نشریه علمی-تخصصی تبدیل انرژی (JEED)
دوره ۱۰، شماره ۲، تابستان ۱۴۰۲، ص: ۹۷- ۱۱۴

J. Energy Conversion
Volume: 10, Issue: 2, 2023: 97−114

DOR: 20.1001.1.20089813.1400.10.2.2.2

بررسی عددی جریان و انتقال حرارت جابجایی آزاد متاثر از رسانش دیواره جامد در یک محفظه حاوی نانوسیال

میثم محمودی [۱و*] و سید ابوذر فنایی [۲]

*۱- مربی، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی، دانشگاه ولایت، ایرانشهر، ایران M.mahmoudi@velayat.ac.ir
۲- دانشیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران sab.famech@birjand.ac.ir

دریافت: ۱۴۰۱/۰۶/۱۱، بازنگری: ۱۴۰۱/۱۰/۲۰، پذیرش: ۱۴۰۱/۱۱/۲۴

چکیده

در این مقاله انتقال حرارت جابجایی آزاد در یک محفظه حاوی نانو سیال آب - مس متاثر از رسانش دیواره جامد به صورت عددی بررسی شده است. معادلات حاکم پس از بی بعد سازی به روش عددی حجم محدود و با استفاده از الگوریتم سیمپل حل شده اند. تاثیر پارامترهای مهم شامل کسرحجمی نانوذرات و نسبت ضریب رسانش حرارتی ناحیه جامد به نانوسیال بر جریان و انتقال حرارت جابجایی آزاد محفظه بررسی شدند. بررسی ها در عدد رایلی $Ra = 10^5$، کسر حجمی های $\phi=0$، $\phi=0.02$ و $\phi=0.05$ برای نسبت ضریب های رسانش حرارتی $K_r =0.1$ ، $K_r =1$ و $K_r =10$ انجام شده است. نتایج حاصل نشان داد با افزایش کسرحجمی نانوذرات و نسبت ضریب رسانش، سرعت و قدرت جریان به طور متوسط افزایش می یابند. همچنین با افزایش کسر حجمی نانوذرات و نسبت ضریب رسانش، دمای بی بعد نانو سیال درکل کاهش می یابد. علاوه بر آن با افزایش کسرحجمی نانوذرات و مقادیر نسبت ضریب رسانش، نسبت به حالت $K_r =1$ مقادیر ناسلت در امتداد دیواره ها افزایش می یابند و نرخ انتقال حرارت بیشتری از سطح مشترک جامد و نانوسیال عبور می نماید. در نتیجه برای هدف خنک کاری و کاهش دمای کلی محفظه هرچه نسبت ضریب رسانش بیشتر باشد مفید ترخواهد بود.

* **عهده‌دار مکاتبات:** M.mahmoudi@velayat.ac.ir

کلمات کلیدی: نانوسیال، انتقال حرارت جابجایی آزاد، رسانش دیواره جامد، محفظه

۱- مقدمه

جریان سیال با انتقال حرارت جابجایی آزاد دارای سابقه ای بیش از نیم قرن می باشد و سالهاست که جابجایی آزاد در محفظه های مستطیلی، بطورچشمگیری مورد توجه محققین واقع شده است. انتقال حرارت جابجایی آزاد توام با رسانش (انتقال حرارت ترکیبی) دارای کاربردهای بسیاری در رشته های مهندسی و فرآیندهای طبیعی مانند کلکتورهای خورشیدی، عایق های حرارتی و طراحی شیشه های دوجداره، راکتورهای هسته ای، سیستم های بهبود گرما، طراحی حرارتی ساختمان ها، تهویه هوا در محیط های بسته، خنک کاری تجهیزات الکترونیکی، رشدکریستالها، صنایع هوانوردی، کاربردهای شیمیایی، ساخت نیمه هادی ها و... همچنین تاثیر اختلاف دما به صورت جابجائی آزاد و تفاوت ممنتوم ناشی از تهویه مکانیکی جابجائی اجباری یا اختلاف فشار ناشی از جریان داخل یک اتاق و فضای بیرون آن و به کارگیری بهینه آنها، یکی از بروزترین مباحث در صنعت تاسیسات می باشد. از جمله کارهای دقیق اولیه در زمینه انتقال حرارت جابجایی طبیعی می توان به بررسی های سایتو وهیروس[۱]ودوهل

نحوه استناد به این مقاله: میثم محمودی و سیدابوذر فنایی. بررسی عددی جریان و انتقال حرارت جابجایی آزاد متاثر از رسانش دیواره جامد در یک محفظه حاوی نانوسیال. مهندسی مکانیک تبدیل انرژی. ۱۴۰۲; ۱۰ (۲) :۹۷-۱۱۴.
DOR: 20.1001.1.20089813.1400.10.2.2.2

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-22]
[DOR: 20.1001.1.20089813.1402.10.2.2.2]

دیویس[۲] اشاره نمود. که میزان نرخ انتقال حرارت با فرآیند انتقال حرارت جابجایی طبیعی در محفظه های بسته مورد بررسی قرار گرفت. به عنوان مثال، یکی از روش های ساده برای خارج نمودن گرمای تولید شده از المان های یک برد مدار الکترونیکی، جابجایی طبیعی است. میزان انتقال حرارت درون محفظه دستگاه را می توان با وجود موانع، چشمه های حرارتی و دیواره های ضخامت دار در آن کنترل نمود. بهینه سازی تجهیزات انتقال حرارت جهت رسیدن به راندمان بالاتر انرژی نیازمند تمرکز بر کوچک سازی تجهیزات از یک سو و افزایش شدت انتقال حرارت به ازای واحد سطح از سوی دیگر می باشد. از طرفی نیاز به شار حرارتی در محفظه ها، استفاده از خنک کننده های مایع را الزامی می کند. مهم ترین کاربرد نانو سیال ها به عنوان خنک کننده است[۳]. سیالاتی نظیرآب، روغن های معدنی و اتیلن گلایکول نقش زیادی درانتقال حرارت در فرآیندهای صنعتی مانند فرآیندهای تولید نیرو، فرآیندهای شیمیایی، فرآیندهای سرمایش وگرمایش و میکروالکترونیک برعهده دارند. خواص ضعیف انتقال حرارت سیالات متداول نظیر سیالات مذکور اولین مانع جدی در فشرده سازی و کارآمد کردن مبدلهای حرارتی است همچنین در طراحی ماشین های الکتریکی و مدارهای الکترونیکی، غالباً انتقال حرارت عامل محدود کننده می باشد. تحقیقات بسیاری از سوی پژوهشگران در مورد انتقال حرارت جابه جایی آزاد در شکل ها و هندسه های مختلف با شرایط مرزی گوناگون صورت گرفته است. در میان هندسه های مختلف مورد مطالعه پژوهشگران، محفظه ها به دلیل کاربردهای دامنه دار صنعتی و طراحی های مهندسی در شاخه های مختلف مربوط به انتقال حرارت مورد توجه بوده و بررسی های تحلیلی، عددی و تجربی متنوعی در جهت افزایش و یا کاهش میزان انتقال حرارت در این زمینه انجام گرفته است. یکی از روش ها برای بهبود انتقال حرارت استفاده از مخلوط ذرات نانو در سیال پایه می باشد. ازطرفی جریان نانو سیال در محفظه یک مساله کاربردی در خنک سازی تجهیزات الکترونیکی بالاخص با پیشرفت در تولید رایانه ها و تجهیزات الکترونیکی آنها می باشد علی رغم کارهای زیادی که در زمینه جابجایی طبیعی نانوسیالات انجام گرفته است، در بسیاری از تحقیقات پیشین برای شبیه سازی جریان و انتقال حرارت داخل محفظه مقاومت حرارتی دیواره ها را ناچیز فرض نموده اند هرچند در بسیاری از مسایل واقعی، رسانش دیواره ها نقش مهمی روی جریان وانتقال حرارت جابجایی طبیعی در داخل محفظه ایفا می کند. جریان نانو سیال در محفظه ها یک مساله کاربردی در مدل سازی برای خنک سازی تجهیزات الکترونیکی علی رغم کارهای زیادی که درزمینه جابجایی آزاد نانو سیال صورت گرفته است، به نظر می رسد هنوز به دلیل کاربردهای فراوان این پدیده کاستی های زیادی وجود دارد. بالحاظ کردن اثر رسانش دیواره توام با انتقال حرارت جابجایی آزاد نانوسیال داخل محفظه یک مساله واقعی و کاربردی تر مورد بررسی قرار می گیرد. در اینجا جهت آشنایی، برخی از مطالعات صورت گرفته در مورد محفظه ها با سیال خالص که در آنها رسانش دیواره نیز به شکل مختلفی در نظر گرفته شده است مرور می گردد.

کیم و ویسکانتا[۵-۴] محفظه مربعی که دیواره های آن دارای ضخامت هستند را درنظر گرفتند. آنها در مطالعات خود نشان دادند که با افزایش عدد رایلی و عدد پرانتل عدد ناسلت متوسط روی دیواره های محفظه افزایش می یابد. درکار دیگرشان آنها با بررسی اثر رسانش و تابش بر جابجایی آزاد داخل محفظه نشان دادند که رسانش و انتقال حرارت تابشی منجر به کاهش نرخ انتقال حرارت محفظه می گردد. کمنیسکی و پراکاش [۶]، میسرا و سرکار[۷] ، محفظه مربعی که یک دیواره آن دارای ضخامت است را در نظر گرفتند. نتایج آنها نشان داد که با افزایش ضریب رسانش دیواره در یک عدد رایلی مشخص دمای متوسط سیال افزایش می یابد. آچاریا و توسنگ[۸]، ایدر و بیلجن[۹]، نیز نشان دادند که تاثیر نسبت ضریب رسانش دیواره در یک عدد رایلی مشخص منجر به کاهش نرخ انتقال حرارت می گردد. عبدناصر و همکاران [۱۰]، به طور مشابه نشان دادند که هرگاه نسبت ضریب رسانش حرارتی افزایش یابد، عددناسلت متوسط، دمای سطح مشترک سیال و جامد و نیز سرعت جریان افزایش می یابد. خانافر و همکاران [۱۱] و سعید[۱۲]، درون محفظه را محیط متخلخل همگن و سیال خالص در نظر گرفتند نتایج آنها نشان داد که وقتی ضخامت دیواره افزایش می یابد، اختلاف دمای بین سطح داخلی و دمای مرز سرد کاهش می یابد. همچنین آنها نشان دادند در نسبت ضریب رسانش بالادر محیط متخلخل دریافتند، عدد ناسلت متوسط دیواره افزایش می یابد. تورکوگلا و یانکل[۱۳] به مطالعه عددی انتقال حرارت جابجایی آزاد و رسانش در محفظه ای با موانع متعددی که در سمت ضخیم دیواره قرار دارد، پرداختند و اثرات تعداد موانع را بر نرخ انتقال گرما مورد بررسی قرار دادند و متوجه شدند که میانگین عدد ناسلت با افزایش

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-22]

[DOR: 20.1001.1.20089813.1402.10.2.2.2]

تعداد مانع کاهش می یابد و نسبت ابعاد محفظه تاثیری در عدد ناسلت ندارد. کاهوکی[۱۵-۱۴] به مطالعه عددی جابجایی طبیعی درون محفظه ای قسمت بندی شده که از هوا پر شده است، پرداخت و با استفاده ازروش تفاضل محدود مشاهده کرد که عدد ناسلت متناسب با عدد رایلی، در حضور مانع جامد جداکننده افزایش یافته و عدد ناسلت متوسط با کاهش مقاومت حرارتی و افزایش ضخامت مانع اثرکمی بر روی نرخ انتقال حرارت دارد. ازجمله کارهای مشابه دیگر در بررسی انتقال حرارت جابجایی آزاد همراه با موانع با رفتارهای حرارتی مختلف از جمله چشمه حرارتی[۲۰-۱۶] و یا سطوح آدیاباتیک [۲۴-۲۱] و هدایت مانع [۳۱-۲۵] می توان اشاره کرد. نتایج حاصل نشان می دهد ویژگی های انتقال حرارت به طور قابل توجهی به افزودن موانع جامد، اندازه آنها، تعداد آنها وموقعیت شان درمحفظه ها وابسته است. هو وهمکاران[۳۲] به بررسی تجربی جابجایی آزاد نانوسیال آب- اکسید آلومنیوم و هدایت ذرات نانوسیال در سه نوع محفظه مربع شکل با ابعاد مختلف به همراه اندازه گیری تجربی کلیه خواص ترموفیزیکی نانوسیال پرداختند و اظهار داشتند که افزایش یا کاهش غیر عادی انتقال گرما را تنها با خواص ترموفیزیکی نانوسیال به طور ساده نمی توان توضیح داد. آنها دلایل ممکن برای این رفتار غیر عادی را مورد بحث و بررسی قرار دادند و توضیح دادند که اثر کسرحجمی متغیر که بر اثر انتقال نانوذرات به وجود می آید درجابه جایی آزاد نانوسیال می تواند مهم باشد. محمودی و همکاران [۳۳]یک محفظه مربعی شکل دو بعدی در نظر گرفتند، که دارای یک منبع جامد حرارتی افقی مستطیلی شکل شار ثابت روی دیواره عمودی به حالت مانع قرار گرفته است. نتایج آنها نشان دادکه با افزایش درصد حجمی نانوذرات عدد ناسلت متوسط افزایش می یابد. آنها نیز دریافتند که با افزایش درصد حجمی نانو سیال، متوسط دمای سیال کاهش می یابد. محمودی و همکاران[۳۴] در کاری دیگر یک محفظه دو بعدی با یک مانع عایق جامد مستطیلی شکل که روی دیواره پایینی واقع شده است و همچنین دیواره سمت چپ این محفظه دارای ضخامت و در معرض شار حرارتی ثابت و جابجایی اجباری با هوای محیط قرار دارد را در نظر گرفتند. نتایج آنها نشان داد که با افزایش درصد حجمی ذرات نانو نرخ انتقال حرارت زیاد می شود. بولاهیا و همکاران[۳۵]به مطالعه عددی انتقال حرارت طبیعی نانوسیال در محفظه ای مربعی، که دارای یک مانع سرد پرداختند. آنها اثرات پارامتر های مختلفی از جمله ارتفاع مانع و کسر حجمی نانو ذرات را مورد بررسی قرار دادند و به این نتیجه رسیدند که نرخ انتقال حرارت در داخل محفظه با افزایش ارتفاع مانع سرد، عدد ریلی و کسر حجمی نانو ذرات افزایش می‌یابد. دزودزو و همکاران[۳۶] نتایج عددی و تجربی انتقال حرارت ترکیبی جابجایی آزاد و هدایت را بوسیله ی ورقه های نازک یک مانع مورد بررسی قرار داد آنها همچنین جریان سیال درون محفظه ی مکعبی را در دو حالت بدون مانع و با مانع مورد بررسی قرار داد و به این نتیجه رسید که با ورود یک مانع عمودی درون محفظه انتقال حرارت جابجای کاهش می یابد. سلیمفن دیجیل و هاکان [۳۷]مطالعه انتقال حرارت جابجایی و رسانش در یک محفظه شیبدار قسمت بندی شده و پر شده از نانو سیالات مختلف در طرف های مختلف مانع بوسیله روش المان محدود پرداختند و اثرات عدد گراشف، زاویه شیب محفظه، نسبت انتقال حرارت از مانع به نانوسیال، موقعیت مانع و کسر حجمی نانوذرات جامد در جریان و ویژگی های مایع داخل را در محفظه مورد بررسی قرار دادند. از جمله کارهای اخیر نیز داگونچی و هشیم [۳۸] به مطالعه انتقال حرات جابجایی آزاد نانوسیال در محفظه بین استوانه مدور موج دار و محفظه لوزی شکل جامدتحت یک میدان مغناطیسی یکنواخت پرداختند. نتایج آنها نیز نشان داد وجود مانع جامد تاثیر زیادی بر نرخ انتقال حرارت دارد. رضوان و همکاران [۳۹] به بررسی انتقال حرارت نانوسیال در یک محفظه لوزی شکل و با وجود مانع جامد مربع شکل پرداختند نتایج آنها نشان داد وجود مانع جامد بر نرخ انتقال حرارت تاثیر بسزایی دارد. العبدالوی و همکاران [۴۰] به بررسی عددی جابجایی آزاد مانع مثلثی داغ داخل یک محفظه با روش شبکهٔ بولتزمن پرداخته و روابطی را جهت محاسبهٔ عدد ناسلت ارائه نمودند. بولاهیا و همکاران [۴۱]به مطالعه عددی انتقال حرارت طبیعی نانوسیال آب -مس در محفظه ای مربعی، دارای یک مانع سرد پرداختند. در کار آنها معادلات جابجایی با استفاده از روش ضمنی با جهت متغیر و فرمول تفاضل محدود حل شدند. آنها اثرات پارامتر های مختلفی از جمله ارتفاع مانع، عدد ریلی و کسر حجمی نانو ذرات را مورد بررسی قرار دادند نتایج حاصل آنها نشان داد نرخ انتقال حرارت در داخل محفظه با افزایش ارتفاع مانع سرد، عدد ریلی و کسر حجمی نانو ذرات افزایش می‌یا بد. سلیمفن دیجیل و هاکان [۴۲] به مطالعه انتقال حرارت ترکیبی جابجایی و رسانشی در یک محفظه شیبدار قسمت بندی شده و پر شده از نانوسیالات مختلف آب- اکسید مس و آب اکسید آلومینیوم در طرف های مختلف با وجود مانع پرداختند و اثرات عدد گراشف، زاویه شیب محفظه، نسبت انتقال حرارت از مانع به سیال، موقعیت مانع و

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-22]

[DOR: 20.1001.1.20089813.1402.10.2.2.2]

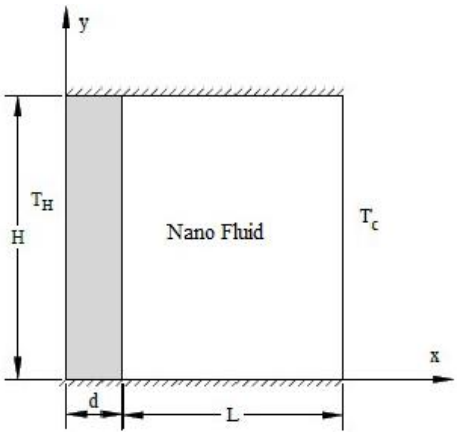
کسر حجمی نانوذرات جامد در جریان و ویژگی های نانوسیال داخل محفظه را مورد بررسی قرار دادند. لیو و همکاران [۴۳] انتقال حرارت جابجایی آزاد توام با رسانش درون یک محفظه حاوی موانع جامد با آرایه های مختلف را بررسی نمودند. نتایج آنها نشان داد ضریب رسانش حرارتی و تعداد بلوک های جامد بر نرخ انتقال حرارت تاثیر به سزایی دارد. حسنویی و همکاران [۴۴] به تجزیه و تحلیل عددی انتقال حرارت جابجایی آزاد توام با رسانش در یک محفظه با آرایه ای ازموانع جامد لوزی شکل در مرکز محفظه پرداختند. نتایج آنها نشان دادکه نرخ انتقال حرارت به نحوه قرارگیری و تعداد بلوکهای جامد لوزی شکل بستگی دارد همچنین نتایج آنها نشان دادرسانش حرارتی بلوک های جامد بر انتقال حرارت جابجایی آزاد نقش سودمندی دارد.

همانگونه که ذکر شد، موانع تأثیرات به سزایی برجریان سیال و نرخ انتقال حرارت به دلیل اهمیت کاربرد آنها در صنایع مختلف مکانیکی و الکترونیکی دارند. لذا بررسی این موانع در محفظه ها، بررسی تاثیر تغییر مکان وزاویه قرارگیری آنها و تأثیر تغییر ابعاد و همچنین میزان رسانش آنها جهت افزایش دانش علمی و عمومی بسیار ضروری به نظر می‌رسد[۱۹]. در واقع وجود مانع و رسانش آنها، تاثیر مستقیم بر روی جریان سیال، شدت و ساختار آن داشته و به علت اثر متقابل بین سیال و مرزهای محفظه، در نرخ انتقال حرارت نیز موثر است [۲۶]. کارهای عددی بسیاری جهت مطالعه ی انتقال حرارت جابجایی آزاد سیال در هندسه ها و شرایط مرزی مختلف و برای انواع گوناگون سیالات صورت گرفته است. به طوری که مرور مقالات فوق نشان می‌دهد. اثر رسانش و ابعاد وتعداد ناحیه جامد و موانع بر جریان و انتقال حرارت جابجایی آزاد داخل محفظه زیاد است. در نتیجه در کار حاضر به مطالعه اثر پارامتر مهم مرتبط با رسانش حرارتی دیواره جامد محفظه، نسبت ضریب رسانش حرارتی توام با اثر کسر حجمی نانوذرات بر جریان و انتقال حرارت جابه جایی آزاد دریک محفظه دو بعدی حاوی نانوسیال را به صورت عددی می‌پردازیم.

۲- معرفی مساله، معادلات حاکم، محاسبه خواص نانوسیال، شرایط مرزی و روش حل عددی

۲-۱- معرفی مساله

هندسه ی در نظر گرفته شده برای مسئله ی حاضر درشکل ۱ نشان داده شده است. یک محفظه ای دو بعدی پر شده از نانوسیال، با ابعادی به ارتفاع H وبه عرضL می باشد. دیواره عمودی محفظه در سمت چپ دارای ضخامت d و رسانش حرارتی k بوده که دیواره سمت راست در دمای سرد T_c و دیواره سمت چپ در دمای گرم T_h می باشد. سایر دیواره های محفظه آدیاباتیک می باشند. جریان آرام، پایدار و نانوسیال داخل محفظه نیوتنی و غیر قابل تراکم با خواص ثابت فرض می شود. نانو ذرات دارای شکل یکسان، یکنواخت، هم اندازه وکروی شکل فرض می شوند. هدف بررسی میدان جریان و انتقال حرارت جابجایی آزاد محفظه توام با رسانش دیواره با مطالعه اثر پارامترهای مهم ازجمله کسرحجمی نانوسیال و اثر ضریب رسانش بر جریان و انتقال حرارت درداخل محفظه به صورت عددی می باشد.



شکل ۱: طرحی از هندسه مساله

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-22]

[DOR: 20.1001.1.20089813.1402.10.2.2.2]

۲-۲-معادلات حاکم

در این بررسی تعادل حرارتی بین سیال پایه و نانوذرات برای نانو سیال در نظر گرفته می شود. با صرف نظر از تلفات حرارتی اصطکاکی تمامی خواص ترموفیزیکی، به جز چگالی که براساس تقریب بوزینسک مدل می شود ثابت در نظر گرفته شده اند. معادلات بدون بعد حاکم برای جریان آرام و دائم دوبعدی داخل محفظه عبارتند از:

معادله پیوستگی:

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

معادله مومنتوم در راستای x :

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

معادله مومنتوم در راستای y:

$$u^*\frac{\partial v^*}{\partial x^*}+v^*\frac{\partial v^*}{\partial y^*}=-\frac{\partial p^*}{\partial y^*}+\frac{\mu_{nf}}{\rho_{nf}\alpha_f}\left(\frac{\partial^2 v^*}{\partial x^{*2}}+\frac{\partial^2 v^*}{\partial y^{*2}}\right)+Ra_f Pr_f\frac{\rho_f}{\rho_{nf}}T^* \quad (۳)$$

معادله انرژی:

$$u^*\frac{\partial T^*}{\partial x^*}+v^*\frac{\partial T^*}{\partial y^*}=\frac{\alpha_{nf}}{\alpha_f}\left(\frac{\partial^2 T^*}{\partial x^{*2}}+\frac{\partial^2 T^*}{\partial y^{*2}}\right) \quad (۴)$$

معادله انرژی حاکم برای محیط جامد:

$$\left(\frac{\partial^2 T_W{}^*}{\partial x^{*2}}+\frac{\partial^2 T_W{}^*}{\partial y^{*2}}\right)=0 \quad (۵)$$

در استخراج معادلات بدون بعد بالا از متغیرهای بی بعد زیر استفاده شده است.

$$u^*=\frac{u}{u_0}\,,v^*=\frac{v}{u_0}\,,x^*=\frac{x}{H}\,,y^*=\frac{y}{H}\,,p^*=\frac{p}{p_0}\,,T^*=\frac{(T-T_c)}{T_H-T_C} \quad (۶)$$

در معادلات بالا Ra عدد رایلی و Pr عدد پرانتل می باشند و به صورت زیر تعریف می شوند.

$$Ra_f=\frac{\beta_f g\Delta T H^3}{\vartheta_f\alpha_f} \quad (۷)$$

$$Pr_f=\frac{\vartheta_f}{\alpha_f} \quad (۸)$$

که در آنها H ارتفاع محفظه، T_H دمای دیواره گرم و T_c دمای دیواره سردتر و به عنوان دمای مرجع، α ضریب پخش حرارتی، β ضریب انبساط حجمی، ρ چگالی و μ ویسکوزیته دینامیکی می باشد. همچنین شرایط مرزی مسئله به صورت زیر تعریف می گردد:

شرایط مرزی جریان برای دیواره ها:

$$u^*=0\,,v^*=0 \quad (۹)$$

برای دیواره های بالا و پایین محفظه که عایق می باشد شرط مرزی حرارتی:

$$\frac{\partial T^*}{\partial y^*}=0 \quad (۱۰)$$

شرط مرزی حرارتی برای سطح خارجی دیواره راست و چپ محفظه:

$$T_W{}^*=0 \quad (۱۱)$$

شرط مرزی حرارتی برای مرز مشترک نانوسیال با دیواره جامد:

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-22]

[DOR: 20.1001.1.20089813.1402.10.2.2.2]

$$\frac{\partial T^*}{\partial y^*})_{nf} = k_r \frac{\partial T^*}{\partial y^*})_w \quad (۱۲)$$

که در آن k_r نسبت ضریب هدایت محیط جامد به ضریب هدایت نانوسیال می باشد.

$$K_r = \frac{k_w}{k_{nf}} \quad (۱۳)$$

۲-۳-محاسبه خواص نانوسیال

همانطور که در معادلات حاکم برمساله دیده می شود، برای حل معادلات نیاز به خواص ترموفیزیکی نانوسیال می باشد چگالی، ضریب انبساط حجمی، ظرفیت حرارتی و ضریب پخش حرارتی نانوسیال به کمک خواص سیال خالص و نانوذرات از روابط (۱۴) الی (۱۷) محاسبه و معادل می شوند:

$$\rho_{nf} = \rho_s + (1-\varphi)\rho_f \quad (۱۴)$$

$$(\rho c_p)_{nf} = (1-\phi)(\rho c_p)_f + \phi(\rho c_p)_s \quad (۱۵)$$

$$(\rho\beta)_{nf} = (1-\phi)(\rho\beta)_f + \phi(\rho\beta)_s \quad (۱۶)$$

$$\alpha_{nf} = \frac{k_{nf}}{(\rho c_p)_{nf}} \quad (۱۷)$$

که در آنها ϕ کسر حجمی نانوذرات و c_p ظرفیت گرمایی می باشد، برای مدل کردن ویسکوزیته دینامیکی نانوسیال از رابطه بریکمن و برای ضریب هدایت حرارتی نانوسیال، مدل تئوری کو کلینسترو استفاده شده است. در مدل کو کلینسترو برای ضریب هدایت حرارتی اثر اندازه ذره، کسر حجمی ذره، وابستگی دما و خواص سیال پایه را با در نظر گرفتن حرکت بروانی نانوذرات در نظر گرفته شده است [۴۲-۴۳].

$$\mu_{nf} = \frac{\mu_f}{(1-\phi)^{2.5}} \quad (۱۸)$$

$$\frac{k_{nf}}{k_f} = \frac{k_s + 2k_f - 2\phi(k_f - k_s)}{k_s + 2k_f + \phi(k_f - k_s)} + 5\times 10^5 \phi\beta(\rho c_p)_f \sqrt{\frac{K_B T}{2\rho_s d_s}} f(T,\phi) \quad (۱۹)$$

که در آن مقادیر k_B ثابت بولتزمن، β و $f(T,\phi)$ به کمک روابط ۱۸ و ۱۹ محاسبه می شوند.

$$\beta = 0.0137(100\phi)^{-0.8229} \ , \quad \phi < \%1 \quad (۲۰)$$

$$\beta = 0.0011(100\phi)^{-0.7272} \ , \quad \phi > \%1 \quad (۲۱)$$

$$f(T,\phi) = (-6.04\phi + 0.4705)T + (1772.3\phi - 134.63) \ , \%1 \le \phi \le \%4 \ , 300K \le T \le 325K \quad (۲۲)$$

برای همه روابط زیر نویس های f ،s وnf به ترتیب اشاره به سیال خالص پایه، نانوذرات و نانوسیال دارد. برای رسانش حرارتی مدل های تئوری مختلفی ارائه شده است که در آن اثر اندازه ذره،کسرحجمی ذره، وابستگی دما و خواص سیال پایه را با در نظر گرفتن حرکت براوانی نانوذرات در محدوده های دمایی مختلف در نظر گرفته می شود. در مدل مذکور با درنظر گرفتن کسرحجمی و خواص فیزیکی سیال پایه اثر دما نیز در نظر گرفته شده است خواص ترموفیزیکی آب و نانوذرات مس در جدول ۱آورده شده است.

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-22]

[DOR: 20.1001.1.20089813.1402.10.2.2.2]

جدول ۱: خواص ترموفیزیکی آب خالص و نانوذرات مس

خاصیت فیزیکی	نماد	مقدار برای آب خالص	مقدار برای نانو ذرات مس	واحد
چگالی	ρ	۹۹۷,۱	۸۹۵۴	$(kg.m^{-3})$
گرمای ویژه در فشار ثابت	C_p	۴۱۷۹	۳۸۳	$(J.kg.K^{-1})$
ضریب رسانش حرارتی	k	۰,۶	۴۰۰	$(W.mK^{-1})$
ضریب انبساط حرارتی	β	$۲/۱\times۱۰^{-۴}$	$۱,۶۷\times۱۰^{-۵}$	(k^{-1})
ویسکوزیته سینماتیکی	υ	$۸/۹۵\times۱۰^{-۷}$	–	$(m^2.s^{-1})$
ویسکوزیته دینامیکی	μ	$۸,۹۳\times۱۰^{-۴}$	–	$(kg.m^{-1}.s^{-1})$

نرخ انتقال حرارت را با مقدار عدد ناسلت می توان بیان کرد. جهت بررسی تاثیر پارامترها بر رفتار حرارتی سیال، پس از هر تغییر در فرضیات مسئله عدد ناسلت را بررسی می کنیم. اعداد ناسلت بزرگتر بیانگر انتقال حرارت جابجایی موثرتر هستند. این پارامتر به صورت زیر تعریف می شود:

$$\mathrm{Nu} = \frac{\mathrm{h_{nf}\,L}}{\mathrm{k_f}} \qquad (۲۳)$$

عدد ناسلت به دو صورت محلی و متوسط بیان می‌شود. برای محاسبه عدد ناسلت محلی نیاز به محاسبه شارحرارتی و ضریب انتقال حرارت جابجایی داریم. از قوانین نیوتن و هدایت فوریه عدد ناسلت محلی محاسبه می گردد:

$$\mathrm{q_w} = -\mathrm{k_f}\nabla.\,\mathrm{T.\,n} \qquad (۲۴)$$

ضریب انتقال حرارت جابجایی با استفاده از شار حرارتی از رابطه زیر بدست می آید:

$$\mathrm{h_{nf}} = \frac{\mathrm{q_w}}{(\mathrm{T}_w - \mathrm{T_{ref}})} \qquad (۲۵)$$

رابطه‌ی ناسلت محلی در امتداد دیواره بصورت زیر بیان می شود:

$$\mathrm{Nu_s} = -\frac{\mathrm{k_{nf}}}{\mathrm{k_f}}\frac{\partial \mathrm{T}}{\partial \mathrm{N}} \qquad (۲۶)$$

در روابط فوق $\mathrm{T_w}$ دمای دیواره، $\mathrm{T_{ref}}$ دمای مرجع، h ضریب انتقال حرارت جابجایی، $\mathrm{q_w}$ شار حرارتی محلی، $\mathrm{L_{ref}}$ طول مشخصه موثر محفظه N مولفه عمود برسطح و S مولفه مماس برسطح است و k ضریب انتقال حرارت هدایت است ناسلت متوسط در امتداد دیواره از رابطه (۲۳) محاسبه می شود.

$$\overline{\mathrm{Nu}} = \frac{1}{\mathrm{A}}\int_{\mathrm{A}} \frac{\mathrm{h_{nf}\,L}}{\mathrm{k_f}}\,\mathrm{dA} \qquad (۲۷)$$

برای محاسبه انتقال حرارت کل از عدد ناسلت متوسط وضرب طرفین در A طبق رابطه خواهیم داشت:

$$\overline{\mathrm{q}}\mathrm{A} = \overline{\mathrm{Nu}}(\mathrm{T_w} - \mathrm{T_{ref}})\frac{\mathrm{kA}}{\mathrm{L_{ref}}} \qquad (۲۸)$$

باتوجه به اینکه انتقال حرارت کل Q برابر است با:

$$Q = \overline{\mathrm{q}}\mathrm{A} \qquad (۲۹)$$

در نتیجه انتقال حرارت کل برحسب عدد ناسلت متوسط مطابق رابطه زیر بدست می آید:

$$Q = \overline{\mathrm{Nu}}(\mathrm{T_w} - \mathrm{T_{ref}})\frac{\mathrm{kA}}{\mathrm{L_{ref}}} \qquad (۳۰)$$

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-22]

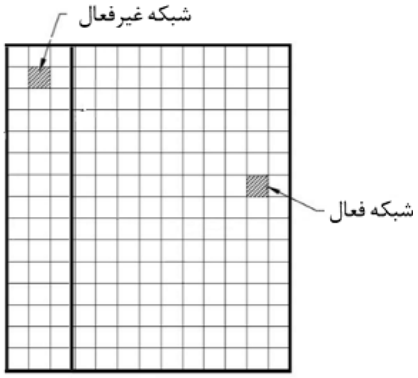
[DOR: 20.1001.1.20089813.1402.10.2.2.2]

۲-۴-روش حل عددی

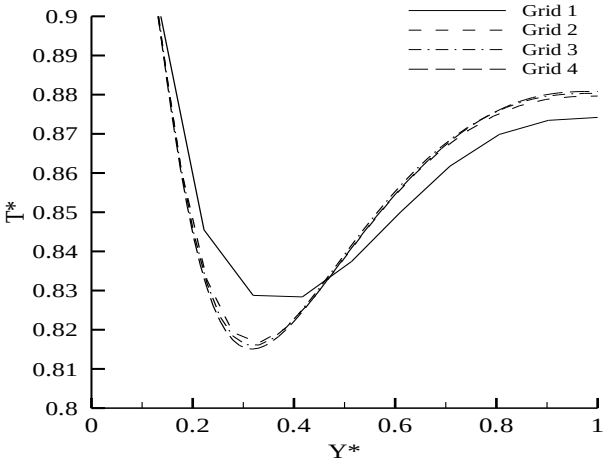
معادلات حاکم و شرایط مرزی با استفاده از روش عددی حجم محدود حل شده و برای کوپل سرعت و فشار الگوریتم سیمپل استفاده شده است. برای حصول شبکه حل مناسب و بررسی استقلال شبکه، مطابق با شکل ۲ شبکه محاسباتی منظم و نواحی فعال و غیرفعال نمایش داده شده است همچنین برای چهار نوع تغییرات در اندازه شبکه درمحفظه ای با شرایط $L^*=1$، $H^* = 1$، $d^* = 0.125$ ، $\phi = 0$ و $Ra = 10^5$، $Kr = 0.1$، و دمای مرجع $T_c^* = 0$ انتخاب شده است. مقدار عدد ناسلت متوسط در امتداد کل دیواره های محفظه به ازای تعداد المان های مختلف در جدول ۲ نشان داده شده است. رابطه ۳۱ محاسبه درصد خطای نسبی اعداد ناسلت به ازای تعداد المان های مختلف در هر مرحله را نشان می دهد.

$$\left|\frac{Nu_{\text{جدید}} - Nu_{\text{قدیم}}}{Nu_{\text{قدیم}}}\right| \times 100 \qquad (۳۱)$$

مطابق جدول ۲ اختلاف بین تعداد المان های 64960 و 1039360 کمتراز یک درصد است. اما مدت زمان لازم جهت رسیدن به همگرایی در تعداد المان 1039360 تقریبا ۳ برابر مدت زمان سپری شده در تعداد المان 64960 می باشد. همچنین در شکل ۳ تغییرات دما بر حسب Y^* در $x^* = 0.75$ در تعداد اندازه های شبکه مختلف رسم شده است. مشاهده می شود در سه شبکه آخر خطای نسبی کمتر از ۰/۵ در صد است. لذا شبکه ۳ به عنوان شبکه مناسب برای ادامه بررسی های عددی انتخاب شده است.



شکل ۲: نمایش شبکه و نواحی فعال و غیرفعال



شکل ۳: تغییرات دما بر حسب Y^* در $x^* = 0.75$ در چهار شبکه متفاوت

جدول۲: عدد ناسلت متوسط به ازای تعداد المان های مختلف

تعداد المان ها	Nu	درصد خطا
2030	4.8872	-
8120	4.8064	1.6393
64960	4.7827	0.4166
1039360	4.7634	0.4790

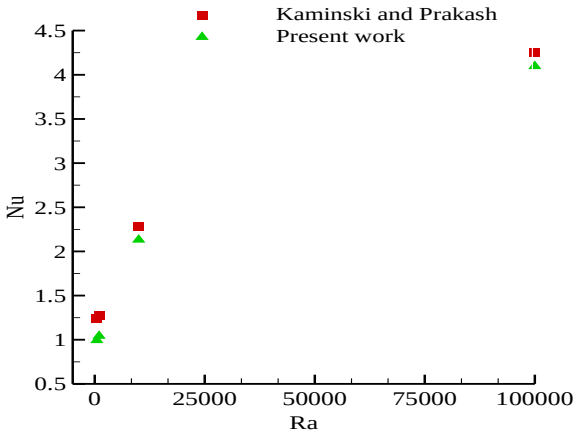
جهت بررسی صحت روش عددی بکار رفته در این پژوهش، در دوحالت، نتایج بدست آمده را با سایر پژوهشگران مقایسه می کنیم. تا مقدار اختلاف میان نتایج مشاهده و مقایسه گردد. در حالت اول نتایج حاصل با کار کمنیسکی و پراکاش [۶] که محفظه با دیواره سمت چپ عمودی دارای ضخامت وسایردیواره های آن بدون ضخامت می باشند و همچنین سطح عمودی

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-22]

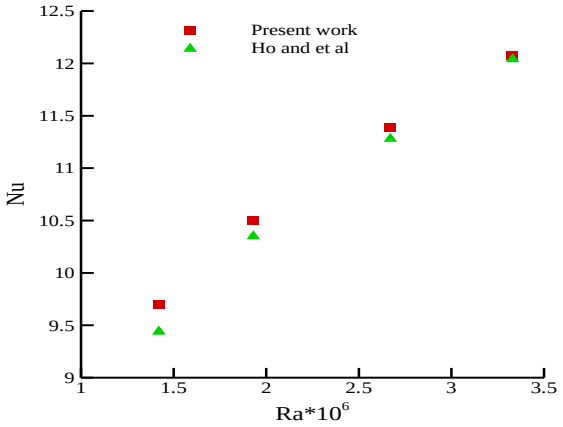
[DOR: 20.1001.1.20089813.1402.10.2.2.2]

دیواره های سمت چپ و راست آن در دماهای ثابت گرم و سرد نگه داشته شده اند در حالی که دیواره های افقی آن آدیاباتیک هستند در نظر گرفته شده است. نتایج بدست آمده از کار حاضر با نتایج کار کمنیسکی و پراکاش [۶] با هم مقایسه شده‌اند. شکل۴ مقادیر اعداد ناسلت متوسط در امتداد سطح دیواره گرم دارای ضخامت را در کارحاضر وکار کمنیسکی و پراکاش [۶]را نشان می دهد. مشاهده می شود مقدار خطای نسبی، در نتایج بدست آمده کمتر از۱ درصد است.

در مرحله دوم نتایج عددی با داده های کار تجربی هو و همکاران[۳۰] که به بررسی جابجایی طبیعی نانوسیال در یک محفظه پرداختند مقایسه شده است. شکل ۵ مقایسه نتایج دو کار رانشان می دهد، نتایج حاصل نشان داد که مطابقت خوبی بین کار عددی حاضر و نتایج تجربی وجود دارد و خطای نسبی بین نتایج عددی و تجربی هو و همکاران[۳۰] ۰,۴ تا ۵ درصداست.



شکل ۴: مقایسه عدد ناسلت متوسط در امتداد دیواره بین کار حاضر و کار کمنیسکی و پراکاش[۶]در عدد رایلی های مختلف در محفظه ای با $K_r=5$ و دمای مرجع $T^* = 0$



شکل۵: مقایسه مقادیر ناسلت متوسط در مقادیر مختلف اعداد رایلی کارحاضر وکارتجربی هو وهمکاران[۳۰]

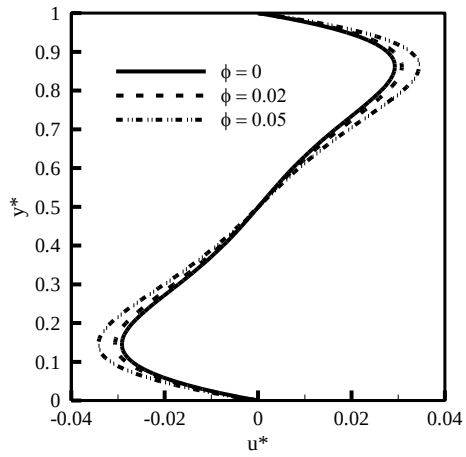
۳- نتایج و بحث

۳-۱- بررسی اثر کسر حجمی نانوذرات بر روی پارامترهای هیدرودینامیکی و حرارتی

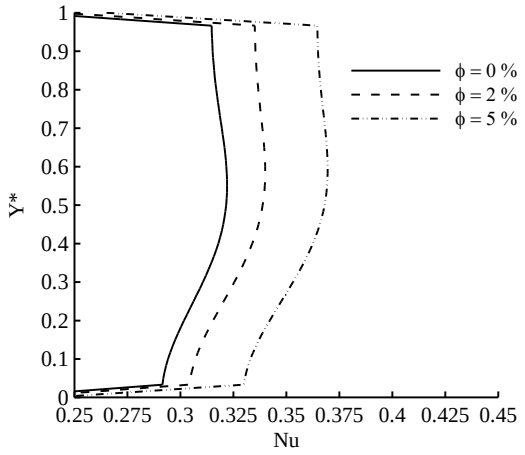
جهت بررسی اثر تغییر کسرحجمی نانوذرات بر روی جریان و انتقال حرارت جابجایی آزاد توام با رسانش دیواره، جریان نانوسیال آب- مس درون محفظه، عدد رایلی $Ra = 10^5$ و $K_r = 1$ در نظر گرفته شده است. محفظه دارای نسبت منظری $Ar=L/H = 1$, می باشد. در این بررسی از سه کسر حجمی $\phi = 0$ ، $\phi = 0.02$ و$\phi = 0.05$ برای نانو ذرات استفاده شده است. زیرا این مقادیر در این محدوده خواص نانو ذرات را به طور دقیق تعیین و به صورت قابل تمایز مشخص می نماید و همچنین به عنوان یک مقدار محدوده مناسب و استاندارد برای کسر حجمی نانوذرات در بیشتر مقالات علمی استفاده می گردد.از طرفی خواص فیزیکی نانوذرات مس و سیال پایه آب در دمای مرجع $Tc=300\ k$در نظر گرفته شده است. باتوجه به اینکه خواص فیزیکی نانوسیال تابع کسر حجمی نانوذرات می باشد در نتیجه برای هرکسر حجمی خصوصیات فیزیکی این سیال تغییر می کند با افزایش کسر حجمی ذرات نانو با توجه به بالا بودن رسانش حرارتی و چگالی این ذرات، رسانش حرارتی و چگالی سیال نانو افزایش می یابد. همچنین به دلیل اینکه گرمای ویژه ذرات نانو از آب کمتر است گرمای ویژه مخلوط آن ها یعنی نانو سیال نیز دارای مقدار کمتری خواهد بود. (شکل۶) تغییرات سرعت بی بعد در جهت طولی، (شکل۷) تغییرات عدد بی بعد ناسلت در امتداد دیواره سمت چپ و (شکل ۸) توزیع دمای بی بعد نانوسیال در راستای x^* خط میانی محفظه و همچنین (شکل۹) خطوط جریان نانوسیال را در کسر حجمی های مختلف نشان می دهند.

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-22]

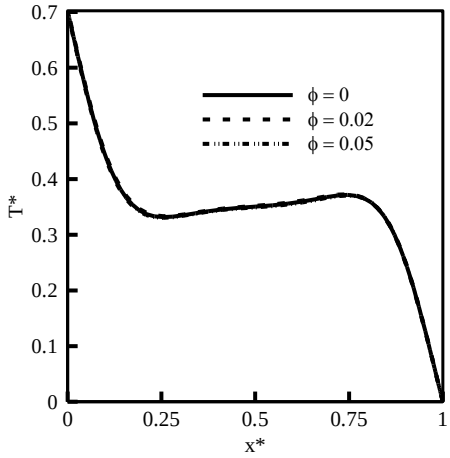
[DOR: 20.1001.1.20089813.1402.10.2.2.2]



شکل۶: توزیع طولی سرعت بی بعد نانوسیال در کسر حجمی های مختلف در راستای y^* میانی محفظه ای با $AR = 1$، $Ra = 10^5$ و $d/H = 0.125$ ،$K_r = 1$



شکل ۷: تغییرات عدد ناسلت روی دیواره سمت چپ در کسر حجمی های مختلف درمحفظه



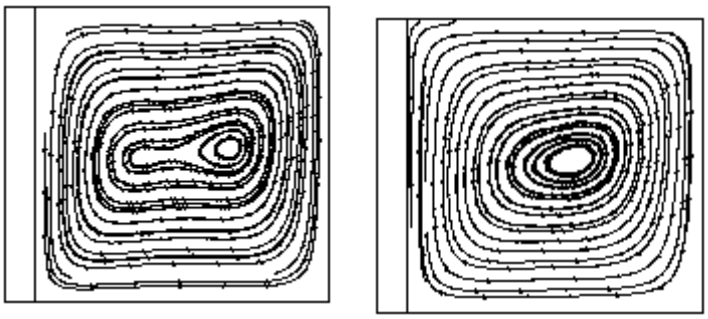
شکل ۸: توزیع دمای بی بعد نانوسیال در کسر حجمی های مختلف در راستای X^* میانی محفظه ای با $AR = 1$، $Ra = 10^5$ و $d/H = 0.125$،$K_r = 1$

با افزایش کسر حجمی ذرات نانو با توجه به بالا بودن هدایت حرارتی و چگالی این ذرات، هدایت حرارتی و چگالی سیال نانو افزایش می یابد. همچنین به دلیل اینکه گرمای ویژه ذرات نانو از آب کمتر است گرمای ویژه مخلوط آن ها یعنی نانو سیال نیز دارای مقدار کمتری خواهد بود. (شکل۶) تغییرات سرعت بی بعد در جهت طولی را در امتداد خط میانی محفظه را نشان می دهد مشاهده می شود با افزایش کسر حجمی سرعت افزایش می یابد. زیرا با افزایش کسر حجمی و عبور شار حرارتی از سطح دیواره قدرت و شدت جریان داخل محفظه افزایش می یابد که این امر منجر به افزایش سرعت نانوسیال می گردد. همچنین (شکل۹) خطوط جریان نانوسیال را در کسر حجمی های مختلف نشان می دهند که با افزایش کسر حجمی مشاهده می گردد خطوط جریان تمایل به تشکیل گردابه جدید دارند. با توجه به توزیع سرعت، گردش جریان نیز به صورت ساعتگرد است. علاوه بر آن با افزایش کسر حجمی مقادیر ناسلت در امتداد دیواره افزایش یافته و حرارت بیشتری در اثر افزایش کسر حجمی انتقال می یابد که این امر در (شکل۷) تغییرات عدد بی بعد ناسلت در امتداد دیواره سمت چپ نشان داده شده است. عدد ناسلت متناسب است با عکس حاصلضرب گرادیان دما در روی دیواره در ضریب رسانش حرارتی می باشد که کاهش حضور نانوذرات با افزایش ضریب هدایت حرارتی نسبت به گرادیان دما کمتر بوده و بنابراین عدد ناسلت با افزایش کسر حجمی افزایش

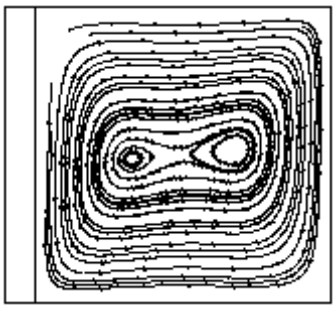
[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-22]

[DOR: 20.1001.1.20089813.1402.10.2.2.2]

پیدا می کند. (شکل ۸) توزیع دمای بی بعد نانوسیال در راستای x^* خط میانی محفظه را نشان می دهد مشاهده می شود که با افزایش کسر حجمی دمای بی بعد داخل محفظه تغییرات چندانی نداشته است. با افزایش کسر حجمی نانوذرات، باتوجه به ثابت بودن دمای دیواره سرد، منجر به افزایش ضریب هدایت حرارتی و همچنین کاهش ظرفیت گرمایی نانوسیال می باشد. که در کل مطابق با رابطه ۶ تغییرات چندانی برای دمای بی بعد نانوسیال ندارد.



b) $\phi = 0.02$ a) $\phi = 0$



c) $\phi = 0.05$

شکل ۹: خطوط جریان در کسر حجمی های مختلف محفظه ای با $AR = 1$، $d/H = 0.125$، $Ra = 10^5$ و $K_r = 1$

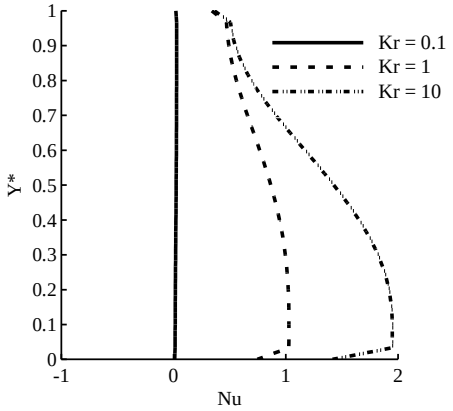
۳-۲-بررسی اثرات رسانش حرارتی دیواره بر روی پارامترهای هیدرودینامیکی و حرارتی

جهت بررسی اثر رسانش بر روی انتقال حرارت جابجایی آزاد جریان نانوسیال آب- مس درون محفظه، عدد رایلی $Ra = 10^4$ در نظر گرفته شده است. محفظه دارای نسبت منظری $Ar = 1$ می باشد. در این بررسی از سه نسبت ضریب هدایت $K_r = 0.1$ ، $K_r = 1$ و $K_r = 10$ استفاده شده است. باتوجه به اینکه خواص فیزیکی نانوسیال تابع کسر حجمی نانوذرات می باشد در نتیجه برای هرکسر حجمی خصوصیات فیزیکی این سیال تغییر می کند خواص فیزیکی نانوسیال در کسرحجمی $\phi = 0.02$ در این بررسی به کار گرفته شده است. (شکل ۱۰) نمودار عدد ناسلت را در نسبت ضرایب رسانش مختلف روی دیواره های سمت چپ محفظه نشان می دهد. همچنین جدول ۳ مقادیرتغییرات اعداد ناسلت متوسط در امتداد کل دیواره های محفظه در عدد رایلی ثابت برای نسبت ضریب رسانش مختلف نشان می دهد. مشاهده می شود که با افزایش نسبت ضریب رسانش در یک کسرحجمی ثابت مقادیر ناسلت روی دیواره سمت چپ افزایش می یابند. (شکل ۱۱) به ترتیب نمودار تغییرات دمای بی بعد در امتداد خط مرکزی محفظه و کانتورهای دما در ضریب رسانش های مختلف نشان می دهند. مشاهده می شود با افزایش ضریب هدایت مقادیر دما کاهش می یابند. با افزایش نسبت ضریب رسانش، ضریب رسانش دیواره جامد افزایش یافته و انتقال حرارت بیشتری از سطح مشترک جامد و نانوسیال عبور می نماید. این امر بر دمای نانوسیال موثر بوده و منجر به کاهش دمای بی بعد نانوسیال نیزمی گردد. (شکل۱۲) توزیع طولی سرعت بی بعد نانوسیال در نسبت ضریب رسانش مختلف را در راستای y^* میانی محفظه نشان می دهد. در این شکل مشاهده می شود که با افزایش نسبت ضریب رسانش در یک کسرحجمی ثابت مقادیر مولفه طولی بی بعد سرعت افزایش می یابد. با افزایش نسبت ضریب رسانش، ضریب رسانش دیواره جامد افزایش یافته و انتقال حرارت

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-22]

[DOR: 20.1001.1.20089813.1402.10.2.2.2]

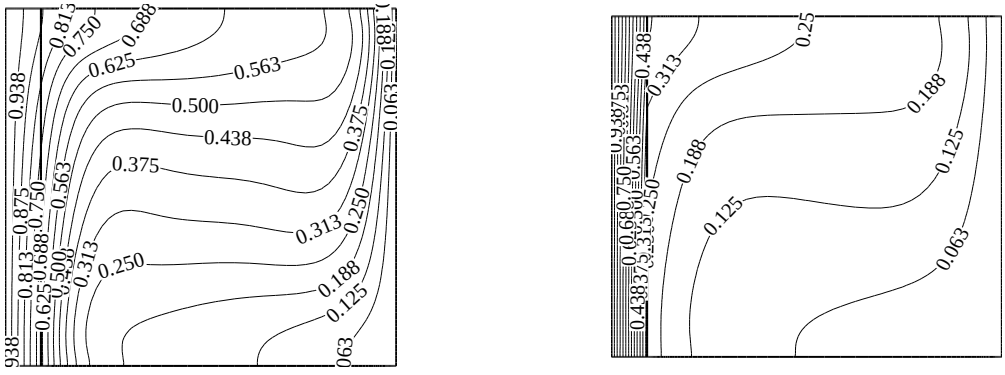
بیشتری از سطح مشترک جامد و نانوسیال عبور می نماید با عبور شار حرارتی از سطح دیواره قدرت و شدت جریان داخل محفظه افزایش می یابد که این امر منجر به افزایش سرعت نانوسیال می گردد. در نتیجه با افزایش ضریب رسانش دیواره مولفه های سرعت افزایش می یابد.



شکل ۱۰: نمودار تغییرات عدد ناسلت دیواره سمت چپ در نسبت ضریب رسانش مختلف درمحفظه ای با AR = 1، $Ra = 10^4$ و $\phi = 0.02$ ،$w_0/H = 0.125$

جدول ۳: مقدارتغییرات اعداد ناسلت متوسط در امتداد کل دیواره های محفظه در عدد رایلی ثابت برای نسبت ضریب رسانش مختلف

kr	ناسلت متوسط در امتداد دیواره های محفظه Nu	درصد تغییرات
0.1	1.08	-78%
1	4.63	0
10	8.13	75%
100	14.04	203%

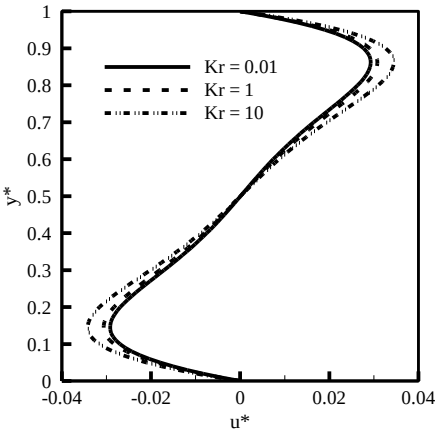


b) a)

شکل ۱۱: کانتورهای دمای بی بعد با بزرگنمایی درمحفظه ای با AR = 1 ، d/H = 0.125، $Ra = 10^4$ $\phi = 0.02$ a) در نسبت ضریب هدایت Kr =0.1، b) در نسبت ضریب رسانش Kr =1

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-22]

[DOR: 20.1001.1.20089813.1402.10.2.2.2]



شکل ۱۲: توزیع طولی سرعت بی بعد نانوسیال در نسبت ضریب هدایت مختلف را در راستای y^* میانی محفظه مختلف درمحفظه ای با $AR = 1$، $w_0/H = 0.125$، $\phi = 0.02$ و $Ra = 10^4$

با افزایش نسبت ضریب رسانش، ضریب رسانش دیواره جامد افزایش یافته و انتقال حرارت بیشتری از سطح مشترک جامد و نانوسیال عبور می نماید که این امر بر دمای نانوسیال موثر بوده و منجر به کاهش دمای بی بعد نانوسیال می شود. در نتیجه جهت خنک سازی داخل محفظه هرچه نسبت ضریب بیشتر باشد مناسب تر است. به علاوه با افزایش نسبت ضریب رسانش، ضریب رسانش دیواره جامد افزایش یافته و انتقال حرارت بیشتری از سطح مشترک جامد و نانوسیال عبور می نماید. همچنین نشان داده شد که با افزایش نسبت ضریب رسانش، مقادیر اعداد ناسلت در امتداد دیواره های محفظه افزایش یافتند.

۴- نتیجه‌گیری

نتایج حاصل نشان داد با افزایش کسر حجمی ذرات نانو با توجه به بالا بودن هدایت حرارتی و چگالی این ذرات، هدایت حرارتی و چگالی سیال نانو افزایش می یابد. همچنین به دلیل اینکه گرمای ویژه ذرات نانو از آب کمتر است گرمای ویژه مخلوط آن ها یعنی نانو سیال نیز دارای مقدار کمتری خواهد بود. با افزایش کسر حجمی نانوذرات باتوجه به ثابت بودن دمای دیواره سرد، با افزایش ضریب هدایت حرارتی و همچنین کاهش ظرفیت گرمایی نانوسیال همراه می باشد. در کل با افزایش کسر حجمی، تغییرات چندانی برای دمای بی بعد نانوسیال ندارد. همچنین اثر کلی افزایش کسر حجمی بر سرعت ها نشان داد، با افزایش کسر حجمی سرعت نانوسیال افزایش می یابد. علاوه بر آن با افزایش کسر حجمی مقادیر ناسلت در امتداد دیواره افزایش یافته و حرارت بیشتری در اثر افزایش کسر حجمی انتقال می یابد. از طرفی باتوجه به اصل پایستاری و قانون اول ترمودینامیک اختلاف انتقال حرارت های ورودی و خروجی در هر کسر حجمی مشاهده می شود که اختلاف ناچیز می باشد. در نتیجه انتقال حرارت کلی محفظه با افزایش کسر حجمی تغییری نمی کند. یکی از مهمترین کاربردهای نانوسیال، بکارگیری آن در خنک کاری قطعات الکترونیکی می باشد. به همین دلیل مقدار حرارت عبوری از سطح دیواره های محفظه حاوی نانوسیال در کسر حجمی های مختلف، پارامتر مناسبی جهت بررسی کارآیی نانوسیال می باشد. بنابراین برای سرد نگه داشتن داخل محفظه و خنک کاری آن اضافه کردن نانوذرات به نانوسیال عامل مثبت و سودمندی می باشد. با افزایش نسبت ضریب رسانش، ضریب رسانش دیواره جامد افزایش یافته و انتقال حرارت بیشتری از سطح مشترک جامد و نانوسیال عبور می نماید. این امر بر دمای نانوسیال موثر بوده و منجر به افزایش دمای بی بعد نانوسیال می گردد همچنین با افزایش نسبت ضریب رسانش در یک کسرحجمی ثابت مقادیر ناسلت روی دیواره سمت چپ افزایش می یابند. بنابراین در این کار انتقال حرارت ترکیبی جابجایی آزاد توام با رسانش دیواره جامد در محفظه ای حاوی نانوسیال آب- مس به صورت عددی مورد مطالعه قرار گرفت. برخی از نتایج مهم بدست آمده عبارتند از:

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-22]

[DOR: 20.1001.1.20089813.1402.10.2.2.2]

۱) اگر جنس دیواره جامد از موادی با ضریب رسانش بالا انتخاب کنیم نرخ انتقال حرارت زیاد می شود و جهت خنک سازی سودمند است.
۲) با افزایش نسبت ضریب رسانش حرارتی و کسر حجمی نانودرات قدرت جریان و نرخ انتقال حرارت به طور متوسط افزایش می یابد.
۳) با افزایش ضریب رسانش حرارتی و گرادیان دما در دیواره کمتر و اختلاف دما در سیال بیشتر می شود.
۴) با افزایش ضریب رسانش دیواره جامد و افزایش کسر حجمی نانوذرات قدرت گردابه ها ی جریان و نرخ انتقال حرارت بیشتر می شود.

فهرست علامت‌ها

علائم انگلیسی			
ضخامت دیوار، m	d	دما، K	T
ضخامت بی بعد دیوار	d^*	مولفه های سرعت در راستای x و y، m/s	u، v
شتاب جاذبه، m/s^2	g	مولفه های بی بعد در راستای x و y	u^*، v
ضریب هدایت حرارتی، W/m K	k	مختصات کارتزین، m	x، y
نسبت ضریب هدایت حرارتی سیال به فاز جامد	K_r	مختصات بی بعد کارتزین	X^*،Y
طول محفظه مربعی، m	L	**علائم یونانی**	
ارتفاع محفظه مربعی، m	H	چگالی، kg/m^3	ρ
عدد ناسلت متوسط	$\overline{\mathrm{Nu}}$	ضریب نفوذ حرارتی، m^2/s	α
عدد ناسلت محلی	Nu_s	ضریب انبساط حرارتی سیال، 1/k	β
ضریب انتقال حرارت جابجایی	h	لزجت دینامیکی، kg/m s	μ
فشار، Pa	P	لزجت سینماتیک، m^2/s	υ
فشار بی بعد	P^*	**زیر نویس**	
عدد پرانتل	Pr	سرد	c
عدد رایلی	Ra	نانو سیال	nf
دمای بی بعد	T^*	سیال	f
ظرفیت گرمایی مؤثر، $J/K\ m^3$	(c_p)	جامد	s
		گرم	h
		دیواره	w
		مرجع	ref

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-22]
[DOR: 20.1001.1.20089813.1402.10.2.2.2]

مراجع

T. Saitoh, K. Hirose, High-accuracy benchmark solutions to natural convection in a square cavity, Computational Mechanics, 4 (1989) 417-427.

G. De Vahl Davis, Natural convection of air in a square cavity, International Journal for numerical methods in fluids, 3 (1983) 249-264.

A. K. Singh, Thermal Conductivity of Nanofluids, Defence Science Journal, 58(2008), p.600.

D. M. Kim, R. Viskanta, Study of the effects of wall conductance on natural convection in differently oriented square cavities, Journal of Fluid Mechanics 144 (1984) 153-176.

D. M. Kim, R. Viskanta, Effect of wall heat conduction on natural convectionheat transfer in a square enclosure, Journal of Heat Transfer 107(1985) 139–146.

D. A. Kaminski, C. Prakash, Conjugate natural convection in a square enclosure: effect of conduction in one of the vertical walls, International Journal of Heat and Mass Transfer 29 (1986): 1979-1988.

D. Misra, A. Sarkar, Finite element analysis of conjugate natural convectionin a square enclosure with a conducting vertical wall, Computer Methodsin Applied Mechanics and Engineering, 14(1997) 205–219.

S. Acharya, C. H. Tsang, Influence of wall conduction on natural convectionin an inclined square enclosure, Heat Mass Transfer, 21(1987) 19–30.

R. B. Yedder, E. Bilgen, Laminar natural convection in inclined enclosuresbounded by a solid wall, Heat Mass Transfer, 32 (1997) 455–462.

B. Abdennacer, B. Smail, A. Said, Effect of Wall Conductivity on Conjugate Natural Convection in a Square Enclosure with Finite Vertical Wall Thickness, Adv. Theor. Applied Mechanics 5 (2012) 179-190.

A. Al-Amiri, Kh. Khanafer, I. Pop, Steady-state conjugate natural convection in a fluid-saturated porous cavity, International Journal of Heat and Mass Transfer 51(2008) 4260–4275.

N. H. Saeid, Conjugate natural convection in a porous enclosure, effect of conduction in one of the vertical walls, International Journal of Thermal Sciences 46(2007) 531-539.

H. Turkoglu, N. Yucel, Natural convection heat transfer in enclosures with conducting multiple partitions and side walls, Heat Mass Transfer 32(1996) 1-8.

K. Kahveci, Natural convection in a partitioned vertical enclosure heated with a uniform heatflux, Journal of Heat Transfer 129 (2007) 717–726.

K. Kahveci, Numerical simulation of natural convection in a partitioned enclosure using PDQ method, International Journal of Numerical Methods for Heat & Fluid Flow 17 (2007) 439-456.

M. Y. Ha., M. J. Jung, A numerical study on three-dimensional conjugate heat transfer of natural convection and conduction in a differentially heated cubic enclosure with a heat-generating cubic conducting body, International Journal of Heat and Mass Transfer 43 (2000) 4229-4248.

C. Shu, Y. D. Zhu, Efficient computation of natural convection in a concentric annulus between an outer square cylinder and an inner circular cylinder, International journal for numerical methods in fluids 38 (2002) 429-445.

M. El. Abdallaoui, M. Hasnaoui, A. Amahmid, Lattice-Boltzmann modeling of natural convection between a square outer cylinder and an inner isosceles triangular heating body, Numerical Heat Transfer, Part A: Applications 66 (2014) 1076-1096.

A. R. Rahmati, A. A. Tahery, Numerical study of nanofluid natural convection in a square cavity with a hot obstacle using lattice Boltzmann method, Alexandria engineering journal 57 (2018) 1271-1286.

F.-Y. Zhao, G.-F. Tang, D. Liu, Conjugate natural convection in enclosures with external and internal heat sources, International Journal of Engineering Science 44 (2006) 148-165.

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-22]

[DOR: 20.1001.1.20089813.1402.10.2.2.2]

M. Y. Ha, I. K. Kim, H. S. Yoon, K. S. Yoon, J. R. Lee, S. Balachandar, H. H. Chun, Two-dimensional and unsteady natural convection in a horizontal enclosure with a square body, Numerical Heat Transfer: Part A: Applications 41 (2002) 183-210.

M. Mahmoodi, S. M. Sebdani, Natural convection in a square cavity contain- ing a nanofluid and an adiabatic square block at the center, Superlattices and Microstructures 52 (2012) 261-275.

P. Bhave, A. Narasimhan, D. A. S. Rees, Natural convection heat transfer enhancement using adiabatic block: optimal block size and Prandtl number effect, International Journal of Heat and Mass Transfer 49 (2006) 3807-3818.

P. Karki, A. K. Yadav, D. Arumuga Perumal, Study of adiabatic obstacles on natural convection in a square cavity using Lattice Boltzmann method, Journal of Thermal Science and Engineering Applications 11 (2019).

J. M. House, C. Beckermann, T. F. Smith, Effect of a centered conducting body on natural convection heat transfer in an enclosure, Numerical Heat Transfer, 18 (1990) 213-225.

F.-Y. Zhao, D. Liu, G.-F. Tang, Conjugate heat transfer in square enclosures, Heat and mass transfer 43 (2007) 907-922.

M. K. Das, K. S. K. Reddy, Conjugate natural convection heat trans- fer in an inclined square cavity containing a conducting block, International Journal of Heat and Mass Transfer 49 (2006) 4987-5000.

E. J. Braga, M. J. S. de Lemos, Laminar natural convection in cavities filled with circular and square rods, International communications in heat and mass transfer 32 (2005) 1289-1297.

A. A. Merrikh, J. L. Lage, Natural convection in an enclosure with disconnected and conducting solid blocks, International Journal of Heat and Mass Transfer, 48 (2005), 1361-1372.

J. T. Hu, X. H. Ren, D. Liu, F. Y. Zhao, H. Q. Wang, Conjugate natural convection inside a vertical enclosure with solid obstacles of unique volume and multiple morphologies, International Journal of Heat and Mass Transfer 95 (2016) 1096-1114.

J. T. Hu, X. H. Ren, D. Liu, F. Y. Zhao, H. Q. Wang, Effect of the subdivi- sion of an obstacle on the natural convection heat transfer in a square cavity, Computers & fluids 68 (2012) 1-15.

C. J. Ho, W. K. Liu, Y. S. Chang, C. C. Lin, Natural Convection Heat Transfer of Alumina-Water Nanofluid in Vertical Square Enclosures: An Experimental Study, International Journal of Thermal Sciences 49 (2010) 1345-1353.

A. H. Mahmoudi, M. Shahi, A. H. Raouf, A. Ghasemian, Numerical study of naturalconvectioncooling of horizontal heat source mounted in a square cavity filled with nanofluid, International Communications in Heat and Mass Transfer 37.8 (2010): 1135-1141.

A. H. Mahmoudi, M. Shahi, A. H. Raouf, Modeling of conjugated heat transfer in a thickwalled enclosure filled with nanofluid, International communications in heat and mass transfer 38 (2011) 119-127.

Z. Boulahia, A. Wakif, R. Sehaqui, Natural Convection Heat Transfer of the nanofluids in a Square Enclosure with an Inside Cold Obstacle, Int. J. Innov. Sci. Res. 21 (2016) 367-375.

D.M. Cuckovic-Dzodzo., M. B. Dzodzweo, M. S Pavlovic, Laminar natural convection in a fully partitioned enclosure containing fluid with nonlinear thermophysical properties, International journal of heat and fluid flow 20 (1999) 614-623.

F. Selimefendigil, H. F. Öztop, Conjugate natural convection in a cavity with a conductive partition and filled with different nanofluids on different sides of the partition, Journal of Molecular Liquids 216 (2016) 67-77.

A. S. Dogonchi, Heat transfer by natural convection of Fe3O4-water nanofluid in an annulus between a wavy circular cylinder and a rhombus, International Journal of Heat and Mass Transfer 130 (2019) 320-332.

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-22]

[DOR: 20.1001.1.20089813.1402.10.2.2.2]

F. A. Soomro, Z. Hammouch, Heat transfer analysis of CuO- water enclosed in a partially heated rhombus with heated square obstacle, International Journal of Heat and Mass Transfer 118 (2018): 773-784.

A. Raji, M. Hasnaoui, M. Naïmi, K. Slimani, M. T. Ouazzani, Effect of the subdivi- sion of an obstacle on the natural convection heat transfer in a square cavity, Computers & fluids 68 (2012) 1-15.

M. E. L. Abdallaoui, M. Hasnaoui, A. Amahmid, Lattice-Boltzmann modeling of natural convection between a square outer cylinder and an inner isosceles triangular heating body, Numerical Heat Transfer, Part A: Applications 66.9 (2014) 1076-1096.

F. Selimefendigil, H. F. Öztop, Conjugate natural convection in a cavity with a conductive partition and filled with different nanofluids on different sides of the partition, Journal of Molecular Liquids 216 (2016) 67-77.

R. Z. Liu, L. Wang, W. C. Zhang, F. Y. Zhao, J. H. Guo, D. Liu, Conjugate fluid, heat and species transports inside an enclosure containing miscellaneous solid arrays: General models of electronic cooling and pollutant removals". International Journal of Thermal Sciences 166 (2021) 640-662.

A. El Mansouri, M. Hasnaoui, A. Amahmid, M. Alouah, Numerical analysis of conjugate convection-conduction heat transfer in an air-filled cavity with a rhombus conducting block subjected to subdivision: Cooperating and opposing roles, International Journal of Heat and Mass Transfer 150 (2020) 254-270.

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-22]

[DOR: 20.1001.1.20089813.1402.10.2.2.2]

چکیده انگلیسی

Numerical study flow and natural convection heat transfer affected by solid wall conduction in cavity filled nano fluid

Meysam Mahmoudi*[1], Aboozar Fanaei[1*]

[1]Department of Engineering, Velayat University, Iranshahr, Iran

Received: September 2023 Accepted: February 2023

Abstract

In this article, the authors investigate free convection heat transfer in a cavity containing water-copper nanofluid affected by solid wall conduction using numerical methods. The governing equations were solved using a dimensionless numerical method and a simple algorithm. The authors investigated the effect of important parameters, including the volume fraction of nanoparticles and the ratio of the thermal conductivity coefficient of the solid region to the nanofluid, on the flow and heat transfer of the free movement of the chamber. The investigations were carried out at Rayleigh number Ra = 105, volume fractions ϕ=0, ϕ=0.02 and ϕ=0.05 for the ratio of thermal conductivity coefficients Kr =0.1, Kr =1 and Kr =10. The results showed that with an increase in the volume fraction of nanoparticles and the ratio of the conduction coefficient, the speed and power of the flow increased on average. Additionally, an increase in the volume fraction of nanoparticles and the ratio of the conductivity coefficient led to a decrease in the dimensionless temperature of the nanofluid. Moreover, compared to the case of Kr = 1, increasing the volume fraction of nanoparticles and the values of the ratio of the conduction coefficient led to higher Nusselt values along the walls, indicating a higher heat transfer rate passing through the interface of solid and nanofluid. Therefore, a higher ratio of the conduction coefficient can be useful for cooling and reducing the overall temperature of the cavity.

Key words: Nanofluid, free convection heat transfer, solid wall conduction, cavity.

*corresponding author: m.mahmoudi@velayat.ac.ir

Cite this article as: Meysam Mahmoudi*1, Aboozar Fanae, Numerical study flow and natural convection heat transfer affected by solid wall conduction in cavity filled nano fluid. Journal of Energy Conversion, 2023, 10(2), 97-114. **DOR: 20.1001.1.20089813.1400.10.2.2.2**

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-22]

[DOR: 20.1001.1.20089813.1402.10.2.2.2]