه با آب کاهش دهد. زی و همکاران [۲۱] پیش‌بینی عددی جریان و عملکرد حرارتی چاه‌های حرارتی تک‌لایه و دولایه موج‌دار با آب خنک‌شونده را مورد مطالعه قرار دادند. نتایج آن‌ها نشان داد که برای حذف یک بار گرمایی یکسان، مقاومت حرارتی کلی چاه حرارتی تک‌لایه موج‌دار میکروکانالی با افزایش سرعت جریان، کاهش و افت فشار به شدت افزایش می‌یابد. ژانگ و همکاران [۲۲] کار بعدی را انجام دادند و باتوجه به داده‌های تجربی آن‌ها، فلز مایع می‌تواند انتقال حرارت همرفتی را به دلیل خواص ترموفیزیکی برتر افزایش دهد. ویو و همکاران [۲۳] با استفاده از یک روش عددی، عملکرد جریان و انتقال حرارت چاه گرمایی مبتنی بر فلز مایع با انواع مختلف سیال کاری، شکل‌های مقطع میکروکانال متنوع و سرعت‌های ورودی مختلف را مورد بررسی قرار دادند. با حل مدل انتقال حرارت ثابت و سه‌بعدی دریافتند که در بین تمام موارد مورد بررسی، لیتیوم مناسب‌ترین انتخاب برای سیال کاری است؛ زیرا کمترین افت فشار و بیشترین انتقال حرارت را به همراه دارد. برای چهار نوع سطح مقطع میکروکانال در نظر گرفته شده (مستطیل، دایره، ذوزنقه و متوازی اضلاع)، استفاده از مقطع میکروکانال دایره‌ای ضریب انتقال حرارت متوسط بالاتری را به دست آورد، درحالی‌که استفاده از سطح مقطع متوازی اضلاع کمترین افت فشار را به دست می‌آورد.

وانگ و همکاران [۲۴] یک چاه حرارتی دو لایه میکروکانالی با دنده‌های نیمه متخلخل را با مدل سیال-جامد سه‌بعدی، همراه با الگوریتم ژنتیک چند هدفه بهینه کردند. تحقیقات آن‌ها بهبود قابل توجهی را در عملکرد خنک‌کننده و به دنبال آن، کاهش قابل توجهی در قدرت پمپاژ نشان می‌دهد.

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 بود.

سوهل و همکاران [۱۴] به طور تجربی عملکرد حرارتی یک چاه حرارتی میکروکانال را برای خنک‌کردن وسایل الکترونیکی با استفاده از خنک‌کننده نانوسیال به جای آب خالص بررسی کردند. نتایج تجربی آن‌ها، بهبود عملکرد حرارتی با استفاده از نانوسیال به جای آب مقطر خالص را نشان داد.

هو و همکاران [۱۵] به مطالعه جابه‌جایی اجباری حرارتی نانوسیال آب-اکسید آلومینیوم (به صورت تجربی) در یک چاه حرارتی میکروکانالی پرداختند. از ۲۵ کانال مستطیلی به صورت موازی با ابعاد ۵۰ میلی‌متر برای طول، ۸۰۰ میکرومتر برای ارتفاع و ۲۸۳ میکرومتر برای مقطع عرضی به عنوان چاه حرارتی میکروکانالی استفاده کردند. در نهایت، آن‌ها توانستند به این نتیجه برسند که استفاده از نانوسیال، باعث افزایش میانگین انتقال حرارت در چاه حرارتی می‌شود.

تیموری و همکاران [۱۶] جابه‌جایی ترکیبی درون یک حفره مربعی بسته را مورد بررسی قرار دادند. نتایج آن‌ها نشان داد که برای یک عدد رینولدز و ریچاردسون ثابت، افزودن نانو ذره به سیال پایه می‌تواند منجر به افزایش عدد ناسلت تا ۲۰ درصد گردد؛ همچنین، با افزایش میزان کجی حفره از صفر تا ۹۰ درجه، عدد ناسلت حدود ۳۰ درصد افزایش می‌یابد.

قاسمی و همکاران [۱۷] میزان انتقال حرارت نانوسیال آب-آلومینا را در یک چاه حرارتی میکروکانالی به صورت عددی مطالعه کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که ضریب انتقال حرارت و ضریب اصطکاک با افزایش غلظت نانوذرات، افزایش و مقاومت حرارتی با افزایش غلظت نانوذرات، کاهش می‌یابد.

کومار و همکاران [۱۸] تجزیه و تحلیل حرارتی میکروکانال‌های چاه گرمایی موج‌دار منشعب و خنک شده با نانوسیال آب-آلومینیوم اکسید را با استفاده از روش عددی انجام دادند. نتایج آن‌ها نشان داد که جدای از اختلال در لایه مرزی و شروع

آب به‌عنوان سیال پایه و نانو ذره مس به آن افزوده می‌شود. نتایج آن‌ها نشان داد با افزایش تمام پارامترهای ذکر شده، عدد ناسلت افزایش می‌یابد.

کارگر شریف‌آبادی [۳۱] انتقال حرارت جابه‌جایی اجباری فروسیال در داخل یک لوله مسی تحت یک میدان مغناطیسی متناوب را به‌صورت عددی بررسی کردند که هدف اصلی تحقیق، افزایش سرعت در لایه مرزی با استفاده از اثر میدان مغناطیسی روی نانوذرات جهت افزایش انتقال حرارت بیشتر بوده است.

چن و همکاران [۳۲] به‌منظور غلبه بر کمبود مقاومت بالای جریان فلز مایع، بهینه‌سازی ساختاری میکروکانال را بررسی کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که کمترین مقاومت جریان در میکروکانال کامپوزیت به دست می‌آید و قدرت پمپاژ  $54/9$  درصد کمتر از کانال سنتی با تنها  $0/7$  درصد افزایش مقاومت حرارتی کل است. کنثتی و همکاران [۳۳] مقایسه جریان سیال و ویژگی‌های انتقال حرارت در داخل یک محفظه مربعی شکل با آب و گالیم مایع به‌عنوان سیال عامل، تحت جابه‌جایی آزاد به‌صورت عددی در رژیم جریان آرام را مورد مطالعه قرار دادند. نتایج آن‌ها نشان داد که مکانیسم هدایت در مقایسه با جابه‌جایی در گالیوم مایع برای عدد گراشهف  $104$  غالب است؛ اما پدیده جابه‌جایی برای آب مایع برای تمامی اعداد گراشهف غالب است. شیخ‌زاده و همکاران [۳۴] به بررسی تأثیر اعمال یک میدان مغناطیسی ثابت بر میدان جریان و میدان دما در جابه‌جایی آزاد متلاطم درون یک محفظهٔ دوبعدی حاوی فلز مایع با اعداد پرانتل  $0/11$  و  $0/22$  و  $0/54$  پرداخته‌اند. نتایج آن‌ها نشان داد با افزایش عدد رایلی (افزایش نیروهای شناوری)، خطوط جریان به دیواره‌ها نزدیک می‌شوند و لایهٔ مرزی هیدرودینامیکی در نزدیکی دیواره‌ها متراکم می‌شود. وانگ و همکاران [۳۵] به بررسی انتقال حرارت جابه‌جایی ترکیبی فلز مایع تحت میدان مغناطیسی یکنواخت خارجی پرداختند. میدان مغناطیسی ثابت با شدت  $0$  تا  $0/1$  تسلا و شرط مرزی دما ثابت لحاظ شده بود. نتایج آن‌ها نشان داد که اثر اعمال میدان مغناطیسی با افزایش عدد هارتمن، علاوه بر افزایش  $32$  درصدی انتقال حرارت، افت فشار و ضریب اصطکاک چاه حرارتی را به‌شدت افزایشی می‌کند. سینگ و گوهِیل [۳۶] به بررسی عددی جریان فلز مایع و انتقال حرارت در محفظه چند مرحله‌ای در

شی و همکاران [۲۵] پارامترهای هندسی یک چاه حرارتی میکروکانالی را بهینه کردند. مطالعه عددی آن‌ها توسط نرم‌افزار فلوئنت انجام شده و متغیرهای طراحی شامل نسبت عرض کانال ثانویه به عرض میکروکانال، نسبت نیم گام کانال ثانویه به عرض میکروکانال و مقدار زاویه کانال ثانویه است. اثرات متغیر طراحی روی توابع هدف به‌صورت عددی مورد مطالعه قرار گرفت و تحلیل خوشه‌بندی برای بهینه‌سازی به کار گرفته شد.

وانگ و همکاران [۲۶] انتقال حرارت جابه‌جایی طبیعی خارجی فلز مایع تحت تأثیر میدان مغناطیسی را مورد مطالعه قرار دادند. صفحه گرم شده در یک طرف حفره و دو دیوار افقی مجاور آن عایق حرارتی و مابقی دیواره‌ها دما ثابت هستند. تحت تأثیر میدان مغناطیسی، ضخامت لایه مرزی سرعت ابتدا افزایش و سپس کاهش می‌یابد، در حالی که ضخامت لایه مرزی حرارتی به طور کلی افزایش می‌یابد.

حاج‌محمدی و همکاران [۲۷] یک مطالعه عددی برای بررسی اثرات یک میدان مغناطیسی یکنواخت و غیر یکنواخت خارجی بر هندسه بهینه شده و عملکرد حرارتی یک چاه حرارتی میکروکانال انجام دادند. نتایج آن‌ها نشان داد که برای آزمایش‌های هندسی خارج از طراحی (غیر بهینه)، اعمال میدان مغناطیسی یکنواخت، مقاومت حرارتی را تا  $21\%$  کاهش و عملکرد چاه حرارتی را بهبود می‌یابد.

آبادی 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 ثابت دایره‌ای مورد مطالعه قرار دادند. نتایج آن‌ها نشان داد که عدد ناسلت با استفاده از یک میدان مغناطیسی جایگزین با فرکانس  $10$  و  $100$  هرتز به ترتیب  $11/85$  و  $14/8$  درصد افزایش می‌یابد.

لی و همکاران [۲۹] یک روش بهینه‌سازی سریع با بازسازی هندسه و شبیه‌سازی چاه‌های حرارتی میکروکانالی پیشنهاد کردند. در مقایسه با نمونه اولیه، نتایج آن‌ها نشان داد که بیشینه افزایش نسبی عملکرد حرارتی مدل با عدد رینولدز  $200$ ،  $34/63$  درصد به دست آمده است.

نوری و همکاران [۳۰] انتقال حرارت جابه‌جایی در یک کانال سینوسی‌شکل محتوی نانوسیال تحت میدان مغناطیسی را بررسی کردند. میدان مغناطیسی، عمود بر کانال اعمال شده و

رسانایی الکتریکی بالا استفاده شده است. خواص ترموفیزیکی در جدول ۱ قابل مشاهده است.

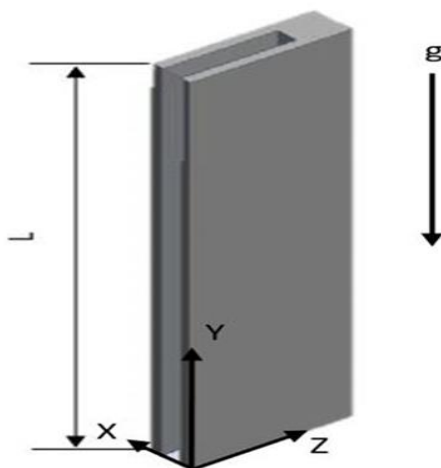
جدول ۱- خواص ترموفیزیکی فلز مایع گالینستن [۳۵]

خواص	واحدها	Ga68%In20%Sn12% (Galinstan)
نقطه ذوب	°C	۱۰/۵
چگالی	Kg/m <sup>3</sup>	۶۳۶۳/۵
گرمای ویژه	J/(Kg.K)	۳۶۵/۸
ویسکوزیته	Pa.s	۰/۰۰۲۲
رسانایی گرمایی	W/(m.K)	۱۶/۵
رسانایی الکتریکی	s/m	۳۳۱۰۰۰۰
ضریب انبساط حرارتی		۰/۰۰۰۱۲۴

### ۳- هندسه مسئله و معادلات حاکم

از یک چاه حرارتی با تک میکروکانال مشابه کار سارووار و همکاران [۴۰] استفاده شده است. پارامترهای هندسی زیر در مطالعه مقایسه بین مواد بستر و خنک‌کننده استفاده شده است.

ارتفاع کانال  $H=5 \text{ mm}$ ، عرض کانال  $b-2c=1 \text{ mm}$ ، ضخامت دیواره کانال  $c=b/4$  و ضخامت پایه  $W-H=2 \text{ mm}$  و با ابعاد  $L \times W=4 \text{ cm} \times 7 \text{ mm}$



حضور میدان مغناطیسی پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد که استفاده از میدان مغناطیسی باعث کاهش گردابه‌های جریان شده که تغییرات دمایی یکنواختی را در عدد هارتمن بالاتر نشان می‌دهد. حافظ احمد و همکاران [۳۷] 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 فناوری های مدرن است. فراهانی و همکاران [۳۸] به بررسی میزان تأثیر روش‌های فعال (افزودن نانوذرات به سیال پایه و جهت حرکت دیوار) و روش‌های غیرفعال (کاربرد میدان مغناطیسی) بر ویژگی‌های سیال پرداختند. این تحقیق به روش شبکه بولتزمن و نتایج آن با عدد گراشهف  $104$  و عدد پرانتل  $6/71$  به دست آورده شد. ایشاک و همکاران [۳۹] به بررسی لایه مرزی جریان جابه‌جایی ترکیبی سیال رسانا روی یک سطح نفوذ پذیر در حضور میدان مغناطیسی پرداختند. اثرات مکش و تزریق بر تنش برشی سطح و نرخ انتقال حرارت در سطح بررسی شده بود. نتایج آن‌ها نشان داد که پارامتر جابه‌جایی ترکیبی که محلول برای آن وجود دارد با مکش افزایش می‌یابد.

نوع آوری این پژوهش، انتقال حرارت جابه‌جایی ترکیبی فلز مایع گالینستن در اثر اعمال میدان مغناطیسی در دو جهت عمود بر محور حرکت جریان در یک چاه حرارتی میکروکانالی است. فلز مایع گالینستن به دلیل ضریب رسانایی حرارتی و الکتریکی و چگالی بالاتر نسبت به مایعات معمولی برتری دارد. اثرات میدان مغناطیسی یکنواخت خارجی در دو جهت عمود بر محور جریان سبب تغییر در رفتار جریان شده که به بهبود انتقال حرارت کمک‌کننده است. جهت جریان در چاه حرارتی عمودی (جهت جریان از بالا به پایین و بالعکس) در خصوص بهبود انتقال حرارت جابه‌جایی ترکیبی نیز بررسی شده است.

### ۲- خواص ترموفیزیکی سیال

انتقال حرارت جابه‌جایی، بین دیواره‌های چاه حرارتی و سیال عامل صورت می‌گیرد. با توجه به حضور میدان مغناطیسی، از فلز مایع گالینستن (حساس به میدان مغناطیسی) به دلیل

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

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

در معادلات فوق،  $u$ ،  $v$  و  $w$  مولفه‌های سرعت در جهات  $x$ ،  $y$  و  $z$  هستند.  $\rho$  چگالی سیال و  $B_0$  شدت میدان مغناطیسی و  $\beta$  ضریب انبساط حجمی است.  $P$  و  $T$  به ترتیب فشار و دما هستند.  $\alpha$  انتشار حرارتی سیال است و به صورت زیر تعریف می‌شود.

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

$C_p$  ظرفیت گرمایی ویژه است و  $K$  رسانایی گرمایی سیال است. یکی از اعداد بی‌بعد مهم عدد هارتمن  $Ha$  است.

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

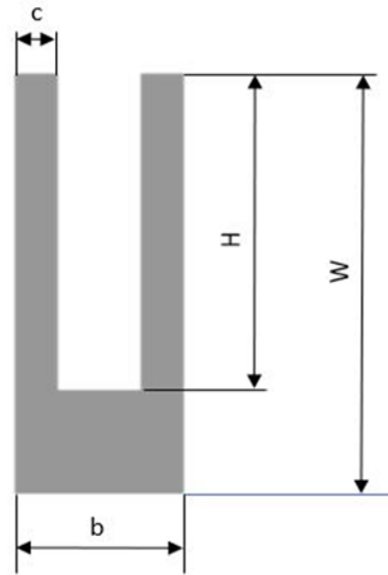
برای انتقال حرارت جابه‌جایی ترکیبی، عدد ناسلت تابعی از عدد رینولدز و عدد پراتل و عدد گراشهف است.

$$Nu = Nu(Re, Pr, Gr) \quad (8)$$

$$Re = \frac{r u D_h}{m} \quad (9)$$

$$Gr = \frac{r^2 g b q D_h^4}{K m^2} \quad (10)$$

$$Ri = \frac{Gr}{Re^2} \quad (11)$$



شکل ۱- هندسه سه‌بعدی تک میکروکانال

معادلات اصلی حاکم بر رفتار سیال با توجه به فرضیات زیر نوشته شده است.

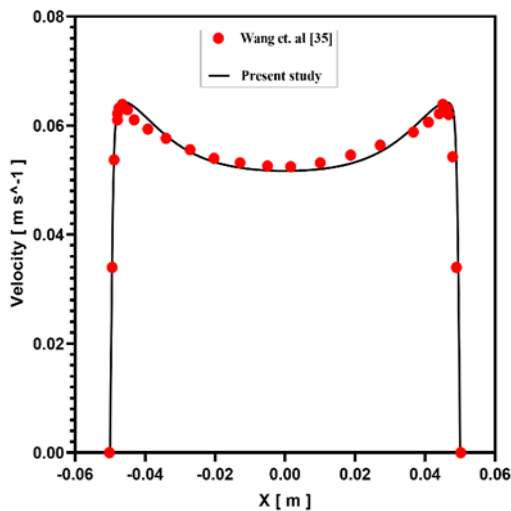
- ۱- جریان سیال آرام و پایا
- ۲- سیال تراکم ناپذیر نیوتنی
- ۳- نیروهای حجمی، لورنتز و گرانش است.
- ۴- از اثرات اتلاف ویسکوز و انتقال حرارت تشعشعی و گرمای ژول نیز صرف نظر شده است.
- ۵- میدان مغناطیسی یکنواخت در نظر گرفته شده است و به علت نبود گرادیان‌های مغناطیسی عبارت نیروی کلوم در نظر گرفته نشده است.

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

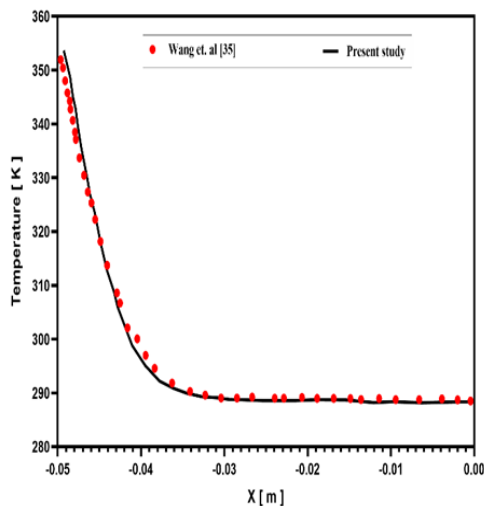
$$\begin{aligned}
 & r \left( u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) = \\
 & - \frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left[ \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \right) + \left( \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) + \left( \frac{\partial^2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

$$r \left( u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right) = \quad (3)$$

نتایج توزیع سرعت در مقطع  $y=0.01$  m با شدت میدان مغناطیسی  $0.1$  تسلا و شکل ۳ نتایج توزیع دما با شدت میدان مغناطیسی  $0.06$  تسلا را نشان داده است. با توجه به نتایج به دست آمده و درصد خطای محاسبه شده در جدول ۲، مشخص است که نتایج حاصل از شبیه سازی چاه حرارتی از اعتبار لازم برخوردار است.



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



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

قانون اهم به صورت زیر که  $\vec{J}$  چگالی جریان الکتریکی و  $\sigma$  رسانندگی الکتریکی سیال و  $\vec{E}$  بردار میدان الکتریکی و  $\vec{B}$  بردار میدان مغناطیسی است.

$$\vec{J} = \sigma (\vec{E} + \vec{U}' \times \vec{B}) \quad (12)$$

قوانین ماکسول به صورت روابط ۱۳، ۱۴، ۱۵، ۱۶ بیان شده است.  $\rho$  چگالی بار و  $\mu$  ضریب تراوایی مغناطیسی محیط و  $\epsilon_0$  ضریب گذردهی خلا است.

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0} \quad (13)$$

$$\vec{\nabla}' \cdot \vec{E} = - \frac{\nabla' B}{\epsilon_0} \quad (14)$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0 \quad (15)$$

$$\vec{\nabla}' \cdot \vec{B} = m \vec{j} \quad (16)$$

$$\vec{F}_L = \vec{J}' \times \vec{B} \quad (17)$$

$$\text{Pr} = \frac{u}{a} \quad (18)$$

$$h = \frac{Q}{A_w (T_w - T_m)} \quad (19)$$

$$Q = q A_b \quad (20)$$

$$\text{Nu} = \frac{1}{L} \int_0^L \text{Nu}_y dy \quad (21)$$

## ۲- اعتبارسنجی و استقلال حل از شبکه

یکی از مهم ترین قسمت ها در یک پژوهش عددی، بررسی اعتبارسنجی مسئله است. بنابراین جهت اطمینان از صحت نتایج، باید نتایج با یک پژوهش معتبر بررسی گردد. در این قسمت از مطالعه به مقایسه نتایج بین پژوهش حاضر با نتایج وانگ و همکاران [35]، بررسی جریان فلز مایع در یک میکروکانال با سطح مقطع مستطیل و شرط مرزی دما ثابت با دیواره های رسانای الکتریکی پرداخته شده است. شکل ۲

جدول ۲- درصد خطای اعتبارسنجی با مطالعه [۳۵]

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

جهت استقلال حل از شبکه مقدار سرعت بیشینه و ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی در تعداد نقاط متفاوت بررسی شده است که شبکه مناسب جهت بررسی میدان جریان و انتقال حرارت انتخاب می‌شود. شکل ۴ شبکه‌بندی هندسه را نشان می‌دهد که شبکه ناحیه سیال جهت بالابردن دقت نتایج ریزتر لحاظ شده و نتایج به‌دست‌آمده در جدول ۳ با تعداد نقاط ۴۴۰۰۰۰ و ۹۱۲۰۰۰ و ۲۲۹۰۰۰۰ و سرعت جریان ورودی ۰/۴ متر بر ثانیه و مقدار شار حرارتی ۱۰ وات بر سانتی‌متر مربع مقایسه شده‌اند. با توجه به نتایج به‌دست‌آمده، انتخاب شبکه با تعداد نقاط ۹۱۲۰۰۰ مناسب است.

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.

مگنتوهیدرودینامیک اندرکنش بین فلزات مایع یا ذرات فرومغناطیس داخل جریان و میدان الکترومغناطیسی را در نظر می‌گیرد. در مدل مگنتوهیدرودینامیک معادلات ماکسول الکترومغناطیسی با معادلات سیال ترکیب می‌شوند که شامل نیروی لورنتز ناشی از میدان مغناطیسی نیز می‌شود. جهت شبیه‌سازی از نرم‌افزار آنسیس فلونت است استفاده شده است که حلگر مبتنی بر فشار و الگوریتم حل سیمپل‌سی و گسسته سازی معادلات به روش حجم محدود مرتبه دوم بالادست انجام شده است.

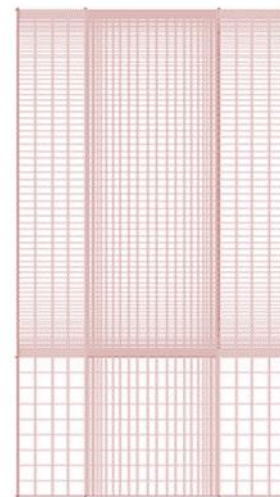
جدول ۳- استقلال حل از شبکه

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

#### ۴- بررسی اثرات جهت جریان بر بهبود انتقال

##### حرارت

مکانیسم انتقال حرارت بین سیال و سطوح مجاور آن، به‌عنوان جابه‌جایی نامیده می‌شود. در این پژوهش انتقال حرارت جابه‌جایی ترکیبی شامل جابه‌جایی آزاد و اجباری است. جابه‌جایی ترکیبی زمانی شکل خواهد گرفت که تأثیر جریان اجباری و جریان آزاد بر یکدیگر غالب می‌شوند. در این پژوهش از یک چاه حرارتی عمودی استفاده شده که به دو صورت ۱- جهت جریان از پایین‌به‌بالا (+y) و ۲- جهت جریان از بالا‌به‌پایین (-y) به بررسی اثرات جابه‌جایی آزاد و اجباری پرداخته شده است. شکل ۵ تغییرات عدد ناسلت در دو جهت جریان از پایین‌به‌بالا و بالعکس را بدون حضور میدان مغناطیسی نشان می‌دهد. با افزایش عدد ریچاردسون در محدوده ۰/۴۵ الی ۱۰، اثرات جابه‌جایی آزاد بر بهبود انتقال حرارت بیشتر شده است. جهت جریان از پایین‌به‌بالا و عدد ریچاردسون ۰/۴۵، ۱ و ۱۰ به ترتیب عدد ناسلت ۲/۸، ۴/۴ و ۱۱/۳۰ درصد نسبت به جهت جریان از بالا‌به‌پایین بهبود داده شده است. افزایش عدد ناسلت با جهت جریان از پایین‌به‌بالا به این دلیل است که جابه‌جایی اجباری و آزاد اثرات یکدیگر را تقویت کرده‌اند. در صورتی که با جهت جریان بالا به پایین اثرات یکدیگر را تضعیف می‌کنند. افزایش عدد ریچاردسون سبب افزایش اثرات نیروی شناوری شده که سبب بهبود انتقال حرارت شده است.



شکل ۴- شبکه‌بندی هندسه

#### ۳- تشریح شرایط مرزی و نرم افزار

برای شرایط مرزی، شار حرارتی ثابت به کف چاه حرارتی (-Z) اعمال شده و دیواره‌های اطراف چاه حرارتی، عایق در نظر



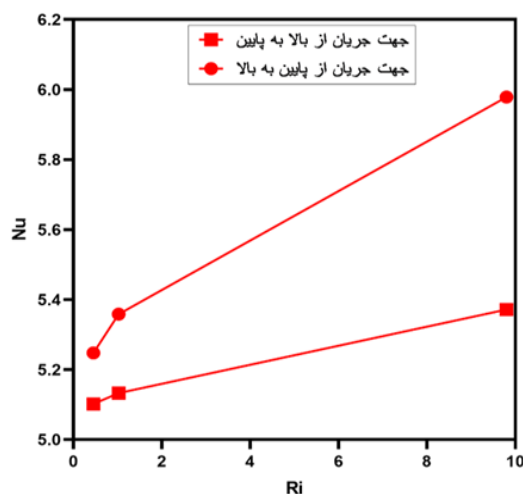
خط مرکزی میکروکانال شده که نشان‌دهنده جریان هانت [۴۰، ۴۱] است.

شکل ۷ نمودار تغییر سرعت در سه حالت متفاوت ۱- جهت جریان از پایین به بالا ۲- جهت جریان از بالا به پایین بدون حضور میدان مغناطیسی ۳- جهت جریان از پایین به بالا با حضور میدان مغناطیسی و عدد هارتمن ۱۲۹ را نشان داده است. نتایج نشان می‌دهد که سرعت جریان در جهت پایین به بالا به علت تاثیر نیروی شناوری نسبت به جهت جریان بالا به پایین در نزدیکی دیواره‌های گرم بیشتر شده و با اعمال میدان مغناطیسی، سرعت جریان در مجاورت دیواره‌ها نسبت به خط مرکزی میکروکانال افزایشی شده است.

شکل ۸ تغییرات توزیع سرعت تحت اعمال میدان مغناطیسی در جهت X با افزایش عدد هارتمن در مقطع  $y=0.02$  m را نشان داده است. اثر اعمال میدان مغناطیسی در جهت X به چاه حرارتی سبب تغییر توزیع سرعت از حالت یکنواخت به حالت تخت شده است. این نوع توزیع سرعت به وجود آمده، سرعت جریان نزدیک به دیواره‌ها را نسبت به حالت یکنواخت افزایشی کرده است.

شکل ۹ و ۱۰ به ترتیب نمودار تغییرات سرعت با اعمال میدان مغناطیسی در جهت Z و X در ناحیه لایه مرزی از ورودی تا مرکز میکروکانال ( $-0.04 < y < -0.02$ ) را نشان داده‌اند. با افزایش عدد هارتمن، ضخامت لایه مرزی سرعت (هیدرودینامیکی) کوچکتر شده است و سرعت جریان در این ناحیه افزایشی شده است. شکل ۱۱ تغییرات سرعت در خط مرکزی میکروکانال با اعمال میدان مغناطیسی در جهت Z را نشان داده است. با افزایش عدد هارتمن به دلیل افزایش نیروی لورنتز در خلاف جهت جریان، سبب کاهش سرعت جریان در خط مرکزی میکروکانال شده است.

شکل ۱۲ کانتور سرعت جریان با افزایش عدد هارتمن برای جهت جریان از پایین به بالا را نشان داده است. با افزایش عدد هارتمن ضخامت لایه مرزی هیدرودینامیکی کوچکتر شده و سبب افزایش سرعت جریان در مجاور دیواره‌ها شده است.

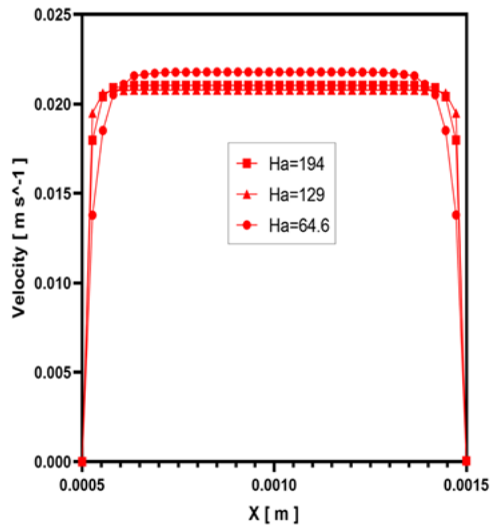


شکل ۵- بررسی عدد ناسلت با افزایش عدد ریچاردسون در دو حالت جهت جریان از پایین به بالا و بالعکس

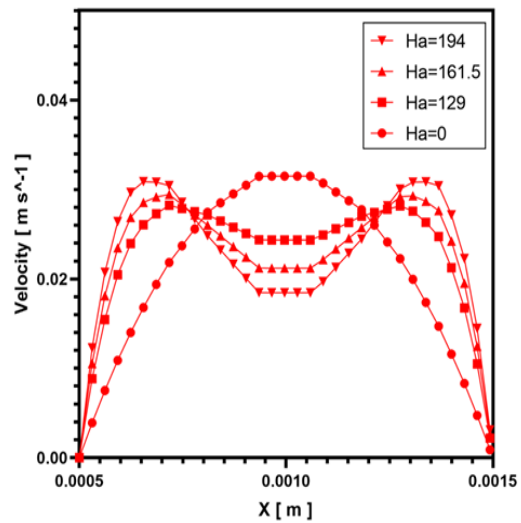
## ۵- بررسی میدان جریان در اثر اعمال میدان مغناطیسی

ارتباط بین میدان جریان سیال و میدان مغناطیسی را می‌توان بر اساس دو اثر اساسی در نظر گرفت، ۱- القای جریان الکتریکی ناشی از حرکت ماده‌ی رسانا در میدان مغناطیسی ۲- اثر نیروی لورنتز به دلیل برهم‌کنش جریان الکتریکی و میدان مغناطیسی. به طور کلی، جریان الکتریکی القایی و نیروی لورنتز تمایل دارند با مکانیسم‌هایی که آن‌ها را ایجاد می‌کند، مخالفت کنند؛ بنابراین، جنبش‌هایی که منجر به القای الکترومغناطیسی می‌شوند، به طور سیستماتیک توسط نیروی لورنتز حاصل، متوقف می‌شوند. نسبت نیروی لورنتز به نیروی اینرسی حرکتی سیال را پارامتر برهم‌کنش می‌نامند. هرچقدر این پارامتر بیشتر باشد اثر نیروی لورنتز بر حرکت سیال بیشتر است. بنابراین اگر نیروی لورنتز از حد خاصی بیشتر شود، می‌تواند باعث جلوگیری از حرکت سیال گردد.

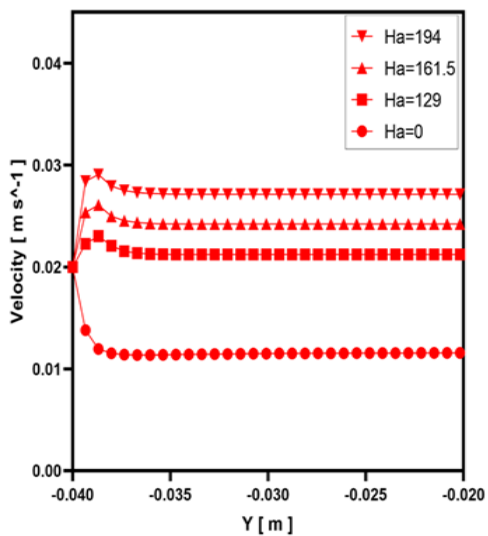
شکل ۶ تغییرات توزیع سرعت تحت اعمال میدان مغناطیسی در جهت Z با افزایش عدد هارتمن در مقطع  $y=0.02$  m را نشان داده است. اثر اعمال میدان مغناطیسی در جهت Z (عمود بر محور جریان) سبب به وجود آمدن نیرویی در خلاف جهت حرکت جریان به نام نیروی لورنتز شده که توزیع سرعت M شکل را باعث شده است. این نوع توزیع سرعت، سبب افزایش سرعت جریان در مجاورت دیواره‌ها و کاهش سرعت جریان در



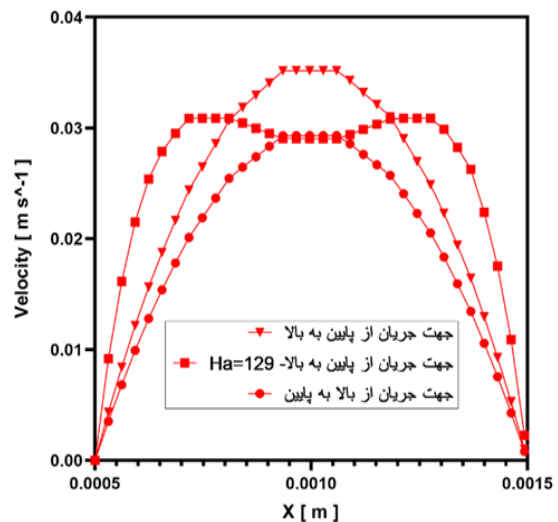
شکل ۸- توزیع سرعت تحت اعمال میدان مغناطیسی در جهت X با افزایش عدد هارتمن



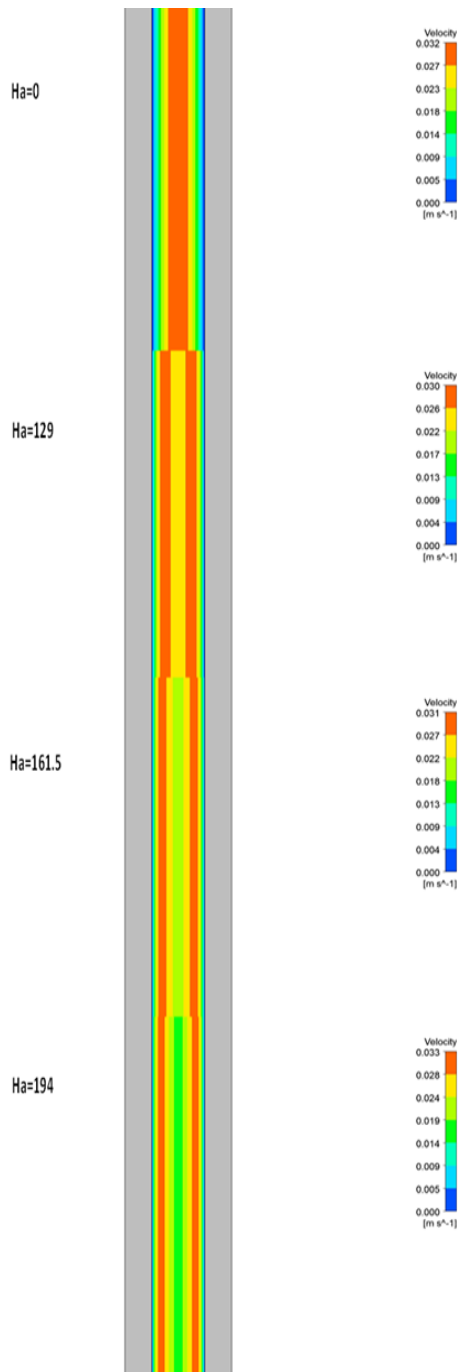
شکل ۶- تغییرات توزیع سرعت تحت اعمال میدان مغناطیسی در جهت Z با افزایش عدد هارتمن، مقطع  $y=2\text{ cm}$



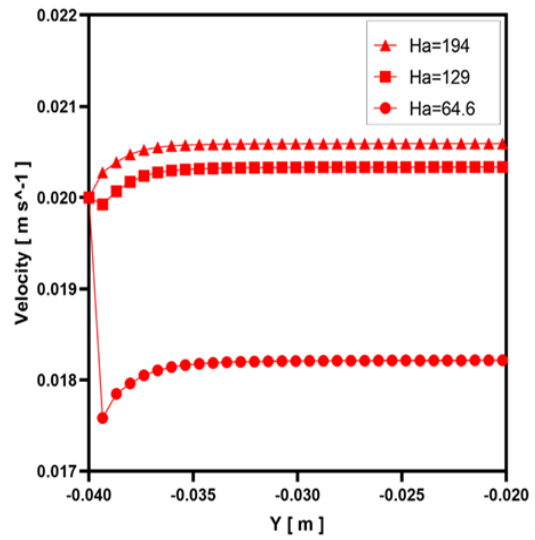
شکل ۹- تغییرات سرعت تحت اعمال میدان مغناطیسی در جهت Z با افزایش عدد هارتمن در ناحیه لایه مرزی



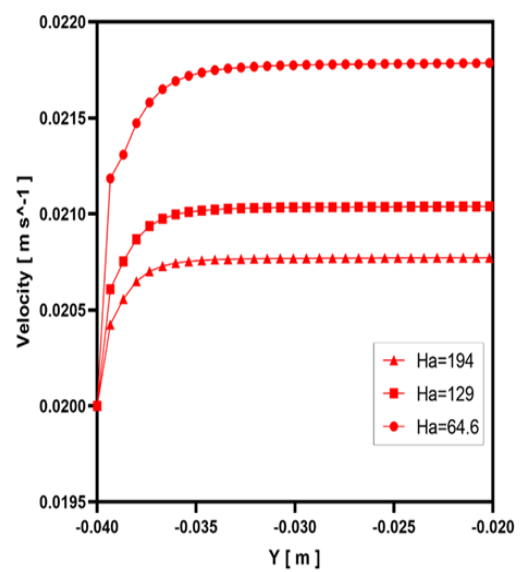
شکل ۷- تغییرات سرعت در سه حالت (۱) جهت جریان از پایین به بالا (۲) جهت جریان از بالا به پایین (۳) جهت جریان از پایین به بالا در حضور میدان مغناطیسی با عدد هارتمن ۱۲۹، مقطع  $Z=3.5\text{ mm}$



شکل ۱۲- کانتور سرعت با افزایش عدد هارتمن، جهت جریان پایین به بالا، اعمال میدان مغناطیسی Z



شکل ۱۰- تغییرات سرعت تحت اعمال میدان مغناطیسی در جهت X با افزایش عدد هارتمن در ناحیه لایه مرزی



شکل ۱۱- تغییرات سرعت با اعمال میدان مغناطیسی در جهت Z با افزایش عدد هارتمن در خط مرکزی میکروکانال

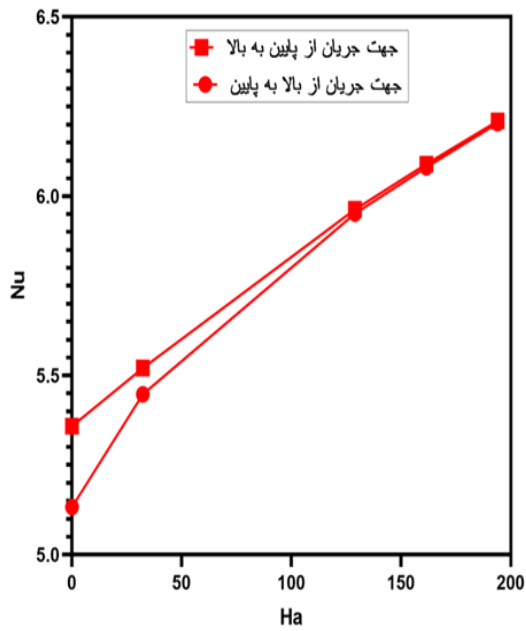
## ۶- بررسی بهبود انتقال حرارت و افت فشار در اثر

### اعمال میدان مغناطیسی

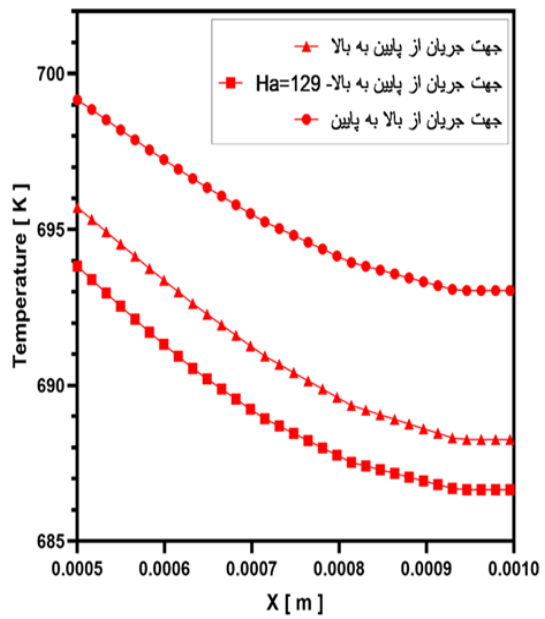
نتایج نشان داد که اثر اعمال میدان مغناطیسی در دو جهت عمود بر محور جریان سیال، سبب افزایش سرعت جریان در مجاورت دیواره‌ها شده است. شکل ۱۳ نمودار تغییرات دما در سه حالت متفاوت ۱- جهت جریان از پایین به بالا ۲- جهت جریان از بالا به پایین بدون حضور میدان مغناطیسی ۳- جهت جریان از پایین به بالا با حضور میدان مغناطیسی و عدد هارتمن ۱۲۹ را نشان داده است. نتایج نشان داده است که با جهت جریان از پایین به بالا اثرات بویانسی انتقال حرارت جابه‌جایی اجباری را تقویت کرده و سبب کاهش دمای سطوح شده است، و اثر اعمال میدان مغناطیسی با عدد هارتمن ۱۲۹ انتقال حرارت سطوح میکروکانال را تقویت کرده است. شکل ۱۴ تغییرات عدد ناسلت را با اعمال میدان مغناطیسی در جهت Z نشان داده است. با توجه به شرط مرزی شار ثابت، افزایش سرعت جریان در مجاورت دیواره‌ها در اثر اعمال میدان مغناطیسی، سبب بهبود انتقال حرارت و کاهش دمای سطوح شده است. به طوریکه با عدد ریچاردسون ۱ و جهت جریان از پایین به بالا، اثر اعمال میدان مغناطیسی در جهت Z (عمود بر محور جریان) با عدد هارتمن ۱۲۹، ۱۶۴/۵ و ۱۹۴ به ترتیب ۱۱/۲۹، ۱۳/۶۳ و ۱۵/۸۸ درصد عدد ناسلت را بهبود بخشیده است. شکل ۱۵ بررسی بهبود انتقال حرارت تحت اعمال میدان مغناطیسی در جهت Z با افزایش عدد هارتمن در دو حالت جهت جریان از پایین به بالا و بالعکس را نشان داده است. انتقال حرارت با جهت جریان از پایین به بالا نسبت به جهت جریان از بالا به پایین با افزایش عدد هارتمن افزایش شده است. نکته حائز اهمیت این است که بعد از عدد هارتمن ۱۲۹، به علت کاهش ضخامت لایه مرزی هیدرودینامیکی، اثرات جابه‌جایی اجباری به علت افزایش سرعت در مجاور دیواره‌ها نسبت به جابه‌جایی آزاد بیشتر شده و عدد ناسلت متوسط هر دو جهت جریان پایین به بالا و بالا به پایین تقریباً یکسان شده است. شکل ۱۶ بررسی بهبود انتقال حرارت تحت اعمال میدان مغناطیسی در جهت X با افزایش عدد هارتمن در دو حالت جهت جریان از پایین به بالا و بالعکس را نشان داده است. با اعمال میدان مغناطیسی در جهت X با توجه به نتایج قبلی مشاهده شد که سرعت جریان در مجاور دیواره‌ها نسبت به اعمال میدان مغناطیسی در جهت Z افزایش کمتری داشته است؛ بنابراین

انتظار نمی‌توان داشت که مانند شکل ۱۵ با افزایش عدد هارتمن (۱۲۹ به بعد) اثرات جابه‌جایی اجباری در جهت جریان از بالا به پایین نسبت به جهت پایین به بالا افزایشی و سبب یکسان شدن عدد ناسلت متوسط هر دو جهت جریان گردد. شکل ۱۷ نمودار تغییرات عدد ناسلت موضعی را در مقاطع مختلف میکروکانال با افزایش عدد هارتمن نشان داده است. با افزایش عدد هارتمن، عدد ناسلت در ابتدای ورودی میکروکانال به علت افزایش انتقال حرارت، افزایشی شده و در مقاطع بعدی تا انتهای میکروکانال کاهش چشمگیری داشته است. در اثر اعمال میدان مغناطیسی و با افزایش عدد هارتمن، عدد ناسلت در طول میکروکانال بهبود یافته است.

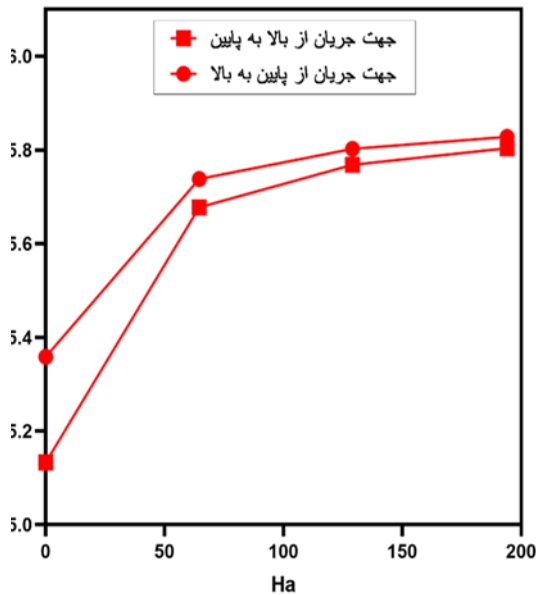
نتایج این پژوهش نشان دادند که افزایش عدد هارتمن منجر به کاهش ضخامت لایه مرزی سرعت و در نتیجه افزایش گرادیان سرعت با توجه به برقراری شرط عدم لغزش شده است. شکل ۱۸ و ۱۹ تغییرات افت فشار چاه حرارتی با اعمال میدان مغناطیسی در جهت Z و X در دو حالت جهت جریان از پایین به بالا و بالعکس را نشان داده است. با افزایش عدد هارتمن و کوچک‌تر شدن ضخامت لایه مرزی، افت فشار چاه حرارتی افزایشی شده است. هنگامی که جهت جریان از بالا به پایین باشد افت فشار چاه حرارتی با اعمال میدان مغناطیسی در جهت Z و عدد هارتمن ۱۲۹ و ۱۶۱/۵ و ۱۹۴ نسبت به جهت جریان پایین به بالا به ترتیب ۳/۱۳ و ۲/۲۰ و ۱/۸ برابر شده است. افت فشار چاه حرارتی با اعمال میدان مغناطیسی در جهت X و عدد هارتمن ۱۲۹ و ۱۹۴ نسبت به جهت جریان پایین به بالا به ترتیب ۲/۴۴ و ۱/۸ برابر شده است. با اعمال میدان مغناطیسی عمود بر محور جریان و افزایش عدد هارتمن، افت فشار چاه حرارتی و در نتیجه ضریب اصطکاک افزایشی شده است.



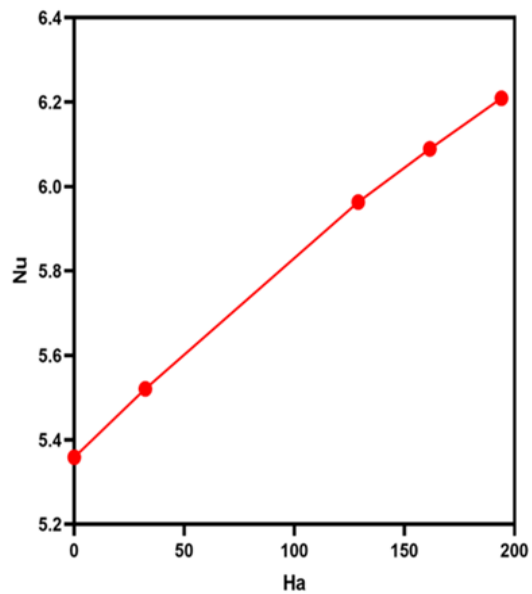
شکل ۱۳- تغییرات عدد ناسلت با افزایش عدد هارتمن در دو حالت جهت جریان متفاوت، اعمال میدان مغناطیسی در جهت Z



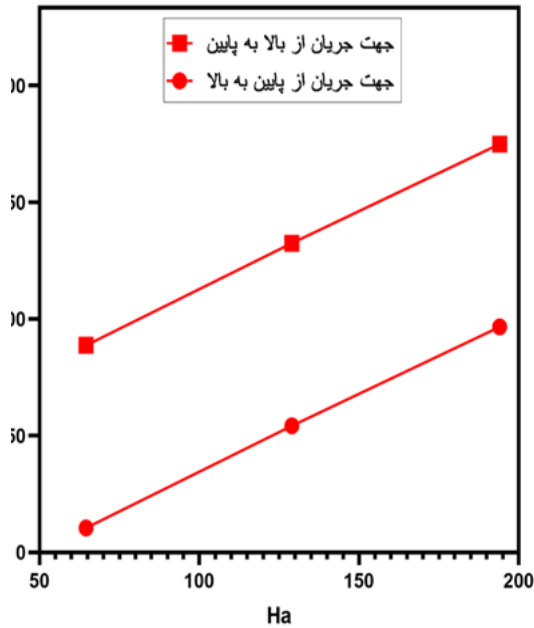
شکل ۱۴- تغییرات دما در سه حالت (۱) جهت جریان از بالا به پایین (۲) جهت جریان از پایین به بالا (۳) جهت جریان از پایین به بالا در حضور میدان مغناطیسی با عدد هارتمن ۱۲۹



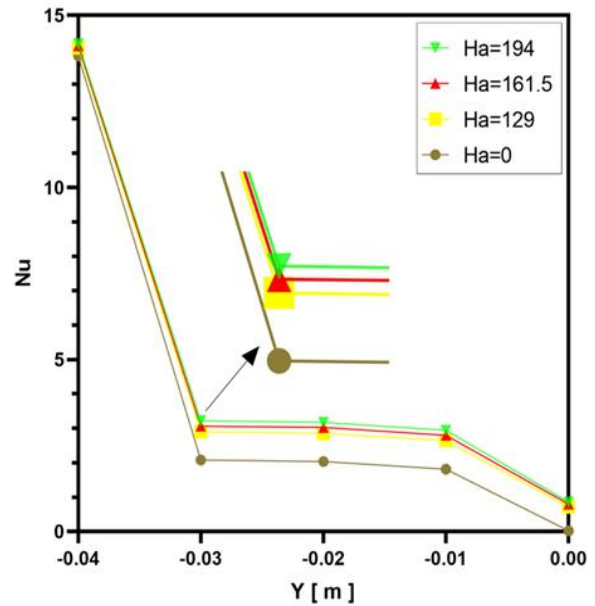
شکل ۱۵- تغییرات عدد ناسلت با افزایش عدد هارتمن در دو حالت جهت جریان متفاوت، اعمال میدان مغناطیسی در جهت X



شکل ۱۶- تغییرات عدد ناسلت با افزایش عدد هارتمن، اعمال میدان مغناطیسی در جهت Z



شکل ۱۹- تغییرات افت فشار چاه حرارتی با افزایش عدد هارتمن در دو حالت جهت جریان متفاوت، اعمال میدان مغناطیسی در جهت X



شکل ۱۷- بررسی تغییرات عدد ناسلت در طول میکروکانال با افزایش عدد هارتمن

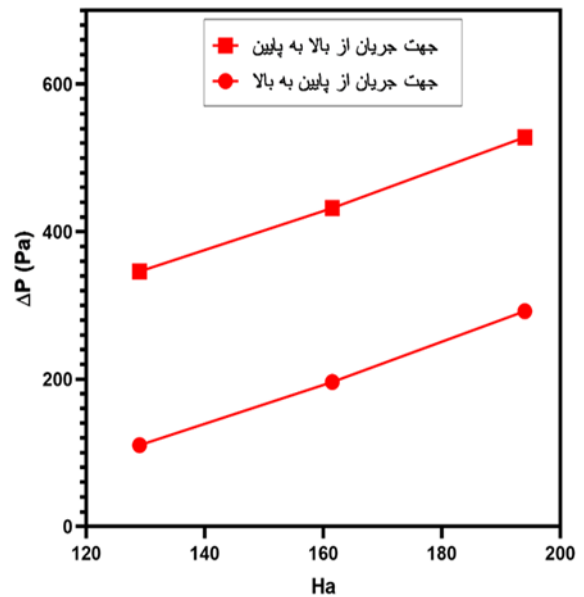
#### نتایج

۱- در انتقال حرارت جابه‌جایی ترکیبی، نیروی شناوری در افزایش انتقال حرارت تاثیر بسزایی دارد. جهت جریان از پایین‌به‌بالا با عدد ریچاردسون ۱۰ بدون حضور میدان مغناطیسی عدد ناسلت را ۱۱/۳۰ درصد نسبت به جهت جریان بالا‌به‌پایین بهبود داده است.

۲- اعمال میدان مغناطیسی در جهت Z (عمود بر محور جریان) توزیع سرعت M شکل را باعث شده است که با توجه به شرط مرزی شار ثابت، افزایش سرعت در مجاورت دیواره‌ها سبب بهبود انتقال حرارت و کاهش دمای سطوح شده است.

۳- با عدد ریچاردسون ۱ و جهت جریان از پایین‌به‌بالا، اثر اعمال میدان مغناطیسی در جهت Z (عمود بر محور جریان) با عدد هارتمن ۱۲۹، ۱۶۴/۵ و ۱۹۴ به ترتیب ۱۱/۲۹، ۱۳/۶۳ و ۱۵/۸۸ درصد عدد ناسلت را بهبود بخشیده است.

۴- با عدد ریچاردسون ۱ و جهت جریان از پایین‌به‌بالا، اثر اعمال میدان مغناطیسی در جهت X (عمود بر محور جریان) با عدد هارتمن ۶۴/۶، ۱۲۹ و ۱۹۴ به ترتیب ۷/۰۸، ۸/۲۸ و ۸/۷۶ درصد عدد ناسلت را بهبود داده است.



شکل ۱۸- تغییرات افت فشار چاه حرارتی با افزایش عدد هارتمن در دو حالت جهت جریان متفاوت، اعمال میدان مغناطیسی در جهت Z

**علائم انگلیسی**

A_W	مساحت انتقال حرارت بین سیال و دیواره‌ها، m <sup>2</sup>
A_b	مساحت کف میکروکانال، m <sup>2</sup>
D_h	قطر هیدرولیکی، m
K	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 <sup>2</sup> K
Ha	عدد هارتمن
Nu_Avg	عدد ناسلت متوسط
P	فشار، pa
Pr	عدد پرانتل
Ri	عدد ریچاردسون
Gr	عدد گراشهف
g	شتاب جاذبه، m/s <sup>2</sup>
q	شار حرارتی، w/m <sup>2</sup>
Q	انتقال حرارت، w
Re	عدد رینولدز
T_f	دمای سیال ورودی، k
U_f	سرعت سیال ورودی، m/s
u	مولفه سرعت در جهت X
v	مولفه سرعت در جهت y
w	مولفه سرعت در جهت Z
B_0	شدت میدان مغناطیسی، T
L	طول مشخصه، m
C_P	ظرفیت گرمایی ویژه، J/kg.k
F_L	نیروی لورنتز در حالت مستقیم، N
J	چگالی جریان الکتریکی، A/m <sup>2</sup>

**علائم یونانی**

θ	لزجت سینماتیک، m <sup>2</sup> /s
α	انتشار حرارتی سیال، m <sup>2</sup> /s
σ	رسانایی الکتریکی سیال، s/m
β	ضریب انبساط حجمی، K <sup>-1</sup>
ρ	چگالی سیال، kg/m <sup>3</sup>
μ	ویسکوزیته دینامیکی سیال، kg/m.s

۵- هنگامی که جهت جریان از بالا به پایین باشد افت فشار چاه حرارتی با اعمال میدان مغناطیسی در جهت Z و عدد هارتمن ۱۲۹ و ۱۶۱/۵ و ۱۹۴ نسبت به جهت جریان پایین به بالا به ترتیب ۳/۱۳ و ۲/۲۰ و ۱/۸ برابر شده است. هنگامی که جهت جریان از بالا به پایین باشد، افت فشار چاه حرارتی با اعمال میدان مغناطیسی در جهت X و عدد هارتمن ۱۲۹ و ۱۹۴ نسبت به جهت جریان پایین به بالا به ترتیب ۲/۴۴ و ۱/۸ برابر شده است. با اعمال میدان مغناطیسی عمود بر محور جریان و افزایش عدد هارتمن در دو حالت جهت جریان از پایین به بالا و بالعکس، افت فشار چاه حرارتی و در نتیجه ضریب اصطکاک افزایشی شده است.

۶- در این پژوهش مشخص شد برای مسئله انتقال حرارت جابه‌جایی ترکیبی جهت جریان در چاه حرارتی میکروکانالی عمودی در خصوص بهبود انتقال حرارت و افت فشار حائز اهمیت است. نتایج نشان دادند که جهت جریان از پایین به بالا به علت اثرات جابه‌جایی آزاد در بهبود انتقال حرارت نقش بسزایی دارد و با اعمال میدان مغناطیسی، انتقال حرارت تقویت شده و افت فشار با جهت جریان پایین به بالا نسبت به جهت بالا به پایین بهبود یافته است.

در انتقال حرارت جابه‌جایی آزاد سیال به علت اثرات بویانسی حرکت می‌کند؛ یعنی با گرم شدن سیال، چگالی سیال کمتر شده و به سمت بالا حرکت می‌کند (در خلاف جهت جاذبه). نشان داده شد که جهت جریان از پایین به بالا (جهت جریان در خلاف جاذبه) سبب تقویت اثرات جابه‌جایی اجباری شده و در بهبود انتقال حرارت جابه‌جایی ترکیبی کمک کننده است. با اعمال میدان مغناطیسی به علت تغییر توزیع سرعت از حالت یکنواخت به M شکل و حالت تخت، به علت افزایش سرعت جریان در مجاورت دیواره‌ها، با توجه به شرط مرزی شار ثابت، انتقال حرارت بهبود یافته و دمای سطوح کاهشی شده است. در اثر اعمال میدان مغناطیسی، ضخامت لایه مرزی هیدرودینامیکی کاهش و سبب افزایش گرادیان سرعت و در نتیجه افزایش ضریب اصطکاک شده است. در نتیجه نیاز است در پژوهش‌های آینده راهکاری جهت کاهش افت فشار در اثر اعمال میدان مغناطیسی صورت پذیرد که علاوه بر بهره‌برداری از افزایش انتقال حرارت، افت فشار کاهشی شده و در نهایت هزینه‌های پیاده‌سازی پژوهش‌های مربوطه کاهش یابد.

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 and Fluid Mechanics*, 12(6), 191-204.

[12] Chein, R., & Huang, G. (2005). Analysis of microchannel heat sink performance using nanofluids. *Applied thermal engineering*, 25(17-18), 3104-3114.

[13] DarZi, A. R., Farhadi, M., Sedighi, K., Aallahyari, S., & Delavar, M. A. (2013). Turbulent heat transfer of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-water nanofluid inside helically corrugated tubes: numerical study. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 41, 68-75.

[14] Soheli, 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 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-H<sub>2</sub>O nanofluid. *Int. J. Heat Mass Trans.*, 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 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/water nanofluid. *Applied Thermal Engineering*, 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 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanoparticles in a novel minichannel heat sink. *J. Molecular Liqu.*, 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 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-water nanofluid cooled branched wavy heat sink. *Applied Thermal Engineering*, 201, 117787.

[19] Miner, A., & Ghoshal, U. (2004). Cooling of high-power-density microdevices using liquid metal coolants. *Applied physics letters*, 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 Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology*, 4(1), 46-56.

[21] Xie, G., Chen, Z., Sundén, B., & Zhang, W. (2013). Numerical predictions of the flow and thermal

زیر نویس

متوسط	Avg
دیواره	w
سیال	f

## مراجع

[1] Tuckerman, D. B., & Pease, R. F. W. (1981). High-performance heat sinking for VLSI. *IEEE Electron device letters*, 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 trans.*, 45(12), 2549-2565.

[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. *International communications in heat and mass transfer*, 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 Trans.*, 204, 123830.

[5] Sepehrnia, M., & Rahmati, A. (2018). Numerical investigating the gas slip flow in the microchannel heat sink using different materials. *Challenges in Nano and Micro Scale Science and Technology*, 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 Trans.*, 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. *International J. Thermal 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 Bosanquet parameter. *J. Heat Mass Trans. Research*, 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. Analy. and Calorimetry*, 141, 547-558.

[10] Hamidi, E., Ganesan, P., Muniandy, S. V., & Hassan, M. A. (2022). Lattice BoltZmann Method



- nanofluid in a sinusoidal channel. *Modares Mechanical Engineering*, 13(14), 43-55.
- [31] Kargar Sharifabad, H., & Falsafi, M. (2015). Numerical modeling of internal convection heat transfer of magnetic fluid in the pulse magnetic field and different time frequencies. *Modares Mechanical Engineering*, 15(6), 91-98.
- [32] 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. Thermal Sci.*, 183, 107840.
- [33] 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. Research*, 50(3).
- [34] 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 Engineering and Management*, 1(2), 49-55.
- [35] 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.
- [36] 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.
- [37] 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. *Materials Today Communications*, 35, 105892.
- [38] Nemati, M., Farahani, S. D., & Armaghani, T. (2023). A LBM entropy calculation caused by hybrid nanofluid mixed convection under the effect of changing the kind of magnetic field and other active/passive methods. *J. Magnet. Magnetic Mater.*, 566, 170277.
- [39] Ishak, A., NaZar, R., Bachok, N., & Pop, I. (2010). MHD mixed convection flow near the stagnation-point on a vertical permeable surface. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 389(1), 40-46.
- [40] Sarowar, M. T. (2021) Numerical analysis of a liquid metal cooled mini channel heat sink with performance of water-cooled single-layer and double-layer wavy microchannel heat sinks. *Numerical Heat Transfer, Part A: Applications*, 63(3), 201-225.
- [22] Zhang, R., Hodes, M., Lower, N., & Wilcox, R. (2015). Water-Based Microchannel and Galinstan-Based Minichannel Cooling Beyond 1 kW/cm<sup>2</sup>. *Heat Flux. IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology*, 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 Trans.*, 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. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 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 and Mass Trans.*, 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. Molecular 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. *Applied Thermal Engineering*, 171, 115060.
- [30] Nouri, R., Gorji-Bandpy, M., & Domiri Ganji, D. (2014). Numerical investigation of magnetic field effect on forced convection heat transfer of

- [41] Hunt, J. C. R., & Stewartson, K. (1965). Magnetohydrodynamic flow in rectangular ducts. II. J. fluid mech., 23(3), 563-581.
- five different ceramic substrates. Ceramics International, 47(1), 214-225
- Hunt, J. C. R. (1965). Magnetohydrodynamic flow in rectangular ducts. J. fluid mech., 21(4), 577-590.