

مدل سازی و بهینه سازی انتقال حرارت جابه جایی طبیعی در محفظه بسته پر شده با نانوسیال

محمود صبور^۱ و محمد قلم باز^{۲*}

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک، واحد دزفول، دانشگاه آزاد اسلامی، دزفول، ایران

۲- استادیار مهندسی مکانیک، واحد دزفول، دانشگاه آزاد اسلامی، دزفول، ایران

دریافت: دی ۱۳۹۴، اصلاحیه: بهمن ۱۳۹۴، پذیرش: بهمن ۱۳۹۴

چکیده: در پژوهش حاضر، یک محفظه بسته چهارضلعی با هدف بهینه سازی میزان انتقال حرارت جابه جایی طبیعی سیال خالص و نانوسیال های متفاوت مورد بررسی قرار گرفته است. معادلات حاکم بر مبنای سیال پایه به شکل بی بعد خود منتقل و با استفاده از روش المان محدود حل شدند. با بهره گیری از نتیجه های آزمایشگاهی موجود در پیشینه پژوهش و به منظور بررسی جامع رفتار حرارتی نانوسیال ها، دو عامل بی بعد جدید، یعنی عامل رسانش حرارتی (Nc) و عامل لزجت دینامیک (Nv) تعریف شده اند. عامل های یاد شده به جنس نانوذرات و سیال پایه، اندازه و شکل نانوذرات و دمای کارکرد نانوسیال بستگی دارند. استفاده از نانوذرات درون سیال پایه، باعث افزایش رسانایی حرارتی سیال عامل شده که در نتیجه آن امکان افزایش انتقال حرارت فراهم می شود. از طرفی بهینه سازی محفظه بسته نیز به تقویت هرچه بیشتر انتقال حرارت کمک شایانی می کند. به منظور بهینه سازی هندسی، دو عامل نسبت متناظر (نسبت ارتفاع به طول محفظه) و زاویه انحراف به عنوان متغیرهای بهینه سازی در نظر گرفته شده اند. بررسی ها برای اعداد رایلی گوناگون و کسرهای حجمی متفاوتی از نانوذرات به انجام رسیده است. نتیجه ها نشان می دهند که با افزایش عدد رایلی، از یک طرف محفظه بهینه باریک تر (افزایش نسبت متناظر) خواهد شد و از طرف دیگر زاویه انحراف محفظه نیز کاهش می یابد.

واژه های کلیدی: انتقال حرارت جابه جایی طبیعی، نانوذرات، رسانایی حرارتی، محفظه بسته چهارضلعی، بهینه سازی هندسی

مقدمه

بهبود بخشند. یکی از راهکارهایی که در گذشته برای افزایش رسانایی حرارتی مطرح شده، استفاده از ذراتی در ابعاد میلی متر و پس از گذشت سال ها، در ابعاد میکرومتر است. آزمایش ها نشان می دهد با کوچک تر شدن اندازه ذرات از میلی متر به میکرو متر، انتقال حرارت بهبود می یابد. افزایش انتقال حرارت در اثر کاهش اندازه ذرات ناشی از افزایش سطح ذره نسبت به حجم آن است. بنابراین، در صورت استفاده از نانوذرات می توان به سطح بیشتر و در نتیجه انتقال حرارت بیشتر دست یافت. اما به نظر می رسد در آن دوران امکان ساخت دستگاه و یا وسیله ای برای

شاید ساده ترین مثال برای شناخت انتقال حرارت جابه جایی آزاد درون محفظه های بسته چهارضلعی، گردش هوا درون اتاق های یک ساختمان باشد. با این رویکرد، سال ها ست که محفظه های بسته در صنایعی مانند انرژی خورشیدی و عایق کاری دیواره های دوجداره، مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته اند [۱]. در این بین، گاهی اوقات به دلیل عدم رضایت کامل از عملکرد این سامانه های صنعتی، پژوهشگران بر آن می شوند تا از برخی جهات مانند رسانای حرارتی، وضعیت انتقال حرارت سامانه ها را

نانوسیال‌ها به دلیل خواص انتقال حرارت بهبودیافته‌ای که از خود نشان داده‌اند مورد توجه بسیاری از پژوهشگران در کاربردهای مهندسی و انتقال حرارت بوده‌اند. با پخش پایدار نانوذرات در محفظه‌های بسته، می‌توان انتقال حرارت را تا حد قابل توجهی نسبت به عدم حضور نانوذرات (فقط سیال پایه)، بهبود داد.

خانافر و همکارانش [۶]، نخستین کسانی بودند که به صورت عددی انتقال حرارت نانوسیال را در محفظه‌های مربعی‌شکل، شبیه‌سازی کردند. آن‌ها از مدل وسپ^۳ برای رسانش حرارتی نانوسیال و از مدل برینکمن برای محاسبه لزجت دینامیک نانوسیال استفاده کردند. خانافر و همکارانش [۶] نشان دادند که نرخ انتقال حرارت نانوسیال با افزایش کسر حجمی نانوذرات افزایش می‌یابد.

قهوه‌چی [۷]، انتقال حرارت جابه‌جایی طبیعی درون محفظه‌های بسته مستطیلی شکل را به صورت عددی مورد بررسی قرار داد. در مطالعه وی، آب به‌عنوان سیال پایه استفاده شده و تأثیر جنس نانوذرات کروی مس، آلومینا و نقره بر انتقال حرارت بررسی شده است. نتیجه‌ها نشان می‌دهند که افزایش نرخ انتقال حرارت متوسط، برای نانوذرات کروی نقره، بیشینه بوده و برای نانوذرات کروی آلومینا، دارای کمترین مقدار است.

جانگ و چوی [۸]، مشخصه‌های حرارتی انتقال حرارت جابه‌جایی آزاد در محفظه‌های مستطیلی را مطالعه کردند. آن‌ها در پژوهش خود از نانوذرات مس با ابعاد ۶ nm و الماس با ابعاد ۲ nm بهره بردند. نتیجه‌های این پژوهش حاکی از آن است که در محفظه‌های مستطیلی، نانوسیال‌ها دارای ضریب انتقال حرارت بزرگ‌تری نسبت به سیال‌های خالص هستند.

ژوو و ژنگ [۹]، بهبود انتقال حرارت جابه‌جایی طبیعی در محفظه‌های بسته را به صورت عددی و از روش تک‌فازی مورد مطالعه قرار دادند. آن‌ها در پژوهش خود برای تحلیل عملکرد انتقال حرارت، عامل‌هایی همچون کسر حجمی، عدد گراشف و نسبت متناظر محفظه را بررسی کردند. از نتیجه‌های این پژوهش می‌توان به افزایش متوسط انتقال حرارت در اثر افزایش ترم

تولید ذرات کوچک‌تر وجود نداشته است. هم‌چنین به علت وزن زیاد ذرات (در اندازه میکرومتر) نسبت به مولکول‌های سیال پایه، مشکلاتی از قبیل ته‌نشینی، سایش و افت فشار در محفظه‌ها، رخ می‌داد؛ که این امر ساخت دستگاه‌هایی به منظور ایجاد ذرات کوچک‌تر را ایجاب می‌کرد. امروزه، با پیشرفت فناوری امکان ساخت ذرات در مقیاس نانو (نانوذرات) فراهم شده است. عموماً، نانوذرات با اندازه‌های متفاوتی، بسته به نوع کارکرد از ۱۰ تا ۱۰۰ nm تولید می‌شوند. از این رو، راه بهره‌گیری از دانش کاربردی نانو در عرصه‌های گوناگون علمی هموار شده است. برای مثال، نانوذرات^۱ می‌توانند در بهبود وضعیت محیط زیست و کاهش آلاینده‌های محیطی نقش بسزایی داشته باشند. در پژوهشی، افشاری و همکاران [۲]، چگونگی جذب فلزات سنگین از محلول‌های آبی را بررسی کردند. آن‌ها در پژوهش خود برای جذب فلز سنگین Pb^{2+} موجود در فاضلاب صنعتی، از نانوذرات TiO_2 و Fe_3O_4 بهره بردند. صادق حسنی و همکارانش [۳] از ساختار نانولوله‌های کربنی برای ساخت کائود میکروسکوپ مغناطیسی استفاده کردند. میکروسکوپ‌های مغناطیسی در شناخت و تفکیک مواد شیمیایی به کار می‌روند. ایزدیاری و همکارانش [۴] از ساختار نانوکپسول‌ها در جهت مصارف دارویی و غذایی بهره جستند. آن‌ها با هدف رفع کم‌خونی (کمبود آهن موجود در خون) به تولید نانوکپسول‌های فروگلوتامات پرداختند. ایزدیاری و همکارانش [۴]، اندازه، شکل و مقدار پایداری نانوکپسول‌های فروگلوتامات را نیز بررسی کردند. نتیجه‌ها نشان می‌دهد که مقدار پایداری نانوکپسول‌ها با بهره‌گیری از معیار پتانسیل زتا، مناسب ارزیابی شده است. هم‌چنین نانوکپسول‌های فروگلوتامات دارای اندازه ۱۰۰ تا ۴۰۰ nm و به شکل کروی بودند.

در سال‌های اخیر، سیالات جدیدی موسوم به نانوسیالات^۲ به سبب کاربردهای بی‌شمار، مورد توجه قرار گرفته‌اند. وجود کسر حجمی مشخصی از نانوذرات درون یک سیال پایه (برای مثال آب) باعث پدید آمدن نانوسیال‌ها می‌شود. نانوسیال‌ها برای نخستین بار در سال ۱۹۹۵ توسط چوی ساخته شدند [۵]. از آن زمان تاکنون

باشد، انتظار می‌رود که افزایش رسانش حرارتی به طور قطع موجب افزایش انتقال حرارت شود. ولی در بحث انتقال حرارت جابه‌جایی طبیعی، حرکت سیال و انتقال حرارت در اثر انتقال جرم (انتقال حرارت در اثر حرکت کپه‌ای مولکول‌ها) نقش بسیار پررنگی ایفا می‌کند. در انتقال حرارت جابه‌جایی طبیعی، اختلاف دما باعث ایجاد اختلاف چگالی و در نتیجه حرکت سیال می‌شود. در بحث حرکت سیال، لزجت سیال عامل تعیین کننده‌ای بوده و بدیهی است که در هنگام وجود یک نیروی محرکه ثابت (یک اختلاف چگالی محدود در اثر اختلاف دما) هرچه سیال لزج‌تر باشد، سرعت حرکت سیال نیز کمتر خواهد بود. کاهش سرعت سیال باعث کاهش سازوکار انتقال حرارت در اثر انتقال جرم (انتقال حرارت در اثر حرکت کپه‌ای مولکول‌ها) می‌شود. بنابراین، به صرف رسانش حرارتی بالای نانوسیال نمی‌توان از مناسب بودن آن برای استفاده در کاربردهای انتقال حرارت جابه‌جایی طبیعی اطمینان حاصل کرد. در این میان، افزایش لزجت دینامیک سیال در اثر وجود نانوذرات نیز می‌بایست در نظر گرفته شود و به همین دلیل بحث تجزیه انتقال حرارت جابه‌جایی نانوسیال‌ها امری ضروری است.

اُوزتاپ و ابوندا [۱۴]، انتقال حرارت و جریان سیال را به سبب اهمیت نیروهای شناوری مطالعه کردند. آن‌ها از روش تک‌فازی برای تحلیل رفتار نانوسیال استفاده کردند. هم چنین در محفظه‌های مورد مطالعه از گرمکن نیز بهره بردند. محاسبات برای عددهای رایلی، ارتفاع گرمکن، موقعیت گرمکن، نسبت متناظر و کسر حجمی متفاوتی از نانوذرات، انجام شده بودند. آن‌ها دریافتند که انتقال حرارت نانوسیال با افزایش عدد رایلی، ارتفاع گرمکن و کسر حجمی نانوذرات، افزایش می‌یابد.

کفایتی و همکارانش [۱۵]، انتقال حرارت جابه‌جایی طبیعی نانوسیال آب-مس را در یک محفظه باز با استفاده از روش لاتیس-بولتزمن، به صورت عددی بررسی کردند. نتیجه‌ها نشان می‌دهد که عدد ناسلت متوسط با افزایش عدد رایلی و کسر حجمی نانوذرات برای نسبت‌های متناظر متفاوت افزایش می‌یابد؛ در حالی که عدد ناسلت متوسط با افزایش نسبت متناظر، کاهش می‌یابد.

شناوری و کسر حجمی نانوذرات، اشاره کرد.

هو و همکارانش [۱۰]، یک تحلیل عددی برای انتقال حرارت جابه‌جایی طبیعی در محفظه مربعی ارائه دادند. آن‌ها نشان دادند که روابط موجود برای محاسبه ضریب رسانش حرارتی و لزجت دینامیک در برخی موارد کارایی لازم را ندارند. از این رو، روابط یاد شده گاهی اوقات بهبود و گاهی اوقات تضعیف انتقال حرارت را نشان می‌دادند.

در این راستا قلم‌باز و همکارانش [۱۱] و زرکی و همکارانش [۱۲] اعداد رسانش حرارتی و لزجت دینامیک را برای نانوسیال‌ها تعریف کردند. اعداد رسانش حرارتی و لزجت دینامیک تابعی از جنس نانوذرات، اندازه نانوذرات، شکل نانوذرات، دمای کارکرد نانوسیال و جنس سیال پایه در نظر گرفته شده‌اند. در واقع با استفاده از اعداد رسانش حرارتی و لزجت دینامیک، پیچیدگی‌های عوامل تاثیرگذار بر رسانش حرارتی و لزجت دینامیک نانوسیال‌ها در دو عدد بی‌بعد پیشنهاد شده یعنی رسانش حرارتی و لزجت دینامیک خلاصه می‌شود.

هم چنین در پژوهشی دیگر هو و همکارانش [۱۳] نتیجه آزمایشگاهی انتقال حرارت جابه‌جایی طبیعی در محفظه مربعی را گزارش کردند. آن‌ها از نانوسیال آب-آلومینا بهره بردند. در پژوهش آن‌ها، خواص ترموفیزیکی، شامل اندازه ذرات، لزجت دینامیک، چگالی و ضریب رسانش حرارتی، به عنوان تابعی از دما و هم چنین کسر حجمی نانوذرات، بیان شده است. در این پژوهش [۱۳] کاهش انتقال حرارت کلی نانوسیال نسبت به سیال پایه در غلظت‌های بزرگ‌تر-مساوی دو درصد، برای اعداد رایلی متفاوت مشاهده شده است. نتیجه پژوهش هو و همکارانش [۱۳] نشان می‌دهد که استفاده از نانوسیال با آنکه باعث افزایش رسانش حرارتی می‌شود ولی به دلیل افزایش همزمان لزجت و دیگر ویژگی ترموفیزیکی و یا به دلیل ایجاد سازوکارهای دیگر می‌تواند باعث کاهش انتقال حرارت کلی در محفظه شد. حضور نانوذرات در سیال پایه باعث افزایش رسانش حرارتی می‌شود. این در حالی است که حضور نانوذرات علاوه بر افزایش رسانش حرارتی، لزجت دینامیک سیال را نیز افزایش می‌دهد. در صورتی که سیال ساکن

در برخی از پژوهش‌ها، افزون بر بهره‌گیری از نانوذرات، اثرات زوایای انحراف^۱ نیز برای هندسه محفظه بسته لحاظ شده است. حسین و حسین [۱۶]، انتقال حرارت جابه‌جایی آزاد نانوسیال آب-مس، درون محفظه بسته با هندسه متوازی‌الاضلاع را بررسی کردند. بررسی آن‌ها بیانگر حساسیت گرده‌های انتقال حرارت جابه‌جایی به تغییر زاویه و هم‌چنین افزایش قابل ملاحظه نرخ انتقال حرارت در نانوسیال آب-مس، نسبت به سیال خالص آب است. هیون و چوی [۱۷] انتقال حرارت گذرا در یک محفظه متوازی‌الاضلاع را برای یک سیال معمولی مطالعه کردند. گارسیا و همکارانش [۱۸] به صورت تجربی تأثیر مکان‌های المنت‌های حرارتی را بر انتقال حرارت درون یک متوازی‌الاضلاع حاوی یک سیال معمولی را بررسی کردند.

بیری و همکاران [۱۹] نیز یک مطالعه مروری در مورد انتقال حرارت جابه‌جایی طبیعی در محفظه‌های متوازی‌الاضلاع در کاربردهای مهندسی ارائه کردند. بر اساس مطالعه بیری و همکارانش وجود زوایای انحراف موجب ایجاد محفظه‌هایی با هندسه متوازی‌الاضلاع (متماثل به راست و متمایل به چپ) می‌شوند. این محفظه‌ها در زمینه‌های متفاوتی کاربرد دارند؛ که از جمله می‌توان به هوانوردی و انرژی خورشیدی اشاره کرد [۱۹]. شیخ‌السلامی و همکارانش [۲۰] و ملوندی و گنجی [۲۱] تأثیر وجود میدان مغناطیسی بر انتقال حرارت جابه‌جایی طبیعی نانوسیال‌های آلومینا-آب [۲۰ و ۲۱] را یک محفظه بسته بررسی کردند. شیخ‌السلامی و گنجی [۲۲] و شمخه و همکارانش [۲۳] تأثیر وجود نانوذرات اکسید مس در نانوسیال اکسید مس-آب را بر انتقال حرارت و تولید آنتروپی در یک محفظه بسته مستطیلی [۲۲] و محفظه بسته C شکل [۲۳] مطالعه کردند. نتیجه نشان می‌دهد که وجود میدان مغناطیسی سرعت جریان و انتقال حرارت نانوسیال را کاهش می‌دهد. این در حالی است که وجود میدان مغناطیسی تولید آنتروپی را کاهش می‌دهد.

حاجی علی گل و همکارانش [۲۴] انتقال حرارت نانوسیال‌های آلومینا-آب و مس-آب را به صورت نظری در یک مبدل حرارتی

پوسته-لوله مطالعه کردند. پژوهشگران افزایش انتقال حرارت کلی در اثر استفاده از نانوسیال‌ها را گزارش کردند و نتیجه گرفتند که استفاده از نانوسیال مس-آب موجب انتقال حرارت بیشتری نسبت به نانوسیال آلومینا-آب می‌شود.

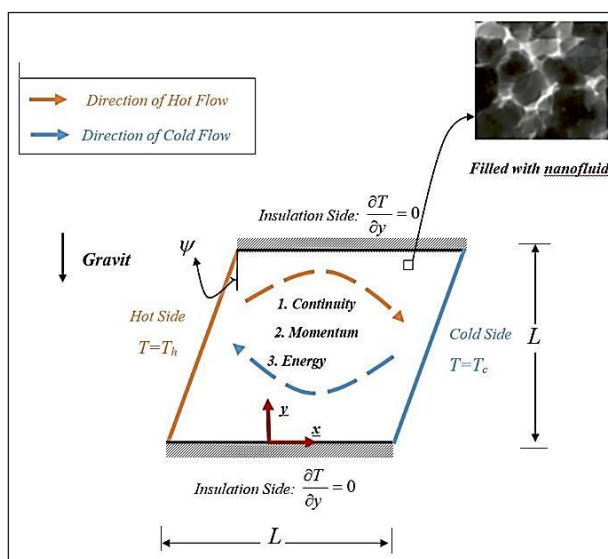
شهریاری [۲۵] در یک مطالعه نظری تأثیر استفاده از نانوسیال‌های آلومینا-آب و اکسید تیتانیوم-آب را بر انتقال حرارت درون یک محفظه بسته بررسی کرد. در پژوهش مذکور تأثیر قطر نانوذرات بر انتقال حرارت مورد توجه قرار گرفت و نتیجه‌های کاهش انتقال حرارت جابه‌جایی طبیعی با استفاده از نانوسیالات را نشان داد. هم‌چنین، نتیجه‌های پژوهش شهریاری نشان می‌دهد که استفاده از نانوذرات کوچک‌تر باعث کاهش بیشتر انتقال حرارت کلی درون محفظه می‌شود.

مرادی [۲۶] اثر زاویه شیب قرارگیری محفظه نسبت به زمین و نسبت مشخصه بر روی انتقال حرارت جابه‌جایی آزاد نانوسیالات آب-اکسید آلومینیم و آب-اکسید تیتانیوم را درون یک محفظه بسته استوانه‌ای شکل به صورت تجربی بررسی کرد. انتقال حرارت محفظه مورد مطالعه برای نسبت مشخصه‌های ۰٫۵، ۱ و ۱٫۵ برای غلظت ۰٫۲ نانوسیال آب-اکسید آلومینیم و غلظت ۰٫۱ نانوسیال آب-اکسید تیتانیوم و برای مقادیر متفاوت عدد رایلی بررسی شد. نتیجه‌ها نشان داد که استفاده از غلظت‌های بالاتر از ۱٫۰ درصد حجمی نانو ذرات آلومینیم اکسید باعث کاهش ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی آزاد شد. در تمام گستره عددهای رایلی بررسی شده، این روند کاهش ضریب انتقال حرارت (انتقال حرارت کلی) مشاهده شد. در مورد نانوذرات تیتانیوم روند تغییرات انتقال حرارت به غلظت نانوذرات اکسیدتیتانیوم بستگی دارد و بسته به شرایط محفظه می‌توان شاهد افزایش یا کاهش انتقال حرارت کلی در محفظه در اثر استفاده از نانوسیال بود.

ابوندا و اوزتاپ [۲۷] به‌صورت عددی و با استفاده از روش تک‌فازی، اثر زاویه انحراف را روی انتقال حرارت جابه‌جایی طبیعی و جریان سیال، مطالعه کردند. حل آن‌ها به صورت دو بعدی است و هم‌چنین از نانوسیال آب-مس بهره بردند. پژوهشگران دریافتند

1. Skew angle

پایای یک نانوسیال نیوتنی در یک محفظه بسته چهار ضلعی پر شده از نانوسیال بررسی شد. سیال درون محفظه، تراکم ناپذیر، و جریان نیز به صورت دو بعدی فرض شد. طول و ارتفاع محفظه بسته به ترتیب به اندازه L و H در نظر گرفته شده‌اند. دیواره‌های عمودی سمت چپ و سمت راست محفظه به ترتیب در دمای ثابت T_c و T_h قرار دارند که دمای T_h بزرگ‌تر از دمای T_c است. ضمن این که دیواره‌های افقی بالا و پایین محفظه عایق فرض شده‌اند. شکل ۱ هندسه، سامانه مختصات و شرایط مرزی را به صورت شماتیک نشان می‌دهد.



شکل ۱ دیاگرام شماتیک از مدل فیزیکی

فرض می‌شود که در هنگام ساخت نانوسیال، نانوذرات به خوبی در سیال پایه پخش شده باشند و سیال پایه و نانوذرات یک مخلوط کاملاً همگن را تشکیل می‌دهند. با صرف نظر از عوامل غیریکنواخت‌کننده نانوذرات در سیال پایه، نانوسیال همگن فرض شده و از لغزش نسبی میان نانوذرات و سیال پایه صرف نظر می‌شود. به دنبال مطالعه حسین و حسین [۱۶] و پژوهش قهوه‌چی [۷] و با در نظر گرفتن فرض بوزینسک، معادله پیوستگی، مومنتوم (در راستای افقی و عمودی) و حرارت به ترتیب به شکل زیر نوشته

1. Aspect ratio

2. Optimization

که که اثر غلظت نانوذرات بر روی عدد ناسلت در کسر حجمی بالا نسبت به کسر حجمی پایین، بارزتر است.

بررسی پژوهش‌هایی که تأثیر نسبت متناظر^۱ [۱۴، ۱۶ و ۲۸] و یا زاویه انحراف هندسی محفظه [۱۶ تا ۱۹ و ۲۷] را بر انتقال حرارت جابه‌جایی طبیعی در محفظه‌های بسته چهارضلعی با ابعاد متفاوت را مطالعه کرده‌اند، نشان می‌دهد که تغییر عدد ناسلت بر حسب تغییر نسبت متناظر و یا زوایای انحراف هندسی محفظه به صورت یکنواخت نیست. بنابراین، انتظار می‌رود که در برخی مقادیر نسبت متناظر و زوایای انحراف هندسی محفظه نقاط بهینه انتقال حرارت وجود داشته باشد.

با وجود تلاش‌ها و پژوهش‌های انجام شده، چه در زمینه سیال خالص و چه در زمینه نانوسیال‌ها، تاکنون راهکاری برای یافتن زاویه انحراف و هم چنین نسبت متناظر، به منظور بیشینه شدن رسانش حرارتی کنکاش نشده است و در تمام پژوهش‌های انجام شده، زاویه‌های انحراف و نسبت‌های متناظر، به صورت دلخواه، بررسی شده‌اند. در واقع، هیچ یک از پژوهش‌ها، تاکنون به منظور یافتن انتقال حرارت بیشینه، هندسه محفظه بسته را مورد بهینه‌سازی^۲ قرار نداده‌اند. بهینه‌سازی و اصلاح هندسه محفظه متناسب با نانوسیال مورد استفاده، بحث جدیدی است که در هیچ یک از پژوهش‌های پیشین مورد توجه قرار نگرفته است.

هدف پژوهش حاضر، یافتن مقادیر بهینه نسبت متناظر ابعاد هندسه محفظه و زاویه انحراف هندسی محفظه به منظور بیشینه کردن انتقال حرارت از محفظه است. در ادامه، تأثیر استفاده از نانوسیال بر مقادیر بهینه نسبت متناظر ابعاد محفظه و زاویه انحراف هندسی محفظه بررسی خواهد شد.

معادلات مدل‌سازی انتقال حرارت آزاد محفظه

انتقال حرارت جابه‌جایی آزاد درون محفظه‌های بسته چهارضلعی به سبب کاربردش در صنعت یک موضوع هم به شمار می‌آید. طراحی محفظه‌ها به منظور بیشترین کارایی انتقال حرارت امری ضروری است. در پژوهش حاضر، انتقال حرارت جابه‌جایی طبیعی

می شوند:

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

$$\rho_{nf} (u^* \frac{\partial u^*}{\partial x^*} + v^* \frac{\partial u^*}{\partial y^*}) = -\frac{\partial P^*}{\partial x^*} + \mu_{nf} \left(\frac{\partial^2 u^*}{\partial x^{*2}} + \frac{\partial^2 u^*}{\partial y^{*2}} \right) \quad (۲)$$

$$\rho_{nf} (u^* \frac{\partial v^*}{\partial x^*} + v^* \frac{\partial v^*}{\partial y^*}) = -\frac{\partial P^*}{\partial y^*} + \mu_{nf} \left(\frac{\partial^2 v^*}{\partial x^{*2}} + \frac{\partial^2 v^*}{\partial y^{*2}} \right) + g \beta_{nf} (T - T_c) \quad (۳)$$

$$(\rho C_p)_{nf} \left(u^* \frac{\partial T}{\partial x^*} + v^* \frac{\partial T}{\partial y^*} \right) = (k_{nf}) \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^{*2}} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^{*2}} \right) \quad (۴)$$

منظور از روابط ذیل برای بی بعدسازی معادلات پیوستگی، مونتوم و حرارت استفاده می شود:

$$x = \frac{x^*}{L}, \quad y = \frac{y^*}{H}, \quad u = \frac{u^* L}{\alpha_{bf}}, \quad v = \frac{v^* H}{\alpha_{bf}},$$

$$\theta = \frac{T - T_c}{T_h - T_c}, \quad P = \frac{L^2 P^*}{\rho_{bf} \alpha_{bf}^2}, \quad P = \frac{H^2 P^*}{\rho_{bf} \alpha_{bf}^2} \quad (۶)$$

که در این جا x, y, u, v, p, θ به ترتیب تعاریف بی بعدی از مؤلفه افقی مکان، مؤلفه عمودی مکان، سرعت در راستای افق، سرعت در راستای عمود، فشار و دما هستند.

پس از بی بعدسازی معادلات (۱) تا (۴) شکل نهایی این معادلات به صورت زیر به دست آمده است:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (۷)$$

$$u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -\frac{\rho_{bf}}{\rho_{nf}} \frac{\partial P}{\partial x} + Pr \frac{\mu_{nf}}{\mu_{bf}} \frac{\rho_{bf}}{\rho_{nf}} \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) \quad (۸)$$

$$u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = -\frac{\rho_{bf}}{\rho_{nf}} \frac{\partial P}{\partial y} + Pr \frac{\mu_{nf}}{\mu_{bf}} \frac{\rho_{bf}}{\rho_{nf}} \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) + Pr \theta Ra \frac{(\rho \beta)_{nf}}{\rho_{nf} \beta_{bf}} \quad (۹)$$

$$u \frac{\partial \theta}{\partial x} + v \frac{\partial \theta}{\partial y} = \frac{\alpha_{nf}}{\alpha_{bf}} \left(\frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial y^2} \right) \quad (۱۰)$$

که در روابط بالا، چگالی نانوسیال، حاصل ضرب چگالی در ظرفیت حرارتی ویژه نانوسیال، حاصل ضرب چگالی در ضریب انبساط حجمی نانوسیال، نسبت ضریب پخش حرارتی نانوسیال به ضریب پخش حرارتی سیال پایه عبارت اند از:

$$\rho_{nf} = (1-C) \rho_{bf} + C \rho_p \quad (۱۱)$$

$$(\rho C_p)_{nf} = (1-C) (\rho C_p)_{bf} + C (\rho C_p)_p \quad (۱۲)$$

$$(\rho \beta)_{nf} = (1-C) (\rho \beta)_{bf} + C (\rho \beta)_p \quad (۱۳)$$

$$\frac{\alpha_{nf}}{\alpha_{bf}} = \frac{k_{nf}}{k_{bf}} \frac{(\rho C_p)_{bf}}{(\rho C_p)_{nf}} \quad (۱۴)$$

که در معادلات بالا x^*, y^*, u^*, v^* به ترتیب بیان گر مؤلفه افقی مکان، مؤلفه عمودی مکان، سرعت در راستای افق و سرعت در راستای عمود، در حالت با بُعد هستند. هم چنین دما، فشار، چگالی، لزجت دینامیک، ضریب رسانش حرارتی سیال پایه و ظرفیت حرارتی ویژه به ترتیب با $T, P, \mu_{nf}, \rho, (\rho C_p)$ و K_{nf} داده شده اند.

هم چنین باتوجه به مدلسازی مساله، شرایط مرزی برای معادلات (۱) تا (۴) به صورت زیر نوشته می شوند:

$$u^* (-L/2, y^*) = v^* (-L/2, y^*) = 0,$$

$$u^* (L/2, y^*) = v^* (L/2, y^*) = 0 \quad (الف-۵)$$

$$T (-L/2, y^*) = T_h, \quad T (L/2, y^*) = T_c \quad (ب-۵)$$

$$u^* (x^*, 0) = v^* (x^*, 0) = 0,$$

$$u^* (x^*, H) = v^* (x^*, H) = 0 \quad (پ-۵)$$

$$\frac{\partial T}{\partial y^*} \Big|_{(x^*, 0)} = 0, \quad \frac{\partial T}{\partial y^*} \Big|_{(x^*, H)} = 0 \quad (ج-۵)$$

در ادامه، برای راحتی در بررسی و حل معادلات فوق، معادلات حاکم به شکل بی بعد خود تبدیل خواهند شد.

در بی بعدسازی معادلات نسبت به خواص سیال پایه بی بعد خواهند شد تا نانوسیال نسبت به سیال پایه ارزیابی شود. بدین

و عامل لزجت دینامیک به طور عمومی از طریق نتیجه‌های آزمایشگاهی به دست می‌آیند. مقدار عامل‌های ضریب رسانش حرارتی و لزجت دینامیک با استفاده از نتیجه‌های تجربی ارائه شده در مطالعات پیشین برای رسانش حرارتی و لزجت دینامیک، در جدول ۱ پژوهش زرکی و همکارانش [۱۲] ارائه شده است. عدد بی‌بعد ناسلت به‌عنوان معیاری برای تعیین میزان انتقال حرارت در حالت موضعی به‌صورت زیر قابل محاسبه است:

$$Nu_{nf} = \frac{hH}{k_{bf}} \quad \text{و} \quad Nu_{nf,x} = -\frac{k_{nf}}{k_{bf}} \frac{\partial \theta}{\partial x} \Big|_{x=-\frac{1}{2}} \quad (19)$$

هم چنین عدد ناسلت متوسط با انتگرال‌گیری روی سطح دیواره سمت چپ به دست می‌آید:

$$Nu_{nf} = \int_{y=0}^{y=1} Nu_{nf,x} dy \quad (20)$$

به‌منظور ارزیابی انتقال حرارت محفظه‌های بسته با ابعاد متفاوت، می‌بایست عامل دیگری نیز به معادله‌های موجود افزوده شود. این عامل که نسبت متناظر نام دارد از تقسیم ارتفاع محفظه به طول محفظه به دست می‌آید و به شکل زیر تعریف می‌شود:

$$AR = \frac{H}{L} \quad (21)$$

جدول ۱ بررسی استقلال از شبکه برای نانوسیال آب- منیزیم اکسید در عدد رایلی ۱۰^۵

عدد ناسلت متوسط اندازه شبکه‌های متفاوت					
۵۰×۵۰	۱۰۰×۱۰۰	۲۰۰×۲۰۰	AR	ψ (deg)	C (%)
۲,۰۰۸	۱,۹۵۳	۱,۹۱۳	۰,۵	-۶۰	۰
۴,۷۲۵	۴,۷۲۲	۴,۷۲۱	۱,۰	۰	
۷,۰۱۵	۶,۹۹۲	۶,۹۷۹	۴,۰	+۶۰	
۱,۳۴۴	۱,۲۹۴	۱,۲۶۰	۰,۵	-۶۰	۱۰
۵,۳۵۲	۵,۳۵۰	۵,۳۵۰	۱,۰	۰	
۱۲,۴۰۸	۱۲,۳۳۶	۱۲,۳۲۴	۰,۴	+۶۰	

1. Weak form

در معادلات (۸) و (۹) Pr و Ra به‌ترتیب اعداد بی‌بعد رایلی و پراتل هستند که به صورت زیر نمایش داده می‌شوند:

$$Pr = \frac{\nu_{bf}}{\alpha_{bf}}, \quad Ra = \frac{g \beta \Delta T H^3}{\alpha_{bf} \nu_{bf}} \quad (15)$$

در این‌جا شرایط مرزی نیز به شکل بی‌بعدشان منتقل شده‌اند و به‌صورت زیر ارائه شده‌اند:

$$u(-0.5, y) = v(-0.5, y) = 0, \quad u(+0.5, y) = v(+0.5, y) = 0 \quad (16\text{-الف})$$

$$\theta(-0.5, y) = 1, \quad \theta(+0.5, y) = 0 \quad (16\text{-ب})$$

$$u(x, 0) = v(x, 0) = 0, \quad u(x, 1) = v(x, 1) = 0 \quad (16\text{-پ})$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial y} \Big|_{(x,0)} = 0, \quad \frac{\partial \theta}{\partial y} \Big|_{(x,1)} = 0 \quad (16\text{-ج})$$

در معادلات بی‌بعد (۷) تا (۱۰) برای محاسبه نسبت لزجت دینامیک و نسبت رسانش حرارتی از رابطه ارائه شده توسط زرکی و همکاران [۱۲] استفاده خواهد شد:

$$\frac{\mu_{nf}}{\mu_{bf}} = 1 + NvC \quad (17)$$

$$\frac{k_{nf}}{k_{bf}} = 1 + NcC \quad (18)$$

در روابط بالا، Nv و Nc عامل‌های بی‌بعدی هستند که به‌ترتیب عامل رسانش حرارتی و عامل لزجت دینامیک نام دارند [۱۲]. این عامل‌های بی‌بعد، به شکل نانوذرات، جنس نانوذرات، اندازه نانوذرات، دمای کارکرد نانوسیال و هم چنین نوع سیال پایه بستگی دارد و با تغییر هر یک از این موارد مقدار این عامل‌ها تغییر خواهند کرد. به عبارت دیگر در هر شرایط خاص، این عامل‌ها دارای مقدار مختص به آن شرایط هستند. عامل رسانایی حرارتی

$$u \approx \sum_{k=1}^N u_k \xi_k(x, y),$$

$$v \approx \sum_{k=1}^N v_k \xi_k(x, y), \theta \approx \sum_{k=1}^N \theta_k \xi_k(x, y) \quad (25)$$

ذکر این نکته حائز اهمیت است که توابع پایه برای سرعت‌ها و دما یکسان است و بنابراین، مجموع تعداد گره‌های متغیرها برابر N است. با استناد به روش المان محدود، باقی‌مانده‌های غیرخطی برای معادله‌های مومنتوم و انرژی در گره‌های درونی برابرند با:

$$R_i^1 = \sum_{k=1}^N u_k \int_{\Omega} \left[\left(\sum_{k=1}^N u_k \xi_k \right) \frac{\partial \xi_k}{\partial x} + \left(\sum_{k=1}^N v_k \xi_k \right) \frac{\partial \xi_k}{\partial y} \right] \xi_i dx dy$$

$$+ \gamma \frac{\rho_{bf}}{\rho_{nf}} \sum_{k=1}^N u_k \int_{\Omega} \frac{\partial \xi_i}{\partial x} \frac{\partial \xi_k}{\partial x} dx dy$$

$$+ \gamma \frac{\rho_{bf}}{\rho_{nf}} \sum_{k=1}^N v_k \int_{\Omega} \frac{\partial \xi_i}{\partial x} \frac{\partial \xi_k}{\partial y} dx dy$$

$$+ Pr \sum_{k=1}^N u_k \int_{\Omega} \left[\frac{\partial \xi_i}{\partial x} \frac{\partial \xi_k}{\partial x} + \frac{\partial \xi_i}{\partial y} \frac{\partial \xi_k}{\partial y} \right] dx dy \quad (26)$$

$$R_i^2 = \sum_{k=1}^N v_k \int_{\Omega} \left[\left(\sum_{k=1}^N u_k \xi_k \right) \frac{\partial \xi_k}{\partial x} + \left(\sum_{k=1}^N v_k \xi_k \right) \frac{\partial \xi_k}{\partial y} \right] \xi_i dx dy$$

$$+ \gamma \frac{\rho_{bf}}{\rho_{nf}} \sum_{k=1}^N u_k \int_{\Omega} \frac{\partial \xi_i}{\partial y} \frac{\partial \xi_k}{\partial x} dx dy$$

$$+ \gamma \frac{\rho_{bf}}{\rho_{nf}} \sum_{k=1}^N v_k \int_{\Omega} \frac{\partial \xi_i}{\partial y} \frac{\partial \xi_k}{\partial y} dx dy$$

$$+ Pr \sum_{k=1}^N v_k \int_{\Omega} \left[\frac{\partial \xi_i}{\partial x} \frac{\partial \xi_k}{\partial x} + \frac{\partial \xi_i}{\partial y} \frac{\partial \xi_k}{\partial y} \right] dx dy$$

$$+ Ra Pr \int_{\Omega} \left(\sum_{k=1}^N \theta_k \xi_k \right) \xi_i dx dy \quad (27)$$

$$R_i^3 = \sum_{k=1}^N \theta_k \int_{\Omega} \left[\left(\sum_{k=1}^N u_k \xi_k \right) \frac{\partial \xi_k}{\partial x} + \left(\sum_{k=1}^N v_k \xi_k \right) \frac{\partial \xi_k}{\partial y} \right] \xi_i dx dy$$

$$+ \sum_{k=1}^N \theta_k \int_{\Omega} \left[\frac{\partial \xi_i}{\partial x} \frac{\partial \xi_k}{\partial x} + \frac{\partial \xi_i}{\partial y} \frac{\partial \xi_k}{\partial y} \right] dx dy \quad (28)$$

محاسبات، برای مقدار باقی‌مانده کمتر از 10^{-7} برای هر معادله

روش حل معادلات مدل‌سازی انتقال حرارت

گروه معادلات دیفرانسیل پاره‌ای حاکم در سامانه بسته، یعنی معادله‌های پیوستگی، مومنتوم و انرژی با درنظر گرفتن شرایط مرزی در دیواره‌ها، از طریق کدنویسی به روش المان محدود حل شدند. بدین منظور معادله‌های یاد شده در شکل ضعیف^۱ فرمول‌بندی شدند. معادله پیوستگی به عنوان یک قید برای تأیید قانون بقای جرم به کار رفته است. از این‌رو، این قید برای معادله پیوستگی به عنوان یک عامل جریمه (γ) در معادله‌های مومنتوم، در نظر گرفته شده است. بنابراین ترم فشار در معادله‌های مومنتوم را می‌توان به شکل زیر نوشت [۲۹]:

$$P = -\gamma \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right) \quad (22)$$

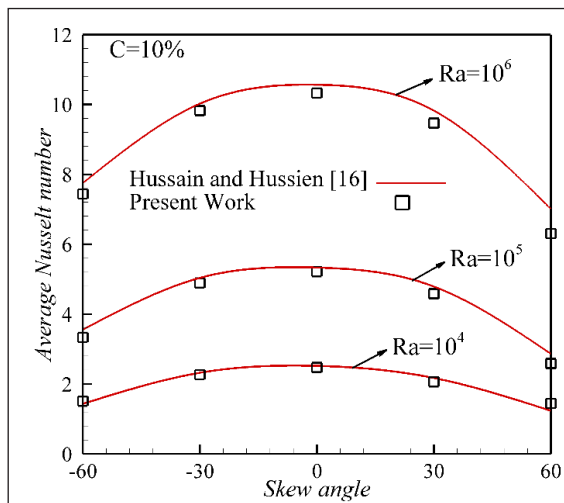
با استفاده از معادله بالا، معادلات مومنتوم در جهت افقی و عمودی به شکل زیر نائل می‌آیند:

$$\frac{\partial u}{\partial \tau} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = \frac{\rho_{bf}}{\rho_{nf}} \gamma \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right) + Pr \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) \quad (23)$$

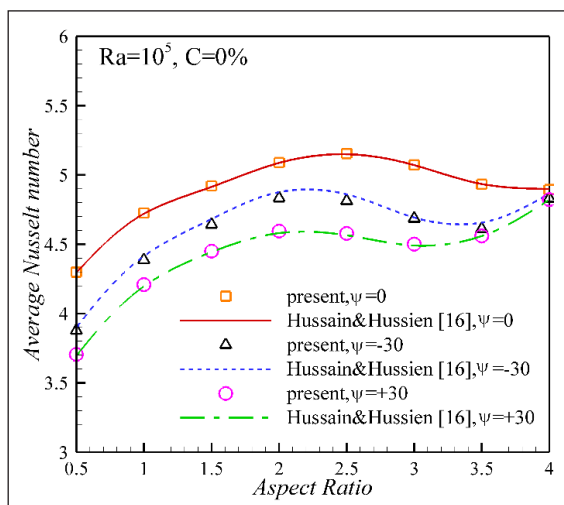
$$\frac{\partial v}{\partial \tau} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = \frac{\rho_{bf}}{\rho_{nf}} \gamma \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right) + Pr \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) + \frac{(\rho\beta)_{nf}}{\rho_{nf} \beta_{bf}} (Ra Pr \theta) \quad (24)$$

بنابراین، در معادله‌های بالا برای مقادیر بسیار زیاد عامل جریمه ($\gamma=10^7$)، معادله پیوستگی تأیید می‌شود [۳۰]. از آن‌جا که سرعت‌های جابه‌جایی طبیعی مقادیر کوچکی هستند، انتخاب یک عدد بسیار بزرگ برای γ منجر به تأیید معادله پیوستگی با خطای بسیار کوچک می‌شود. در پژوهش حاضر، به پیروی از مطالعه‌های پیشین [۳۰] مقدار معمول $\gamma=10^7$ انتخاب شد. حال سرعت‌های افقی و عمودی و هم‌چنین دما را نیز می‌توان به صورت یک سری به شکل زیر در بازه‌های $-0.5 < x < 0.5$ و $0 < y < 1$ بسط داد.

وجود نقاط بهینه در شکل‌های ۲ و ۳ که بر اساس عامل‌های هندسی محافظه ترسیم شده‌اند مشهود است. این نقاط با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی مورد استفاده نیز به خوبی و با دقت سه رقم اعشار کنکاش شدند. بنابراین، از صحت عملکرد و همگرایی الگوریتم بهینه‌سازی اطمینان ایجاد شد.



شکل ۲ اعتبارسنجی عدد ناسلت متوسط برای نانوسیال آب-مس در زوایای انحراف متفاوت در مقابل کار حسین و حسین [۱۶]



شکل ۳ اعتبارسنجی عدد ناسلت متوسط در نسبت‌های متناظر گوناگون در مقابل پژوهش حسین و حسین [۱۶]

ادامه یافته‌اند. جزئیات بیشتر در مورد کد عددی استفاده شده در مراجع [۲۹ و ۳۰] وجود دارد و بنابراین، در اینجا تکرار نشده است. فرایند حل، در قالب یک کد حل کامپیوتری^۱ در نرم افزار متلب^۲ پیاده شده است که دقت این کد در بخش‌های بعدی (بخش مربوط به نتیجه‌ها و بحث) و در مقایسه با کار دیگران بررسی شده است.

از آنجا که یافتن مقدارهای بی‌بعد بهینه هندسی محافظه از اهداف پژوهش حاضر است. کد عددی حاضر به صورت توابعی در نرم افزار متلب نگاهشده شد تا با استفاده از نتیجه‌ها حل عددی دینامیک سیالات محاسباتی و لینک کردن نتیجه‌ها با یک کد الگوریتم بهینه‌سازی بتوان مقادیر بهینه ابعاد محافظه را محاسبه کرد.

در پژوهش حاضر از الگوریتم بهینه‌سازی نلد-مید^۳ بهره گرفته شده است. این حل‌کننده در زمره الگوریتم‌هایی قرار می‌گیرد که در آن‌ها بدون مشتق‌گیری از تابع هدف، پاسخ مورد نظر یافت می‌شود. الگوریتم نلد-مید به ازای N تعداد متغیر کنترلی، یک ساختار (در دو بُعد به صورت چندضلعی و در سه بعد و بالاتر به شکل چند وجهی) ساده^۴ با N+1 نقطه تولید می‌کند [۳۱].

برای مثال، اگر فضای جست‌وجو برای دو متغیر کنترلی تولید شده باشد، یک مثلث ایجاد می‌شود. ساختار ایجاد شده از N+1 نقطه در فضای جست‌وجو استفاده کرده و به منظور رسیدن به هدف مورد نظر شروع به حرکت در مسیرهای متفاوت می‌کند. این الگوریتم همانند دیگر الگوریتم‌های بهینه‌سازی غیر وابسته به مشتق دارای عملگرهایی است که مسئول این حرکت‌ها هستند و از جمله این عملگرها می‌توان به بازتاب، انبساط و انقباض اشاره کرد [۳۲ و ۳۳]. برای مثال، عملگر بازتاب به بهبود وضعیت بدترین نقطه موجود در ساختار ساده ایجاد شده کمک می‌کند و باعث تغییر موقعیت این نقطه می‌شود. هم چنین عملگرهای انبساط و انقباض، با کوچک و بزرگ کردن اندازه اضلاع ساختار ساده ایجاد شده، باعث نزدیک شدن به هدف مورد نظر می‌شوند. اطلاعات بیشتر در مورد الگوریتم نلد-مید در مراجع [۳۲ و ۳۳] بیان شده است.

1. Computer solution code

2. Matlab

3. Nelder-Mead

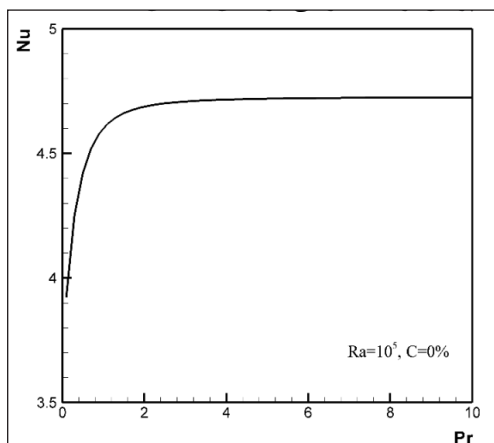
4. Simplex

اعتبارسنجی داده‌های مدل‌سازی

شده‌اند. بهینه‌سازی نیز با هدف به بیشترین مقدار رساندن انتقال حرارت، انجام شده است. در واقع، هدف یافتن عدد ناسلت متوسط بیشینه و مقدارهای نسبت متناظر (AR) و زاویه انحراف (ψ) محفظه با ناسلت بهینه است. برای نسبت متناظر گستره‌ای از ۰٫۵ تا ۴ و برای زاویه انحراف گستره‌ای از مثبت ۳۰ درجه تا منفی ۳۰ درجه در نظر گرفته شده است.

تحلیل بی‌بعد

با در نظر گرفتن ویژگی نانوسیال و سیال پایه و یک محاسبه ساده می‌توان دریافت که نسبت‌های ρ_{nf}/ρ_{bf} و $(\rho C_p)_{nf}/(\rho C_p)_{bf}$ به طور عموم برای نانوسیال‌های متفاوتی نزدیک عدد واحد ۱ به دست می‌آیند [۱۲]. برای مثال، این نسبت‌ها با در نظر گرفتن ویژگی ارائه شده برای نانوسیال در جدول ۲ و برای کسر حجمی ۲٪ از نانوذرات منیزیم اکسید در سیال پایه آب، به ترتیب ۱٫۰۵ و ۰٫۹۸ محاسبه می‌شوند. بنابراین، نسبت‌های ρ_{nf}/ρ_{bf} و $(\rho C_p)_{nf}/(\rho C_p)_{bf}$ به منظور ساده‌سازی کار، معادل با عدد واحد ۱، در نظر گرفته شده‌اند. در واقع تغییر چگالی و ظرفیت حرارتی نانوسیال نسبت به سیال پایه کم است و از این تأثیر می‌توان صرف نظر کرد. به دنبال مطالعه زرکی و همکارانش [۱۲] برای اعداد بی‌بعد رسانش حرارتی و لزجت دینامیک گستره ۴ تا ۱۶ در نظر گرفته شده است. تغییرات عدد پراتل بر حسب رایلی در شکل ۴ نشان داده شده است.



شکل ۴ تأثیر تغییرات عدد پراتل بر انتقال حرارت (عدد ناسلت) در محفظه

به منظور راستی آزمایی نتیجه‌های به دست آمده در پژوهش حاضر، ابتدا نتیجه‌های به دست آمده با نتیجه پژوهش‌های معتبر پیشین مقایسه شد. در شکل‌های ۲ و ۳، مقایسه بین اعداد ناسلت متوسط در زوایای انحراف و نسبت‌های متناظر متفاوت، در پژوهش حاضر و پژوهش حسین و حسین [۱۶] انجام شده است. مقایسه ایجاد شده در شکل ۲، برای کسر حجمی ۱۰٪ از نانوذرات مس در سیال پایه آب، اجرا شده و مقایسه ایجاد شده در شکل ۳، برای سیال خالص آب صورت گرفته است. نتیجه‌های حاصل شده در شکل‌های ۲ و ۳، دارای تطابق مناسبی با نتیجه گزارش شده توسط حسین و حسین [۱۶] دارند. حسین و حسین [۱۶] در پژوهش خود از روابط ماکسول و برینکمن برای ارزیابی نسبت رسانش حرارتی و نسبت لزجت دینامیک استفاده کردند. هم چنین با توجه به این که در پژوهش حاضر از رابطه‌های (۱۵) و (۱۶) برای محاسبه نسبت لزجت دینامیک و نسبت رسانش حرارتی استفاده شده؛ برای عامل‌های رسانش حرارتی و لزجت دینامیک مقدارهایی معادل با روابط ماکسول و برینکمن در نظر گرفته شده است.

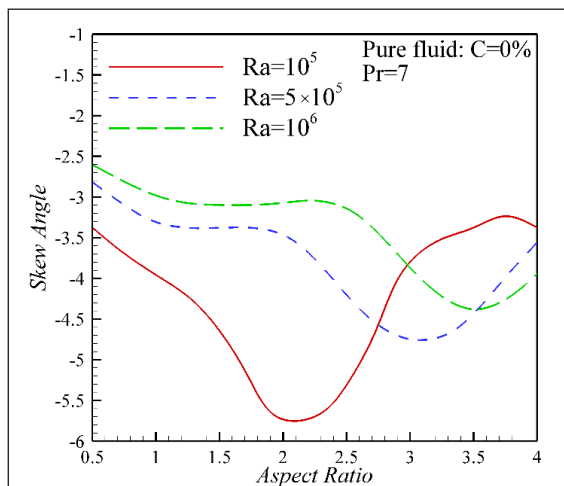
استقلال از شبکه

به منظور اطمینان از استقلال شبکه حل، محاسبات برای چند اندازه شبکه متفاوت اجرا شده‌اند. مقدارهای عدد ناسلت متوسط برای سه اندازه شبکه ۵۰×۵۰، ۱۰۰×۱۰۰، ۲۰۰×۲۰۰ و هم چنین کسرهای حجمی متفاوتی از نانوذرات، به دست آمده‌اند. مقدارهای به دست آمده در جدول ۱ نمایش داده شده‌اند. همان طور که در جدول ۱ نشان داده شده، اندازه شبکه ۱۰۰×۱۰۰ دارای دقت مناسبی است. بنابراین، از این اندازه شبکه برای محاسبات استفاده شده است.

نتیجه‌ها و بحث

در این بخش به بهینه‌سازی هندسه محفظه بسته چهارضلعی پرداخته شده است. بدین منظور دو عامل نسبت متناظر (AR) و زاویه انحراف (ψ) به عنوان متغیرهای بهینه‌سازی در نظر گرفته

انحراف منفی $3/4$ درجه و در عدد رایلی 10^6 نیاز به ایجاد زاویه انحراف منفی 3 درجه است. بنابراین، افزایش عدد رایلی موجب کاهش زاویه انحراف در دیواره‌های عمودی می‌شود. هم‌چنین با استفاده از شکل 6 می‌توان دریافت که اعداد ناسلت متوسط بیشینه متناظر با $AR=2$ در سه عدد رایلی 10^5 ، 5×10^5 و 10^6 به ترتیب برابر 5 ، $7/8$ و $9/5$ هستند.



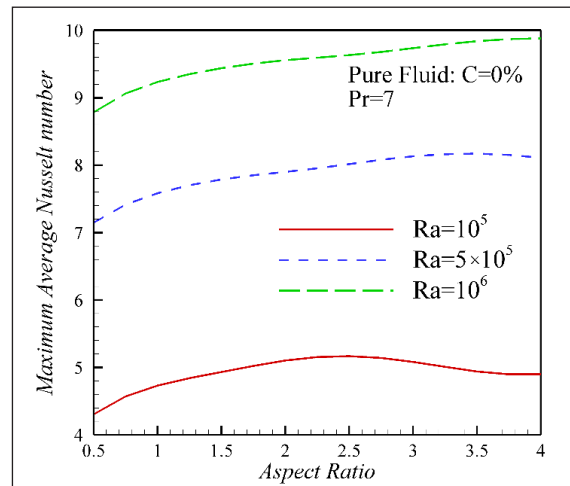
شکل ۵ زاویه انحراف (ψ) به‌عنوان تابعی از نسبت متناظر (AR) برای سیال خالص در اعداد رایلی متفاوت

در شکل 6 عدد ناسلت متوسط بیشینه در سه عدد رایلی متفاوت بر حسب نسبت متناظر ترسیم شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در هر منحنی از عدد رایلی، حداکثر انتقال حرارت بیشینه در یک مقدار مشخص از نسبت متناظر رخ داده است. اما آنچه که مسلم است، با افزایش عدد رایلی، بیشترین انتقال حرارت بیشینه در نسبت‌های متناظر بزرگ‌تری روی داده است. در منحنی رایلی 10^5 ، بیشترین انتقال حرارت بیشینه در نسبت متناظر $2/25$ ، برای منحنی رایلی 5×10^5 ، بیشترین انتقال حرارت بیشینه در حدود نسبت متناظر $3/5$ و برای منحنی رایلی 10^6 ، بیشترین انتقال حرارت بیشینه در نسبت متناظر 4 اتفاق افتاده است. این درحالی است که برای هر سه منحنی رایلی، کمترین انتقال حرارت بیشینه در نسبت متناظر $0/5$ به دست آمده است. در واقع بسته به قدرت ساز و کارهای انتقال حرارت جابه‌جایی (مقدار غلبه بر نیروهای

بررسی تغییرات ناسلت بر حسب تغییرات عدد پراتل نشان می‌دهد که تغییرات عدد پراتل برای اعداد پراتل کوچک‌تر از هفت بر تغییرات عدد ناسلت (مشخصه انتقال حرارت کلی بی‌بعد در محفظه) تأثیر معنادار دارد. ولی افزایش عدد پراتل به مقدارهای بالاتر از هفت تأثیر معناداری بر تغییرات عدد ناسلت نشان نمی‌دهد. از آنجا که عدد پراتل اغلب سیال‌ها پایه (مایع) و نانوسیال‌ها در حدود هفت یا بالاتر است، عدد پراتل 7 برای بیان نتیجه‌های ناسلت در نظر گرفته شد. بنابراین، نتیجه‌های مربوط به سیال خالص با عدد پراتل برابر 7 مورد ارزیابی قرار گرفت (شکل‌های 5 تا 8) و سپس به بررسی نتیجه‌های مربوط به نانوسیال پرداخته شد (شکل‌های 9 تا 12). در ارائه نتیجه‌ها، زاویه انحراف (ψ) به‌عنوان متغیر بهینه‌سازی در گستره‌ی تعیین شده برای مقدار دلخواهی از نسبت متناظر (AR) بررسی شد. سپس، نسبت متناظر (AR) به‌عنوان متغیر بهینه‌سازی در نظر گرفته شد و مقدار بهینه این عامل برای مقدارهای دلخواهی از زاویه انحراف (ψ) محاسبه شد.

شکل‌های 5 تا 8 نتیجه‌های بهینه‌سازی را برای سیال خالص نشان می‌دهند. شکل 5 زاویه انحراف دیواره عمودی را به‌عنوان تابعی از نسبت متناظر در سه عدد رایلی متفاوت نشان می‌دهد. برای استفاده از شکل 5 بدین صورت عمل می‌شود که در هر نسبت متناظر دلخواه (در بازه تعریف شده) و در اعداد رایلی تعیین شده، می‌توان زاویه انحرافی را یافت که طی آن، عدد ناسلت متوسط به مقدار بیشینه خود نائل آید. عدد منفی برای زوایای انحراف ایجاد شده بیان‌گر تمایل دیواره‌های عمودی به سمت چپ است. دلیل این امر گرم بودن دیواره سمت چپ نسبت به دیواره سمت راست در نسبت‌های متناظر متفاوت است. چنان‌که مشخص است، با افزایش عدد رایلی دامنه تغییرات زوایای انحراف کاهش یافته است. در واقع با افزایش عدد رایلی، مقدار نیروهای حجمی (شناوری) روی دیواره گرم افزایش یافته و در زاویه‌های انحراف کوچک‌تری، مقدار بیشینه انتقال حرارت به دست می‌آید. برای مثال، به‌منظور دستیابی به بیشترین مقدار انتقال حرارت در نسبت متناظر $AR=2$ در عدد رایلی 10^5 ، نیاز به ایجاد زاویه انحراف منفی 6 درجه، در عدد رایلی 5×10^5 نیاز به ایجاد زاویه

لزجت) و مقدار فاصله دو دیواره عمودی از هم (نسبت متناظر)، بیشترین انتقال حرارت در محفظه بسته، متغیر است. بنابراین، بسته به مقدار عدد رایلی، دستیابی به بیشترین انتقال حرارت پیشینه تا یک مقدار مشخص از نسبت متناظر تأیید می‌شود و پس از آن مقدار از نسبت متناظر، کاهش انتقال حرارت پیشینه انتظار می‌رود.



شکل ۶ عدد ناسلت متوسط پیشینه (Nu_{max})، به عنوان تابعی از نسبت متناظر (AR) برای سیال خالص

شکل ۷، نسبت متناظر را به عنوان تابعی از زاویه انحراف در سه عدد رایلی، نشان می‌دهد. در اینجا متغیر بهینه‌سازی، نسبت متناظر است و در زاویه‌های انحراف متفاوت (در محدوده مشخص شده) مورد بررسی قرار گرفته است. به عبارت دیگر، در هر زاویه دلخواه می‌توان نسبت متناظری را انتخاب کرد که طی آن، مقدار انتقال حرارت متوسط، پیشینه شود. همان‌طور که در شکل ۷ مشاهده می‌شود، با فاصله گرفتن از زاویه صفر درجه، مقدار نسبت متناظر به صورت قرینه کاهش یافته است. در واقع در محفظه‌های بسته با هندسه متوازی الاضلاع، سرعت چرخش جریان کاهش می‌یابد. چرا که محفظه‌های متوازی الاضلاعی دارای گوشه‌هایی با زاویه تند ($90^\circ < \theta$) هستند؛ از این رو، ایجاد زاویه در مجاورت دیواره‌های عمودی محفظه (چه به سمت چپ و چه به سمت راست)، موجب ایجاد زوایای تند در مقابل همدیگر می‌شود.

به‌منظور پوشش این ضعف و بهبود مقدار انتقال حرارت، هندسه محفظه بسته به سمت عریض‌تر شدن میل می‌کند؛ که این امر کاهش نسبت متناظر را در پی دارد. بنابراین، هم در زاویه‌های مثبت و هم در زاویه‌های منفی، نسبت متناظر به مقدار یکسانی کاهش یافته است و از این رو موجب قرینه شدن مقدار نسبت متناظر، نسبت به زاویه صفر شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، برای مثال، مقدار نسبت متناظر در عدد رایلی 5×10^5 برای زاویه‌های انحراف منفی و مثبت 10° درجه، یکسان و برابر 3.4 است. هم چنین مقدار نسبت متناظر برای زاویه انحراف صفر درجه در اعداد رایلی 10^5 ، 5×10^5 و 10^6 ، به ترتیب مساوی 2.5 ، 3.5 و 4 است و در همین اعداد رایلی و زاویه انحراف، عدد ناسلت متوسط پیشینه برابر 5.1 ، 8.1 و 9.8 ارزیابی شده است (شکل ۸). از این رو افزایش عدد رایلی موجب افزایش نسبت متناظر می‌شود. شکل ۸، عدد ناسلت متوسط پیشینه متناظر با هر زاویه انحراف را نشان می‌دهد. در اینجا نیز نتیجه‌ها در سه عدد رایلی به دست آمده است. چنان‌که مشاهده می‌شود میزان عدد ناسلت متوسط پیشینه، با افزایش عدد رایلی افزایش یافته است. اما افزایش عدد رایلی بر خلاف منحنی‌های نسبت متناظر (شکل‌های ۵ و ۶)، باعث تغییر الگوی منحنی‌ها نشده است. در واقع حداکثر مقدار انتقال حرارت پیشینه در هر منحنی از عدد رایلی در نزدیکی زاویه صفر درجه رخ داده است. هم چنین این منحنی‌ها نسبت به زاویه صفر درجه قرینه نیستند و عدد ناسلت متوسط پیشینه در زاویه‌های منفی دارای مقداری بیشتر از عدد ناسلت متوسط پیشینه در زاویه‌های مثبت است. در اینجا عدد ناسلت متوسط همواره به‌صورت عمود بر دیواره مورد نظر محاسبه می‌شود، لذا می‌بایست گرادیان دما بر حسب کسینوس زاویه انحراف محاسبه شود و از آن‌جایی که کسینوس، یک تابع زوج به شمار می‌آید، کسینوس زاویه‌های مثبت و زاویه‌های منفی همواره مقدار یکسانی می‌شوند. اما گرادیان حرارتی ایجاد شده در زاویه‌های منفی نسبت به زاویه‌های مثبت بیشتر است، از این رو، عدد ناسلت متوسط پیشینه در زاویه‌های منفی دارای مقدار بیشتری از عدد ناسلت متوسط پیشینه در زاویه‌های مثبت است و به علت این که مقدار کسینوس

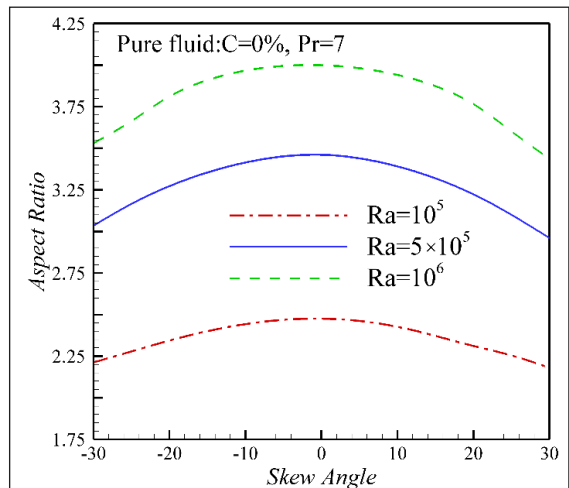
مقدارهای متفاوت عامل‌های رسانش حرارتی (Nc) و لزجت دینامیک (Nv) و در کسر حجمی ۵٪ از نانوذرات ترسیم شده است.

در شکل ۹، زاویه انحراف (متغیر بهینه‌سازی)، به صورت تابعی از نسبت متناظر نشان داده شده است. همان‌طور که مشخص است بیشترین زاویه انحراف، به طور تقریب در حدود نسبت متناظر ۲٫۵ رخ داده است، اما دامنه تغییرات زاویه برای این چهار منحنی متفاوت است؛ هرچند مقدار این تفاوت‌ها بسیار کم است. منحنی مربوط به عامل‌های $Nc=Nv=4$ ، دارای بیشترین زاویه انحراف منفی ۵ درجه است و منحنی مربوط به عامل‌های $Nc=16$ و $Nv=4$ بیشترین زاویه انحراف منفی ۵٫۵ درجه است. در شکل ۴، مشاهده شد که بیشترین زاویه انحراف برای عدد رایلی 5×10^5 به تقریب در منفی ۵ درجه و بین نسبت‌های متناظر ۲٫۵ تا ۳ اتفاق افتاده است. در شکل ۹ نیز چنین الگویی برای زاویه‌های انحراف و نسبت متناظر وجود دارد و همان‌طور که بیان شد بیشترین زاویه انحراف در نهایت تا زاویه منفی ۵٫۵ درجه است که نسبت به منحنی سیال خالص (شکل ۵) چندان تغییری به وجود نیامده است. از این‌رو، می‌توان نتیجه گرفت که استفاده از نانوسیال‌های متفاوت در یک عدد رایلی ثابت و هم چنین نسبت متناظر مشخص، چندان بر روی زوایای انحراف تأثیرگذار نیستند.

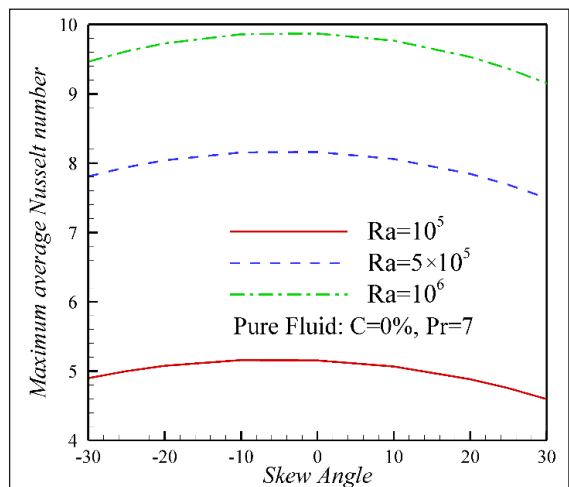
اما اهمیت عامل رسانش حرارتی و لزجت دینامیک در شکل ۱۰ آشکار شده است. چنان‌که مشخص است در کسر حجمی ۵٪ از نانوذرات و در عدد رایلی 5×10^5 افزایش مقدار پارامتر رسانش حرارتی و کاهش مقدار لزجت دینامیک موجب افزایش عدد ناسلت متوسط بیشینه شده است. از این‌رو، منحنی مربوط به پارامترهای $Nc=16$ و $Nv=4$ بیشتر موجب افزایش عدد ناسلت متوسط بیشینه شده است. در عوض منحنی مربوط به عامل‌های $Nv=16$ و $Nc=4$ دارای کمترین اعداد ناسلت متوسط بیشینه است. ضمن این‌که دو منحنی $Nv=Nc=8$ و هم چنین $Nv=Nc=4$ نیز در بین دو منحنی یاد شده قرار گرفته‌اند.

هم چنین ذکر این نکته حائز اهمیت است که الگوی هر منحنی که در واقع می‌تواند الگوی هر نانوسیال باشد در یک

زاویه صفر درجه (و در نتیجه سطح عمود برای انتقال حرارت) بیشتر از زاویه‌های دیگر است، همواره بیشترین انتقال حرارت بیشینه در نزدیکی زاویه صفر (کمی متمایل به زاویه‌های منفی) رخ داده است.



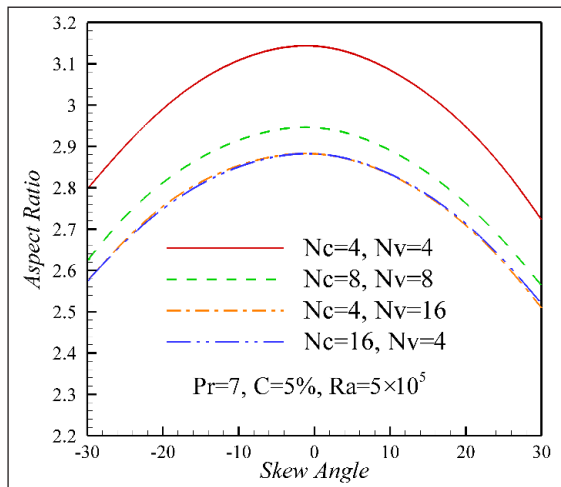
شکل ۷ نسبت متناظر (AR) به عنوان تابعی از زاویه انحراف (ψ) برای سیال خالص در اعداد رایلی متفاوت



شکل ۸ عدد ناسلت متوسط بیشینه (Nu_{max}) به عنوان تابعی از زاویه انحراف (ψ) برای سیال خالص

در شکل‌های ۹ تا ۱۲، نتیجه‌های بهینه‌سازی محفظه‌های بسته چهارضلعی پر شده از نانوسیال در عدد رایلی 5×10^5 برای

شکل ۱۱، نسبت متناظر محفظه بسته را به‌عنوان تابعی از زاویه انحراف دیواره‌های عمودی نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود در این‌جا نیز عدد رایلی برابر 5×10^5 و کسر حجمی نانوذرات ۵٪ است. چنان‌که مشخص است با تغییر عامل‌های رسانش حرارتی (Nc) و لزجت دینامیک (Nv)، مقدار نسبت متناظر با حفظ الگو، کاهش یافته است. به طوری که بیشترین تفاوت نسبت متناظر بین منحنی سیال پایه و منحنی نانوسیال کمتر از $AR < 0.5$ است. بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که وجود نانوسیال‌های متفاوت درون محفظه‌های بسته چندان نمی‌تواند باعث تغییر نسبت‌های متناظر در زاویه‌های دلخواه شوند.

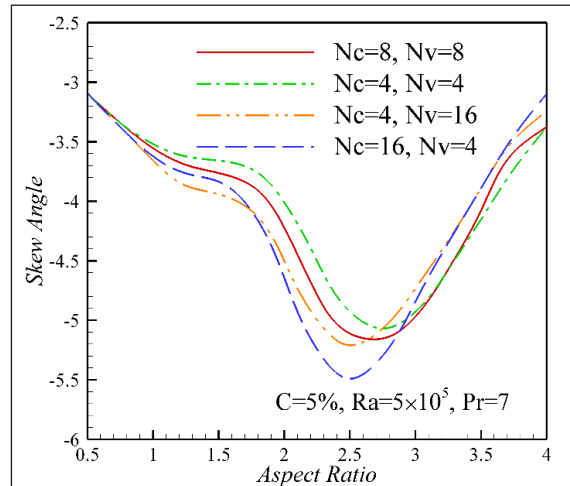


شکل ۱۱ نسبت متناظر (AR) به‌عنوان تابعی از زاویه‌های انحراف (ψ) در عامل‌های رسانش حرارتی (Nc) و لزجت دینامیک (Nv) متفاوت

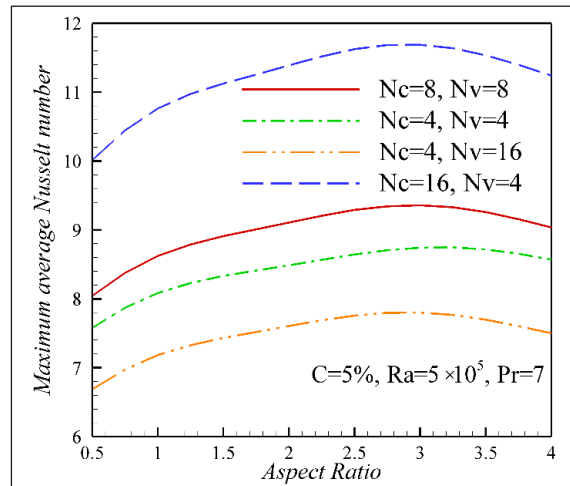
شکل ۱۲، اعداد ناسلت متوسط پیشینه متناظر با زوایای انحراف را نشان می‌دهد. در این‌جا نیز بیشترین انتقال حرارت پیشینه در هر منحنی در نزدیکی زاویه صفر رخ داده است. در واقع در اعداد رایلی بالا، تأثیر عامل لزجت، کاهش می‌یابد. از این‌رو، منحنی‌های شکل ۱۲ نیز از این قاعده جدا نیستند.

در کل وجود نانوسیال‌های متفاوت در یک محفظه بسته و در یک عدد رایلی مشخص، نه آن‌چنان باعث تغییرات زیادی در نسبت متناظر می‌شوند و نه تغییرات زیادی در زوایای متفاوت

عدد رایلی ثابت، بدون تغییر باقی می‌ماند و این الگو برای سیال خالص و نانوسیال‌های متفاوت به تقریب یکسان است. این امر در شکل‌های ۱۱ و ۱۲ نیز قابل رؤیت است و الگوهای به‌دست آمده برای نانوسیال‌های متفاوت بسیار شبیه الگوهای سیال خالص هستند (در یک عدد رایلی ثابت).



شکل ۹ زاویه‌های انحراف (ψ) به‌عنوان تابعی از نسبت متناظر (AR) در مقدارهای متفاوت عامل‌های رسانش حرارتی (Nc) و لزجت دینامیک (Nv).

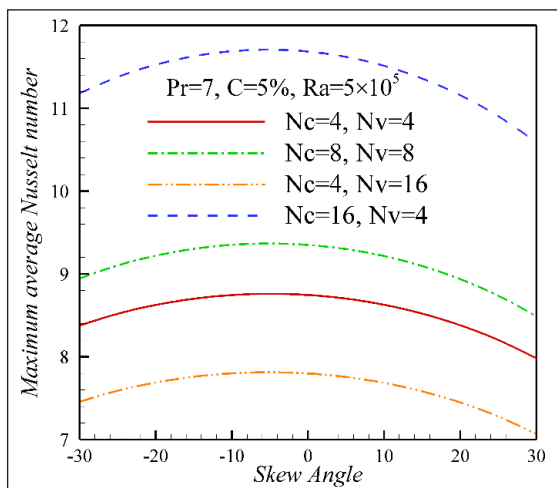


شکل ۱۰ عدد ناسلت متوسط پیشینه به‌عنوان تابعی از نسبت متناظر (AR) در مقدارهای متفاوت عامل‌های رسانش حرارتی (Nc) و لزجت دینامیک (Nv)

برای نانوسیال آب- منیزیم اکسید به ترتیب برابر ۷۷۰ و ۱۲۰۵ اندازه‌گیری شده‌اند. در جدول ۳، اثر کسر حجمی نانوذرات و هم چنین اثر عدد رایلی روی عامل‌های نسبت متناظر، زاویه انحراف و هم‌چنین عدد ناسلت متوسط بیشینه برای نانوسیال آب- منیزیم اکسید، فراهم شده است. همان‌طور که مشخص است با افزایش عدد رایلی در هر سه غلظت مورد نظر، نسبت متناظر افزایش چشم‌گیری داشته است ولی در عوض زاویه انحراف به طور محسوسی کاهش یافته است. این درحالی است که عدد ناسلت متوسط بیشینه با افزایش عدد رایلی افزایش یافته است. از سوی دیگر افزایش غلظت نانوذرات در هر سه عدد رایلی، کاهش نسبت متناظر را در پی دارد. برعکس افزایش غلظت نانوذرات، موجب تمایل بیشتر دیواره‌های عمودی به سمت چپ می‌شود. افزایش غلظت نانوذرات، محفظه‌های بسته با شکل متوازی‌الاضلاع عریض‌تری را به‌منظور بهینه‌سازی می‌طلبد؛ هرچند که مقدار تغییرات برای نسبت متناظر و زاویه‌های انحراف در اثر افزایش کسر حجمی نانوذرات کم است و این تغییرات برای متغیرهای بهینه‌سازی (نسبت متناظر و زاویه انحراف) در اعداد رایلی بالاتر کم‌تر هم می‌شوند. در واقع مقدار تغییرات دو عامل نسبت متناظر و زاویه انحراف در اثر تغییر کسر حجمی نانوذرات، نسبت به تغییرات همین دو عامل در اثر تغییر عدد رایلی، بسیار کمتر است اما آنچه که بدیهی است، عدد ناسلت متوسط بیشینه هم در اثر افزایش عدد رایلی و هم در اثر افزایش کسر حجمی نانوذرات، بهبود یافته است. مقادیرها و نتیجه‌های به دست آمده در جدول ۳، همگی دارای تطابق مناسبی با توضیح ارائه شده در بخش تحلیل بدون بعد هستند.

هم‌چنین ذکر این نکته حائز اهمیت است که در عدد رایلی 10^5 و در عدم حضور نانوذرات منیزیم اکسید (آب خالص)، عدد ناسلت متوسط در یک محفظه بهینه‌سازی شده، بیشتر از عدد ناسلت متوسط در همان عدد رایلی، در حضور نانوذرات منیزیم اکسید و در یک محفظه مربعی شکل است. این به آن معناست که اگر از سیال خالص آب استفاده شود ولی هندسه محفظه بسته، بهینه‌سازی شده باشد، مقدار انتقال حرارت نسبت به یک محفظه

را سبب می‌شوند. در عوض از تأثیر نانوسیال‌های متفاوت با عامل‌های رسانش حرارتی (Nc) و لزجت دینامیک (Nv) گوناگون نمی‌توان گذشت.



شکل ۱۲ عدد ناسلت متوسط بیشینه به عنوان تابعی از زاویه انحراف (ψ) در عامل‌های رسانش حرارتی (Nc) و لزجت دینامیک (Nv) متفاوت

مطالعه موردی

در این قسمت از پژوهش حاضر، با بهره‌گیری از نتیجه‌های مربوط به تحلیل بی‌بعد به بهینه‌سازی هندسه یک محفظه بسته پر شده از نانوسیال آب- منیزیم اکسید، پرداخته شده است. جدول ۲ ویژگی ترموفیزیکی نانوذرات منیزیم اکسید و سیال پایه آب را نشان می‌دهد.

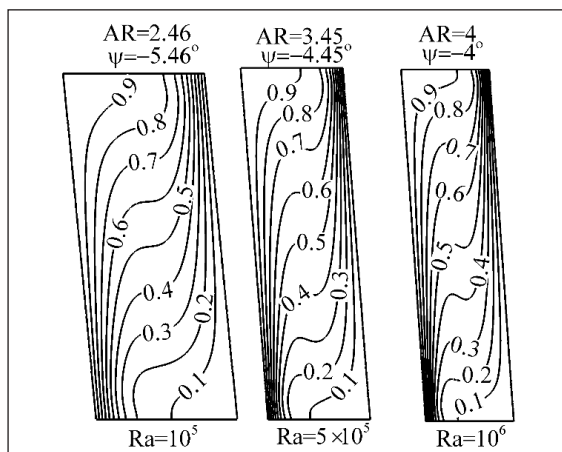
جدول ۲ ویژگی ترموفیزیکی سیال پایه آب و نانوذرات منیزیم اکسید [۳۴]

ρ (kgm^{-3})	$\alpha \times 10^{-7}$ (m^2s^{-1})	$\beta \times 10^{-6}$ (K^{-1})	K ($\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$)	C_p ($\text{Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}$)	
۹۹۷٫۰۵	۱٫۴۵۴	۲۲۵٫۳	۰٫۶۰۶	۴۱۸۱٫۴	آب
۳۵۸۰	۹۵٫۳	۳۳٫۶	۳۰	۸۷۹	منیزیم اکسید

در این‌جا، به‌طور هم‌زمان هم نسبت متناظر و هم زاویه انحراف به عنوان متغیرهای بهینه‌سازی در نظر گرفته شده‌اند. ضمن این‌که مقادیرهای عامل‌های رسانش حرارتی و لزجت دینامیک

است در حالی که باریک‌ترین محفظه در سیال خالص آب و عدد رایلی 10^6 به دست آمده است. هم‌چنین بیشترین زاویه انحراف در عریض‌ترین محفظه و کم‌ترین زاویه انحراف در باریک‌ترین محفظه بسته ایجاد شده است.

شکل‌های ۱۳ و ۱۴ کانتورهای دمای بی‌بعد را برای سیال خالص و نانوسیال در محفظه بسته نشان می‌دهند. همان‌طور که مشخص است با افزایش عدد رایلی، در یک غلظت ثابت از نانوذرات، مقدار انحنای خطها به خصوص در مرکز محفظه بیشتر شده است. اما با افزایش غلظت در یک عدد رایلی ثابت این مقدار انحناء کاهش یافته است (شکل ۱۴). در واقع افزایش عدد رایلی موجب تقویت مکانیزم‌های انتقال حرارت جابه‌جایی طبیعی می‌شود. افزایش کسر حجمی نانوذرات نیز به این مهم دامن زده است. این امر در شکل‌های ۱۵ و ۱۶ نیز قابل مشاهده است. افزایش عدد رایلی و نزدیک شدن دیواره‌های عمودی به هم، موجب متراکم شدن خطوط جریان در مرکز محفظه شده است. اما از سوی دیگر، افزایش کسر حجمی نانوذرات کمی موجب فاصله گرفتن دیواره‌های عمودی از یکدیگر و تمایل بیشتر این دیواره به طرف چپ شده است (شکل ۱۶)؛ در نتیجه سرعت در محفظه بسته مقدار کمی کاهش یافته است؛ از این‌رو مقدار تراکم خطوط جریان در مرکز محفظه با افزایش کسر حجمی نانوذرات مقدار کمی کاهش یافته است.



شکل ۱۳ کانتورهای دما ثابت درون محفظه‌های بسته بهینه شده چهارضلعی در کسر حجمی صفر درصد از نانوذرات.

بسته مربعی ($AR=1$ و $\psi=0$) پر شده از نانوسیال آب- منیزیم اکسید در کسر حجمی ۵٪ از نانوذرات، بیشتر می‌شود (عدد ناسلت متوسط برای سیال خالص آب در یک محفظه بهینه‌سازی شده برابر ۵/۱۷ و برای نانوسیال آب- منیزیم اکسید در یک محفظه مربعی شکل برابر ۵/۰۶ است). از این‌رو، اهمیت بهینه‌سازی در اینجا مشخص می‌شود. حال آن‌که استفاده از نانوسیال مناسب در یک محفظه بهینه‌سازی شده، افزایش مقدار انتقال حرارت را دو چندان می‌کند (جدول ۳).

جدول ۳ اثر عدد رایلی (Ra) و کسر حجمی نانوذرات (C) بر عدد ناسلت متوسط بهینه (Nu_{max})، نسبت متناظر (AR) و زاویه انحراف (ψ) برای نانوسیال آب- منیزیم اکسید

C=۰%			C=۵%			Ra
AR	ψ	Nu	AR	ψ	Nu	
۲,۴۶	-۵,۴۶	۵,۱۷	۲,۰۹	-۵,۸۵	۵,۵۷	10^5
۳,۴۵	-۴,۴۵	۸,۱۷	۲,۸۹	-۴,۹۸	۸,۹۶	5×10^5
۴	-۴	۹,۸۸	۳,۳۵	-۴,۵۵	۱۰,۸۸	10^6

چنان‌که در شکل‌های ۱۳ تا ۱۶ مشاهده می‌شود، افزایش عدد رایلی سبب ایجاد محفظه‌هایی با نسبت متناظر بالاتر و زاویه انحراف کمتر شده است. در واقع افزایش عدد رایلی در محفظه بسته باعث نزدیک‌تر شدن دیواره‌های عمودی به یکدیگر شده است. از این‌رو، گرادیان حرارتی ایجاد شده در محفظه بسته بیشتر می‌شود و به‌طور کلی مقدار انتقال حرارت بهبود می‌یابد. این درحالی است که در کسرهای حجمی بالاتر برای نانوذرات، نیاز به ایجاد محفظه‌هایی با زاویه کم‌تر و باریک‌تر، کمتر احساس می‌شود. در واقع به‌خاطر این‌که نانوذرات نسبت به سیال پایه دارای رسانش حرارتی بالاتری هستند، لذا، نیاز کمتری به نزدیک شدن دیواره‌های عمودی به هم وجود دارد. ولی از طرف دیگر می‌باید تمایل دیواره‌های عمودی به طرف چپ (سمت دیواره گرم) بیشتر شود تا نانوذرات حرارت بیشتری را از دیواره گرم دریافت کنند و مقدار برخورد جریان با دیواره سرد کمتر شود. همان‌طور که در شکل‌های ۱۳ تا ۱۶ مشاهده می‌شود، عریض‌ترین محفظه بسته در غلظت ۵٪ از نانوذرات و عدد رایلی 10^5 به دست آمده

نتیجه‌گیری

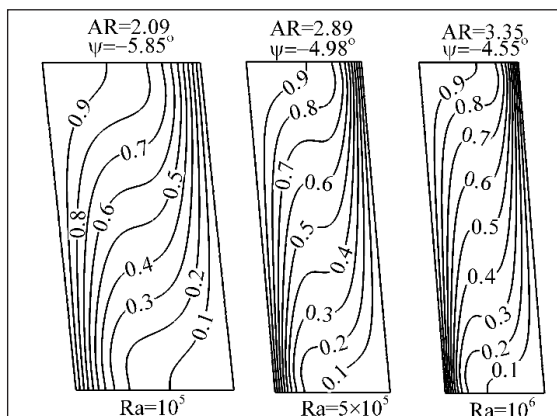
هندس‌ه محفظه بسته در اعداد رایلی متفاوت و هم‌چنین در حضور و در غیاب نانوذرات، مورد بهینه‌سازی قرار گرفت. هدف از این بهینه‌سازی دست‌یابی به بیشترین مقدار انتقال حرارت بود. ضمن این‌که نسبت متناظر و زاویه انحراف، متغیرهای بهینه‌سازی را تشکیل می‌دادند. بررسی‌ها در دو گروه و به صورت تحلیل بی‌بُعد و مطالعه موردی (نانوسیال آب- منیزیم اکسید) به انجام رسید.

نتیجه‌های پژوهش حاضر نشان می‌دهند که هندسه بهینه محفظه تابعی از غلظت نانوسیال مورد استفاده است. مهم‌ترین نتیجه‌های به دست آمده را می‌توان به صورت زیر خلاصه کرد:

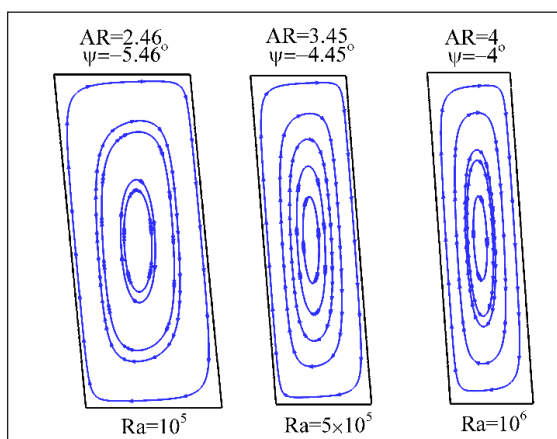
۱- افزایش عدد رایلی (Ra)، با تقویت سازوکارهای انتقال حرارت، امکان بهبود انتقال حرارت جابه‌جایی به وسیله نانوذرات را افزایش می‌دهد. در واقع هنگامی که عدد رایلی افزایش می‌یابد، استفاده از نانوسیال به افزایش انتقال حرارت جابه‌جایی تمایل یافته و به بهبود انتقال حرارت و برداشت بیشتر گرما از دیواره گرم منجر می‌شود.

۲- افزایش عدد رایلی موجب افزایش نسبت متناظر (محفظه باریک‌تر) و کاهش زاویه انحراف (تمایل به زاویه صفر) در محفظه بهینه می‌شود. در عوض، افزایش کسر حجمی نانوذرات باعث کاهش نسبت متناظر (محفظه عریض‌تر) و افزایش زاویه انحراف (فاصله گرفتن از زاویه صفر درجه) می‌شود. هرچند تغییرهای ناشی از افزایش کسر حجمی نانوذرات در برابر تغییرهای ناشی از افزایش عدد رایلی به تقریب ناچیز است.

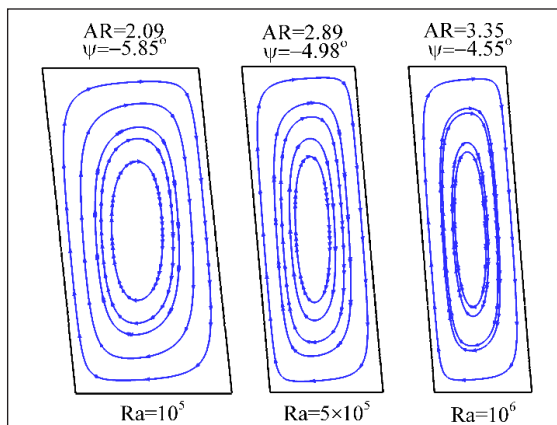
۳- در برخی موارد مشاهده شد که مقدار انتقال حرارت کلی درون محفظه بسته با ابعاد بهینه پر شده از نانوسیال می‌تواند از مقدار انتقال حرارت محفظه بسته بهینه پر شده از سیال خالص (سیال پایه بدون نانوذرات)، کم‌تر شود. این به این معنا است که استفاده از نانوسیال نامناسب می‌تواند باعث کاهش انتقال حرارت شود.



شکل ۱۴ کانتورهای دما ثابت درون محفظه‌های بسته بهینه شده چهارضلعی در کسر حجمی ۵ درصد از نانوذرات



شکل ۱۵ خط‌های جریان درون محفظه‌های بسته بهینه شده چهار ضلعی در کسر حجمی صفر درصد از نانوذرات.



شکل ۱۶ خط‌های جریان درون محفظه‌های بسته بهینه شده چهار ضلعی در کسر حجمی ۵ درصد از نانوذرات.

سپاسگزاری

با تشکر از دانشگاه آزاد اسلامی واحد دزفول، شرکت نفت (ملی حفاری) و ستاد ویژه فناوری نانو که این پژوهش با حمایت آن‌ها به انجام رسیده است. نویسندگان مراتب تقدیر و تشکر صمیمانه خود از استفاده از امکانات پردازی مرکز ابررایانش ملی شیخ بهایی را اعلام می‌کنند. این مرکز تحت حمایت معاونت علمی و فناوری ریاست جمهوری و دانشگاه صنعتی اصفهان است.

فهرست علائم

u	مؤلفه افقی سرعت ($m s^{-1}$)
v	مؤلفه عمودی سرعت ($m s^{-1}$)
x	مؤلفه افقی مکان (m)
y	مؤلفه عمودی مکان (m)
علائم یونانی	
α	ضریب پراکندگی حرارتی ($m^2 s^{-1}$)
β	ضریب پخش حرارتی (K^{-1})
θ	دمای بدون بعد
μ	لزجت دینامیکی ($kg m^{-1} s^{-1}$)
ρ	چگالی ($kg m^{-3}$)
ψ	زاویه انحراف
زیرنویس	
bf	سیال پایه
c	سرد
h	گرم
nf	نانوسیال
p	نانوذرات
بالانویس	
*	با بعد

AR	نسبت متناظر
C	کسر حجمی نانوذرات
C_p	ظرفیت حرارتی ویژه ($J Kg^{-1} K^{-1}$)
g	نیروی گرانش ($m s^{-2}$)
H	ارتفاع محفظه بسته (m)
h	ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی ($W m^{-2} K^{-1}$)
k	ضریب رسانش حرارتی ($W m^{-1} K^{-1}$)
L	طول محفظه بسته (m)
N_c	پارامتر رسانش حرارتی
N_u	عدد ناسلت متوسط
N_{u_x}	عدد ناسلت موضعی
N_v	پارامتر لزجت دینامیک
P	فشار (atm)

مراجع

- [1] Bejan, A.; Int. J. Heat Mass Transfer, 23, 723-726, 1980.
- [2] افشاری، نازنین؛ نیک آذر، منوچهر؛ کیارستمی، وحید؛ فصل نامه پژوهش‌های کاربردی در شیمی، شماره ۳، ۸۳-۷۵، پاییز ۱۳۹۳.
- [3] صادق حسنی، صدیقه؛ افضلی، جمال الدین؛ رشیدی، علیمراد؛ فصل نامه پژوهش‌های کاربردی در شیمی، شماره ۱، ۴۸-۴۱، بهار ۱۳۹۳.
- [4] ایزدیاری، آزاده؛ اکبرزاده، عظیم؛ وزیری، سید علی؛ علوی، ابوالحسن؛ عطار، حسین؛ فصل نامه پژوهش‌های کاربردی در شیمی، شماره ۲، ۵۱-۴۵، تابستان ۱۳۹۳.
- [5] Choi, US; ASME Fluids Engineering Division, 231, 99-105.
- [6] Khanafer, K.; Vafai, K.; and Lightstone, M.; Int. J. Heat Mass Transfer, 46, 3639-3653, 2003.

- [7] Kehveci, K.; J. Heat Transfer, 132, 062501, 2010.
- [8] Jang, S.P.; and Choi, S.U.S.; Proceeding of IMECE04, Anaheim, California, USA, 1-4, 2004.
- [9] Jou, R.Y.; and Tzeng, S.C.; Int Commun Heat Mass, 33, 727-36, 2006.
- [10] Ho, C.J.; Chen, M.W.; and Li, Z.W.; Int. J. Heat Mass Transfer, 51, 4506-16, 2008.
- [11] Ghalambaz, M.; Noghrehabadi, A.; and Ghanbarzadeh, A.; Braz J Chem Eng, 31, 413-427, 2014.
- [12] Zaraki, A.; Ghalambaz, M.; Chamkha, J.A.; Ghalambaz, M.; and De Rossi, D.; Adv Powder Technol, 26, 935-946, 2015.
- [13] Ho, C.J., Liu, W.K.; Chang, Y.S.; and Lin, C.C.; Int J Therm Sci, 49, 1345-53, 2010.
- [14] Oztop, H.F.; and Abu-Nada, E.; Int J Heat Fluid Fl, 29, 1326-36, 2008.
- [15] Kefayati, G.H.R.; Hosseinizadeh, S.F.; Gorji, M.; and Sajjadi, H.; Int J Therm Sci, 52, 91-101, 2012.
- [16] Hussain, S.; and Hussein, A.; J. Heat Transfer, 136: 082502, 2014.
- [17] Hyun, J.M.; and Choi, B.S.; Int J Heat Fluid Fl, 11, 2-18, 1990.
- [18] Garcia de Maria, J.M.; Bairi, A.; and Costa, V.A.F.; Int. J. Heat Mass Transfer, 53, 3831-3838, 2010.
- [19] Bairi, A.; Zarco-Pernia, E.; and Garcia de Maria, J.M.; Appl Therm Eng, 63, 304-322, 2014.
- [20] Sheikholeslami, M.; Gorji-Bandpy, M.; and Vajravelu, K. Int. J. Heat Mass Transfer, 80, 16-25, 2015.
- [21] Malvandi, A.; and Ganji, D. D.; Chem Eng Res des, 94, 355-364, 2015.
- [22] Sheikholeslami, M.; and Ganji, D. D.; Physica A, 417, 273-286, 2015.
- [23] Chamkha, A.; Ismael, M.; Kasaeipoor, A.; and Armaghani, T.; Entropy, 18, 50-68, 2016.
- [24] حاجی علی‌گل، نجمه؛ شیخ‌زاده، قنبرعلی؛ ابراهیم‌قمی، معصومه؛ حیدری، رقیه؛ سومین همایش بین المللی مبدل‌های گرمایی در صنایع نفت و انرژی، هم اندیشان انرژی کیمیا، ۱۳۹۰.
- [25] شهریاری، علیرضا؛ پایان نامه کارشناسی ارشد تحت عنوان شبیه‌سازی جریان و انتقال حرارت جابجایی طبیعی آرام نانوسیالات به کمک روش شبکه بولتزن، دانشگاه شهید باهنر کرمان، دانشکده فنی و مهندسی، ۱۳۹۰.
- [26] مرادی، حمید؛ پایان نامه کارشناسی ارشد تحت عنوان بررسی اثر زاویه شیب و نسبت مشخصه بر ضریب انتقال حرارت جابجایی آزاد نانو سیالات نیوتنی در یک محفظه بسته استوانه ای، دانشگاه صنعتی اصفهان، دانشکده مهندسی شیمی، ۱۳۹۰.
- [27] Abu-Nada, E.; and Oztop, H.F.; Int J Heat Fluid Fl, 30, 669-78, 2009.
- [28] Bouhaleb M.; and Abbasi, H.; I Int J Hydrogen Energ, 39, 15275-15286, 2014.
- [29] Basak, T.; Roy, S.; and Balakrishnan, A.R.; Int. J. Heat Mass Transfer, 49, 4525-4535, 2006.
- [30] Reddy, J.N.; "An introduction to the finite element method", Graw-Hill, New york, 1993.
- [31] Luersen, M.A.; and Le Riche, R.; Computers & structures, 82, 2251-2260, 2004.
- [32] Lagarias, J.C.; Reeds, J.A.; Wright, M.H.; and Wright, P.E.; Siam J Optimiz, 9, 1, 112-147, 1998.
- [33] Conn, A.R.; Scheinberg, K.; and Vicente, L.N.; "Introduction to derivative-free Optimization", Siam J Optimiz, SIAM, 2009.
- [34] E. ToolBox "Constant pressure heat capacity of water vs. temperature", Retrieved 2013-1-11, 2013.

Modeling and maximization of natural convection heat transfer in an enclosure filled with a nanofluid

M. Sabour¹ and M. Ghalambaz^{2,*}

1. MSc student in Mechanical Engineering, Dezful Branch, Islamic Azad University, Dezful, Iran

2. Assistant Prof. of Mechanical Engineering, Dezful Branch, Islamic Azad University, Dezful, Iran

Received: December 2015, Revised: January 2016, Accepted: February 2016

Abstract: In the present research, the maximization of natural convective heat transfer in a quadrilateral enclosure filled with pure fluids or nanofluids was reviewed. The governing equations have been transformed into a dimensionless form based on the base fluid thermophysical properties. The governing equations are solved using the finite element method. Based on the experimental results available in literature, two new dimensionless parameters, namely thermal conductivity parameter (N_c) and thermal viscosity parameter (N_v) are utilized. The mentioned parameters depend on the type of nanoparticles, and the base fluid, size and shape of the nanoparticles and the working temperature of the nanofluid. Dispersing nanoparticles in the fluid could result in enhancement of the thermal conductivity of the working fluid; hence, utilizing a nanofluid may enhance the heat transfer in an enclosure. On the other hand, the geometrical optimization of the enclosure could also boost the heat transfer. In order to perform a geometrical optimization in the enclosure, two parameters of aspect ratio (the ratio of height to length of enclosure) and the tilted angle (ψ) are adopted as the optimization variables for the enclosure. The analysis and optimizations were performed for various Rayleigh numbers and volume fractions of nanoparticles. The results show that the increase of Rayleigh number would result in the increase of the enclosure aspect ratio (a thinner enclosure) as well as the decrease of the tilted angle (ψ) of the optimized enclosure.

Keywords: Natural convection heat transfer, Nanoparticles, Thermal conductivity, Quadrilateral enclosure, Geometrical optimization