نحوه استناد به این مقاله: مهران‌نیا، مجتبی؛ قلم‌باز محمد (۱۳۹۰). مطالعه خواص ترموفیزیکی مواد تغییر فاز دهنده بهبودیافته با نانوذرات. تبدیل انرژی، ۲(۴-۳)، ۳۴-۲۷.

مطالعه خواص ترموفیزیکی مواد تغییر فاز دهنده بهبودیافته با نانوذرات

مجتبی مهران‌نیا [۱]، محمد قلم‌باز [۲و*]

[۱] دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی، واحد دزفول، دانشگاه آزاد اسلامی، دزفول، ایران
[۲] استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی، واحد دزفول، دانشگاه آزاد اسلامی، دزفول، ایران

دریافت: خردادماه ۱۳۹۶، بازنگری: تیرماه ۱۳۹۶ پذیرش: آبان ۱۳۹۶

چکیده

در این مطالعه، با بهره‌گیری از نتایج آزمایشگاهی و به منظور بررسی جامع رفتار حرارتی نانوسیالات، دو پارامتر بدون بُعد جدید، یعنی پارامتر رسانش حرارتی (N_c) و پارامتر لزجت دینامیکی (N_v) معرفی شدند. با استفاده از پارامترهای بی‌بُعد معرفی شده، تأثیر دمای کارکرد نانوسیال، نوع سیال پایه، جنس و اندازه نانوذرات بر بهبود حرارتی نانوسیال مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج نشان می‌دهد که استفاده از نانوسیال می‌تواند باعث افزایش یا بعضاً کاهش انتقال حرارت شود. از طرفی، کاهش اندازه نانوذرات موجب بهبود انتقال حرارت می‌شود.

* **عهده‌دار مکاتبات:** m.ghalambaz@iaud.ac.ir

کلمات کلیدی: رسانش حرارتی، لزجت دینامیک، نانوذرات، نانوسیال

۱- مقدمه

گروه‌های خاصی از مواد به دلیل داشتن خصوصیات مناسبی مانند گرمای نهان بالا، دمای تغییر فاز مناسب و تغییر حجم اندک حین تغییر فاز به منظور مدیریت حرارتی[۱] (کنترل درجه حرارت سیستم‌های حرارتی) در برخی از فرآیندهای حرارتی استفاده می‌گردد. از این مواد اصطلاحاً به عنوان مواد تغییر فاز دهنده[۲] نام برده می‌شود. بنابراین بیشتر مواد تغییر فاز دهنده (PCMs) موادی هستند که طی فرآیند تغییر حالت از جامد به مایع، انرژی را ذخیره می‌کنند و از پیوندهای شیمیایی برای ذخیره و آزادسازی انرژی حرارتی استفاده می‌کنند. مواد تغییر فاز دهنده (PCM)، بدون استفاده از تجهیزات مکانیکی و به صورت کاملاً هوشمند و تنها از طریق تمایل ذاتی به تغییر فاز، به طور طبیعی خود را با نوسانات محیط تطبیق داده و کاهش مصرف انرژی را به دنبال دارند. در سال‌های اخیر به دلیل افزایش روز افزون تقاضای انرژی برای مصارف صنعتی از یک‌سو و رو به اتمام نهادن منابع زیرزمینی انرژی مثل نفت و زغال‌سنگ از سوی دیگر سبب شده تا بحث سیستم‌های ذخیره‌سازی حرارتی بر مبنای مواد تغییر فاز دهنده (PCM) در انجمن‌های بزرگی مانند انجمن‌های جهانی انتقال حرارت و انجمن انرژی‌های تجدید پذیر به عنوان یک مسئله مهم مطرح گردد. با توجه به این موضوع، استفاده از مواد تغییر فاز دهنده در سال‌های اخیر، به عنوان یک مسئله مهم و اساسی مورد توجه بسیاری از محققین و پژوهشگران قرار گرفته است. این توجه در اثر ظرفیت حرارتی بالا و همچنین رفتار دما ثابت در مواد تغییر فاز دهنده تحت گذار از فاز جامد به مایع است [۱]. نمونه‌های عمده در کاربردهای مواد تغییر فاز دهنده، شامل ذخیره‌سازی حرارتی در انرژی خورشیدی [۲و۳]، کنترل دمای اجزاء به صورت الکترونیکی [۴]، تنظیم دما در ساختمان‌های مسکونی و تجاری [۵] و بهبود عملکرد در تکنولوژی کلکتورهای خورشیدی هستند [۶]. گروه جدیدی از سیالات که شامل یک سیال پایه و ذرات در اندازه نانو که در سیال پایه معلق می‌باشند را نانوسیال[۳] می‌نامند که اولین بار توسط چوی[۴] در سال ۱۹۹۵ در آزمایشگاه ملی آرگون[۵] مطرح شد. او ادعا کرد که چنین سیالاتی هم از نظر تهیه و هم از نظر خواص پایداری در مقایسه با سوسپانسیون‌های معمولی جامد-مایع و میکروسیالات

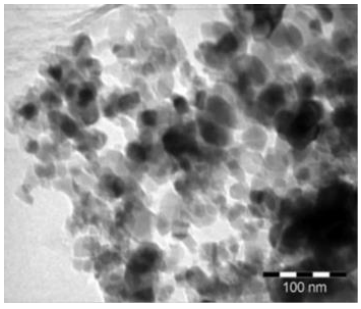
[1] - Thermal Management
[2] - Phase Change Materials

[3]- Nanofluid
[4] - Choi
[5] - Argonne National Laboratory

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-07]

[DOR: 20.1001.1.20089813.1390.2.3.3.3]

تفاوت‌های فراوانی دارند. در تعریف کلی، نانوسیال از ترکیب از کسر حجمی مشخصی از نانوذرات[1] با سیال پایه، حاصل می‌گردد. نانوذرات بسته به نوع کارکردی که دارند در اندازه‌های مختلفی در محدوده ۱۰nm تا ۱۰۰nm تولید می‌گردند. با پخش پایدار نانوذرات در ماده تغییر فاز دهنده، می‌توان انتقال حرارت را تا حد قابل ملاحظه‌ای نسبت به عدم حضور نانوذرات (فقط ماده تغییر فاز دهنده) بهبود داد. نانوذرات مورد استفاده برای ساخت مواد تغییر فاز دهنده عمدتاً اکسیدهای آلومینیوم[2]، سیلیکا، تیتانیوم[3] و مس و فلزاتی نظیر طلا و نقره هستند. برای ماده تغییر فاز دهنده پایه نیز می‌توان به آب، پارافین و اکتادکان اشاره نمود. شکل ۱، تصویری از نانوذرات تیتانیا را نشان می‌دهد که توسط هی و همکاران[4] [۷] ارائه شده است.



شکل ۱: تصویری از نانوذرات تیتانیا با ابعاد ۱۰۰nm [۷].

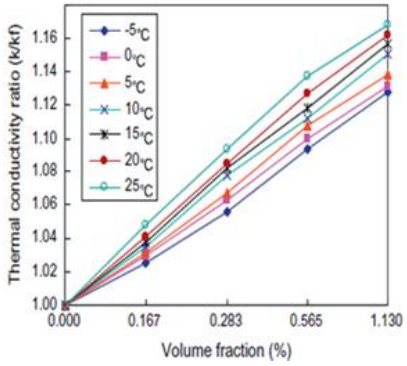
۲- نانوسیال TiO_2 -$BaCl_2$

به منظور تعیین اثر نانوذرات بر سیال پایه، نوع جدیدی از مواد تغییر فاز دهنده (PCM) به وسیله نانوذرات معلق کوچک تیتانیا در محلول اشباع آبی باریم کلرید توسعه داده شده است، که رسانایی حرارتی مواد تغییر فاز دهنده این نوع از نانوسیال مورد بررسی قرار گرفته شده است. نتایج تجربی نشان می‌دهد که با کسر حجمی[5] ۱,۱۳۰ درصد، رسانایی حرارتی نانوذرات مواد تغییر فاز دهنده به مقدار ۱۲,۷۶ درصد در دمای ۵- درجه سانتی‌گراد افزایش یافته است. با افزایش کسر حجمی، ویسکوزیته نیز افزایش یافته و در نهایت هیچ‌گونه تأثیر منفی بر روی سیستم ذخیره‌ساز سرما نخواهد داشت. بر همین اساس با توجه به قابلیت ذخیره‌سازی حرارتی نانوذرات، از این مواد می‌توان به عنوان ذخیره‌ساز انرژی حرارتی در دماهای پایین استفاده نمود [۷].

رسانایی حرارتی

به منظور بررسی اثر دما بر روی افزایش رسانایی حرارتی، مقدار رسانایی حرارتی در محدوده ۵- تا ۲۵ درجه سانتی‌گراد اندازه‌گیری شده است. شکل ۲ نشان می‌دهد که رسانایی حرارتی افزایش یافته، تابعی از کسر حجمی نانوذره TiO_2 معلق شده درون مواد تغییر فاز دهنده نانوسیال می‌باشد. در این بخش از نتایج، K و K_f به ترتیب، رسانایی حرارتی نانوسیال ماده تغییر فاز دهنده و رسانایی حرارتی سیال پایه ($Bacl_2$) می‌باشند. در همین راستا، نتایج نشان می‌دهد که رسانایی حرارتی نانوسیال تقریباً به صورت خطی با افزایش کسر حجمی نانوذره افزایش یافته است. بر همین اساس، با افزایش کسر حجمی نانوذره تیتانیا در محلول اشباع باریم کلرید، نسبت رسانایی حرارتی افزایش خواهد یافت. همچنین نتایج نشان می‌دهد که افزایش دما نیز بر بهبود رسانایی حرارتی تأثیر معنادار دارد و با افزایش دما و افزایش کسر حجمی نانوذره، ضریب رسانش حرارتی بهبود می‌یابد. در نهایت، نتایج نشان می‌دهد زمانی که کسر حجمی ۱,۱۳۰ درصد باشد، رسانایی حرارتی در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد تا ۱۶,۷۴ درصد افزایش می‌یابد، درحالی‌که در دمای پایین ۵- درجه سانتی‌گراد این مقدار تا ۱۲,۷۶درصد افزایش خواهد یافت.

با این وجود، حرکت براونی تقریباً ضعیف دلیل اصلی افزایش رسانایی حرارتی به علت سطح بار الکتریکی سطح نانوذره می‌باشد [۸]. این ویژگی برای نانوسیالات مواد تغییر فاز دهنده برای خنک کردن محفظه در دمای پایین مهم می‌باشد، زیرا رسانایی حرارتی محلول $Bacl_2$-H_2o، با به دام انداختن دما و اثر راندمان خنک کاری مخزن تخلیه بار الکتریکی سرد، کاهش می‌یابد.



شکل۲: نسبت رسانایی حرارتی(K/K_f) به عنوان تابعی از دما در کسر حجمی متفاوت TiO_2 [۷].

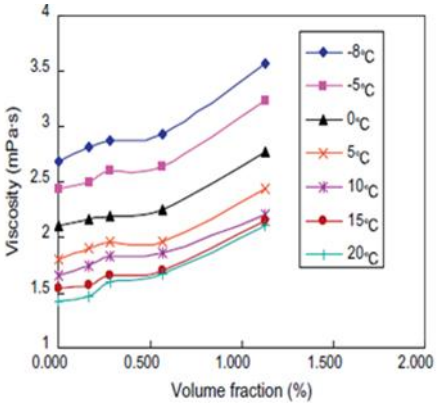
ویسکوزیته

به منظور بررسی اثر افزودن نانوذرات به ماده تغییر فاز دهنده پایه، ویسکوزیته این نوع از نانوسیالات مورد مطالعه قرار گرفته شده است. شکل ۳، ویسکوزیته را به عنوان تابعی از دما

[1] - Nanoparticles
[2] - Al_2O_3
[3] - TiO_2
[4] - Wang et al
[5]- Volume fraction

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-07]
[DOR: 20.1001.1.20089813.1390.2.3.3.3]

در کسر حجمی متفاوت TiO_2 نشان می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد که ویسکوزیته نانوسیال با افزایش کسر حجمی مطابق با پژوهش‌های دیگر افزایش یافته است [۱۱-۹]. بر اساس نتایج، ویسکوزیته TiO_2-$Bacl_2$-H_2O با کسر حجمی ۰,۱۶۷ درصد در دمای صفر درجه سانتی‌گراد تا ۲,۸۶ درصد افزایش یافته است، درحالی‌که کسر حجمی ذره TiO_2، ۱,۱۳ درصد حجمی باشد، ویسکوزیته می‌تواند مشابه به آن تا ۳۱,۹ درصد افزایش یابد. همچنین نتایج نشان می‌دهد که با افزایش کسر حجمی نانوذره، فاصله بین ذرات کاهش خواهد یافت. با توجه به نتایج، نیروی اصطکاک میان نانوذرات و بین نانوذرات و مولکول آب به سرعت افزایش می‌یابد که در نمودار افزایش ویسکوزیته به‌صورت آشکارا به چشم می‌خورد [۱۴-۱۳]. ویسکوزیته نانوسیالات TiO_2-$Bacl_2$-H_2O، مطابق با افزایش غلظت ذرات معلق افزایش یافته است. وقتی که انتقال حرارت در جریان لوله به کار برده می‌شود، مقاومت جریان سیستم افزایش پیدا خواهد کرد. بنابراین ویسکوزیته اثر منفی بر روی سیستم ذخیره‌ساز سرما نخواهد داشت. در مقابل، ویسکوزیته بالا می‌تواند برای پایداری ذرات معلق مطلوب می‌باشد [۱۵]. به آسانی مطابق شکل ۳ می‌توان فهمید که با افزایش دما، ویسکوزیته کاهش یافته است. زمانی که دما افزایش پیدا می‌کند، حرکت براونی نیز افزایش پیدا خواهد کرد، درنتیجه نیروهای بین ذرات کاهش پیدا کرده که می‌تواند باعث کاهش مقاومت جریان اجباری و مقاومت در برابر حرارت گردد [۷].



شکل ۳: ویسکوزیته به عنوان تابعی از دما در کسر حجمی متفاوت TiO_2[۷].

۳- نانوسیال ceramic-water

در حال حاضر، نانوسیالات به عنوان بهترین گزینه برای افزایش انتقال حرارت مورد توجه هستند [۱۷-۱۶]. نانوسیالات، مایعاتی هستند که در آن ذرات با اندازه‌های مختلف از حدود ۱۰ تا ۲۰۰ نانومتر در یک سیال پایه به حالت معلق در آمده‌اند. به طورکلی انتظار می‌رود که رسانایی حرارتی چنین ذرات معلقی بیشتر از سیال پایه باشد. یکی از مدل‌های معروف در زمینه انتقال حرارت نانوسیالات، مدل ماکسول می‌باشد. بسیاری از پژوهش‌ها، حمایت خود را از گسترش دادن تئوری ماکسول[1] اعلام کرده‌اند [۱۸]. چندین مقالات اخیر نشان داده‌اند که موافق با این رویکرد هستند [۲۰-۱۹]. توسعه این رویکرد مشابه با رویکرد نان[2] و همکاران برای برنامه‌های کاربردی ترمودینامیکی می‌باشد [۲۱]. بسیاری از تحقیقات نشان می‌دهد که انتقال حرارت در نانوسیالات بیشتر از آن چیزی که انتظار آن می‌رفت، افزایش یافته است [۲۳-۲۲]، در حالی‌که دیگران نشان می‌دهند که این اتفاق نخواهد افتاد [۲۵-۲۴]. برای کاربرد عملی نانوسیالات، دانش خواص ترموفیزیکی از قبیل رسانایی حرارتی، ویسکوزیته دینامیکی، ظرفیت گرمایی ویژه، چگالی و تغییر دما اساسی می‌باشد. بر همین اساس چندین رویکرد علمی برای خواص ترموفیزیکی نانوسیالات وجود دارد [۲۷-۲۶]. یکی از اهداف اصلی این بخش از پژوهش حاضر، تعیین آزمایشگاهی رسانایی حرارتی (K_{nf}) پنج نانوذره با سیال پایه آب در محدوده دمایی ۲۰ تا ۴۰ درجه سانتی‌گراد می‌باشد.

یکی از مدل‌های معروف برای نانوسیالات، مدل ماکسول توسعه یافته می‌باشد، که اولین بار برای یک ذره در یک میدان مغناطیسی ارائه شد. نتایج نشان داد که این مدل نیز برای میکروذرات هم نسبتاً صادق خواهد بود. در نهایت بسیاری از بررسی‌های آزمایشگاهی بیان کردند که مدل ماکسول برای نانوذرات هم صادق می‌باشد. در واقع مدل ماکسول فقط تابعی از رسانندگی حرارتی سیال پایه، رسانندگی حرارتی نانوذره و کسر حجمی می‌باشد و تحت تأثیر ابعاد و روش ساخت قرار نمی‌گیرد. بسیاری از پژوهش‌ها از این مدل به عنوان یک مدل معروف استفاده می‌کنند که بر اساس این مدل و مدل‌های تئوری دیگر این مدل را گسترش می‌دهند [۲۸]. بر همین اساس با توجه به خصوصیاتی که نانوسیالات دارند و تحت تأثیر اندازه نانوذرات، جنس نانوذرات، جنس سیال پایه و دمای کارکرد قرار می‌گیرند، روابطی که تمامی این خصوصیات را در برگیرد، بسیار حائز اهمیت می‌باشد. به همین منظور، دو پارامتر بدون بُعد جدید، یعنی پارامتر رسانش حرارتی و پارامتر لزجت دینامیکی ارائه می‌شوند که تمامی این خصوصیات در این دو پارامتر بدون بعد خلاصه می‌شود و این روابط جایگزین روابط ماکسول و بریکمن می‌گردد [۳۵-۳۴].

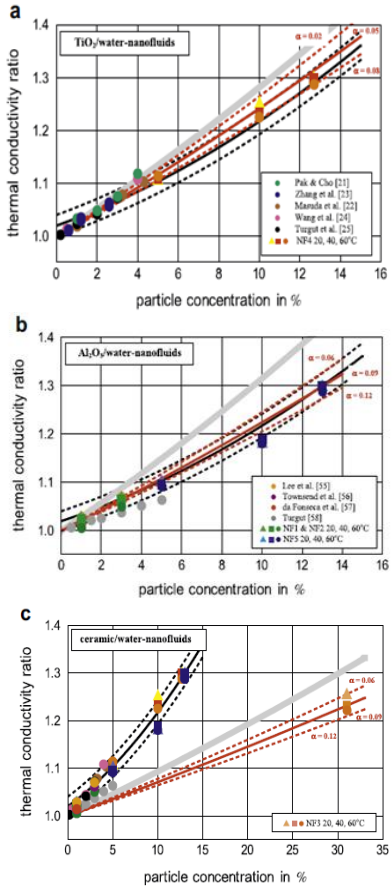
رسانایی حرارتی

با انجام کاربردهای عملی، مشخص شد که نانوسیالات موجب افزایش انتقال حرارت می‌شوند. با بهره‌گیری از آزمایش‌های استاندارد در چندین مطالعات آزمایشگاهی این هدف دنبال شده است [۲۹]. بر همین اساس نتایج نشان

[1]- Maxwell
[2]- Nan

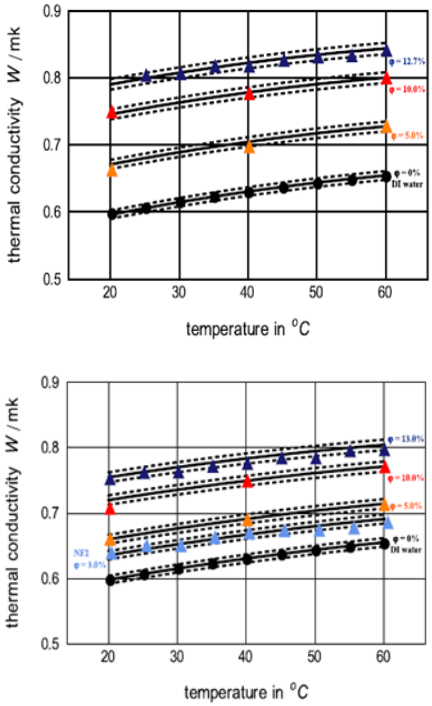
[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-07]
[DOR: 20.1001.1.20089813.1390.2.3.3.3]

می‌دهد که با افزایش کسر حجمی نانوذرات و افزودن نانوذرات به سیال پایه، ضریب رسانش حرارتی افزایش می‌یابد. شکل ۴، نسبت رسانایی حرارتی را بر حسب کسر حجمی ذرات برای نانوسیال تیتانیا-آب، آلومینا-آب و اکسید سیلیسیم-آب نشان می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش کسر حجمی نانوذرات، ضریب رسانایی حرارتی افزایش خواهد یافت. در این بخش از مطالعه، منحنی خاکستری‌رنگ، تئوری ماکسول را نشان می‌دهد [۱۳]. همچنین منحنی قرمزرنگ، تئوری نان را برای سه مقدار متفاوت $\propto$ نشان می‌دهد. در نهایت منحنی مشکی‌رنگ، مربع داده‌ها و نمودار مشکی منقطع، مقدار خطا را با ۲ ± درصد نشان می‌دهد [۲۴].



شکل ۴ : نسبت رسانایی حرارتی بر حسب کسر حجمی ذرات برای نانوسیال a) تیتانیا-آب، b) آلومینا-آب و c) اکسید سیلیسیم-آب [۲۹].

شکل ۵، رسانایی حرارتی را بر حسب دما به ترتیب برای نانوسیالات تیتانیا-آب، آلومینا-آب با کسر حجمی مختلف نشان می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد که افزایش دما بر بهبود رسانایی حرارتی تأثیر معنادار داشته و با افزایش کسر حجمی، رسانایی حرارتی نانوسیال در مقایسه با ماده تغییر فاز دهنده پایه بیشتر افزایش می‌یابد. همچنین نتایج نشان می‌دهد که در اثر افزودن نانوذره تیتانیا به سیال پایه آب، رسانایی حرارتی در مقایسه با افزودن نانوذره آلومینا به سیال پایه آب، بیشتر افزایش پیدا خواهد کرد. در این نتایج نقاط تو پر، نتایج آزمایشگاهی نانوسیال را نشان می‌دهد. خطوط مشکی پررنگ، نتایج دقیق و خطوط منقطع، میزان خطا را با مقدار ۱ ± درصد نشان می‌دهد [۲۹].



شکل ۵ : رسانایی حرارتی بر حسب دما به ترتیب برای نانوسیال تیتانیا-آب و آلومینا-آب [۲۹].

ویسکوزیته

به منظور تعیین ویسکوزیته دینامیکی نانوسیالات، اندازه‌گیری‌ها در محدوده دمایی ۲۰ تا ۶۰ درجه سانتی‌گراد انجام شد و در هیچ مورد رفتار غیر نیوتنی به‌جز برای نرخ برشی بسیار پایین پیدا نشده است. نتایج برای نانوسیالات نشان می‌دهد که افزایش فوق‌العاده ویسکوزیته برای مدل کلاسیک بریکمن[1] [۳۰]، انیشتین[2] [۳۱] و بکلور[3] [۳۲] با پژوهش‌های اخیر قابل بیان نیستند [۲۹]. آزمایش‌ها نشان می‌دهند که افزایش ویسکوزیته به وضوح به غلظت نانوذرات بستگی دارد که این وابستگی دمایی برای سیال پایه آب نزدیک به یک می‌باشد. همچنین اندازه‌گیری ویسکوزیته فقط تابعی از دما می‌باشد که این عامل تنها برای محاسبات نیاز می‌باشد [۲۹].

[1]- Brinkman
[2]- Einstein
[3]- Bachelor

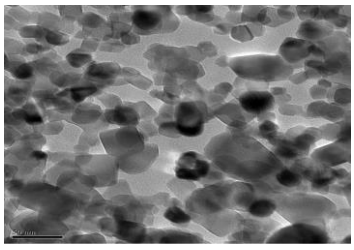
[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-07]
[DOR: 20.1001.1.20089813.1390.2.3.3.3]

جدول۱: محاسبه ویسکوزیته دینامیکی برای نانوذره تیتانیا با کسر حجمی ۱۲،۷۰

Temperature (°C)	Brinkman [30]	Einstein [31]	Batchelor [32]	Prasher et al [11]	Buschmann [29]
۲۰	۱،۴۱	۱،۳۲	۱،۴۲	۲،۲۷	۴،۱۴
۳۰	۱،۱۲	۱،۰۵	۱،۱۳	۱،۸۱	۳،۳۸
۴۰	۰،۹۲	۰،۸۶	۰،۹۳	۱،۴۸	۳،۰۹
۵۰	۰،۷۷	۰،۷۲	۰،۷۸	۱،۲۴	۲،۸۱
۶۰	۰،۶۶	۰،۶۱	۰،۶۶	۱،۰۶	۲،۴۹

۴- نانوسیال TiO_2،Al_2O_3 -EG/water

تحقیقات تجربی برای تعیین ویسکوزیته نانوذرات معلق TiO_2 و Al_2O_3 در ترکیب آب/اتیلن گلیکول (EG/water- ۲۰/۸۰ درصد کسر حجمی) با کسر حجمی متفاوت بین ۴-۰ درصد و محدوده دمایی۶۰-۱۵ درجه سانتی‌گراد انجام شده است. برخی مقایسه‌ها بین نتایج تجربی، مدل‌های تئوری و همبستگی‌های معروف برای ویسکوزیته در مقالات انجام شده است. نتایج نشان می‌دهد که مدل‌های تئوری برای پیش‌بینی ویسکوزیته نانوذرات مناسب نیستند. در این بخش، نانوذرات TiO_2–EG/water و Al_2O_3–EG/water با کسر حجمی ۴-۱درصد آماده و تست شده‌اند. به منظور آماده‌سازی نانوسیالات، دو نوع نانوذره معلق شده در آب، TiO_2 (قطر ۲۱ نانومتر) و Al_2O_3 (قطر ۱۲۰ نانومتر) به ترتیب با کسر وزنی ۴۰ و ۳۰ درصد استفاده شده است. به منظور آماده‌سازی غلظت مورد نیاز نانوسیالات، محلولی از مخلوط آب و اتیلن گلیکول که ۲۰ درصد از سیال پایه اتیلن گلیکول و ۸۰ درصد آب می‌باشد، ترکیب شده است. درنتیجه پایداری نانوذرات معلق داخل سیال پایه برای چندین ماه خوب نشان داده شده است [۳۳].

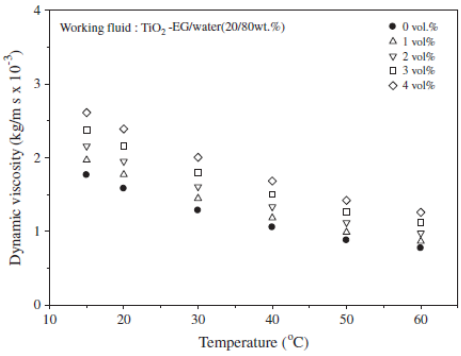


شکل ۶: تصویری از نانوذره TiO_2–EG/water [۳۳].

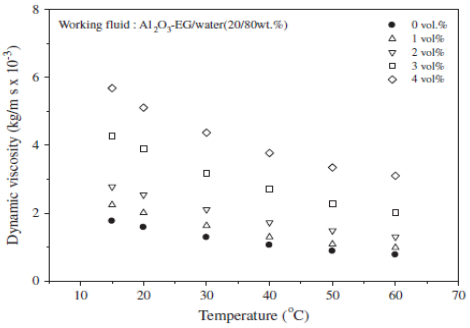
زمانی که نانوسیالات بسیار پیچیده می‌شوند، از مدل بریکمن که برای میکروسیالات ارائه شده است، استفاده می‌شود که این مدل فقط تابعی از غلظت نانوذرات (φ) می‌باشد [۳۴]. مدل بریکمن در اکثر مواقع ویسکوزیته را کمتر از مقدار واقعی خود نشان می‌دهد. به همین منظور، روابطی که مقدار واقعی ویسکوزیته را نشان دهد، حائز اهمیت می‌باشد که این رویکرد در مطالعه حاضر مورد توجه قرار گرفته است.

ویسکوزیته

به منظور بررسی اثر افزودن نانوذرات به ماده تغییر فاز دهنده پایه، در این بخش به بررسی خواص ویسکوزیته دینامیکی نانوسیالات پرداخته شده است. شکل ۷ و شکل ۸، ویسکوزیته دینامیکی را بر حسب دما به ترتیب برای نانوسیال TiO_2–EG/water و Al_2O_3–EG/water با کسر حجمی مختلف نشان می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش دما، مقدار ویسکوزیته کاهش می‌یابد. همچنین نتایج نشان می‌دهد که با افزایش کسر حجمی نانوذرات، ویسکوزیته دینامیکی در مقایسه با سیال پایه (صفر درصد حجمی) بیشتر افزایش پیدا خواهد کرد.



شکل ۷: مقایسه ویسکوزیته دینامیکی نانوسیال TiO_2–EG/water بر حسب دما برای کسرهای حجمی مختلف [۳۳].



شکل۸: مقایسه ویسکوزیته دینامیکی نانوسیال Al_2O_3–EG/water بر حسب دما برای کسرهای حجمی مختلف[۳۳].

با توجه به مطالعات انجام شده، ویسکوزیته و ضریب رسانایی حرارتی[1] دو پارامتر مهم در بحث نانوسیالات می‌باشند که باید مورد توجه قرار گیرند. با این وجود، در مکانیزم جابه‌جایی طبیعی[2] نمی‌توان به خوبی تشخیص داد که این دو پارامتر چگونه تغییر خواهند یافت. بر اساس نتایج، ویسکوزیته

[1]- $K_{conductinity}$
[2]- Natural convection

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-07]
[DOR: 20.1001.1.20089813.1390.2.3.3.3]

در جهت کاهش جابه‌جایی طبیعی و ضریب رسانایی حرارتی در جهت بهبود حرارت عمل می‌کند. بنابراین یک تقابل در جابه‌جایی طبیعی به وجود می‌آید که برای هر نانوسیال باید جداگانه بررسی شود.

۵- مدل اصلاح شده رسانش حرارتی و لزجت دینامیکی

مشکل شرایط مرزی انتقال حرارت همرفت طبیعی نانوسیالات از لحاظ تئوری مورد تجزیه‌وتحلیل قرار گرفته شد. جنبه‌های مختلف نانوسیالات، از قبیل ماده ساختاری، نوع سیال پایه، نوع نانوذره و دمای کارکرد مورد بررسی قرار گرفته شدند. مدل شار رانشی نانوسیالات از جمله، اثرات حرکت براونی، ترموفیزیکی و کسر حجمی موضعی نانوسیالات به عنوان مدل شرایط مرزی انتقال حرارت و انتقال جرم نانوسیالات پذیرفته شده است. پیرو ویژگی‌های ترموفیزیکی، چهار نوع ترکیب نانوسیالات شامل، تیتانیا-باریم‌کلرید، سرامیک-آب، تیتانیا-اتیلن گلیکول/آب و آلومینا-اتیلن گلیکول/آب مورد بررسی قرارگرفته شد.

با توجه به خصوصیات نانوسیالات که تحت تأثیر اندازه و نوع نانوذرات، نوع سیال پایه و دمای کارکرد قرار می‌گیرند، روابطی که تمامی این خصوصیات را در برگیرد، بسیار حائز اهمیت می‌باشد که این روابط جایگزین روابط ماکسول و بریکمن قرار خواهند گرفت. در این راستا، قلم‌باز و همکاران [۳۴] و زرکی و همکاران [۳۵] اعداد رسانش حرارتی و لزجت دینامیک را برای نانوسیال‌ها تعریف نمودند. اعداد رسانش حرارتی و لزجت دینامیک، تابعی از جنس نانوذرات، اندازه نانوذرات، شکل نانوذرات، دمای کارکرد نانوسیال و جنس سیال پایه می‌باشند. با استفاده از اعداد رسانش حرارتی و لزجت دینامیک، پیچیدگی‌های عوامل تأثیرگذار بر رسانش حرارتی و لزجت دینامیک نانوسیال‌ها در دو عدد بی‌بعد پیشنهاد شده یعنی رسانش حرارتی و لزجت دینامیک خلاصه می‌شود، و در نهایت این دو عدد بی‌بعد در محاسبات در نظر گرفته می‌شود. برای محاسبه نسبت لزجت دینامیک و نسبت رسانش حرارتی از رابطه ارائه شده توسط زرکی و همکاران [۳۵] استفاده خواهد شد:

$$\frac{K_{nf}}{K_{bf}} = 1 + N_c \times \Phi \qquad (1)$$

$$\frac{\mu_{nf}}{\mu_{bf}} = 1 + N_\nu \times \Phi \qquad (2)$$

در روابط بالا، N_c [1] و N_υ [2] عامل‌های بی‌بعدی هستند که به ترتیب عامل رسانش حرارتی و عامل لزجت دینامیک نامیده می‌شوند [۳۵]. این عامل‌های بی‌بعد، به شکل نانوذرات، جنس نانوذرات، اندازه نانوذرات، دمای کارکرد نانوسیال و همچنین نوع سیال پایه وابسته می‌باشند و با تغییر هر یک از این موارد، مقدار این دو عدد بی‌بعد تغییر خواهد یافت. به عبارت دیگر در هر شرایط خاص، این عامل‌ها دارای مقدار مختص به آن شرایط هستند و عموماً از طریق نتایج آزمایشگاهی محاسبه می‌شوند.

۶- نتایج و بحث

در این قسمت از پژوهش حاضر، اثر اندازه نانوذرات، جنس نانوذرات، جنس و دمای سیال پایه بر روی انتقال حرارت جابه‌جایی طبیعی نانوسیال‌ها، مورد بررسی قرار می‌گیرد. چهار نوع سیال انتقال حرارتی یعنی نفت، کلرید باریم، پارافین واکس و پارافین به عنوان سیال پایه انتخاب شده‌اند. یازده دمای کارکرد ۵-°C، ۰°C، ۵°C، ۱۰°C، ۱۵°C، ۲۰°C، ۲۵°C، ۳۰°C، ۴۵°C، ۶۰°C و ۶۵°C، به منظور تحلیل اثر دمای کارکرد بر روی انتقال حرارت نانوسیال‌ها لحاظ و سه نوع نانوذره، یعنی آلومینا (Al_2O_3)، تیتانیا (TiO_2) و اکسید مس (CuO)، برای بررسی اثر جنس نانوذرات انتخاب شده‌اند. به طور خلاصه سیزده نمونه نانوسیال از چهار مرجع مختلف در این بخش از پژوهش آمده‌اند.

بر همین اساس، نتایج نشان می‌دهند که استفاده از نانوذرات مناسب در یک سیال پایه به افزایش محسوس انتقال حرارت جابه‌جایی نانوسیال می‌انجامد. در عوض انتخاب نامناسب نانوذرات می‌تواند سبب کاهش انتقال حرارت جابه‌جایی طبیعی نانوسیال گردد. از طرفی، کاهش اندازه نانوذرات باعث بهبود انتقال حرارت می‌شود.

جدول ۲: ارزیابی مقادیر گوناگون پارامترهای رسانش حرارتی و لزجت دینامیک برای نمونه‌های مختلف نانوسیال

نمونه	مرجع	نوع نانوذرات	نوع سیال پایه	اندازه نانوذرات (nm)	دما (°C)	N_c	N_υ
۱	[۳۶]	Al_2O_3	Kerosene	۱۳	۲۵	۴۹,۲۴	۲۰,۰۲
۲	[۳۶]	Al_2O_3	Kerosene	۵۰	۲۵	۳۷,۴۱	۱۵,۶۲
۳	[۳۰]	Tio_2	$Bacl_2$	۲۰	-۵	۱۰,۸۲	۲۳,۶۱
۴	[۳۰]	Tio_2	$Bacl_2$	۲۰	۰	۱۱,۵۰	۲۳,۸۰
۵	[۳۰]	Tio_2	$Bacl_2$	۲۰	۵	۱۲,۲۶	۲۵,۸۸
۶	[۳۰]	Tio_2	$Bacl_2$	۲۰	۱۰	۱۳,۲۶	۲۷,۷۳
۷	[۳۰]	Tio_2	$Bacl_2$	۲۰	۱۵	۱۳,۹۸	۳۱,۱۵
۸	[۳۰]	Tio_2	$Bacl_2$	۲۰	۲۰	۱۴,۶۹	۳۹,۹۱
۹	[۳۷]	Cuo	paraffin wax	۴۰	۶۰	۱,۴۳	۲,۲۶
۱۰	[۳۷]	Cuo	paraffin wax	۴۰	۶۵	۱,۲۶	۱,۹۴
۱۱	[۳۸]	Al_2O_3	paraffin	۱۶۰	۳۰	۰,۶۱	۲,۸۷
۱۲	[۳۸]	Al_2O_3	paraffin	۱۶۰	۴۵	۰,۶۶	۲,۹۹
۱۳	[۳۸]	Al_2O_3	paraffin	۱۶۰	۶۰	۱,۶۸	۳,۳۸

[1]- Number of Conductivity
[2]- Number of Viscosity

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-07]
[DOR: 20.1001.1.20089813.1390.2.3.3.3]

۷- نتیجه‌گیری

حرارت همرفت طبیعی و ویسکوزیته دینامیکی بر اساس انواع مختلف نانوذرات، سیال پایه و دمای کارکرد مورد بررسی قرار گرفته شد. رسانایی حرارتی و ویسکوزیته دینامیکی نانوسیالات با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی موجود، مورد ارزیابی قرار گرفته شد. بر اساس یک مدل ریاضی قوی یک رویکرد شبیه‌سازی موفق انجام شد که بر اساس آن، رسانایی حرارتی و ویسکوزیته دینامیکی نانوسیالات مختلف به دست آمدند که بر اساس دمای کارکرد، نوع نانوذره، نوع سیال پایه و سایز نانوذرات برای هریک قابل محاسبه می‌باشند و با افزایش دمای کارکرد در اکثر نانوسیالات رسانایی حرارتی و ویسکوزیته دینامیکی افزایش پیدا خواهد کرد.

فهرست علامت‌ها

علائم انگلیسی	
K_{nf}	رسانایی حرارتی نانوسیال
K_{bf}	رسانایی حرارتی سیال پایه
μ_{nf}	ویسکوزیته دینامیکی نانوسیال
μ_{bf}	ویسکوزیته دینامیکی سیال پایه
N_c	پارامتر بی‌بعد رسانش حرارتی
N_υ	پارامتر بی‌بعد ویسکوزیته دینامیکی
علائم یونانی	
φ	کسر حجمی

مراجع

[1] K.Pielichowska, K.Pielichowski, Phase change materials for thermal energy storage, Progress in Materials Science, 65(2014) 67-123.

[2] A. Joseph, M. Kabbara, D. Groulx, P. Allred, M.A. White Real-time Testing of Phase Change Materials for Solar Thermal Energy Storage, in: Proc. of 13th International Conference on Clean Energy (ICCE-2014), pp. 265-274.

[3] M. Mazman, L.F. Cabeza, H. Mehling, M. Nogues, H. Evliya, H.Ö. Paksoy,Utilization of phase change materials in solar domestic hot water systems, Renewable Energy, 34(6):1639-1643 (2009).

[4] Z. Ling, Z. Zhang, G. Shi, X. Fang, L. Wang, X., Fang,Y. Gao, T. Xu, S. Wang, X. Liu,Reviewon thermal management systems using phase change materials for electronic components,Li-ionbatteries and photovoltaic modules,Renewable and Sustainable Energy Reviews, 31(2014) 427-438.

[5] M. Rastogi, A. Chauhan, R. Vaish, A. Kishan, Selection and performance assessment of Phase Change Materials for heating, ventilation and air-conditioning applications, Energy Conversion and Management, 89(2015)260-269.

[6] D.N.Nkwetta, F.Haghighat,Thermal energy storage with phase change material—a state-of-the art review, Sustainable Cities and Society, 10(2014) 87-100.

[7] Q. He, Sh. Wang, M. Tong, Y. Liu, Experimental study on thermophysical properties of nanofluids as phase-change material (PCM) in low temperature cool storage, Energy Conversion and Management 64(2012)199–205.

[8] W.Yu, H. Xie, L. Chen,et al. Enhancement of thermal conductivity of kerosenebased Fe_3O_4nanofluids prepared via phase-transfer method.Colloids Surf A:Physicochem Eng Aspects 2010;355:109–13.

[9] D. Lee, J.W. Kim, BG. Kim, A new parameter to control heat transport in nanofluids: surface charge state of the particle in suspension. J Phys Chem B2006;110:4323–8.

[10] TX. Phuoc, M, Massoudi, RH. Chen, Viscosity and thermal conductivity of nanofluids containing multi-walled carbon nanotubes stabilized by chitosan. Int JTherm Sci 2011;50:12–8.

[11] R. Prasher, D. Song, J. Wang, et al. Measurements of nanofluid viscosity and its implications for thermal applications. Appl Phys Lett 2006;89:133108.

[12] P. Namburu, D.Kulkarni, D.Misra, et al. Viscosity of copper oxide nanoparticles dispersed in ethylene glycol and water mixture.Exp.ThermalFluidSci 2007;32:397–402.

[13] M. Vasheghani, E. Marzbanrad, C. Zamani, M. Aminy, B. Raissi, T. Ebadzadeh, et al. Effect of Al_2O_3 phases on the enhancement of thermal conductivity and viscosity of nanofluids in engine oil. Heat Mass Transfer 2011;47:1401–5.

[14] P. Namburu, D. Kulkarni, D. Misra, D. Das, Viscosity of copper oxide nanoparticles dispersed in ethylene glycol and water mixture. Exp Therm Fluid Sci 2007;32:397–402.

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-07]

[DOR: 20.1001.1.20089813.1390.2.3.3.3]

[15] B. Wang, C. Li, X. Peng, Research on stability of nano-particle suspension. J Univ Shanghai Sci Technol 2003;25(3):209–12.

[16] L. Godson, B. Raja, D.M. Lal, S. Wongwises, Enhancement of heat transfer using nanofluids e an overview, Renew. Sustain. Energy Rev. 14 (2010) 629e641.

[17] S.Özerinç, S. Kakaç, A.Y. Güvenç, Enhancedthermalconductivity of nanofluids: astate-of-the-artreview,Microfluid Nanofluid 8 (2010) 145-170.

[18] J.C.A. Maxwell, Treatise on Electricity and Magnetism, second ed. Clarendon, Oxford, 1881.

[19] J. Buongiorno, D.C. Venerus, N. Prabhat, T. McKrell, J. Townsend,R. Christianson, et al., A benchmark study on the thermal conductivity of nanofluids, J. Appl. Phys. 106 (2009) 094312.

[20] J. Eapen, R. Rusconi, R. Piazza, S. Yip, The classical nature of thermal conduction in nanofluids, J. Heat Transfer 132 (2010) 102402.

[21] C.W. Nan, R. Birringer, D.R. Clarke, H. Gleiter, Effective thermal conductivity of particulate composites with interfacial thermal resistance, J. Appl. Phys. 81(1997) 6692-6699.

[22] Q. Li, Y. Xuan, Convective heat transfer and flow characteristics of Cu-water nanofluid, Sci. China (Ser. E) 45 (2002).

[23] S.Z. Heris, S.G. Etemad, M.N. Esfahany, Experimental investigation of oxide nanofluids laminar flow convective heat transfer. I, Commun. Heat Mass Transfer 33 (2006) 529-535.

[24] U. Rea, T. McKrell, L. Hu, J. Buongiorno, Laminar convective heat transfer and viscous pressure loss of aluminaewater and zirconiae water nanofluids, J. Heat Mass Transfer 52 (2009) 2042-2048.

[25] W. Williams, J. Buongiorno, L.W. Hu, Experimental investigation of turbulent convective heat transfer and pressure loss of alumina/water,andzirconia /water nanoparticle,colloids(nanofluids) in horizontal tubes, J. Heat Transfer 130 (2008) 042412.

[26] Y. Ding, H. Chen, L. Wang, C.Y. Yang, Y. He, W. Yang, W.P. Lee, L. Zhang, R. Huo, Heat transfer intensification using nanofluids, KONA 25 (2007) 23-38.

[27] M. Chandrasekar, S. Suresh, A review on the mechanisms of heat transport in nanofluids, Heat Transfer Eng. 30 (2009) 1136-1150.

[28] N. Prabhat, J. Buongiorno, L. Hu, Convective heat transfer enhancement in nanofluids: real anomaly or analysis artifact?, in: Proceedings of the ASME/ JSME 2011 8th Thermal Engineering Joint Conference (2011) Honolulu, Hawaii, USA AJTEC2011-44020.

[29] M. H., Buschmann, Thermal conductivity and heat transfer of ceramic nanofluids, International Journal of Thermal Sciences 62 (2012) 19-28.

[30] H.C. Brinkmann, The viscosity of concentrated suspensions and solution, J. Chem. Phys. 20 (1952) 571e581.

[31] A. Einstein, Investigations on the Theory of the Brownian Movement. Dover Publications Inc., New York, 1956.

[32] G.K. Batchelor, The effect of the Brownian motion on the bulk stress in a suspension of spherical particles, J. Fluid Mech. 83 (1977) 97-117.

[33] T. Yiamsawas,; O. Mahian , A.S ,Dalkilic , S. Kaewnai, S. Wongwises, Experimental studies on the viscosity of TiO_2 and Al_2O_3 nanoparticles suspended in a mixture of ethylene glycol and water for high temperature applications, Applied Energy 111 (2013) 40–45.

[34] M. Ghalambaz, A. Noghrehabadi, and,A. Ghanbarzadeh, Natural convection of nanofluids over a convectively heated vertical plate embedded in a porous medium,Brazilian Journal of Chemical Engineering , 31, 413-427, 2014.

[35] A. Zaraki, M. Ghalambaz, J.A. Chamkha, M.Ghalambaz, and,D. De Rossi, Theoretical analysis of natural convection boundary layer heat and mass transfer of nanofluids: Effects of size, shape and type of nanoparticles, type of base fluid and working temperature Adv,26,935-946,2015.

[36] D.K. Agarwal, A. Vaidyanathan, S. Sunil Kumar, Synthesis and characterization of kerosene-Alumina nanofluids, Applied Thermal Engineering, 60(2013)275-284.

[37] S. Jesumathy, M. Udayakumar, S. Suresh, Experimental study of enhanced heat transfer by addition of CuO nanoparticle, Heat Mass Transfer (2012) 48:965–978.

[38] C.J,Ho,J.Y.Gao,Preparation and thermophysical properties of nanoparticle-in-paraffin emulsion as phase change material, International Communications in Heat and Mass Transfer, 36(2009)467-470.

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-07]

[DOR: 20.1001.1.20089813.1390.2.3.3.3]