بسم الله الرحمن الرحیم

دانشکده فنی و مهندسی
گروه مهندسی مکانیک

پایان‌نامه
برای دریافت درجه کارشناسی ارشد
مهندسی مکانیک-تبدیل انرژی

بررسی عددی جریان و انتقال حرارت نانوسیال در یک محفظه تهویه شده با چشمه داخلی

استاد راهنما:
دکتر علی اکبر دهقان

اساتید مشاور:
دکتر شهرام طالبی
مهندس مسیح خوشاب

پژوهش و نگارش:
محمدرضا علیزاده بهجانی

اسفند ۱۳۹۰

تقدیم به:

پدر و مادرم که بهترین هدیه‌های خداوند به من بوده‌اند.

تشکر و قدردانی

شکر خدای را عزوجل که طاعتش موجب قربت است و به شکر اندرش مزید نعمت؛ چه تنها او لایق سپاس مخصوص است؛ هم او که تمام کائنات را به علم آفرید و تمام مخلوقات را به حلم پرورش داد. و حال از باب کلام "من لم یشکر المخلوق، لم یشکر الخالق" بر خود لازم می‌دانم از تلاش و زحمات تمام کسانی که در تهیه و تنظیم این اثر مرا یاری نموده‌اند؛ بالاخص استاد گرانقدر جناب آقای دکتر علی‌اکبر دهقان که استاد راهنمای اینجانب در طول دوره‌ی کارشناسی ارشد بوده‌اند؛ صمیمانه تقدیر و تشکر به عمل آورم. همچنین از اساتید مشاور خود جناب آقای دکتر شهرام طالبی و آقای مهندس خوشاب که بی‌دریغ پذیرا و پاسخگوی سؤالات اینجانب بودند، تشکر می‌نمایم.

از خواهر عزیزم به خاطر یاری بنده در تدوین این اثر، متشکرم.

همچنین از دوستان عزیزم آقایان وحید خمسه و هادی پاکدامن نیز بخاطر تمام ابراز محبت‌هایشان نسبت به حقیر در طول دوره‌ی تحصیل، سپاسگزارم.

چکیده

روند کوچک‌سازی قطعات مورد استفاده در صنایع گوناگون از جمله الکترونیک و اپتیک، با عاملی محدود کننده روبروست. این عامل محدود کننده همان چگالی فزاینده‌ی بار حرارتی تولیدی در این اجزاست که لزوم استفاده از فن‌آوری‌های پیشرفته‌ی خنک‌کاری را بیش از پیش آشکار می‌سازد. از این جهت، تلاش‌های زیادی برای بهبود انتقال حرارت از منابع تولید گرما صورت گرفته است. از آن جمله می‌توان به تولید نانوسیالات اشاره نمود که از پراکنده ساختن ذرات با ابعاد نانو در سیالات خنک‌کننده‌ی سنتی حاصل می‌شوند و امیدهای تازه‌ای را در بهبود خواص انتقال حرارتی سیالات خنک‌کننده ایجاد کرده‌اند.

در تحقیق حاضر، جریان و انتقال حرارت جابجایی طبیعی ترکیبی در محفظه‌ی بسته و همچنین انتقال حرارت جابجایی مخلوط در محفظه‌ی در حال تهویه با حضور مانع داخلی و بدون حضور مانع داخلی بررسی شده است. درمسئله‌ی اصلی که جریان جابجایی مخلوط درون محفظه را بررسی می‌کند، دیواره‌ها آدیاباتیک بوده و سیال ورودی در دمای سرد فرض شده است. چشمه‌ی داخلی دارای شار ثابت حرارتی می‌باشد که در ۹ موقعیت مختلف درون محفظه تغییر مکان می-دهد.

مدلسازی نانوسیال در این تحقیق به صورت تک‌فاز صورت گرفته است؛ لذا معادلات بقای جرم، مومنتوم و انرژی سیال خالص، با اعمال تغییرات مربوط به حضور نانوسیال، بی‌بعد شده و بوسیله‌ی روش حجم محدود گسسته‌سازی می‌گردد. به منظور کوپل کردن معادلات سرعت و فشار از الگوریتم سیمپلر استفاده شده و دستگاه معادلات جبری بدست آمده از گسسته‌سازی، به روش شبه گذرا حل می‌گردد.

در این تحقیق، تاثیر پارامترهای ۱) مکان جسم داخلی، ۲) نرخ تولید حرارت (عدد گراشف)، ۳) نرخ سیال ورودی (عدد رینولدز)، ۴) غلظت نانوسیال، ۵) نوع نانوسیال و ۶) ابعاد جسم داخلی بر جریان و انتقال حرارت درون محفظه، بررسی گردیده و نتایج آن در قالب خطوط جریان، خطوط دماثابت، اعداد ناسلت متوسط و موضعی، توزیع دما و توزیع سرعت سیال گزارش

شده است. از مطالعه‌ی نتایج بدست آمده برای محفظه‌ی در حال تهویه اینگونه بر می‌آید که حضور نانوذرات درون سیالات پایه در اغلب موارد باعث افزایش انتقال حرارت و در عین حال تضعیف جریان درون محفظه می‌گردد. با این وجود، به طور قطع نمی‌توان بهبود انتقال حرارت درون محفظه را در اثر استفاده از نانوسیال انتظار داشت؛ چرا که بسته به نوع جریان (جابجایی طبیعی یا مخلوط)، پارامترهای انتقال حرارتی (رایلی یا گراشف) و موقعیت قرار گرفتن منبع حرارتی در محفظه، استفاده از نانوسیال ممکن است حتی به نقصان انتقال حرارت نیز بیانجامد. به علاوه دیده شد که در جریان جابجایی مخلوط با حضور چشمه‌ی حرارتی داخلی، افزایش انتقال حرارت و یا کاهش آن در اثر افزایش رینولدز و گراشف، مستقیماً به محل استقرار منبع حرارتی بر می‌گردد؛ به نحوی که در بعضی حالات، افزایش رینولدز و گراشف با ایجاد جریان‌های ثانویه، مانع از حرکت بهینه‌ی سیال روی منبع حرارتی می‌گردد.

بهترین موقعیت برای استقرار منبع حرارتی در محفظه از لحاظ دارا بودن کمترین مقادیر توزیع دما و بیشترین افزایش انتقال حرارت در اثر بکارگیری نانوسیال، گوشه‌ی سمت راست و بالای محفظه (نزدیک دهانه‌ی خروجی سیال) می‌باشد. همچنین در انتقال حرارت جابجایی طبیعی در محفظه‌ی بسته، استفاده از نانوسیال تنها در اعداد رایلی پایین به صرفه است و با افزایش رایلی تا بیش از $۱۰^{۶}$، استفاده از نانوسیال اثر معکوس در بهبود انتقال حرارت دارد. از بین سه نانوسیالی که در این تحقیق استفاده شد، بهترین خواص حرارتی را به ترتیب، نانوسیالات آب-مس، آب-اکسید مس و آب-آلومینا از خود بروز دادند.

فهرست مطالب

عنوان **صفحه**

فهرست مطالب ..... أ

فهرست اشکال ..... و

فهرست جداول ..... ن

فهرست نمادها ..... ع

فصل ۱ – مقدمه ۱

۱-۱ انتقال حرارت ۲

۱-۲ روش‌های انتقال حرارت ۲

۱-۲-۱ رسانش ۲

۱-۲-۲ جابجایی ۳

۱-۲-۳ تابش ۳

۱-۳ انتقال حرارت در محفظه ۴

۱-۴ نانوسیالات ۵

فصل ۲ – پیشینه‌ی تحقیق ۸

۲-۱ مقدمه ۹

۲-۲ پیشینه‌ی نانوسیالات ۱۰

۲-۲-۱ جنس نانوذرات ۱۲

۲-۲-۲ کاربرد نانوسیالات ۱۳

۲-۲-۳ انتقال حرارت در نانوسیال‌ها ۱۵

۲-۲-۴ روش‌های تحلیل نانوسیالات ۱۷
۲-۲-۵ مکانیزم‌های انتقال حرارت ۱۷
۲-۲-۶ مدل‌های تخمین ضریب هدایت حرارتی نانوسیالات ۲۴
۲-۳ انتقال حرارت در محفظه‌ها به کمک سیالات پایه ۲۹
۲-۴ بررسی عددی جریان نانوسیالات در محفظه‌ها ۳۵
۲-۵ پیشنهاد طرح تحقیق و رئوس مطالب پایان‌نامه ۳۹
فصل ۳ - شبیه سازی عددی ۴۳
۳-۱ مقدمه ۴۴
۳-۲ معادلات حاکم ۴۴
۳-۲-۱ معادلات حاکم بر جابجایی سیال ۴۵
۳-۲-۲ بی‌بعد سازی معادلات ۴۹
۳-۲-۳ معادلات بی‌بعد جریان جابجایی طبیعی آرام با استفاده از نانوسیال: ۵۰
۳-۲-۴ معادلات بی‌بعد جریان جابجایی مخلوط آرام با استفاده از نانوسیال: ۵۱
۳-۳ شرایط مرزی: ۵۳
۳-۳-۱ جابجایی مخلوط در محفظه‌ی تهویه شده با شار حرارتی ثابت (ارائه شده در فصل ۴) ۵۳
۳-۳-۲ جابجایی طبیعی ترکیبی آرام با توجه به منبع حرارتی حجمی درونی (ارائه شده در فصل ۵) ۵۴
۳-۳-۳ جابجایی ترکیبی در محفظه‌ی در حال تهویه با توجه به منبع حرارتی شار ثابت درونی (ارائه شده در فصل ۶) ۵۵

۳-۴ حل عددی ۵۷
۳-۴-۱ شبکه بندی ۵۷
۳-۴-۲ گسسته سازی ۶۲
۳-۴-۳ حل معادلات ۶۴
۳-۴-۴ الگوریتم سیمپلر ۶۴
۳-۴-۵ روش ADI خط به خط ۶۶
۳-۴-۶ زیر تخفیف و فوق تخفیف ۶۷
۳-۴-۷ همگرایی ۶۸
۳-۵ الگوریتم پیزو ۶۹
۳-۶ میزان عملکرد روش‌های مختلف انتقال حرارت ۷۲
۳-۷ اعتبارسنجی ۷۴
۳-۷-۱ مقایسه با نتایج دی وال دیویس [۶۷] ۷۵
۳-۷-۲ مقایسه با نتایج ژائو و همکاران [۳۶] ۷۵
۳-۷-۳ مقایسه با نتایج امین الساداتی و قاسمی [۵۵] ۷۶
۳-۷-۴ مقایسه با نتایج شاهی و همکاران [۵۲] ۷۸
۳-۸ حل مستقل از شبکه ۷۹
۳-۸-۱ حل مستقل از حدس اولیه ۸۲
فصل ۴ - جریان و انتقال حرارت نانوسیال در محفظه‌ی در حال تهویه حاوی چشمه سطحی با شار حرارتی ثابت ۸۵
۴-۱ مقدمه ۸۶

۴-۲ تاثیرات غلظت نانوسیال ۸۷
۴-۳ تاثیرات قدرت جریان و توان چشمه‌ی حرارتی ۹۴
۱-۱ تاثیرات نوع نانوسیال ۹۸
۱-۲ تاثیرات مکان چشمه‌ی حرارتی ۱۰۱
۴-۴ جمع‌بندی و نتیجه‌گیری ۱۰۴
فصل ۵ - جریان و انتقال حرارت جابجایی طبیعی ترکیبی نانوسیال در محفظه‌ی حاوی چشمه‌ی حرارتی حجمی ۱۰۶
۵-۱ مقدمه ۱۰۷
۵-۲ تاثیرات غلظت نانوسیال ۱۰۸
۵-۳ تاثیرات توان چشمه‌ی حرارتی ۱۱۲
۵-۴ تاثیرات نوع نانوسیال ۱۱۷
۵-۵ تاثیرات مکان چشمه‌ی حرارتی ۱۱۹
۵-۶ تاثیر اندازه‌ی منبع حرارتی ۱۲۵
۵-۷ جمع‌بندی و نتیجه‌گیری ۱۲۷
فصل ۶ - جریان و انتقال حرارت جابجایی مخلوط نانوسیال در محفظه‌ی حاوی چشمه‌ی حرارتی ۱۲۹
۶-۱ مقدمه ۱۳۰
۶-۲ تاثیرات غلظت نانوسیال ۱۳۱
۶-۳ تاثیرات قدرت جریان و توان چشمه‌ی حرارتی ۱۴۰
۵-۱ تاثیرات نوع نانوسیال ۱۴۴

۶-۴ تاثیرات مکان چشمه‌ی حرارتی.....۱۴۶

۶-۵ ملاحظات حل گذرای مسئله و تاثیر استفاده از نانوسیال بر زمان رسیدن به حل دائمی۱۵۶

۶-۶ جمع بندی و نتیجه‌گیری ۱۶۰

فصل ۷ – جمع‌بندی نهایی.....۱۶۲

۷-۱ جمع‌بندی ۱۶۳

۷-۲ پیشنهاداتی برای ادامه‌ی تحقیق ۱۶۶

فهرست منابع ۱۶۸

فهرست اشکال

عنوان شکل **صفحه**

شکل ۱-۱ نمایش انواع روش‌های انتقال حرارت..... ۴

شکل ۲-۱ مقایسه‌ی ضریب هدایت حرارتی مواد گوناگون[۹] ۱۲

شکل ۲-۲ نانوذرات استفاده شده توسط هوانگ [۱۳]..... ۱۶

شکل ۲-۳ مقایسه‌ی بین نتایج مدل HC و نتایج آزمایش برای تعیین افزایش انتقال حرارت نانوسیال‌های متشکل از نانولوله‌های کربنی، آب و اتیلن گلیکول [۱۳]..... ۱۶

شکل ۲-۴ ضریب هدایت حرارتی نانوسیال‌های نمونه در مقاله‌ی [۱۵] نسبت به تغییرات کسر غلظت..... ۱۸

شکل ۲-۵ تاثیر غلظت نانوذرات بر ضریب انتقال حرارت نانوسیال [۱۷] ۱۹

شکل ۲-۶ دستگاه اندازه‌گیری تجربی مورد استفاده در[۱۸] ۱۹

شکل ۲-۷ ضریب هدایت حرارتی نانوسیال آب-آلومینا در دمای 22^oC بدست آمده از روش‌های مختلف..... ۲۰

شکل ۲-۸ تغییر پایداری نانوسیال Al_2O_3 با زمان (بدون پایدارکننده) ۲۱

شکل ۲-۹ نمایش گره‌های محاسباتی در میدان جریان، گره‌های اصلی (مرکز سلول) و گره‌های مجازی..... ۳۰

شکل ۲-۱۰ نمایش محفظه‌ی مورد بررسی توسط ژائو، مورد A عمودی و مورد B افقی است. .. ۳۰

شکل ۲-۱۱ نمایهی محفظه‌ی مورد بررسی توسط رحمان [۳۹]..... ۳۲

شکل ۲-۱۲ نمایی از هندسه‌ی مورد بررسی در مقاله [۴۳]. ۳۴

شکل ۲-۱۳ هندسه‌ی استفاده شده در [۵۶]. ۳۹

شکل ۲-۱۴ نانوسیال CuO-Water در زمان‌های مختلف بعد از تولید. ۴۰

شکل ۲-۱۵ هندسه‌ی استفاده شده در مسئله‌ی فصل ۴ ..... ۴۲

شکل ۳-۱ مقایسه‌ی نتایج حاصل از مدل هدایت حرارتی پاتل با داده‌های تجربی ۴۸

شکل ۳-۲ مقایسه‌ی مدل‌های مختلف تخمین لزجت نانوسیال با داده‌های تجربی ۴۸
شکل ۳-۳ نمای محفظه‌ی مورد استفاده در تحقیق فصل ۴ ..... ۵۴
شکل ۳-۴ نمای محفظه‌ی مورد استفاده در تحقیق فصل ۵ ..... ۵۵
شکل ۳-۵ نمای محفظه‌ی مورد استفاده در تحقیق فصل ۶ ..... ۵۶
شکل ۳-۶ محل قرارگیری گره‌ها و مرزها در روش A ۵۸
شکل ۳-۷ محل قرارگیری گره‌ها و مرزها در روش B ۵۹
شکل ۳-۸ مقایسه‌ی رفتار روابط (۳-۳۴) و (۳-۳۵) برای تراکم شبکه در دو جهت ۶۱
شکل ۳-۹ نمونه‌ای از شبکه بندی با تابع هایپربولیک درون محفظه‌ی مربعی بدون مانع داخلی ۶۱
شکل ۳-۱۰ نقاط شبکه و فاصله‌ی مابین آنها برای مسئله‌ی یک بعدی ۶۳
شکل ۳-۱۱ نمایش حل خط به خط در روش ADI، نقاطی که مقادیر آنها معلوم فرض میشود (■)، نقاطی که مقادیر انها محاسبه خواهد شد (●) و نقاط مرزی که مقدار آنها معلوم نیست (×). ۶۷
شکل ۳-۱۲ مقایسه‌ی نمایه‌ی دما در محور افقی وسط محفظه از دو روش سیمپلر دائمی و گذرا ۷۱
شکل ۳-۱۳ مقایسه‌ی نمایه‌ی دما در مقطع افقی وسط محفظه از دو روش سیمپلر و پیزو ۷۱
شکل ۳-۱۴ مقایسه‌ی نمایه‌های سرعت عمودی در مقطع افقی وسط محفظه از دو روش سیمپلر و پیزو ۷۲
شکل ۳-۱۵- مقایسه‌ی خطوط دمای بدست آمده از تحقیق حاضر (سمت راست) با نتایج ژائو[۳۶] (سمت چپ) ۷۶
شکل ۳-۱۶ هندسه‌ی مورد مطالعه در مرجع [۵۵] ۷۷
شکل ۳-۱۷ نمایه‌ی سرعت عمودی در طول وسط حفره ($Cu-Water, Ra=10^5, \emptyset=0.1$) ۷۸
شکل ۳-۱۸ نمونه‌ی شبکه‌بندی محفظه با حضور جسم داخلی ۸۰

شکل ۳-۱۹ نیمرخ سرعت عمودی در مقطع میانی محفظه‌ی تهویه شده با حضور چشمه‌ی حرارتی داخلی. (Al_2O_3-Water, $Re=100$, $Gr=10^5$, $\phi=0.05$, $B=0.2$, $lx=ly=0.5$) ۸۳
شکل ۳-۲۰ توزیع دما در مقطع میانی محفظه‌ی تهویه شده با حضور چشمه‌ی حرارتی داخلی (Al_2O_3-Water, $Re=100$, $Gr=10^5$, $\phi=0.05$, $B=0.2$, $lx=ly=0.5$) ۸۴
شکل ۴-۱ نمای محفظه‌ی مورد استفاده در تحقیق حاضر ۸۶
شکل ۴-۲ تغییرات عدد ناسلت متوسط چشمه‌ی حرارتی به ازای غلظت‌های مختلف برای نانوسیال آب-آلومینا (رینولدز پایین). ($X_S=L/3$ & $X_E=2L/3$) ۸۸
شکل ۴-۳ تغییرات عدد ناسلت متوسط چشمه حرارتی به ازای غلظت‌های مختلف برای نانوسیال آب-آلومینا (رینولدز بالا). ($X_S=L/3$ & $X_E=2L/3$) ۸۹
شکل ۴-۴ مقایسه‌ی خطوط جریان سیال خالص و نانوسیال آلومینا ($Ri=0.1$, $Re=50$, $X_S=L/3$ & $X_E=2L/3$) ۹۰
شکل ۴-۵ مقایسه‌ی خطوط جریان سیال خالص و نانوسیال آلومینا ($Ri=0.1$, $Re=100$, $X_S=L/3$ & $X_E=2L/3$) ۹۰
شکل ۴-۶ مقایسه‌ی خطوط جریان سیال خالص و نانوسیال آلومینا ($Ri=0.1$, $Re=500$, $X_S=L/3$ & $X_E=2L/3$) ۹۱
شکل ۴-۷ مقایسه‌ی خطوط جریان سیال خالص و نانوسیال آلومینا ($Ri=0.1$, $Re=1000$, $X_S=L/3$ & $X_E=2L/3$) ۹۱
شکل ۴-۸ مقایسه‌ی خطوط دما ثابت سیال خالص و نانوسیال آلومینا ($Ri=0.1$, $Re=50$, $X_S=L/3$ & $X_E=2L/3$) ۹۲
شکل ۴-۹ مقایسه‌ی خطوط دما ثابت سیال خالص و نانوسیال آلومینا $Ri=0.1$, $Re=100$, ($X_S=L/3$ & $X_E=2L/3$) ۹۲
شکل ۴-۱۰ مقایسه‌ی خطوط دما ثابت سیال خالص و نانوسیال آلومینا $Ri=0.1$, $Re=500$, ($X_S=L/3$ & $X_E=2L/3$) ۹۳

شکل ۴-۱۱ مقایسه‌ی خطوط دما ثابت سیال خالص و نانوسیال آلومینا $Ri=0.1, Re=1000,$ $(X_S=L/3 \& X_E=2L/3)$ ۹۳

شکل ۴-۱۲ عدد ناسلت متوسط چشمه‌ی حرارتی برای نانوسیال آب-آلومینا در رینولدز پایین. $(X_S=L/3 \& X_E=2L/3)$ ۹۴

شکل ۴-۱۳ عدد ناسلت متوسط چشمه‌ی حرارتی برای نانوسیال آب-آلومینا در رینولدز بالا . $(X_S=L/3 \& X_E=2L/3)$ ۹۵

شکل ۴-۱۴ مقایسه‌ی خطوط جریان نانوسیال آلومینا در رینولدزهای پایین $(Ri=10, \emptyset=0.05, X_S=L/3 \& X_E=2L/3)$ ۹۶

شکل ۴-۱۵ مقایسه‌ی خطوط جریان نانوسیال آلومینا در رینولدزهای بالا $(Ri=10, \emptyset=0.05, X_S=L/3 \& X_E=2L/3)$ ۹۶

شکل ۴-۱۶ مقایسه‌ی خطوط دما ثابت نانوسیال آلومینا در رینولدزهای پایین $(Ri=10, \emptyset=0.05, X_S=L/3 \& X_E=2L/3)$ ۹۷

شکل ۴-۱۷ مقایسه‌ی خطوط دما ثابت نانوسیال آلومینا در رینولدزهای بالا $(Ri=10, \emptyset=0.05, X_S=L/3 \& X_E=2L/3)$ ۹۸

شکل ۴-۱۸ مقایسه‌ی عدد ناسلت متوسط در امتداد چشمه‌ی حرارتی برای نانوسیالات آب-آلومینا و آب-مس $(Re=100, X_S=L/3 \& X_E=2L/3)$. ۹۹

شکل ۴-۱۹ مقایسه‌ی دمای بیشینه در محفظه برای نانوسیالات آب-آلومینا و آب-مس $(Re=100, X_S=L/3 \& X_E=2L/3)$ ۱۰۰

شکل ۴-۲۰ نیمرخ سرعت عمودی جریان نانوسیال در مقطع عرضی میانی محفظه $Y=1/2$ $(Re=100, Ri=1, X_S=L/3 \& X_E=2L/3)$ ۱۰۱

شکل ۴-۲۱ اثر تغییر نوع نانوسیال بر نیمرخ دمای دیواره‌ی پایینی محفظه. $(Re=100 \& Ri=1, X_S=L/3 \& X_E=2L/3)$ ۱۰۱

شکل ۴-۲۲ توزیع دما در مقطع میانی افقی محفظه برای موقعیت‌های مختلف چشمه‌ی حرارتی. ($Re=100$ & $Ri=1$, $\emptyset=0.05$) ۱۰۲
شکل ۴-۲۳ مقایسه‌ی خطوط دما ثابت نانوسیال آب-مس برای سه موقعیت مختلف چشمه‌ی حرارتی ($Re=100$ & $Ri=1$, $\emptyset=0.05$) ۱۰۳
شکل ۴-۲۴ مقایسه‌ی خطوط جریان نانوسیال آب-مس برای سه موقعیت مختلف چشمه‌ی حرارتی ($Re=100$ & $Ri=1$, $\emptyset=0.05$) ۱۰۴
شکل ۵-۱ نمای محفظه‌ی حاوی نانوسیال مورد استفاده در تحقیق حاضر ۱۰۷
شکل ۵-۲ تغییرات ضریب تقویت جابجایی متوسط چشمه‌ی حرارتی به ازای غلظت‌های مختلف نانوسیال ($B=0.2$, $l_x=0.5$, $l_y=0.5$) ۱۰۹
شکل ۵-۳ توزیع ناسلت روی دیواره‌های چشمه‌ی حرارتی برای نانوسیال آب-اکسید مس. ($Ra=10^5$, $B=0.2$, $lx=0.5$, $ly=0.5$) ۱۱۱
شکل ۵-۴ تغییرات دمای بیشینه‌ی چشمه‌ی حرارتی به ازای غلظت‌های مختلف نانوسیال ($B=0.2$, $l_x=0.5$, $l_y=0.5$) ۱۱۳
شکل ۵-۵ مقایسه‌ی خطوط جریان سیال خالص و نانوسیال آب-اکسید مس.($B=0.2$, $l_y=l_x=0.5$) ۱۱۵
شکل ۵-۶ مقایسه‌ی خطوط دما ثابت سیال خالص و نانوسیال اکسید مس. ($B=0.2$, $l_y=l_x=0.5$) ۱۱۶
شکل ۵-۷ مقایسه ضریب تقویت جابجایی متوسط چشمه‌ی حرارتی برای نانوسیالات مختلف. ($B=0.2$, $l_x=0.5$, $l_y=0.5$) ۱۱۸
شکل ۵-۸ نیمرخ سرعت عمودی جریان نانوسیال در مقطع میانی محفظه ($Ra=10^6$, Y=1/2. $B=0.2$, $l_x=0.5$, $l_y=0.5$) ۱۱۹