

بررسی ویژگی‌های نانوسیالات و چالش‌های استفاده از آنها برای بهبود انتقال حرارت

قنبرعلی شیخزاده
دانشیار دانشکده مهندسی مکانیک
دانشگاه کاشان
Sheikhz@kashanu.ac.ir

محمد پورجعفرقلی*
دانشجوی دکتری مهندسی مکانیک
دانشگاه کاشان
mpourjafargholi@gmail.com

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۳/۱۰/۲۰

تاریخ دریافت: ۱۳۹۳/۰۹/۱۱

چکیده

نانوسیالات خواص ترموفیزیکی سیال پایه را به شدت تغییر می‌دهند. پژوهش‌ها نشان می‌دهند که انتقال حرارت نانوسیالات نسبت به سیالات پایه رایج افزایش بسیار خوبی دارند. این رفتار به عواملی چون شکل نانوذرات، توزیع اندازه و کسر حجمی آنها، دما، ضریب هدایت حرارتی نانوذرات و سیال پایه بستگی دارد. این مقاله با تأکید بر افزایش انتقال حرارت نانوسیالات، مرور جدیدی بر فرمول‌بندی، پایداری، سازوکارهای ممکن برای افزایش هدایت حرارتی و مدل‌کردن عددی نانوسیال ارائه می‌دهد. در این مقاله ویژگی‌های انواع نانوسیالات (تهیه‌شده با نانوذرات اکسید آلومینا، اکسید مس، اکسید روی، مس و آهن که غالباً در تحقیقات نانوسیال استفاده می‌شوند و سیالات پایه معمولی کاربردی برای انتقال حرارت مانند آب، اتیلن گلیکول و روغن) به اجمال ارائه و نتایج حاصل از تحقیقات صورت‌گرفته با هم مقایسه می‌شوند. اما باید توجه داشت که به‌منظور درک تمامی عوامل مؤثر در افزایش ضریب هدایت حرارتی نانوسیالات به مطالعات محاسباتی و تجربی بیشتری نیاز است.

واژگان کلیدی: نانوسیالات، ویسکوزیته، ضریب هدایت حرارتی، روش‌های آماده‌سازی نانوسیالات

۱. مقدمه

برای بهبود انتقال حرارت و بازده انرژی در انواع سیستم‌های حرارتی مورد توجه و مطالعه قرار گرفته است. بیشتر این تحقیقات درباره نانوسیالات و در آزمایشگاه‌ها و محیط‌های دانشگاهی انجام شده است. از جمله ویژگی‌های کلیدی نانوسیالات که تاکنون گزارش شده‌اند، می‌توان به

نخستین بار، چوی در سال ۱۹۹۵ م نانوسیالات را با مخلوط کردن نانوذرات با سیال پایه معرفی کرد [۱] و در سال ۲۰۰۱ م، افزایش ۱۶۰ درصدی برای ضریب هدایت حرارتی نانولوله‌های کربنی چنددیواره پراکنده‌شده در روغن پلی‌اوایل را اندازه‌گیری نمود. تاکنون استفاده از نانوسیالات



هدایت‌های گرمایی بسیار بالاتر از آنچه که سیالات مرسوم از خود نشان می‌دهند و نیز وابستگی شدید هدایت گرمایی به دما و افزایش چشمگیر در شار حرارتی بحرانی اشاره کرد. دو سازوکار کلیدی حرکت نانوذرات (حرکت براونی)، نانولایه‌ها (سطح مولکولی لایه‌ای مایع در سطح مشترک مایع با ذرات) توأم از مهم‌ترین عوامل افزایش هدایت گرمایی سیالات انتقال‌دهنده گرما و انتقال حرارت در نانوسیالات می‌باشند. باوجود ویژگی‌های متعدد، نانوسیالات هنوز در ابتدای مرحله گسترش و پیشرفت قرار دارند. داده‌های تجربی خواص فیزیکی نانوسیالات، به‌ویژه ضریب هدایت حرارتی آنها بسیار پراکنده‌اند. هرچند این داده‌ها، اطلاعاتی درباره خواص فیزیکی و مزایای انتقال حرارت نانوسیالات را فراهم می‌کند، اما هنوز به تحقیق بیشتری در این زمینه نیاز است.

۲. انواع نانوسیالات

دامنه ترکیبات مفید نانوذرات و سیالات پایه گسترده است. براساس نوع ذرات، انواع نانوسیالات را می‌توان به چهار گروه نانوسیالات سرامیکی، فلزی، آلیاژی و نهایتاً نانوسیالات با شکل‌های متنوع کربن یا پایه کربنی تقسیم کرد. در ادامه درباره هر یک از این موارد به اجمال توضیحاتی مطرح می‌شود.

۱-۲. نانوسیالات سرامیکی

به‌علت تولید آسان و پایداری شیمیایی در محلول، ذرات سرامیکی اولین موادی هستند که برای نانوسیالات مورد آزمایش قرار گرفتند. سرامیک‌ها را در سه گروه مجزا می‌توان طبقه‌بندی کرد:

۱. اکسیدها مانند آلومینا و زیرکونیا (اکسید زیرکونیم)
 ۲. غیراکسیدها مانند کاربیدها، نیتريد‌ها و سیلیسیدها
 ۳. کامپوزیت‌ها مانند ترکیبات اکسیدها و غیر اکسیدها
- هر یک از این موارد نیز خواص منحصر به‌فردی ایجاد می‌کنند.

۱-۱-۲. نانوذرات آلومینا^۱

اکسیدهای فلزی همچون اکسید آلومینیوم از نظر شیمیایی در سوسپانسیون نسبت به فلزات، پایداری بیشتری دارند و در PHهای مختلف پایداری خوبی در سوسپانسیون نشان می‌دهند. نانوسیالات حاوی این نانوذرات ضریب انتقال حرارت بالایی دارند. ویژگی‌های نانوسیال آلومینا - آب تهیه‌شده با استفاده از روش دومرحله‌ای در جدول ۱، به‌صورت نمونه، ارائه شده است [۲].

جدول ۱. ویژگی‌های نانوسیال اکسید آلومینیوم - آب [۲]

درصد خلوص	۹۹/۹۹ درصد
ای. پی. اس. ^۲ نانوذرات	۵ نانومتر
SSA/m ² g ⁻¹	کمتر از ۱۵۰
ریخت‌شناسی نانوذرات	تقریباً کروی
رنگ نانوذرات	سفید
ظرفیت گرمایی ویژه	۸۸۰ ژول بر کیلوگرم کلوین
چگالی	۳/۸۹۰ کیلوگرم بر متر مکعب
چگالی بالک	۰/۱۸ gm/L

آلومینا دارای دو ساختار آلفا^۳ و گاما^۴ است. نوع آلفای آلومینا سختی بیشتر و مساحت سطح کمتری دارد و کورندم^۵ نامیده می‌شود و دارای ساختاری مکعبی است. همچنین دارای گروه‌های OH- کمتری می‌باشد و همین امر سبب اختلاف PH آنها می‌شود. نوع نرمتر نوع گاما است که دارای منافذ و تخلخل بیشتر نیز می‌باشد. مشخص است که نوع گاما دارای مساحت بیشتری است. نوع گاما کاتالیزگر جالبی است و دارای ساختار لوزوجهی می‌باشد.

۱-۲-۲. نانوذرات اکسید روی^۶

اکسید روی ماده‌ای سفیدرنگ است. مصارف متعدد آن مربوط به خاصیت عایق‌بودن آن در برابر جریان الکتریسیته و هدایت ظرفیت حرارتی زیاد، خاصیت چسبندگی خوب، قدرت پوشش عالی، مقاومت کافی در برابر پرتوهای

فرابنفش، ثابت دی‌الکتریک متوسط و ضریب شکست بالاست. این ماده زیست‌سازگار و ایمن است. در بین اکسیدهای کارکردی^۷، تنها ماده‌ای است که هر دو ویژگی پیزوالکتریکی و نیمه‌رسانایی را دارد. ساختارهای گوناگونی دارد و بسیار غنی‌تر از انواع مواد شناخته‌شده مانند نانولوله‌های کربنی است. با استفاده از روش تصعید حرارتی حالت جامد و با کنترل سرعت رشد، دمای رشد موضعی و ترکیب شیمیایی مواد می‌توان دسته وسیعی از نانو ساختارهای اکسید روی را تولید کرد.

۳-۱-۲. نانوذرات اکسید آهن^۸

اکسید آهن یا اکسید فریک یک ترکیب معدنی و غیرآلی با فرمول Fe_2O_3 است. اکسیدهای دیگر آهن به صورت طبیعی به حالت سنگ آهن Fe_3O_4 یافت می‌شوند.

۳-۲. نانوسیالات فلزی

هرچند درباره نانوسیالات حاوی نانوذرات فلزی در مقایسه با نانوذرات اکسیدی مطالعات کمتری انجام شده است، اما نتایج حاصل امیدبخش است. نانوذرات فلزی در مقایسه با نانوذرات اکسیدی ضریب هدایت حرارتی مؤثر بالاتری دارند.

۳-۳. نانوسیالات آلیاژی

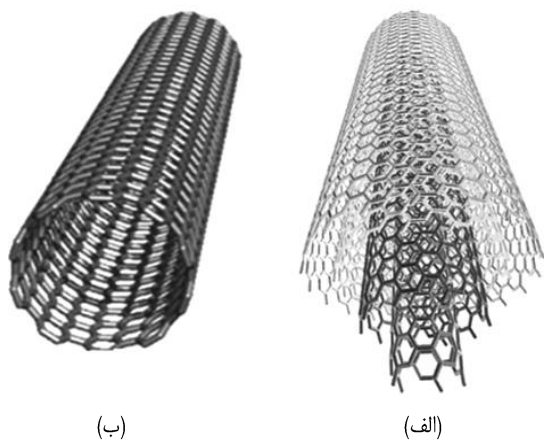
این نوع از نانوسیالات با فرایند آلیاژ مکانیکی یا چگالش گاز بی‌اثر تهیه می‌شوند. متأسفانه گزارش‌های اندکی درباره آنها وجود دارد.

۴-۲. نانوسیال پایه کربنی

خواصی استثنائی، به‌همراه پایداری، روش تهیه نسبتاً آسان و ویسکوزیته قابل قبول سبب شده است تا نانوسیالات پلیمری به‌عنوان یکی از مناسب‌ترین و قوی‌ترین انتخاب‌ها در زمینه سیالات خنک‌کننده مطرح شوند. مقدار اندکی (در حدود یک درصد حجمی) از نانولوله‌های کربنی در اتیلن گلیکول یا روغن به ترتیب افزایش ۴۰ و ۱۵۰ درصدی در

هدایت حرارتی این سیالات ایجاد می‌کند. افزودن ۱ درصد وزنی نانولوله کربنی، رسانایی حرارتی اپوکسی را بیش از دو برابر می‌کند، در حالی که همین مقدار از الیاف کربنی رسانایی حرارتی را تنها ۴۰ درصد افزایش می‌دهد. بنابراین نانولوله‌های کربنی قابلیت زیادی برای بهبود خواص حرارتی پلیمرها و در نتیجه توسعه کامپوزیت‌ها برای کاربردهای مدیریت حرارتی دارند. نانولوله‌ها برحسب نحوه رول شدن صفحات گرافیتی سازنده‌شان به صورت رسانا یا نیمه‌رسانا درمی‌آیند؛ زاویه پیش‌ش نوعی نانولوله، که به صورت زاویه بین محور الگوی شش‌وجهی آن و محور لوله تعریف می‌شود، رسانا یا نارسانا بودن را تعیین می‌کند.

نانولوله‌ها به دو دسته تک‌جداره (شکل ۱) و چندجداره تقسیم می‌شوند. نانولوله‌های تک‌جداره برحسب آرایش اتم‌های کربن مقطع لوله به سه دسته مهم دسته صندلی، کایرال که دارای خاصیت فلزی هستند و زیگزگ که خاصیت نیمه‌رسانایی دارد تقسیم می‌شوند. نانولوله‌های کربنی تک‌جداره فقط از کربن و یک ساختار ساده (ورقه‌ای از شش ضلعی‌های منظم) تشکیل شده‌اند.



الف) نانولوله کربنی چندجداره، ب) نانولوله کربنی تک‌جداره

علت علاقه به نانولوله‌های تک‌جداره و تلاش برای جایگزین کردن آنها در صنعت براساس محاسبات نظری آثار آزمایشگاهی بر خصوصیات عالی مکانیکی و رسانایی

الکتریکی آنها مانند فلزات می‌باشد. البته تولید این مواد هزینه بالایی دارد و تولید همراه با پایدارکردن خصوصیات آنها در حین فراوری پلیمر نانولوله مشکل است. از طرفی، در دسترس بودن و تجاری‌سازی نانولوله‌های کربنی چندجداره سبب شده است پیشرفت‌های وسیعی در این زمینه حاصل شود، تاحدی که محصولاتی در آستانه تجاری‌شدن تولید شده است. یکی از معایب نانولوله‌های چندجداره نسبت به تک‌جداره این است که استحکام‌دهی آنها کمتر است؛ زیرا پیوندهای صفحات داخلی ضعیف می‌باشند، اما چون در حال حاضر کاربرد نانولوله‌ها در تقویت پلیمرها سبب بهبود خواص الکتریکی و گرمایی می‌شود تا بهبود خواص مکانیکی کاربرد نانولوله‌های کربنی چندجداره بسیار زیاد می‌باشد، از طرفی روش‌های موجود برای تولید نانولوله‌های تک‌جداره به اندازه کافی بازدهی ندارد و خلوص لازم را نیز همراه نمی‌آورد. تلخیص این مواد بسیار مشکل است و ممکن است به ساختار نانولوله صدمه بزند.

۳. آماده‌سازی نانوسیالات

معمولاً برای تهیه نانوسیال‌ها دو فرایند عمده وجود دارد که به ترتیب عبارت‌اند از:

۱. روش یک‌مرحله‌ای

۲. روش دو‌مرحله‌ای

۳-۱. روش یک‌مرحله‌ای

در این روش تولید نانوذره و ورود آن درون سیال پایه در یک مرحله صورت می‌گیرد. مثلاً برای تهیه نانوسیال مس در یک مرحله، بخار مس را - که از روش میعان بخار گاز تهیه می‌شود - مستقیماً با سیال پایه‌ای که فشار بخار کمی دارد (مثلاً اتیلن گلیکول) تماس می‌دهند و در اثر آن نانوسیال مس با خواص پایداری خوبی ایجاد می‌شود.

۳-۲. روش دو‌مرحله‌ای

مرحله نخست این روش شامل تولید نانوذرات به صورت پودر خشک است که اغلب توسط چگالش با یک گاز بی‌اثر

انجام می‌شود. در مرحله بعد، نانوذرات تولیدشده در سیال پخش می‌گردند. نکته اساسی در این روش تجمع نانوذرات بر اثر چسبندگی آنها به یکدیگر است که از معایب آن به‌شمار می‌آید. در این روش، برای پراکندن ذرات و کاهش کلوخه‌شدن آنها از تجهیزات آلتراسونیک استفاده می‌شود. روش‌های تک‌مرحله‌ای و دو‌مرحله‌ای برای نانوذرات اکسیدی خوب عمل می‌کنند، در حالی که برای نانوذرات فلزی کمتر مفیدند.

۴. ویژگی‌ها و خواص نانوسیالات

برای نانوسیالات ویژگی‌های زیر مشاهده شده است:

۱. مهم‌ترین ویژگی مشاهده‌شده در نانوسیالات، افزایش استثنائی و دور از انتظار ضریب هدایت حرارتی آنهاست. این افزایش عمدتاً به فاکتورهایی چون شکل و ابعاد ذرات، درصد حجمی ذرات در محلول و ویژگی‌های حرارتی نانوذرات و سیال پایه بستگی دارد [۳].

۲. افزایش غیرعادی ویسکوزیته نانوسیال نسبت به سیال پایه که توسط محققان مشاهده شده است. محاسبه ویسکوزیته نانوسیالات برای به‌دست‌آوردن قدرت مناسب پمپاژ به‌علاوه ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی مانند اعداد پرانتل و رینولدز (توابع ویسکوزیته) مورد نیاز می‌باشد [۴].

۴-۱. ضریب هدایت حرارتی

از میان خواص فیزیکی نانوسیالات، ضریب هدایت حرارتی پیچیده‌ترین و مهم‌ترین خاصیت محسوب می‌شود. با تولید سوسپانسیون برخی از نانوذرات در سیالات گرمایشی یا سرمایشی، عملکرد سیال به‌میزان قابل توجهی بهبود می‌یابد. دلایل اصلی این اتفاق را نیز می‌توان بدین قرار تشریح کرد:

۱. نانوذرات معلق‌شده مساحت سطح و ظرفیت گرمایی سیال را بالا می‌برند.

۲. نانوذرات معلق شده ضریب هدایت حرارتی مؤثر را افزایش می‌دهند.

۳. اثر متقابل و برخورد بین ذرات و سیال تقویت می‌شود.

۴. نوسان و آشفتگی سیال تشدید می‌شود.

۵. پراکندگی نانوذرات گرادیان عرضی دما را مسطح می‌کند.

بنابر نتایج تجربی پژوهشگران، ضریب هدایت حرارتی نانوسیالات به ضریب هدایت حرارتی نانوذرات اعم از فلزی یا اکسیدی و همچنین به شدت به کسر حجمی نانوذرات معلق در نانوسیال وابسته می‌باشد. جدول‌های ۲، ۳ و ۴ خلاصه برخی از مطالعات تجربی ضریب هدایت حرارتی نانوسیالات را نشان می‌دهند [۵-۷]. جدول ۵ نیز حاوی تعدادی از مدل‌های اصلی مورد استفاده برای تخمین ضریب هدایت حرارتی بر اساس موارد ذیل می‌باشد [۶]:

الف) مدل‌های استاتیک که نانوذرات در سیال پایه ساکن فرض می‌شوند و ضریب هدایت حرارتی پیش‌بینی شده با مدل‌های هدایت مبنا مانند ماکسول، هامیلتون - کراسر و جز این‌ها با استفاده از ضریب هدایت اجزای اصلی فاز و کسرهای حجمی

ب) مدل‌های دینامیک بر پایه حرکت براونی و معتبر برای انرژی انتقال یافته از طریق برخورد بین نانوذرات

۴-۲. روش‌های اندازه‌گیری آزمایشگاهی

سه روش عمده برای اندازه‌گیری ضریب هدایت حرارتی به روش آزمایشگاهی وجود دارد. این روش‌ها به ترتیب عبارتند از: روش سیم داغ گذرا، روش سطوح موازی پایدار^{۱۰} و نهایتاً روش نوسان دمایی^{۱۱}.

۴-۲-۱. روش سیم داغ گذرا

شواهد نشان می‌دهند که هدایت گرمایی گذرا در سوسپانسیون‌ها تطابق خوبی با روش‌های کلاسیک در تخمین ضریب هدایت گرمایی مؤثر دارد و می‌تواند افزایش

قابل توجه انتقال گرما را توجیه کند. این روش اساساً گونه‌ای از روش کلاسیک است که برای هدایت گرمایی در محیط‌های متخلخل کاربرد دارد [۸]. در فرمولاسیون مربوطه ثابت شده است که هدایت گرمایی گذرا در سوسپانسیون‌ها نه تنها به وسیله هدایت گرمایی مؤثر کنترل می‌شود، که ضریب انتقال گرمای جامد - سیال نیز بر آن اثر دار است. روش سیم داغ یک روش استاندارد دینامیکی گذرا براساس اندازه‌گیری افزایش دما در فاصله‌ای مشخص از منبع حرارتی خطی (سیم داغ) جاسازی شده در ماده مورد آزمایش است. اگر فرض کنیم منبع حرارتی در امتداد طول نمونه تحت آزمایش یک خروجی ثابت و یکنواخت داشته باشد، ضریب هدایت حرارتی به صورت مستقیم از نتایج تغییر دما در فاصله زمانی معلوم قابل استنتاج می‌باشد [۹]. روش کاوشگر^{۱۲} سیم داغ به عنوان اصل روش سیم داغ گذرا استفاده می‌شود. در اینجا سیم حرارتی به علاوه حسگر دما (ترموکوپل) در یک کاوشگر قرار داده شده که به صورت الکتریکی سیم داغ و حسگر دما مورد آزمایش را ایزوله می‌کند [۱۰].

۴-۲-۲. روش سطوح موازی پایدار

و ننگ هدایت گرمایی مؤثر را با استفاده از روش s-s اندازه‌گیری کرده است [۱۱]. اگرچه این روش از نظر تئوری ساده به نظر می‌رسد، اما از نظر عملی دشوار است. چون نیاز به محافظ گرمایی برای حذف جریان گرمای نهان دارد، سیستم باید از نظر الکتریکی کنترل شود تا شرایط پایدار در طول آزمایش برقرار شود و نیز از انتقال گرما به طریق جابه‌جایی صرف‌نظر می‌شود [۵].

۴-۲-۳. روش نوسان دمایی

این روش نخستین بار توسط روتزل ارائه شد [۱۲] و سپس به وسیله زارنسکی و روتزل گسترش یافت [۱۳]. این روش صرفاً حرارتی است و اجزای الکتریکی سیستم از نمونه مورد آزمایش زوده می‌شوند. بنابراین حرکت یون‌ها اندازه‌گیری را تحت تأثیر قرار نمی‌دهد. این روش یک روش مناسب



برای بررسی اثر دما بر هدایت حرارتی است [۱۴]. ماسودا و همکاران نخستین کسانی بودند که در سال ۱۹۹۳ ویسکوزیته بعضی از نانوسیالات با سیال پایه آب در دماهای متغیر از دمای محیط تا ۳۴۰ کلوین را اندازه‌گیری کردند [۱۵]؛ از بعضی داده‌ها برای نانوسیال آلومینا به‌وسیله پاک و چو [۱۶] پیروی می‌کرد. ونگ و همکاران [۱۷] با استفاده از سه روش مختلف پراکندگی بعضی داده‌های نانوسیالات اکسید آلومینیوم - آب و اکسید آلومینیوم - اتیلن گلیکول را در دمای محیط به‌دست آوردند. اخیراً میر و همکاران [۱۸] تعدادی از داده‌های جدید ویسکوزیته وابسته به دمای نانوسیال اکسید آلومینیوم - آب با ϕ نسبتاً بالا را به‌دست آورده‌اند. اجها و همکاران [۱۹] در سال ۲۰۱۰ م گزارش کردند که نانوسیال اکسید روی - آب که بدون هیچ‌گونه سورفکتانت آماده شده بود در بعضی دمای یکسان گرمایش یا سرمایش، اختلافاتی در ویسکوزیته نشان داد. این پدیده که به‌عنوان پسماند در ویسکوزیته نامیده می‌شود [۲۰]، هنگام استفاده از سورفکتانت مانع از حصول اطمینان از پراکندگی کامل نانوذرات اکسید روی گردید. گزارش‌هایی در مورد افزایش و کاهش در ویسکوزیته نسبی با دما وجود دارد [۲۱-۲۱].

صرف‌نظر از این مسائل، لنگو و زیلیو [۲۳] در سال ۲۰۱۱ م و چن و همکاران [۲۴] در سال ۲۰۰۷ م گزارش کردند که دما مستقل از ویسکوزیته نسبی نانوسیالات می‌باشد. به‌علت وابسته‌بودن قدرت پمپاژ به ویسکوزیته علاوه بر ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی و اعداد رینولدز و پراتل، ویسکوزیته پارامتر مهمی در طراحی نانوسیالات برای استفاده در جریان و انتقال حرارت در تجهیزات حرارتی یا سیستم‌هایی مانند مبدل‌های حرارتی یا سیستم‌های سرمایش می‌باشد. در جریان آرام، افت فشار با ویسکوزیته تناسب مستقیم داشته و ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی نیز تحت تأثیر ویسکوزیته می‌باشد. بنابراین ویسکوزیته به اهمیت ضریب هدایت حرارتی در سیستم‌های مهندسی شامل جریان سیال می‌باشد [۲۵]. برخی مدل‌های رایج

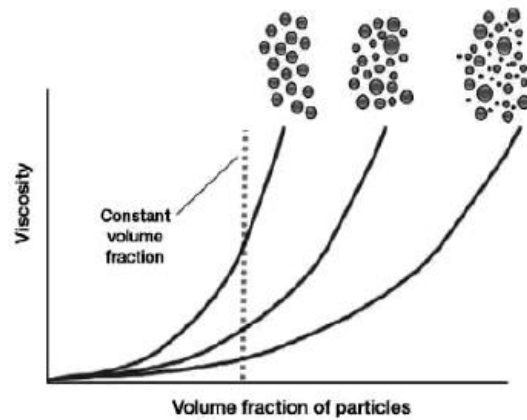
(مانند مدل اینشتین) برای پیش‌بینی ویسکوزیته نانوسیالات که خلاصه تعدادی از آنها در جدول ۶ آمده است، تنها کسر حجمی نانوذرات را در نظر می‌گیرند در حالی که باید تأثیر پارامترهای دیگری مانند دما، اندازه و شکل ذره و جز این‌ها هم باید بررسی شود. تعدادی از پارامترهای مهم و مؤثر در ویسکوزیته نانوسیالات عبارت‌اند از [۶]:

الف) دما: با افزایش دما برهم‌کنش‌های بین‌مولکولی بین نانوذرات و سیال و همچنین ملکول‌های سیال کاهش می‌یابد. بنابراین ویسکوزیته نانوسیال با افزایش دما کاهش می‌یابد.

ب) اندازه و شکل ذره: مطالعاتی درباره اثر شکل ذره روی ویسکوزیته نانوسیال انجام شده است. ثابت نگاه‌داشتن جرم ذرات در سوسپانسیون، کاهش اندازه ذره منجر به افزایش تعداد ذره می‌شود که آن‌هم سبب برهم‌کنش‌های بیشتر بین ذرات و افزایش مقاومت در برابر جریان و در نتیجه افزایش ویسکوزیته می‌شود.

ج) توزیع اندازه ذره: در کسر حجمی ثابت، نانوسیالات با توزیع گسترده ذره در مقایسه با نانوسیالات با توزیع ذره دارای گستردگی کمتر، (شکل ۲) فضای آزاد بیشتری برای حرکت پیرامونی داشته و به‌راحتی در نمونه جریان می‌یابند که مفهوم آن داشتن ویسکوزیته پایین‌تر می‌باشد.

با توجه به مطالعات انجام‌شده، با افزایش غلظت ذره و در نتیجه افزایش تعداد ذرات، ویسکوزیته نانوسیالات زیاد می‌شود. البته باید توجه داشت که همیشه با افزایش غلظت نانوذرات ویسکوزیته افزایش نمی‌یابد. مثلاً حجت و همکاران [۲۸] در سال ۲۰۱۱ ویسکوزیته نانوذرات $\gamma-Al_2O_3$ ، TiO_2 و CuO در محلول رقیق کربوکسی متیل سلولز را در دماهای مختلف اندازه‌گیری کردند. آنها دریافتند که ویسکوزیته نانوسیالات و سیال پایه آنها تابعی از دما و غلظت ذره می‌باشد. همچنین مشاهده کردند که ویسکوزیته ظاهری نانوسیالات $\gamma-Al_2O_3$ و TiO_2 با افزایش غلظت نانوذره زیاد می‌شود، اما ویسکوزیته نانوسیال CuO مستقل از غلظت نانوذره می‌باشد.



شکل ۲. ویسکوزیته در برابر کسر حجمی نانوسیالات با توزیع اندازه مختلف ذره

۵. برخی از مدل‌های جدید تجربی و تئوری

ضریب هدایت حرارتی و ویسکوزیته نانوسیالات

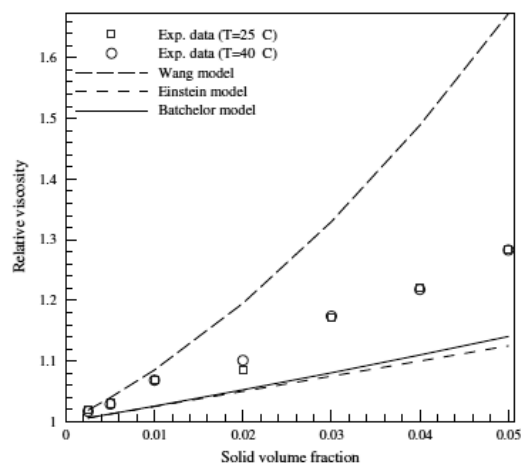
همت اسفه و همکارش [۲۹] در سال ۲۰۱۴ آثار دما و کسرهای حجمی مختلف بر ویسکوزیته دینامیکی نانوسیال ZnO-EG را به صورت تجربی بررسی کردند. آنها ویژگی‌های ویسکوزیته نانوسیال اکسید روی - اتیلن گلیکول با توسعه یک معادله رگرسیون، از جمله اثر غلظت ذره و دمای سیال مورد مطالعه قرار دادند. در این مطالعه اندازه‌گیری ویسکوزیته نانوسیال اکسید روی - اتیلن گلیکول با قطر متوسط ۱۸ نانومتر ذرات اکسید روی در غلظت‌های حجمی و دماهای مختلف انجام شد. معادله زیر ناشی از تجزیه و تحلیل رگرسیون نتایج ویسکوزیته در دماها و غلظت‌های مختلف با میانگین انحراف ۲ درصد می‌باشد.

$$\frac{\mu_{nf}}{\mu_{bf}} = 0.9118 \text{Exp}(5.49\phi - 0.00001359T^2) + 0.0303 \text{Ln}(T)$$

آنها دریافتند که معمولاً ویسکوزیته دینامیکی با افزایش قابل توجه و با دما کاهش اندکی دارد. شکل ۳ مقایسه ویسکوزیته نسبی نسبت به ϕ برای داده‌های تجربی در دو دمای مختلف و مدل‌های تئوری را نمایش می‌دهد. همان‌گونه که در این شکل مشاهده می‌شود، هیچ‌یک از مدل‌های تئوری توانایی پیش‌بینی درست ویسکوزیته

ZnO/EG را در هیچ‌کدام از کسرهای حجمی نانوذرات جامد در نظر گرفته شده ندارند. این مقایسه آشکار می‌کند که مدل‌ها در تخمین داده‌های تجربی خوب عمل نمی‌کنند، به گونه‌ای که در ماکزیمم غلظت نانوسیال مانند ۰/۴ درصد اختلاف قابل توجهی در حدود ۴۰ درصد بین داده‌های تجربی و مدل یو - چوی وجود دارد. واجها و همکاران [۳۰] در سال ۲۰۰۹ برای تعیین تجربی ضریب هدایت حرارتی نانوسیالات اکسید آلومینیوم، اکسید مس و اکسید روی در سیال پایه اتیلن گلیکول و آب، آنها را تا کسر حجمی ۱۰ درصد و محدوده دمای ۲۹۸ تا ۳۶۳ کلوین مورد آزمایش انجام دادند. نتایج آنها نشان داد که ضریب هدایت حرارتی نانوسیالات با افزایش کسر حجمی نانوذرات و دما در مقایسه با سیالات پایه افزایش نشان می‌دهد. ضریب هدایت حرارتی نانوسیال اکسید آلومینیوم با $(\phi = 6\%)$ در سیال پایه ۶۰:۴۰ آب - اتیلن گلیکول به صورت مجذور دما در محدوده دمای آزمایش افزایش نشان می‌دهد. البته باید توجه کرد که مقادیر ضریب هدایت حرارتی پیش‌بینی شده با رابطه هامیلتون - کراسر (H-C) کمتر می‌باشد [۳۱]. با افزایش دما، فاصله بین داده‌های تجربی و رابطه (H-C) بیشتر می‌شود. همت اسفه و همکاران [۳۲] در سال ۲۰۱۴ ویژگی‌های انتقال حرارت و افت فشار نانوسیال با سیال پایه آب و نانولوله‌های کربنی دو دیواره عامل‌دار شده با -COOH در جریان آشفته در غلظت‌های پایین در مبدل حرارتی دولوله‌ای را به صورت تجربی مطالعه کردند. آنها ابتدا ضریب هدایت حرارتی و ویسکوزیته نانوسیال در کسرهای حجمی مختلف اندازه گرفتند و روابط متناظر آنها را ارائه دادند. سپس انتقال حرارت و افت فشار نانوسیال عبوری از مبدل حرارتی دو لوله‌ای را مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج نشان داد که حتی استفاده از غلظت پایین نانوسیال مانند ۰/۴ درصد منجر به افزایش قابل توجهی در بازده انتقال حرارت تا ۳۲ درصد در مقایسه با آب مقطر می‌شود. به عبارت دیگر در اثر استفاده از کسر حجمی ۰/۴ درصد افت فشار تا ۲۰ درصد زیاد

می‌شود. نهایتاً تحلیل داده‌های انتقال حرارت و افت فشار از طریق ضریب عملکرد حرارتی آشکار کرد که با وجود امتیاز منفی افت فشار، نانوسیال با سیال پایه آب و نانولوله‌های کربنی دو دیواره عاملدارشده با COOH- با کسر حجمی $0/4$ درصد انتخاب خوبی برای استفاده در مبدل حرارتی دو لوله‌ای می‌باشد. آنها ضریب هدایت حرارتی نمونه‌ها را در محدوده دمایی 300 تا 340 درجه سانتی‌گراد اندازه‌گیری کردند.



شکل ۳. مقایسه بین داده‌های تجربی و مدل‌های تئوری ویسکوزیته در کسرهای حجمی مختلف

وجود دارد. آنها دریافتند که با افزودن $2/5$ درصد نانولوله کربنی، ضریب هدایت حرارتی سیال پایه (اتیلن گلیکول) تا 20 درصد افزایش می‌یابد.

۶. جمع‌بندی

در این مقاله خلاصه‌ای از موارد مطرح در زمینه ساخت، استفاده و تغییرات ایجادشده به‌وسیله نانوسیالات در خواص فیزیکی سیالات پایه ارائه شد. هرچند اطلاعات در دسترس، اطلاع سودمندی درباره خواص نانوسیال و مزایای انتقال حرارت آنها در اختیار قرار می‌دهند، اما هنوز به انجام تحقیقات بیشتری در این زمینه نیاز است و توسعه این میدان با چالش‌هایی روبروست. تعدادی از مهم‌ترین آنها به اجمال ارائه می‌شود:

(الف) بهبود روش‌های ترکیب موجود و تجارتهای کردن آنها یا توسعه روش‌های جدید برای ترکیب و پراکنده‌سازی نانوذرات که توانایی مطالعه سیستماتیک نانوسیالات را فراهم کند.

(ب) توسعه روش‌های فرایندی که اجازه ترکیب مقادیر زیاد نانوذرات را با عدم خوشه‌ای و کلوخه‌ای شدن بدهد.

(ج) داده‌های تجربی خواص فیزیکی نانوسیالات به‌ویژه ضریب هدایت حرارتی پراکنده‌گی زیادی دارند. هرچند این اطلاعات، آگاهی خوبی درباره خواص نانوسیال و مزایای انتقال حرارتی آنها ارائه می‌دهند، اما هنوز نیاز به تحقیق بیشتری در این زمینه احساس می‌شود.

(د) توزیع اندازه نانوذرات و انباشتگی آنها در سوسپانسیون‌ها به‌ندرت گزارش شده‌اند. این عدم گزارش‌دهی را می‌توان به‌دشواری در تشخیص خاصیت سوسپانسیون‌های با غلظت بالای نانوذرات نسبت داد. مثلاً روش پراکنده‌گی نور که در همه غلظت‌های بالای ذرات یا ضعیف عمل می‌کند یا اصلاً کار نمی‌کند.

(ه) اگرچه تعداد مدل‌های پیش‌بینی ضریب هدایت حرارتی نانوسیالات زیادند، اما سازوکار افزایش ضریب هدایت حرارتی هنوز مبهم است و در آینده نیازمند مطالعات

امراللهی و همکاران [۳۳] در سال 2008 ، آثار دما، کسر حجمی نانوذره و زمان ارتعاش آلتراسونیک روی خواص ترموفیزیکی سوسپانسیون نانولوله کربنی (نانوسیال کربن) شامل ضریب هدایت حرارتی، ظرفیت گرمایی حجمی را به‌صورت تابعی از زمان عملیات آلتراسونیک، دما و کسر حجمی نانوذره و با استفاده از روش لایه‌نازک^{۱۳} اندازه‌گیری و مشاهده کردند که بعد از استفاده از شکننده آلتراسونیک تعداد ذرات کلوخه‌شده به‌صورت قابل توجهی کاهش و ضریب هدایت حرارتی با زمان سپری‌شده در عملیات آلتراسونیک افزایش یافت. کلوخه‌شدن نانولوله‌های کربنی به‌صورت میکروسکوپی تأیید شد. وابستگی شدیدی بین ضریب هدایت حرارتی مؤثر به دما و کسر حجمی، حرکت براونی و پتانسیل بین ذره که در حرکت ذره مؤثر است

محاسباتی برای درک تمام ضرایب مؤثر در افزایش انتقال حرارت می‌باشد.

استفاده از نانوسیالات در گسترده تنوع کاربردها امیدبخش است. اما پیشرفت در این میدان به‌دلائل ذیل با کندی مواجه بوده است:

الف) عدم سازگاری نتایج حاصل توسط محققان

ب) نبود روابط تئوری معین و سازوکارهای معتبر برای تغییرات خواص. با توجه به اینکه ضریب هدایت حرارتی نانوذرات فلزی ۱۰۰ بار بزرگتر از نانوذرات اکسیدی است، در آینده برای بررسی افزایش انتقال حرارت در رژیم‌های آرام، گذرا و آشفته، باید از نانوسیالات دارای نانوذرات فلزی با هندسه‌ها و غلظت‌های مختلف استفاده شود.

ج) به‌عنوان یک چالش فنی، بتوان سوسپانسیونی همگن با پایداری طولانی‌مدت نانوذرات معلق در نانوسیال و عدم رسوب و خوشه‌ای شدن آنها (به‌علت آثار متقابل نیروی خیلی قوی واندروالس) تهیه نمود. توجه به این نکته لازم است که رفتار پراکندگی نانوذرات با دوره زمانی تحت تأثیر قرار می‌گیرد که از نتایج آن افت ضریب هدایت حرارتی بعد از گذشت یک دوره زمانی می‌باشد.

د) افزایش افت فشار و قدرت پمپاژ پیوند نزدیکی با هم دارند. افزایش افت فشار منجر به افزایش قدرت مورد نیاز برای پمپاژ می‌شود. افزایش افت فشار در طی جریان سردکننده‌ها، از جمله پارامترهای مهم در محاسبه کارایی نانوسیالات مورد استفاده می‌باشد. چگالی و ویسکوزیته سردکننده تحت تأثیر افت فشار سردکننده هستند. انتظار می‌رود سردکننده‌های با چگالی و ویسکوزیته بالاتر، افت

فشار بیشتری را تجربه کنند که این از معایب نانوسیالات مورد استفاده می‌باشد.

ه) هرچند نتایج حاصل از آزمایش‌ها در غلظت‌های پایین (به‌عنوان مثال از ۰/۲ درصد تا ۲ درصد کسر حجمی برای نانوسیال آب - دی‌اکسید تیتانیوم) حاکی از افزایش ضریب انتقال حرارت می‌باشد، لکن در غلظت‌های نسبتاً بالا (۲ درصد برای نانوسیال آب - دی‌اکسید تیتانیوم) ضریب یادشده نسبت به سیال پایه کاهش نشان می‌دهد.

و) نقطه ضعف دیگر نانوسیالات، عملکرد حرارتی در ناحیه کاملاً توسعه‌یافته است. براساس نتایج تجربی گزارش شده، ضریب انتقال حرارت نانوسیالات در اعداد رینولدز پایین، بیشترین مقدار را در طول ورودی لوله دارد و بعد از آن با فاصله‌گرفتن در طول محور کاهش می‌یابد و نهایتاً در ناحیه کاملاً توسعه‌یافته به مقدار ثابتی می‌رسد.

ز) هرچند ویسکوزیته نانوسیالات هماهنگ با افزایش غلظت ذرات بالا می‌رود، اما این افزایش نمی‌تواند نامحدود باشد. مثلاً در مبدل‌های حرارتی صنعتی، که حجم‌های بزرگی از نانوسیالات در جریان آشفته کاملاً توسعه‌یافته مورد نیاز هستند، جانشینی سیالات رایج با نانوسیالات نامساعد به‌نظر می‌رسد.

ح) براساس یافته‌ها، گرمای ویژه نانوسیالات از سیالات پایه کمتر می‌باشد. یک خنک‌کننده ایده‌آل باید دارای گرمای ویژه بالایی باشد تا قادر به دفع حرارت بیشتری باشد. (ت) هزینه بالای تولید نانوسیالات به‌علت نیاز به استفاده از تجهیزات پیشرفته و پیچیده از دیگر چالش‌های استفاده از آنها در صنعت می‌باشد.

جدول ۲. مطالعات تجربی ضریب هدایت حرارتی برخی از نانوسیالات

سیال پایه با ضریب هدایت حرارتی	نانوذرات، قطر و غلظت متوسط	روش آماده‌سازی نانوسیال	ماکزیمم نسبت ضریب هدایت حرارتی
آب، ۰/۶۱۳	$Al_2O_3 < 50nm$ تا ۴/۳ درصد کسر حجمی	دو مرحله‌ای	۱/۰۸
آب، ۰/۶۱۳	$CuO < 50nm$ تا ۳/۴ درصد کسر حجمی	دو مرحله‌ای	۱/۱۰



جدول ۲. مطالعات تجربی ضریب هدایت حرارتی برخی از نانوسیالات (ادامه)

سیال پایه با ضریب هدایت حرارتی	نانوذرات، قطر و غلظت متوسط	روش آماده‌سازی نانوسیال	ماکزیمم نسبت ضریب هدایت حرارتی
آب، ۰/۶۱۳	$C - MWNT < 50nm, 5\mu m 3\mu m$ درصد کسر حجمی ۰/۶	دو مرحله‌ای	۱/۳۸
آب، ۰/۶۱۳	$TiO_2, 15nm$ تا ۵ درصد کسر حجمی	دو مرحله‌ای	۱/۳۰
آب، ۰/۶۱۳	$Cu, 18nm$ تا ۵ درصد کسر حجمی	تک‌مرحله‌ای	۱/۶۰
α Olephin	$CNT, 25x 50000nm$ تا ۱ درصد کسر حجمی	دو مرحله‌ای	۲/۵۰
اتیلن گلیکول، ۰/۲۵۲	$Al_2O_3 < 50nm$ تا ۵ درصد کسر حجمی	دو مرحله‌ای	۱/۱۸
اتیلن گلیکول، ۰/۲۵۲	$CuO, 35nm$ تا ۴ درصد کسر حجمی	دو مرحله‌ای	۱/۲۱
اتیلن گلیکول، ۰/۲۵۲	$Cu, 10nm$ تا ۰/۵ درصد کسر حجمی	تک‌مرحله‌ای	۱/۴۱
روغن ترانس، ۰/۱۴۵	Cu تا ۱۰۰ نانومتر تا ۷/۶ درصد کسر حجمی	دو مرحله‌ای	۱/۴۳
آب، ۰/۶۱۳	$Cu, 75-100nm$ ، ۱/۰ درصد کسر حجمی	تک‌مرحله‌ای	۱/۲۳

جدول ۳. خلاصه تعدادی از مطالعات تجربی ضریب هدایت حرارتی نانوسیالات

سیال پایه	نانوذرات و اندازه آنها	کسر حجمی نانوذرات	یافته‌های آزمایش
روغن	CNT $L = 50\mu m$ $D = 25nm$	۰/۳ تا ۱ درصد	K بطور غیرعادی بزرگتر از پیش بینی‌های تئوری بوده و تغییرات آن با بارگذاری نانولوله غیر خطی می‌باشد.
آب / اتیلن گلیکول / decene	CNT یا نیتریک اسید کم $L = 30\mu m$ $D = 15nm$	۰/۳ تا ۱/۵ درصد	K با افزایش کسر حجمی زیاد می‌شود. افزایش نسبت ضرایب هدایت حرارتی با افزایش k سیال پایه کاهش می‌یابد.
EG	Fe $D = 10nm$	۰/۵۵٪	۱۸٪ افزایش در k مشاهده شد.
آب	TiO_2 کروی شکل $L = 40\mu m$ $D = 10nm$	۱/۵ تا ۵ درصد	ماکزیمم افزایش k ۳۳٪
رقیق‌کننده Toluene	TiO_2 کروی شکل $D = 1.65nm$	۰/۰۰۳ درصد	K با افزایش غلظت ذره و افزایش k ذره زیاد شد



جدول ۳. خلاصه تعدادی از مطالعات تجربی ضریب هدایت حرارتی نانوسیالات (ادامه)

سیال پایه	نانوذرات و اندازه آنها	کسر حجمی نانوذرات	یافته‌های آزمایش
آب	TiO_2 کروی شکل $D = 20nm$	(۱۰-۴۰)٪	
آب	CuO $D = 33nm$	(۰/۵-۴/۵)٪	
آب	Al_2O_3 $D = 30nm$	(۰/۰۱-۰/۳)٪	K نانوسیال رقیق اکسید آلومینیوم - آب تقریباً بصورت خطی با غلظت افزایش یافت
آب/ اتیلن گلیکول	Al_2Cu $D : 30-105nm$	(۱-۲)٪	درصد حجمی بالاتر نانوذرات، k_{eff} بزرگتر و اندازه پخش ذرات کوچکتر و افزایش k بیشتر بود.
آب/ اتیلن گلیکول	Ag_2Al $D : 30-120nm$	(۱-۲)٪	

جدول ۴. مروری بر نتایج ضریب هدایت حرارتی نانوسیالات از مقاله‌های گوناگون [۱۰]

ذره	سیال پایه	اندازه متوسط ذره برحسب نانومتر	درصد کسر حجمی	درصد افزایش k
Cu	اتیلن گلیکول	۱۰	۰/۳	۴۰
Fe	اتیلن گلیکول	۱۰-۲۰	۰/۵۵	۱۸
Au	آب	۶۰-۸۰	۰/۰۲۶	۲۱
Ag	آب		۰/۰۰۱	۱۷
Al_2O_3	آب	۱۳	۴/۳	۳۰
Al_2O_3	آب	۳۳	۴/۳	۱۵
CuO	آب	۳۶	۳/۴	۱۲
SiC	آب	۲۶	۴/۲	۱۶
TiO_2	آب	۱۵	۵	۳۰
MWCNT	روغن مصنوعی	۲۵ نانومتر قطر و ۵۰ میکرومتر طول	۱	۱۵۰
MWCNT	آب/ اتیلن گلیکول / Decene	۱۵ نانومتر قطر و ۳۰ میکرومتر طول	۱	۲۰/۱۳/۱۷



جدول ۵. تعدادی از مدل‌های اصلی مورد استفاده برای تخمین ضریب هدایت حرارتی [۹]

مدل	رابطه
مدل ماکسول	$\frac{K_{eff}}{K_m} = 1 + \frac{3(\alpha-1)v}{(\alpha+2) - (\alpha-1)v}$
مدل هامپلتون - کراسر	$\frac{K_{eff}}{K_m} = \frac{\alpha + (n-1) - (n-1)(1-\alpha)v}{\alpha + (n-1) + (1-\alpha)v}$
R_k مقاومت کاپیتزا ^{۱۴} هستند و $\beta = R_k K_m / R_2$	$\frac{K_{eff}}{K_m} = \frac{(\alpha(1+2\beta)+2) + 2v(\alpha(1-\beta)-1)}{(\alpha(1+2\beta)+2) - v(\alpha(1-\beta)-1)}$
مدل جانگ و چوی	$K_{eff} = K_m + (1-v) + K_2 v + v h \delta_T$
مدل پراشر و همکاران	$\frac{K_{eff}}{K_m} = \left\{ 1 + A R_e^m \text{Pr}^{0.333} \Phi [2(1-v)/(2+v)] \right\}$

در این روابط k_{eff} ضریب هدایت حرارتی موثر مخلوط جامد - سیال، $a = K_2 / K_m$ ، K_2 به ترتیب ضریب هدایت حرارتی سیال پایه و ذره، n ضریب شکل تجربی و u کسر حجمی، h ضریب انتقال حرارت، δ_T ضخامت لایه هستند.

جدول ۶. برخی از مدل‌های مورد استفاده برای پیش‌بینی ویسکوزیته نانو سیالات [۲۶-۲۷]

مدل	رابطه	ملاحظات
اینشتین	$\mu = (1 + 2.5\phi)\mu_f$	ذرات کروی و $\phi < 0.02$
برینکمن	$\mu = \mu_f \frac{1}{(1-\phi)^{2.5}}$	فرمول بسط داده شده اینشتین برای $\phi < 0.04$
فرانکل و اکریووس ^{۱۵}	$\mu = \mu_f \frac{9}{8} \frac{\left[\left(\frac{\phi}{\phi_m} \right)^{\frac{1}{s}} \right]}{1 - \left(\frac{\phi}{\phi_m} \right)^{\frac{1}{s}}}$	ϕ_m ضریب تجربی می‌باشد
لاندگرن ^{۱۶}	$\mu = (1 + 2.5\phi + 6.25\phi^2 + o(\phi^3))\mu_f$	سری تیلور برای ϕ



جدول ۶. برخی از مدل‌های مورد استفاده برای پیش‌بینی ویسکوزیته نانو سیالات (ادامه)

مدل	رابطه	ملاحظات
بچلر ^{۱۷}	$\mu = (1 + 2.5\varphi + 6.25\varphi^2)\mu_f$	حرکت براونی نیز در نظر گرفته شده است.
گراهام ^{۱۸}	$\mu = (1 + 2.5\varphi + \frac{4.5}{\left(\frac{h}{d_p}\right) \cdot \left(2 + \frac{1}{d_p}\right) \cdot \left(1 + \frac{1}{d_p}\right)^2})\mu_f$	با در نظر گرفتن مینیمم فاصله جدایی بین دو کره
تی سنگ و چن ^{۱۹}	$\mu = \mu_f \times 0.4513e^{0.6965\varphi}$	بعد از افزودن غیر واقعی ذرات جامد
چنگ و لائو ^{۲۰}	$\mu = 1 + 2.5\varphi + (2.5\varphi)^2 + (2.5\varphi)^3 + (2.5\varphi)^4 + (2.5\varphi)^5 + \dots$	برای جریان دوفاز با ذرات بزرگتر از ۱۰۰ نانومتر
تودا و فوروسه ^{۲۱}	$\mu = \frac{1 + 0.5k\varphi - \varphi}{(1 - k\varphi)^2(1 - \varphi)}$	برای پراکندگی غلیظ ذرات بزرگ
انگیون و همکاران ^{۲۲}	$\mu = (1.1250 - 0.0007T)\mu_f$	برای محاسبه ویسکوزیته نانو سیالات در $1\% < \varphi < 4\%$
چن و همکاران	$\mu = \mu_f \left(1 - \frac{\varphi}{\varphi_m} \left(\frac{d_a}{d}\right)^{1.2}\right)^{-(\mu)\varphi_m}$	با در نظر گرفتن توده‌ها و خوشه‌ها
نامبورو ^{۲۳}	$\log \mu = A e^{-BT}$ $A = 1.8375(\varphi)^2 - 29.643(\varphi) + 165.56$ $B = 4 \times 10^{-6}(\varphi)^2 - 0.001(\varphi) + 0.0186$	
معصومی	$\mu = \mu_f + \frac{\rho V_s d^2}{72Cl}$	با در نظر گرفتن اثر دما، چگالی نانوذره و خواص فیزیکی سیال پایه

۷. مأخذ

- [1] Choi, S. *Enhancing thermal conductivity of fluids with nanoparticles*, In Development and applications of non-newtonian flows, edited by D.A. Siginer and H.P. Wang, New York: ASME, 1995, pp. 99-105.
- [2] Hemmat, Esfe, M., S. Saedodin, O. Mahian, S. Wongwises, *Thermal conductivity of Al2O3/water nanofluids Measurement, correlation, sensitivity analysis, and comparisons with literature reports*, Springer, 2014.
- [3]. Yimin Xuan, Wilfried Roetzel, "Conceptions for Heat Transfer Correlation of Nanofluids." *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 43, 2000, pp. 3701-3707.



- [4] Praveen K. Namburu a, Devdatta P. Kulkarni a, Debasmita Misra b, Debendra K. Das, “Viscosity of copper oxide nanoparticles dispersed in ethylene glycol and water mixture.” *Exp. Therm. Fluid Sci.* 32 (2007):397–402.
- [5] Singh, A. K., “Thermal Conductivity of Nanofluids.” *Defence Science Journal*, Vol. 58, 2008, pp. 600-607.
- [6] Goharshadi, E.K., H. Ahmadzadeh, S. Samiee and M. Hadadian. "Nanofluids for Heat Transfer Enhancement-A Review " *Phys. Chem. Res.*, Vol. 1, No. 1, 2013, pp. 1-33.
- [7] Shen B. “Minimum quantity lubrication grinding using nanofluids”. PhD thesis.USA: University of Michigan; 2006.
- [8] Nield, D., and Bejan, A., *Convection in Porous Media*, Springer, 2nd ed., 1999.
- [9] Davis W. R., Hot-Wire Method for the Measurement of the Thermal Conductivity of Refractory Materials, in Maglič K D, Cezairliyan A, Peletsky V E, (Eds.) *Compendium of Thermophysical Property Measurement Methods*, Vol. 1 Survey of Measurement Techniques, 1984, New York, London, Plenum Press, p. 161.
- [10] Wechsler A. E., the Probe Method for Measurement of Thermal Conductivity in Maglič K D, Cezairliyan A, Peletsky V E, (Eds.) *Compendium of Thermophysical Property Measurement Methods*, Vol. 2 Recommended Measurement Techniques and Practices, 1992, New York, London, Plenum Press, p. 281.
- [11] Wang, X., X. Xu, S.U.S. Choi, “Thermal Conductivity of Nanoparticle–Fluid Mixture.” *Journal of Thermophysics and Heat Transfer*, Vol. 13, 1999, pp. 474– 480.
- [12] Roetzel, W., S. Prinzen, Y. Xuan, “Measurement of Thermal Diffusivity Using Temperature Oscillations”, in: C. Cremers, H. Fine (Eds.), *Thermal Conductivity*, Vol. 21, 1990, pp. 201-207.
- [13] W. Czarnetzki, W. Roetzel, Temperature Oscillation Techniques for Simultaneous Measurement of Thermal Diffusivity and Conductivity, *International Journal of Thermophysics*, Vol. 16, 1995, pp. 413–422.
- [14] Wang, Xiang-Qi, Arun S. Mujumdar, Heat Transfer Characteristics of Nanofluids: a review, *International Journal of Thermal Sciences*, Vol. 46, 2007, pp. 1-19.
- [15] H. Masuda, A. Ebata, K. Teramae, N. Hishinuma, Alteration of thermal conductivity and viscosity of liquid by dispersing ultra-fine particles (dispersion of c-Al₂O₃, SiO₂ and TiO₂ ultra-fine particles), *Netsu Bussei* 4 (4) (1993) 227–233 (in Japanese).
- [16] Pak, P.C., Y.I. Cho, Hydrodynamic and heat transfer study of dispersed fluids with submicron metallic oxide particles, *Exp. Heat Transfer* 11 (2) (1998):151-170.
- [17] Wang, X., X. Xu, S.U.-S. Choi, “Thermal conductivity of nanoparticles– fluid mixture.” *J. Thermophys. Heat Transfer* 13 (4) (1999):474–480.
- [18] Maré, T., A.G. Schmitt, C.T. Nguyen, J. Mirel, G. Roy, Experimental heat transfer and viscosity study of nanofluids: water–c Al₂O₃, in: Proc. 2nd Int. Conf. Thermal Engrg. Theory and Applications, Paper No. 93, Al Ain, United Arab Emirates, January 3–6, 2006.
- [19] Ojha, U., S. Das, S. Chakraborty, Stability, pH and viscosity relationships in zinc oxide based nanofluids subject to heating and cooling cycles, *J. Mater. Sci. Eng.* 4 (7) (2010):24–29.
- [20] Nguyen, C.T., F. Desgranges, G. Roy, N. Galanis, T. Mare´ , S. Boucher, H. Angue Mintsa, Temperature and particle-size dependent viscosity data for waterbased nanofluids – hysteresis phenomenon, *Int. J. Heat Fluid Flow* 28 (6) (2007):1492–1506.
- [21] Duangthongsuk, W., S. Wongwises, Measurement of temperature-dependent thermal conductivity and viscosity of TiO₂–water nanofluids, *Exp. Therm. Fluid Sci.* 33 (4) (2009):706–714.

- [22] Lee, S.W., S.D. Park, S. Kang, I.C. Bang, J.H. Kim, Investigation of viscosity and thermal conductivity of SiC nanofluids for heat transfer applications, *Int. J. Heat Mass Transfer* 54 (1–3) (2011) 433–438.
- [23] Longo, G.A., C. Zilio, Experimental measurement of thermophysical properties of oxide–water nanofluids down to ice-point, *Exp. Therm. Fluid Sci.* 35 (7) (2011):1313–1324.
- [24] Chen, H., Y. Ding, C. Tan, Rheological behaviour of nanofluids, *New J. Phys.* 9 (2007) 367.
- [25] Kole, M., T.K. Dey, *Exp. Therm. Fluid Sci.* 34 (2010) 677.
- [26] Goharshadi, E.K., H. Ahmadzadeh, S. Samiee and M. Hadadian. "Nanofluids for Heat Transfer Enhancement-A Review." *Phys. Chem. Res.*, Vol. 1, No. 1, June 2013, pp. 1-33
- [27] Mansour, R.B., N. Galanis, C.T. Nguyen, *Appl. Therm. Eng.* 27 (2007) 240.
- [28] Hojjat, M., S.G. Etemad, R. Bagheri, J. Thibault, *International Commun. Heat Mass Tran.* 38 (2011) 144.
- [29] Hemmat, Esfe, M., S. Saedodin, "An experimental investigation and new correlation of viscosity of ZnO–EG nanofluid at various temperatures and different solid volume fractions", *Journal of Experimental Thermal and Fluid Science* 55 (2014):1–5.
- [30] Ravikanth, S. Vajjha, Debendra K. Das, "Experimental determination of thermal conductivity of three nanofluids and development of new correlations", *International Journal of Heat and Mass Transfer* 52 (2009):4675–4682
- [31] Hamilton, R., O. Crosser, "Thermal conductivity of heterogeneous two-component systems", *I and EC Fundamentals* 125 (3) (1962):187–191.
- [32] Hemmat, Esfe, M., S. Saedodin, O. Mahian, S. Wongwises, "Heat transfer characteristics and pressure drop of COOH-functionalized DWCNTs/water nanofluid in turbulent flow at low concentrations", *International Journal of Heat and Mass Transfer* 73 (2014):186–194.
- [33] Amrollahi, A., A. AHamidi and A.M. Rashidi, "The effects of temperature, volume fraction and vibration time on the thermo-physical properties of a carbon nanotube suspension (carbon nanofluid), *Nanotechnology* 19 (2008) 315701 (8pp).
- [34] Goharshadi, E. K., H. Ahmadzadeh, S. Samiee and M. Hadadian, "Nanofluids for Heat Transfer Enhancement-A Review". *Phys. Chem. Res.*, Vol. 1, No. 1, June 2013 PP. 1-33.
- [35] Saidur, R., K.Y. Leong, H.A. Mohammad, "A review on applications and challenges of nanofluids." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 15 (2011):1646–1668.

پی نوشت

-
1. Al₂O₃
 2. APS
 3. α Al₂O₃
 4. g Al₂O₃
 5. Corundum
 6. ZnO
 7. Functional
 8. Fe₂O₃
 9. Transient Hot Wire (THW)
 10. Steady State Parallel Plate
 11. Temperature Oscillation
 12. Probe

-
13. Thin Layer
 14. Kapitza
 15. Frankel and Acrivos
 16. Lundgren
 17. Batchlor
 18. Graham
 19. Tseng and Chen
 20. Cheng and Law
 21. Toda and Furuse
 22. Nguyen et al.
 23. Namburu

