نشریه علمی-تخصصی تبدیل انرژی (JEED)
J. Energy Conversion
Volume: 13, Issue 1, 2026: 41-55
دوره ۱۳، شماره ۱، بهار ۱۴۰۵، ص:۴۱-۵۵

مطالعه تجربی همرفت طبیعی نانوسیال آب - اکسید مس در محفظه‌ای مربعی‌شکل با کسر حجمی‌های مختلف و بافل‌های گوناگون

محسن امیدوار[۱]، طاهر ارمغانی[۲و*]، فرهاد دولت آبادی[۳]

۱- کارشناسی‌ارشد، گروه مهندسی مکانیک، واحد مهدی‌شهر، دانشگاه آزاد اسلامی، سمنان، ایران
۲- دانشیار، گروه مهندسی مکانیک، واحد تهران غرب، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران
۳- کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مکانیک، واحد تهران غرب، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

دریافت: ۱۴۰۴/۱۲/۱۳ ، بازنگری: ۱۴۰۵/۱/۲۱، پذیرش:۱۴۰۵/۲/۱۹

چکیده

در این تحقیق، شرایط انتقال حرارت پایدار در یک محفظه مربعی با استفاده از سیال پایه آب و نانوسیال اکسید مس-آب با نسبت‌های حجمی ۱٪ و ۲٪ به‌صورت تجربی مطالعه شده و ضریب انتقال حرارت و عدد ناسلت در هر دو وضعیت مقایسه شده است. آزمایش‌ها در یک محفظه مربعی با ابعاد داخلی ۹٫۹ × ۹٫۹ × ۱۰ سانتی‌متر مکعب و با به‌کارگیری بافل‌هایی با ارتفاع‌های مختلف (۳، ۵ و ۷ سانتی‌متر) انجام گرفته است. هرکدام از این بافل‌ها در فاصله ۴ سانتی‌متری از صفحه گرم قرار داده شده‌اند. هم‌چنین، محفظه مربعی در زوایای چرخش مختلف (۴۵-، ۹۰، ۴۵ و ۰) درجه مورد آزمایش قرار گرفت. نتایج برای سیال پایه آب خالص در حضور بافل‌ها نشان داد که بیش‌ترین عدد ناسلت به‌ترتیب با بافل ۳ سانتی‌متری، ۵ سانتی‌متری و ۷ سانتی‌متری در زوایای ۴۵ ، ۹۰ و ۰ درجه مشاهده شد و کم‌ترین عدد ناسلت در زاویه ۴۵- درجه رخ داد. زمانی‌که محفظه با نانوسیال پر شده بود، بیش‌ترین عدد ناسلت در زاویه ۴۵ درجه و با بافل ۳ سانتی‌متری به دست آمد. با افزایش کسر حجمی نانوسیال از ۱٪ به ۲٪ مقدار عدد ناسلت حدود ۱۱/۵۴٪ افزایش یافت. هم‌چنین، عدد ناسلت در نانوسیال با کسر حجمی ۲٪ و بافل ۳ سانتی‌متری، در مقایسه با آب خالص، به میزان ۲۱/۲۶٪ افزایش پیدا کرد.

کلمات کلیدی: نانوسیال، انتقال حرارت جابه‌جایی طبیعی، محفظه مربعی، بافل، اکسید مس

* **عهده‌دار مکاتبات:** armaghani.taher@wtiau.ac.ir

نحوه استناد به این مقاله محسن امیدوار، طاهر ارمغانی، فرهاد دولت آبادی. بررسی مطالعه تجربی همرفت طبیعی نانوسیال آب - اکسید مس در محفظه‌ای مربعی‌شکل با کسر حجمی‌های مختلف و بافل‌های گوناگون. **مهندسی مکانیک تبدیل انرژی. ۱۴۰۵; ۱۳ (۱): ۴۱-۵۵.**

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-06]

[DOI: 10.82377/jeed.2026.2.564]

۱- مقدمه

سیال‌های رایج انتقال حرارت مانند آب، روغن‌ها و اتیلن گلیکول، به‌دلیل خواص حرارتی محدود، چالشی برای افزایش بازده و فشرده‌سازی مبدل‌های حرارتی محسوب می‌شوند. یکی از روش‌های نوین برای بهبود خواص حرارتی سیالات، افزودن ذرات جامد در ابعاد نانو است. استفاده از ذرات در مقیاس میکرو یا میلی‌متر به‌دلیل مشکلاتی نظیر ته‌نشینی سریع، انسداد مجاری، فرسایش تجهیزات و افت فشار زیاد، موفقیت‌آمیز نبود. در سال ۱۹۹۵، چوی [۱] برای اولین بار مفهوم «نانوسیال» را معرفی کرد که از پراکندگی پایدار نانوذرات با رسانایی حرارتی بالا در یک سیال پایه تشکیل شده است.

تحقیقات نشان داده است که نانوسیالات, پایداری و خواص جریانی بهتری نسبت به سوسپانسیون‌های با ذرات بزرگ‌تر دارند [۱] و ضریب انتقال حرارت هدایتی آن‌ها به شکل چشم‌گیری بالاتر است، بدون آن‌که افت فشار قابل‌توجهی ایجاد کنند [۲]. به این ترتیب، شاخه جدیدی در علوم مهندسی حرارتی ایجاد شد و به نظر می‌رسد که نانوسیال‌ها به‌خاطر قابلیت مناسب در افزایش انتقال حرارت، جایگزین مناسبی برای سیال‌های واسط انتقال حرارت متداول باشند و به‌عنوان نسل بعدی سیال‌ها انتقال حرارت مورد استفاده قرار گیرند. لذا مطالعات تجربی و عددی زیادی جهت بررسی رفتار حرارتی و هیدرودینامیکی این سیال‌ها در دستگاه‌های حرارتی مختلف انجام گرفته است. این مطالعات عددی با دو نگرش تک‌فازی و دوفازی مورد توجه محققین بسیاری قرارگرفته است [۳].

در روش تک‌فازی، مخلوط ذرات نانو و سیال پایه همگن در نظر گرفته می‌شوند و این مخلوط به‌عنوان یک سیال با خواص حرارتی و هیدرودینامیکی مؤثر جهت مطالعه در نظر گرفته می‌شود؛ درحالی‌که در روش دوفازی، رفتار سیال و ذره به‌صورت مجزا در نظر گرفته می‌شود که این خود باعث افزایش زمان محاسبات می‌گردد. حال آن‌که دقت محاسبات بر پایه نگرش تک‌فازی مستقیماً به‌دقت خواص فیزیکی مؤثر سیال بستگی دارد. از جمله این خصوصیات ویسکوزیته است که اکثراً از مقادیر تجربی به‌دست می‌آید و روابط تحلیلی با دقت بالایی جهت پیش‌گویی آن در دسترس نیست. در مسئله بازده انتقال حرارت در تجهیزاتی نظیر مبدل‌های حرارتی، هدایت حرارتی سیال حامل انرژی و ضریب جابه‌جایی انتقال حرارت نقش اساسی را بر عهده دارند. به‌عنوان مثال، ضریب هدایت گرمایی مس در دمای محیط حدود ۷۰۰ برابر آب و ۳۰۰۰ برابر روغن موتور است [۴]. از طرفی ضریب هدایت گرمایی مواد فلزی نیز بسیار بیش‌تر از هدایت گرمایی مواد غیرفلزی است. به‌همین دلیل، انتظار می‌رود که سیال‌ها حاوی ذرات جامد معلق فلزی یا اکسید فلزی دارای هدایت گرمایی بیش‌تری نسبت به سیال‌ها خالص باشند.

در ابتدا بررسی‌ها برای ذراتی که دارای اندازه میلی‌متری یا میکرومتری بودند، صورت گرفته بود. در این اندازه‌ها ذرات با مشکلات جدی ته‌نشینی سریع روبه‌رو بودند. به این مشکل باید مسئله ایجاد سایش در مسیر جریان و افزایش افت فشار را نیز اضافه کرد. به‌علاوه برای سیستم‌های میکرونی انتقال حرارت، این ذرات بسیار درشت بودند. در سال‌های اخیر، فناوری جدید نانوتکنولوژی این امکان را فراهم آورده تا بتوان ذراتی با اندازه بسیار کوچک نانومتری تولید و فرآوری کرد. این پیشرفت سبب شد تا در سال ۱۹۹۳ ایده استفاده از نانوذرات فلزی در داخل سیال‌ها حامل انرژی نظیر آب و اتیلن گلیکول و موضوع نانوسیال به‌عنوان موضوع جدید انتقال حرارت مطرح گردد.

نانوسیال‌ها طبقه‌بندی جدیدی از سیال‌ها انتقال حرارت هستند که از طریق معلق‌سازی نانوذرات درون سیال‌های معمولی و متداول انتقال حرارت که به‌عنوان سیال پایه شناخته می‌شوند، به دست می‌آیند. پراکندگی نانوذرات درون سیال می‌تواند کاملاً یا تقریباً همگن باشد. متوسط اندازه ذرات استفاده‌شده در نانوسیال‌ها کم‌تر از ۵۰ نانومتر است.

با این وجود، امروزه تحقیقات به این اندازه محدود نبوده و ذراتی با توزیع اندازه‌های مختلف در دامنه ۱ نانومتر تا ۱۰۰ نانومتر مورد مطالعه قرار می‌گیرند. ذرات با مواد گوناگون و متعددی برای تهیه نانوسیال‌ها استفاده می‌شوند. در این بین، نانوذرات Fe، Au، Ag، SiC، TiO_2، CuO و Al_2O_3 اغلب در تحقیقات مربوط به نانوسیال‌ها به‌کار رفته‌اند.

مقالات زیادی در مورد محفظه‌های مربعی و کاربرد نانوسیال‌ها در آن‌ها منتشرشده است که برخی از این مقالات در جدول زیر جمع آوری شده.

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-06]

[DOI: 10.82377/jeed.2026.2.564]

جدول ۱: مرور پیشنیه

ردیف	پژوهشگران	نوع مطالعه	نانوسیال	هندسه / سیستم مورد بررسی	مدل / روش عددی	پارامترهای بررسی‌شده	نتایج اصلی
[۵]	ژوآن و همکاران	تجربی	مس–آب	لوله برنجی مستقیم	—	—	بررسی انتقال حرارت همرفت نانوسیال در لوله و مشاهده بهبود ضریب انتقال حرارت نسبت به آب خالص
[۶]	یانووی‌هو و همکاران	تجربی و عددی	—	محفظه مربعی	—	شرایط هندسی، دما، چگالی	بررسی تطبیقی داده‌های آزمایشگاهی و عددی در انتقال حرارت طبیعی
[۷]	صابر یکانی و همکاران	عددی	آب–آلومینا	محفظه شیب‌دار	مدل دو فازی بونژیورنو	عدد رایلی، کسر حجمی، زاویه شیب	افزایش انتقال حرارت با افزایش عدد رایلی و کسر حجمی
[۸]	سی‌جی هو و همکاران	عددی	آلومینا–آب	محفظه مربعی	—	ویسکوزیته، هدایت حرارتی مؤثر	تحلیل اثر عدم قطعیت در خواص ترمودینامیکی بر جریان و دما
[۹]	اودین و همکاران	عددی	انواع نانوسیال‌ها	صفحه عمودی در محیط متخلخل	مدل دارسی–فورچهیمر	عدد دارسی، رایلی	بررسی تأثیر نانوسیال و محیط متخلخل بر ضریب انتقال حرارت
[۱۰]	احمد و همکاران	عددی	اکسید مس–آب	محفظه شیب‌دار	روش شبکه دوفازی بولتزمن	زاویه شیب، عدد رایلی	افزایش انتقال حرارت با افزایش زاویه و کسر حجمی نانوذرات
[۱۱]	لی و همکاران	تجربی	اکسید روی–آب	—	—	دما، غلظت نانوذرات	تأیید افزایش انتقال حرارت طبیعی با افزایش غلظت نانوذرات
[۱۲]	هو و همکاران	تجربی	تیتانیا–آب	محفظه مربعی	—	—	افزایش محسوس ضریب انتقال حرارت نسبت به آب خالص
[۱۳]	هو و همکاران	تجربی	آلومینا–آب	محفظه مربعی عمودی	—	—	بهبود انتقال حرارت در حضور نانوذرات آلومینا
[۱۴]	مارفوک و همکاران	عددی	نانوسیال تک‌جزئی	محفظه مربعی متخلخل	مدل بونژیورنو	رایلی، دارسی، هارتمان، ترموفورزیس، براونی	تحلیل اثرات مغناطیسی و فیزیکی بر الگوی جریان و دما
[۱۵]	رمنیک و همکاران	عددی	هیبریدی آلومینا–مس–تیتانیا–آب	محفظه مربعی متخلخل	روش المان محدود	—	افزایش قابل‌توجه انتقال حرارت نسبت به نانوسیال ساده
[۱۶]	امیره مهدبی و همکاران	عددی	آلومینا، تیتانیا، مس–آب (پای-لاو غیرنیوتنی)	محفظه مربعی با پره عمودی گرم	—	رایلی، کسر حجمی، شاخص پای-لاو، ابعاد پره	بررسی تأثیر سیال غیرنیوتنی و بهبود انتقال حرارت با افزایش کسر حجمی
[۱۷]	محمدعلی حنفیه و همکاران	عددی	هیبریدی آلومینا–مس–آب	محفظه مربعی	روش المان محدود	فاکتور شکل نانوذرات	افزایش نرخ انتقال حرارت با افزایش فاکتور شکل به‌دلیل سطح مؤثر بالاتر

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-06]

[DOI: 10.82377/jeed.2026.2.564]

با توجه به مرور پژوهش‌های پیشین، بیش‌تر مطالعات در زمینه همرفت طبیعی نانوسیال‌ها به تحلیل عددی محدود بوده یا صرفاً به بررسی تأثیر نوع نانوسیال و عدد رایلی پرداخته‌اند، در حالی‌که مطالعات تجربی که به‌طور هم‌زمان اثر پارامترهای هندسی و خواص نانوسیال را ارزیابی کنند، بسیار محدود است. در پژوهش حاضر، به‌منظور پر کردن این شکاف، یک محفظه مربعی از جنس پلکسی‌گلاس طراحی و ساخته شد که در آن تأثیر زاویه چرخش محفظه، ارتفاع بافل‌ها و تغییر کسر حجمی نانوسیال اکسیدمس– آب بر انتقال حرارت همرفت طبیعی به‌صورت تجربی مورد بررسی قرار گرفته است. نوآوری این تحقیق در بررسی هم‌زمان پارامترهای هندسی (زاویه و ارتفاع بافل) و ترمودینامیکی (کسر حجمی نانوسیال) در یک سیستم واقعی است که تاکنون در هیچ مطالعه آزمایشگاهی مشابهی مشاهده نشده است.

برای ایزوله کردن و بررسی دقیق تأثیر این پارامترهای کلیدی، این مطالعه بر شرایط پایه همرفت طبیعی متمرکز شده و از افزودن عوامل پیچیده‌کننده دیگری هم‌چون میدان‌های مغناطیسی خارجی یا مواد افزودنی (مانند سورفکتانت) خودداری گردید. بنابراین، بهبود مشاهده‌شده در انتقال حرارت را می‌توان مستقیماً به آثار ترکیبی هندسه محفظه و حضور نانوذرات نسبت داد. در این راستا، برای تحلیل کمّی، عدد ناسلت بر اساس مدل‌های مرسوم و روابط تجربی پذیرفته‌شده برای محاسبه خواص مؤثر نانوسیال (بدون در نظر گرفتن اثرات میدان) تخمین زده شد.

با توجه به ماهیت تجربی این مطالعه و برای اطمینان از عدم تأثیر عوامل خارجی بر پدیده همرفت طبیعی مورد بررسی، تمامی تدابیر لازم به‌کار گرفته شد. منبع گرمایش از نوع مقاومتی (روتاری کانوکتور) بود که فاقد میدان مغناطیسی قوی قابل‌توجهی است. هم‌چنین، دستگاه در فاصله ایمنی از سایر تجهیزات الکترومغناطیسی قرار داشت. بنابراین، فرض شده است که اثر میدان‌های مغناطیسی پارازیتی در مقایسه با نیروهای محرک اصلی (شناوری و ویسکوزیته) ناچیز است.

۲- روش‌شناسی

۲-۱- دستگاه و راه‌اندازی آزمایشگاهی

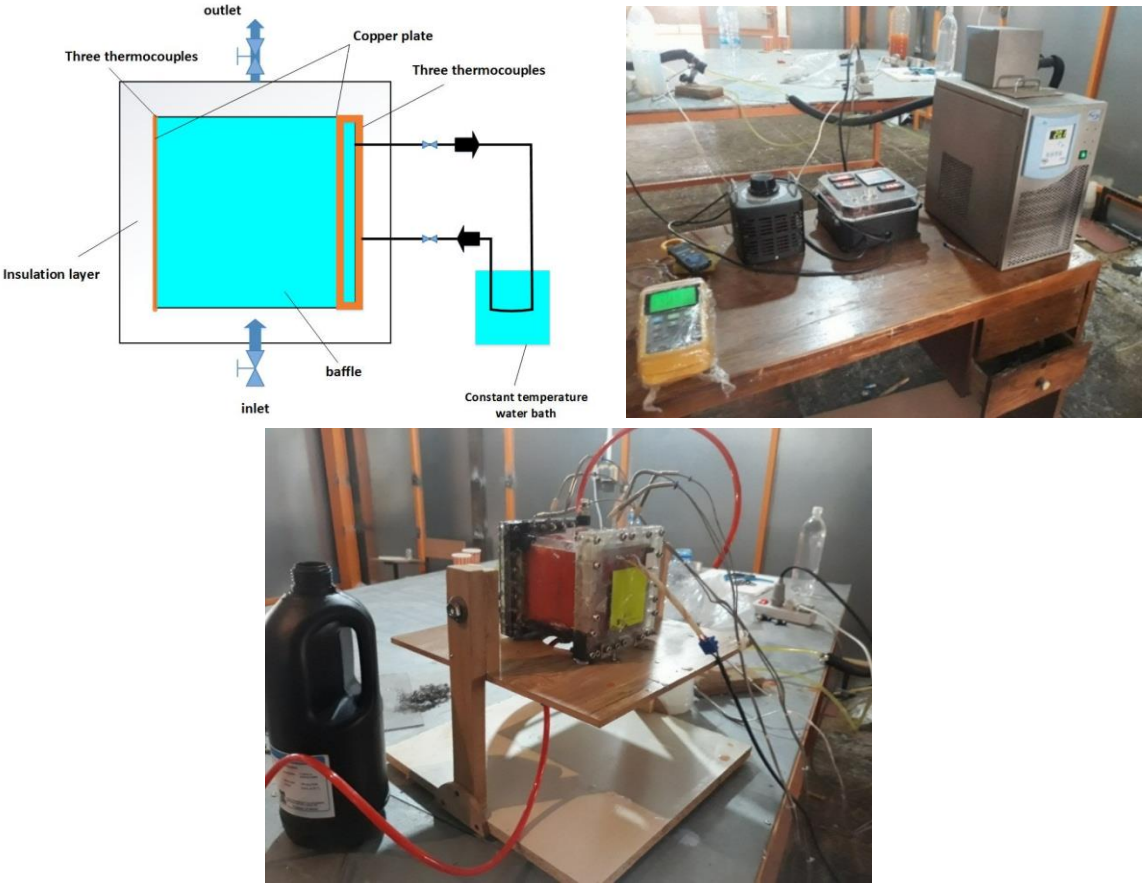
راه‌اندازی آزمایشگاهی شامل یک محفظه مکعبی از جنس پلکسی‌گلاس با ابعاد داخلی (عرض ۹٫۹ × ارتفاع ۹٫۹ × طول ۱۰) سانتی‌متر است. همان‌طور که در شکل (۱) نشان داده شده است، دیواره‌های عمودی این محفظه به دو صفحه مسی با ضخامت ۰/۵ سانتی‌متر متصل هستند که به‌عنوان دیواره گرم و سرد عمل می‌کنند.

دیواره‌های جانبی این محفظه از دو سمت با دو صفحه مسی که یکی از آن‌ها صفحه گرم و دیگری سرد می‌باشد، در تماس است. صفحه گرم توسط یک روتاری کانوکتور با جریان برق AC گرم می‌شود. از طرفی، صفحه سرد نیز توسط یک حمام کنترل‌کننده دما ثابت خنک می‌شود. دمای هرکدام از صفحه‌ها توسط سه عدد ترموکوپل از نوع k کنترل می‌شود. بازه عملکرد دمایی ترموکوپل‌های سیمی شکل نوع k در بازه ۴۰- تا ۲۵۰ درجه سانتی‌گراد می‌باشد. حساسیت ترموکوپل نوع k تقریباً ۴۱ $\mu V/^{\circ}C$ است و معمولاً در دماهای بالا مورد استفاده قرار می‌گیرد. دمای حس‌شده توسط این ترموکوپل‌ها توسط یک دیتا لایر ۱۲ کاناله مدل D BTM- 4208S خوانده می‌شود. دمای صفحه گرم نیز با سیستم کنترل فرکانس (روتاری کانوکتور) قابل‌کنترل و تغییر است. ابعاد صفحه مسی ۹/۹ ×۹/۹سانتی‌مترمربع با ضخامت ۰/۰۰۵ متر است.

توان گرمایشی صفحه گرم را می‌توان از ولتاژ و جریان الکتریکی منبع تغذیه AC به‌دست آورد. هم‌چنین خصوصیات انتقال حرارت همرفت طبیعی از محفظه مربعی با زوایای چرخش (α) برابر۴۵-، ۰، ۴۵ و ۹۰ درجه با نانوسیال اکسید مس-آب مورد بررسی قرار گرفته است. شکل (۲) طرحواره محفظه و مشخصات هندسی آن را نشان می‌دهد.

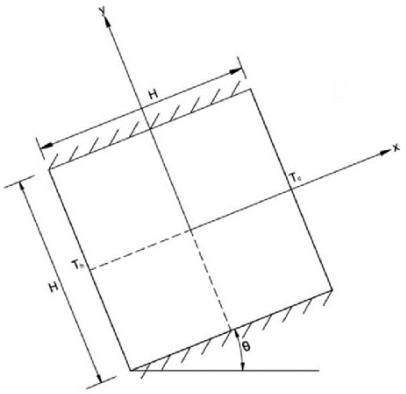
[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-06]

[DOI: 10.82377/jeed.2026.2.564]



شکل ۱: طرح‌واره هندسی محفظه آزمایشی و موقعیت بافل‌ها

به‌منظور اطمینان از صحت نتایج و حذف اثرات عوامل خارجی، تدابیر لازم در طراحی آزمایش لحاظ گردید. منبع گرمایشی مورد استفاده از نوع مقاومتی (روتاری کانوکتور) بود که فاقد میدان مغناطیسی قوی قابل‌توجهی است. هم‌چنین، کلیه تجهیزات در فاصله مناسبی از منابع احتمالی میدان‌های مغناطیسی پارازیت قرار داشتند. بنابراین، فرض بر این است که تأثیر میدان مغناطیسی در این آزمایش ناچیز بوده و نتایج به‌دست‌آمده صرفاً ناشی از مکانیزم همرفت طبیعی و پارامترهای مورد مطالعه می‌باشد.



شکل ۲: طرح‌واره و مشخصات هندسی محفظه

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-06]

[DOI: 10.82377/jeed.2026.2.564]

۲-۲- تهیه نانوسیال

نانوسیال مورد استفاده در این پژوهش، اکسید مس (CuO) معلق در آب دیونیزه است. نانوذرات CuO با اندازه متوسط ۳۵ نانومتر از شرکت نانو صدرا تهیه شد. برای تهیه نانوسیال با کسرهای حجمی ۱٪ و ۲٪ ،از روش دومرحله‌ای استفاده گردید. ابتدا مقدار مشخصی از نانوپودر CuO وزن شده و به آب دیونیزه اضافه شد. سپس، برای شکستن کلوخه‌ها و دست‌یابی به یک سوسپانسیون پایدار و همگن، مخلوط به مدت ۳ ساعت در یک حمام آلتراسونیک با دمای ۸۰ درجه سانتی‌گراد قرار گرفت. مشخصات ترموفیزیکی آب و نانوذرات اکسید مس در جدول (۲) آورده شده است.

جدول ۲: مشخصات ترموفیزیکی آب و اکسید مس در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد

مشخصه	آب	اکسید مس
چگالی (ρ)	۹۹۷/۱ kg/m^3	۶۵۰۰kg/m^3
ظرفیت گرمایی ویژه در فشار ثابت (C_p)	۴۱۷۹ J/kgK	۵۴۰ J/kgK
ضریب انتقال حرارت همرفت (K)	۰/۶۱۳ W/mK	۱۸/۱ W/mK
ضریب انبساط حرارتی (β)	۲/۱× ۱۰ K^{-1}-۴	۵/۸× ۱۰ K^{-1}-۶
اندازه نانوذره (d_p)	-	۳۵ nm

پایداری سوسپانسیون نانوسیال یک پارامتر حیاتی است، زیرا ته‌نشینی یا کلوخه‌شدن ذرات می‌تواند خواص ترموفیزیکی مؤثر را تغییر داده و در نتیجه بر قابلیت تکرارپذیری و صحت نتایج آزمایش تأثیر بگذارد. در این پژوهش، پایداری نانوسیال‌های تهیه‌شده (با کسرهای حجمی ۱٪ و ۲٪) به دو روش اصلی مورد ارزیابی قرار گرفت:

۱. مشاهده بصری و آزمون رسوب‌گذاری: نمونه‌های نانوسیال در استوانه‌های مدرج شفاف ریخته شده و در بازه‌های زمانی مشخص (۲۴، ۴۸ و ۷۲ ساعت پس از تولید) مورد مشاهده قرار گرفتند. در طی این مدت هیچ لایه‌ای از مایع شفاف در بالای نمونه‌ها و هیچ رسوب قابل ملاحظه‌ای در کف ظروف مشاهده نشد. این موضوع حاکی از پایداری مناسب سوسپانسیون در بازه زمانی انجام آزمایش‌ها بود.

۲. اندازه‌گیری پتانسیل زتا: به‌عنوان یک ارزیابی کمّی، پتانسیل زتای نمونه نانوسیال با استفاده از دستگاه اندازه‌گیری شد. مقدار میانگین پتانسیل زتا برای نانوسیال مورد استفاده ۴۲±mV به‌دست آمد. مقادیر مطلق پتانسیل زتا بالاتر از ۳۰mV عموماً نشان‌دهنده پایداری کلوئیدی مناسب به دلیل دافعه قوی الکتروستاتیک بین ذرات است. این نتیجه، مشاهدات بصری مبنی بر پایداری خوب نانوسیال را تأیید می‌کند.

بر اساس این ارزیابی‌ها، اطمینان حاصل شد که نانوسیال مورد استفاده در طول انجام کلیه مراحل آزمایش از پایداری کافی برخوردار بوده و نتایج به‌دست‌آمده قابل اتکا هستند.

۲-۳- روش انجام آزمایش

ابتدا محفظه با سیال موردنظر (آب خالص یا نانوسیال) پر می‌شد. سپس هیتر دیواره گرم و سیستم خنک‌کننده دیواره سرد فعال می‌شدند. پس از گذشت زمان کافی و رسیدن دماها به یک حالت پایدار (تغییرات کم‌تر از ۰/۱ درجه سانتی‌گراد در طی ۱۰ دقیقه)، داده‌های دما، ولتاژ و جریان ثبت می‌شدند. این فرآیند برای هر یک از سیالات، در چهار زاویه چرخش (۴۵-، ۰، ۴۵ و ۹۰) و برای هر یک از سه بافل (۳، ۵ و ۷ سانتی‌متری) و هم‌چنین در حالت بدون بافل تکرار شد.

۳- پردازش داده‌ها و تحلیل عدم قطعیت

۳-۱- روابط محاسباتی

برای تحلیل نتایج، پارامترهای مهم انتقال حرارت محاسبه شدند. برای شار حرارتی ورودی[۱۵]

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-06]

[DOI: 10.82377/jeed.2026.2.564]

$$q''_{act} = \frac{V \times I}{A} \quad (۱)$$

که V ولتاژ، I جریان و A مساحت صفحه گرم است. با توجه به عایق‌بندی سطوح، از اتلاف حرارت صرف‌نظر شده است.

از آن‌جا که ترموکوپل‌ها در پشت صفحات مسی نصب شده‌اند، دمای واقعی سطح در تماس با سیال با استفاده از قانون هدایت فوریه اصلاح می‌شود. برای دمای اصلاح‌شده سطوح، [۱۶]

$$T_{corr} = T - \frac{q'' \times t}{k_p} \quad (۲)$$

که t ضخامت صفحه مسی و k_p ضریب هدایت حرارتی مس است. هم‌چنین، دمای T برای دو حالت سرد و گرم از میانگین دمای گزارش‌شده توسط سه ترموکوپل حاصل می‌شود.

$$T = \frac{1}{3}(T_1 + T_2 + T_3) \quad (۳)$$

برای محاسبه ضریب انتقال حرارت جابجایی و عدد ناسلت به ترتیب از روابط (۴) و (۵) استفاده می‌شود [۱۶].

$$h = \frac{q''}{T_{h-corr} - T_{c-corr}} \quad (۴)$$

$$Nu = \frac{h \times H}{k_{nf}} \quad (۵)$$

در رابطه (۵)، H ارتفاع مشخصه محفظه و k_{nf} ضریب هدایت حرارتی نانوسیال است. روابط مختلفی توسط پژوهش‌گران برای محاسبه عدد ناسلت پیشنهاد شده است. در این پژوهش، از رابطه پیشنهادی توسط مارکاتوس [۱۷] برای مقایسه نتایج تجربی عدد ناسلت استفاده شده است.

$$Nu = 0.082 {Ra_h}^{0.329} \quad (۶)$$

در رابطه (۶)، Ra عدد رایلی است.

خواص نانوسیال با استفاده از روابط زیر محاسبه می‌شود. روابط (۷) تا (۱۱) به ترتیب برای محاسبه چگالی، ظرفیت گرمایی، ضریب هدایت حرارتی، ویسکوزیته دینامیکی و ضریب انبساط حرارتی به‌کار می‌روند [۱۹و۱۸].

$$\rho_{nf} = (1-\phi)\rho_f + \phi\rho_p \quad (۷)$$

$$(\rho C_p)_{nf} = (1-\phi)(\rho C_p)_f + \phi(\rho C_p)_p \quad (۸)$$

$$k_{nf} = k_f\left[\frac{k_p + 2k_f - 2\phi(k_f - k_p)}{k_p + 2k_f + \phi(k_f - k_p)}\right] \quad (۹)$$

$$\mu_{nf} = \frac{\mu_f}{(1-\phi)^{2.5}} \quad (۱۰)$$

$$(\rho\beta)_{nf} = (1-\phi)(\rho\beta)_f + \phi(\rho\beta)_p \quad (۱۱)$$

در روابط (۷) تا (۱۱)، ϕ کسر حجمی نانوسیال و زیروندهای p، f و nf به‌ترتیب بیان‌گر ذره، سیال و نانوسیال هستند [۲۰].

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-06]

[DOI: 10.82377/jeed.2026.2.564]

۲-۳- عدم قطعیت

برای تحلیل عدم قطعیت از روش انتشار خطا (یا روش بویت) استفاده شده است. این روش مشخص می‌کند که خطاهای موجود در اندازه‌گیری‌های اولیه چگونه به خطای نهایی در نتیجه محاسبات ما «منتشر» یا «منتقل» می‌شوند. روابط مربوط به عدم قطعیت شار حرارتی، ضریب جابجایی حرارت، عدد ناسلت و عدد رایلی به‌ترتیب در رابطه (۱۲) تا (۱۵) ارائه شده است [۲۳و۲و۲۱].

$$\sigma_{q''_{act}} = q''_{act}\sqrt{\left(\frac{\sigma_V}{V}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_I}{I}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_H}{H}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_W}{W}\right)^2} \quad (۱۲)$$

$$\sigma_h = h\sqrt{\left(\frac{\sigma_{q''}}{q''}\right)^2 + \frac{\sigma^2_{T_{h-corr}} + \sigma^2_{T_{c-corr}}}{(T_{h-corr} - T_{c-corr})^2}} \quad (۱۳)$$

$$\sigma_{Nu} = Nu\sqrt{\left(\frac{\sigma_h}{h}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_H}{H}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{k_{nf}}}{k_{nf}}\right)^2} \quad (۱۴)$$

$$\sigma_{Ra} = Ra\sqrt{\left(\frac{\sigma_\beta}{\beta}\right)^2 + \frac{\sigma^2_{T_{h-corr}} + \sigma^2_{T_{c-corr}}}{(T_{h-corr} - T_{c-corr})^2} + 9\left(\frac{\sigma_L}{L}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_\nu}{\nu}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_\alpha}{\alpha}\right)^2} \quad (۱۵)$$

در روابط (۱۲) تا (۱۵)، σ پارامتر عدم قطعیت است. مقادیر محاسبه‌شده عدم قطعیت به کمک این روابط در جدول (۳) گزارش شده است.

جدول ۳: عدم قطعیت پارامترهای آزمایش

پارامتر	عدم قطعیت
شار حرارتی	±0.63 W
ضریب انتقال حرارت	3.8%
عدد ناسلت	2.3%
عدد رایلی	6%

نتایج جدول (۳) نشان می‌دهد که عدد رایلی دارای بیش‌ترین عدم قطعیت در میان نتایج نهایی است. این موضوع نشان می‌دهد که اندازه‌گیری دقیق طول مشخصه و اختلاف دما و هم‌چنین تخمین دقیق خواص سیال، حیاتی‌ترین بخش‌های آزمایش برای کاهش خطا بوده‌اند. در کل، عدم قطعیت این پارامترها در محدوده قابل قبولی برای یک آزمایش استاندارد انتقال حرارت قرار دارند.

برای اعتبارسنجی دستگاه آزمایش، نتایج به‌دست‌آمده برای آب خالص با روابط معتبر موجود در مقالات، از جمله رابطه مارکاتوس مقایسه شد که در جدول (۴) ارائه شده است. نتایج آزمایشگاهی توافق خوبی با این رابطه داشت و اختلاف آن‌ها کم‌تر از ۲٪ بود که صحت عملکرد سیستم را تأیید می‌کند.

جدول ۴: عدم قطعیت پارامترهای آزمایش

پارامتر	مقدار آزمایشگاهی	رابطه مارکاتوس	خطا
ناسلت	45.31	46.09	1.7%

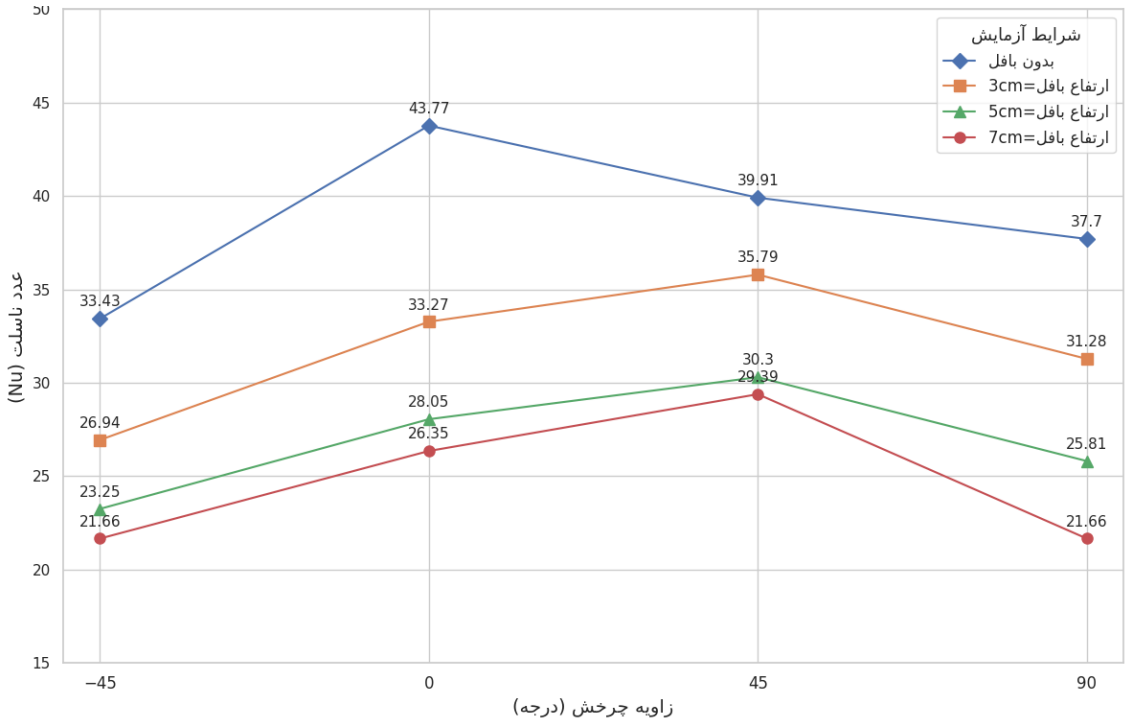
[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-06]

[DOI: 10.82377/jeed.2026.2.564]

۴- نتایج و بحث

۴-۱- انتقال حرارت با آب خالص

شکل (۳) عدد ناسلت را برای محفظه پر شده با آب خالص در حالت‌های مختلف، با بافل و بدون بافل، در زوایای مختلف چرخش محفظه را نشان می‌دهد.



شکل ۳: مقایسه عدد ناسلت برای آب خالص بر اساس ارتفاع بافل و زاویای چرخش

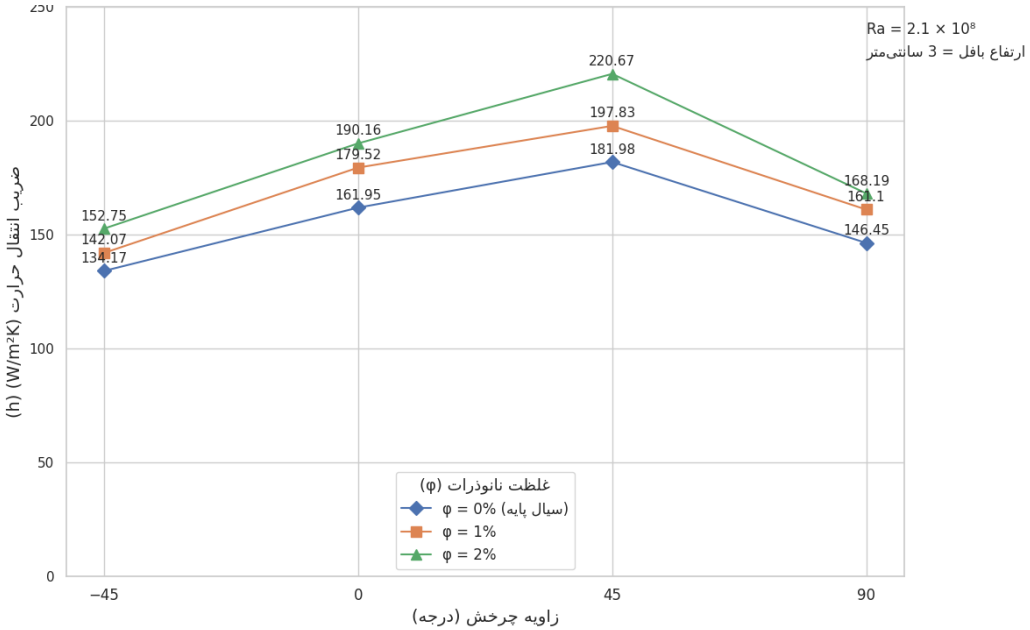
بیش‌ترین عدد ناسلت در زاویه ۰ درجه (حالت افقی) و بدون بافل رخ می‌دهد دلیل فیزیکی این پدیده را می‌توان در آرایش پایدارترین پیکربندی همرفت طبیعی جستجو کرد. در این حالت، صفحه گرم در پایین و صفحه سرد در بالا قرار دارد که منجر به ایجاد یک ناپایداری حرارتی قوی و تشکیل سلول‌های همرفتی منظم (سلول‌های بنارد) در سراسر محفظه می‌شود. این الگوی جریان سازمان‌یافته، انتقال حرارت را به حداکثر می‌رساند. در مقابل، کم‌ترین انتقال حرارت در زاویه ۴۵- درجه و با بافل ۷ سانتی‌متری مشاهده شد. در این زاویه، مولفه افقی نیروی شناوری کاهش یافته و بافل بلند نیز به‌عنوان مانعی جدی در مسیر توسعه الگوی جریان طبیعی عمل می‌کند. در این حالت، صفحه گرم در پایین و صفحه سرد در بالا قرار دارد که منجر به ناپایداری حرارتی شدید و ایجاد سلول‌های همرفتی قوی (سلول‌های بنارد) می‌شود. کم‌ترین انتقال حرارت در زاویه ۴۵- و ۴۵ درجه و با فاصله بافل ۷ سانتی‌متری مشاهده شد. با افزودن بافل، الگوی جریان تغییر می‌کند. بیش‌ترین عدد ناسلت در زاویه ۴۵ درجه به‌دست آمد. این زاویه به‌نظر می‌رسد بهترین تعادل را بین نیروی شناوری و هدایت جریان توسط بافل ایجاد می‌کند. هم‌چنین، بافل ۳ سانتی‌متری بالاترین نرخ انتقال حرارت را در میان سه بافل آزمایش‌شده نشان داد. با افزایش ارتفاع بافل به ۵ و ۷ سانتی‌متر، عدد ناسلت کاهش یافت که نشان می‌دهد بافل‌های بلندتر مانع گردش مؤثر سیال در محفظه می‌شوند.

۴-۲- اثر نانوسیال بر ضریب انتقال حرارت با بافل ۳ سانتی‌متری

شکل (۴) ضریب انتقال حرارت را برای آب خالص و نانوسیال با کسرهای حجمی ۱٪ و ۲٪ در حضور بافل ۳ سانتی‌متری مقایسه می‌کند.

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-06]

[DOI: 10.82377/jeed.2026.2.564]

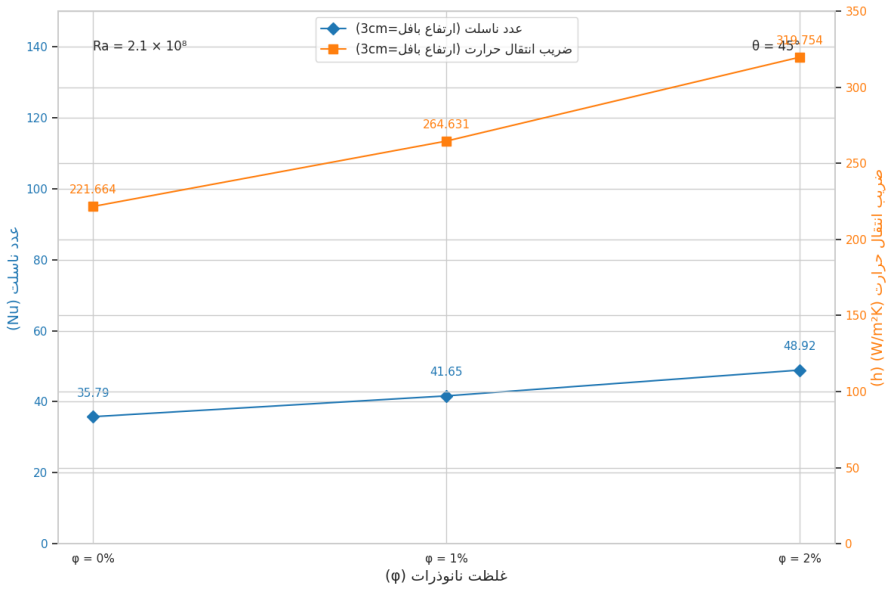


شکل ۴: مقایسه ضریب انتقال حرارت با بافل ۳ سانتی‌متری در غلظت‌های مختلف نانوذره

افزودن نانوذرات اکسید مس به آب، در تمام زوایا منجر به افزایش ضریب انتقال حرارت شد. این بهبود عمدتاً به‌دلیل افزایش ضریب هدایت حرارتی مؤثر سیال و هم‌چنین تأثیر حرکت براونی نانوذرات است که به میکرواختلاط و انتقال انرژی بهتر کمک می‌کند. همانند حالت آب خالص، بیش‌ترین انتقال حرارت برای نانوسیال نیز در زاویه ۴۵ درجه رخ داد و کم‌ترین آن در زاویه ۴۵- درجه بود.

۳-۴- اثر کسر حجمی نانوسیال بر عدد ناسلت و ضریب انتقال حرارت با بافل ۳ سانتی‌متری

شکل (۵) تأثیر افزایش کسر حجمی نانوذرات از ۱٪ به ۲٪ را بر ضریب انتقال حرارت و عدد ناسلت در زاویه بهینه ۴۵ درجه نشان می‌دهد.



شکل ۵: مقایسه ضریب انتقال حرارت و عدد ناسلت با بافل ۳ سانتی‌متری درنسبت حجمی‌های متفاوت در زاویه ۴۵ درجه

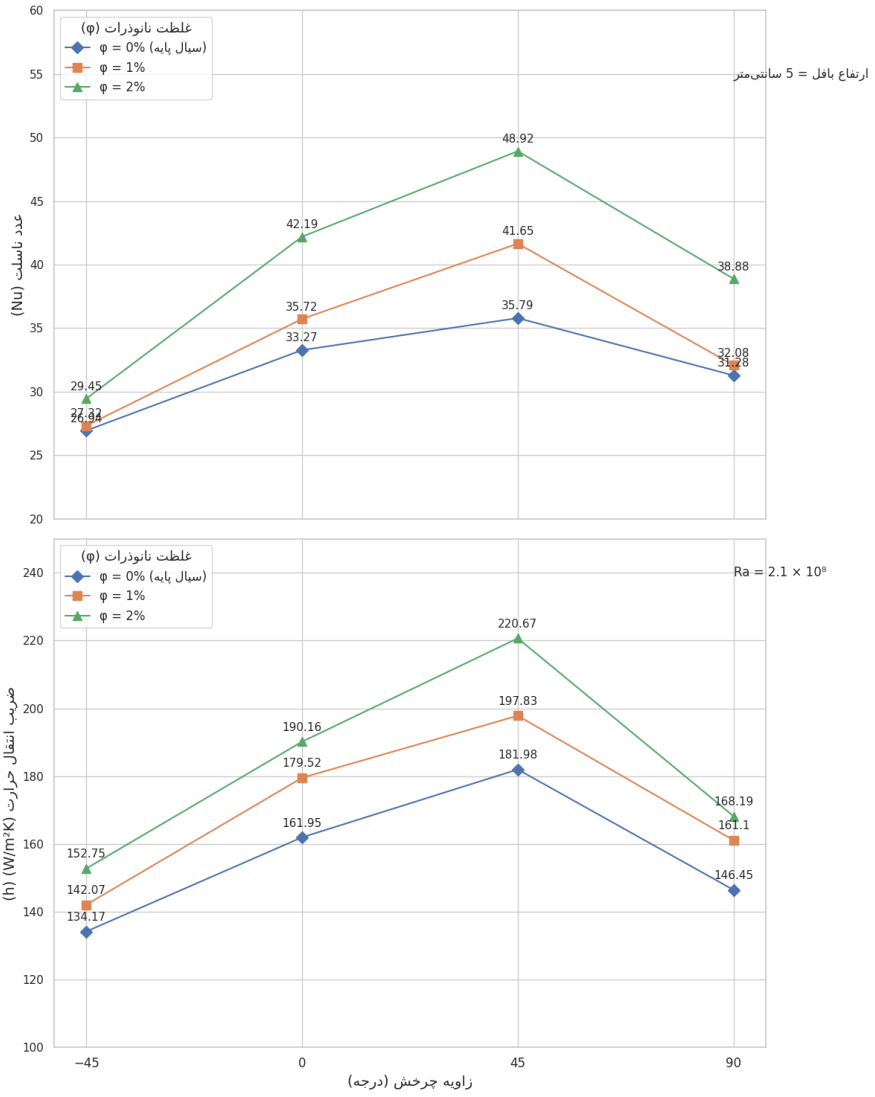
[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-06]

[DOI: 10.82377/jeed.2026.2.564]

طبق شکل (۵)، با افزایش کسر حجمی از ٪۰ به ٪۲، هم ضریب انتقال حرارت و هم عدد ناسلت افزایش یافتند. این نتیجه تأیید می‌کند که غلظت بالاتر نانوذرات، خواص ترموفیزیکی سیال را بیش‌تر بهبود می‌بخشد. به‌طور مشخص، افزایش کسر حجمی از ٪۱ به٪۲، عدد ناسلت را به میزان ٪۱۱,۵۴ افزایش داد. در بهترین حالت (نانوسیال ٪۲، بافل ۳ سانتی‌متری و زاویه ۴۵ درجه)، عدد ناسلت ٪۲۱,۲۶ بیش‌تر از آب خالص در شرایط مشابه بود که نشان‌دهنده پتانسیل بالای این نانوسیال برای بهبود سیستم‌های خنک‌کننده است.

۴-۴- اثر کسر حجمی نانوسیال بر عدد ناسلت و ضریب انتقال حرارت با بافل‌های ۵ و ۷ سانتی‌متری

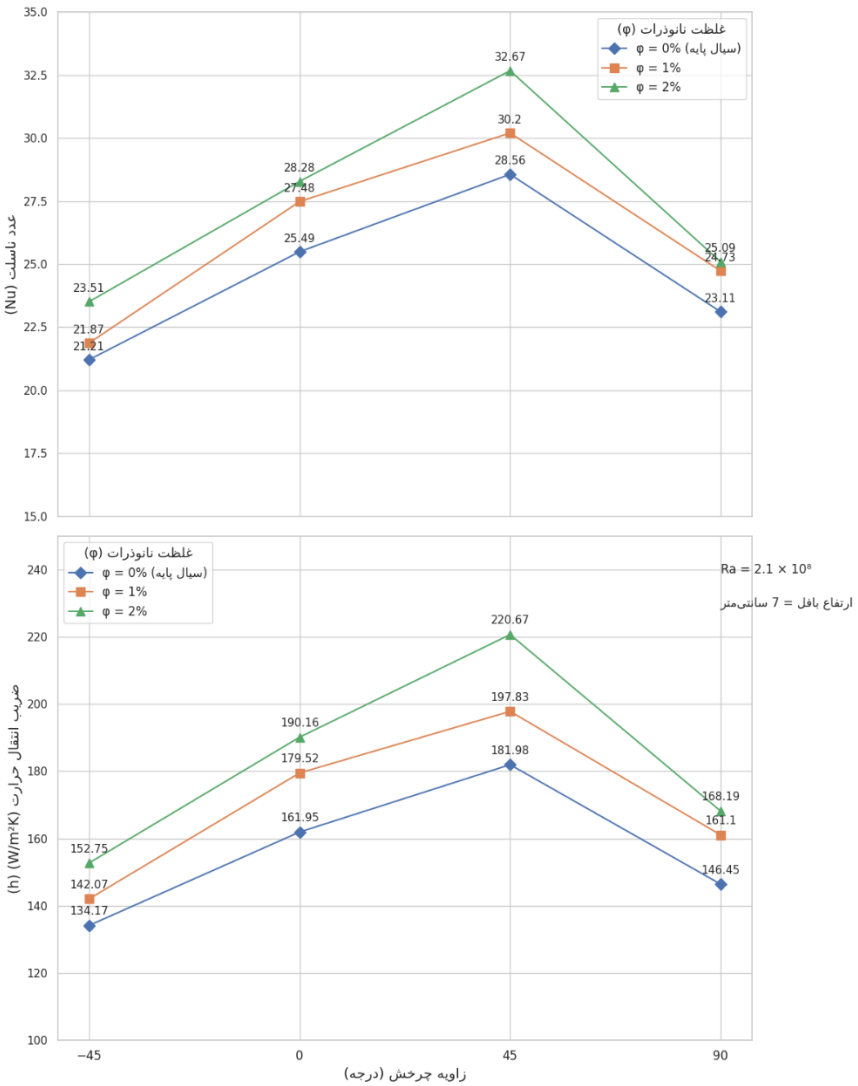
شکل (۶) عدد ناسلت و ضریب انتقال حرارت را برای بافل‌های ۵ و ۷ سانتی‌متری در کسر حجمی‌های مختلف نانوسیال مقایسه می‌کند.



(الف)

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-06]

[DOI: 10.82377/jeed.2026.2.564]



(ب)

شکل ۶: مقایسه عدد ناسلت و ضریب انتقال حرارت برای بافل‌های (الف) ۵ سانتی‌متری و (ب) ۷ سانتی‌متری در زوایای چرخش و کسر حجمی‌های مختلف نانوسیال

نتایج به‌دست‌آمده برای بافل‌های ۵ و ۷ سانتی‌متری نیز روندی مشابه بافل ۳ سانتی‌متری داشتند. در هر دو حالت، زاویه ۴۵ درجه بهترین عملکرد را داشت و نانوسیال ٪۲ بالاترین نرخ انتقال حرارت را ثبت کرد. با این‌حال، مقادیر مطلق عدد ناسلت برای این بافل‌ها کم‌تر از بافل ۳ سانتی‌متری بود که نشان می‌دهد ارتفاع بهینه بافل برای این هندسه، کم‌تر از ۵ سانتی‌متر است.

۴- نتیجه‌گیری و پیشنهادات

در این پژوهش، انتقال حرارت جابه‌جایی طبیعی نانوسیال آب-اکسید مس در یک محفظه مربعی با بافل‌های مختلف و در زوایای چرخش گوناگون به‌صورت تجربی بررسی شد. نتایج کلیدی به‌شرح زیر است. این نتایج نشان می‌دهد که استفاده ترکیبی از نانوسیال و بهینه‌سازی پارامترهای هندسی مانند بافل و جهت‌گیری، راهکاری مؤثر برای افزایش چشم‌گیر بازده سیستم‌های انتقال حرارت است. نوآوری این پژوهش در بررسی تجربی هم‌زمان تأثیر سه عامل کلیدی یعنی زاویه چرخش محفظه، ارتفاع بافل و کسر حجمی نانوسیال اکسیدمس– آب بر انتقال حرارت همرفت طبیعی در یک محفظه مربعی است. در حالی‌که اغلب مطالعات پیشین تنها به بررسی عددی یا آزمایشگاهی یکی از این پارامترها پرداخته‌اند، در این تحقیق تعامل هم‌زمان عوامل هندسی و ترمودینامیکی مورد ارزیابی قرار گرفته است. این ترکیب آزمایشی منحصربه‌فرد، درک عمیق‌تری از نقش پارامترهای هندسی و خواص نانوسیال در بهبود عملکرد حرارتی فراهم می‌آورد و می‌تواند مبنایی برای طراحی بهینه سامانه‌های سرمایش و

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-06]
[DOI: 10.82377/jeed.2026.2.564]

گرمایش مبتنی بر همرفت طبیعی در مقیاس‌های مهندسی باشد. در ادامه، نتایج کلیدی پژوهش به‌صورت عددی و تحلیلی ارائه می‌شود. در حالت آب خالص و بدون بافل، زاویه ۰ درجه (افقی) بهترین عملکرد حرارتی را نشان داد.

- در حضور بافل و هم‌چنین برای نانوسیال، زاویه بهینه برای بیش‌ترین انتقال حرارت ۴۵ درجه به‌دست آمد که در این زاویه عدد ناسلت نسبت به حالت پایه افزایش چشم‌گیری داشت.
- بافل با ارتفاع ۳ سانتی‌متر بیش‌ترین بهبود در انتقال حرارت را ایجاد کرد، در حالی‌که افزایش ارتفاع بافل به ۵ و ۷ سانتی‌متر باعث کاهش عدد ناسلت به‌دلیل ایجاد مانع در مسیر جریان گردید.
- افزودن نانوذرات اکسید مس موجب افزایش محسوس ضریب انتقال حرارت و عدد ناسلت در تمامی شرایط شد؛ به‌طوری‌که افزایش کسر حجمی از ۱٪ به ۲٪ موجب رشد ۱۱٪/۵۴ در عدد ناسلت گردید.
- در شرایط بهینه (نانوسیال با کسر حجمی ۲٪، بافل ۳ سانتی‌متری و زاویه ۴۵ درجه)، عدد ناسلت ۲۱٪/۲۶ بیش‌تر از حالت آب خالص حاصل شد.

با توجه به نتایج به‌دست‌آمده در این پژوهش، پیشنهاد می‌شود در تحقیقات آتی تأثیر پارامترهای دیگری مانند شکل هندسی محفظه (مستطیلی، مثلثی یا استوانه‌ای)، نوع نانوذرات (مانند آلومینا، تیتانیا یا نانوسیال‌های هیبریدی) و هم‌چنین استفاده از میدان‌های مغناطیسی خارجی بر بهبود انتقال حرارت بررسی شود. مطالعه رفتار دینامیکی و پایداری بلندمدت نانوسیال نیز می‌تواند جنبه مهمی برای کاربردهای عملی باشد. علاوه بر این، شبیه‌سازی عددی جریان با استفاده از مدل‌های دوفازی برای مقایسه با نتایج تجربی و درک عمیق‌تر مکانیزم‌های انتقال حرارت، زمینه مناسبی برای پژوهش‌های آینده فراهم می‌آورد.

فهرست علائم

علائم انگلیسی			
A	مساحت، m^2	T	دما، °C
C_p	ظرفیت گرمایی ویژه در فشار ثابت، J/kgK	t	ضخامت صفحه، m
d_p	اندازه ذره، nm	V	ولتاژ، V
h	ضریب انتقال حرارت جابجایی، W/m^2K	W	عرض صفحه، m
H	ارتفاع مشخصه محفظه، m	**علائم یونانی**	
I	جریان الکتریکی، A	β	ضریب انبساط حرارتی، 1/K
k	ضریب هدایت گرمایی، W/mK	μ	ویسکوزیته دینامیکی، Pa.s
Nu	عدد ناسلت	ρ	چگالی، kg/m^3
q''	شار حرارتی، W/m^2	σ	عدم قطعیت در اندازه‌گیری
Ra	عدد رایلی	ϕ	کسر حجمی نانوذرات

مراجع

[1] Wang, X., Xu, X., Choi, S. U., Thermal conductivity of nanoparticle-fluid mixture, Journal of Thermophysics and Heat Transfer, (1999) 474-480.

[2] Xuan, Y., Li, Q., Heat transfer enhancement of nanofluids, International Journal of Heat and Fluid Flow, (2000) 58-64.

[3] Choi, S., Zhang, Z., Yu, W., Lockwood, F., Grulke, E., Anomalous thermal conductivity enhancement in nanotube suspensions, Applied Physics Letters, (2001) 2252-2254.

[4] Singh, A., Thermal conductivity of nanofluids, Defence Science Journal, (2008) 600.

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-06]

[DOI: 10.82377/jeed.2026.2.564]

[5] Xuan, Y., Li, Q., Investigation on convective heat transfer and flow features of nanofluids, Journal of Heat Transfer, (2003) 151-155.

[6] Hu, Y., He, Y., Qi, C., Jiang, B., Schlaberg, H. I., Experimental and numerical study of natural convection in a square enclosure filled with nanofluid, International Journal of Heat and Mass Transfer, (2014) 380-392.

[7] Motlagh, S. Y., Soltanipour, H., Natural convection of Al_2O_3-water nanofluid in an inclined cavity using Buongiorno's two-phase model, International Journal of Thermal Sciences, (2017) 310-320.

[8] Ho, C.-J., Chen, M., Li, Z., Numerical simulation of natural convection of nanofluid in a square enclosure: effects due to uncertainties of viscosity and thermal conductivity, International Journal of Heat and Mass Transfer, (2008) 4506-4516.

[9] Uddin, Z., Harmand, S., Natural convection heat transfer of nanofluids along a vertical plate embedded in porous medium, Nanoscale Research Letters, (2013) 64.

[10] Ahmed, M., Eslamian, M., Numerical simulation of natural convection of a nanofluid in an inclined heated enclosure using two-phase lattice Boltzmann method: accurate effects of thermophoresis and Brownian forces, Nanoscale Research Letters, (2015) 1-12.

[11] Li, H., He, Y., Hu, Y., Jiang, B., Huang, Y., Thermophysical and natural convection characteristics of ethylene glycol and water mixture based ZnO nanofluids, International Journal of Heat and Mass Transfer, (2015) 385-389.

[12] Hu, Y., He, Y., Wang, S., Wang, Q., Schlaberg, H. I., Experimental and numerical investigation on natural convection heat transfer of TiO_2–water nanofluids in a square enclosure, Journal of Heat Transfer, (2014).

[13] Ho, C., Liu, W., Chang, Y., Lin, C., Natural convection heat transfer of alumina-water nanofluid in vertical square enclosures: an experimental study, International Journal of Thermal Sciences, (2010) 1345-1353.

[14] Marfouk, A., Mansour, A., Hasnaoui, A., Amahmid, A., Hasnaoui, M., MHD Free Convection in an Enclosure Loaded with Nanofluid and Partially Cross-heated, Journal of Applied Fluid Mechanics, (2025) 1720-1734.

[15] Xuan, Y., Li, Q. (2000). Heat transfer enhancement of nanofluids. International Journal of Heat and Fluid Flow, 21(1), 58–64.

[16] Zeinali Heris, S., Nasr-Esfahany, M., & Etemad, S. Gh. (2007). Experimental investigation of convective heat transfer of $Al_2\ O_3$ /water nanofluid in a circular tube. International Journal of Heat and Fluid Flow, 28(2), 203-210.

[17] Revnic, C., Groșan, T., Khanafer, K. M., Pop, I., Natural convection in a porous square cavity filled with a ternary hybrid nanofluid: A numerical study, Thermal Science, (2024) 272.

[18] Pak, B. C., Cho, Y. I. (1998). Hydrodynamic and heat transfer study of dispersed fluids with submicron metallic oxide particles. Experimental Heat Transfer, 11(2), 151–170.

[19] Maxwell, J. C. (1881). A Treatise on Electricity and Magnetism. Oxford University Press.

[20] M'hadbi, A., Ganaoui, M., Hamed, H., Guizani, A., Chtaibi, K., Natural convection of a power-law nanofluid in a square cavity with a vertical fin, Fluid Dynamics & Materials Processing, (2024) 2091.

[21] Kline, S. J., & McClintock, F. A. (1953). Describing uncertainties in single-sample experiments. Mechanical Engineering, 75(1), 3–8.

[22] Eastman, J. A., Choi, S. U. S., Li, S., Yu, W., & Thompson, L. J. (2001). Anomalously increased effective thermal conductivities of ethylene glycol-based nanofluids containing copper nanoparticles. Applied Physics Letters, 78(6), 718–720.

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-06]

[DOI: 10.82377/jeed.2026.2.564]

Experimental Investigation of Natural Convection in a Square Enclosure Using CuO-Water Nanofluid: Effects of Different Volume Fractions and Baffles

Mohsen Omidvar[1], Taher Armaghani[2,*], Farhad Dowlatabadi[3]

1. M.Sc., Department of Mechanical Engineering, M.C., Islamic Azad University, Semnan, Iran
2. Associate Professor, Department of Mechanical Engineering, WT.C., Islamic Azad University, Tehran, Iran
3. M.Sc., Department of Mechanical Engineering, WT.C., Islamic Azad University, Tehran, Iran

Received: Winter 2026 Accepted: Spring 2026

Abstract

In this study, steady-state heat transfer in a square enclosure was experimentally investigated using water as a base fluid and a copper oxide (CuO)-water nanofluid at 1% and 2% volume fractions. The heat transfer coefficient and Nusselt number were compared for both conditions. Experiments were performed in a square enclosure with internal dimensions of 9.9 × 9.9 × 10 cm³, utilizing baffles of different heights (3, 5, and 7 cm). Each baffle was positioned 4 cm from the hot plate. The enclosure was also tested at various inclination angles (-45°, 0°, 45°, and 90°). For the pure water base fluid in the presence of baffles, the results showed that the highest Nusselt numbers were achieved with the 3 cm, 5 cm, and 7 cm baffles at angles of 45°, 0°, and 90°, respectively. The lowest Nusselt number occurred at an angle of -45°. When the enclosure was filled with the nanofluid, the maximum Nusselt number was obtained at a 45° angle with the 3 cm baffle. Increasing the nanofluid volume fraction from 1% to 2% enhanced the Nusselt number by approximately 11.54%. Furthermore, the Nusselt number for the 2% nanofluid with the 3 cm baffle increased by 21.26% compared to pure water.

Keywords: nanofluid, natural convection, square enclosure, baffle, copper oxide.
*Corresponding author: armaghani.taher@wtiau.ac.ir

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-06]

[DOI: 10.82377/jeed.2026.2.564]

Cite this article as: Mohsen Omidvar, Taher Armaghani, Farhad Dowlatabadi. Experimental Investigation of Natural Convection in a Square Enclosure Using CuO-Water Nanofluid: Effects of Different Volume Fractions and Baffles. . **Journal of Energy Conversion, 2026, 13(1), 41-55**.