J. Energy Conversion
Volume: 10, Issue: 4, 2024: 93-121

نشریه علمی-تخصصی تبدیل انرژی (JEED)

دوره ۱۰، شماره ۴، زمستان۱۴۰۲، ص: ۹۳-۱۲۱

بررسی تجربی پتانسیل انتقال حرارتی نانوسیال اکسید آلومینیوم - آب با استفاده از معیارهای خواص ترموفیزیکی

بهروز راعی[۱و*]، الناز سادات سیدی[۱]

۱.گروه مهندسی شیمی، واحد ماهشهر، دانشگاه آزاد اسلامی، ماهشهر، ایران

دریافت: ۱۴۰۲/۰۹/۰۵، بازنگری: ۱۴۰۲/۱۱/۲۵، پذیرش: ۱۴۰۲/۱۲/۰۱

چکیده

مطالعه حاضر به بررسی قابلیت بهبود پایداری و عملکرد انتقال حرارتی سیال خنک کننده آب با استفاده از پراکندگی نانوذرات اکسید آلومینیوم در آب می‌پردازد. نانوسیال عاری از سورفکتانت با ۴ کسر حجمی مختلف ۰/۰۵ ٪، ۰/۵ ٪، ۱ ٪ و۲٪ به روش دو مرحله‌ای تهیه شد. پایداری نانوسیال با دو روش عکسبرداری مداوم و پراکندگی نور پویا (DLS) رصد شد. ضریب هدایت حرارتی، ویسکوزیته و دانسیته نانوسیال اکسید آلومینیوم-آب در ۴ غلظت و در دماهای ۳۵،۲۵ و۴۵ درجه سانتی‌گراد اندازه گیری شد. نتایج نشان داد که ضریب هدایت حرارتی و ویسکوزیته نانوسیال اکسید آلومینیوم-آب با افزایش غلظت افزایش می یابد. ویسکوزیته نانوسیال در تمامی غلظتها بیشتر از سیال پایه بود. این در حالیست که افزایش ویسکوزیته تقریباً مستقل از افزایش دما بوده است. بیشترین درصد افزایش ضریب هدایت حرارتی نانوسیال برابر ۴۹ ٪ است که در غلظت ۲٪ و دمای ۴۵ درجه سانتیگراد بدست آمد. روابط جدیدی با دقت بالا بر اساس داده‌های تجربی ضریب هدایت حرارتی و ویسکوزیته نانوسیالات ارائه گردید. قابلیت انتقال حرارتی و توان پمپاژ نانوسیال بر اساس چندین معیار و شاخص عملکرد مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. نتایج مطلوب افزایش قابلیت انتقال حرارتی باعث گردیده که بتوان از نانوسیال اکسید آلومینیوم – آب به عنوان یک کاندید بالقوه برای سیال خنک‌کننده در کاربردهای عملی نام برد.

* **عهده‌دار مکاتبات:** behrouz.raei@iau.ac.ir

کلمات کلیدی: نانوسیال،انتقال حرارت،ضریب هدایت حرارتی،ویسکوزیته.

۱- مقدمه

سیالات پایه مانند آب، گلیکول‌ها و روغن‌ها به‌عنوان محیط‌های کاری در دستگاه‌های انتقال حرارت در طیف گسترده‌ای از کاربردهای مهندسی استفاده می‌شوند. راندمان حرارتی چنین دستگاه‌هایی را می‌توان با افزایش ضریب هدایت حرارتی سیالات پایه افزایش داد. مفهوم پراکندگی ذرات جامد در اندازه نانو در سیالات پایه که توسط چوی و همکاران [۱] توسعه یافته است، به موضوع مهمی تبدیل شده است که به عنوان نانوسیال شناخته می شود. برای اینکه بتوان درباره نانوسیالات تحقیق کرد تهیه این نوع سیالات به صورت پایدار عامل بسیار مهمی در شروع کار است چون پایداری نانوسیال به شدت بر خواص ترموفیزیکی آن تاثیر می‌گذارد [۲, ۳]. به طور معمول سه روش برای پراکندگی نانوذرات در سیالات پایه وجود دارد. اولین روش پراکندگی،

نحوه استناد به این مقاله: بهروز راعی، الناز سادات سیدی. بررسی تجربی پتانسیل انتقال حرارتی نانوسیال اکسید آلومینیوم - آب با استفاده از معیارهای خواص ترموفیزیکی.
مهندسی مکانیک تبدیل انرژی. ۱۴۰۲; ۱۰ (۴) :۹۳-۱۲۱.

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

تغییر دادن مقدار pH سیال است، پایداری نانوسیال به طور مستقیم به وسیله پتانسیل زتا[1] تحت تاثیر قرار می‌گیرد که به مقدار pH سیال پایه مرتبط است. دومین روش، اصلاح کردن سطح نانوذرات به وسیله استفاده از ماده فعال سطحی است. سومین روش پراکندگی به وسیله امواج فراصوت است که می تواند نوسان‌های حبابی تولید کرده و به اثرات پراکندگی ختم شود [۲]. تحقیقات گسترده‌ای برای بررسی پایداری، ضریب هدایت حرارتی و ویسکوزیته نانوسیالات انجام شده است. ماسودا و همکاران[۴] با مطالعه تجربی ضریب هدایت حرارتی اکسید آلومینیوم و اکسید تیتانیوم در سیال پایه آب نشان دادند که ضریب هدایت حرارتی نانوسیالات مذکور به ترتیب ۳۰ درصد و ۱۰ درصد نسبت به آب در غلظت ۴ درصد افزایش می‌یابد. وانگ و همکاران [۲] با استفاده از سدیم دودسیل بنزن سولفونات (SDBS) به عنوان پراکنده ساز، نانوذرات اکسید مس و اکسید آلومینیوم را در سیال پایه آب با اندازه ذرات مختلف مورد بررسی قرار داده‌اند. مطالعات آنها نشان داد که pH نانوسیال تحت‌تاثیر اندازه ذرات قرار دارد. همچنین نتایج آنها نشان داد که در pH بهینه، نانو سیالات بهترین رفتار پایداری را داشته و در آن حالت ضریب هدایت حرارتی نانو سیال بیشینه مقدار خود را خواهد داشت. ایستمن و همکاران [۵] افزایش ۴۰ درصدی در ضریب هدایت حرارتی نانوسیال مس- اتیلن گلیکول را با ۰/۳ درصد غلظت حجمی گزارش نموده اند. مرشد و همکاران[۶] ضریب هدایت حرارتی نانوسیال اکسید تیتانیوم بر پایه آب را با شکلهای کروی و میله‌ای مورد بررسی قرار دادند. نتایج آنها نشان داد که شکل ذرات تا حد زیادی بر افزایش ضریب هدایت حرارتی در نانوسیال اثرگذار است. آنها نتایج تجربی بدست آمده را با مدل‌های نظری معتبر مقایسه کردند و دریافتند که مقادیر تجربی ضریب هدایت حرارتی نانوسیالات بیشتر از مقادیری است که از پیش‌بینی مدلهای معتبر بدست می‌آید. دینگ و همکاران [۷] ۱۱/۳ ٪ و ۱۸٪ افزایش در مقادیر ضریب هدایت حرارتی نانوسیالات شامل نانولوله کربنی-آب با غلظت‌های به ترتیب ۱٪ و ۰/۱٪ بدست آوردند. مینتسا و همکاران[۸] گزارش کرده اند که افزایش ضریب هدایت حرارتی در نانوسیال‌های اکسید آلومینیوم (۳۶ نانومتر) و اکسید مس (۴۷ نانومتر) وابسته به غلظت و دما است. شاه و همکاران [۹] افزایش ضریب هدایت حرارتی در نانوسیال آلفا اکسید آلومینیوم- آب را بررسی کردند و اظهارات مینتسا و همکاران[۸] را تأیید نموده‌اند. مطالعات صمد و همکاران [۱۰] نشان داده است که ضریب هدایت حرارتی نانوسیال اکسید تیتانیوم-آب با افزایش غلظت و دما بهبود می‌یابد. آنها مشاهده کردند که افزایش ضریب هدایت حرارتی ۳۷/۳۵ ٪ با کسر حجمی ۰/۴۷ درصد در دمای ۹۰ درجه سانتیگراد بود، در حالی که این افزایش در ۲۰ درجه سانتیگراد۲۴/۱۱٪ است. جی و همکاران[۱۱] رفتار پراکندگی و پایداری نانوذرات گاما آلومینا در سیال پایه آب یون‌زدایی شده را در انواع سورفکتانت و مقادیر مختلف pH مورد بررسی قرار داده‌اند. سه سورفکتانت شامل Tween 60 غیر یونی، ستیل تری متیل آمونیوم برماید کاتیونی (CTAB) و سدیم دودسیل بنزن سولفونات آنیونی (SDBS) به عنوان عوامل افزودنی برای بهبود کیفیت پایداری نانوسیال انتخاب شدند. نتایج نشان داد که پراکندگی و پایداری نانوسیال گاما آلومینا به شدت به نوع و مقدار سورفکتانت و مقدار مطلق پتانسیل زتا بستگی دارد. اثر pH بر پایداری، ضریب هدایت حرارتی و ویسکوزیته نانوذرات اکسید مس و اکسید گرافن و هیبرید آنها در نسبتهای مختلف (سیال پایه آب) توسط کانتی و همکاران [۱۲] بررسی شد. همچنین اثر دو سورفکتانت مختلف بر پایداری نانوسیالات درpH های مختلف هم مورد مطالعه قرار گرفت. با استفاده از دو روش جدید بر پایه یادگیری ماشینی[2]،شامل روش Bayesian optimized support vector machine[3] وBayesian optimized boosted regression trees[4] مدلهایی برای پیش بینی ضریب هدایت حرارتی و ویسکوزیته نانوسیالات مذکور پیشنهاد گردید. نتایج نشان داد که برای هم ضریب هدایت حرارتی و هم ویسکوزیته ، روش اولی دقت بالاتری نسبت به روش دوم در پیش بینی دارد. اشگرف و همکاران [۱۳] ضریب هدایت حرارتی و ویسکوزیته نانوسیال اکسید آهن–آب را در غلظت و دماهای مختلف مورد بررسی آزمایشگاهی قرار دادند. سپس با استفاده از

[1] Zeta potential
[2] machine learning
[3] BoA-SVM
[4] BoA-BRT

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

شبکه عصبی مصنوعی مدلهایی برای پیش بینی خواص ترموفیزیکی مذکور ارائه شد. نتایج از دقت بالای مدلهای پیشنهادی در پیش بینی خواص ترموفیزیکی نانوسیال حکایت داشت بطوریکه حاشیه خطا[1] برای پیش بینی ضریب هدایت حرارت و ویسکوزیته نانوسیالFe_3O_4 –آب به ترتیب برابر ۰/۴۲ و ۰/۰۶ درصد بدست آمد. ضریب هدایت حرارتی نانوسیال هیبریدی کربید سیلیکون + اکسید منیزیم- اتیلن گلایکول به طور تجربی توسط غفوری و همکاران [۱۴] مورد بررسی قرار گرفت. حجم مساوی از نانوذرات مذکور در ۳ قطر مختلف ۲۰ ،۵۵ و ۹۰ نانومتر در سیال پایه اتیلن گلایکول اضافه تا نانوسیال هیبریدی تهیه گردد. نتایج نشان داد که کسر حجمی و دما به شدت بر ضریب هدایت حرارتی تاثیر افزایشی می‌گذارند. اما کاهش ضریب هدایت حرارتی با افزایش قطر نانوذرات مشاهده شد. در نهایت رابطه‌ای جهت پیش‌بینی ضریب هدایت حرارتی نانوسیال هیبریدی پیشنهاد گردید.

ویسکوزیته نیز مانند ضریب هدایت حرارتی، برای تخمین عملکرد حرارتی تجهیزات مهندسی مختلف، که با انتقال حرارت و توان پمپاژ در ارتباط هستند، مهم است. مطالعات مختلفی در خصوص ویسکوزیته نانوسیالات انجام شده است. پاک و چو [۱۵] ویسکوزیته نانوسیالات اکسید آلومینیوم (۱۳ نانومتر) - آب و اکسید تیتانیوم (۲۷ نانومتر) - آب را بررسی کردند. نتایج آنها نشان داد که مقادیر ویسکوزیته نانوسیال‌ها چندین برابر آب است. پراشر و همکاران [۱۶] ویسکوزیته نانوسیال اکسید آلومینیوم - پروپیلن گلیکول را مورد مطالعه قرار داده و گزارش کردند که ویسکوزیته نانوسیال با افزودن نانوذرات در سیال پایه افزایش می‌یابد و همزمان با افزایش دما کاهش می‌یابد. آنها همچنین گزارش دادند که افزایش ویسکوزیته در نانوسیال بیشتر از افزایش ضریب هدایت حرارتی در نانوسیال است. دوانگتونگساک و همکاران[۱۷] بررسی تجربی ویسکوزیته دینامیکی نانوسیال اکسید تیتانیوم-آب را در غلظت های حجمی ۰/۲٪ تا ۲٪ و در دامنه دمایی بین ۱۵ درجه سانتیگراد تا ۳۵ درجه سانتیگراد انجام دادند. آنها مشاهده کردند که ویسکوزیته نانوسیال با افزودن نانوذرات در سیال پایه افزایش می یابد. همچنین ویسکوزیته نانوسیالات با افزایش دما کاهش یافت. بعلاوه، داده های ویسکوزیته تجربی به طور گسترده‌ای با داده‌های پیش‌بینی‌شده توسط معادلات موجود متفاوت بود. یامساواس و همکاران[۱۸] ویسکوزیته نانوسیال اکسید آلومینیوم-آب را با کسر حجمی متنوع از ۱٪ تا ۸٪ در دماهای مختلف بین ۱۵ درجه سانتیگراد تا ۶۰ درجه سانتیگراد مورد سنجش قرار دادند. آنها گزارش کردند که ویسکوزیته با افزایش غلظت نانوذرات افزایش و با افزایش دما کاهش می یابد. آنها همچنین نتایج تجربی خود را با مدل های نظری و یافته های تجربی قبلی مقایسه کردند.

از مروری بر مطالعات پیشین مشهود است که مطالعات گسترده ای در مورد ضریب هدایت حرارتی و ویسکوزیته نانوسیالات انجام شده است. برخی از مطالعات نیز در دسترس هستند که بر روی عملکرد حرارتی و امکان عملیاتی شدن[2] نانوسیال‌ها متمرکز شده‌اند. تحقیقات محدودی [۱۹-۲۴] در مورد عملکرد حرارتی نانوسیالات بر اساس معیارهای ارزیابی مختلف و شاخص‌های شایستگی‌ها[3] بر اساس خواص ترموفیزیکی انجام شده است. طبق نتایج آنها، نانوسیالات تا غلظت خاصی برای بهبود انتقال حرارت در کاربردهای صنعتی مناسب هستند. با این حال، دسترسی به چنین داده هایی بسیار محدود است.

بررسی مقالات این واقعیت را روشن می‌نماید که مطالعات در زمینه نانوسیال گسترده است، اما نتایج آنها بسیار متناقض است. بنابراین مطالعات بیشتر ضروری به نظر می رسد. از این رو در این پژوهش، مطالعه جامعی در مورد پایداری، خواص ترموفیزیکی و عملکرد حرارتی نانوسیال اکسید آلومینیوم (آلومینا) بر پایه آب انجام شد. دلایل انتخاب نانوذره اکسید آلومینیوم دارا بودن ویژگی‌های مطلوبی مانند قیمت مناسب، امکان کاربردهای متنوع، در دسترس بودن با خلوص بالا، ضریب هدایت حرارتی، مقاومت حرارتی و خوردگی بالا، استحکام و درجه سختی مکانیکی بالا و سازگاری محیط زیستی مطلوب بوده است. ابتدا نانوسیال اکسید آلومینیوم-آب با روش دومرحله‌ای فرموله و تهیه گردید. سپس پایداری پراکندگی آنها توسط دو روش مجزا مورد رصد قرار گرفت. سپس ضریب هدایت حرارتی، ویسکوزیته و دانسیته نانوسیال اندازه گیری شد. اثرات فاکتورهای غلظت و دما بر ضریب هدایت حرارتی و ویسکوزیته به طور جامع مورد بررسی قرار گرفت. روابط جدیدی با دقت پیش بینی بسیار بالا

[1] margin of deviation
[2] Viability
[3] Figure of merits (FOMs)

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

برای تخمین ضریب هدایت حرارتی و ویسکوزیته نانوسیال اکسید آلومینوم-آب پیشنهاد شده است. در نهایت، عملکرد حرارتی نانوسیال‌ها تحت رژیم جریان آرام و آشفته، بر اساس معیارهای ارزیابی مختلف، مورد تجزیه و تحلیل و کاوش قرار گرفته است.

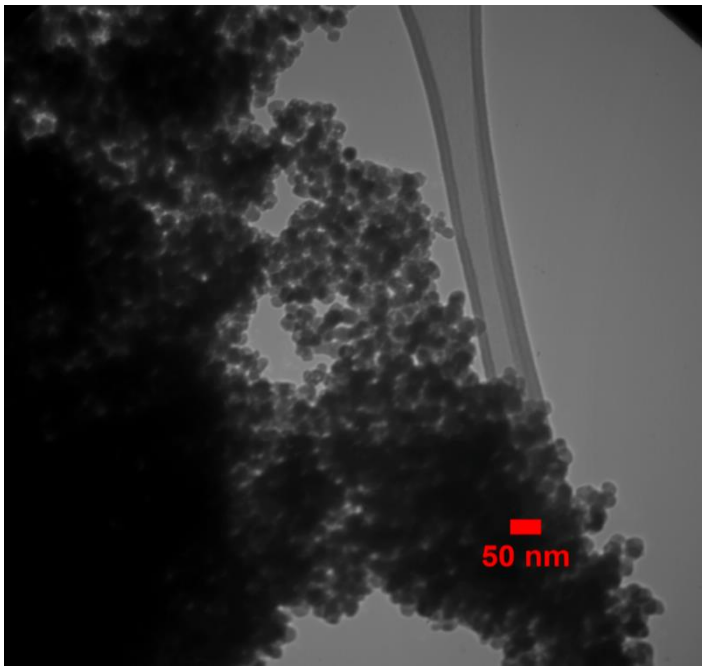
۲. مواد و روش ها

۱،۲ تهیه و پایداری نانوسیال

در این پژوهش از نانوذره اکسید آلومینیوم در سیال پایه آب مقطر استفاده شد. نانوذره از شرکت معتبر (US Research Nanomaterials, Inc.) خریداری گردیده و مشخصات نانوذرات در جدول ۱ نشان داده شده است. شکلهای ۱ و۲ تصاویر SEM و TEM نانوذره را نشان می‌دهد. از این شکل‌ها مشهود است که نانوذرات اکسید آلومینیوم تقریباً کروی و تجمع یافته هستند.

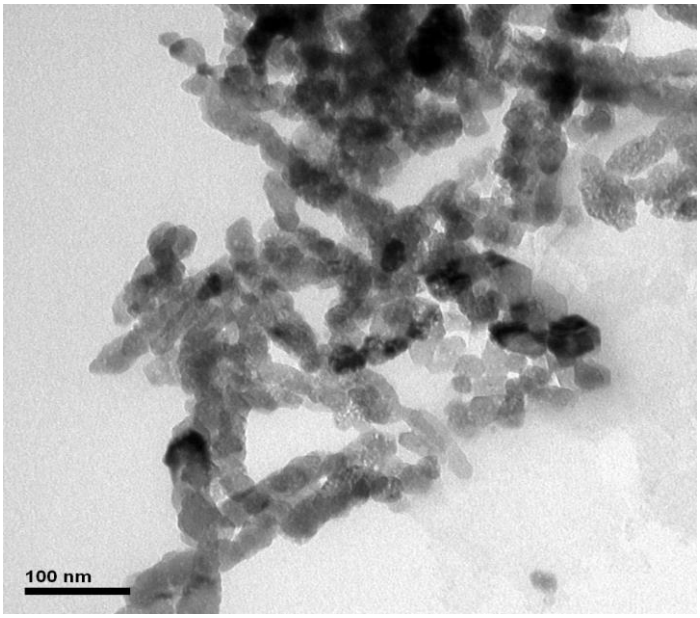
جدول ۱- خواص نانوذرات اکسید آلومینیوم

نانوذره	قطر متوسط ذرات nm	خلوص %	دانسیته Kg/m^3	سطح ویژه m^2/g	ریخت شناسی	فاز
اکسید آلومینیوم	۲۰	+۹۹	۳۸۹۰	>۱۳۸	تقریباً کروی	گاما



شکل ۱ -عکس TEM نانوذرات اکسید آلومینیوم

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]



شکل ۲- عکس SEM نانوذرات اکسید آلومینیوم

تهیه نانوسیال اولین مرحله کلیدی در مطالعات آزمایشگاهی استفاده از نانوذرات در کاربردهای مختلف می‌باشد. در حال حاضر دو روش یک مرحله‌ای و دو مرحله‌ای برای تهیه نانوسیال وجود دارد. از آنجاییکه نانوذرات به صورت تجاری در دسترس می باشد بسیاری از محققان از روش دو مرحله ای برای تهیه نانوسیال استفاده می‌نمایند. در پژوهش حاضر از روش دو مرحله‌ای برای تهیه نانوسیال استفاده شده است. در این روش چالش بزرگ، تهیه نانوسیال پایدار است. در مطالعه حاضر غلظت نانوسیالات (۰۵/، ۰/۵، ۱ و ۲ درصد حجمی) و دما (۳۵،۲۵ و۴۵) درجه سانتیگراد انتخاب گردید. با توجه به اینکه پایداری و قیمت بالای نانوذرات از مهمترین چالش های حال حاضر کاربردی کردن نانو سیالات می‌باشد لذا از غلظتهای نسبتاً کم مذکور برای محدوده غلظت استفاده شد. روش کار بدین صورت است که ابتدا میزان مشخصی از نانوذره در ترازوی دیجیتالی وزن شده (دقت تا چهار رقم اعشار) سپس داخل آب مقطر به عنوان سیال پایه ریخته می‌شود. بعد از یک ساعت عملیات همزدن مغناطیسی، سوسپانسیون‌ها در دستگاه اولتراسونیک با مشخصات (BANDELIN Company– با توان۲۴۰ کیلووات و فرکانس ۳۵ کیلوهرتز) قرار می‌گیرند. این موضوع باید مورد توجه قرار گیرد که به دلیل جلوگیری از تغییرات احتمالی خواص ترموفیزیکی نانوسیال، هیچ گونه ماده افزودنی مانند سورفکتانت یا پراکنده ساز برای تهیه نانوسیال استفاده نشد [۲۵, ۲۶]. برای تهیه نانوسیال اکسید آلومینیوم- آب، مدت زمان استفاده از دستگاه اولتراسونیک ۳ ساعت انتخاب شد. برای رصد پایداری نانوسیالات تهیه شده از روش عکسبرداری مداوم استفاده گردیده است. نتایج حاصل از رصد پایداری نانوسیال مذکور نشان داد که در حالت ایستا حداقل به مدت ۲۴ ساعت پایدار بوده است. روش مذکور در مراجع [۲۷-۳۱] مورد استفاده قرار گرفته است. از آنجاییکه اطلاع از اندازه موثر نانوذرات در طول فاز پراکنده برای درک تجمع نانوذرات مهم است بنابراین، برای مطالعه پدیده‌های خوشه‌بندی و تجمع، از تکنیک پراکندگی نور پویا[1] برای به دست آوردن توزیع اندازه ذرات در نانوسیال با استفاده از (Malvern Zetasizer Nano, Malvern Panalytical, UK) استفاده شد. نمونه های تازه و قدیمی (بعد از ۷ روز) برای به دست آوردن توزیع اندازه ذرات در نمونه های آزمایشی مورد آزمایش و تجزیه و تحلیل قرار گرفتند.

۲,۲ اندازه گیری خواص ترموفیزیکی

[1] Dynamic Light Scattering (DLS)

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

۱،۲،۲ اندازه گیری ضریب هدایت حرارتی

اندازه گیری ضریب هدایت حرارتی نانوسیال در شرایط مختلف آزمایشگاهی با استفاده از تحلیلگر خواص حرارتیKD2 Pro (ساخته شده توسط Decagon Devices, Inc. USA) انجام شده است (شکل ۳). اندازه‌گیری در محدوده ۲-۰/۰۲ W/m.K عمل می‌کند. این دستگاه مجهز به حسگر سوزن از نوع KS-1 است که به طور عمودی و مرکزی در ظرف نانوسیال قرار می‌گیرد. مکانیسم اندازه‌گیری بر اساس روش سیم داغ گذرا است. برای کنترل دمای نمونه در طول اندازه‌گیری ازحمام آب استفاده شده است. فاصله زمانی ۳۰ دقیقه بین اندازه‌گیری های بعدی درنظر گرفته شده است تا اثر افزایش دما در مجاورت کاوشگر به دلیل گرمای گذرا از بین برود. بنابراین نتایج به دست آمده ثابت و قابل تکرار هستند. میانگین سه اندازه‌گیری ضریب هدایت حرارتی برا ی هر نمونه در نظر گرفته شده است تا از دقت و سازگاری نتایج اطمینان حاصل شود.



شکل۳ - دستگاه آنالیزور حرارتیKD2-pro

۲،۲،۲ اندازه گیری دانسیته و ویسکوزیته نانوسیال

برای اندازه‌گیری ویسکوزیته دینامیکی، دانسیته و ویسکوزیته سینماتیکی در دماهای مختلف از دستگاه ویسکومتر مدل (SVM ™ 3000,AUSTRIA) استفاده شد. این دستگاه اندازه‌گیری را تنها با استفاده از ۲/۵ میلی لیتر نمونه انجام می‌دهد. هر آزمایش وی سکوزیته و دان سیته سه بار تکرار شده و تکرارپذیری اندازه‌گیری وی سکوزیته (mm^2/s) ۰/۰۰۱± و تکرارپذیری اندازه‌گیری دانسیته (g/cm^3) ۰/۰۰۰۲ ± توسط شرکت سازنده گزارش شده است.

۲،۳ عدم قطعیت

به منظور حذف خطای تجربی و بررسی تکرارپذیری، هر اندازه گیری۳ بار در شرایط یکسان تکرار شد. میانگین اندازه‌گیری‌ها به عنوان نتایج نهایی ارائه گردید. عدم قطعیت در اندازه‌گیری ضریب هدایت حرارتی، ویسکوزیته و دانسیته بر اساس صحت[1] ابزارهای استفاده شده (جدول ۲) تخمین زده شد. عدم قطعیت در ضریب هدایت حرارتی، ویسکوزیته و دانسیته نانوسیال با استفاده از روابط ۱، ۲ و ۳ محاسبه شدند [۳۲]:

[1] Accuracy

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

$$U_{knf} = \pm\sqrt{\left(\frac{\Delta k_{nf}}{k_{nf}}\right)^2 + \left(\frac{\Delta w}{w}\right)^2 + \left(\frac{\Delta T}{T}\right)^2} \quad (۱)$$

$$U_{\mu nf} = \pm\sqrt{\left(\frac{\Delta \mu_{nf}}{\mu_{nf}}\right)^2 + \left(\frac{\Delta w}{w}\right)^2 + \left(\frac{\Delta T}{T}\right)^2} \quad (۲)$$

$$U_{\rho nf} = \pm\sqrt{\left(\frac{\Delta \rho_{nf}}{\rho_{nf}}\right)^2 + \left(\frac{\Delta w}{w}\right)^2 + \left(\frac{\Delta T}{T}\right)^2} \quad (۳)$$

که U نشان‌دهنده عدم قطعیت در اندازه‌گیری است؛ w نشان‌دهنده وزن نانوذرات، T نشان دهنده دما و Δ خطا در اندازه‌گیری را نشان می‌دهد. حداکثر میزان عدم قطعیت در اندازه گیری ضریب هدایت حرارتی، ویسکوزیته و دانسیته به ترتیب برابر با ۱/۸٪، ۱/۹٪ و ۰/۸٪ محاسبه شد.

جدول ۲- میزان صحت تجهیزات استفاده شده

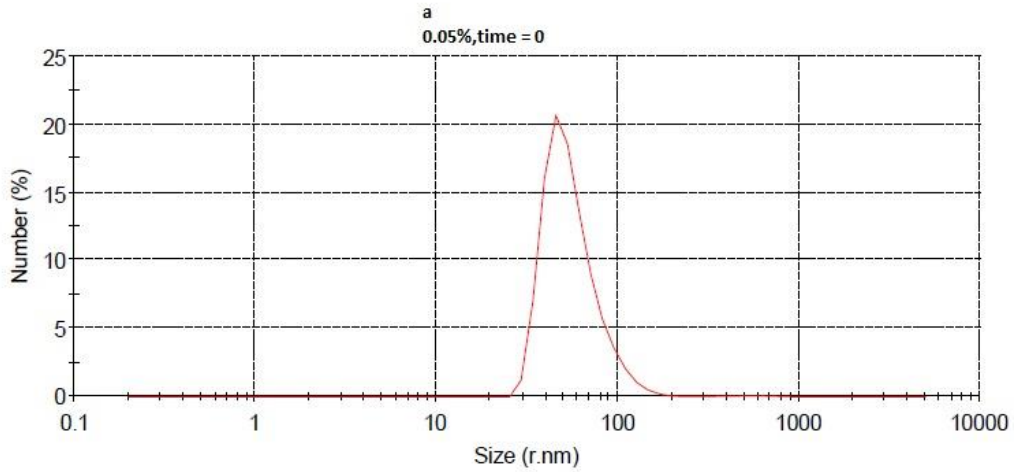
ابزار	صحت
ترازو	± ۰/۰۰۰۱
حمام اولتراسونیک	۳± kHz
دستگاه ضریب هدایت حرارتی	± ۰/۰۱ W/m.K
حمام آب گرم	± ۰/ °۱C

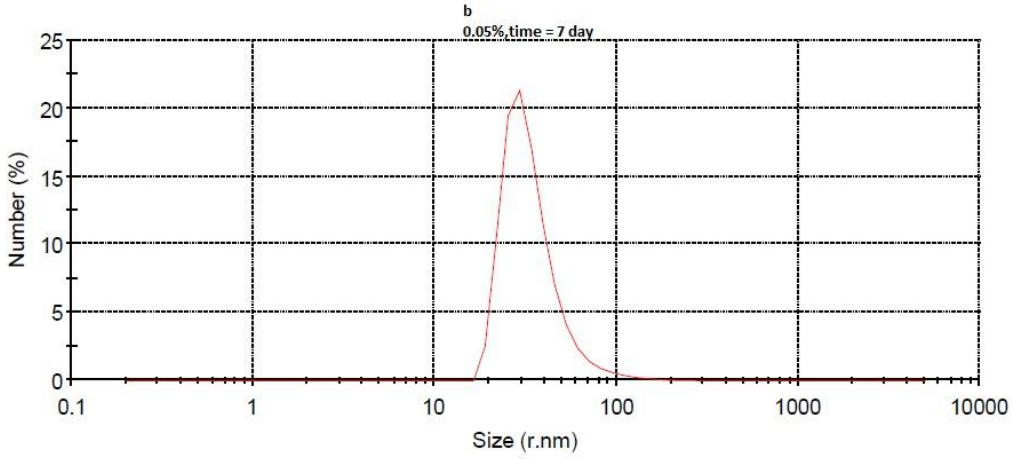
۳ نتایج و بحث

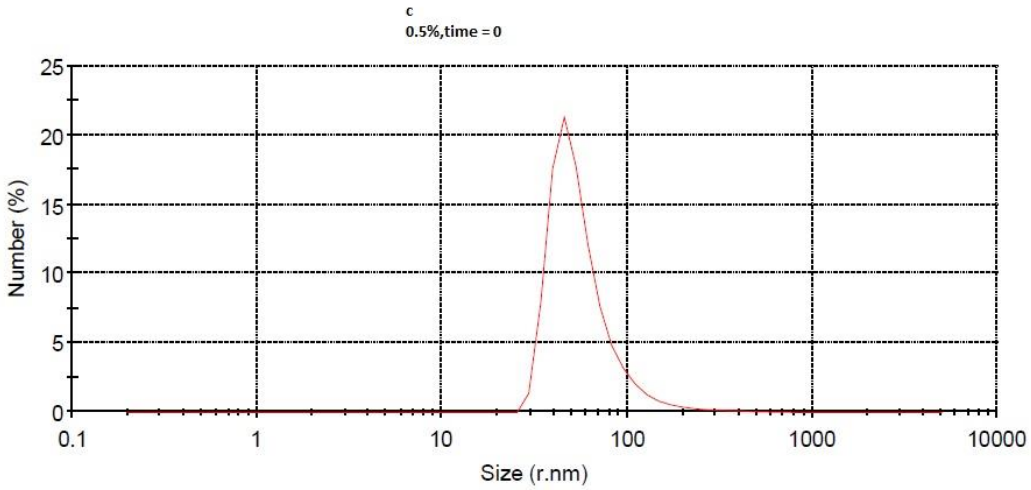
۱،۳ رصد پایداری نانوسیال با روش پراکندگی نور پویا

توزیع اندازه نانوذرات در یک فاز پراکنده توسط پراکندگی نور پویا (DLS) شناسایی می شود. شکل ۴ توزیع اندازه ذرات را برای غلظتهای ۰/۰۵، ۰/۵، ۱ و ۲ درصد حجمی در دو زمان متفاوت شامل بلافاصله پس از آماده سازی نانوسیال (نمونه تازه) و بعد از ۷ روز حالت ایستا (نمونه قدیمی) نشان می‌دهد. همچنین در جدول۳ متوسط اندازه نانوذرات در غلظتهای مختلف را بلافاصله پس از آماده سازی نانوسیال و بعد از گذشت ۷ روز نشان می دهد. نتایج نشان می‌دهد که متوسط اندازه ذرات بدست آمده از پراکندگی نور پویا بزرگتر از اندازه بدست آمده از عکس TEM است چون پراکندگی نور پویا قطر هیدرودینامیکی نانوذرات را نشان می دهد. شکل۴ همچنین قله های تقریباً مشابه و نزدیک را در تمامی نمونه ها نشان می‌دهد که نشان دهنده همگنی و پایداری پراکندگی خوب است. همچنین نتایج نشان می دهد که نانوسیال با کسر حجمی بالاتر دارای ذراتی با قطر متوسط بزرگتری است زیرا تجمع نانوذرات با افزایش غلظت نانوذرات در سیال پایه بیشتر می گردد. علاوه بر این نتایج نشان می دهد نانوسیالات تازه تهیه شده در غلظتهای مختلف دارای متوسط قطر نانوذرات بیشتری نسبت به نانوسیالات بعد از ۷ روز هستند. چنین پدیده ای به این واقعیت مربوط می شود که ذرات تجمع یافته بزرگتر، ته نشین می شوند و این موضوع باعث شناسایی راحت ذرات کوچکتر توسط پراکندگی نور پویا می گردند [۱۹, ۳۳]. یافته های مذکور در تطابق با نتایج مطالعات [۱۹, ۲۲, ۳۴] است.

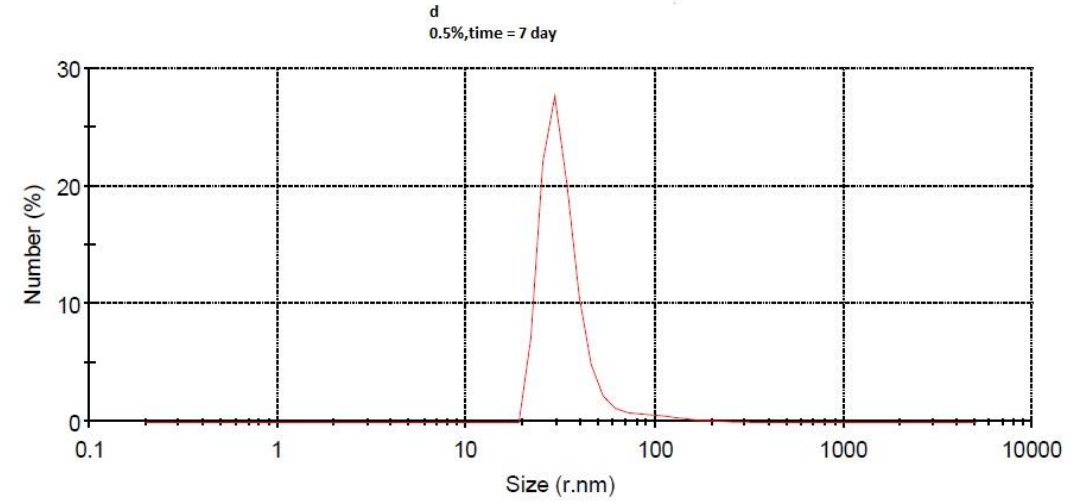
[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

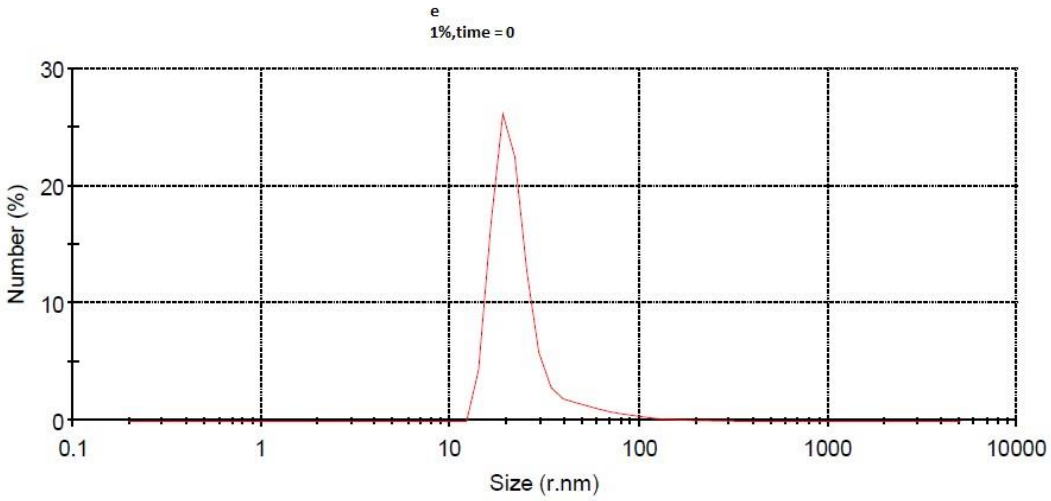


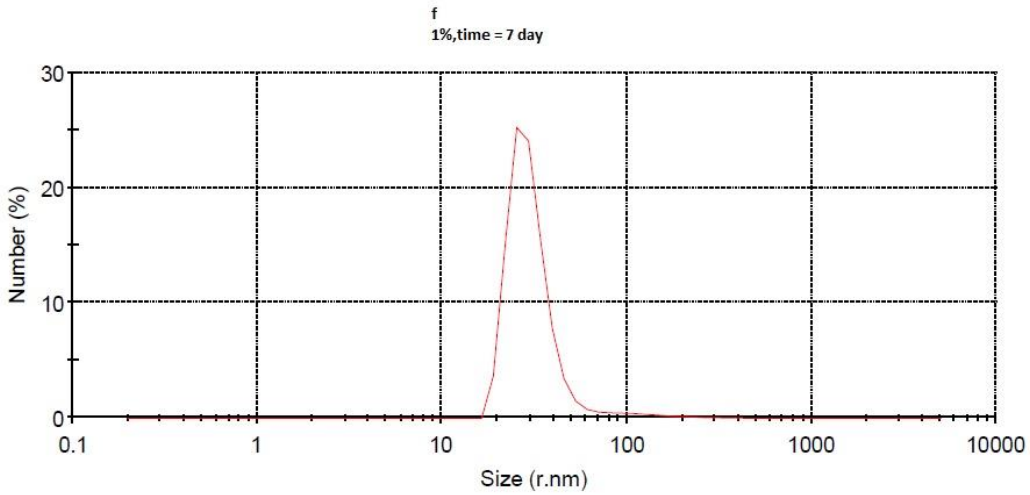




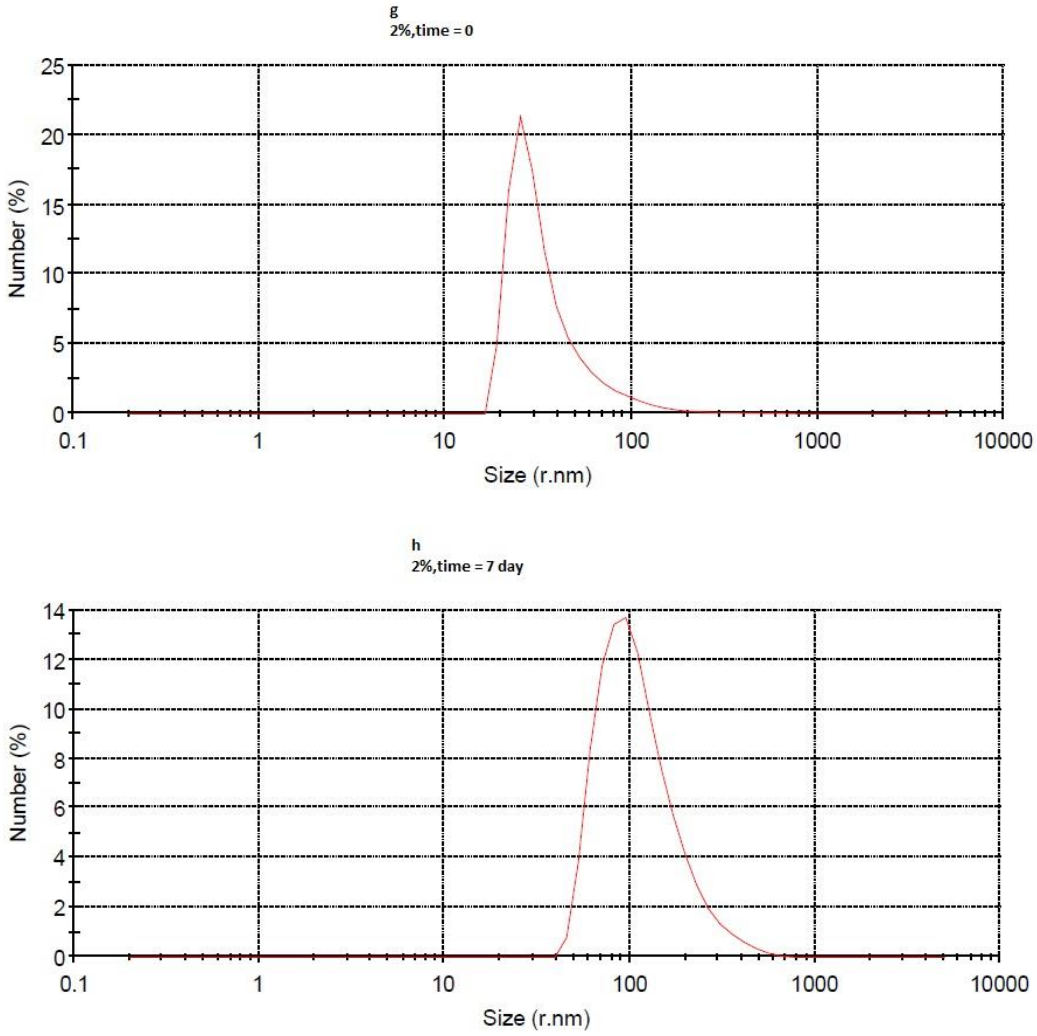
[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]







[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]



شکل ۴- تحلیل پراکندگی نوری پویا نانوسیال اکسید آلومینیوم-آب در غلظتهای ۰/۰۵، ۰/۵، ۱ و ۲ درصد حجمی در دو زمان شامل بلافاصله بعد از تهیه و ۷ روز بعد

جدول ۳ - متوسط قطر نانوذرات در زمانهای مختلف بدست آمده از پراکندگی نور پویا

غلظت (کسر حجمی)	قطر نانوذرات (نانومتر)	
	بلافاصله بعد از تهیه نانوسیال	بعد از گذشت ۷ روز
٪ ۰/۰۵	۱۳۴	۹۰
٪ ۰/۵	۱۶۱	۱۲۹
۱٪	۱۶۹	۱۴۷
۲٪	۲۱۸	۱۹۷

۲،۳ اعتبارسنجی سامانه ها

به منظور بررسی اعتبار سامانه‌های آزمایشگاهی، مقادیر اندازه‌گیری شده ضریب هدایت حرارتی و ویسکوزیته آب مقطر با داده‌های NIST [۳۵] در محدوده دمایی ۲۵ تا ۴۵ درجه سانتی‌گراد در فواصل دمایی ۱۰ درجه سانتی‌گراد مقایسه شد.

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

حداکثر انحراف در اندازه‌گیری ضریب هدایت حرارتی و ویسکوزیته کمتر از ۳ ٪ بدست آمد. انحراف کوچک بین داده های تجربی و استاندارد، صحت و اعتبار اندازه گیری‌ها را ثابت می‌نماید.

۳,۳ ضریب هدایت حرارتی نانوسیال

در این بخش، نتایج اندازه‌گیری ضریب هدایت حرارتی نانوسیال در فاکتورها و سطوح مختلف مورد بحث قرار گرفت. میزان افزایش ضریب هدایت حرارتی نانوسیال نسبت به سیال پایه به عنوان پارامتر نسبت ضریب هدایت حرارتی[1] (k_r) ارائه شده است که با استفاده از معادله ۴ محاسبه می گردد:

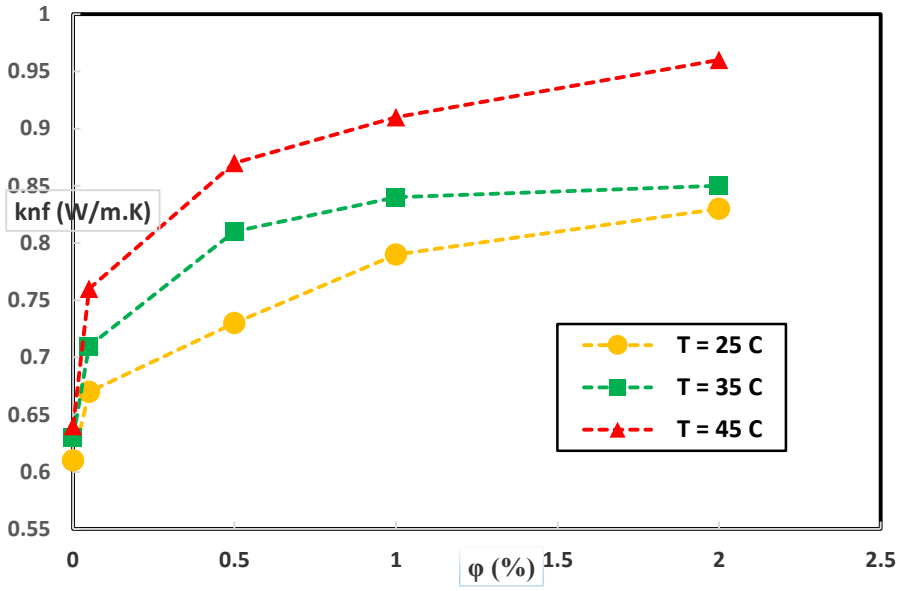
$$k_r = \frac{k_{nf}}{k_{bf}} \quad (۴)$$

۱,۳,۳ اثر غلظت

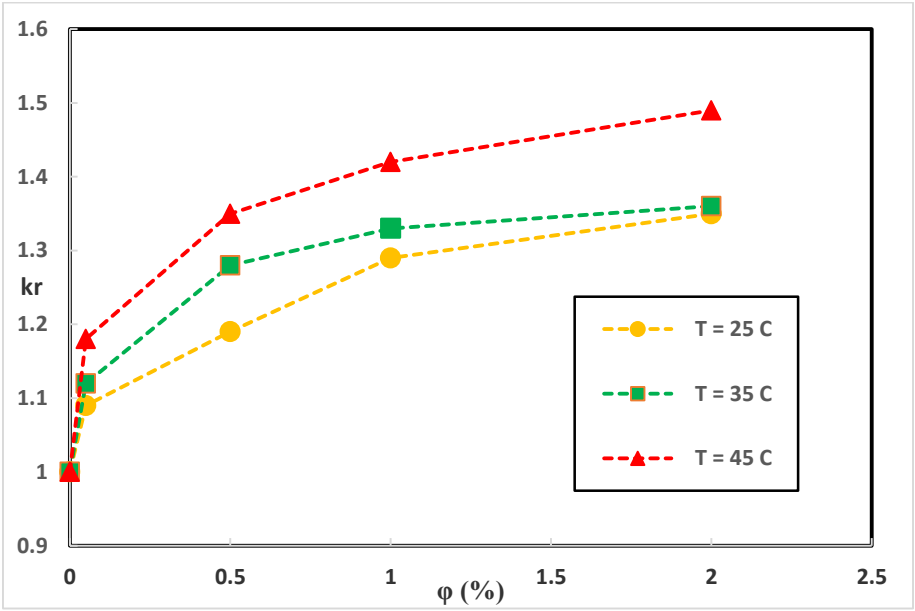
اثر کسر حجمی نانوذرات بر ضریب هدایت حرارتی نانوسیال اکسید آلومینیوم - آب در شکل ۵ ارائه شده است. همانطور که شکل مذکور نشان می‌دهد یک افزایش غیر خطی در بهبود ضریب هدایت حرارتی وجود دارد. ضریب هدایت حرارتی نانوسیال مقادیری در دامنه ۰/۶۷ W/m.K الی ۰/۹۶ W/m.K را در بازه غلظتی ۰/۰۵ تا ۲ درصد حجمی و بازه دمایی ۲۵ تا ۴۵ درجه سانتیگراد دارد. بیشترین مقدار ضریب هدایت حرارتی برابر ۰/۹۶ W/m.K در غلظت ۲ درصد حجمی بدست آمد. شکل ۶ تغییرات نسبت ضریب هدایت حرارتی(k_r) به کسر حجمی نانوذرات را نشان می‌دهد. مقدار نسبت ضریب هدایت حرارتی بین ۱/۰۹ الی ۱/۴۹ متغیر است که نشان‌دهنده افزایش ضریب هدایت حرارتی تمامی نانوسیالات نسبت به آب است. اکثر مطالعات قبلی گزارش کرده اند که ضریب هدایت حرارتی نانوسیالات کاملاً پایدار شده به صورت خطی با افزایش غلظت افزایش می یابد[۳۶]. افزایش غیر خطی در ضریب هدایت حرارتی نشان می‌دهد که احتمالاً پدیده خوشه بندی[2] در نمونه های نانوسیال به دلیل عدم وجود سورفکتانت ها وجود دارد[۳۷]. همچنین رفتار غیر خطی افزایش ضریب هدایت حرارتی نانوسیالات می‌تواند به تأثیر پارامترهای دیگر مانند سینتیک تجمع، برهمکنش ذرات، و لایه بندی مایع[3] مرتبط باشد [۱۹, ۳۸]. به جز تجمع، افزایش غلظت همیشه نقش فعالی در افزایش ضریب هدایت حرارتی دارد. با این حال، با توجه به مطالعه لیو و همکاران[۳۹]، خوشه‌بندی یا تجمع در نانوسیال مقاومت حرارتی سطحی بین نانوذرات و سیالات پایه را تضعیف نموده و مسیر انتقال حرارت سریع‌تری را فراهم می‌کند که منجر به افزایش ضریب هدایت حرارتی می‌شود. همچنین روند فعلی بهبود ضریب هدایت حرارتی می‌تواند به پدیده هایی مانند حرکت براونی[4]، ترموفورز[5] و میکروهمرفت مرتبط شود [۴۰-۴۲]. این پدیده‌ها با افزایش کسر حجمی و افزایش دما به دلیل بیشتر شدن فعل و افعلات ذرات افزایش می یابند. علاوه بر این، پراکندگی نانوذرات اکسید آلومینیوم بسیار رسانا در سیال پایه کمتر رسانا نیز به افزایش ضریب هدایت حرارتی در نانوسیال اکسید آلومینیوم-آب کمک می‌نماید.

[1] Thermal conductivity ratio
[2] Clustering
3 Liquid layering
[4] Brownian motion
[5] Thermophoresis

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]



شکل ۵. اثر کسر حجمی بر ضریب هدایت حرارتی نانوسیال اکسید آلومینیوم – آب



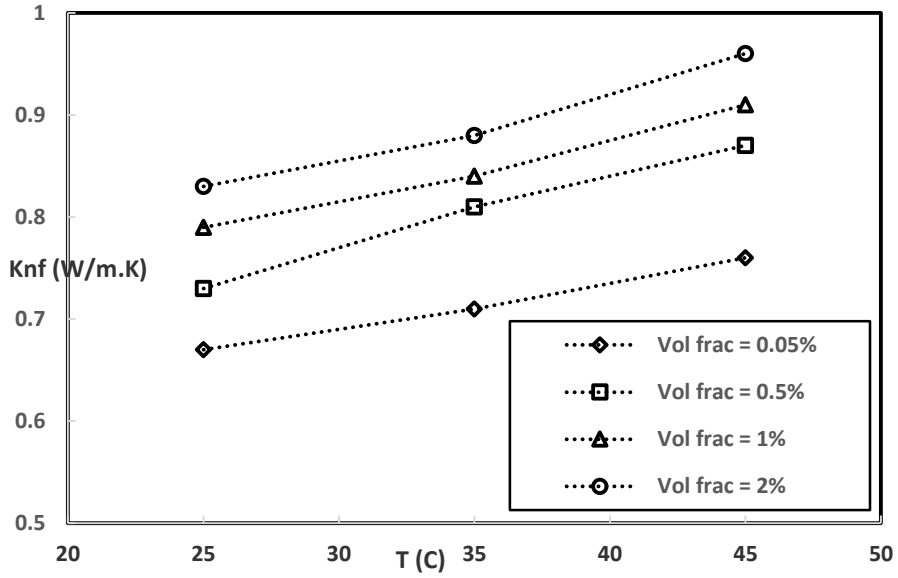
شکل ۶. اثر کسر حجمی بر نسبت ضریب هدایت حرارتی نانوسیال اکسید آلومینیوم – آب

۲،۳،۳ اثر دما

دما یکی از پارامترهای مهمی است که بر ضریب هدایت حرارتی نانوسیال تأثیر می گذارد. مطالعات پیشین نشان داده است که ضریب هدایت حرارتی نانوسیالات با دما افزایش می یابد [۴۳-۴۵]. در تطابق با مطالعات پیشین، شکل ۷ نشان می‌دهد که ضریب هدایت حرارتی نانوسیال در محدوده دمایی ۲۵ تا ۴۵ درجه سانتی گراد وقتی کسرحجمی از ۰/۰۵ ٪ تا ۲٪ تغییر می نماید، افزایش یافته است. بهبود ضریب هدایت حرارتی می‌تواند به اثرات نفوذ و میکروهمرفت که توسط حرکت براونی کنترل می شود، نسبت داده شود [۴۶, ۴۷]. بهبود بیشتر ضریب هدایت حرارتی به افزایش تحرک نانوذرات و کاهش مقاومت حرارتی

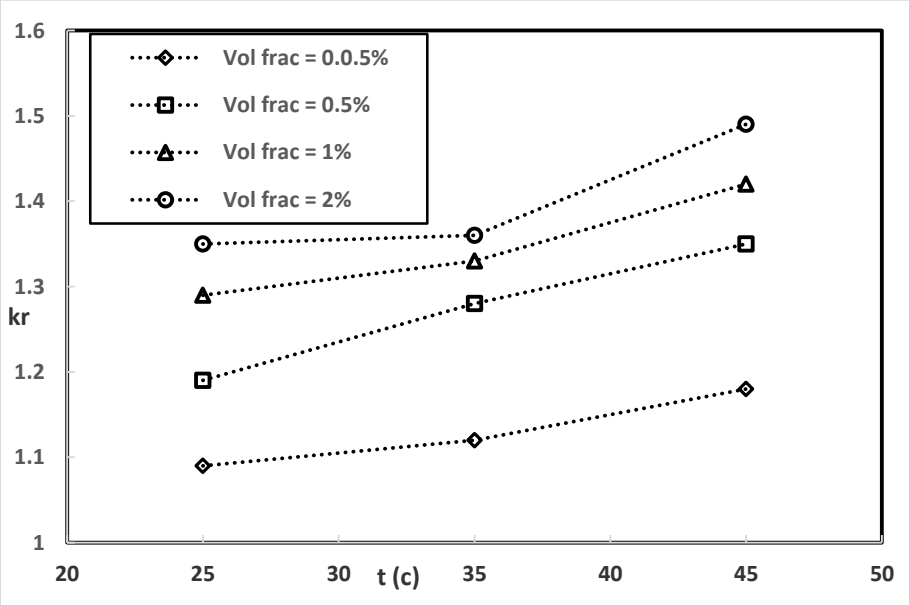
[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

سطحی بین نانوذره و سیال پایه در دماهای بیشتر مرتبط است [۴۸]. به علاوه، افزایش ضریب هدایت حرارتی سیال پایه با افزایش دما می تواند به افزایش ضریب هدایت حرارتی در نانوسیال اکسید آلومینیوم-آب کمک کند.



شکل ۷. تاثیر دما بر ضریب هدایت حرارتی نانوسیال اکسید آلومینیوم – آب

تغییرات نسبت ضریب هدایت حرارتی در محدوده دمایی مشابه در شکل ۸ نشان داده شده است. مقادیر نسبت ضریب هدایت حرارتی نانوسیال با افزایش دما رفتار غیرخطی دارد. روند غیر خطی نسبت ضریب هدایت حرارتی با دما نشان دهنده وجود مکانیسم انتقال حرارت در مقیاس نانو در نانوسیالات است که در سیال پایه اصلاً وجود ندارد.



شکل ۸. تاثیر دما بر نسبت ضریب هدایت حرارتی نانوسیال اکسید آلومینیوم – آب

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

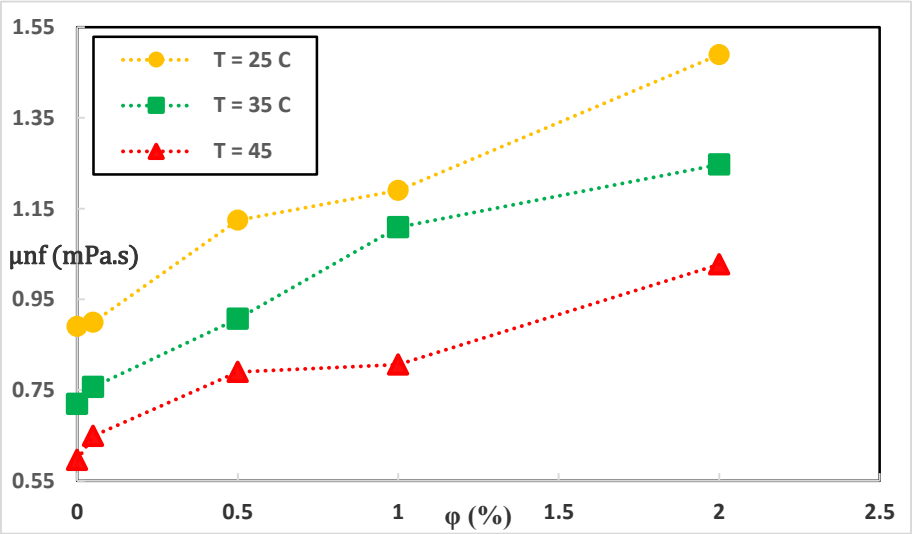
۴,۳ ویسکوزیته نانوسیالات

نتایج اندازه‌گیری ویسکوزیته نانوسیال اکسید آلومینیوم –آب و رفتار آن تحت تأثیر کسر حجمی و دما در بخش های زیر ارائه شده است. افزایش ویسکوزیته نانوسیالات به صورت پارامتر نسبت ویسکوزیته (μ_r) نعریف شده که با استفاده از معادله ۵ محاسبه می‌شود:

$$\mu_r = \frac{\mu_{nf}}{\mu_{bf}} \qquad (۵)$$

۱,۴,۳ اثر غلظت

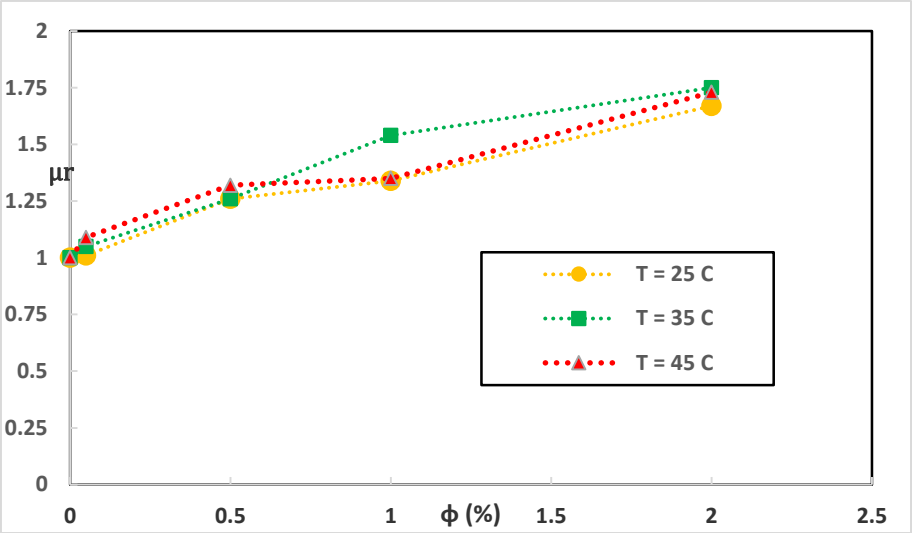
شکل ۹ اثر کسر حجمی را بر ویسکوزیته نانوسیال در دماهای بین ۲۵ درجه سانتیگراد تا ۴۵درجه سانتیگراد نشان می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد که ویسکوزیته نانوسیال به صورت غیر خطی با افزایش کسرهای حجمی افزایش می‌یابد. به عنوان مثال، در دمای ۲۵ درجه سانتی گراد، ویسکوزیته نانوسیال از ۰/۸۹۹ mPa·s به۱/۴۸۹۲ mPa·s افزایش می یابد وقت که غلظت از ۰/۰۵ درصد به ۲ درصد تغییر یافت. دلیل افزایش ویسکوزیته را می توان به افزایش تعداد ذرات پراکنده شده که برهمکنش ذرات را توسعه داده که این موضوع باعث افزایش تنش برشی در نانوسیال گردیده، مرتبط دانست. افزایش ویسکوزیته همچنین به تجمع ذرات یا خوشه‌بندی در نانوسیالات مربوط می‌شود[۴۹]. پدیده خوشه‌بندی با افزایش کسر حجمی نانوذرات افزایش می‌یابد. بنابراین، ویسکوزیته نانوسیال‌ها با افزایش کسر حجمی افزایش یافته است.



شکل ۹. تاثیر کسر حجمی بر ویسکوزیته نانوسیال اکسید آلومینیم-آب

مقادیر نسبت ویسکوزیته نانوسیالات بر اساس کسر حجمی در شکل ۱۰ ارائه شده است. مقادیر نسبت ویسکوزیته نانوسیال‌ها با افزایش کسر حجمی در محدوده دمایی مطالعاتی تقریباً به صورت خطی تغییر می‌کند. هر چند که مقادیر نسبت ویسکوزیته تمام نمونه‌های نانوسیال در محدوده دمایی فعلی از تغییرات بسیار کمی برخوردار بوده بطوریکه شاید بتوان با خطایی قابل قبول گفت که تقریباً یکسان است. چنین رفتاری به این واقعیت مربوط می شود که در غلظتهای کم (۰/۰۵٪ تا ۲٪) ، دما اثر چندانی بر افزایش ویسکوزیته نداشته و می توان آن را تقریباً قابل چشم پوشی دانست.

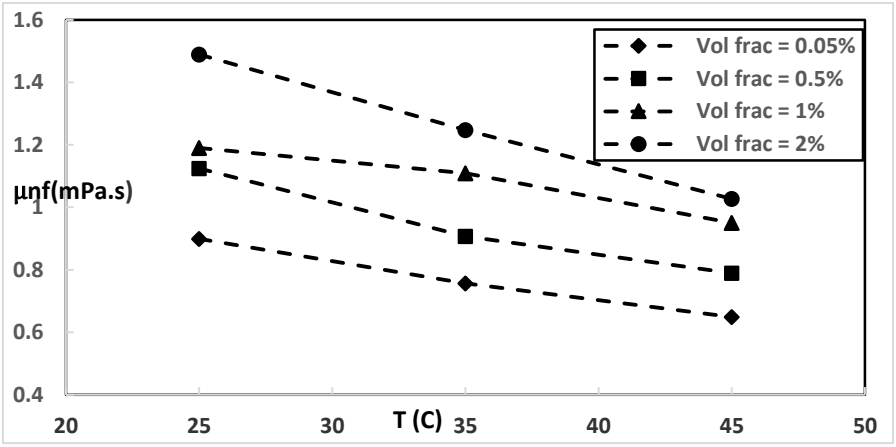
[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]



شکل ۱۰. تاثیر کسر حجمی بر نسبت ویسکوزیته نانوسیال اکسید آلومینیم-آب

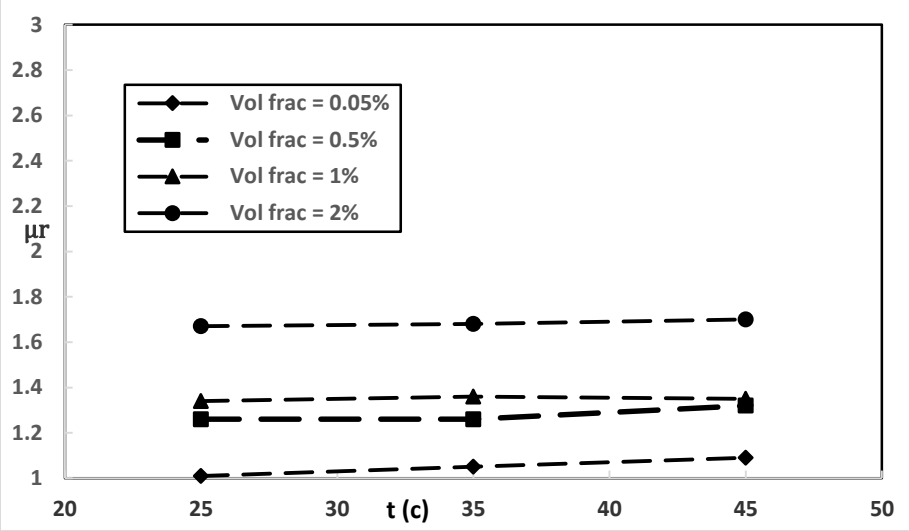
۲،۴،۳ اثر دما

مطالعات پیشین روند کاهشی ویسکوزیته با افزایش دما را نشان می دهند[۵۰-۵۳]. افزایش دما نیروی جاذبه واندروالسی در بین ذرات پراکنده در سیال پایه را تضعیف کرده که این موضوع منجر به کاهش ویسکوزیته می‌شود در پژوهش حاضر، ویسکوزیته نانوسیال روند کاهشی مورد انتظاری را با افزایش دما نشان داد که در در شکل ۱۱ قابل مشاهده است. بطور مثال در غلظت ۲ درصد حجمی نانوسیال، وقتی دما از ۲۵ درجه سانتیگراد تا ۴۵ درجه سانتیگراد افزایش می یابد ویسکوزیته از مقدار ۱/۴۸۹۲ mPa·s به ۱/۰۲۷۳ mPa·s کاهش یافته که معادل ۳۱ درصد کاهش است. تشدید حرکت براونی نانوذرات با افزایش دما، زمان برهمکنش ذرات را کاهش می‌دهد و همچنین فاصله بین ذرات را به دلیل افزایش انرژی افزایش می‌دهد، از این رو ویسکوزیته کاهش می یابد. چنین کاهشی در ویسکوزیته نانوسیالات همچنین به کاهش ویسکوزیته سیال پایه در دمای بالاتر هم مرتبط است. کاهش ویسکوزیته در دماهای بالاتر برای کاهش افزایش توان پمپاژ در کاربردهای حرارتی و صنعتی مختلف مناسب است. اثر دما بر روی پارامتر نسبت ویسکوزیته در شکل ۱۲ ارائه شده است. همانطور که در شکل ۱۲ نشان داده شده است، تغییرات پارامتر نسبت ویسکوزیته بطور جالبی تقریباً مستقل از دما است که در تطابق با نتایج [۱۹, ۵۴-۵۸] است.



شکل ۱۱ . تاثیر دما بر ویسکوزیته نانوسیال اکسید آلومینیوم-آب

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]



شکل۱۲. تاثیر دما بر نسبت ویسکوزیته نانوسیال اکسید آلومینیم-آب

۵,۳ مقایسه با مدلهای کلاسیک

در این بخش مقایسه مقادیر تجربی ضریب هدایت حرارتی و ویسکوزیته با داده‌های پیش‌بینی شده توسط مدل‌های کلاسیک ارائه شده است. مقایسه‌ها در نهایت منجر به ارائه روابطی جدید برای پیش‌بینی ضریب هدایت حرارتی و ویسکوزیته نانوسیالات اکسید آلومینیوم –آب گردید.

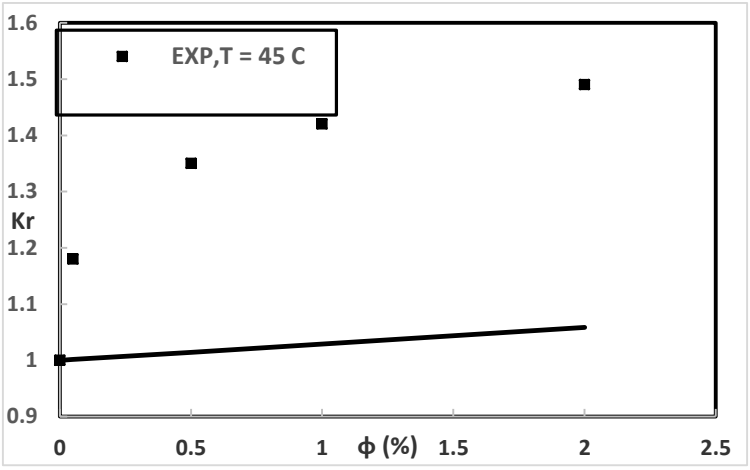
۱,۵,۳ مقایسه ضریب هدایت حرارتی

مقادیر نسبت ضریب هدایت حرارتی تجربی نانوسیال اکسید آلومینیوم –آب با مقادیر پیش‌بینی‌شده توسط مدلهای کلاسیک از جمله مدل Wasp [۵۹] ،که فرم آن در معادله ۶ آمده است، مقایسه شد. شکل ۱۳ این مقایسه را نشان می‌دهد. از شکل مذکور مشهود ا ست که مدل کلاسیک Wasp در پیش بینی ضریب هدایت حرارتی نانوسیال ناتوان است. ناسازگاری بین داده‌های تجربی و داده‌های پیش‌بینی‌شده توسط مدل‌های کلاسیک به این دلیل رخ می‌دهد که مدل‌های کلاسیک پدیده‌های مقیاس نانو را، مانند حرکت براونی، لایه‌بندی مایع، ریخت شناسی ذرات[1]، و پدیده‌های بین سطحی[2]، که تا حد زیادی بر هدایت حرارتی نانوسیال‌ها تأثیر می‌گذارند در نظر نمی‌گیرند [۶۰].

$$\frac{k_{nf}}{k_f} = \frac{k_p+2k_f-2\Phi(k_f-k_p)}{k_p+2k_f+\Phi(k_f-k_p)} \qquad (۶)$$

[1] Particle morphology
[2] Interfacial phenomena

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]



شکل ۱۳. مقایسه ضریب هدایت حرارتی تجربی نانوسیال با نتایج پیش‌بینی شده از مدل کلاسیک

۲،۵،۳ مقایسه ویسکوزیته

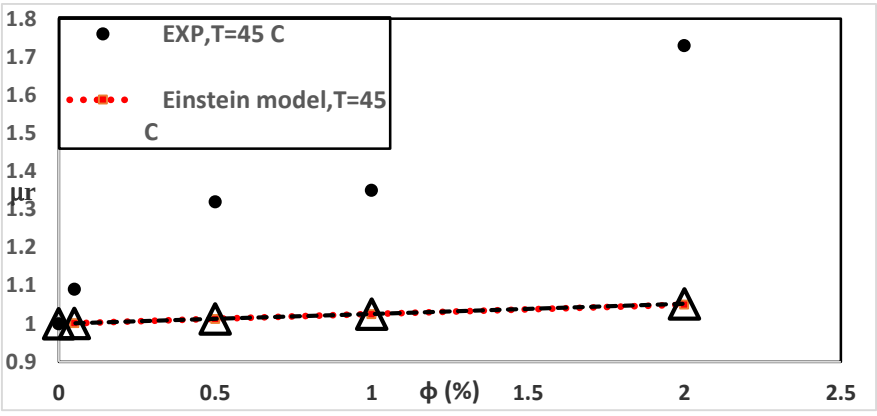
تاکنون مدل های متعددی برای پیش بینی ویسکوزیته نانوسیالات مختلف پیشنهاد شده است. در میان این مدل‌ها، انیشتین[۶۱] اولین بار معادله ۷ را برای پیش‌بینی ویسکوزیته سوسپانسیون کلوئیدی بدون برهمکنش، در غلظتهای کسر حجمی بسیار کم پیشنهاد کرد:

$$\frac{\mu_{nf}}{\mu_{bf}} = (1 + 2.5\varphi) \qquad (۷)$$

بعدها، بچلر[۶۲] مدل انیشتین را با ترکیب اثر حرکت براونی و با در نظر گرفتن تعلیق همسانگرد ذرات سخت کروی توسعه داد و معادله ۸ را پیشنهاد نمود:

$$\frac{\mu_{nf}}{\mu_{bf}} = (1 + 2.5\varphi + 6.2\varphi^2) \qquad (۸)$$

مقادیر تجربی نسبت ویسکوزیته نانوسیال با نتایج پیش‌بینی به‌دست‌آمده توسط مدل های انیشتین و بتچلر در شکل ۱۴ مقایسه شد. انحراف گسترده در اندازه‌گیری ویسکوزیته بین داده‌های تجربی و پیش‌بینی‌شده مشهود است، که نشان می‌دهد مدل‌های کلاسیک نمی توانند ویسکوزیته نانوسیال ها را پیش بینی کنند زیرا آنها پدیده های نانومقیاس،که در پراکندگی جامد-مایع رخ می دهد، را در نظر نمی گیرند[۶۳].



شکل ۱۴ . مقایسه ویسکوزیته داده‌های تجربی با نتایج پیش‌بینی شده از مدل‌های کلاسیک

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

۶,۳ پیشنهاد روابط

همانطور که بحث شد، مدل‌های کلاسیک پیش‌بینی دقیقی از ضریب هدایت حرارتی و ویسکوزیته نانوسیالات ارائه نمی-نمایند. بنابراین، روابط جدیدی مورد نیاز است. از این رو با استفاده از نتایج تجربی بدست آمده و با روش برازش منحنی[1]، روابط جدیدی پیشنهاد گردید. معادلات پیشنهادی برای پیش بینی نسبت ضریب هدایت حرارتی و نسبت ویسکوزیته نانوسیال به ترتیب در معادلات ۹ و ۱۰ ارائه شده است:

$$\frac{Knf}{Kbf} = [a1(T)^2 + a2(T)] + [\,\mathrm{b1}(\varphi^2) + \mathrm{b2}(\varphi)] + [c(T)(\varphi)] + \mathrm{d} \qquad (۹)$$

$$\frac{\mu nf}{\mu bf} = a(\Phi) + b(T) + \mathrm{c} \qquad (۱۰)$$

(نسخه ۱۰) ضرایب مجهول همبستگی معادلات ۹ و۱۰ برای پیش بینی نسبت Design-Expertبا استفاده از نرم افزار ضریب هدایت حرارتی و نسبت ویسکوزیته نانوسیال اکسید آلومینیوم-آب بر اساس داده‌های تجربی بدست آمد. نتایج تحلیل آماری انجام شده برای بدست آوردن ضرایب همبستگی به ترتیب در جداول شماره ۴و۵ نشان داده شده‌است. معادلات ۹ و۱۰ برای دامنه دمایی بین ۲۵ تا ۴۵ درجه سانتیگراد و دامنه غلظتی بین ۰/۰۵ تا ۲ درصد حجمی معتبر می‌باشند.

جدول ۴. ضرایب همبستگی برای مدلسازی ضریب هدایت حرارتی

ضرایب	مقادیر
$a1$	۲/۲۵×۱۰$^{-۴}$
$a2$	– ۹/۹۴۶۷×۱۰$^{-۳}$
b1	–۰/۰۹۶۷۹
b2	۰/۳۰۶۱۶
c	۷/۸۵۰۱۳×۱۰$^{-۴}$
d	۱/۱۷۶۰۱
R^2	۰/۹۸
MSE	۵/۷۶×۱۰$^{-۴}$
AARD,%	۰/۰۱۷
Max Deviation, %	۲/۶۵

جدول ۵. ضرایب همبستگی برای مدلسازی ویسکوزیته

ضرایب	مقادیر
a	۰/۳۰۸۸۷
b	۰/۰۰۲۲۵
c	۰/۹۸۷۹۶
R^2	۰/۹۷
MSE	۱/۹۳۶×۱۰$^{-۳}$
AARD,%	۰/۰۸۶
Maximum deviation, %	۵/۹

[1] Curve fitting

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

پارامترهای همبستگی از جمله R^2 [۱](ضریب همبستگی)، خطای نسبی متوسط مطلق[۲]، خطای میانگین مربعات[۳] [۱۹] توسط معادلات۱۳-۱۱ محاسبه شده اند:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_i \left(P_{iexp} - P_{ipred}\right)^2}{\sum_i \left(\bar{P} - P_{iexp}\right)^2} \quad (۱۱)$$

$$AARD\% = \frac{100}{n} \sum_i \frac{\left|P_{iexp} - P_{ipred}\right|}{P_{iexp}} \quad (۱۲)$$

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_i \left(\left|P_{iexp} - P_{ipred}\right|\right)^2 \quad (۱۳)$$

که P نشان دهنده پارامتر اندازه‌گیری شده (ضریب هدایت حرارتی و ویسکوزیته)، n تعداد داده های تجربی و زیرنویس های pred و exp به ترتیب نشان دهنده داده‌های پیش‌بینی شده و تجربی می‌باشند. در جداول۴ و ۵، ضرایب همبستگی برای پیش بینی نسبت ضریب هدایت حرارتی و نسبت ویسکوزیته بسیار نزدیک به ۱ و مقادیر AARD و MSE نیز بسیار پایین هستند. بنابراین می‌توان گفت که معادلات پیشنهادی از قابلیت پیش بینی خوبی برخوردار می باشند.

۴. آنالیز انتقال حرارت و توان پمپاژ

در بخش قبل، ضریب هدایت حرارتی و ویسکوزیته نانوسیال اکسید آلومینیوم-آب به طور جامع مورد بررسی قرار گرفت. با آگاهی از این دو خاصیت ترموفیزیکی مهم، می توان عملکرد انتقال حرارتی نانوسیال را تحلیل کرد. نسبت افزایش خواص[۴] (PER)[۶۴] و عدد مورمتسف[۵] (Mo) [۲۴] دو معیار ارزیابی هستند که بر اساس آنها می توان سودمند بودن استفاده از نانوسیال را ارزیابی نمود. نتایج مطالعات دقیق در مورد این دو معیار در بخش‌های بعدی مورد بحث قرار گرفته است.

۴,۱ نسب افزایش خواص

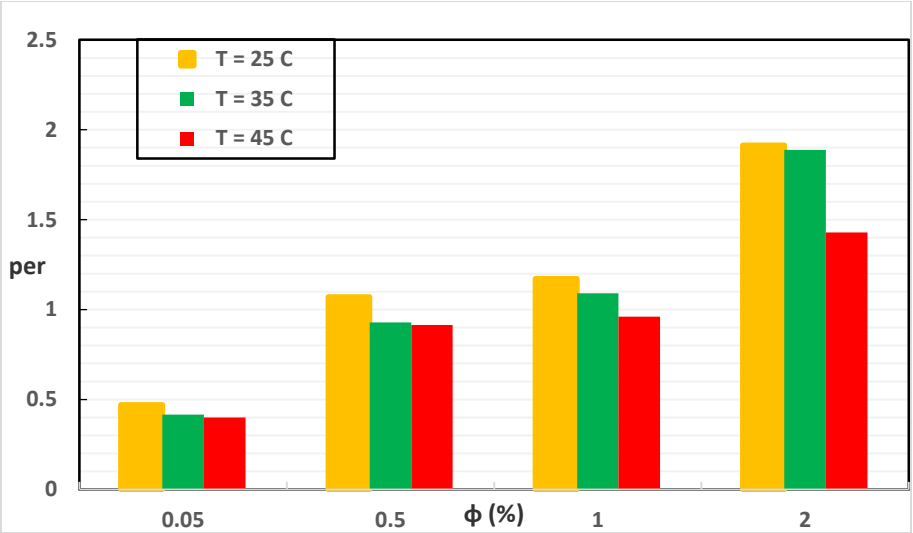
پارامتر نسبت افزایش خواص (PER) به صورت نسبت افزایش ویسکوزیته به ضریب هدایت حرارتی نانوسیال در شرایط یکسان تعریف می‌گردد. مقدار پارامتر مذکور باید برای نانوسیال کمتر از ۵ باشد تا در کاربردهای انتقال حرارتی در مقایسه با سیال پایه سودمند واقع گردد. مقدار PER با استفاده از معادله ۱۴ محاسبه می‌شود [۱۹]:

$$PER = \left(\frac{\mu_r - 1}{k_r - 1}\right) \quad (\text{غیرسودمند برای انتقال حرارت}، 5 < \text{، سودمند برای انتقال حرارت}، 5 >) \quad (۱۴)$$

مقادیر پارامتر PER نانوسیال اکسید آلومینیوم – آب در محدوده غلظت ۰/۰۵٪ تا ۲٪ حجمی در دامنه دمایی ۲۵ درجه سانتیگراد تا ۴۵ درجه سانتیگراد محاسبه گردیده و در شکل ۱۵ نشان داده شده است. مقادیر PER بسیار کمتر از ۵ بدست آمده که نشان می‌دهد که نانوسیال اکسید آلومینیوم – آب برای کاربردهای انتقال حرارتی مفید است. علاوه بر این، شکل ۱۵ افزایش در مقادیر PER با افزایش کسر حجمی و کاهش آن با افزایش دما را نشان می‌دهد. این روند ما را به سمت این واقعیت هدایت می نماید که افزایش ویسکوزیته بر افزایش ضریب هدایت حرارتی در دمای پایین تر غالب است. با این حال، در دماهای بالا، افزایش ضریب هدایت حرارتی بر افزایش ویسکوزیته غالب است. بنابراین، نانوسیالات برای افزایش انتقال حرارت در کاربردهای حرارتی دما بالا، مناسب تر هستند.

[1] Regression Coefficient
[2] Average Absolute Relative Deviation
[3] Mean Square Error
[4] Properties Enhancement Ratio
[5] Mouromtseff number

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]



شکل ۱۵. پارامتر PER نانوسیال اکسید آلومینیوم-آب در در غلظت و دماهای مختلف

۲,۴ عدد موروموتسف

نانوسیالات در شرایط مختلف انتقال حرارتی قابل استفاده هستند. موروموتسف و همکاران [۶۵] شاخصی[1] (FOM) را برای ارزیابی بازده حرارتی فرآیند انتقال حرارت جریان جابجایی تک فاز پیشنهاد نمودند. شاخص مذکور به عنوان عدد موروموتسف شناخته می شود که به صورت معادله ۱۵ بیان می گردد:

$$MO = \rho^{\alpha} K^{b} C_P^{c} \mu^{-d} \qquad (۱۵)$$

که ρ ، k، c_p و μ به ترتیب دانسیته، ضریب هدایت حرارتی، گرمای ویژه و ویسکوزیته سیال را نشان می‌دهند. توان های a ، b، c و d ثوابتی هستند که مقادیر متفاوتی برای حالت‌های مختلف انتقال حرارت (جابجایی آزاد،جابجایی اجباری،جوشش،میعان...) و شرایط جریانی (رژیم آرام یا رژیم آشفته) دارند. ضریب هدایت حرارتی، ویسکوزیته و دانسیته نانوسیال قبلاً در بخش‌های قبلی اندازه‌گیری و ارائه شده بود. گرمای ویژه نانوسیال با استفاده از مدل پاک و چو[۱۵] و با معادله ۱۶ محاسبه شد:

$$c_{pnf} = (1-\varphi)c_{pbf} + \varphi c_{pnp} \qquad (۱۶)$$

به طور کلی هرچه عدد موروموتسف بیشتر باشد، نانوسیال عملکرد حرارتی بهتری دارد. اگر پارامتر نسبت عدد مورتسف Mo_r (Mo_{nf}/Mo_{bf}) بیشتر از ۱ باشد، نانوسیال نسبت به سیال پایه سودمند در نظر گرفته می‌شود. عدد موروموتسف در هر دو رژیم جریان آرام و آشفته محاسبه می‌شود. در مورد انتقال حرارت در شرایط آرام، کاملاً توسعه یافته، عدد ناسلت ثابت است. بنابراین، ضریب هدایت حرارتی تنها پارامتری است که بر عملکرد انتقال حرارت تأثیر می‌گذارد. بنابراین پارامتر نسبت عدد موروموتسف، برای انتقال حرارت در شرایط جریان آرام توسط سیمون و همکاران[۶۶] و از معادله ۱۷ محاسبه می گردد:

[1] Figure of merit

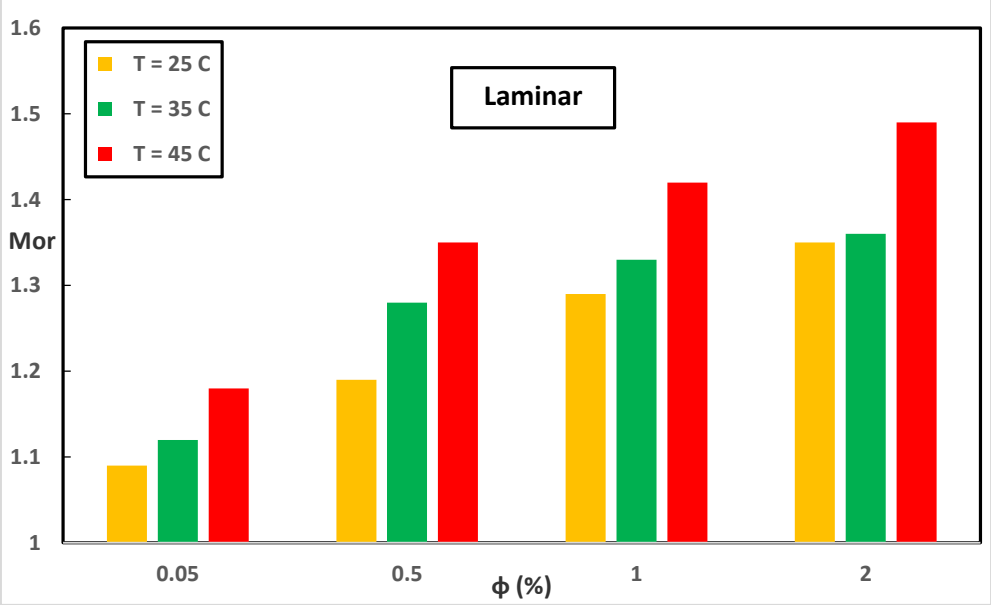
[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

$$Mo_r = \left(\frac{Mo_{nf}}{Mo_{bf}}\right) = \left(\frac{k_{nf}}{k_{bf}}\right) > 1$$، سودمند برای انتقال حرارت (۱۷)

تموفیوا و همکاران [۶۷] برای محاسبه پارامتر نسبت عدد موروموتسف در رژیم جریان آشفته معادله ۱۸ را پیشنهاد کرده اند:

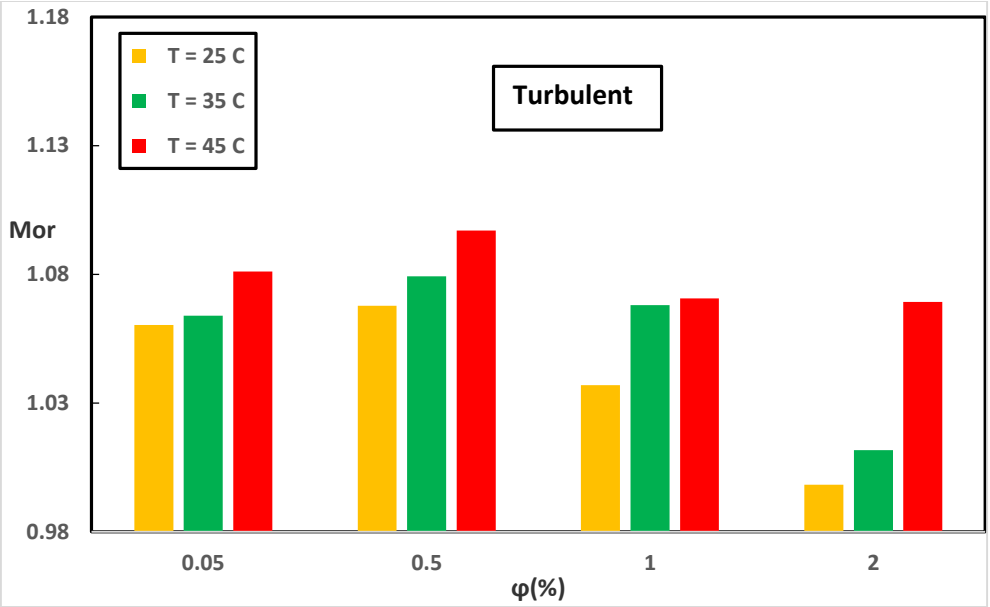
$$Mo_r = \left(\frac{Mo_{nf}}{Mo_{bf}}\right) = \left(\frac{\rho_{nf}^{0.8} k_{nf}^{0.67} c_{pnf}^{0.33} \mu_{nf}^{-0.47}}{\rho_{bf}^{0.8} k_{bf}^{0.67} c_{p.bf}^{0.33} \mu_{bf}^{-0.47}}\right) > 1$$، سودمند برای انتقال حرارت (۱۸)

شکلهای ۱۶ و۱۷ پارامتر Mo_r را برای رژیم جریان آرام و آشفته در کسرهای حجمی و دماهای مختلف نشان می‌دهد. مطابق شکل ها، مقادیر پارامتر Mo_r بزرگتر از ۱ است که نشان می‌دهد نانوسیالات برای عملکرد انتقال حرارتی مناسب هستند. در رژیم جریان آرام با افزایش غلظت نانوذرات و افزایش دما، عدد Mo_r افزایش می‌یابد. این درحالیست که در رژیم جریان آشفته، مقادیر پارامتر Mo_r در غلظت های بالا (۱ ٪ و ۲٪) کاهش می یابد که نشان دهنده غلبه تاثیر تغییرات ویسکوزیته بر تغییرات سایر خواص ترموفیزیکی است. مقادیر پارامتر Mo_r در دمای بالا برای همه غلظت‌ها، بیشتر است که نشان دهنده افزایش ضریب هدایت حرارتی و کاهش ویسکوزیته نانوسیالات به طور همزمان با افزایش دما است. علاوه بر این، مشاهده این نکته بسیار جالب است که نانوسیال اکسید آلومینیوم- آب با غلظت ۰/۵ درصد حجمی بهترین نتایج را نشان داده است که می‌تواند به عنوان غلظت بهینه برای کاربرد انتقال حرارتی در شرایط رژیم جریان آشفته (با توجه به شرایط عملیاتی مورد مطالعه) معرفی گردد.



شکل ۱۶. مقادیر پارامتر Mo_r نانوسیال اکسید آلومینیوم-آب در کسرهای حجمی و دماهای مختلف تحت رژیم جریان آرام

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]



شکل ۱۷. مقادیر پارامتر Mo_r نانوسیال اکسید آلومینیوم-آب در کسرهای حجمی و دماهای مختلف تحت رژیم جریان آشفته

۳,۴ افت توان پمپاژ[1]

در مورد جریان حلقوی[2] که دیواره آن در معرض شرط مرزی شار حرارتی ثابت قرار گرفته است، افزایش توان پمپاژ نانوسیال نسبت به سیال پایه را می توان با استفاده از معادلات ۱۹ و ۲۰ محاسبه نمود [۲۲]:

$$w_{rl} = \left(\frac{W_{nf}}{W_{bf}}\right)_l = \left(\frac{\mu_{nf}}{\mu_{bf}}\right)\left(\frac{\rho_{bf}}{\rho_{nf}}\right)^2 \qquad (۱۹)$$

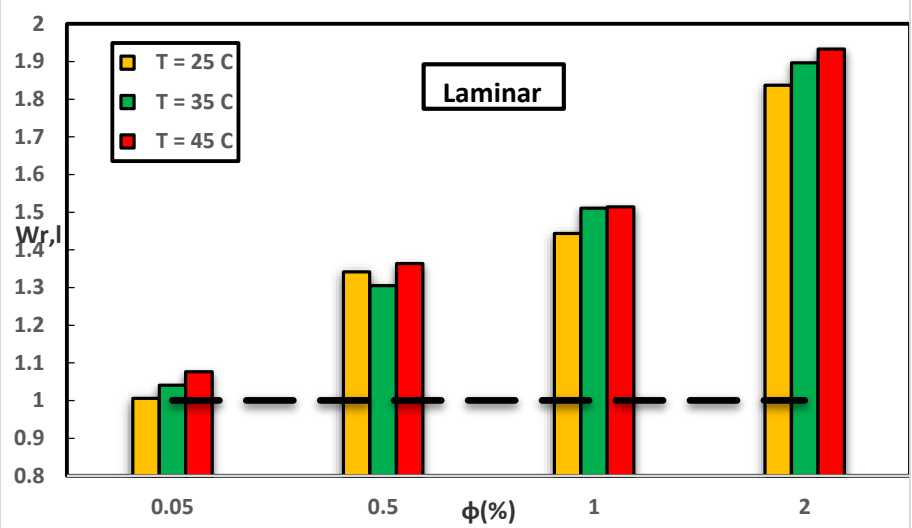
$$w_{rt} = \left(\frac{w_{nf}}{w_{bf}}\right)_t = \left(\frac{\mu_{nf}}{\mu_{bf}}\right)^{\frac{1}{4}}\left(\frac{\rho_{bf}}{\rho_{nf}}\right)^2 \qquad (۲۰)$$

که در آن W نشان دهنده افت توان پمپاژ است و اندیس‌های l و t به ترتیب شرایط رژیم جریان آرام و آشفته را نشان می‌دهد. مقادیر افت توان پمپاژ نسبی (W_r) کمتر از یک برای کاهش مصرف انرژی در شرایط رژیم جریان آرام و آشفته، مطلوب است. شکلهای ۱۸ و ۱۹ تغییرات افت توان پمپاژ با تغییر غلظت را به ترتیب برای رژیم جریان آرام و آشفته نشان می دهند. نتایج از افزایش توان پمپاژ تا ۹۳ درصد در نانوسیال با غلظت ۲ درصد حجمی در رژیم جریان آرام حکایت دارد. اما در رژیم جریان آشفته توان پمپاژ حدود ۵/۵ درصد در غلظت ۱ درصد حجمی کاهش نشان داده است. بعلاوه اثر دما بر افت توان پمپاژ (به ویژه در رژیم جریان آرام) چندان ملموس نیست. دلیل آن این است (همانطور که در قسمتهای قبل نشان داده شده است) که دما اثر چندانی بر ویسکوزیته نانوسیال (در شرایط عملیاتی مطالعه شده) ندارد. بنابراین، افزودن نانوذرات اکسید آلومینیوم به سیال پایه (آب) در صورتی مفید است که رژیم جریان در شرایط آشفته باشد. یافته های مذکور در تطابق با نتایج

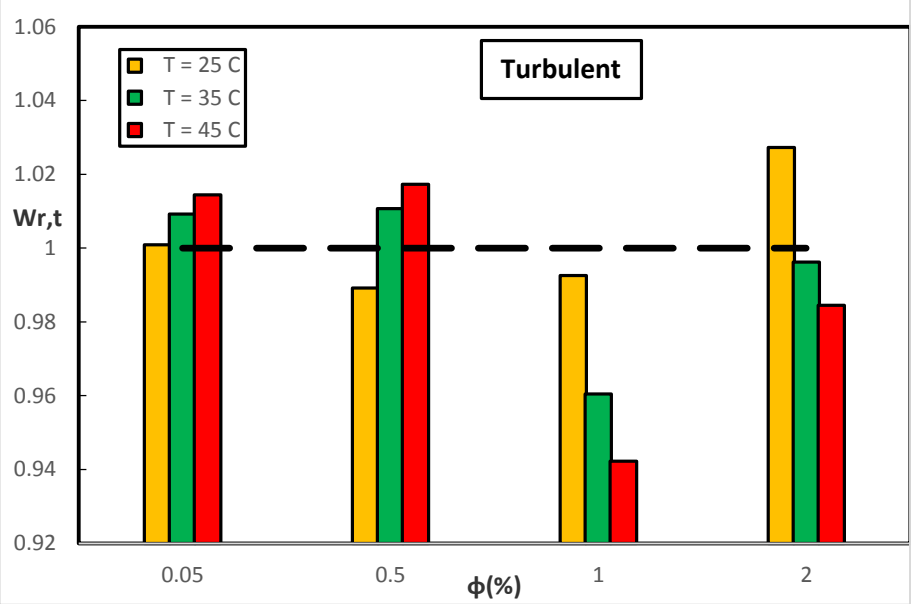
[1] Pumping Power Loss
[2] Annular

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

[۱۹] است هرچند نتایج فعلی کاملاً با گزارش های [۲۲, ۲۳] در تناقض است. با این حال، چنین نتیجه ای برای عملکرد حرارتی بهتر نانوسیال اکسید آلومینوم- آب مفید است.



شکل ۱۸. W_r نانوسیال اکسید آلومینیوم- آب در غلظت ها و دماهای مختلف در رژیم جریان آرام



شکل ۱۹. W_r نانوسیال اکسید آلومینیوم- آب در غلظت ها و دماهای مختلف در رژیم جریان آشفته

۵. نتیجه گیری

در این پژوهش خواص ترموفیزیکی و عملکرد حرارتی نانوسیال اکسید آلومینیوم بر پایه آب مقطر به طور جامع مورد بررسی قرار گرفت. نانوسیالات اکسید آلومینیوم- آب در چهار کسر حجمی ۰/۰۵٪، ۰/۵٪، ۱٪ و ۲ ٪ تهیه شد. بازرسی بصری و پراکندگی نور پویا (DLS) برای رصد پایداری انجام شد. اندازه گیری تجربی ضریب هدایت حرارتی، ویسکوزیته و دانسیته نانوسیال در غلظت‌های انتخابی در محدوده دمایی ۲۵ درجه سانتی‌گراد تا ۴۵ درجه سانتی‌گراد انجام شد. اثرات کسر حجمی و دما با جزئیات مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. علاوه بر این، عملکرد حرارتی- سیالی نانوسیال در هر دو شرایط جریانی آرام و آشفته مورد ارزیابی قرار گرفت اهم نتایج را می‌توان به صورت زیر خلاصه کرد:

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

- نانوسیال اکسید آلومینیوم- آب پایداری پراکندگی خوبی را نشان داد. پایداری نانوسیال تحت تأثیر غلظت است بطوریکه نانوسیال رقیق در مقایسه با نانوسیال غلیظ پایداری بهتری از خود نشان داد.
- ضریب هدایت حرارتی نانوسیال با افزایش غلظت بهبود یافت. بنابراین، افزودن نانوذرات برای افزایش ضریب هدایت حرارتی مطلوب است. با این حال، افزودن بیش از حد ذرات می‌تواند پایداری نانوسیال را مختل نماید.
- ضریب هدایت حرارتی نانوسیال با افزایش دما افزایش یافت. این بهبود به دلیل افزایش حرکت براونی نانوذرات پراکنده شده در سیال پایه است که با افزایش دما بیشتر می‌گردد. بنابراین، نانوسیالات برای کاربردهایی در دمای بالا مناسب هستند.
- ویسکوزیته نانوسیال با افزایش غلظت افزایش یافت. افزایش ویسکوزیته همچنین نیاز توان پمپاژ را افزایش می‌دهد. این را می‌توان به عنوان اصلی ترین نقطه ضعف استفاده از نانوسیالات معرفی کرد.
- افزایش دما باعث کاهش ویسکوزیته نانوسیال شد. بنابراین، ویسکوزیته بر عملکرد انتقال حرارتی در دمای بالاتر تأثیر نمی‌گذارد.
- ویسکوزیته نانوسیال اکسید آلومینیوم-آب در تمامی غلظتها بیشتر از سیال پایه بود. با این حال، افزایش ویسکوزیته تقریباً مستقل از افزایش دما بوده است.
- عملکرد انتقال حرارتی و توان پمپاژ نانوسیال با استفاده از معیارهای عملکردی مختلف مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. نانوسیالات عملکرد انتقال حرارتی بهتری نسبت به سیال پایه نشان دادند. با این حال، مهمترین جریمه استفاده از نانوسیالات، افزایش توان پمپاژ آنها نسبت به سیال پایه است.
- مقدار بهینه غلظت برابر ۰/۵٪ حجمی به دست آمد که در آن راندمان انتقال حرارت، بیشینه است.

علائم انگلیسی

AARD : خطای نسبی متوسط مطلق

Mo : عدد مورومتسف

MSE :خطای میانگین مربعات

mتعداد آزمایش

R^2 : ضریب همبستگی

U : عدم قطعیت

W : توان پمپاژ

علائم یونانی

Δ : تغییر یا تفاوت

ρ : دانسیته

φ :کسر حجمی

μ : ویسکوزیته

زیرنویس

bf : سیال پایه

np : نانوذرات

nf : نانوسیال

exp : داده‌های تجربی

Pred : داده‌های پیش‌بینی شده

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

مراجع

[۱]S.U.S. Choi, Enhancing thermal conductivity of fluids with nanoparticles, in: Proceedings of the 1995 ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition, New York, USA, 1995, pp. 99-105.

[۲]X.-j. Wang, D.-s. Zhu, S. yang, Investigation of pH and SDBS on enhancement of thermal conductivity in nanofluids, Chem. Phys. Lett., 470(1–3) (2009) 107-111.

[۳]D. Zhu, X. Li, N. Wang, X. Wang, J. Gao, H. Li, Dispersion behavior and thermal conductivity characteristics of Al2O3–H2O nanofluids, Current Applied Physics, 9(1) (2009) 131-139.

[۴]H. Masuda, A. Ebata, K. Teramae, Alteration of thermal conductivity and viscosity of liquid by dispersing ultra-fine particles. Dispersion of Al2O3, SiO2 and TiO2 ultra-fine particles, (1993).

[۵]J.A. Eastman, S. Choi, S. Li, W. Yu, L. Thompson, Anomalously increased effective thermal conductivities of ethylene glycol-based nanofluids containing copper nanoparticles, Appl. Phys. Lett., 78(6) (2001) 718-720.

[۶]S. Murshed, K. Leong, C. Yang, Enhanced thermal conductivity of TiO2—water based nanofluids, Int J Therm Sci, 44(4) (2005) 367-373.

[۷]Y. Ding, H. Alias, D. Wen, R.A. Williams, Heat transfer of aqueous suspensions of carbon nanotubes (CNT nanofluids), Int. J. Heat Mass Transfer, 49(1) (2006) 240-25.۰

[۸]H.A. Mintsa, G. Roy, C.T. Nguyen, D. Doucet, New temperature dependent thermal conductivity data for water-based nanofluids, Int J Therm Sci, 48(2) (2009) 363-371.

[۹]J. Shah, M. Ranjan, V. Davariya, S.K. Gupta, Y. Sonvane, Temperature-dependent thermal conductivity and viscosity of synthesized α-alumina nanofluids, Applied Nanoscience, 7 (2017) 803-813.

[۱۰]S.M. Abdel-Samad, A.A. Fahmy, A.A. Massoud, A.M. Elbedwehy, Experimental investigation of TiO2-water nanofluids thermal conductivity synthesized by Sol-gel technique, Current Nanoscience, 13(6) (2017) 586-594.

[۱۱]J. Ji, X. Yao, J. Gao, W. Lu, W. Wang, D. Chu, Effect of surfactants and pH values on stability of γ-Al2O3 nanofluids, Chemical Physics Letters, 781 (2021) 138996.

[۱۲]P.K. Kanti, P. Sharma, K. Sharma, M. Maiya, The effect of pH on stability and thermal performance of graphene oxide and copper oxide hybrid nanofluids for heat transfer applications: Application of novel machine learning technique, Journal of Energy Chemistry, 82 (2.۳۷۴-۳۵۹ (۰۲۳

[۱۳]H. Eshgarf, A.A. Nadooshan, A. Raisi, M. Afrand, Experimental examination of the properties of Fe3O4/water nanofluid, and an estimation of a correlation using an artificial neural network, J. Mol. Liq., (2023) 121150.

[۱۴]A. Ghafouri, D. Toghraie, Novel multivariate correlation for thermal conductivity of SiC-MgO/ethylene glycol nanofluid based on an experimental study, Materials Science and Engineering: B, 297 (2023) 116771.

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

[۱۶]R. Prasher, D. Song, J. Wang, P. Phelan, Measurements of nanofluid viscosity and its implications for thermal applications, Appl. Phys. Lett., 89(13) (2006) 133108.

[۱۷]W. Duangthongsuk, S. Wongwises, An experimental study on the heat transfer performance and pressure drop of TiO2-water nanofluids flowing under a turbulent flow regime, Int. J. Heat Mass Transfer,.۳۴۴-۳۳۴ (۲۰۱۰) (۳–۱)۵۳

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

[۱۸]T. Yiamsawas, A.S. Dalkilic, O. Mahian, S. Wongwises, Measurement and correlation of the viscosity of water-based Al2O3 and TiO2 nanofluids in high temperatures and comparisons with literature reports, J. Dispersion Sci. Technol., 34(12) (2013) 1697-1703.

[۱۹]S. Mukherjee, S.R. Panda, P.C. Mishra, P. Chaudhuri, Enhancing thermophysical characteristics and heat transfer potential of TiO2/water nanofluid, Int. J. Thermophys., 41(12) (2020) 1-33.

[۲۰]J. Garg, B. Poudel, M. Chiesa, J. Gordon, J. Ma, J. Wang, Z. Ren, Y. Kang, H. Ohtani, J. Nanda, Enhanced thermal conductivity and viscosity of copper nanoparticles in ethylene glycol nanofluid, J. Appl. Phys., 103(7) (2008) 074301.

[۲۱]Y. Zhai, L. Li, J. Wang, Z. Li, Evaluation of surfactant on stability and thermal performance of Al2O3-ethylene glycol (EG) nanofluids, Powder Technol., 343 (2019) 215-224.

[۲۲]D. Cabaleiro, L. Colla, S. Barison, L. Lugo, L. Fedele, S. Bobbo, Heat transfer capability of (ethylene glycol+ water)-based nanofluids containing graphene nanoplatelets: Design and thermophysical profile, Nanoscale research letters, 12(1) (2017) 1-11.

[۲۳]M. Asadi, A. Asadi, S. Aberoumand, An experimental and theoretical investigation on the effects of adding hybrid nanoparticles on heat transfer efficiency and pumping power of an oil-based nanofluid as a coolant fluid, International Journal of Refrigeration, 89 (2018) 83-92.

[۲۴]A. Asadi, F. Pourfattah, Heat transfer performance of two oil-based nanofluids containing ZnO and MgO nanoparticles; a comparative experimental investigation, Powder Technol., 343 (2019) 296-308.

[۲۵]Z.-H. Liu, L. Liao, Forced convective flow and heat transfer characteristics of aqueous drag-reducing fluid with carbon nanotubes added, Int J Therm Sci, 49(12) (2010) 2331-2338.

[۲۶]A. Nasiri, M. Shariaty-Niasar, A.M. Rashidi, R. Khodafarin, Effect of CNT structures on thermal conductivity and stability of nanofluid, Int. J. Heat Mass Transfer, 55(5-6) (2012) 1529-1535.

[۲۷]B. Raei, F. Shahraki, M. Jamialahmadi, S. Peyghambarzadeh, Experimental study on the heat transfer and flow properties of γ-Al2O3/water nanofluid in a double-tube heat exchanger, J. Therm. Anal. Calorim., 127(3) (2017) 2561-2575.

[۲۸]B. Raei, F. Shahraki, M. Jamialahmadi, S. Peyghambarzadeh, Experimental investigation on the heat transfer performance and pressure drop characteristics of γ-Al2O3/water nanofluid in a double tube counter flow heat exchanger, Challenges in Nano and Micro Scale Science and Technology, 5(1) (2016).۷۵-۶۴

[۲۹]B. Raei, Statistical analysis of nanofluid heat transfer in a heat exchanger using Taguchi method, Journal of Heat and Mass Transfer Research, 8(1) (2021) 29-38.

[۳۰]B. Raei, S. Peyghambarzadeh, R.S. Asl, Experimental investigation on heat transfer and flow resistance of drag-reducing alumina nanofluid in a fin-and-tube heat exchanger, Appl. Therm. Eng., 144 (2018) 926-936.

[۳۱]B. Raei, S.M. Peyghambarzadeh, Measurement of Local Convective Heat Transfer Coefficient of Alumina-Water Nanofluids in a Double Tube Heat Exchanger, Journal of Chemical and Petroleum engineering, 53(1) (2019) 25-36.

[۳۲]T.-P. Teng, Y.-H. Hung, T.-C. Teng, H.-E. Mo, H.-G. Hsu, The effect of alumina/water nanofluid particle size on thermal conductivity, Appl. Therm. Eng., 30(14-15) (2010) 2213-2218.

[۳۳]N. Ali, J.A. Teixeira, A. Addali, A review on nanofluids: fabrication, stability, and thermophysical properties, Journal of Nanomaterials, 2018 (2018).

[۳۴]L. Fedele, L. Colla, S. Bobbo, S. Barison, F. Agresti, Experimental stability analysis of different water-based nanofluids, Nanoscale research letters, 6 (2011) 1-8.

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

[۳۵]E. Lemmon, M.L. Huber, M.O. McLinden, NIST standard reference database 23: reference fluid thermodynamic and transport properties-REFPROP, version 8.0, (2007).

[۳۶]K. Bashirnezhad, S. Bazri, M. Safaei, M. Goodarzi, M. Dahari, O. Mahian, A. Dalkiliça, S. Wongwises, Viscosity of nanofluids: a review of recent experimental studies, Int. Common, Heat Mass Transf, 3350 (2016) 1-10.

[۳۷]F.M. Ali, W.M.M. Yunus, M.M. Moksin, Z.A. Talib, The effect of volume fraction concentration on the thermal conductivity and thermal diffusivity of nanofluids: numerical and experimental, Rev. Sci. Instrum., 81(7) (2010) 074901.

[۳۸]I.W. Almanassra, A.D. Manasrah, U.A. Al-Mubaiyedh, T. Al-Ansari, Z.O. Malaibari, M.A. Atieh, An experimental study on stability and thermal conductivity of water/CNTs nanofluids using different surfactants: A comparison study, J. Mol. Liq., 304 (2020) 111025.

[۳۹]M. Liu, C. Ding, J. Wang, Modeling of thermal conductivity of nanofluids considering aggregation and interfacial thermal resistance, RSC advances, 6(5) (2016) 3571-3577.

[۴۰]R.K. Shukla, V.K. Dhir, Effect of Brownian motion on thermal conductivity of nanofluids, J HEAT TRANSF.(۲۰۰۸) (۴)۱۳۰ ,

[۴۱]H.E. Patel, K. Anoop, T. Sundararajan, S.K. Das, A micro-convection model for thermal conductivity of nanofluids, in: International Heat Transfer Conference 13, Begel House Inc., 2006.

[۴۲]S. Ilyas, R. Pendyala, M. Narahari, Stability and thermal analysis of MWCNT-thermal oil-based nanofluids, colloids surfaces a physicochem. Eng. Asp. 527: 11–22, in, 2017.

[۴۳]S. Mukherjee, P.C. Mishra, S. Parashar, P. Chaudhuri, Role of temperature on thermal conductivity of nanofluids: a brief literature review, Heat Mass Transfer., 52 (2016) 2575-2585.

[۴۴]B. Ruhani, M.T. Andani, A.M. Abed, N. Sina, G.F. Smaisim, S.K. Hadrawi, D. Toghraie, Statistical modeling and investigation of thermal characteristics of a new nanofluid containing cerium oxide powder, Heliyon, 8(11) (2022) e11373.

[۴۵]T.R. Prasad, K. Krishna, K. Sharma, N. Mantravadi, Viscosity and Thermal Conductivity of Cobalt and Silica Nanofluid in an Optimum Mixture of Glycerol and Water, Colloid J., 84(2) (2022) 208-221.

[۴۶]C.-C. Li, N.Y. Hau, Y. Wang, A.K. Soh, S.-P. Feng, Temperature-dependent effect of percolation and Brownian motion on the thermal conductivity of TiO 2–ethanol nanofluids, PCCP, 18(22) (2016) 15363-15368.

[۴۷]L. Yu-Hua, Q. Wei, F. Jian-Chao, Temperature dependence of thermal conductivity of nanofluids, Chinese physics letters, 25(9) (2008) 3319.

[۴۸]N.A.C. Sidik, M.N.A.W.M. Yazid, S. Samion, A review on the use of carbon nanotubes nanofluid for energy harvesting system, Int. J. Heat Mass Transfer, 111 (2017) .۷۹۴-۷۸۲

[۴۹]P.C. Mishra, S. Mukherjee, S.K. Nayak, A. Panda, A brief review on viscosity of nanofluids, International nano letters, 4 (2014) 109-120.

[۵۰]M.H. Esfe, Thermal conductivity modeling of aqueous CuO nanofluids by adaptive neuro-fuzzy inference system (ANFIS) using experimental data, Periodica Polytechnica Chemical Engineering, 62(2) (2018) 202-208.

[۵۱]H.K. Naina, R. Gupta, H. Setia, R. Wanchoo, Viscosity and specific volume of TiO2/water nanofluid, Journal of Nanofluids, 1(2) (2012) 161-16.۵

[۵۲]R.M. Barai, D. Kumar, A.V. Wankhade, A.R. Sayed, A.A. Junankar, Experimental study of thermal characteristics of ZrO2/EG nanofluid for application of heat transfer, Environmental Science and Pollution Research, (2022) 1-9.

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

[۵۳]M. Hemmat Esfe, S. Saedodin, Investigating the Behavior of SiO 2 (90%)-MWCNT (10%)/SAE50 Hybrid Nanofluid and Modeling its Viscosity, Arab J Sci Eng, (2022) 1-12.

[۵۴]M. Hemmat Esfe, Viscosity Analysis of MWCNT (25%)–ZnO (75%)/10W40 Hybrid Nanofluid; Toward a New Look at Finding Efficient Nanofluid for Heat Transfer Goals, Arab J Sci Eng, 46 (2021) 5957-5968.

[۵۵]A.V. Minakov, V.Y. Rudyak, M.I. Pryazhnikov, Systematic experimental study of the viscosity of nanofluids, Heat Transfer Eng, 42(12) (2021) 1024-1040.

[۵۶]S. Peyghambarzadeh, S. Hashemabadi, H. Saffarian, F. Shekari, Experimental study of the effect of drag reducing agent on pressure drop and thermal efficiency of an air cooler, Heat Mass Transfer., 52(1) (2016) 63-72.

[۵۷]M.H. Esfe, S. Saedodin, An experimental investigation and new correlation of viscosity of ZnO–EG nanofluid at various temperatures and different solid volume fractions, Exp. Therm Fluid Sci., 55 (2014) 1-5.

[۵۸]M. Akbari, M. Afrand, A. Arshi, A. Karimipour, An experimental study on rheological behavior of ethylene glycol based nanofluid: proposing a new correlation as a function of silica concentration and temperature, J. Mol. Liq., 233 (2017) 352-357.

[۵۹]E.J. Wasp, J.P. Kenny, R.L. Gandhi, Solid--liquid flow: slurry pipeline transportation.[Pumps, valves, mechanical equipment, economics], Ser. Bulk Mater. Handl.;(United States), 1(4) (1977).

[۶۰]S. Mukherjee, P.C. Mishra, P. Chaudhuri, Thermo-economic performance analysis of Al2O3-water nanofluids—an experimental investigation, J. Mol. Liq., 299 (2020) 112200.

[۶۱]A. Einstein, A new determination of the molecular dimensions, Ann.physics, 19 (1906) 289-306.

[۶۲]G. Batchelor, The effect of Brownian motion on the bulk stress in a suspension of spherical particles, J. Fluid Mech., 83(1) .۱۱۷-۹۷ (۱۹۷۷)

[۶۳]V.Y. Rudyak, Viscosity of nanofluids. Why it is not described by the classical theories, Advances in nanoparticles, 2(03) (2013) 266.

[۶۴]G. Xia, H. Jiang, R. Liu, Y. Zhai, Effects of surfactant on the stability and thermal conductivity of Al 2 O 3/de-ionized water nanofluids, Int J Therm Sci, 84 (2014) 118-124.

[۶۵]I. Mouromtseff, Water and forced-air cooling of vacuum tubes nonelectronic problems in electronic tubes, Proc. IRE, 30(4) (1942) 190-205.

[۶۶]R.E. Simons, Calculation corner: Comparing heat transfer rates of liquid coolants using the Mouromtseff number, Electronics Cooling, 12(2) (2006) 10.

[۶۷]E.V. Timofeeva, J.L. Routbort, D. Singh, Particle shape effects on thermophysical properties of alumina nanofluids, J. Appl. Phys., 106(1) (2009) 014304.

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

چکیده انگلیسی:

Experimental investigation of heat transfer potential of aluminum oxide-water nanofluid using thermophysical properties criteria

Behrouz Raei[1, *] Elnaz sadat Seyedi[1]

1. Department of Chemical Engineering, Mahshahr Branch, Islamic Azad University, Mahshahr, Iran

Received: November 2023 Accepted: February 2024

Abstract

The present study investigates the ability to improve the stability and heat transfer performance of water coolant fluid by dispersing aluminum oxide nanoparticles in water. Surfactant-free nanofluid with 4 different volume fractions of 0.05%, 0.5%, 1% and 2% were prepared by two-step method. The stability of the nanofluid was monitored by continuous imaging (visualization) and dynamic light scattering (DLS) techniques. Thermal conductivity, viscosity and density of aluminum oxide-water nanofluid were measured in 4 concentrations and at temperatures of 25, 35 and 45 °C. The results showed that the thermal conductivity and viscosity of aluminum oxide-water nanofluid increases with rising concentration. The viscosity of nanofluids in all concentrations were higher than the base fluid. This is while the increase in viscosity was almost independent of the increase in temperature. The highest percentage increase in the thermal conductivity of nanofluid is equal 49%, which was obtained at a concentration of 2% and a temperature of 45 °C. New correlations with high precision were presented based on the experimental data of thermal conductivity and viscosity of nanofluids. The heat transfer performance and pumping power of nanofluid were analyzed based on several performance criteria. The advantageous results of increasing the heat transfer capability made aluminum oxide-water nanofluid a potential candidate for cooling fluid in practical applications.

Key words: Nanofluid, Heat transfer, Thermal conductivity, Viscosity.

*corresponding author: **behrouz.raei@iau.ac.ir**

Cite this article as: Behrouz Raei, Elnaz sadat Seyedi, Experimental investigation of heat transfer potential of aluminum oxide-water nanofluid using thermophysical properties criteria. Journal of Energy Conversion, 2024, 10(4), 93-121.

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]