

نگاهی بر خواص، عملکرد و پایداری نانوسیال‌ها و فروسیال‌ها

مجید ریحانی^۱، آرمین عابدین^۱، علی ابراهیمی ممقانی^۲ و *^۱ کارشناس ارشد مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد نور^۲ باشگاه پژوهشگران جوان و نخبگان، واحد تهران جنوب، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران

*مسئول مکاتبات: a.ebrahimimamaghani@modares.ac.ir

چکیده

واژگان کلیدی

نانوسیال
فروسیال
انتقال حرارت جابه‌جایی
اکتشافات تجربی
پایداری

تاریخچه مقاله

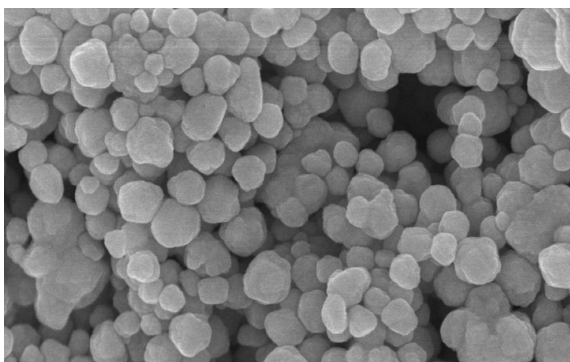
تاریخ دریافت ۱۳۹۶/۰۴/۰۴

تاریخ پذیرش ۱۳۹۶/۱۱/۰۳

بهینه‌سازی و افزایش بازده سیستم‌های انتقال حرارت، یکی از اساسی‌ترین چالش‌های مهندسان و طراحان طی سالیان اخیر بوده است. از همین رو، استفاده از نانوذرات در سیالات پایه، به‌عنوان روشی غیرفعال در جهت بهبود انتقال حرارت و کوچک‌سازی سیستم‌های گرمایشی شناخته شده است و پژوهشگران متعددی در مطالعات خود به پیش‌بینی رفتار و قابلیت‌های کاربردی آنها با انواع روش‌های نظری، عددی و آزمایشگاهی پرداخته‌اند. به همین دلیل، در این مقاله با هدف آشنایی با مبانی، سازوکار، مزایای بهره‌گیری و همچنین چالش‌های استفاده از نانوسیالات، به بررسی خواص و ویژگی‌های آنها پرداخته می‌شود. سپس برای درک صحیح از سازوکارهای انتقال حرارت، مدل‌های ارائه‌شده و جایگاه اکتشافات تجربی در این زمینه معرفی می‌شوند. در ادامه با معرفی فروسیال‌ها یا همان نانوسیال‌های مغناطیسی، به کاربردهای آنها در صنایع گوناگون اشاره می‌شود. در نهایت روش‌های بررسی و افزایش پایداری نانوسیالات به تفصیل تشریح می‌شود.

۱ مقدمه

تخمین ضریب هدایت حرارتی محلول‌هایی با ذرات میکرو و بزرگتر ارائه دادند؛ اما هیچ‌کدام از این مدل‌ها قادر به پیشگویی مقدار صحیح هدایت حرارتی نانوسیال‌ها نیستند. چون اثر اندازه در آنها لحاظ نشده است. در سال ۱۹۹۳م، چوی نانوذرات را با خواص منحصرشان در سیال پایه حل کرد و ایده نانوسیال‌ها را کشف کرد [۳]. در شکل ۱ یک تصویر از نانوسیال که با میکروسکوپ الکترونی عبوری گرفته شده است، نمایش داده شده است.



شکل ۱: تصویر میکروسکوپ الکترونی عبوری از نانوسیال [۴]

تعیین هدایت حرارتی نانوسیالات و میزان افزایش نرخ انتقال حرارت با استفاده از نانوسیالات، از جمله مباحث چالشی در استفاده از نانوسیالات است. به‌طور کلی، روش‌های تجربی در این حوزه را می‌توان به دو دسته روش‌های نوری و غیرنوری دسته‌بندی کرد. روش‌های نوری، روش‌هایی غیرتهاجمی‌اند و نسبت به روش‌های غیرنوری قدمت کمتر و دقت بالاتری دارند. مثلاً در روش نوری نانوفلش، پالس انرژی الکترومغناطیسی یک طرف نمونه را گرم می‌کند و دما به‌عنوان تابعی از زمان افزایش می‌یابد

خواص ضعیف انتقال حرارت سیالات متداول را می‌توان یکی از موانع اساسی در کارآمدسازی تجهیزات انتقال حرارت دانست، از همین رو در صنایع گوناگون برای افزایش راندمان تجهیزات انتقال حرارتی می‌توان از کوچک‌سازی (مانند تغییر در هندسه جریان) و افزایش شدت انتقال حرارت به ازای واحد سطح (مانند افزایش ضریب انتقال حرارت هدایتی سیال) استفاده کرد. یکی از شاخه‌های نانوفناوری، مربوط به استفاده از نانوذرات با خواص حرارتی بسیار بالا در سیالات پایه^۱ دارای خواص حرارتی پایین‌تر می‌شود که محصول آن سوسپانسیون با خواص حرارتی بالاتر از سیال اولیه است. به‌عبارت دیگر، سیال‌های متداول با توجه به خواص حرارتی پایین‌شان، توانایی محدودی در انتقال حرارت دارند. برعکس، فلزها دارای ضریب انتقال حرارتی تا سه برابر بیشتر از سیال‌های مذکور می‌باشند. ایده ترکیبی از این دو ماده برای تولید محیط انتقال حرارتی که مشابه سیال عمل کند و هدایت حرارتی فلزات را داشته باشد، در نهایت منجر به پیدایش نانوسیال‌ها، که شامل ذرات کوچک‌تر در ابعاد نانومتر هستند، شده است. نانوسیال از توزیع ذرات جامد با ابعاد کمتر از ۱۰۰ نانومتر در سیال‌های مورد استفاده به‌وجود می‌آید. در تهیه نانوسیال‌ها عموماً از نانوذرات فلزی یا اکسیدهای فلزی مانند مس، آلومینا، اکسید مس، اکسید تیتانیوم استفاده می‌شوند و سیال پایه، سیالات متداول مانند آب، نفت، اتیلن گلیکول و روغن‌های صنعتی می‌باشند. ازجمله دلایل انتخاب ابعاد نانو برای اندازه این ذرات، پایداری بیشتر آنها در مقایسه با ذرات بزرگتر و سطح تبادل حرارتی بیشتر همزمان با داشتن وزن کمتر است.

ابتدا ماکسول [۱] و سپس همیلتون و کراسر [۲] مدل‌های خود را برای

¹base fluids

گسترده‌ای درباره جوشش نانوسیالات با تغییر پارامترهای جنس و زبری و ترشوندگی سطح گرم‌کن، جنس و اندازه و شکل نانوذرات، نوع سیال پایه و شرایط فشار و دما، زمان و روند انجام آزمایش انجام شده است [۱۷، ۱۸]. از جمله تحقیقات کاربردی در حوزه نانوسیالات می‌توان به پژوهش میبدی و همکاران [۱۹] اشاره کرد که به بررسی تأثیر افزودن نانوسیال سیلیکا در سیال پایه مخلوط ۵۰ درصدی آب و اتیلن گلیکول بر بازدهی کالکتورهای صفحه تخت خورشیدی پرداخته‌اند. آنها به این نتیجه رسیدند برخلاف رسانایی حرارتی پایین سیلیکا، این نوع نانوسیال تأثیر مناسبی بر افزایش راندمان حرارتی کالکتور صفحه تخت خورشیدی می‌گذارد و بازدهی حرارتی را بین ۴ تا ۸ درصد برای دبی‌های مختلف افزایش می‌دهد.

۲ مزایای نانوسیال

انتقال حرارت نانوسیال نسبت به سیال پایه بهتر است؛ زیرا ذرات ریز جامد، هدایت حرارتی مخلوط را افزایش می‌دهند. چون انتقال حرارت در سطح نانوذرات اتفاق می‌افتد، استفاده از ذرات با سطح ویژه بالا مطلوب است. همچنین نانوپودرها در مقایسه با ذرات با اندازه میکرون سطح ویژه بیشتری دارند. از سوی دیگر، مومنتوم نانوذرات بسیار کم است. در نتیجه مومنتومی که آنها می‌توانند به دیوار جامد انتقال دهند بسیار کم است و احتمال سایش اجزای مبدل‌های حرارتی، خطوط لوله‌ها و پمپ‌ها را کاهش می‌دهد. این ذرات نیز قابلیت حرکت و جابه‌جایی بالایی دارند و میکرو جابه‌جایی را در سیال پدید می‌آورند و انتقال انرژی را در سیال افزایش می‌دهند. همچنین، چون این ذرات ریز هستند، وزن کمی دارند و احتمال ته‌نشینی در آنها کم است. کاهش ته‌نشینی می‌تواند مشکل استفاده از سوسپانسیون‌ها؛ یعنی نشست ذرات را برطرف نماید. مثلاً پخش ذرات در حد میکرون در میکروکانال مناسب نه‌ست و سبب گرفتگی کانال خواهد شد. در مجموع می‌توان گفت فناوری نانوسیال، صنایع را به سمت کوچک‌سازی سیستم و در نتیجه طراحی سیستم‌های تبادل حرارتی سبکتر سوق می‌دهد. مثلاً برای دو برابر شدن ضریب انتقال حرارت آب، توان پمپ باید ۱۰ برابر گردد، اما اگر یک نانوسیال با ضریب هدایت حرارتی ۳ برابر آب استفاده شود، سرعت انتقال حرارت دو برابر خواهد شد [۲۰]. برخی از مزایا و قابلیت‌های بالقوه نانوسیالات به قرار زیر است.

۱.۲ بهبود انتقال حرارت و پایداری

کاهش اندازه ذرات یک جامد که با افزایش تعداد آنها در واحد جرم همراه است، به افزایش سطح مخصوص می‌انجامد؛ به طوری که سطح مخصوص ذراتی با اندازه نانومتری در حدود ۱۰۰۰ برابر سطح مخصوص ذراتی با ابعاد میکرومتری است. با کاهش اندازه ذرات به حدود نانومتر درصد بیشتری از اتم‌های آن در نزدیکی سطح قرار می‌گیرند. سطح ذرات در انتقال حرارت مؤثر بوده و استفاده از نانوسیال به افزایش سطح انتقال حرارت منجر می‌گردد. بنابراین نانوذرات یک سطح بسیار زیاد برای انتقال حرارت ایجاد می‌کند و همین عامل مزیتی بالقوه برای نانوسیال است. مقایسه سطح ایجاد شده

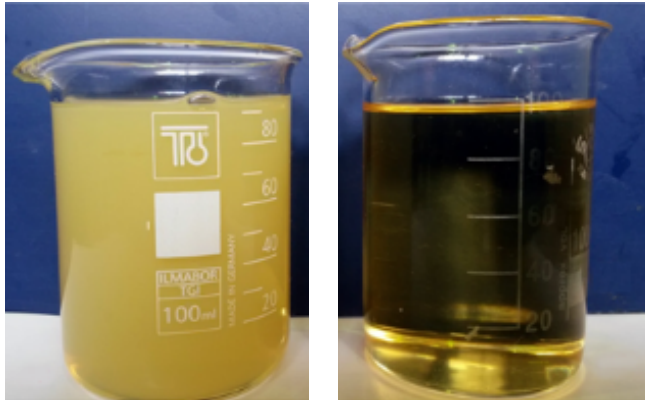
[۵]. بواونومو و همکاران از روش نانو فلش، برای محاسبه هدایت حرارتی نانوسیال آب و اکسید آلومینیم در کسر حجمی‌های مختلف استفاده کردند [۶]. روش‌های غیرنوری امکانات آزمایشگاهی ساده‌تری دارند و نسبت به روش‌های نوری پرکاربرترند. در میان تمامی روش‌ها، روش سیم داغ گذرا ساده‌ترین و پرکاربردترین روش است. ژینگ و وانگ میزان انتقال حرارت سه نمونه مختلف شامل نانولوله‌های کربنی تک‌جداره کوتاه، نانولوله‌های کربنی تک‌جداره بلند و نانولوله‌های کربنی چندجداره اضافه‌شده به آب را در دماها و کسر حجمی‌های مختلف با استفاده از روش سیم داغ گذرا مورد بررسی قرار دادند [۷].

در پژوهش‌های اخیر محققان در پی ارائه مدل‌های جدید تجربی و نظری برای ضریب هدایت حرارتی و ویسکوزیته نانوسیالات بوده‌اند. مثلاً اسفه و همکاران آثار دما و کسر حجمی‌های مختلف بر ویسکوزیته دینامیکی سیال اکسید روی - اتیلن گلیکول را به صورت تجربی بررسی کردند و با توسعه یک معادله رگرسیون، از جمله اثر غلظت ذره و دمای سیال مورد مطالعه قرار دادند [۸]. همچنین در پژوهش‌های شریعت و همکاران [۹، ۱۰] به بررسی انتقال حرارت جابه‌جایی نانوسیال آب - اکسید آلومینیم در مجراهای بیضوی با ضریب منطری‌های مختلف که تحت شار حرارتی ثابت هستند پرداختند. آنها با روش حجم محدود به گسسته‌سازی معادلات سه‌بعدی ناوراستوکس و انرژی و کسر حجمی پرداختند و برای تعیین ضریب رسانش گرمایی و ویسکوزیته دینامیکی نانوسیال، که به دما وابسته‌اند، حرکت براونی نانوذرات را در نظر گرفتند. نتایج مطالعه آنها نشان داد که در مقادیر ثابت رینولدز و ریچاردسون، با افزایش کسر حجمی، عدد ناسلت افزایش می‌یابد و با افزایش ضریب منطری، ضریب اصطکاک نیز کاهش می‌یابد. هریس و همکاران [۱۱] ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی برای نانوسیال آب - اکسید مس و اکسید آلومینیم، برای جریان آرام در لوله حلقوی با شرط مرزی دما ثابت بررسی کردند. نتایج نشان داده‌اند که ضریب انتقال حرارت کلی با افزایش عدد پکلت و همچنین غلظت افزایش یافته است و نانوسیال اکسید آلومینیم افزایش بیشتری در مقایسه با نانوسیال اکسید مس داشته است. جعفرمدار و همکاران [۱۲] در سال ۲۰۱۶ به تحلیل گرمایی و تولید آنتروپی در لوله‌های حامل جریان ضربانی نانوسیال آب - اکسید آلومینیم در لوله‌ها پرداختند و به وسیله مقایسه با نانوسیال آب - مس دریافتند که تولید آنتروپی در هر دو حالت یکسان است. در سال ۲۰۱۶ شجاعی فرد و همکاران [۱۳] به مدل‌سازی دوبعدی لوله‌های استوانه‌ای حامل جریان نانوسیال با کسر حجمی‌های مختلف پرداختند.

چون آزمایش‌های انتقال حرارت هزینه‌های بالایی دارند، از روش‌های گوناگون هوشمند از جمله شبکه‌های عصبی مصنوعی در پیش‌بینی مقادیر داده‌های آزمایش نشده نیز استفاده می‌کنند که می‌توان به مطالعه کامل و همکاران اشاره کرد که بررسی انتقال حرارت لوله‌های افقی مغروق در بسترهای سیال همراه با حباب و شن اشاره کرد [۱۴]. از سوی دیگر، مطالعاتی نیز در لوله‌های دارای مانع در مسیر جریان نانوسیال صورت گرفته است که از این میان می‌توان به لوله مجهز به نوار پیچیده [۱۵] و همچنین لوله دارای پرده داخلی [۱۶] اشاره کرد. همچنین طی یک دهه گذشته مطالعات

صرفه‌جویی قابل ملاحظه‌ای در هزینه‌های سرمایه‌گذاری و عملیاتی واحدهای صنعتی ایجاد می‌گردد [۲۱].

برای انتقال حرارت در نانوذرات با سطح پودرهای متداول میکرومتری بیانگر توانایی و قابلیت زیاد نانوذرات در افزایش انتقال حرارت و ایجاد سوسپانسیون پایدار است. گفتنی است یکی از مشکلات افزودن ذرات به اندازه میکرو به سیال پایه ته‌نشینی سریع آنهاست که با کاهش اندازه به مقیاس نانو تا حدود زیادی مرتفع می‌گردد.



(ب)

(الف)

شکل ۲: نمایی از الف) سیال پایه بدون افزودن نانوذرات (ب) نانوسیال پایدار به ازای درصد حجمی ۳ درصد [۴]

۲.۲ کاهش توان لازم برای پمپاژ سیال

در سیالات متداول حامل انرژی، افزایش میزان انتقال حرارت جابه‌جایی مستلزم افزایش سرعت سیال و بالا رفتن عدد رینولدز و در پی آن عدد ناسلت و در نتیجه ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی است. این افزایش سرعت در تجهیزات به نوبه خود، مستلزم افزایش توان مصرفی پمپ است؛ اما اگر نانوسیال به‌کار گرفته شود، در یک سرعت معین افزایش انتقال حرارت نتیجه افزایش هدایت حرارتی سیال خواهد بود. مثلاً افزایش انتقال حرارت به میزان ۲ برابر با استفاده از سیال پایه، نیازمند افزایش توان پمپ به حدود ۱۰ برابر است. در حالی‌که اگر نانوذرات به سیال پایه افزوده شده و ضریب هدایت حرارتی نانوسیال حاصل حدود ۳ برابر سیال پایه گردد، بدون نیاز به افزایش پمپ می‌توان به همان ۲ برابر افزایش در انتقال حرارت دست یافت. بنابراین کاهش هزینه انرژی و کاهش توان مصرفی پمپ‌ها از دیگر مزایای نانوسیالات است.

۳.۲ کاهش گرفتگی و انسداد مجاری

ایده افزایش انتقال حرارت با استفاده از افزودن ذرات به یک سیال پایه قدمتی نزدیک به صد سال دارد. اما ذراتی که در تحقیقات قدیمی به سیالات افزوده می‌شد، دارای اندازه‌های میکرومتری بودند. این ذرات پایداری لازم در سوسپانسیون را نداشته و به سرعت ته‌نشین می‌شوند. همین امر سبب می‌شود که مجاری عبور سیال به سرعت مسدود گردد. در حالی‌که ذرات با اندازه نانو، تشکیل سوسپانسیون‌های بسیار پایدارتری داده و پایین بودن سرعت ته‌نشینی آنها سبب می‌گردد تا مشکل گرفتگی و انسداد مجاری به حداقل برسد. از طرفی بزرگی ذرات میکرومتری سبب می‌شود تا نتوان از آنها در مجاری میکروکانال‌ها استفاده کرد، در حالی‌که اندازه ذرات نانو این امکان را می‌دهد تا از نانوسیال بتوان در میکروکانال‌ها استفاده کرد.

۴.۲ کاهش اندازه سیستم‌های انتقال حرارت

با توجه به قابلیتی که نانوسیال از خود در افزایش انتقال حرارت نشان داده است، برای انتقال یک مقدار مشخص از حرارت، وقتی از نانوسیال به‌جای سیال معمولی استفاده شود، مبدل حرارتی لازم حجم کوچکتری خواهد داشت.

۵.۲ کاهش هزینه‌ها

به دلیل کاهش توان مصرفی پمپ‌های انتقال سیال از طرفی و کاهش اندازه و وزن تجهیزات انتقال حرارت از طرف دیگر، با به‌کارگیری نانوسیال

۳ خواص نانوسیال

عنوان هر مقاله، معرف هویت و محتوای آن مقاله و هدف اصلی پژوهش است. در چهار خاصیت ترموفیزیکی سیال وجود دارد که با افزودن نانوذرات به سیال پایه مقدارشان تغییر می‌کند. این خواص عبارت‌اند از: چگالی، ویسکوزیته، ضریب هدایت حرارتی و گرمای ویژه. محققان نظرات متفاوتی درباره اثر افزودن نانوذرات بر مقادیر این خواص بیان کرده‌اند، اما به‌طور کلی افزودن نانوذرات سبب افزایش این خواص به‌جز گرمای ویژه می‌شود که این خاصیت با افزودن نانوذرات کاهش می‌یابد. درصد این افزایش به عوامل مختلفی از جمله درصد حجمی نانوذرات (کسر حجمی یا غلظت)، شکل و خواص نانوذرات، خواص سیال پایه و دما بستگی دارد. در ادامه به‌طور اجمال به بررسی تغییرات این عوامل پرداخته می‌شود:

۱. ضریب هدایت حرارتی: افزودن درصد کمی از نانوذرات سبب افزایش چشمگیر ضریب هدایت حرارتی نانوسیال نسبت به سیال پایه می‌شود. سازوکارهایی که برای افزایش ضریب هدایت حرارتی نانوسیالات ارائه می‌شود، به این صورت است که:

الف) به علت حرکت براونی نانوذرات، اختلاط در سیال افزایش پیدا کرده و ضریب هدایتی افزایش می‌یابد.

ب) اگرچه حرکت براونی مهم است، اما در وهله نخست کوپل شدن بین ذرات مسئول افزایش ضریب هدایتی است. به این صورت که نانوذرات به هم چسبیده و زنجیره‌هایی ایجاد می‌کنند که انتقال حرارت از طریق این زنجیرها سریع‌تر صورت می‌گیرد. نظریه‌های مختلفی برای محاسبه ضریب هدایت حرارتی نانوسیال پیشنهاد شده است که مدل براگمن، پیش‌بینی بهتری نسبت به مدل‌های دیگر، مخصوصاً برای ذرات کروی

دارد [۲۲]:

۴ اکتشافات تجربی

پدیده‌های گوناگونی در بحث نانوسیالات وجود دارند که با نظریه‌های متداول و کلاسیک قابل توجیه نیستند، از جمله عدم تمرکز و تجمع بالای نانوذرات در سیال که باعث افزایش بیش از مقدار پیش‌بینی شده یک عامل بر اساس تئوری شده است. همین‌طور در طی آزمایش‌ها متعدد وابستگی شدید دما، اندازه نانوذره، نوع جریان (آرام و متلاطم بودن) و هدایت حرارتی مشاهده شده است، به طور مثال نانوسیال مس و نانولوله‌های کربنی در دماهای بالا هدایت حرارتی بیش از ۱۰ برابر مقدار پیش‌بینی شده از خود نشان می‌دهند. از همین رو آزمایش‌ها تجربی به منظور کشف روابط دقیق‌تر رو به افزایش است. از جمله دلایلی که می‌توان اشاره کرد که چرا تئوری قاطعی برای نانوسیال وجود ندارد، می‌توان به عوامل زیر اشاره کرد:

الف) تفاوت رفتار ترمودینامیکی نانوسیال با کامپوزیت‌های جامد - جامد یا سوسپانسیون‌های استاندارد جامد - مایع وجود وابستگی به پارامترهای غیرمتداولی همچون اندازه ذره و شکل در مقایسه با سوسپانسیون‌های استاندارد جامد - مایع [۲۷].

ب) فهم فیزیکی مسئله نیازمند یک مفهوم چندرشته‌ای^۱ است

۵ کاربردهای مهندسی نانوسیال

کاربردهای صنعتی نانوسیالات اکثراً مربوط به مباحث سرمایش و گرمایش است. به‌طور مثال نانوسیال در اوپراتور به‌کار می‌رود و سبب افزایش شار حرارتی بحرانی در استخر جوش می‌شود. همچنین نانوسیالات در بخش انتقال جرم بیشتر مربوط به مباحث دارویی و پزشکی نیز کاربرد دارند، مثلاً می‌توان از آنها برای فرستادن دارو در مکان خاصی از بدن با دوز بالا استفاده کرد، بدون اینکه به بافت آسیب برسد. نکته جالب اینجاست که هرچند این مواد ساخته دست بشر هستند، اما در طبیعت وجود دارند. مهم‌ترین نانوسیالی را که در طبیعت یافت می‌شود؛ یعنی خون به‌عنوان یک کمپلکس از نانوسیال بیولوژیکی است. همچنین سیستم‌های میکروالکترومکانیکی نیازمند سیستم سرمایش با عملکرد بالا هستند؛ زیرا تولید گرما در آنها بالاست. در شکل ۳ یک آب‌گرم‌کن خورشیدی به‌طور شماتیک نمایش داده شده است. در صنعت خودروسازی نیز نانوسیال به‌دلیل هدایت حرارتی بالایی می‌تواند باعث کاهش وزن موتور شود و برای رادیاتور نیز ضدیخ مناسبتری نسبت به سیال پایه است. در جدول ۲ برخی از کاربردهای نانوسیالات در بخش انتقال حرارت بیان شده است. در ادامه به معرفی برخی از کاربردهای نوین نانوسیالات در صنعت پرداخته می‌شود.

۱.۵ گرمایش ساختمان‌ها و کاهش آلودگی

از نانوسیالات می‌توان در سیستم گرمایش ساختمان‌ها (سیستم رادیاتورها، پکیچ‌ها و سایر سیستم‌های گرمایشی مبتنی بر انتقال حرارت توسط مایعات) بهره برد. مثلاً در مناطق سردسیر در سیستم انتقال حرارت از مخلوط اتیلن گلیکول و آب با نسبت ۶۰ به ۴۰ به‌عنوان مایع استفاده می‌شود که منجر به کاهش مصرف انرژی در پمپاژ سیال می‌گردد که در نهایت نیز باعث استفاده

$$k_{nf} = k \left[\left((3\varphi - 1) \frac{k_s}{k} + (2 - 3\varphi) \right) + k_s \sqrt{\Delta} / 4 \right] \quad (1)$$

$$\Delta = (3\varphi - 1)^2 \left(\frac{k_s}{k} \right)^2 + (2 - 3\varphi)^2 + 2(2 + 9\varphi^2) \left(\frac{k_s}{k} \right)$$

که k_s ، k ، k_{nf} و φ به ترتیب ضریب هدایت حرارتی نانوسیال، ضریب هدایت حرارتی سیال پایه، ضریب هدایت حرارتی جامد و کسر حجمی نانوذرات هستند. باید دقت کرد که این نظریه‌ها کامل نیستند. همت و همکاران [۲۳] به این نتیجه رسیدند که این پیش‌بینی‌ها در مقایسه با اندازه‌گیری‌ها مقدار کمتری را نشان می‌دهند، زیرا در این مدل‌ها آثار اندازه ذرات و نیروهای بین‌مولکولی اعمال نمی‌شود.

۲. ویسکوزیته: ویسکوزیته نانوسیالات بیشتر از سیالات پایه است. ویسکوزیته نانوسیال نیز مانند ضریب هدایتی با درصد حجمی رابطه مستقیم دارد. برخی از مدل‌های ارائه‌شده برای محاسبه ویسکوزیته نانوسیالات در جدول ۱ مشاهده می‌شوند.

جدول ۱: نظریه‌های مختلف برای محاسبه ویسکوزیته [۲۴]

مدل	معادله
انستین	$\mu_r = \frac{\mu_{nf}}{\mu} = 1 + \eta\phi$
باچر	$\mu_r = \frac{\mu_{nf}}{\mu} = 1 + \eta\phi + (\eta\phi)^2$
وارد	$\mu_r = \frac{\mu_{nf}}{\mu} = 1 + \eta\phi + (\eta\phi)^2 + (\eta\phi)^3$

۳. گرمای ویژه: تابه‌حال برای محاسبه گرمای ویژه دو مدل ارائه شده است [۲۵]:

$$c = (1 - \varphi) c_{bf} + \varphi c_p \quad (2)$$

$$c = \left((1 - \varphi) (\rho c)_{bf} + \varphi (\rho c)_p \right) / \rho \quad (3)$$

در مدل‌های بالا نیز c ، c_{bf} و ρ به ترتیب گرمای ویژه نانوسیال، گرمای ویژه سیال پایه و چگالی سیال پایه هستند. برای محاسبه گرمای ویژه می‌توان از این دو مدل استفاده کرد و نیازی به اندازه‌گیری تجربی نیست.

۴. ضریب نفوذ: برخی محققان مشاهده کردند که ضریب نفوذ در حضور نانوذرات افزایش می‌یابد. این رفتار به این صورت توجیه شد که به‌علت حرکت براونی نانوذرات، در لایه‌های اطراف نانوذرات اغتشاش ایجاد می‌شود که سبب ایجاد یک حرکت همرفتی در مقیاس کوچک می‌شود و ریزهمرفت‌ها به بهبود نفوذ کمک می‌کنند [۲۵]. نتایج مطالعات دیگر محققان نشان داد که ضریب نفوذ نانوسیالات نسبت به سیال پایه کمتر است. به این دلیل که حضور نانوذرات سبب پیچیدگی مسیر نفوذ شده و در نتیجه نفوذ را کم می‌کند. در صورتی که از درصد جرمی پایین نانوسیال استفاده می‌شود فرض می‌شود نانوذرات اثری روی ضریب نفوذ نداشته باشند [۲۶].

¹multidisciplinary

می‌دهند.

جدول ۲: کاربرد و زمینه کاری فروسیال‌ها

زمینه کاری	کاربرد
الکترونیک	خنک‌سازی دیود لیزری، تراشه و نیمه‌رسانا
صنعت خودرو	خنک‌سازی موتور، سیستم تعلیق فرمان، کلاچ‌ها
تولید نیرو	خنک‌سازی مبدل‌های حرارتی
صنایع هسته‌ای	مبرد اولیه در راکتورهای آب تحت فشار
انرژی تجدیدپذیر	افزایش انرژی از جمع‌کننده‌های خورشیدی
تهویه مطبوع	کاهش توان موردنیاز پمپ در ساختمان‌ها
ساخت و تولید	خنک‌سازی مته، چرخ سنگ‌زنی و ابزار جوش
دفاعی	خنک‌سازی سلاح، خودروی جنگی

۵.۵ سیستم‌های مبرد صنعتی (سردسازی)

استفاده از نانوسیالات در سیستم‌های مبرد صنعتی با هدف صرفه‌جویی در مصرف انرژی اهمیت بالایی دارد؛ مثلاً با جایگزینی نانوسیالات در سیستم‌های خنک‌کننده صنایع کانادا می‌تواند منجر به جلوگیری از مصرف سالانه یک تریلیون بی. تی. یو. انرژی گردد.

۶.۵ سیستم سرمایش هسته‌ای

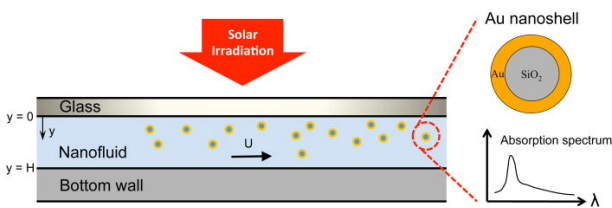
در راکتورهای هسته‌ای به علت حساسیت بالا، پایداری دمایی و همچنین جلوگیری از افزایش دما اهمیت فوق‌العاده‌ای دارند؛ در نتیجه استفاده از یک سیال با ظرفیت انتقال حرارت بیشتر و نقطه جوش بالاتر می‌تواند در مبردهای این صنعت اهمیت ویژه‌ای داشته باشد، لذا نانوسیالات می‌توانند گزینه خوبی برای یک خنک‌کننده در سیستم‌های سردسازی صنایع هسته‌ای باشند.

۷.۵ کاربردهای هوافضا

کاهش ابعاد، وزن و مصرف انرژی از مسائل حائز اهمیت در مهندسی هوافضا (به‌طور مثال فضاییماها و ایستگاه‌های فضایی) است؛ از همین رو در این صنایع نیز نیاز به یک سیستم خنک‌کننده با قابلیت بالا و ابعاد کوچکتر کاملاً محسوس است. در نتیجه نانوسیالات می‌توانند به‌خوبی در این سیستم نقش حیاتی ایفا کنند.

۸.۵ ذخیره‌سازی انرژی

چون ذخیره انرژی به‌صورت انرژی نهان یکی از مسائل مهم امروزی در حوزه مدیریت انرژی است، لذا نانوسیالات با داشتن ظرفیت هدایت حرارتی بالا و یا به‌عبارت دیگر دارا بودن گرمای نهان بالا می‌توانند به‌عنوان ذخیره‌کننده انرژی به‌صورت گرمای نهان مورد استفاده قرار بگیرند (شکل ۳).



شکل ۳: آب‌گرم‌کن خورشیدی مجهز به نانوسیال [۲۸]

۹.۵ کاهش شکست

پژوهش‌های متعدد نشان داده‌اند که استفاده از سیالات دارای نانوذرات (اعم از نانوذرات مس و یا نانولوله‌های کربنی) شکست در قطعات مکانیکی را به‌طور محسوسی کاهش داده و همچنین به‌شدت از سایش آنها جلوگیری می‌کند. از سوی دیگر استفاده از نانوسیالات حین ماشینکاری نیروی لازم برای این کار را کاهش می‌دهد.

از سیستمی کوچکتر با ظرفیت انتقال حرارت بیشتر و کاهش هزینه‌ها می‌شود.

۲.۵ حمل و نقل

نانوسیالات به دلیل پیچیدگی سیستم سردکننده و در نتیجه کاهش وزن و نهایتاً افزایش راندمان سردسازی، دارای پتانسیل بالایی جهت سردسازی خودروها و موتورهای سنگین هستند. تحقیقات متعدد نشان دادند که استفاده از نانوذرات در سیستم مبرد خودروها، می‌تواند سبب کاهش وزن و ابعاد رادیاتور حتی تا ۱۰ درصد شود و تا ۵ درصد میزان سوخت مصرفی را نیز به‌علت بهبود اثرودینامیک، کاهش دهد. همچنین چون حین توقف، انرژی جنبشی یک وسیله نقلیه به انرژی گرمایی تبدیل می‌شود و در نهایت به سیال متوقف‌کننده در سیستم هیدرولیک منتقل می‌گردد. با استفاده از نانوذرات در سیستم هیدرولیک به دلیل دارا بودن نقطه جوش بالاتر، ویسکوزیته و همچنین هدایت حرارتی بیشتر، سبب جلوگیری از قفل بخار و ایجاد امنیت بیشتر حین رانندگی می‌شود.

۳.۵ جذب انرژی خورشیدی

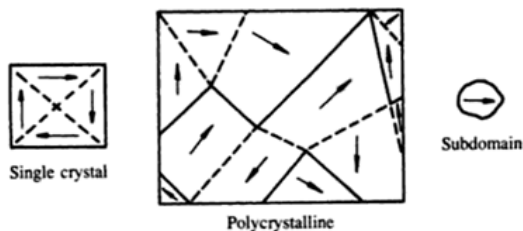
امروزه انرژی خورشیدی یکی از منابع انرژی نو به‌حساب می‌آید که آثار زیست‌محیطی بسیار کمی دارد. همچنین فناوری جمع‌آوری و بهره‌گیری از این انرژی توسط سلول‌های خورشیدی در جهت گرم کردن آب یا تولید الکتریسیته کاملاً شناسایی و مورد بهره‌برداری است. استفاده از نانوسیالات به‌عنوان منتقل‌کننده حرارت می‌تواند راه مناسبی برای افزایش راندمان در این سیستم‌های جمع‌آوری‌کننده انرژی باشد. مثلاً تحقیقات نشان دادند که استفاده از سیالاتی حاوی نانوذرات نقره، نانولوله‌های کربنی و یا گرافیت منجر به افزایش ۵ درصدی راندمان این سیستم‌های انتقال حرارت حاصل از انرژی خورشیدی می‌گردد [۲۸].

۴.۵ کاربردهای الکترونیکی

در تجهیزات الکترونیکی علاوه بر رویکرد طراحی بهینه هندسه، می‌توان با ایجاد ظرفیت هدایت حرارتی بالاتر به‌کمک نانوسیالات، به‌واسطه هدایت حرارتی بالایی، به حذف گرما بدون نیاز به افزایش ابعاد اقدام کرد. به‌طور مثال در سردسازی CPU در کامپیوترهای خانگی، لوله‌های حاوی نانوذرات تیتانیومی به‌میزان تنها ۱/۰ غلظت حجمی، راندمان گرمایی را نسبت به سیال معمولی از همان نوع بدون بهره گرفتن از نانوذرات تا ۱۰/۶ درصد افزایش

۱۰.۵ خواص نوری ویژه

نانوسیالات مغناطیسی جهت فیلترکردن امواج نوری خاص مورد استفاده قرار می‌گیرند. این خاصیت با اعمال یک نیروی مغناطیسی خارجی فعال می‌شود.



نشان می‌دهد.

۱۱.۵ خواص ضدباکتری

مواد ضدباکتری آلی در برخی موارد، پایداری کمی در دماهای بالا دارند. دانشمندان در پژوهش‌های متعدد نشان دادند که استفاده از مواد غیرآلی مانند فلزات و اکسیدفلزات به‌عنوان راه‌حل این معضل مورد توجه قرار گرفته است. به‌عنوان مثال نانوسیالات دارای خاصیت ضد باکتری خارق‌العاده‌ای باثبات در دمای بالا هستند.

۱۲.۵ کاربردهای پزشکی

در مجموع نانوپزشکی، علم استفاده از فناوری نانو در پزشکی است. گستره نانوپزشکی از کاربردهای پزشکی نانومواد تا حسگرهای زیستی نانوالکترونیکی و حتی کاربردهای احتمالی آتی از فناوری نانومولکولی را شامل می‌شود. همچنین استفاده از نانوسیالات به‌عنوان خنک‌کننده‌های مؤثر در جراحی یک عضو خاص، سبب کاهش خطر آسیب عضو و عمل جراحی امن‌تر شده و شانس زنده‌ماندن بیمار افزایش می‌یابد. از سوی دیگر نانوسیالات می‌توانند با ایجاد حرارت بالا در اطراف تومور به کشتن سلول‌های سرطانی بدون تأثیر بر سلول‌های سالم اطراف بپردازند [۲۸].

شکل ۴: ساختار دامنه برای مواد تک‌بلوری و چندبلوری [۴]

ماده فرومغناطیسی برای کاهش سطح انرژی خود به دامنه‌های زیادی تقسیم می‌شود. در غیر این صورت تمام گشتاورهای مغناطیسی در یک جهت قرار گرفته و در نتیجه سطح انرژی بسیار بالا می‌رود. در واقعیت تغییر در جهت بردار گشتاور مغناطیسی بین اتم‌ها یک اتفاق تدریجی است و این تغییر طی تقریباً ۱۰۰ اتم اتفاق می‌افتد. در شکل ۵ نیز یک نمونه واقعی فروسیال که در معرض یک میدان مغناطیسی قرار دارد ارائه شده است.



شکل ۵: نمونه صنعتی فروسیال در معرض میدان مغناطیسی [۴]

۶ فروسیال‌ها^۱

نانوسیالات مغناطیسی^۲ (فروسیال‌ها)، سوسپانسیون کلوئیدی پایداری از نانوذرات مغناطیسی هستند که نسبت به میدان مغناطیسی خارجی واکنش نشان می‌دهند مانند CoFe_2O_4 , FeC , Fe_3O_4 [۲۹]. زمینه مطالعه در مورد نانوسیالات مغناطیسی امروزه با عنوان فروهیدرودینامیک^۳ شناخته می‌شود که یک حوزه کاملاً میان‌رشته‌ای است و به دانشمند معروف رونالد روزنزویگ نسبت داده شده است [۴]. با اعمال میدان مغناطیسی در جهت و شدت‌های مختلف می‌توان تا حدودی بر رفتار هیدرودینامیکی و حرارتی این‌گونه سیالات کنترل داشت که این یک مزیت مهم برای این‌گونه از نانوسیالات به‌شمار می‌آید. این دسته از سیال‌ها نه تنها از نظر جریان‌پذیری همانند سیال‌های نیوتونی رفتار می‌کنند، که خصوصیات مغناطیسی آنها همانند توده‌ای از مواد مغناطیسی است. در نتیجه معادله‌های بیان‌کننده رفتار حرکتی سیال‌های مغناطیسی تلفیقی از معادله‌های ناویر استوکس برای بیان حرکت سیال مغناطیسی و سایر معادلات ناشی از میدان مغناطیسی می‌باشند. نتایج تحقیقات نشان می‌دهند که اگر قطر ذرات کوچکتر از ۲ نانومتر باشد، خاصیت مغناطیسی آنها از بین خواهد رفت [۳۰]. نانوذرات همچنین باید از مغناطیس‌پذیری بالایی برخوردار باشند. مواد فرومغناطیسی از دامنه‌هایی تشکیل شده‌اند که در هر کدام از آنها گشتاور مغناطیسی همه اتم‌ها در یک جهت مشخص است. ساختار دامنه‌ها برای مواد تک‌بلوری و چند بلوری در شکل ۴ نشان داده شده است که خطوط نقطه‌چین مرزهای دامنه‌ها و خطوط توپر مرزهای بلورها را

۱.۶ کاربردهای فروسیال‌ها

ویژگی‌های منحصر به فرد و کنترل‌پذیری بالای این نوع سیال‌ها در حضور میدان مغناطیسی، باعث شده است تا گستره استفاده از آنها در صنایع و علوم مختلف به‌صورت روزافزونی افزایش یابد. در ادامه به برخی از کاربردهای این دسته از سیال‌ها اشاره شده است.

۱.۱.۶ کاربردهای حرارتی

یک میدان مغناطیسی خارجی اعمال شده بر یک فروسیال با فروگیری متغیر (که فروگیری متغیر آن مثلاً بر اثر یک شیب دما حاصل شده باشد) به یک نیروی بدنه مغناطیسی غیریکنواخت منجر می‌شود که سبب ایجاد شکلی از انتقال حرارت به نام جابه‌جایی ترمومغناطیسی می‌شود. این شکل از انتقال حرارت هنگامی می‌تواند مفید باشد که انتقال حرارت در جابه‌جایی طبیعی کافی نباشد. به‌طور مثال دستگاه‌های میکرومینیاتوری تحت شرایط جاذبه ثقلی اندک. از ویژگی‌های حرارتی دیگر فروسیال‌ها می‌توان به کاربرد این‌گونه سیالات در بلندگوها به‌منظور دور کردن گرما از کویل صدا اشاره کرد. فروسیال در گپ هوایی اطراف کویل صدا قرار می‌گیرند و در آنجا تحت جاذبه آهنربای بلندگو ثابت می‌مانند. چون فروسیال‌ها پارامغناطیس هستند، از قانون کوری تبعیت می‌کنند، در دماهای بیشتر دارای خاصیت آهنربایی کمتری هستند. یک آهنربای قوی قرار گرفته در نزدیکی کویل صدا که تولید

¹ferrofluid ²magnetic nanofluid ³ferrohydrodynamics

متناوب گرما آزاد می‌کند. همچنین از این‌گونه سیالات می‌توان به‌عنوان محیط جدید سنجش آزمون‌های پرتو آلفا استفاده کرده و از خاصیت مغناطیس شوندگی^۳ آنها در یک میدان متناوب به‌منظور حرارت‌دهی به بافت سلولی یا استفاده در تجهیزهای سنجش بینایی می‌توان اشاره کرد [۳۱].

۷ مدل‌سازی میدان‌های جریان نانوسیالات

تاکنون پنج دیدگاه برای مدل‌سازی میدان جریان نانوسیالات ارائه شده است. الف) مدل تک‌فازی همگن^۴: با فرض اینکه نانوذرات و سیال پایه در شرایط تعادل گرمایی هستند و هیچ‌گونه سرعت لغزشی بین آنها وجود ندارد، می‌توان تمام معادلات پیوستگی، مومنتوم و انرژی مربوط به سیال خالص را به نانوسیال نیز تعمیم داد و خواص مؤثر نانوسیال باید جایگزین خواص سیال پایه شوند. لذا در این دیدگاه تمام روابط ارائه‌شده برای انتقال گرما به همان شکل قابل استفاده‌اند و فقط کافی است که خواص مؤثر جایگزین شوند [۳۲].

ب) مدل پراش گرمایی^۵: با وجود اینکه نانوسیالات بیشتر شبیه یک سیال رفتار می‌کنند تا یک مخلوط سیال - جامد، اما ذاتاً یک سیال دوفازی هستند و لذا برخی ویژگی‌های معمول یک مخلوط را دارا هستند. بدین معنا که در اثر وجود فاکتورهای متعدد نظیر جاذبه، حرکت براونی، نیروی اصطکاک بین ذرات و سیال و رسوب‌گذاری ممکن است سرعت لغزشی بین دو فاز صفر نباشد. به‌عبارت دیگر حرکت نامنظم و تصادفی ذرات، نرخ تبادل انرژی درون سیال را افزایش می‌دهد؛ یعنی در جریان نانوسیالات پخش گرمایی صورت می‌گیرد که باعث هموارتر شدن توزیع دما و بیشتر شدن گرادیان دما بین سیال و دیواره می‌گردد و در نتیجه انتقال حرارت را افزایش می‌دهد. بنابراین در این دیدگاه وجود سرعت لغزشی، خود را به صورت عبارت‌های اختلال^۶ در دما و سرعت نشان می‌دهد [۳۳].

ج) مدل دوفازی مخلوط: در این مدل نانوسیال به‌عنوان یک سیال با دو فاز در نظر گرفته می‌شود که وابستگی بین فازها شدید بوده و لذا هر فاز سرعت مخصوص به خود را دارد و در هر سلول محاسباتی، مقداری از هر فاز وجود دارد [۳۴].

د) مدل دوجزئی چهار معادله‌ای ناهمگن تعادلی^۷: در این مدل دو پدیده ترموفورسیس و حرکت براونی به‌عنوان مهم‌ترین سازوکارهای سرعت لغزشی در معادلات وارد می‌شوند. در این دیدگاه علاوه بر حل سه معادله پیوستگی، مومنتوم و انرژی برای نانوسیال، یک معادله دیگر برای پیوستگی نانوذرات حل می‌شود [۳۵].

ه) مدل جابه‌جایی ذره‌ها^۸: دیگ و ون نخستین کسانی بودند که از مفهوم جابه‌جایی ذرات در مدل‌سازی نانوسیالات استفاده کردند. آنها مدلی تئوری و تحلیلی برای یافتن توزیع کسر حجمی در جریان آرام درون یک لوله در منطقه توسعه‌یافته ارائه نمودند. گفتنی است مدل تک‌فازی با فرض تعادل حرارتی فاز مایع و ذرات جامد و جریان تحت سرعت یکسان ساده‌تر بوده و به زمان محاسبه کمتری نیاز دارد. سایر مدل‌ها به کامپیوترهایی با سرعت بالا و زمان زیادی برای محاسبه نیاز دارند

گرما می‌کند فروسیال سرد را بیش از فروسیال گرم جذب می‌کند، بنابراین فروسیال گرم‌شده از کویل الکتریکی صدا، به طرف چاه گرما بیرون رانده می‌شود. این یک روش سردسازی مؤثر است که نیازی به هیچ انرژی ورودی اضافه‌ای ندارد. بنابراین امکان افزایش قدرت صدا بدون تغییر در اندازه بلندگو حاصل می‌شود.

۲.۱.۶ کاربرد در صنایع الکترونیکی

از فروسیالات به‌عنوان درزبندهای مایع در اطراف شفت‌های گردنده درایو هارددیسک‌ها استفاده می‌شود. در مجاورت شفت گردنده، آهنربا وجود دارد. مقدار کمی فروسیال که در شکاف بین آهنربا و شفت واقع می‌شود با جذب شدنش به آهنربا در سر جای خود ثابت می‌ماند و در عین حال به‌علت مایع بودن، اصطکاک چندانی با شفت گردنده (که در تماس با فروسیال است) ندارد. به این ترتیب، فروسیال همچون مانعی برای ورود ذرات و مواد ریز به داخل درایو هارد عمل می‌کند.

۳.۱.۶ کاربرد در کاهش اصطکاک

فروسیالات قابلیت کاهش اصطکاک را دارند. اگر از آنها روی سطح یک آهنربا که به اندازه کافی قوی هست، مثل آهنربای ساخته‌شده از نودیم استفاده شود، این امکان به‌وجود خواهد آمد که آهنربا به آسانی با کمترین مقاومت، روی سطح هموار سر بخورد.

۴.۱.۶ کاربرد در صنایع هوافضا

ناسا استفاده از فروسیالات را در یک حلقه بسته به‌عنوان مبنایی برای یک سیستم کنترل حالت فضایی‌ها آزمایش کرده است. یک میدان مغناطیسی، به یک حلقه فروسیال اعمال می‌شود تا اندازه حرکت زاویه‌ای را تغییر دهد و روی گردش فضایی تأثیر بگذارد. همچنین نیروی هوایی امریکا یک رنگ از نوع ماده جاذب را در مواد جاذب رادار^۱ معرفی کرده است که هم از فروسیالات و هم از مواد غیرمغناطیسی ساخته شده است. با کاهش انعکاس امواج الکترومغناطیسی، این ماده کمک می‌کند سطح مقطع راداری هواپیما کاهش یابد.

۵.۱.۶ کاربرد در تجهیزات آنالیز

فروسیالات به‌خاطر خواص انکساری‌شان کاربردهای اپتیکی متعددی دارند؛ زیرا هر دانه یا میکروآهنربا در فروسیال، نور را بازتاب می‌کند. از جمله این کاربردها، اندازه‌گیری ویسکوزیته و ویژه مایع واقع‌شده بین پلاریزور و آنالیزور است که به‌وسیله لیزر هلیوم - نئون روشن می‌شود.

۶.۱.۶ کاربرد در علوم پزشکی

در پزشکی از فروسیالات به‌عنوان عامل کنتراست برای تصویربرداری تشدید مغناطیسی^۲ استفاده می‌شود که می‌تواند برای آشکارسازی سرطان قابل استفاده باشد. همچنین آزمایش‌های زیادی با استفاده از فروسیالات در یک عمل جراحی آزمایشی سرطان انجام شده است. اساس این عمل بر این واقعیت استوار است که یک فروسیال واقع‌شده در یک میدان مغناطیسی

¹radar absorbent material (RAM) ²magnetic resonance imaging (MRI) ³magnetization ⁴single phase homogeneous model ⁵thermal dispersion model ⁶perturbation ⁷two-component four-equation non-homogeneous equilibrium model ⁸particle migration

[۳۶].

ذرات نزدیک به منطقه با دمای پایین تر و کمتر بودن مومنتوم ذرات در ناحیه گرمتر جستجو کرد [۳۸].

ه) اندازه نانوذرات: مطالعات مختلف نشان می‌دهد که با کاهش اندازه نانوذرات ضریب هدایت حرارتی نانوسیالها افزایش می‌یابد. به هر حال نانوذرات کوچکتر و سبکتر در مقابل رسوب^۴ مقاومتر می‌باشند [۳۹].

و) شکل نانوذرات: تحقیقات متعدد نشان داده‌اند که نانوذرات میله‌ای شکل مانند نانولوله‌های کربنی، گرمای بیشتری را نسبت به نانوذرات کروی منتقل می‌کنند که این امر می‌تواند به علت دارا بودن نسبت منطقی^۵ بیشتر (نسبت سطح جانبی به حجم آن) باشد [۲۷].

ز) لایه تشکیل شده از سیال در مقیاس مولکولی در سطح مشترک نانوذره - سیال^۶: برخی از پژوهشگران اظهار داشته‌اند که با پخش نانوذرات در سیال پایه، لایه‌ای از سیال در مقیاس مولکولی، دور نانوذرات تشکیل می‌شود که ساختار اتمی آنها خیلی منظم تر از توده سیال^۷ است و همانند بلورهای جامد عمل کرده و سبب افزایش ضریب رسانش می‌شود. آثار متقابل بین اتم‌های سیال و جامد یک رفتار نوسانی در پروفیل چگالی ایجاد می‌کند. کشش جامد - سیال اندازه لایه‌ای را مشخص می‌کند که می‌تواند حتی تا چند فاصله مولکولی برای آثار متقابل قوی گسترش یابد، هرچه کشش افزایش یابد ساختار شبه‌کریستالی در اطراف مایع گسترش می‌یابد، این تغییر ساختاری مایع اثر قابل توجهی در خواص مختلف از جمله گذار فاز سیال - جامد و خواص تریبولوژیکی دارند، خواص مکانیکی دیگر نیز متأثر از این امر هستند، مانند سرعت و نیروی بین ذرات با لایه‌ای ضخیم از مایع [۳۱].

ح) دما: ضریب رسانش مؤثر نانوسیال و حرکت براونی با دما افزایش می‌یابد. چان و همکاران [۲۰] با مطالعه تجربی نانوسیال آب - آلومینا تغییرات نسبت رسانندگی را با دما ثبت کردند و نشان دادند که ضریب رسانش با افزایش دما و کسر حجمی نانوذرات، افزایش می‌یابد.

۸ ابزارهای بررسی پایداری نانوسیالات

اصلی‌ترین عیب آنها که کاربردشان را محدود کرده است، عدم تمایل به پراکندگی همگن در فاز مایع است. این بدان معناست که در برخی شرایط کاری نانوسیالات تمایل زیادی به اتصال به هم نشان می‌دهند؛ از اینرو بحث پایداری نانوسیالات اهمیت بالایی دارد. برای تخمین دقیق پایداری نسبی نانوسیال به استفاده از چند روش نیاز است و نباید به یکی از این روش‌ها اکتفا کرد که در این بخش چند مورد از این روش‌ها مورد بررسی قرار می‌گیرد:

۱. اسپکتروفوتومتر: نتایج این آزمایش برای تشریح کمی پایداری نانوسیال مورد استفاده قرار می‌گیرد. یکی از ویژگی‌های این دستگاه توانایی استفاده آن برای تمام سیالات پایه است. این آزمایش از این اصل استفاده می‌کند که شدت نور به وسیله جذب یا پخش آن از طریق سیال تغییر می‌کند. پایداری نانوسیال معمولاً به شکل اندازه‌گیری

۱۰.۷ سازوکارها و پارامترهای مؤثر بر انتقال حرارت در نانوسیال

در مورد انتقال حرارت جابه‌جایی نانوسیالها ذکر این نکات ضروری است:

۱. با توجه به اینکه انتقال حرارت در داخل نانوسیال روی سطوح ذرات معلق انجام می‌گیرد، ذرات نانو در نانوسیال، سطح انتقال حرارت سیال را افزایش می‌دهند. گفتنی است نانوذرات، دارای نسبت سطح به حجم بسیار بیشتری نسبت به ذرات با ابعاد میلی‌متری و میکرومتری هستند

۲. ذرات نانو معلق، ضریب هدایت حرارتی مؤثر سیال را افزایش می‌دهند

۳. این ذرات، تلاطم و اختلاط جریان سیال افزایش می‌یابد

۴. توزیع نانوذرات در سیال سبب تغییر گرادیان دمایی سیال شده و در نتیجه ضخامت لایه مرزی حرارتی کم می‌شود و طول توسعه‌یافتگی افزایش می‌یابد

۵. تأثیر متقابل و برخورد بین نانوذرات و سیال انتقال حرارت را تحت تأثیر می‌دهد

در مجموع افزایش انتقال حرارت با استفاده از نانوسیالها را به سازوکارها و پارامترهای متنوعی می‌توان نسبت داد که در ادامه به اجمال در مورد آنها بحث می‌شود.

الف) توده‌ای شدن ذرات^۱: محققان در آزمایشات خود دریافتند که اندازه نانوذرات و اندازه خوشه‌ای^۲ شدن آنها تأثیر چشمگیری بر رسانش گرمایی دارد. آنها همچنین دریافتند که پدیده توده‌ای شدن پدیده‌ای وابسته به زمان است؛ یعنی با سپری شدن زمان، انباشتگی نانوذرات بیشتر می‌شود. افزایش انباشتگی باعث کاهش نسبت سطح مؤثر به حجم نانوذرات شده که به نوبه خود باعث کاهش ضریب انتقال حرارت هدایتی و ویسکوزیته می‌شود [۳۳].

ب) حرکت براونی: نانوذرات داخل مولکول‌های سیال جابه‌جا می‌شوند و در اثر برخورد پراکنده می‌شوند و گاهی نیز به هم می‌چسبند و با توجه به مفهوم حرکت براونی (حرکت کاتوره‌ای و تصادفی ذرات) انتقال حرارت کلی و هدایت حرارتی نانوسیال را افزایش می‌دهند. بر اساس رابطه استوکس - اینشتین با افزایش دما ضریب پخش و هدایت حرارتی افزایش می‌یابد [۳۶].

ج) کسر حجمی: ضریب هدایت حرارتی نانوسیالها با افزایش کسر حجمی نانوذرات افزایش می‌یابد. البته باید توجه داشت که فرض معلق ماندن ذرات در سیال پایه در کسر حجمی‌های بالا دیگر صادق نیست و به همین علت است که از کسر حجمی پایین در تهیه نانوسیالها استفاده می‌شود [۳۷].

د) ترموفورسیس^۳: براساس این پدیده نانوذرات از منطقه با دمای کمتر به منطقه با دمای بیشتر (در خلاف جهت گرادیان دما) حرکت می‌کنند که علت آن را مطابق تئوری جنبشی می‌توان در بالاتر بودن مومنتوم

¹particle agglomeration ²cluster size ³thermophoresis ⁴sedimentation ⁵aspect ratio ⁶liquid layering on the nanoparticles-liquid interface ⁷bulk fluid

۹ روش‌های افزایش پایداری نانوسیال

بر اساس مطالعات انجام شده، علاوه بر استفاده از درصد جرمی کمتر برای نانوسیالات، سه روش کلی برای افزایش پایداری نانوسیال وجود دارد.

۱. افزودن مواد فعال سطحی^۵: افزودن ماده فعال سطحی در نانوسیال، روشی ساده و مقرون به صرفه برای افزایش پایداری نانوسیال است. مواد فعال سطحی به طور قابل ملاحظه‌ای بر مشخصه سطح سیستم اثر می‌گذارند. این مواد، حاوی یک سر قطبی آب دوست و یک سر آب‌گریز (معمولاً یک زنجیره هیدروکربنی) می‌باشند. مواد فعال سطحی را بر اساس ترکیب سر آب دوست به چهار دسته تقسیم بندی می‌کنند:

الف) غیر یونی که گروه باردار در سر آب دوست وجود ندارد

ب) آنیونی با گروه باردار منفی

ج) کاتیونی با گروه باردار مثبت

د) آمفوتر که بار سر آب دوست می‌تواند مثبت یا منفی باشد

برای انتخاب ماده فعال سطحی مناسب، باید به این نکته توجه کرد که اگر سیال پایه قطبی باشد، از مواد فعال سطحی با سر آب دوست و در غیر این صورت از مواد فعال سطحی که در روغن محلول هستند استفاده می‌شود [۳۹]. همچنین در استفاده از این مواد باید دقت کرد؛ زیرا حضور بیش از حد این مواد در نانوسیال، خصوصیات نانوسیال را تغییر داده و بر انتقال جرم و انتقال حرارت اثر می‌گذارد. اگرچه استفاده از مواد فعال سطحی یکی از راه‌های معمول بهبود پایداری نانوسیال است اما افزودن این مواد به نانوسیال ممکن است سبب بروز مشکلاتی چون ایجاد کف و کاهش ضریب هدایت حرارتی نانوسیال شود. همچنین تخریب پیوند بین ماده فعال سطحی و نانوذره در دماهای بالای ۶۰ درجه سانتی‌گراد، پایداری نانوسیال از بین می‌رود [۴۰].

۲. کنترل PH: پایداری یک نانوسیال ارتباط مستقیمی با خواص الکتروکینتیکی^۶ آن دارد. به این صورت که اگر در سطح نانوذرات چگالی بار زیاد باشد، به علت نیروی دافعه الکترواستاتیکی، نانوذرات در سیال پایدار خواهند بود. بنابراین می‌توان با تنظیم PH نانوسیال، به پایداری مطلوب رسید [۳۹].

۳. ارتعاش فراصوت^۷: به منظور افزایش پایداری نانوسیال می‌توان از لرزاننده‌های فراصوت استفاده کرد. دو روش قبلی ذکر شده با اصلاح سطح نانوذرات به بهبود پایداری نانوسیال کمک می‌کنند، اما در این روش، امواج فراصوت سبب از بین رفتن پیوندهای سطحی ضعیف میان نانوذرات شده و در نتیجه پایداری نانوسیال را افزایش می‌دهند.

۱۰ معایب کاربرد نانوسیالات

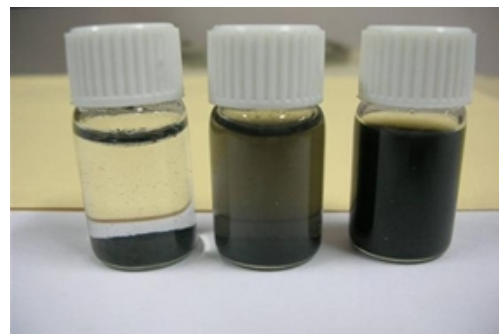
همان‌طور که اشاره شد، در مجموع نانوسیالات به دلیل خواص ترموفیزیکی خوب خود از جمله هدایت حرارتی بالا می‌توانند جهت افزایش ضریب انتقال حرارت سیالات مورد استفاده قرار گیرند؛ اما شایان ذکر است که

حجم ته‌نشین شده برحسب زمان ته‌نشینی توصیف می‌شود. عیب این روش این است که برای نانوسیال‌های با غلظت زیاد، مخصوصاً نانوتیوب‌های^۱ کربنی مناسب نیست.

۲. آزمون پتانسیل زتا: یکی از اصلی‌ترین روش‌های تخمین پایداری نانوسیال از طریق رفتار الکتروفوریتیک (یعنی حرکت ذرات یک محلول کلوئیدی در اثر جریان الکتروستاتیکی) آن است. به این صورت که اگر پتانسیل زتا دارای مقدار بالایی باشد، دافعه الکتروستاتیک بین ذرات نیز افزایش می‌یابد که منجر به پایداری مناسب نانوسیال می‌شود. از سوی دیگر، ذراتی که بار سطحی زیادی نیز دارند تمایلی به تشکیل خوشه ندارند. گفتمی است آنالیزهای آن برای ویسکوزیته سیال مبنا محدودیت‌هایی دارد.

۳. عکسبرداری از رسوب: در این روش پس از آماده شدن سوسپانسیون، از آن طی زمان‌های مختلف عکسبرداری می‌شود و میزان رسوب در آنها مشخص و ثبت می‌شود.

۴. میکروسکوپ‌های الکترونی: میکروسکوپ الکترونی روبشی^۲ و الکترونی عبوری^۳ از ابزارهای قدرتمند برای تشخیص شکل، اندازه و توزیع ذرات نانوسیال هستند؛ اما در کل نمی‌توانند وضعیت دقیق نانوذرات را در نانوسیال وقتی نمونه‌های خشک شده مورد نیاز است، نشان دهند. میکروسکوپ‌های الکترونی کرایوژنیک^۴ (بررسی رفتار مواد در دماهای پایین) می‌توانند این مشکل را حل کنند.

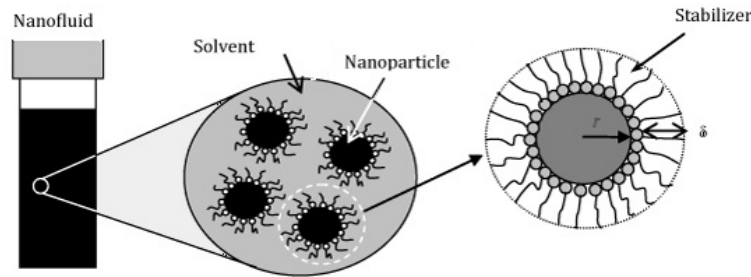


شکل ۶: نمونه‌ای از نانوسیال‌های پایدار - نیمه پایدار - ناپایدار [۲۰]

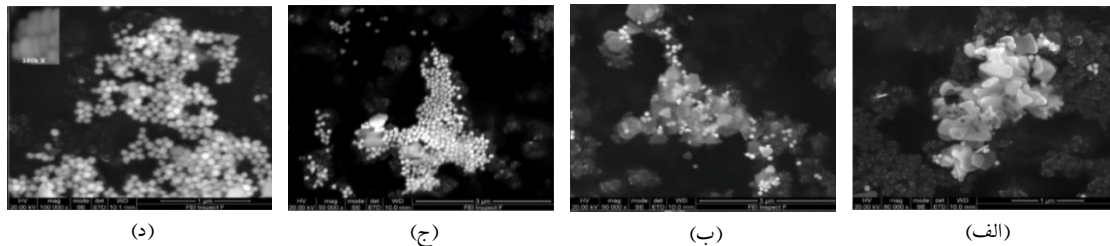
۵. روش پراکنش نور: شدت نور تابشی از یک ذره منفرد با حجم ذره در ارتباط است. از همین رو در این روش از تجزیه و تحلیل ذره منفرد برای تصویر ساختار مولکول پلیمر در محلول یا ذرات موجود در سوسپانسیون استفاده می‌شود. چون تعامل تابش الکترومغناطیس برای ذرات کوچک در تابش نور بسیار ضعیف است، در نتیجه بیشتر نور تابشی انتقال داده می‌شود و قسمت کمی از آن پخش می‌شود.

۶. روش موازنه رسوب: در این روش سینی تعادل رسوب در نانوسیال تازه فرو می‌رود و وزن رسوب نانوذرات طی یک بازه زمانی مشخص اندازه‌گیری می‌شود. سپس جزء ذرات رسوب کرده در زمان مورد محاسبه می‌شود. در این روش پایداری کلوئیدی نانوسیال از طریق یافتن نمودار تغییرات ضریب هدایت حرارتی در محدوده وسیعی از کسرهای حجمی نانوذرات مشخص می‌شود [۲۲]. گفتمی است روش تهیه نانوسیال نیز بر میزان پایداری آن اثر می‌گذارد.

¹nanotube ²scanning electronic microscopy (SEM) ³transmission electronic microscopy (TEM) ⁴cryogenic electronic microscopy (CEM)
⁵surfactant ⁶electrokinetic ⁷ultrasonic



شکل ۷: شماتیک پایداری نانوسیالات [۲۰]



شکل ۸: تأثیر اولتراسونیک بر نانوذرات طلا؛ (الف) لحظه شروع، (ب) زمان ۱۰ دقیقه، (ج) زمان ۲۰ دقیقه، (د) زمان ۳۰ دقیقه [۴۱]

ناشی از خوردگی، ناخالصی و افت فشار را کاهش و پایداری سیالات در مقابل رسوب‌گذاری بهبود چشمگیری می‌یابد. به دلیل بالابودن ضریب هدایتی نانوذرات، با توزیع در سیال پایه باعث افزایش ضریب هدایت حرارتی سیال می‌شوند که یکی از پارامترهای اساسی انتقال حرارت محسوب می‌شود. به صورت خلاصه مزایای استفاده از نانوسیال، در مقایسه با سیال با ذرات بزرگتر، شامل افزایش انتقال حرارت، ایجاد سوسپانسیون پایدارتر، کاهش توان لازم برای پمپاژ سیال، کاهش گرفتگی و انسداد مجاری و کاهش اندازه سیستم‌های انتقال حرارت می‌شود. همچنین نانوذرات سبب بهبود انتقال جرم نیز می‌شوند اما تاکنون سازوکار دقیق این پدیده مشخص نشده و تحقیقات بیشتری لازم است.

مراجع

- [1] J. C. Maxwell, *A treatise on electricity and magnetism*, vol. 1, Clarendon press, 1881.
- [2] R. Hamilton, O. Crosser, Thermal conductivity of heterogeneous two-component systems, *Industrial & Engineering chemistry fundamentals*, vol. 1, no. 3, pp. 187-191, 1962.
- [3] S. Chol, Enhancing thermal conductivity of fluids with nanoparticles, *ASME-Publications-Fed*, vol. 231, no. 2, pp. 99-106, 1995.
- [4] R. E. Rosensweig, *Ferrohydrodynamics*, New York: Dover, 2014.
- [5] N. W. Pech-May, C. Vales-Pinzón, A. Vega-Flick, Á. Cifuentes, A. Oleaga, A. Salazar, et al., Study of the thermal properties of polyester composites loaded with oriented carbon nanofibers using the front-face flash method, *Polymer Testing*, vol. 50, no. 3, pp. 255-261, 2016.
- [6] B. Buonomo, O. Manca, L. Marinelli, S. Nardini, Effect of temperature and sonication time on nanofluid thermal

استفاده از نانوذرات در سیالات پایه محدودیت‌هایی نیز دارد. مثلاً در کنار استفاده از پمپ‌های قوی‌تر برای تأمین انرژی لازم برای نانوذرات (به دلیل افت فشار ناشی از وجود نانوذرات در سیال پایه)، برای تولید و ساخت نانوذرات هزینه‌های اضافی نیز باید پرداخت کرد. محققان حوزه کاربرد نانو، امیدوارند با بهبود روش‌های تولید نانوذرات در حجم انبوه و تجاری‌سازی هرچه بیشتر این نانوذرات، قیمت آن به شدت کاهش یابد؛ همان‌طور که در طول مهر و موم‌های گذشته، این کاهش چشمگیر بوده است. روش‌های تولید نانوسیالات کلاً به سه روش دو مرحله‌ای، تک مرحله‌ای و روش‌های نوآورانه گریز از مرکز و رسوب نشانی دسته‌بندی می‌شوند که هزینه مصرفی در روش تک مرحله‌ای از دیگر روش‌ها بالاتر است. از طرف دیگر، محققان نشان داده‌اند که با کسر حجمی بسیار اندک نانوذرات در نانوسیال، می‌توان نتایج انتقال حرارتی مطلوبی گرفت که این امر هزینه‌ها را کاهش می‌دهد. همچنین با بهبود روش‌های تولید نانوسیال‌ها، پایداری مطلوب نانوسیال‌ها را می‌توان انتظار داشت. در کنار این موارد، ساخت نانوسیال‌ها با لزجت کم حتی کمتر از سیال پایه، به رفع مشکل افزایش افت فشار و توان پمپاژ نانوسیال‌ها کمک شایان توجهی خواهد نمود.

۱۱ نتیجه‌گیری

اگرچه سیال‌های نانو از پتانسیل بالایی در زمینه افزایش نرخ انتقال حرارت برخوردارند، اما تحقیقات انجام‌شده روی مفهوم سازوکار افزایش و کاربردهای نانوسیال همچنان در مراحل اولیه قرار دارد. تا به امروز مدل‌های مختلف تحلیلی، روش‌های عددی و آزمایشگاهی برای پیش‌بینی و اندازه‌گیری هدایت حرارتی نانوسیال‌ها مورد بررسی قرار گرفته‌اند. برای کاربردهای عملی به منظور افزایش نرخ انتقال حرارت فهم کاملی از عملکرد انتقال حرارتی نانوسیال‌ها لازم است. به علت کوچک بودن نانوذرات، بخش عمده مشکلات

- [19] S. S. Meibodi, A. Kianifar, H. Niazmand, O. Mahian, S. Wongwises, Experimental investigation on the thermal efficiency and performance characteristics of a flat plate solar collector using SiO₂/EG-water nanofluids, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, vol. 65, no. 1, pp. 71-75, 2015.
- [20] C. H. Chon, K. D. Kihm, S. P. Lee, S. U. Choi, Empirical correlation finding the role of temperature and particle size for nanofluid (Al₂O₃) thermal conductivity enhancement, *Applied Physics Letters*, vol. 87, no. 1, p. 153107, 2005.
- [21] S. S. Murshed, C. N. de Castro, *Nanofluids: Synthesis, Properties, and Applications*, Nova Science Publishers, Incorporated, 2014.
- [22] J. Sarkar, P. Ghosh, A. Adil, A review on hybrid nanofluids: recent research, development and applications, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 43, no. 4, pp. 164-177, 2015.
- [23] M. Hemmat Esfe, S. Saedodin, O. Mahian, S. Wongwises, Thermal conductivity of Al₂O₃/water nanofluids, *Journal of Thermal Analysis & Calorimetry*, pp. 35-39, vol. 117, 2014.
- [24] M. Chandrasekar, S. Suresh, A. C. Bose, Experimental investigations and theoretical determination of thermal conductivity and viscosity of Al₂O₃/water nanofluid, *Experimental Thermal and Fluid Science*, vol. 34, No. 1, pp. 210-216, 2010.
- [25] Y. Xuan, Q. Li, Heat transfer enhancement of nanofluids, *International Journal of heat and fluid flow*, vol. 21, no. 2, pp. 58-64, 2000.
- [26] S. Choi, Z. Zhang, W. Yu, F. Lockwood, E. Grulke, Anomalous thermal conductivity enhancement in nanotube suspensions, *Applied physics letters*, vol. 79, no. 3, pp. 2252-2254, 2012.
- [27] X.-Q. Wang, A. S. Mujumdar, Heat transfer characteristics of nanofluids: a review, *International journal of thermal sciences*, vol. 46, pp. 1-19, 2007.
- [28] V. Bianco, O. Manca, S. Nardini, K. Vafai, *Heat transfer enhancement with nanofluids*, CRC Press, 2015.
- [29] G. Kefayati, Natural convection of ferrofluid in a linearly heated cavity utilizing LBM, *Journal of Molecular Liquids*, vol. 191, no. 5, pp. 1-9, 2014.
- [30] R. Ganguly, S. Sen, I. K. Puri, Heat transfer augmentation using a magnetic fluid under the influence of a line dipole, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, vol. 271, no. 1, pp. 63-73, 2004.
- [31] J. de Vicente, D. J. Klingenberg, R. Hidalgo-Alvarez, Magnetorheological fluids: a review, *Soft Matter*, vol. 7, no. 3, pp. 3701-3710, 2011.
- [32] J. Lee, I. Mudawar, Assessment of the effectiveness of nanofluids for single-phase and two-phase heat transfer in micro-channels, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 50, no. 2, pp. 452-463, 2007.
- [33] Y. Xuan, W. Roetzel, Conceptions for heat transfer correlation of nanofluids, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 43, no. 2, pp. 3701-3707, 2000.
- conductivity measurements by nano-flash method, *Applied Thermal Engineering*, vol. 91, no. 3, pp. 181-190, 2015.
- [7] M. Xing, J. Yu, R. Wang, Experimental study on the thermal conductivity enhancement of water based nanofluids using different types of carbon nanotubes, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 88, no. 2, pp. 609-616, 2015.
- [8] 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, *Experimental thermal and fluid science*, vol. 55, no. 6, pp. 1-5, 2014.
- [9] M. Shariat, A. Akbarinia, A. H. Nezhad, A. Behzadmehr, R. Laur, Numerical study of two phase laminar mixed convection nanofluid in elliptic ducts, *Applied Thermal Engineering*, vol. 31, no. 2, pp. 2348-2359, 2011.
- [10] M. Shariat, R. M. Moghari, A. Akbarinia, R. Rafee, S. Sajjadi, Impact of nanoparticle mean diameter and the buoyancy force on laminar mixed convection nanofluid flow in an elliptic duct employing two phase mixture model, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, vol. 50, no. 9, pp. 15-24, 2014.
- [11] S. Z. Heris, M. N. Esfahany, G. Etamad, Numerical investigation of nanofluid laminar convective heat transfer through a circular tube, *Numerical Heat Transfer, Part A: Applications*, vol. 52, no. 3, pp. 1043-1058, 2007.
- [12] S. Jafarmadar, N. Azizinia, N. Razmara, F. Mobadersani, Thermal Analysis and Entropy Generation of Pulsating Heat Pipes Using Nanofluids, *Applied Thermal Engineering*, 2016.
- [13] M. H. Shojaeefard, J. Zare, M. Tahani, Numerical Simulation of the Thermal Performance of a Nanofluid-Filled Heat Pipe, *Heat Transfer Engineering*, vol. 37, no. 4, pp. 220-231, 2016.
- [14] L. Kamble, D. Pangavhane, T. Singh, Artificial Neural Network Based Prediction of Heat Transfer from Horizontal Tube Bundles Immersed in Gas-Solid Fluidized Bed of Large Particles, *Journal of Heat Transfer*, vol. 137, no. 4, p. 012901, 2015.
- [15] W. Azmi, K. Sharma, P. Sarma, R. Mamat, S. Anuar, L. S. Sundar, Numerical validation of experimental heat transfer coefficient with SiO₂ nanofluid flowing in a tube with twisted tape inserts, *Applied Thermal Engineering*, vol. 73, no. 8, pp. 296-306, 2016.
- [16] M. Khoshvaght-Aliabadi, F. Hormozi, A. Zamzamian, Effects of geometrical parameters on performance of plate-fin heat exchanger: vortex-generator as core surface and nanofluid as working media, *Applied Thermal Engineering*, vol. 70, no. 1, pp. 565-579, 2014.
- [17] M. Sarafraz, F. Hormozi, Pool boiling heat transfer to dilute copper oxide aqueous nanofluids, *International Journal of Thermal Sciences*, vol. 90, no. 1, pp. 224-237, 2015.
- [18] J. Bi, K. Vafai, D. M. Christopher, Heat transfer characteristics and CHF prediction in nanofluid boiling, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 80, no. 3, pp. 256-265, 2015.

- [34] A. Behzadmehr, M. Saffar-Avval, N. Galanis, Prediction of turbulent forced convection of a nanofluid in a tube with uniform heat flux using a two phase approach, *International Journal of Heat and Fluid Flow*, vol. 28, no. 4, pp. 211-219, 2007.
- [35] J. Buongiorno, Convective transport in nanofluids, *Journal of Heat Transfer*, vol. 128, no. 7, pp. 240-250, 2006.
- [36] D. Wen, Y. Ding, Effect of particle migration on heat transfer in suspensions of nanoparticles flowing through minichannels, *Microfluidics and Nanofluidics*, vol. 1, no. 2, pp. 183-189, 2005.
- [37] X. Li, D. Zhu, X. Wang, N. Wang, J. Gao, H. Li, Thermal conductivity enhancement dependent pH and chemical surfactant for Cu-H₂O nanofluids, *Thermochimica Acta*, vol. 469, no. 3, pp. 98-103, 2008.
- [38] L. Talbot, R. Cheng, R. Schefer, D. Willis, Thermophoresis of particles in a heated boundary layer, *Journal of fluid mechanics*, vol. 101, no. 4, pp. 737-758, 1980.
- [39] C. Ho, W. Liu, Y. Chang, C. Lin, Natural convection heat transfer of alumina-water nanofluid in vertical square enclosures: an experimental study, *International Journal of Thermal Sciences*, vol. 4, no. 2, pp. 1345-1353, 2010.
- [40] G. Huminić, A. Huminić, Heat transfer characteristics in double tube helical heat exchangers using nanofluids, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 54, no. 9, pp. 4280-4287, 2011.
- [41] H.-J. Chen, D. Wen, Ultrasonic-aided fabrication of gold nanofluids, *Nanoscale research letters*, vol. 6, no. 7, p. 198, 2011.