

بررسی رفتار حرارتی میکروسوسپانسیون‌ها و نانوسیالات

احمد قضااتلو^۱، مجتبی شریعتی نیاسر^۲ و زینب حجار^۱

۱- پژوهشگاه صنعت نفت تهران

۲- دانشکده مهندسی شیمی، پردیس دانشکده‌های فنی دانشگاه تهران،

چکیده

در این مقاله ابتدا با معرفی نانوسیالات و ذکر مزایا و کاربردهای آنها نسبت به میکروسوسپانسیون، به نحوه بررسی رفتار حرارتی آنها از دو بعد تئوری و تجربی پرداخته می‌شود. در بخش تئوری با معرفی فرضیات حاکم بر مدل‌های استاتیک و دینامیک دقت و محدوده کاربرد این مدل‌ها تعیین و مدل‌های معتبرتر نیز معرفی و نتیجه شد که مدل‌های دینامیک به دلیل اینکه پارامترهای موثر بیشتری را پوشش می‌دهند، دقت کافی برای تخمین ضریب هدایت حرارتی میکروسوسپانسیون‌ها را دارند و از بین آنها مدل "جانگ" دقت بیشتری دارد. اما بطور کلی این مدل‌ها فقط برای میکروسوسپانسیون‌ها مناسب بوده و قادر به تخمین عملکرد نانوسیالات نیستند زیرا مکانیسم‌های اصلی حاکم بر عملکرد نانوسیالات را در بر نمی‌گیرند از این رو روش تجربی بهترین راه برای گیری ضریب هدایت حرارتی نانوسیالات می‌باشد. سپس با بررسی نتایج ناشی از مطالعات تجربی عملکرد هر یک از گروه نانوذرات فلزی، اکسیدفلزی و نانوساختارهای کربنی با یکدیگر مقایسه و نتیجه گیری شد که در بین آنها نانو ساختارهای کربنی نتایج بهتری را بدست می‌آورند

واژه‌های کلیدی: میکروسوسپانسیون‌ها، نانوسیال، مدل دینامیک، استاتیک، هدایت حرارتی

ghozatlooa@ripi.ir

۱- مقدمه

مخصوصاً در غلظت‌های بالا مانع از استفاده گسترده و جدی آنها در انتقال حرارت شده است. با کوچک تر شدن ذرات در حد نانومتری مشکلات مذکور مرتفع می‌شود بطوریکه گروهی جدید از سیالات به نام نانوسیال پدید آمدند که قادر به انتقال بسیار خوب حرارت هستند. نانوسیال شامل یک سوسپانسیون جامد/مایع با پخش یکنواخت و پایداری از نانوذرات در یک سیال خالص می‌باشد. آزمایش‌ها نشان دادند که هدایت گرمایی آنها خیلی بیشتر از آن چیزی است که انتظار می‌رود. چندین تئوری جدید در سال‌های اخیر برای توضیح این رفتار غیرعادی پیشنهاد شد که در بین آنها تئوری میکروهمفرت نشان داد که تنها با افزودن نانوذرات سبک با اندازه کمتر از ده نانومتر افزایش شگفت‌آوری در هدایت گرمایی سیال اتفاق می‌افتد. مطابق این تئوری، نانوذرات سبک‌تر موجب افزایش بیشتر هدایت گرمایی در نانوسیالات می‌شود.

سیالات مرسوم انتقال حرارت (آب، اتیلن گلیکول و روغن موتور) در مقایسه با فلزات، اکسیدهای فلزی، و ساختارهای کربنی ضریب هدایت حرارت پائینی‌تری دارند. جدول شماره (۱) یک مقایسه ای بین ضریب هدایت حرارتی برخی از ذرات در دمای محیط دارد.

جدول ۱: مقایسه ضریب هدایت حرارتی ذرات مختلف در دمای محیط

منبع	ضریب هدایت حرارتی (W/mK)	ماده
۱	۵۸۰/۰	آب
۱	۲۵۲/۰	اتیلن گلیکول
۲	۷۸	اکسید مس
۳	۲۳۷	آلومینیم
۳	۴۰۱	مس
۴	۱۸۰۰	الماس
۵	۳۰۰۰	نانولوله کربنی
۴	۵۰۰۰	گرافن

۲- کاربرد نانوسیالات

به دلیل هدایت حرارتی و سطح زیاد انتقال حرارت در نانوسیالات، استفاده گسترده آنها در مبدل‌ها، خنک کننده‌ها و تجهیزات صنعتی امکان پذیر است از این رو می‌توان گفت عمده ترین کاربرد نانوسیالات در سیستم‌های سرمایشی و گرمایشی می‌باشد که اهم دلایل آن شامل موارد زیر است:

ضریب هدایت حرارتی بالا:

بطور کلی ضریب هدایت حرارتی نانوسیالات در غلظت‌های مشابه بسیار بیشتر از میکروسوسپانسیون‌ها است. بطوریکه حتی در غلظت‌های پایین نیز این تفاوت وجود دارد. در غلظت پایین نانوذرات، اغلب سیال رفتار نیوتنی خود را حفظ می‌کند. در نانوسیالات وجود وابستگی شدید هدایت به دما و افزایش چشمگیر آن در شار حرارتی بحرانی، یکی از مزایای نانوسیالات بشمار می‌رود. نتایج نشان می‌دهد که با بکار گیری نانو سیالات ضریب هدایت حرارتی تا ۴۰٪ درصد افزایش می‌یابد.

افزایش سرعت انتقال حرارت:

در نانوسیالات به دلیل حرکت تصادفی زیاد و برهم‌کنش‌های بالا بین نانوذرات و همچنین وجود سطح بالا، بطور کلی سرعت جذب و انتقال حرارت بسیار زیاد است. از طرفی با ایجاد تعامل مناسب نانوذرات با سیال پایه، امکان دسترسی اتم‌ها با سیال بیشتر فراهم شده و این امر موجب افزایش سرعت انتقال حرارت می‌شود.

هر قدر اندازه ذرات کوچک شود سطح زیادتری ایجاد خواهد شد که در مکانیسم انتقال حرارت کاربرد مفیدی داشته و موجب افزایش سرعت انتقال حرارت می‌شود. در میکروسوسپانسیون‌ها که ذرات با اندازه میکرومتر در داخل سیالات حضور دارند مشکلات زیادی در سیستم‌های انتقال حرارت ایجاد می‌کند. بطوریکه این ذرات به سرعت در داخل سیستم ته نشین و یا کلوخه شده و ضمن بستن مسیر جریان باعث افت فشار زیادی می‌شوند. همچنین این ذرات در سیستم‌های انتقال، نظیر پمپ‌ها با برخورد با سطوح، به دلیل بزرگی اندازه آنها منجر به سائیدگی دیواره‌ها می‌شوند. بنابراین با وجود ضریب هدایت حرارتی متوسط میکروسوسپانسیون‌ها، به علت ملاحظات فرآیندی (رسوب، خوردگی، سایش و افت فشار)، آنها را سیال انتقال حرارت مناسبی بشمار نمی‌آورند. بعلاوه مشکلات رئولوژیکی و عدم پایداری میکروسوسپانسیون‌ها

عدم ایجاد رسوب در سیستم:

یکی از مزایای نانوسیالات نسبت به میکروسوسپانسیون‌ها عدم رسوب نانوذرات است بطوریکه در زمان‌های طولانی در حالت سکون معمولاً ته‌نشینی صورت نمی‌گیرد. از این رو مشکلات مربوط به رسوب و افت فشار ناشی از آن در نانوسیالات دیده نمی‌شود.

کاهش خوردگی و اثرات سایشی:

در سیستم‌های انتقال حرارت هر قدر اندازه ذرات درون سیال کوچکتر باشد جرم و در نتیجه انرژی سینتیکی سیال عامل کمتر می‌شود و در هنگام برخورد سیال با دیواره سیستم، تأثیر سایشی کمتری مشاهده می‌شود. از این رو خسارت‌های ناشی از سایش و خوردگی در سیستم‌های حاوی نانوسیالات نسبت به میکروسوسپانسیون‌ها بسیار کمتر و در حد ناچیز است.

سیستم‌های سرمایشی پیشرفته:

نانوسیالات در سیستم‌های پیشرفته تولید اشعه X و فوتون نقش ایجاد سرمايش را ایفا می‌کنند. از آنجائی که در تولید پرتو اشعه X حرارت بسیار زیادی ایجاد می‌شود فرایند تولید نیاز به شدت سرمایشی در حدود ۲۰۰۰ تا $cm23000/W$ دارد و چنین سیستم سرمایشی با کاربرد نانوسیال امکان پذیر است (۶).

سیستم‌های میکرو الکترو مکانیکال (MEMS):

بطور کلی برای انتقال حرارت‌های بیش از $cm2100/W$ خنک‌کننده‌های معمولی قابل استفاده نیستند و اغلب از میکروخنک‌کننده‌ها و میکروکانال‌ها استفاده می‌شود. میکروکانال‌ها به علت در اختیار گذاشتن سطح بسیار بالای حرارت به سیالی با هدایت حرارتی بالا نیاز دارند. استفاده از میکروسوسپانسیون‌ها افت فشار زیادی ایجاد می‌کنند و کاربردشان غیرعملی می‌شود. از این رو نانوسیالات با ضریب هدایت بالا مکمل مناسبی برای آنها محسوب می‌شوند.

کاهش دبی سیال عامل:

به دلیل هدایت بالای نانوسیالات، استفاده آنها در سیستم‌های انتقال حرارت منجر به کاهش در دبی سیال عامل مورد نیاز می‌شود.

کوچک سازی سیستم‌ها:

کاهش دبی سیال عامل، موجب کوچک‌تر شدن سیستم شده و در نهایت موجب کاهش هزینه تمام شده، کاهش وزن تجهیزات فرایندی و کاهش وزن کلی فرایند می‌شود. نتایج نشان می‌دهد که با بکار گیری نانو سیالات ابعاد مبدل را می‌توان تا ۳۰٪ کاهش داد.

مصرف انرژی کمتر:

با کاهش دبی سیال عامل، مقدار انرژی لازم برای انتقال سیال نیز کاهش می‌یابد.

ایجاد آلودگی کمتر:

با کاهش انرژی کمتر و کوچک شدن اندازه تجهیزات فرایندی، آلودگی کمتری نیز ایجاد می‌شود.

۳- مطالعات تئوری اندازه‌گیری ضریب هدایت حرارتی نانوسیالات

در مدل سازی تئوری به منظور اندازه‌گیری ضریب هدایت حرارتی نانوسیالات مدل‌ها به دو گروه مدل‌های استاتیک و دینامیک تقسیم بندی می‌شوند (۷).

که در ادامه به معرفی هر یک از آنها پرداخته می‌شود.

۱-۳- مدل‌های استاتیک^۱

در مدل‌های استاتیک ذرات جامد درون فاز سیال بصورت ثابت فرض می‌شود و از حرکت آنها صرفنظر می‌شود. این فرض در دو حالت زیر برقرار است:

- اندازه ذرات جامد در حد میکرون و بزرگتر باشد
- سیال پایه ویسکوز باشد

از آنجائی که در این مدل‌ها ضریب هدایت حرارتی تابع کسر حجمی ذرات و هدایت دو فاز جامد و مایع می‌باشد در نتیجه این مدل‌ها قادر به پیش بینی جامع از رفتار هدایت حرارتی سوسپانسیون‌هایی هستند که فرض اول در آن بیشتر صدق نماید. جدول شماره (۲) اهم مدل‌های استاتیک را بیان می‌کند.

جدول ۲: اهم مدل‌های تئوری استاتیک

نام مدل	دایره کاربرد	رابطه
ماکسول ^۱	ذرات کروی	
همپلتون ^۲	ذرات کروی	
دیویس	ذرات کروی	
لو لین	کروی و غیر کروی	

در مدل‌های فوق ضریب هدایت حرارتی میکروسوسپانسیون و و و به ترتیب ضریب هدایت حرارتی سیال پایه و میکرو ذرات جامد، Π فاکتور شکل تجربی ذرات، Ψ نسبت سطح کره هم حجم با ذره به سطح ذره و کسر حجمی ذرات جامد است. رابطه ماکسول رایج ترین رابطه‌ای است که برای سوسپانسیون‌های با ابعاد میکرونی بکار می‌رود. مشاهده می‌شود که این رابطه تنها تابع سه پارامتر است. درحالیکه در میکروسوسپانسیون‌هایی که حاوی ذرات غیرکروی هستند ضریب هدایت حرارتی علاوه بر جزء حجمی ذرات، به شکل میکروذرات (که تابعی از میزان کرویت ذرات می‌باشد) و احتمالاً عوامل دیگری نیز بستگی پیدا می‌کند. در این راستا رابطه همپلتون با در نظر گرفتن انحراف از حالت کرویت ذرات اینگونه میکروسوسپانسیون‌ها مطرح و درحالیکه نسبت هدایت دو فاز بزرگتر از ۱۰۰ باشد کاربرد پیدا کرد (۸).

همانطور که مشاهده می‌شود فاکتور شکل تجربی موجود در رابطه همپلتون تأثیر میزان کرویت ذرات را بررسی می‌کند. یعنی بجای ضریب Π در رابطه ماکسول از Π استفاده شده است. درصورتیکه ذرات کاملاً کروی باشند مقدار Π برابر ۳ و وقتی ذرات بصورت استوانه شوند مقدار آن برابر ۶ می‌شود که در حالت کروی، با جایگذاری عدد Π برابر ۲ در رابطه همپلتون به همان رابطه ماکسول خواهیم رسید. لذا برای ذرات کروی مقدار گزارش شده است (۶). در تحقیق دیگری مقادیر ۵/۰ تا ۱ برای Ψ در نظر گرفته شده که مقدار ۰/۷ بهترین تطابق تجربی را دارد (۹). در غلظت‌های بالا، نانوذرات به شکل توده در می‌آیند و به فضای میکرونی نزدیک می‌شوند در اینصورت مدل‌های استاتیک جواب تقریبی خوبی می‌دهند. مثلاً در مواردی که ضریب هدایت حرارتی نانوذرات، بیش از ۲۰ برابر ضریب هدایت حرارتی سیال پایه باشد ضریب هدایت حرارتی نانوسیال حاصله حدود سه برابر پاسخی است که از روابط مربوط به سوسپانسیون‌ها برای بدست می‌آید (۱).

۲-۳- مدل‌های دینامیک^۲

1- Static models

2- Dynamic models

انتقال انرژی افزایش می‌یابد (۷). این حرکت تابع قوی از دما بوده بطوریکه در دماهای بالا شدت بیشتری دارد. هدایت گرمایی ویژه در نانوسیالات ناشی از این حرکت است و بر اساس آن است که هدایت حرارتی آنها نسبت به سیال پایه بیشتر است. با این حال، سهم حرکت تصادفی در هدایت حرارتی نانوسیالات کوچک است و نمی‌تواند دلیل اصلی خواص ویژه حرارتی در انتقال گرما در نانوسیالات محسوب شود (۱۰).

۳-۳-۲- لایه‌بندی مایع در اطراف نانوذرات

لایه اتمی مولکول‌های مایع اطراف نانوذرات به دلیل ایجاد پیوندهای کوالانسی موجب بروز رفتاری جامد از این نانولایه می‌شود. این لایه به عنوان یک پل حرارتی بین نانوذرات جامد و مایع عمل می‌کند و نقش مهمی در افزایش رسانایی حرارتی نانوسیالات ایفا می‌کند. در تشکیل این لایه مرزی (بین سیال با سطح نانوذرات) دو رفتار سطح ترشونده و سطح غیر ترشونده وجود دارد. در سطوح ترشونده سیال قادر است با سطح نانوذرات پیوندهای کوالانسی کافی برقرار کند و بر اساس آن تعادل بین مایع و ذرات جامد بیشتر شده و مقاومت حرارتی در فاز مشترک کاهش می‌یابد و در نتیجه سرعت ترجمه انتقال حرارت افزایش می‌یابد. ولی در حالت غیر ترشوند مقاومت حرارتی در فاز مشترک افزایش یافته و سرعت ترجمه انتقال حرارت کاهش می‌یابد (۷).

در رفتار ترشوند با افزایش ضخامت لایه، هدایت حرارتی نانوسیال نیز افزایش می‌یابد. از این رو هر قدر محدوده اندازه ذرات کوچک‌تر شود، ضخامت نانولایه بیشتر شده و در نتیجه اثر اندازه ذرات در بهبود رفتار حرارتی آشکارتر می‌شود. بنابراین افزایش ضخامت این لایه نانویی در اطراف نانوذرات شاید موثرترین مکانیسم برای افزایش رفتار حرارتی نانوسیالات باشد. اگرچه وجود لایه نانویی اطراف نانوذرات در رفتار حرارتی نانوسیالات اثر مثبتی دارد ولی تنها عامل اثر گذار محسوب نمی‌شود. «زو» با بررسی‌های انجام شده توسط دینامیک مولکولی نتیجه گرفته است که لایه اتمی مایع اطراف ذرات اثر قابل توجهی بر خواص انتقال حرارت سیال نمی‌گذارد (۱۰).

۳-۳-۳- طبیعت انتقال گرما در نانوذرات

وقتی که اندازه ذرات بسیار کوچک می‌شود به این معنی است که متوسط مسیر آزاد فونون‌ها در برابر اندازه ذرات قابل مقایسه می‌شود. "کلیسکی" نشان داد که در نانوسیالات گرما در داخل نانوذرات (به عنوان فاز جامد) بصورت بالستیک و بصورت پراکندگی چندگانه منتشر می‌شود و سپس به سطح مشترک جامد/مایع می‌رسد این سطح نقش اصلی را در ترجمه سریع انتقال گرما از درون نانوذرات به فاز مایع ایفا می‌کند و این سرعت ترجمه موجب افزایش محسوس انتقال حرارت در نانوسیالات می‌شود.

وی همچنین پیشنهاد کرد که نانوذرات به دلیل حرکت تصادفی به یکدیگر بسیار نزدیک تر می‌شوند و این امر موجب افزایش فونون‌ها بصورت منسجم‌تر شده و در نهایت جریان گرما در میان ذرات با سرعت بیشتری انتقال می‌یابد. بنابراین دو عامل اصلی مسیر آزاد فونون‌ها و سرعت ترجمه انتقال حرارت در سطح مشترک دو فاز مایع و جامد از فونون‌های ذرات جامد به مولکول‌های ذرات مایع از عوامل اصلی تاثیر گذار بر انتقال حرارت درون سوسپانسیون‌ها می‌باشد که هر دو عامل تابع دانسیته سوسپانسیون است. حال اگر غلظت نانوذرات درون سیال کم باشد سرعت ترجمه انتقال حرارت در سطح مشترک تابعیت کمتری از وجود نانوذرات پیدا می‌کند (۱۰).

۳-۳-۴- خوشه‌ای شدن نانوذرات

از آنجائی که نانوذرات درون سیال دارای حرکت تصادفی هستند نیروهای واندروالس با قدرت بیشتری عمل کرده و موجب خوشه‌ای شدن آنها از

در مدل‌های دینامیک ذرات جامد درون فاز سیال بصورت مستمر دارای حرکت‌های تصادفی هستند. این حرکت وقتی که اندازه ذرات در حد نانومتری باشد اهمیت پیدا می‌کند و چون این مدل‌ها فاکتورهای موثر بر حرکت تصادفی نانو ذرات را در خود لحاظ کرده‌اند شده لذا به تنهایی قادر به پیش بینی جامع از رفتار هدایت حرارتی سوسپانسیون‌ها نیستند و در نتیجه بصورت تکمیل و مطرح می‌شوند. جدول شماره (۳) برخی از مدل‌های استاتیک را بیان می‌کند.

جدول ۳: برخی مدل‌های تئوری دینامیک

نام مدل	رابطه
دافونی	
جانگ و چوی	
پراشر	

که در آن ضریب هدایت حرارتی سوسپانسیون و و به ترتیب ضریب هدایت حرارتی سیال پایه و ذرات جامد است و Π فاکتور شکل ذرات و کسر حجمی ذرات جامد و نیز ضخامت لایه مایع روی ذرات و "مقاومت کاپیتزا" است

از مدل‌های دینامیک ارائه شده مدل جانگ و چوی^۴ که بر اساس حرکت تصادفی نانوذرات، قطر مولکولی ذرات سیال پایه، عدد رینولدز، ضریب نفوذ نانوذرات و متوسط مسیر آزاد مولکول‌های سیال پایه استوار است معتبرترین این مدل‌ها می‌باشد. بطور کلی مدل هائیکه بتوانند پدیده‌های مهم و موثر در انتقال حرارت نانوسیالات را بیشتر پوشش دهند از دقت بیشتری نیز برای پیش بینی ضریب هدایت حرارتی نانوسیالات برخوردارند. بنابراین در ادامه به معرفی پدیده‌های مهم و موثر در انتقال حرارت نانوسیالات پرداخته می‌شود.

۳-۳-۳- پدیده‌های مهم و موثر در انتقال حرارت نانوسیالات

بطور کلی می‌توان گفت چهار مکانیسم اصلی زیر به عنوان پدیده‌های مهم و موثر در انتقال حرارت نانوسیالات شناخته شده است و بیشتر مورد توجه محققین قرار دارد (۱۰).

- حرکت تصادفی نانوذرات^۵
- لایه بندی مایع در اطراف نانوذرات^۶
- طبیعت انتقال گرما در نانوذرات^۷ (ارتعاش هر اتم و هر ذره به به اتم‌ها و ذرات مجاورش)
- خوشه‌ای شدن نانوذرات^۸

۳-۳-۱- حرکت تصادفی نانوذرات

حرکت تصادفی ذرات در مقیاس نانویی و مولکولی به عنوان یکی از مکانیسم‌های مهم در تعیین رفتار حرارتی این ذرات در سوسپانسیون‌ها مطرح می‌باشد. این حرکت در اثر برخورد مداوم نانوذرات با بالک مولکولی مایع بوجود می‌آید که بر اساس آن ضمن افزایش یکنواختی توزیع نانوذرات درون سیال موجب دسترسی بیشتر گرما در داخل سیال می‌گردد و در نتیجه سرعت

3- Kapitza

4- Jang and Choi

5- Brownian motion of particles

6- Liquid layering around nanoparticles

7- Nature of the heat transport in the nanoparticles

8- Clustering of nanoparticles

می‌باشد. شکل شماره (۱) نمائی از دستگاه KD2 می‌باشد.



شکل ۱: نمائی از دستگاه اندازه گیری تجربی ضریب هدایت حرارتی نانوسیالات KD2-

از دستگاه KD2 معمولاً در محدوده دمائی ۱۰ تا ۶۰ درجه سانتی‌گراد برای اندازه‌گیری ضریب هدایت حرارتی استفاده می‌شود (۱۲). این دما توسط یک حمام کنترل دمائی تامین و توسط آن، دمای نانوسیال ثابت نگه داشته می‌شود. برای اندازه گیری ابتدا نمونه را در محفظه مخصوص دستگاه ریخته و آنرا در حمام کنترل دمائی قرار می‌دهند و ترموکوپل را درون نمونه قرار می‌دهند تا دمای افزایش و یا کاهش دمای نمونه رصد شود. پس از اینکه دمای نمونه به دمای مورد نظر (دمای حمام) رسید به مدت ۳۰ دقیقه آنرا درون حمام نگه می‌دارند تا اطمینان کامل از دمای نمونه حاصل شود. سپس ضریب هدایت سه بار اندازه‌گیری شده و متوسط آن را گزارش می‌کنند. درصد افزایش هدایت از طریق فرمول $((k_0 - k) / k_0) * 100$ محاسبه می‌شود که در آن k_0 هدایت سیال پایه و k هدایت نانوسیال است.

۴-۱- نانوسیالات پایه فلزی

نانوسیالات پایه فلزی شامل سیالاتی می‌شود که در آنها از نانوذرات فلزی و یا اکسید فلزی استفاده شده است. "ایستمن" افزایش ۶۰٪ را در ضریب هدایت حرارتی آب حاوی ۵٪ حجمی نانوذرات کریستالی اکسیدمس گزارش کرد (۱۲). "ماسودا" افزایش ۳۰ درصدی هدایت حرارتی را با اضافه کردن ۴/۳ درصد حجمی آلومینا با متوسط اندازه ذرات ۱۳ نانومتر در آب گزارش کرد (۱۳). سپس "لی" با افزایش اندازه نانوذرات آلومینا به ۳۳ نانومتر افزایش ۱۵ درصدی را در ۴/۳٪ حجمی آلومینا گزارش کرد و تفاوت این نتایج را ناشی از بزرگتر شدن اندازه نانوذرات آلومینای بکار رفته دانست (۶). "وَنگ" ۱۷٪ افزایش هدایت حرارتی را با اضافه کردن ۴ درصد حجمی نانوذرات اکسیدمس در آب گزارش کرد. وی برای نانوسیال اتیلن گلیکول / مس با غلظت ۳ درصد حجمی نانوذرات مس با متوسط قطر ۱۰ نانومتر، افزایش حدود ۴۰٪ گزارش کرد و عمده دلیل این افزایش را کاهش متوسط قطر نانوذرات مس نسبت به اکسیدمس یاد کرد (۱۴). وی همچنین افزایش ۲۶ تا ۴۰٪ را در ضریب هدایت حرارتی اتیلن گلیکول حاوی ۵ و ۸٪ حجمی نانوذرات آلومینا گزارش کرد (۱۰). "زای" ۲۰٪ افزایش هدایت حرارتی را با اضافه کردن ۵٪ حجمی نانوذرات آلومینا در آب گزارش کرد (۱۵). در راستای این نتایج جزئیات نشان می‌داد که در جزء حجمی تقریباً مساوی نانوذرات آلومینا، رسانایی گرمایی کمتری نسبت به مس دارند (۱۴). "پتل" افزایش ۲۱ درصدی را برای نانوسیال حاوی ۱۱٪ حجمی نانوذرات طلا و نقره که به ترتیب در آب و تولوئن پراکنده شده بودند گزارش کرد (۱۶) درحالی‌که برای رسیدن به چنین افزایشی در سوسپانسیون‌های معمولی، به غلظت‌های بالاتر از ۱۰٪ از ذرات احتیاج است. جدول شماره (۴) خلاصه ای از مطالعات انجام شده بر روی

مسیرهایی که مقاومت کمتری دارند می‌شوند. با خوشه ای شدن کسر بسته بندی کاهش یافته و موجب می‌شود حجم موثر خوشه‌ها نیز کاهش یابد و در نتیجه خاصیت هدایت حرارتی زیادتر می‌شود. از طرفی خوشه ای شدن نانوذرات باعث اثر منفی بر رفتار هدایتی نانوسیالات مخصوصاً در غلظت کم نانوذرات می‌شود. زیرا موجب رسوب ذرات ریز درون مایع شده و در محل تجمع خود در اثر کاهش حجم مایع در محل ترسیب، موجب ایجاد یک مقاومت گرمائی می‌شود. نتایج بدست آمده از شبیه سازی دینامیک مولکولی غیر تعادلی نشان می‌دهد که هدایت حرارتی در نانوسیالاتی که دارای توزیع بسیار یکنواختی از ذرات باشند می‌تواند تا سه برابر مقداری باشد که از نظریه ماکسول برای ذراتی با تجمع غیر یکنواخت و بی نظم منتج می‌شود. مطالعات در حوزه تاثیرات خوشه ای شدن نانوذرات در سیال نتایج بسیار پرکنده ای از جمله افزایش، کاهش و بی تاثیر بودن آن بر رفتار هدایت حرارتی نانوسیال را به دنبال داشته است. ولی نظریه جالبی مبنی بر وجود یک نقطه بهینه برای خوشه ای شدن نانوذرات به منظور بیشترین مقدار رفتار هدایت حرارتی نانوسیال ارائه شده است که قابل توجه می‌باشد (۱۰).

در میان مکانیسم‌های فوق، مکانیسم لایه‌بندی اتمی سیال اطراف نانوذرات مورد توجه بیشتر قرار گرفته و نقش آن در افزایش انتقال حرارت نانوسیالات بیشتر از دیگر فاکتورها عنوان شده است. مدل‌های تئوری موجود که برای محاسبه ضریب هدایت حرارتی استفاده می‌شوند اثر هیچ یک از مکانیسم‌های فوق را بررسی نمی‌کنند. از طرفی میزان کریستالینتی، ماهیت، نوع، خلوص، اندازه و میزان جهت گیری نانوذرات، ارتعاشات شبکه ای، دما، سایر ترکیبات، pH، غلظت نانوذرات، بار سطحی، سیال پایه و وجود کمپلکس‌ها از جمله عوامل اصلی هستند که بر ضریب هدایت حرارتی نانوسیالات موثرند. که هیچ یک از آنها در مدل‌های تئوری میکرو سوسپانسیون‌ها دیده نشده است. بنابراین تلفیق این متغیرهای غیر وابسته و مکانیسم‌های انتقال گرما در نانوسیالات پیچیدگی زیادی را ایجاد می‌کند که دیگر مدل‌های تئوری میکروسوسپانسیون‌ها قابل پاسخ به این تغییرات نیستند. این مدل هل مستقل از اندازه ذرات و ضخامت لایه مایع در فصل مشترک آنها است و تنها تابعی از ضریب هدایت حرارتی ذرات جامد و سیال و کسر حجمی آنها است. لذا مشاهده می‌شود ضریب هدایت حرارتی نانوسیالات بیش از پیش بینی هائی است که از طریق روابط میکروسوسپانسیونی بدست می‌آید و در نتیجه این روابط قادر به پوشش داده‌های تجربی نانوسیالات و مخصوصاً روند تغییرات ضریب هدایت حرارتی آنها با تغییر شرایط مختلف مانند تغییرات دما نیستند. از این رو در محاسبه ضریب هدایت حرارتی نانوسیالات اغلب مطالعات به سمت یافتن روابط تئوری مستقل و یا داده‌های تجربی سوق یافته است.

۴-۲ مطالعات تجربی اندازه‌گیری ضریب هدایت حرارتی نانوسیالات

"چوی" در سال ۱۹۹۵ اولین کسی بود که خصوصیات برجسته این سیالات را مطرح و سوسپانسیون پودرهای نانو را در سیالات به عنوان نانوسیال نامید (۱۱). پس از معرفی و شناخت نانوسیالات، بیشترین مطالعات بر روی محاسبه ضریب هدایت حرارتی آنها متمرکز شد و اغلب نتایج این مطالعات نشان می‌داد که در غلظت‌های پایین نانوذرات، ضریب هدایت حرارتی سیال بطور قابل ملاحظه ای افزایش می‌یابد. مهمترین روش تجربی اندازه گیری ضریب هدایت حرارتی نانوسیالات روش سیم داغ گذرا^۱ می‌باشد که در بیشتر تحقیقات به عنوان رایج ترین و بهترین روش برای اندازه‌گیری دقیق و سریع ضریب هدایت حرارتی نانوسیالات بکار گرفته می‌شود. این روش بر اساس استفاده از پل وتستون استوار است و توسط دستگاه KD2 به راحتی قابل اندازه گیری

در ادامه تحقیقات، از سیالاتی که حاوی نانوساختارهای کربنی بود استفاده شد و نتایج آزمایشات نشان داد که ضریب هدایت حرارتی این نانوسیالات بطور چشمگیری افزایش می‌یابد. بطوریکه بیشترین افزایش هدایت حرارتی را در حوزه نانوسیالات به خود اختصاص می‌داد. یکی از دلایل این افزایش نسبت به نانوذرات فلزی کمتر بودن دانسیته نانوساختارهای کربنی است. بنابراین نانولوله‌های کربنی، نانوذرات گرافیت، نانوصفحات گرافنی و نانوذرات الماس ساختارهای کربنی مناسبی برای ساخت نانوسیالات محسوب شدند.

ابتدا خواص استثنایی در توانایی انتقال الکترونیکی ساختارهای کربنی توسط نانولوله‌های کربنی مشخص شد و مشاهده شد سیالات حاوی نانولوله‌های کربنی از هدایت بسیار بالایی برخوردار هستند که ناشی از هدایت طبیعی بسیار بالای آنها است^(۱۸). نانولوله‌های کربنی علاوه بر هدایت حرارتی بالا، نسبت طول به قطر بالایی دارند و موجب تشکیل یک شبکه می‌دهند که در اینصورت ابعاد انتقال حرارت را در سیال گسترش می‌دهند. بر اساس نتایج "زو" در نانوسیالات حاوی CNT، میزان افزایش ضریب هدایت حرارتی به طول نانولوله هادی بستگی دارد و از آنجائیکه هدایت محوری CNT بسیار بالاست، این امر باعث افزایش چشمگیر هدایت در نانوسیالات CNT می‌شود^(۵).

"ون" ۲۵٪ افزایش را در ضریب هدایت حرارتی نانوسیال آب حاوی ۸/۰ درصد حجمی CNT گزارش کرد. وی بهترین افزایش در ضریب هدایت حرارتی را در غلظت حدود ۰/۲ درصد حجمی اعلام کرده و اظهار داشت که در غلظت‌های بیشتر هدایت با شیب کمتری افزایش می‌یابد. از طرفی در تمامی حالت‌ها افزایش هدایت را با افزایش دما مشاهده کرد^(۱۹). "زای" اف زایش ۱۰ تا ۲۰٪ ضریب هدایت حرارتی را در آب حاوی ۱٪ حجمی CNT گزارش کرده است^(۲۰). "اسیل" افزایش ۳۸٪ را در ضریب هدایت حرارتی نانوسیال آب حاوی ۶٪ حجمی نانولوله‌های کربنی گزارش کرده است^(۲۱). "چوی" برای سیال حاوی ۱٪ نانولوله‌های چند دیواره در روغن، ۱۶٪ افزایش ضریب هدایت حرارتی را گزارش کرده است^(۲۲). "بیرکاک" مشاهده کرد که با افزایش دما، ضریب هدایت حرارتی نانوسیالات حاوی CNT افزایش می‌یابد^(۲۳). "زو" افزایش ضریب هدایت حرارتی نانوسیالات پایه گرافنی را به دلیل درصد حجمی بالا، هندسه دو بعدی، سفتی و مقاومت حرارتی کم صفحات باز شده گرافیت ذکر کرده است^(۵). باید توجه کرد که انتقال حرارت در نانوسیالات اکسیدگرافن با مکانیسم مشابهی در نانوسیالات CNT انجام می‌شود. زیرا مکانیسم انتقال در ورقه‌های گرافنی شبیه به انتقال در دیواره CNT است. از طرفی هدایت در طول CNT بسیار بیشتر از شعاع آن است. در اکسیدگرافن هدایت ناهمسانگرد بوده (یعنی در جهات طولی، عرضی و ضخامت متفاوت عمل می‌کند) و شار گرما تنها در سطح ورقه محدود می‌شود. در اتیلن گلیکول حاوی درصد حجمی کمتر از ۵٪ از نانوساختارهای کربنی، با افزایش کسر حجمی نانوذرات ضریب هدایت حرارتی نانوسیال بطور خطی تا ۳۰٪ افزایش می‌یابد که بیشترین آنها برای اکسیدگرافن گزارش شده است. بطوریکه در کسر حجمی ۵٪ اکسیدگرافن ضریب هدایت حرارتی ۶۱٪ بیشتر از اکسیدهای فلزی است. در کسر حجمی ۱٪ اکسیدگرافن در اتیلن گلیکول ۱۰/۵٪ افزایش در ضریب هدایت نانوسیال مشاهده و گزارش شده است^(۲۴).

در تحقیقی ابتدا اکسیدگرافن اصلاح شده که توسط عملیات حرارتی از طریق باز کردن صفحات گرافیت بدست آمده بود تهیه و سپس نانوسیال آن حاوی کسرهای حجمی ۰/۰۵ تا ۰/۰۵۶٪ حجمی اکسیدگرافن تهیه و به نام (TEG-f) نام گذاری شد و سپس روند افزایش ضریب هدایت حرارتی نمونه‌ها با افزایش دما (در محدوده دمایی ۲۵ تا ۵۰ درجه سانتی گراد) و افزایش غلظت اکسیدگرافن اندازه‌گیری و نتایج آن در شکل شماره (۲) رسم شد^(۲۵).

بهبود ضریب هدایت حرارتی نانوسیالات پایه آبی حاوی نانوذرات در غلظت‌های مختلف را بیان می‌کند (۱۰).

جدول ۴: نتایج مطالعات انجام شده بر روی بهبود ضریب هدایت حرارتی نانوسیالات پایه آبی

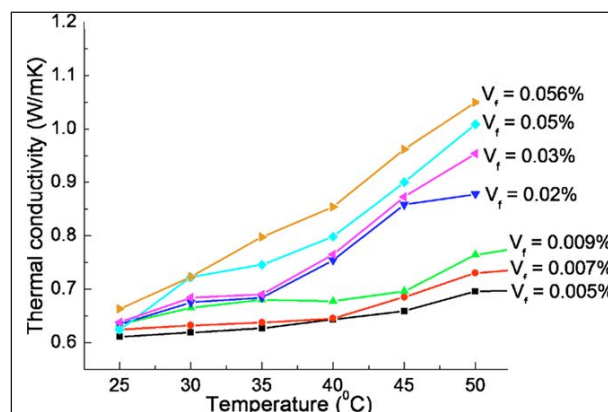
نوع ذره	اندازه (nm)	غلظت حجمی (%)	افزایش هدایت (%)
مس	۷۵	۰/۱	۲۳/۸
مس	۱۰۰	۰/۱	۱۱
مس	۱۰۰	۲/۵	۲۴
مس	۱۰۰	۷/۵	۷۸
مس	۱۳۰	۰/۰۵	۸/۵
مس	۱۳۰	۰/۲	۹/۷
مس	۲۵۰	۰/۲	۳/۶
اکسیدمس	۲۳	۳/۴	۱۲
اکسیدمس	۲۳	۹/۷	۳۶
اکسیدمس	۲۵	۰/۳	۹
اکسیدمس	۲۸	۴	۱۴
اکسیدمس	۲۹	۶	۳۶
اکسیدمس	۳۶	۵	۶۰
آهن	۱۰	۰/۲	۱۴
آهن	۱۰	۰/۵	۱۸
آلومینا	۱۱	۱	۹
آلومینا	۱۳	۱/۳	۱۱
آلومینا	۲۸	۱/۶	۱۰
آلومینا	۲۸	۳	۱۲
آلومینا	۳۶	۲	۸
آلومینا	۳۶	۱۰	۱۱
آلومینا	۳۸	۱	۳
آلومینا	۴۷	۲	۳
آلومینا	۴۷	۴	۸
آلومینا	۴۷	۱۸	۳۱
آلومینا	۶۰	۱/۸	۷
آلومینا	۶۰	۵	۲۳
تیتانا	۱۵	۵	۳۰
تیتانا	۱۵	۰/۵	۵
تیتانا	۲۷	۳/۲۵	۸

با توجه به اعداد جدول شماره (۴) نتیجه می‌شود که در شرایط یکسان با بزرگتر شدن اندازه ذرات مقدار ضریب هدایت حرارتی نانوسیال کاهش می‌یابد. علاوه بر این، در اندازه ذرات یکسان با افزایش غلظت نانوذرات ضریب هدایت حرارتی نیز افزایش می‌یابد. همچنین ساختارهای فلزی نسبت به ساختارهای اکسیدی خود بهبود بیشتری را در ضریب هدایت حرارتی ایجاد می‌کنند.

بیشتر بهبود می‌یابد در نتیجه ذرات فلزی نسبت به اکسیدفلزی عملکرد بهتری را ایفا می‌کنند. ولی بطور کلی ساختارهای کربنی نتایج بسیار خوبی را بدست می‌آورند. مثلاً نحوه افزایش هدایت گرمایی سیالات حاوی نانولوله‌های کربنی فراتر از افزایش هدایت سیالات حاوی نانوذرات فلزی و اکسید فلزی است. این نتایج در شکل شماره (۳) به وضوح قابل مشاهده است. همچنین از شکل شماره (۳) نتیجه می‌شود که مدل‌های استاتیک مانند مدل ماکسول در پیش بینی ضریب هدایت حرارتی نانوسیالات پایه کربنی بسیار خطا دارند و استفاده از آنها توصیه نمی‌شود.

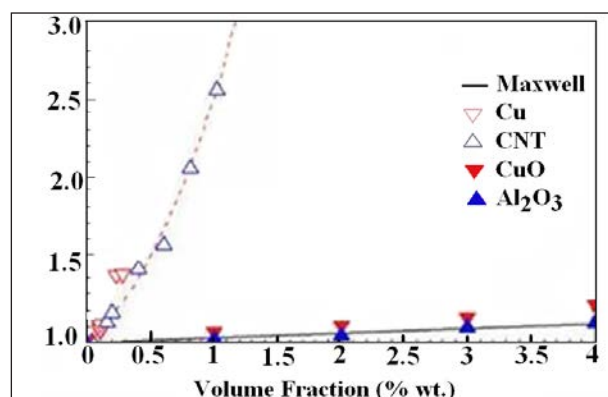
منابع

1. Pawel Keblinski, Jeffrey A. Eastman, and David G. Cahill, "Nanofluids for Enhanced Thermal Transport," *Materials Today*, 8, (2005), pp 22-30.
2. Synthesis and Stability of Cupric Oxide-based Nanofluid: A Novel Coolant for Efficient Cooling, *Asian Journal of Scientific Research*, 5, (2012), pp 218-227.
3. Thermal Conductivity of Periodic Table Elements
4. Chen L. and Xie H., "Silicon Oil based multiwalled carbon nano tubes nano fluid with optimized thermal conductivity enhancement", *Journal of Colloids and surface A: Physiochemical and Engineering Aspects* (2009).
5. Q Z Xue, "Model for the effective thermal conductivity of carbon nanotube composites", *Nanotechnology*, vol. 17, 6, (2006), pp. 1655-1662.
6. Lee S, Choi U.S and Li S, "Measuring Thermal Conductivity of Fluids Containing Oxide Nanoparticles", *Heat Transfer*, Vol. 121, (1999), pp 280- 289.
7. A. K. Singh, "Thermal Conductivity of Nanofluids", *REVIEW PAPER*, *Defence Science Journal*, Vol. 58, No. 5, (2008), pp. 600-607.
8. Hamilton R.L & Crosser O.K, "Thermal Conductivity of Heterogeneous Two-Component Systems", *J. I&EC Fundamentals*, Vol. 1, (1962), pp 182-191.
9. Xuan Y and Li Q, "Heat Transfer Enhancement of nano fluids", *International journal of Heat and Fluid Flow*, Vol. 21, (2000), pp 58-64.
10. Gopalan Ramesh and Narayan Kotekar Prabhu



شکل ۲: روند افزایش ضریب هدایت حرارتی نانوسیال اکسیدگرافن در آب با افزایش دما

مطابق شکل شماره (۲) مشاهده می‌شود با افزایش غلظت اکسیدگرافن ضریب هدایت بطور غیر خطی افزایش می‌یابد. این افزایش غیر خطی در نانوسیالات ساختار کربنی نیز قبلاً گزارش شده بود (۲۲). از طرفی مشاهده می‌شود که با افزایش دما ضریب هدایت نمونه‌ها نیز افزایش می‌یابد. مثلاً افزایش ضریب هدایت نانوسیال با کسر حجمی ۰.۵۶٪ اکسیدگرافن در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد ۱۴٪ و در دمای ۵۰ درجه سانتی‌گراد حدود ۶۴٪ است. این افزایش در ضریب هدایت در غلظت‌های بسیار کم ناشی از سطح بسیار وسیع صفحات اکسیدگرافن می‌باشد. این در حالی است که در نانوسیالات حاوی ۱٪ حجمی آب/MWNT حداکثر افزایش در هدایت حدود ۱۷٪ اعلام شده (۱۵) و ۲۰ تا ۴۰٪ افزایش در هدایت نانوسیالات حاوی ۰.۶٪ حجمی آب/MWNT اعلام شده است (۲۶).



شکل ۳: مقایسه عملکرد نانوسیالات پایه کربنی و نانوسیالات پایه فلزی و تطبیق آنها با مدل‌های تئوری

۵- نتیجه گیری

با توجه به نتایج بدست آمده در خصوص اندازه گیری ضریب هدایت حرارتی محلول‌های کلوئیدی می‌توان نتیجه گرفت که بهترین روش برای اندازه گیری ضریب هدایت حرارتی میکروسوسپانسیون‌ها استفاده از مدل‌های دینامیک است زیرا این محلول‌های کلوئیدی ناپایدار هستند و استفاده از روش سیم داغ گذرا دارای خطای زیادی را ایجاد می‌کند. همچنین برای اندازه گیری ضریب هدایت حرارتی نانوسیالات مدل تئوری مناسبی وجود ندارد و اندازه گیری تجربی ضریب هدایت حرارتی بهترین روش محسوب می‌شود. با توجه به نتایج تجربی تحقیقات به عمل آمده بر روی ضریب هدایت حرارتی نانوسیالات ملاحظه شد که با کوچکتر شدن اندازه ذرات ضریب هدایت حرارتی

- “Review of thermo-physical properties, wetting and heat transfer characteristics of nanofluids and their applicability in industrial quench heat treatment”, *Nanoscale Research Letters*, vol. 6 (2011), pp. 334-349.
11. Choi S.U.S, “Enhancing thermal conductivity of fluid with nanoparticles”, *Developments and Applications of Non-Newtonian flows*, D.A. Siginer and H.P. Wang eds., Vol. 231, (1995), pp 99-112.
 12. Eastman, J. A., et al., *Mater. Sci. Forum* (1999) 312-314, 629
 13. Masuda, H., et al., *Netsu Bussei (Japan)* (1993) 4, 227
 14. X. Wang, X. Xu, S.U.S. Choi. Thermal conductivity of nanoparticle–fluid mixture’, *Thermophys Heat Transfer*. Vol. 13, 4, (1999), pp. 474-480.
 15. Huaqing Xie, Jinchang Wang, Tonggeng Xi, Yan Liu, Fei Ai, and Qingren Wu, “Thermal conductivity enhancement of suspensions containing nanosized alumina particles”, *J. Appl. Phys*, vol. 91, (2002), pp 4568-4572.
 16. H.E. Patel, S.K. Das, T. Sundararajan, A.S. Nair, B. George, T. Pradeep, *Appl. Phys. Lett*, 83, (2003), pp 2931-2944.
 17. M. dalil, N. zareh, investigation of the method for calculating of conductive in nano fluids, (2011), pp. 1-16,
 18. N. Jha and S. Ramaprabhu, *J. Phys. Chem. C* 112, 9315 (2008)
 19. Wen, D. S., and Ding, Y. L., *J. Thermophys. Heat Trans*, 18, (2004), pp 481-492.
 20. H. Xie. H. Lee, W. Young, and M. Choi, “Nanofluids Containing Multiwalled Carbon Nanotubes and Their Enhanced Thermal Conductivities”, *J. Appl. Phys*, vol. 94, 8, (2003), pp. 4967-4971.
 21. Assael, M. J., et al., In *Thermal Conductivity 27/ Thermal Expansion 15: Proc. 27th Int. Thermal Conductivity Conf. and 15th Int. Thermal Expansion Symp.*, Wang, H., and Porter, W. D., (eds.) DEStech Publications, Lancaster, PA, (2005), 153
 22. S. U. S. Choi, Z. G. Zhang, W. Yu, F. E. Lockwood, and E. A. Grulke, “Anomalous thermal conductivity enhancement in nanotube suspensions”, *Appl. Phys. Lett.*, vol. 79, (2001), pp. 272-2774.
 23. M.J. Biercuk, M. C. Llaguno, M. Radosavljevic, J. K. Hyun, A. T. Johnson Jr, J. E. Fischer. “Carbon nanotube composites for thermal management.” *Appl. Phys. Lett*, 80, (2002), pp 2767-2778.
 24. Wei Yu, Huaqing Xie¹ and Dan Bao, “Enhanced thermal conductivities of nanofluids containing graphene oxide nanosheets” *Nanotechnology*, 21, (2010), pp 1-7.
 25. Tessy Theres Baby and S Ramaprabhu, “Investigation of thermal and electrical conductivity of grapheme based nanofluids” *JOURNAL OF APPLIED PHYSICS* 108, (2010), 124308.
 26. Assael MJ, Metaxa IN, Kakosimos K, Constantinou D: Thermal conductivity of nanofluids-experimental and theoretical. *Int J Thermophys*, vol. 27, (2006), pp. 999-1017.