



تحلیل عددی اثر میدان مغناطیسی متناوب بر رفتار هیدرودینامیکی و تولید آنتروپی جریان

فلز مایع گالینستن تحت شار حرارتی بالا

عباس ملائی^۱، علیرضا آقایی^{۲*}، حسین خراسانی‌زاده^۳

^۱دانشجوی دکترا، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه کاشان، کاشان، ایران.

^۲دانشیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه کاشان، کاشان، ایران.

^۳استاد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه کاشان، کاشان، ایران.

مقاله مستقل، تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۱/۳۰؛ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۷/۲۶؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۸/۲۱

چکیده

افزایش نرخ انتقال حرارت در سیستم‌های الکترونیکی نقش مهمی در بهبود عملکرد آنها دارد. در این پژوهش، از یک چاه حرارتی مجهز به میکروکانال فعال عمودی حاوی فلز مایع گالینستن استفاده شده و معادلات ناویراستوکس با روش حجم محدود مرتبه دوم بالادست گسسته‌سازی شده‌اند. گالینستن به دلیل رسانایی حرارتی و الکتریکی بالا، ویسکوزیته کم، چگالی زیاد، عدم سمیت و نقطه ذوب پایین انتخاب شده است. اعمال میدان مغناطیسی متناوب، به علت رسانایی الکتریکی بالای این فلز، موجب تغییر رفتار هیدرودینامیکی جریان، افزایش گرادیان سرعت در نزدیکی دیواره‌ها و در نتیجه بهبود عدد ناسلت و افزایش افت فشار شده است. بررسی اختلاف فاز میدان‌های مغناطیسی و الکتریکی نشان داد که با افزایش اختلاف فاز، افت فشار کاهش می‌یابد و نرخ کاهش آن از نرخ کاهش عدد ناسلت بیشتر است؛ موضوعی که بیانگر تأثیر مؤثر اختلاف فاز در کاهش مقاومت هیدرودینامیکی بدون افت محسوس انتقال حرارت است. همچنین افزایش اختلاف فاز موجب افزایش تولید آنتروپی حرارتی و مغناطیسی و کاهش آنتروپی اصطکاکی می‌شود. در عدد هارتمن ۱۲۹ و اختلاف فازهای ۱۰، ۲۰، ۳۰، ۴۰ و ۵۰ درجه، افت فشار به ترتیب ۲۸/۴، ۲/۱۷، ۴۲/۳۷، ۲/۶۳ و ۳/۹۲ درصد و عدد ناسلت به ترتیب ۱/۱۰، ۵۲/۰، ۱۷/۱، ۰/۶/۲ و ۱۹/۳ درصد نسبت به حالت بدون اختلاف فاز کاهش یافته است.

کلمات کلیدی: انتقال حرارت جابه‌جایی ترکیبی؛ فلز مایع گالینستن؛ چاه حرارتی؛ میدان مغناطیسی متناوب؛ تولید آنتروپی.

Numerical Analysis of the Effect of Alternating Magnetic Field on the Hydrodynamic Behavior and Entropy Generation of Galinstan Liquid Metal Flow Under High Heat Flux

Abbas Molaei¹, Alireza Aghaei^{2*}, Hossein Khorasanizadeh³

¹ PhD. Student, Mech. Eng, Kashan University, Kashan, Iran.

² Assoc. Prof., Mech. Eng, Kashan University, Kashan, Iran.

³ Prof., Mech. Eng, Kashan University, Kashan, Iran.

Abstract

Enhancing heat transfer in electronic systems is critical for improving performance. This study investigates a heat sink with a vertically active microchannel using Galinstan liquid metal. The Navier–Stokes equations are solved using the second-order upwind finite volume method. Galinstan is chosen for its high thermal and electrical conductivity, low viscosity, high density, non-toxicity, and low melting point. The application of an alternating magnetic field modifies the flow behavior, increasing the velocity gradient near the walls. This improves heat transfer, represented by a higher Nusselt number, but also increases pressure drop. Results show that increasing the phase difference between the magnetic and electric fields significantly reduces pressure drop, while causing only a slight reduction in the Nusselt number. Moreover, higher phase differences increase thermal and magnetic entropy generation and decrease frictional entropy generation.

At a Hartmann number of 129, increasing the phase difference from 10° to 50° reduces pressure drop by 4.28–92.3%, whereas the Nusselt number decreases by only 0.11–3.19% compared with the zero-phase-difference case, indicating improved flow conditions with minimal impact on heat transfer.

Keywords: Mixed convection heat transfer; liquid metal Galinstan; heat sink; alternating magnetic field; entropy generation

۱- مقدمه

۱-۱- سیستم خنک کاری

سیستم‌های خنک‌کننده نقش اساسی در صنایع مختلف از جمله نیروگاه‌های هسته‌ای، الکترونیک پیشرفته و فناوری‌های فضایی ایفا می‌کنند. عملکرد بهینه این سیستم‌ها مستقیماً بر بازده، پایداری و طول عمر تجهیزات تأثیرگذار است. در سال‌های اخیر، فلزات مایع به دلیل رسانایی حرارتی بالا، ظرفیت گرمایی مناسب و توانایی انتقال حرارت مؤثر، به‌عنوان سیال خنک‌کننده در کاربردهای پیشرفته مورد توجه قرار گرفته‌اند. موادی همچون گالینستن، سدیم و لیتیم به دلیل ویژگی‌های منحصر به فردشان در این حوزه اهمیت ویژه‌ای پیدا کرده‌اند.

از سوی دیگر، میدان مغناطیسی به‌عنوان ابزاری مؤثر در کنترل رفتار جریان و بهینه‌سازی انتقال حرارت در فلزات مایع شناخته می‌شود. اعمال این میدان نه تنها موجب تغییر در الگوی جریان سیال می‌شود، بلکه با مدیریت توزیع دما، عملکرد سامانه‌های خنک‌کننده را بهبود می‌بخشد. این فناوری در صنایعی که نیاز به دفع حرارت بالا دارند، از جمله سامانه‌های پیشرفته انرژی و تجهیزات الکترونیکی با توان بالا، تحولی قابل توجه ایجاد کرده است.

از زمانی که تاکرمن و پیس اولین تحقیق خود را در این زمینه انجام دادند [۱]، در این پژوهش، یک چاه حرارتی بسیار فشرده و خنک‌شونده با آب برای مدارهای مجتمع سیلیکونی طراحی و بررسی شده است. نتایج آنها نشان داد که ضریب انتقال حرارت جابجایی بین زیرلایه و سیال خنک‌کننده، عامل اصلی در محدودیت کاهش مقاومت حرارتی است. استفاده از کانال‌های میکروسکوپی با نسبت ابعاد بالا به کاهش مؤثر مقاومت حرارتی کمک می‌کند. نمونه طراحی شده توانست در چگالی گرمایی ۷۹۰ وات بر سانتی‌متر مربع، افزایش دمایی معادل ۷۱ درجه سانتی‌گراد نسبت به دمای ورودی آب ایجاد کند که با نتایج پیش‌بینی نظری مطابقت دارد. کو و موداوار [۲] یک میکروکانال مسی طراحی کرده و به بررسی تجربی و عددی ویژگی‌های افت فشار و انتقال حرارت در یک چاه حرارتی تک‌فاز میکروکانالی پرداختند. در بخش شبیه‌سازی عددی از الگوریتم سیمپل برای حل استفاده شد. نتایج آن‌ها نشان داد که اعداد رینولدز بالا می‌توانند در کاهش دمای

خروجی آب و دمای داخل چاه حرارتی مفید باشند، هرچند این امر با افزایش افت فشار همراه است.

گوناسگار و همکاران [۳] به بررسی ویژگی‌های جریان و انتقال حرارت همرفتی در میکروکانال‌های با هندسه‌های مستطیلی، دوزنقه‌ای و مثلثی پرداختند. در این تحقیق، برای تحلیل معادلات حاکم بر جریان آرام از روش حجم محدود به همراه الگوریتم سیمپل استفاده شد. نتایج آنها نشان داد که چاه‌های حرارتی با کمترین قطر هیدرولیکی به بهترین عملکرد در یکنواختی ضریب انتقال حرارت و دما دست یافته و از نظر افت فشار و ضریب اصطکاک نسبت به سایر هندسه‌ها عملکرد بهتری ارائه می‌دهند.

کومار و همکاران [۴] یک روش نوآورانه برای کاهش مشکل توزیع نامتعادل جریان در میکروکانال‌های موازی با استفاده از میکروکانال‌های با عرض متغیر پیشنهاد کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که این طراحی پیشنهادی می‌تواند توزیع جریان را تا ۹۳٪ درصد بهبود دهد و به خنک‌سازی یکنواخت و مؤثر در سراسر میکروکانال منجر شود. همچنین نوسان دما در سطح تماس سیال-جامد به میزان ۴/۳ درجه سانتی‌گراد کاهش یافته و دمای حداکثر و متوسط سطح میکروکانال‌ها به ترتیب ۲/۳ و ۱/۱ درجه سانتی‌گراد کاهش می‌یابد.

لی و همکاران [۵] در مطالعه‌ای مقایسه‌ای، پنج طرح مختلف چاه حرارتی را از نظر ویژگی‌های جریان و عملکرد حرارتی ارزیابی کردند. این طرح‌ها شامل دنده‌های متخلخل تک لایه، دنده‌های جامد تک لایه، دنده‌های جامد دو لایه، دنده‌های متخلخل دو لایه و ترکیب دو لایه می‌باشند. یافته‌های آن‌ها نشان داد که طراحی دو لایه، به‌ویژه در چاه‌های حرارتی میکروکانالی، قادر است ترکیبی از افت فشار پایین و کارایی حرارتی بالا را به‌طور همزمان فراهم کند، که آن را به گزینه‌ای مناسب برای بهینه‌سازی عملکرد این سیستم‌ها تبدیل می‌کند. وانگ و همکاران [۶] یک طراحی جدید چاه حرارتی میکروکانالی با موج دولایه و دنده‌های متخلخل معرفی کردند. آن‌ها نشان دادند که استفاده از دنده‌های متخلخل به‌طور قابل‌ملاحظه‌ای عملکرد سیستم را در شرایط پمپاژ با توان پایین بهبود می‌بخشد. در این مطالعه، چاه حرارتی دولایه بهترین عملکرد خنک‌کنندگی را در میان چهار نوع چاه حرارتی مختلف از خود نشان داد، به‌طوری‌که در بازه توان پمپاژ بین ۰/۰۵ تا ۰/۲ وات، این چاه کمترین مقاومت حرارتی را داشت.

نتیجه، ضریب انتقال حرارت تا ۱۸ درصد افزایش یافت. علاوه بر این، استفاده از نانوسیال موجب کاهش قابل توجه دمای پایه چاه حرارتی (حدود ۲/۷ درجه سانتی‌گراد) شد و در کسر حجمی ۰/۲۵ درصد و عدد رینولدز بالاتر، ۱۵/۷۲ درصد کاهش در مقاومت حرارتی نسبت به آب مقطر مشاهده گردید.

هو و همکاران [۱۱] در یک مطالعه تجربی، انتقال حرارت جابه‌جایی اجباری نانوسیال آب-اکسید آلومینیوم را در یک چاه حرارتی میکروکانالی مورد بررسی قرار دادند. آزمایش‌های آن‌ها در بازه اعداد رینولدز ۲۲۶ تا ۱۶۷۶ انجام شد. در این پژوهش، از ۲۵ کانال مستطیلی موازی با ابعاد ۵۰ میلی‌متر طول، ۸۰۰ میکرومتر ارتفاع و ۲۸۳ میکرومتر عرض به‌عنوان چاه حرارتی میکروکانالی استفاده گردید. نتایج تحقیق آنان نشان داد که به‌کارگیری نانوسیال موجب بهبود قابل توجهی در میانگین انتقال حرارت چاه حرارتی می‌شود.

تیموری و همکاران [۱۲] جابه‌جایی ترکیبی را در یک حفره مربعی بسته مورد بررسی قرار دادند. این محفظه چهارضلعی با اضلاع برابر، به‌صورت کج قرار گرفته است، به‌طوری که دو ضلع بالا و پایین عایق، ضلع چپ گرم و ضلع راست سرد در نظر گرفته شد. نتایج آن‌ها نشان داد که در شرایط عدد رینولدز و ریچاردسون ثابت، افزودن نانوذرات به سیال پایه می‌تواند عدد ناسلت را تا ۲۰ درصد افزایش دهد. همچنین، با افزایش زاویه کجی حفره از صفر به ۹۰ درجه، عدد ناسلت حدود ۳۰ درصد بیشتر شده است.

خنک‌کننده فلز مایع دارای مزایای قابل توجهی نسبت به مایعات خنک‌کننده معمولی است. فلزات مایع مانند سدیم، آلپاژ سدیم-پتاسیم و لیتیوم به‌مدت طولانی به‌عنوان خنک‌کننده در مهندسی هسته‌ای استفاده شده‌اند. در حال حاضر، این نوع خنک‌کننده به‌طور گسترده در نیروگاه‌های هسته‌ای به‌کار می‌رود و فلزات مختلفی برای این منظور آزمایش شده‌اند. علاوه بر این، خنک‌کننده فلز مایع در سایر کاربردها از جمله شتاب‌دهنده‌ها، تولید برق خورشیدی و لیزرها نیز مورد استفاده قرار می‌گیرد.

۱-۲- فلز مایع و میدان مغناطیسی

در حال حاضر، مطالعات گسترده‌ای بر روی چاه‌های گرمایی میکروکانالی انجام می‌شود، اما تحقیقات مربوط به چاه‌های حرارتی میکروکانالی که از فلز مایع به‌عنوان سیال کار استفاده

علاوه بر این، تحلیل‌های پارامتری انجام شده آن‌ها نشان داد که برای رسیدن به کمترین مقاومت حرارتی، یک دامنه و طول موج بهینه وجود دارد. به‌طور کلی، مقاومت حرارتی با افزایش نفوذپذیری متخلخل یا کاهش ضریب درگ به‌طور یکنواخت کاهش پیدا می‌کند.

کشاوری و همکاران [۷] در راستای بهبود انتقال حرارت در یک میکروکانال مستطیلی، از مجموعه‌ای از مولدهای گردابه‌ای بهره گرفته‌اند. این مولدها شامل پین‌های مکعبی هستند که به تیغه‌های انعطاف‌پذیری مجهز شده‌اند و بر روی آن‌ها وصله‌های پیزوالکتریک تعبیه شده است. یافته‌های پژوهش آن‌ها نشان می‌دهد که استفاده از این مولدهای پیزوالکتریک تأثیر چشمگیری بر افزایش نرخ انتقال حرارت در میکروکانال دارد.

چین و هوانگ [۸] به‌صورت عددی و تجربی عملکرد حرارتی جریان نانوسیال‌های مختلف را در میکروکانال‌هایی با دو هندسه متفاوت مورد بررسی قرار دادند. در شبیه‌سازی‌های عددی، نانوسیال به‌عنوان یک سیال تک‌فاز در نظر گرفته شده است. نتایج تحقیق آن‌ها نشان داد که استفاده از نانوسیال‌ها به‌عنوان سیال خنک‌کننده موجب بهبود عملکرد هر دو هندسه شده است. علاوه بر این، به دلیل اندازه کوچک ذرات و کسر حجمی پایین نانوذرات در سیال پایه، افزایش قابل توجهی در افت فشار مشاهده نشده است.

درزی و همکاران [۹] با استفاده از روش دوفازی، میزان انتقال حرارت آشفته را در جریان نانوسیال آب-آلومینا و همچنین آب خالص درون یک لوله راه‌راه گرم‌شده مورد بررسی قرار دادند. این مطالعه به‌صورت عددی، با در نظر گرفتن نسبت‌های مختلف موج و ارتفاع راه‌راه و در بازه‌ای از اعداد رینولدز بین ۱۰،۰۰۰ تا ۴۰،۰۰۰ انجام شده است. نتایج حاصل نشان داد که استفاده از نانوسیال آب-آلومینا با کسر حجمی ۲ و ۴ درصد، به ترتیب موجب افزایش ۲۱ و ۵۸ درصدی انتقال حرارت نسبت به سیال پایه (آب) می‌گردد.

سوهل و همکاران [۱۰] در یک مطالعه تجربی، عملکرد حرارتی یک چاه حرارتی میکروکانالی را برای خنک‌سازی تجهیزات الکترونیکی بررسی کردند. در این پژوهش، به‌جای آب خالص از نانوسیال به‌عنوان سیال خنک‌کننده استفاده شد. یافته‌های تجربی آن‌ها نشان داد که جایگزینی آب مقطر با نانوسیال منجر به بهبود چشمگیر عملکرد حرارتی می‌شود. در

می‌کنند، هنوز نادر است. این نوع چاه‌های حرارتی ظرفیت بالایی برای بهبود عملکرد حرارتی دارند، اما به دلیل ویژگی‌های خاص فلزات مایع مانند هدایت حرارتی بالا و رفتار متفاوت در مقایسه با سیالات معمولی، تحقیق در این زمینه هنوز در مراحل اولیه خود قرار دارد.

هودس و همکاران [۱۳] هندسه بهینه را برای چاه‌های حرارتی مبتنی بر آب و گالینستن از نظر کمینه‌سازی 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 نسبت به آب کاهش دهد. این یافته‌ها نشان‌دهنده ظرفیت بالای گالینستن برای استفاده به عنوان سیال عامل در چاه‌های حرارتی میکروکانالی است، چرا که این کاهش قابل توجه در مقاومت حرارتی می‌تواند منجر به بهبود عملکرد حرارتی سیستم‌های خنک‌کننده شود.

ویو و همکاران [۱۴] با استفاده از یک روش عددی، عملکرد جریان و انتقال حرارت چاه‌های گرمایی مبتنی بر فلز مایع را با انواع مختلف سیال کاری، شکل‌های مقطع میکروکانال متنوع و سرعت‌های ورودی مختلف مورد بررسی قرار دادند. با حل مدل انتقال حرارت ثابت و سه‌بعدی، آن‌ها 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 (مستطیل، دایره، دوزنقه و متوازی‌اضلاع)، استفاده از مقطع دایره‌ای ضریب انتقال حرارت متوسط بالاتری را نشان داد، در حالی که مقطع متوازی‌اضلاع کمترین افت فشار را داشت. با در نظر گرفتن عملکردهای جریان و انتقال حرارت به‌طور جامع، سطح مقطع دایره‌ای به‌عنوان انتخاب بهینه برای شکل مقطع میکروکانال شناسایی شد. علاوه بر این، سرعت ورودی تأثیر زیادی بر عملکرد جریان و انتقال حرارت داشت. از ۱ متر بر ثانیه به ۹ متر بر ثانیه، افت فشار تا ۶۵ برابر افزایش یافت و ضریب انتقال حرارت حدود ۷۴/۳۵ درصد افزایش یافت.

وانگ و همکاران [۱۵] انتقال حرارت جابه‌جایی طبیعی خارجی فلز مایع تحت تأثیر میدان مغناطیسی را مورد مطالعه قرار دادند. اختلاف دمایی زیادی که در فلز مایع با دمایی بالا ایجاد می‌شود، منجر به جابه‌جایی طبیعی خارجی در دیواره

اول می‌گردد. برای بررسی انتقال حرارت جابه‌جایی طبیعی خارجی فلز مایع روی صفحه عمودی تحت میدان مغناطیسی افقی مختلف که عمود بر گرادیان دما است، یک شبیه‌سازی عددی انجام شد. صفحه گرم شده در یک طرف حفره قرار می‌گیرد و دو دیوار افقی مجاور آن عایق حرارتی هستند، در حالی که دیوارهای باقی‌مانده دارای دمای ثابت می‌باشند. تحت تأثیر میدان مغناطیسی، ضخامت لایه مرزی سرعت ابتدا افزایش می‌یابد و سپس کاهش می‌یابد، در حالی که ضخامت لایه مرزی حرارتی به‌طور کلی افزایش می‌یابد.

حاج‌محمدی و همکاران [۱۶] یک مطالعه عددی برای بررسی اثرات یک میدان مغناطیسی یکنواخت و غیر یکنواخت خارجی بر هندسه بهینه‌شده و عملکرد حرارتی یک چاه حرارتی میکروکانال انجام دادند. در این مطالعه، از نانوذرات اکسید آهن معلق در آب به‌عنوان سیال خنک‌کننده استفاده شد. آن‌ها اثرات میدان مغناطیسی را با اعمال برنامه ++C در نرم‌افزار انسیس فلوئنت ۱۴ اضافه کردند. فرآیند بهینه‌سازی برای سه حالت مختلف استفاده شد: ۱- در غیاب میدان مغناطیسی ۲- در حضور یک میدان مغناطیسی یکنواخت ۳- در حضور یک میدان مغناطیسی غیر یکنواخت تولید شده توسط یک سیم حامل جریان. نتایج آن‌ها نشان داد که برای آزمایش‌های هندسی خارج از طراحی (غیر بهینه)، اعمال میدان مغناطیسی یکنواخت موجب کاهش ۲۱ درصدی مقاومت حرارتی شده و عملکرد چاه حرارتی را بهبود می‌بخشد. آباده و همکاران [۱۷] در یک مطالعه تجربی، تأثیر میدان‌های مغناطیسی خارجی بر ضریب انتقال حرارت و افت فشار در جریان آرام فروسیال آب-اکسید آهن را در یک لوله دایره‌ای ثابت بررسی کردند. نتایج آنها نشان داد که با استفاده از میدان مغناطیسی جایگزین با فرکانس‌های ۱۰ و ۱۰۰ هرتز، عدد ناسلت به ترتیب ۱۱/۸۵ و ۱۴/۸ درصد افزایش می‌یابد. در حالی که افزایش فرکانس میدان مغناطیسی فراتر از ۱۰۰ هرتز (تا ۱۰۰۰ هرتز) تأثیری بر بهبود عملکرد نداشت.

نوری و همکاران [۱۸] در تحقیقی به بررسی انتقال حرارت جابه‌جایی در یک کانال سینوسی‌شکل که حاوی نانوسیال تحت تأثیر میدان مغناطیسی است پرداختند. در این مطالعه، میدان مغناطیسی عمود بر کانال اعمال شد و آب به عنوان سیال پایه با نانوذره مس ترکیب گردید. نتایج نشان داد که با افزایش تمامی پارامترهای مورد بررسی، عدد ناسلت افزایش

می‌یابد.

کارگر شریف‌آبادی [۱۹] در یک تحقیق عددی به بررسی انتقال حرارت جابه‌جایی اجباری در فروسیال داخل لوله‌ای مسی پرداخته بود که دارای قسمت‌های عایق الکترومغناطیسی بوده و تحت تاثیر میدان مغناطیسی متناوب قرار دارد. هدف اصلی این مطالعه، افزایش سرعت جریان در لایه مرزی از طریق تاثیر میدان مغناطیسی بر نانوذرات جهت تقویت انتقال حرارت بود. نتایج آنها نشان داد که افزایش فرکانس میدان مغناطیسی متناوب و کسر حجمی نانوذرات، موجب بهبود انتقال حرارت در محدوده مورد نظر گردیده است. همچنین، اثر میدان مغناطیسی بیشتر در اعداد رینولدز پایین و فرکانس‌های بالاتر مشاهده شد.

شیخ‌زاده و همکاران [۲۰] به بررسی تاثیر اعمال یک میدان مغناطیسی ثابت بر جریان و میدان دما در جابه‌جایی آزاد متلاطم در یک محفظه دوبعدی حاوی فلز مایع با مقادیر مختلف عدد پرانتل (۰/۰۱۱، ۰/۰۲۲ و ۰/۰۵۴) پرداختند. در این مطالعه، تاثیر پارامترهای بدون بعد مانند عدد رایلی، عدد پرانتل و عدد هارتمن بر میدان جریان، میدان دما و ضریب انتقال حرارت بررسی شد. نتایج آنان نشان داد که با افزایش عدد رایلی (افزایش نیروهای شناوری)، خطوط جریان به دیواره‌ها نزدیک‌تر می‌شوند و لایه مرزی هیدرودینامیکی در نزدیکی دیواره‌ها متراکم می‌گردد. همچنین، با افزایش عدد هارتمن، لایه‌های حرارتی کاهش یافته و تضعیف می‌شوند و انتقال حرارت بین دیواره‌های گرم و سرد بیشتر توسط هدایت حرارتی صورت می‌گیرد. در شرایط ثابت عدد رایلی و پرانتل، عدد ناسلت متوسط در دیواره گرم با افزایش عدد هارتمن کاهش می‌یابد.

وانگ و همکاران [۲۱] به بررسی انتقال حرارت جابه‌جایی ترکیبی فلز مایع تحت تاثیر میدان مغناطیسی پرداختند. در این مطالعه، یک میکروکانال عمودی با سطحی گرم تحت اعمال میدان مغناطیسی ثابت مورد بررسی قرار گرفت. شدت میدان مغناطیسی از ۰ تا ۰/۱ تسلا افزایش داده شد. نتایج آنها نشان داد که اثر اعمال میدان مغناطیسی با افزایش عدد هارتمن، علاوه بر افزایش ۳۲ درصدی ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی، منجر به افزایش شدید افت فشار و ضریب اصطکاک در چاه حرارتی شده است.

سینگ و گوهِیل [۲۲] در مطالعه‌ای عددی، به بررسی جریان فلز مایع و انتقال حرارت در یک محفظه چند مرحله‌ای در حضور میدان مغناطیسی پرداختند. نتایج به‌دست آمده نشان داد که میدان مغناطیسی باعث کاهش شدت گردابه‌ها در جریان می‌شود و بدین ترتیب فلز مایع قادر است تا تمام دامنه را پوشش دهد. این امر در نهایت منجر به توزیع یکنواخت دما در شرایطی با عدد هارتمن بالاتر می‌شود.

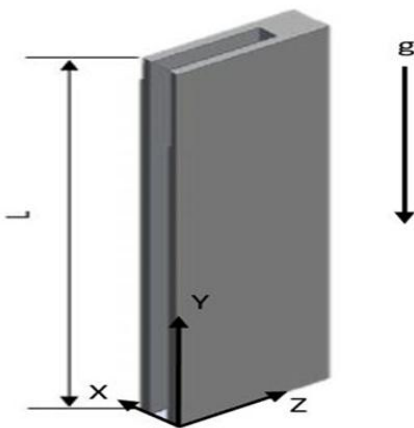
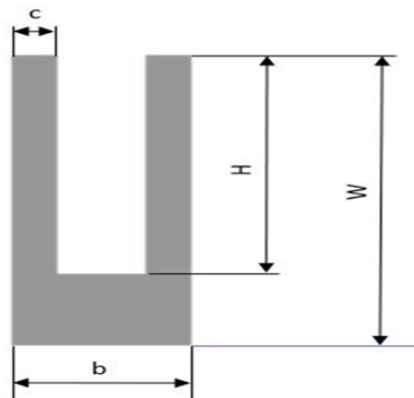
ایشاک و همکاران [۲۳] در مطالعه‌ای به بررسی لایه مرزی جریان جابه‌جایی ترکیبی سیال رسانا روی سطح نفوذپذیر در حضور میدان مغناطیسی پرداختند. آن‌ها ویژگی‌های جریان و انتقال حرارت را برای مقادیر مختلف پارامترهای مؤثر تجزیه و تحلیل کرده و اثرات مکش و تزریق بر تنش برشی سطح و نرخ انتقال حرارت را مورد بررسی قرار دادند. در این تحقیق، هم جریان کمکی و هم جریان مخالف در نظر گرفته شدند. نتایج نشان داد که برای هر دو نوع جریان، راه‌حل‌های دوگانه وجود دارد و با اعمال مکش، محدوده پارامترهای جابه‌جایی ترکیبی که حل برای آن‌ها امکان‌پذیر است، افزایش می‌یابد.

سلیمان‌پور و همکاران [۲۴] به تحقیق تاثیر میدان مغناطیسی بر ویژگی‌های انتقال حرارت و جریان در نانو سیالات پرداختند. در این مطالعه، آن‌ها اثرات میدان مغناطیسی بر ویژگی‌های جریان و ضریب انتقال حرارت نانو سیالات مختلف از جمله آب و روغن را بررسی کردند. نتایج آنان نشان داد که با افزایش شدت میدان مغناطیسی، تغییرات قابل‌توجهی در دما و سرعت جریان نسبت به حالت بدون میدان مغناطیسی مشاهده می‌شود. این تحقیق تحلیل‌های مختلفی از تغییرات دما و جریان تحت میدان مغناطیسی را ارائه کرد.

جافری و همکاران [۲۵] به تحقیق تاثیر میدان مغناطیسی بر انتقال حرارت در فروسیالات تحت شرایط جریان آرام پرداختند. آن‌ها نشان دادند که میدان مغناطیسی می‌تواند ویژگی‌های انتقال حرارت را تغییر دهد، به‌ویژه در لایه‌های مرزی سیال، و بر نرخ انتقال حرارت تاثیر گذارد. این تحقیق با استفاده از شبیه‌سازی عددی و تجربی بررسی‌های دقیقی از تغییرات دما و رفتار فروسیالات در میدان مغناطیسی ارائه داده است و در نهایت، پیشنهاداتی برای طراحی سیستم‌های خنک‌کننده با استفاده از میدان مغناطیسی مطرح کرده است.

۱۶/۵	W/(m. K)	رسانایی گرمایی
۳۳۱۰۰۰۰	s/m	رسانایی الکتریکی
۰/۰۰۰۱۲۴	۱/K	ضریب انبساط حرارتی

شکل ۱ از یک چاه حرارتی با تک میکروکانال مشابه کار سارووار و همکاران [۲۶] استفاده شده است. پارامترهای هندسی زیر در مطالعه مقایسه بین مواد بستر و خنک کننده استفاده شد: 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 $L \times W=4\text{ cm} \times 7\text{ mm}$.



شکل ۱- هندسه سه بعدی میکروکانال

۳-۱- معرفی پژوهش و نوآوری

در این پژوهش، تحلیل عددی اثر میدان مغناطیسی متناوب بر رفتار هیدرودینامیکی و تولید آنتروپی جریان فلز مایع گالینستن تحت شار حرارتی بالا، در چارچوب انتقال حرارت جابه جایی ترکیبی انجام شده است.

نوع آوری اول بررسی اثر میدان مغناطیسی متناوب بر بهبود نرخ انتقال حرارت و کاهش تولید آنتروپی ناشی از انتقال حرارت، اصطکاک و میدان مغناطیسی در جریان سیال. این بررسی در چارچوب انتقال حرارت جابه جایی ترکیبی (ترکیب جابه جایی طبیعی و اجباری) انجام شده و نشان می دهد که اعمال میدان مغناطیسی متناوب می تواند موجب بهبود عملکرد حرارتی سیستم شود. نوآوری دوم، بررسی اثر اختلاف فاز میدان مغناطیسی و میدان الکتریکی از صفر تا ۵۰ درجه بر کاهش افت فشار جریان سیال می باشد. بنابراین در این مقاله راهکار افزایش نرخ انتقال حرارت در اثر اعمال میدان مغناطیسی متناوب ارائه شده است و سپس با بررسی اختلاف فاز، افت فشار ناشی از میدان مغناطیسی را به حداقل خود رسانیده است.

۲- خواص ترموفیزیکی سیال، هندسه مسئله و معادلات حاکم آن

انتقال حرارت جابه جایی میان دیواره های چاه حرارتی و سیال عامل انجام می گردد. با توجه به تاثیر میدان مغناطیسی، فلز مایع گالینستن که ویژگی هایی همچون رسانایی حرارتی، رسانایی الکتریکی بالا، ویسکوزیته کم، چگالی بالا، عدم سمیت و نقطه ذوب پایین دارد، به عنوان سیال عامل انتخاب گردیده است. خواص ترموفیزیکی این فلز در جدول ۱ آورده شده است.

جدول ۱- خواص ترموفیزیکی فلز مایع گالینستن در دمای ۲۹۰ کلوین [۲۱]

خواص	واحدها	Ga68%In20% Sn12% (Galinstan)
نقطه ذوب	°C	۱۰/۵
چگالی	Kg/m ³	۶۳۶۳/۵
گرمای ویژه	J/(Kg. K)	۳۶۵/۸
ویسکوزیته	Pa. s	۰/۰۰۲۲

$$S = \frac{K_f}{T_{f,avg}^2} \left[\left(\frac{\partial T_f}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial T_f}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial T_f}{\partial z} \right)^2 \right] + \frac{\mu_f}{T_{f,avg}^2} \left[2 \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \right)^2 \right] + \frac{\sigma_f B_0^2}{T_{f,avg}} (u^2 + v^2 + w^2) \quad (۶)$$

آنترپوی تولیدی S شامل تولید آنترپوی حرارتی سیال، اصطکاکی و مغناطیسی می باشد.

α انتشار حرارتی سیال است و به صورت زیر تعریف می شود:

$$\alpha = \frac{K}{\rho c_p} \quad (۷)$$

C_p ظرفیت گرمایی ویژه است و K رسانایی گرمایی سیال می باشد.

یکی از اعداد بی بُعد مهم Ha عدد هارتمن است.

$$Ha = B_0 L \sqrt{\frac{\sigma}{\mu}} \quad (۸)$$

برای انتقال حرارت جابه جایی ترکیبی عدد ناسلت تابعی از عدد رینولدز و عدد پرانتل و عدد گراشهف می باشد.

$$Nu = Nu(Re, Gr, Pr) \quad (۹)$$

به ترتیب اعداد گراشهف، عدد ریچاردسون، عدد پرانتل، ضریب انتقال حرارت جابه جایی، مقدار انتقال حرارت از کف چاه حرارتی و عدد ناسلت میانگین آورده شده است.

عدد گراشهف (Grashof number) یک عدد بی بعد است که نسبت نیروی شناوری به نیروی لزجت را در جریان های حرارتی طبیعی (Natural Convection) بیان می کند.

$$Gr = \frac{g \beta q'' D^4}{K_f \nu^2} \quad (۱۰)$$

عدد ریچاردسون نسبت اثر جابه جایی طبیعی به جابه جایی اجباری را در یک جریان ترکیبی بیان می کند.

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

۱- جریان سیال آرام - مقدار عدد رینولدز ۹۶

۲- سیال تراکم ناپذیر نیوتنی

۳- نیروی حجمی لورنتز و گرانش

۴- از اثرات اتلاف ویسکوز و انتقال حرارت تشعشی و گرمای ژول نیز صرف نظر شده است.

۵- باتوجه به حضور میدان مغناطیسی متناوب، جریان غیر دائم در نظر گرفته شده است.

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

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

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

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

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

در معادلات فوق، u, v, w مولفه های سرعت در جهات x, y و z هستند. ρ چگالی سیال و β ضریب انبساط حجمی می باشد. T و P به ترتیب فشار و دما هستند.

$$\vec{J} = \sigma(\vec{E} + \vec{V} \times \vec{B}) \quad (17)$$

معادله (۱۸) بیانگر رابطه‌ای است که در آن میدان الکتریکی E به‌طور متناوب با زمان تغییر می‌کند، که ویژگی‌های دامنه، فرکانس زاویه‌ای و اختلاف فاز را در بر می‌گیرد.

$$\vec{E} = E \sin(\omega t + \phi) \quad (18)$$

در معادله (۱۹)، B نمایانگر شدت میدان مغناطیسی، ω فرکانس زاویه‌ای و t زمان است.

$$\vec{B} = B \sin(\omega t) \quad (19)$$

معادله (۲۰)، نیروی لورنتز در یک میدان مغناطیسی متناوب است که به‌صورت میانگین در یک دوره زمانی محاسبه می‌شود.

$$F_L = \frac{\int_0^{2\pi} \vec{J} \times \vec{B} d\omega t}{2\pi} \quad (20)$$

۲- استقلال حل از شبکه و اعتبارسنجی

بر اساس خطای محاسبه‌شده در جدول ۲، نتایج شبیه‌سازی از دقت و اعتبار مناسبی برخوردار هستند.

برای اطمینان از صحت نتایج این پژوهش، یک شبیه‌سازی عددی برای فلز مایع تحت تأثیر میدان مغناطیسی با شدت ۰/۱ و ۰/۰۶ تسلا انجام شد و نتایج آن با داده‌های ارائه‌شده توسط وانگ و همکاران [۲۱] مقایسه گردید. این بررسی در یک میکروکانال با مقطع مستطیلی و شرط مرزی دمای ثابت همراه با دیواره‌های رسانای الکتریکی صورت گرفته است. همان‌طور که در شکل ۲ مشاهده می‌شود، اعمال میدان مغناطیسی باعث افزایش سرعت جریان در نواحی نزدیک به دیواره‌ها و کاهش آن در مرکز میکروکانال شده که نشان‌دهنده بروز جریان هانت [۲۷، ۲۸] است. علاوه بر این، شکل ۳ توزیع دمای حاصل از شبیه‌سازی را در مقایسه با نتایج وانگ و همکاران نمایش می‌دهد.

به منظور بررسی استقلال حل از شبکه، مقادیر بیشینه سرعت و ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی برای شبکه‌هایی با تعداد المان‌های مختلف تحلیل شده و شبکه بهینه جهت مطالعه دقیق‌تر میدان جریان و انتقال حرارت انتخاب گردید. در شکل ۴، نحوه شبکه‌بندی هندسه نشان داده شده است. برای افزایش دقت شبیه‌سازی، شبکه در ناحیه سیال با جزئیات

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

عدد پرانتل نسبت انتشار مومنوم به انتشار حرارت را در یک سیال بیان می‌کند و نقش مهمی در تحلیل ساختار لایه‌های مرزی حرارتی و سرعت دارد.

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

ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی h میزان انتقال حرارت بین یک سطح و سیال اطراف آن را در اثر جابه‌جایی بیان می‌کند و به ویژگی‌های سیال و شرایط جریان بستگی دارد.

$$h = \frac{Q}{A_w(T_w - T_m)} \quad (13)$$

$$Q = q A_b \quad (14)$$

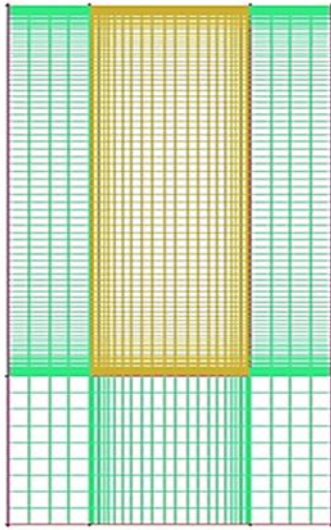
رابطه ۱۵ میانگین‌گیری عدد ناسلت محلی را در امتداد سطح نشان می‌دهد و برای تحلیل کلی نرخ انتقال حرارت از سطح به سیال یا بالعکس، مورد استفاده قرار می‌گیرد.

$$Nu = \frac{1}{L} \int_0^L Nu_x dx \quad (15)$$

ضریب ارزیابی عملکرد (PEC) معیاری بی‌بعد است که کارایی انتقال حرارت را نسبت به افت فشار ارزیابی می‌کند. این شاخص با در نظر گرفتن نسبت عدد ناسلت و نسبت ضریب اصطکاک نسبت به شرایط مرجع، میزان بهبود عملکرد حرارتی را در کنار هزینه انرژی صرف‌شده برای غلبه بر افت فشار می‌سنجد. افزایش مقدار PEC نشان‌دهنده افزایش نرخ انتقال حرارت با حداقل افت فشار و بنابراین بهبود کلی کارایی سیستم است.

$$PEC = \frac{\left(\frac{Nu}{Nu_0}\right)}{\left(\frac{\Delta P}{\Delta P_0}\right)^{\frac{1}{3}}} \quad (16)$$

معادله (۱۷) نشان‌دهنده قانون اهم تعمیم‌یافته در حضور میدان مغناطیسی است که در آن چگالی جریان الکتریکی، σ رسانایی الکتریکی، E میدان الکتریکی، V بردار سرعت و B میدان مغناطیسی را توصیف می‌کند.



شکل ۴- شبکه بندی هندسه

۳- تشریح شرایط مرزی و نرم افزار

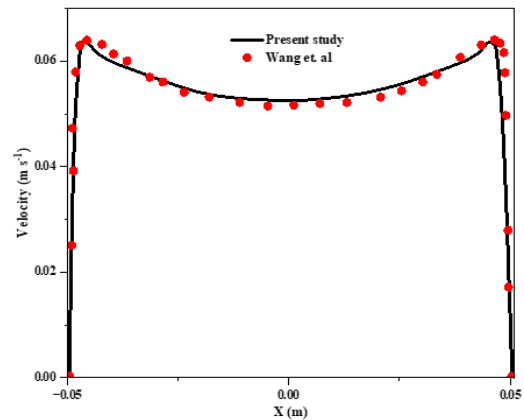
در این مطالعه، شبیه سازی عددی جریان سیال در یک چاه حرارتی تحت تأثیر میدان مغناطیسی انجام شده است. شرایط مرزی مسئله به گونه ای در نظر گرفته شده اند که کف چاه حرارتی ($-Z$) دارای شار حرارتی ثابت است. دیواره های اطراف چاه به صورت عایق حرارتی مدل سازی شده اند تا از تبادل حرارت با محیط اطراف جلوگیری شود. سیال ورودی با دمای و سرعت مشخص وارد میکروکانال شده و در طول مسیر تحت تأثیر شار حرارتی و میدان مغناطیسی قرار می گیرد. برای خروجی، شرط مرزی فشار خروجی اعمال شده است تا جریان به صورت طبیعی از کانال خارج شود. علاوه بر این، تحت تأثیر میدان مغناطیسی، تمامی دیواره های چاه حرارتی رسانای الکتریکی فرض شده اند تا امکان بررسی اندرکنش بین سیال و میدان مغناطیسی فراهم شود.

شبیه سازی به صورت گذرا انجام شده است و گام زمانی بر اساس تحلیل حساسیت و رعایت شرط پایداری عدد CFL انتخاب گردید. برای اطمینان از صحت و دقت نتایج، شبیه سازی تا مدت زمان کافی ادامه یافت تا تغییرات پارامترهای کلیدی مانند سرعت، فشار و دما به حداقل رسیده و به یک الگوی پایدار تناوبی قابل اطمینان دست یابد. این نشان دهنده رسیدن به شرایطی است که پاسخ های سیستم به صورت دوره ای تکرار شده و نتایج حاصل از حل عددی، پایدار

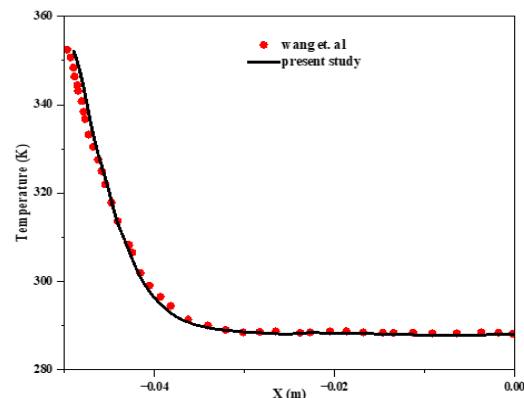
بیشتری در نظر گرفته شده است. مقایسه نتایج در جدول ۳ ارائه شده است که شامل شبکه بندی هایی با $440,000$ ، $912,000$ و $2,290,000$ المان و شرایطی شامل سرعت ورودی 0.4 متر بر ثانیه و شار حرارتی 10 وات بر سانتی متر مربع است. بر اساس این بررسی ها، شبکه با $912,000$ المان به عنوان گزینه مناسب انتخاب شده است.

جدول ۲- نتایج استقلال حل از شبکه

تعداد نقاط	سرعت ماکزیمم	$h(W/m^2 k)$	اختلاف نسبی
440000	0.609	56134	1
912000	0.626	56412	0.7/5
2290000	0.629	56465	0.7/0.9



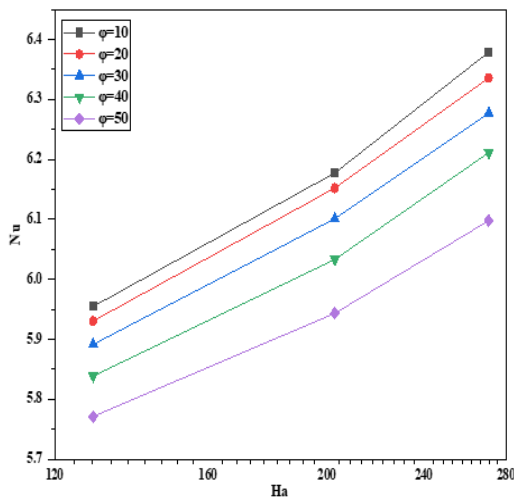
شکل ۲- نمودار تغییرات سرعت در مقطع $y=0.01$ م برای اعتبارسنجی با مطالعه وانگ و همکاران [۲۱]



شکل ۳- نمودار تغییرات دما در مقطع $y=0.01$ م جهت اعتبارسنجی با مطالعه وانگ و همکاران [۲۱]

عملکرد سیستم‌های حرارتی و کاهش مقاومت هیدرودینامیکی شود.

شکل ۵ تغییرات عدد ناسلت (Nu) را بر حسب عدد هارتمن (Ha) برای اختلاف فازهای مختلف میدان مغناطیسی نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، با افزایش عدد هارتمن در تمامی اختلاف فازها، عدد ناسلت افزایش یافته است. این روند بیانگر آن است که افزایش شدت میدان مغناطیسی موجب بهبود انتقال حرارت می‌شود. از سوی دیگر، با افزایش اختلاف فاز، مقدار عدد ناسلت کاهش یافته است، اما نرخ کاهش آن بسیار محدود و تدریجی است. این موضوع نشان می‌دهد که اگرچه افزایش اختلاف فاز بر کاهش نرخ انتقال حرارت تأثیر دارد، اما شدت این تأثیر چندان زیاد نیست و همچنان روند کلی انتقال حرارت مطلوب باقی می‌ماند.



شکل ۵- تغییرات عدد ناسلت (Nu) بر حسب عدد هارتمن (Ha) برای مقادیر مختلف اختلاف فاز (ϕ)

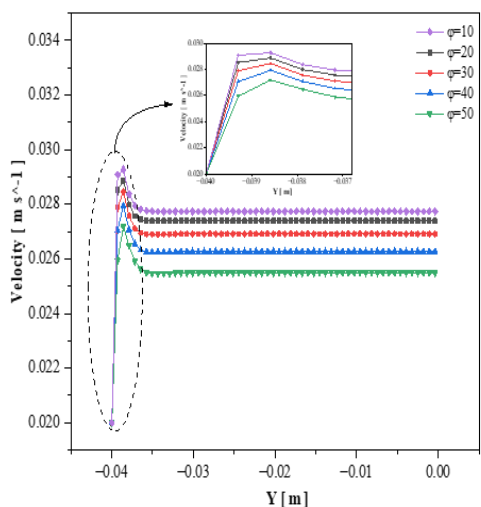
شکل ۶ نشان می‌دهد که با اعمال میدان مغناطیسی و افزایش اختلاف فاز، سرعت جریان در مجاورت دیواره‌ها کاهش یافته و در نتیجه، گرادیان سرعت نیز کاهش یافته است. این تغییر به دلیل تأثیر نیروی لورنتس است که با افزایش اختلاف فاز، حرکت سیال را در نزدیکی دیواره‌ها بیشتر محدود کرده و تغییرات سرعت را در این نواحی کاهش می‌دهد. کاهش گرادیان سرعت در نزدیکی دیواره‌ها نشان‌دهنده تأثیر بازدارنده

و معتبر تلقی می‌شوند. چنین رویکردی مطابق با استانداردهای روز حوزه دینامیک سیالات محاسباتی و انتقال حرارت گذرا است و از لحاظ عددی، اطمینان از همگرایی زمانی را فراهم می‌آورد. برای حل این مسئله، از نرم‌افزار انسیس فلونت استفاده شده است. با توجه به تراکم‌ناپذیر بودن جریان، حل معادلات حاکم به روش مبتنی بر فشار انجام شده و از الگوریتم SIMPLEC برای کوپل‌سازی معادلات استفاده شده است. همچنین، معادلات پیوستگی، مومنتوم و انرژی به روش حجم محدود گسسته‌سازی شده‌اند و برای افزایش دقت محاسبات، از گسسته‌سازی مرتبه دوم استفاده شده است تا پایداری و دقت نتایج تضمین شود.

۴- بررسی میدان مغناطیسی متناوب بر جریان

در حالت انتقال حرارت جابه‌جایی ترکیبی، هر دو مکانیزم جابه‌جایی اجباری و آزاد به‌طور همزمان بر فرآیند انتقال حرارت تأثیر می‌گذارند. این شرایط معمولاً زمانی رخ می‌دهد که نیروی شناوری ناشی از اختلاف دما و نیروی برشی ناشی از جریان خارجی به یک میزان مؤثر باشند. معیار تعیین‌کننده این رژیم، عدد ریچاردسون (Ri) است که نسبت نیروی شناوری به نیروی برشی را نشان می‌دهد. هنگامی که $Ri \approx 1$ باشد، اثرات هر دو نوع جابه‌جایی اهمیت یکسانی دارند و نمی‌توان هیچ‌یک را نادیده گرفت. در این وضعیت، تعامل بین جریان‌های طبیعی و اجباری ممکن است موجب تغییر در الگوی جریان، افزایش یا کاهش انتقال حرارت، و همچنین تأثیرگذاری بر افت فشار شود. بررسی این رژیم برای بهینه‌سازی سیستم‌های خنک‌کننده و طراحی تجهیزات حرارتی از اهمیت بالایی برخوردار است.

میدان مغناطیسی متناوب به میدانی گفته می‌شود که دامنه و جهت آن در طول زمان به‌صورت متناوب تغییر می‌کند. این نوع میدان، که معمولاً با فرکانس مشخصی نوسان دارد، تأثیر قابل توجهی بر رفتار سیالات رسانا، از جمله فلزات مایع، دارد. در حضور یک میدان متناوب، پارامترهای کلیدی نظیر عدد هارتمن (Ha) و اختلاف فاز میان میدان‌های مغناطیسی و الکتریکی نقش تعیین‌کننده‌ای در میزان افت فشار، تولید آنتروپی، و الگوی جریان دارند. تنظیم مناسب ویژگی‌های میدان مغناطیسی متناوب می‌تواند منجر به بهینه‌سازی

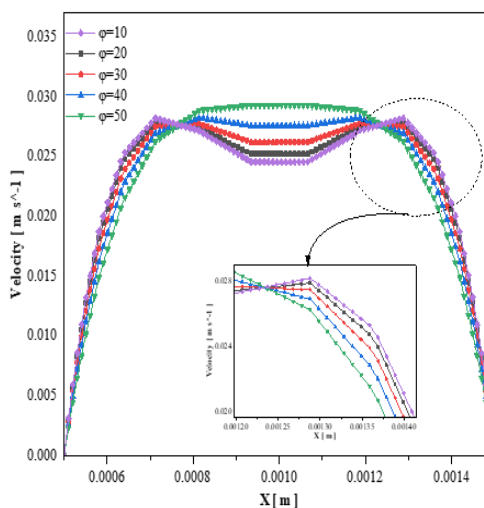


شکل ۷- تأثیر نیروی لورنتس بر لایه مرزی سرعت با تغییر اختلاف فاز بین میدان مغناطیسی و الکتریکی

کانتور میدان سرعت در شکل ۸ نشان می‌دهد که با اعمال میدان مغناطیسی، توزیع سرعت در مقطع میکروکانال تحت تأثیر نیروی لورنتس قرار گرفته است. در این شرایط، سرعت جریان در مجاورت دیواره‌ها افزایشی شده، در حالی که در مرکز میکروکانال کاهش یافته است. این رفتار ناشی از اثر میدان مغناطیسی بر الگوی توزیع نیروی برشی و لایه مرزی سرعت است.

با عدد هارتمن ۲۰۳ و افزایش اختلاف فاز بین میدان مغناطیسی و الکتریکی، نیروی لورنتس تغییر کرده و منجر به تغییر در توزیع سرعت می‌شود. به‌ویژه، سرعت جریان در نزدیکی دیواره‌ها کاهش یافته که نشان‌دهنده افزایش مقاومت مغناطیسی در این ناحیه است. در مقابل، در مرکز میکروکانال، سرعت افزایش یافته که بیانگر کاهش تأثیر نیروی لورنتس در این ناحیه و تغییر در تعادل بین نیروهای لزجت، فشار و مغناطیسی است. این تغییرات نشان می‌دهد که اختلاف فاز میدان‌های اعمالی تأثیر مستقیمی بر الگوی جریان، ضخامت لایه مرزی و انتقال مومنوم در مقطع کانال دارد.

میدان مغناطیسی بر لایه مرزی جریان است که منجر به توزیع یکنواخت‌تر سرعت در این نواحی می‌شود.

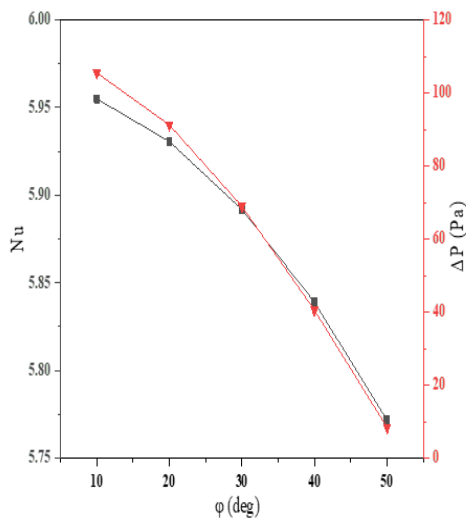


شکل ۶- تأثیر اعمال میدان مغناطیسی و افزایش اختلاف فاز بر توزیع سرعت و کاهش گرادیان سرعت در نزدیکی دیواره‌ها

شکل ۷ اثرات نیروی لورنتس بر لایه مرزی سرعت را نشان می‌دهد. با افزایش اختلاف فاز بین میدان مغناطیسی و الکتریکی، نیروی لورنتس به‌گونه‌ای تغییر می‌کند که باعث کاهش سرعت جریان در لایه مرزی می‌شود. این کاهش سرعت ناشی از افزایش تأثیر بازدارنده میدان مغناطیسی بر حرکت سیال است. در مقابل، با کاهش اختلاف فاز، تأثیر میدان مغناطیسی بر جریان کمتر شده و در نتیجه، سرعت جریان در لایه مرزی افزایش می‌یابد. این رفتار نشان‌دهنده وابستگی مستقیم تغییرات سرعت در لایه مرزی به اختلاف فاز اعمال‌شده بین میدان‌های مغناطیسی و الکتریکی است.

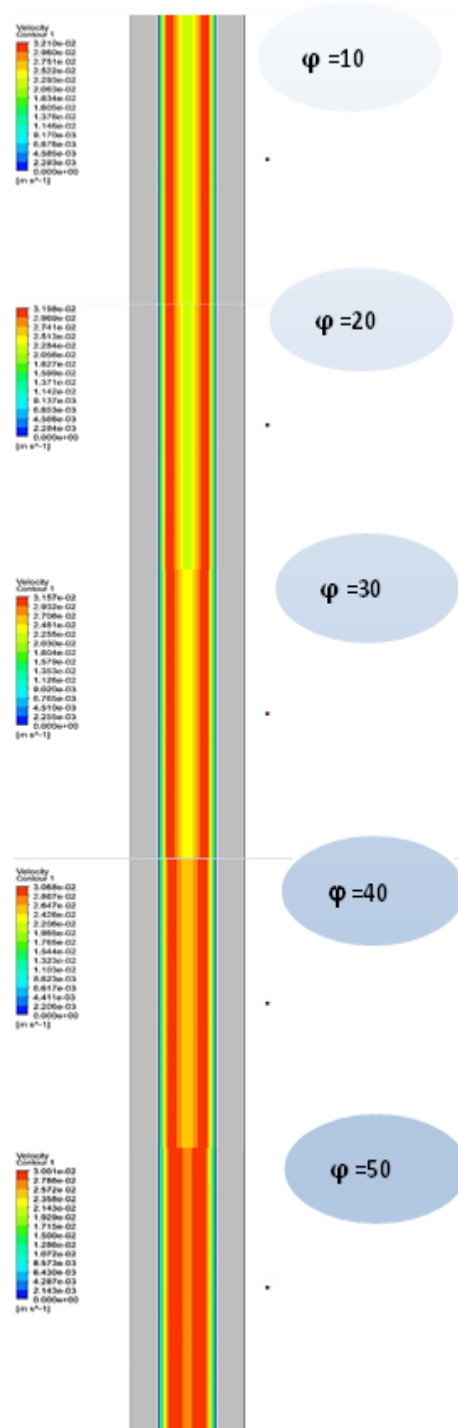
با کاهش اختلاف فاز بین میدان مغناطیسی و الکتریکی، بیشینه و کمینه‌ی این دو میدان به هم نزدیک‌تر شده و هم‌زمانی بیشتری بین نوسانات آن‌ها رخ می‌دهد. این پدیده موجب تقویت برهم‌کنش الکترومغناطیسی و افزایش نیروی لورنتس می‌شود، که نقش کلیدی در بازتوزیع میدان سرعت جریان ایفا می‌کند.

با افزایش اختلاف فاز، هر دو کمیت کاهش می‌یابند که این امر ناشی از کاهش گرادیان سرعت در نزدیکی دیواره‌ها و در نتیجه کاهش انتقال حرارت و افت فشار است. نرخ کاهش افت فشار نسبت به عدد ناسلت بیشتر بوده که نشان‌دهنده کاهش تنش برشی و مقاومت هیدرودینامیکی سیال در حضور میدان مغناطیسی است. با عدد هارتمن ۱۲۹ و اختلاف فاز ۱۰، ۲۰، ۳۰، ۴۰، ۵۰ درجه، افت فشار به ترتیب ۴/۲۸، ۱۷/۲، ۳۷/۴۲، ۶۳/۲، ۹۲/۳ درصد و عدد ناسلت به ترتیب ۰/۱۱، ۰/۵۲، ۱/۱۷، ۲/۰۶، ۳/۱۹ درصد نسبت به اختلاف فاز صفر کاهش شده است. این امر بیانگر بهبود شرایط جریان به علت کاهش مقاومت هیدرودینامیکی جریان، بدون تاثیر چشمگیر بر انتقال حرارت است.



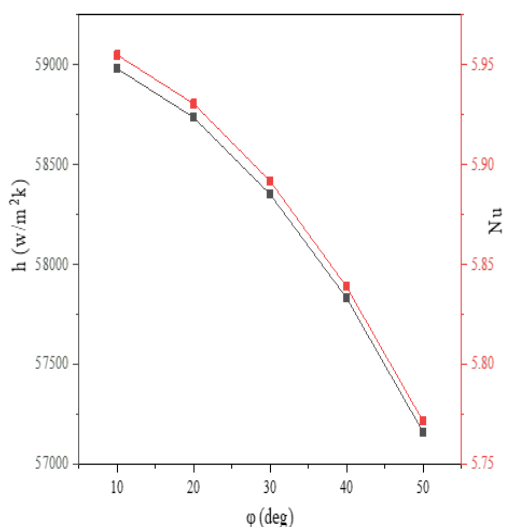
شکل ۹- تأثیر افزایش اختلاف فاز بر عدد ناسلت و افت فشار در عدد هارتمن ۱۲۹

شکل ۱۰ نشان داده است که با افزایش اختلاف فاز، ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی و عدد ناسلت کاهش یافته‌اند. این کاهش به دلیل کاهش گرادیان سرعت در نزدیکی دیواره‌ها و تضعیف لایه مرزی حرارتی رخ می‌دهد، که در نهایت منجر به کاهش نرخ انتقال حرارت می‌شود. با این حال، نرخ کاهش عدد ناسلت کند بوده و کاهش آن نسبت به افت فشار شدت کمتری دارد. همان‌طور که در نمودار قبل (شکل ۸) مشاهده شد، تأثیر افزایش اختلاف فاز بر افت فشار بیشتر از تأثیر آن بر کاهش عدد ناسلت است. این موضوع بیانگر آن است که در حضور



شکل ۸- کانطور میدان سرعت

شکل ۹ تأثیر افزایش اختلاف فاز بر عدد ناسلت و افت فشار در عدد هارتمن ۱۲۹ را نشان داده است. مشاهده می‌شود که



شکل ۱۱- تأثیر افزایش اختلاف فاز بر ضریب ارزیابی عملکرد (PEC)، عدد ناسلت و افت فشار

۵- تحلیل اثر اختلاف فاز بر تولید آنتروپی حرارتی، مغناطیسی و اصطکاکی

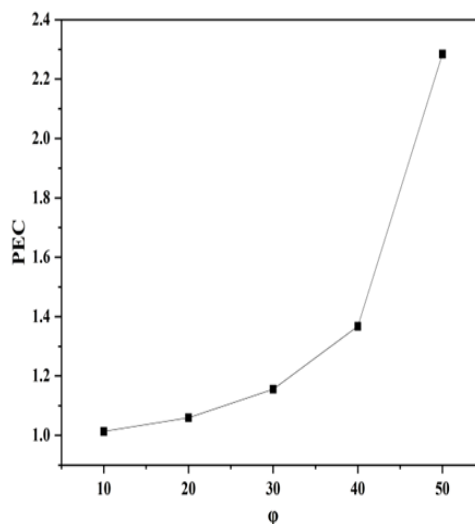
بررسی تغییرات تولید آنتروپی در سیستم‌های انتقال حرارت و جریان مغناطوهدرودینامیک (MHD) به‌ویژه در حضور اختلاف فاز، از اهمیت بالایی برخوردار است. در این مطالعه، با استناد به نمودار ارائه‌شده در شکل ۱۲، مشاهده می‌شود که با افزایش اختلاف فاز، تولید آنتروپی حرارتی و تولید آنتروپی ناشی از میدان مغناطیسی روند افزایشی دارد، در حالی که تولید آنتروپی اصطکاکی کاهش می‌یابد. برای تحلیل این رفتار، بررسی اثرات ناشی از تغییرات عدد ناسلت و افت فشار ضروری است.

۱-۵- اثر اختلاف فاز بر تولید آنتروپی حرارتی و مغناطیسی

تولید آنتروپی در این سیستم از سه منشأ اصلی ناشی می‌شود: ۱- تولید آنتروپی حرارتی که ناشی از انتقال حرارت در حضور گرادیان دما است و مستقیماً با کاهش نرخ انتقال حرارت و افزایش اختلاف دما افزایش می‌یابد.

۲- تولید آنتروپی اصطکاکی (ویسکوز) که مربوط به اتلاف انرژی مکانیکی در اثر مقاومت سیال در برابر جریان است و با کاهش افت فشار، کاهش می‌یابد.

میدان مغناطیسی، کاهش تنش برشی و مقاومت هیدرودینامیکی نقش مؤثرتری در تغییرات جریان نسبت به کاهش انتقال حرارت دارد.

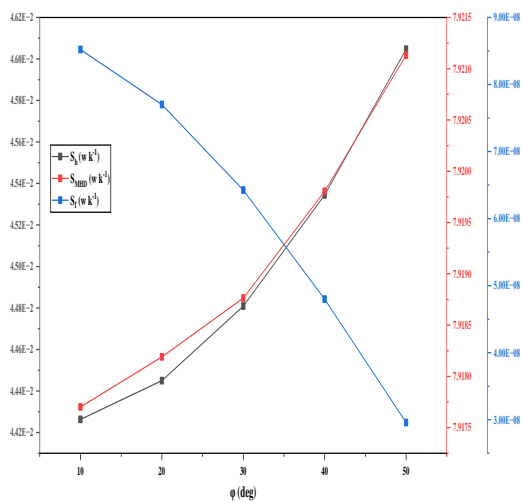


شکل ۱۰- تأثیر افزایش اختلاف فاز بر ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی و عدد ناسلت، عدد هارتمن ۱۲۹

شکل ۱۱ نشان‌دهنده تغییرات ضریب ارزیابی عملکرد (PEC) در شرایط مختلف اختلاف فاز از ۱۰ تا ۵۰ درجه است. با توجه به این نمودار، مشاهده می‌شود که با افزایش اختلاف فاز، PEC به‌طور قابل‌توجهی افزایش یافته است. این افزایش عمدتاً به دلیل کاهش شدیدتر افت فشار نسبت به کاهش عدد ناسلت می‌باشد. به عبارت دیگر، علی‌رغم اینکه عدد ناسلت کاهش یافته و به تبع آن نرخ انتقال حرارت جابه‌جایی کاهش می‌یابد، اما کاهش افت فشار به‌طور چشمگیری بیشتر بوده است. این کاهش در افت فشار نشان‌دهنده کاهش اتلاف انرژی مکانیکی و بهبود الگوی جریان سیال در سیستم است که موجب بهبود عملکرد کلی سیستم می‌شود. در نتیجه، با وجود کاهش در عدد ناسلت، کاهش قابل‌توجه در افت فشار باعث بهبود چشمگیر PEC شده است. این نتایج به‌ویژه در محدوده اختلاف فاز ۵۰ درجه مشاهده می‌شود، که نشان‌دهنده بهینه‌ترین عملکرد سیستم در این شرایط است. بنابراین، این یافته‌ها می‌توانند در بهینه‌سازی طراحی سیستم‌های حرارتی، به‌ویژه در زمینه‌های انتقال حرارت در سیستم‌های میکروکانالی و چاه‌های حرارتی، کاربرد فراوانی داشته باشند.

کاهش نیروی برشی اعمال شده بر سیال است که به دنبال آن تولید آنتروپی اصطکاکی روند کاهشی دارد. از آنجا که افت فشار کاهش قابل توجهی را نشان می‌دهد، تولید آنتروپی اصطکاکی نیز با شیب بیشتری نسبت به تولید آنتروپی حرارتی کاهش می‌یابد.

اگرچه کاهش افت فشار منجر به کاهش تولید آنتروپی ناشی از اصطکاک می‌شود و از دیدگاه ترمودینامیکی می‌تواند نشانه‌ای از کاهش اتلاف‌های مکانیکی باشد، اما این موضوع لزوماً به معنای بهبود عملکرد کلی سیستم نیست؛ چراکه افت فشار کمتر ممکن است همراه با کاهش نرخ جریان یا افت در انتقال حرارت باشد. از این رو، ارزیابی عملکرد بهینه سیستم مستلزم بررسی هم‌زمان پارامترهایی مانند ضریب انتقال حرارت، عدد ناسلت و تولید کل آنتروپی است.



شکل ۱۲- اثرات اختلاف فاز بر تولید آنتروپی حرارتی، تولید آنتروپی مغناطیسی، تولید آنتروپی اصطکاکی

نتیجه‌گیری

۱- همانطور که در بخش ۴ و شکل ۵ نشان داده شد، با افزایش عدد هارتمن، انتقال حرارت بهبود یافته است، که نشان‌دهنده تأثیر مثبت میدان مغناطیسی بر تقویت جابجایی حرارتی در سیستم می‌باشد.

۲- همانطور که در بخش ۴ و شکل ۹ نشان داده شد، با افزایش اختلاف فاز بین میدان مغناطیسی و الکتریکی، عدد ناسلت با شیب ملایم کاهش یافته، در حالی که افت فشار چاه حرارتی با شیب بیشتری کاهش پیدا کرده است. این روند نشان

۳- تولید آنتروپی مغناطیسی که از اثرات میدان مغناطیسی بر جریان و ناپایداری‌های ایجاد شده در میدان ناشی می‌شود و وابسته به شدت میدان و مشخصات مغناطوهیدرودینامیکی سیال می‌باشد.

در شرایط مورد بررسی، با افزایش اختلاف فاز، تولید آنتروپی حرارتی و مغناطیسی افزایش یافته و تولید آنتروپی اصطکاکی کاهش می‌یابد. در نتیجه، سهم نسبی هر نوع آنتروپی در تولید کل آنتروپی سیستم متغیر بوده و تحلیل تفکیکی آن‌ها برای درک بهتر از مکانیسم‌های اتلاف انرژی و بهینه‌سازی عملکرد سیستم ضروری است.

افزایش اختلاف فاز منجر به افزایش اختلاف دما در سیستم می‌شود، که این امر موجب افزایش تولید آنتروپی حرارتی می‌گردد. تولید آنتروپی حرارتی تابعی از گرادیان دمایی و نرخ انتقال حرارت در سیستم است. با افزایش اختلاف فاز، انتقال حرارت کاهش می‌یابد که این کاهش انتقال حرارت، افزایش اختلاف دمای محلی را به دنبال دارد. در نتیجه، فرآیندهای غیرقابل برگشت در سیستم تشدید شده و میزان تولید آنتروپی حرارتی افزایش می‌یابد.

علاوه بر این، میدان مغناطیسی اعمال شده در سیستم نیز تحت تأثیر اختلاف فاز قرار می‌گیرد. تغییر در اختلاف فاز می‌تواند سبب ایجاد ناپایداری‌های مغناطیسی شود که منجر به افزایش تولید آنتروپی ناشی از میدان مغناطیسی می‌گردد. این افزایش ناشی از تأثیر مستقیم میدان مغناطیسی بر خواص جریان و میزان اتلاف انرژی در سیستم است.

۲-۵- ارتباط عدد ناسلت و افت فشار با تولید آنتروپی

همان‌طور که در نمودارهای پیشین مشخص شده است، با افزایش اختلاف فاز، عدد ناسلت روندی کاهشی دارد. عدد ناسلت نشان‌دهنده شدت انتقال حرارت جابجایی است و کاهش آن بیانگر کاهش نرخ انتقال حرارت در سیستم می‌باشد. کاهش انتقال حرارت، سبب افزایش اختلاف دمایی در سیستم شده که به صورت مستقیم تولید آنتروپی حرارتی را افزایش می‌دهد.

از سوی دیگر، افت فشار نیز در اثر افزایش اختلاف فاز کاهش می‌یابد، اما میزان کاهش افت فشار شدیدتر از کاهش عدد ناسلت است. این موضوع نشان‌دهنده کاهش اثرات اصطکاکی در سیستم می‌باشد. کاهش افت فشار به معنای

۱- بررسی رفتار سیستم با سیالات غیرنیوتونی یا سیالات دارای خواص وابسته به دما و شدت میدان مغناطیسی

۲- توسعه هندسه مدل به صورت پیچیده تر یا شامل زبری های سطحی و ناهمواری ها برای شبیه سازی دقیق تر کاربردهای واقعی

۳- مطالعه تغییرات الگوی جریان تحت تأثیر فرکانس های مختلف میدان مغناطیسی

در تحقیقات انجام شده پیرامون اعمال میدان مغناطیسی ثابت و متناوب، چه در شرایط یکنواخت و چه غیریکنواخت، یکی از مشکلات اصلی که همواره مورد توجه قرار گرفته است، افزایش افت فشار در سیستم ها بوده است. این موضوع به ویژه در سیستم های میکروکانالی و چاه های حرارتی که انتقال حرارت به دقت بالا و در مقیاس های میکروسکوپی صورت می گیرد، چالش های قابل توجهی به همراه داشته است. در این پژوهش، برای اولین بار راهکارهایی جهت کاهش افت فشار ارائه شده است، که همزمان با بهبود بهره وری انتقال حرارت، عملکرد سیستم های حرارتی را به طور چشمگیری ارتقا می دهد. این دستاورد می تواند گامی مؤثر در جهت بهینه سازی سیستم های خنک کننده با استفاده از میدان های مغناطیسی باشد. با این حال، همچنان در تحقیقات آینده، انتظار می رود روش های نوین و متنوع تری برای کاهش این معضل و افزایش کارایی سیستم های انتقال حرارت معرفی شوند. این مطالعات می توانند به توسعه فناوری های نوین در صنایع مختلفی مانند الکترونیک و انرژی های تجدیدپذیر کمک شایانی نمایند.

علائم انگلیسی

مساحت کف میکروکانال، m^2	A_b
مساحت انتقال حرارت بین سیال و دیواره ها، m^2	A_w
شدت میدان مغناطیسی، T	B_0
ظرفیت گرمایی ویژه، J/kg.k	C_p
قطر هیدرولیکی، m	D
نیروی لورنتز، Nm^3	F_L
عدد گراشپف	Gr
شتاب جاذبه	g
عدد هارتمن	Ha

می دهد که اثرات ناشی از کاهش افت فشار بر رفتار جریان سیال غالب تر از تغییرات در انتقال حرارت بوده است. با عدد هارتمن ۱۲۹ و اختلاف فاز ۱۰، ۲۰، ۳۰، ۴۰، ۵۰ درجه، افت فشار به ترتیب ۴/۲۸، ۱۷/۲، ۳۷/۴۲، ۶۳/۲، ۹۲/۳ درصد و عدد ناسلت به ترتیب ۰/۱۱، ۰/۵۲، ۱/۱۷، ۲/۰۶، ۳/۱۹ درصد نسبت به اختلاف فاز صفر کاهش یافته است. این امر بیانگر بهبود شرایط جریان به علت کاهش مقاومت هیدرودینامیکی جریان، بدون تأثیر چشمگیر بر انتقال حرارت است.

۳- همانطور که در بخش ۴ و شکل ۱۱ نشان داده شد، به دلیل کاهش شدیدتر افت فشار نسبت به کاهش انتقال حرارت، ضریب ارزیابی عملکرد (PEC) بهبود قابل توجهی داشته است. این افزایش PEC نشان می دهد که سیستم در محدوده اختلاف فاز بررسی شده دارای عملکرد بهینه تری بوده و می تواند منجر به کاهش مصرف انرژی و بهبود بازده کلی در سیستم های انتقال حرارت گردد.

۴- همانطور که در بخش ۵ و شکل ۱۲ نشان داده شد، نتایج حاصل از تحلیل ها و داده های نموداری نشان می دهد که افزایش اختلاف فاز تأثیر قابل توجهی بر تولید آنتروپی در سیستم دارد. تولید آنتروپی حرارتی و مغناطیسی به دلیل افزایش اختلاف دما و ناپایداری های مغناطیسی افزایش می یابد. در مقابل، تولید آنتروپی اصطکاکی به دلیل کاهش افت فشار، روندی کاهشی دارد. از آنجا که افت فشار با نرخ بیشتری کاهش می یابد، میزان کاهش تولید آنتروپی اصطکاکی نیز بیشتر از افزایش تولید آنتروپی حرارتی خواهد بود. این نتایج نشان می دهد که کنترل اختلاف فاز می تواند به عنوان یک پارامتر مهم در بهینه سازی عملکرد سیستم های حرارتی و مغناطیسی مورد استفاده قرار گیرد.

علی رغم انجام شبیه سازی سه بعدی و دستیابی به نتایج قابل توجه در تحلیل ترمودینامیکی سیستم، این مطالعه نیز همانند سایر مطالعات عددی دارای محدودیت هایی است که باید مورد توجه قرار گیرد. در این پژوهش، از فرضیات ساده سازی شده ای مانند رفتار نیوتونی سیال، خواص ترموفیزیکی ثابت، و شرایط مرزی ایستا استفاده شده است. این مفروضات می توانند در برخی کاربردهای صنعتی منجر به تفاوت میان نتایج عددی و رفتار واقعی سیستم شوند.

پیشنهادهایی برای توسعه تحقیقات آینده به شرح زیر ارائه می گردد:

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 and mass transfer, 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] Kumar, R., Singh, G., & Mikielewicz, D. (2018). A new approach for the mitigating of flow maldistribution in parallel microchannel heat sink. J. Heat Transfer, 140(7), 072401.
- [5] Li, X. Y., Wang, S. L., Wang, X. D., & Wang, T. H. (2019). Selected porous-ribs design for performance improvement in double-layered microchannel heat sinks. Int. J. Thermal Sciences, 137, 616-626.
- [6] 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. Thermal Analysis and Calorimetry, 141, 547-558.
- [7] 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.
- [8] Chein, R., & Huang, G. (2005). Analysis of microchannel heat sink performance using nanofluids. Applied thermal engineering, 25(17-18), 3104-3114.
- [9] Darzi, A. R., Farhadi, M., Sedighi, K., Aallahyari, S., & Delavar, M. A. (2013). Turbulent heat transfer of Al₂O₃-water nanofluid inside helically corrugated tubes: numerical study. International Communications in Heat and Mass Transfer, 41, 68-75.
- [10] Sohel, M. R., Khaleduzzaman, S. S., Saidur, R., Hepbasli, A., Sabri, M. F. M., & Mahbubul, I. M. (2014). An experimental investigation of heat transfer enhancement of a minichannel heat sink using Al₂O₃-H₂O nanofluid. Int. J. of Heat and Mass Transfer, 74, 164-172.
- [11] Ho, C. J., Wei, L. C., & Li, Z. W. (2010). An experimental investigation of forced convective cooling performance of a microchannel heat sink

ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی،	h
wm^2K	
ضریب رسانش حرارتی سیال، wmk	K_f
طول مشخصه، m	L
عدد ناسلت متوسط	Nu_{Avg}
فشار، Pa	P
عدد پرانتل	Pr
شار حرارتی، wm^2	q
انتقال حرارت، w	Q
عدد رینولدز	Re
عدد ریچاردسون	Ri
دمای سیال ورودی، K	T_f
دمای میانگین سیال، K	T_m
دمای میانگین دیواره‌ها، K	T_w
سرعت سیال ورودی، ms	Uf
مؤلفه سرعت در جهت X	u
مؤلفه سرعت در جهت Y	v
مؤلفه سرعت در جهت Z	w

علائم یونانی

انتشار حرارتی سیال، m^2/s	α
ویسکوزیته دینامیکی سیال، kg/ms	μ
چگالی سیال، kg/m^3	ρ
رسانایی الکتریکی سیال S/m	σ
لزجت سینماتیک، m^2/s	ν

زیرنویس

متوسط	Avg
سیال	f
دیواره	w

- [20] 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.
- [21] 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. *International J. Thermal Sciences*, 155, 106411.
- [22] 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.
- [23] 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.
- [24] Soleimanpour, M., & Farhadi, M. (2015). The effect of magnetic field on heat transfer and flow characteristics in nanofluids. *International J. Heat and Mass Transfer*, 84, 348-355.
- [25] Jafari, M., & Bagheri, M. (2016). Effect of magnetic field on heat transfer in ferrofluids under laminar flow conditions. *J. Magnetism and Magnetic Materials*, 416, 46-52.
- [26] Sarowar, M. T. (2021) Numerical analysis of a liquid metal cooled mini channel heat sink with five different ceramic substrates. *Ceramics International*, 47(1), 214-225
- [27] Hunt, J. C. R. (1965). Magnetohydrodynamic flow in rectangular ducts. *J. fluid mechanics*, 21(4), 577-590.
- [28] Hunt, J. C. R., & Stewartson, K. (1965). Magnetohydrodynamic flow in rectangular ducts. II. *J. fluid mechanics*, 23(3), 563-581.
- with Al₂O₃/water nanofluid. *Applied Thermal Engineering*, 30(2-3), 96-103.
- [12] 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. *Journal of Solid and Fluid Mechanics*, 13(1), 125-136.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] 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 and Mass Transfer*, 134, 175-184.
- [16] 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.
- [17] 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 Liquids*, 299, 112206.
- [18] Nouri, R., Gorji-Bandpy, M., & Domiri Ganji, D. (2014). Numerical investigation of magnetic field effect on forced convection heat transfer of nanofluid in a sinusoidal channel. *Modares Mechanical Engineering*, 13(14), 43-55.
- [19] 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.