

بررسی مطالعات آزمایشگاهی و تئوری بهبود ضریب رسانش گرمایی نانوسیالات

مسعود بهرامی^{۱*}، سمیه علی دوست^۱

۱- ایران، اهواز، دانشگاه صنعت نفت، دانشکده نفت اهواز، گروه مهندسی گاز، صندوق پستی ۶۳۴۳۱

نویسنده مسئول، ایمیل: m.bahrani@put.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۱۰/۱۱ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۰۱/۱۷

چکیده:

سیالات انتقال حرارتی مرسوم، مانند آب، روغن و اتیلن گلیکول که در صنایع مختلفی مانند فرآیندهای شیمیایی، تبرید، فرآیندهای سرد و گرم کردن، حمل و نقل، نیروگاه ها و صنایع با اندازه‌ای در حد میکرومتر که خصوصیات انتقال حرارتی ضعیفی دارند، استفاده می شوند. افزایش ضریب رسانش گرمایی ایده ی کلیدی برای بهبود ویژگی های انتقال حرارتی سیالات مرسوم است. از آنجایی که ذرات جامد دارای ضریب رسانش گرمایی بیشتری نسبت به سیال پایه هستند، انتظار می رود که معلق سازی ذرات ریز جامد در سیال پایه، باعث بهبود ضریب رسانش گرمایی شود. سوسپانسیون رقیق حاوی ذرات نانومتری را نانوسیال می گویند که این دسته از سیالات خواص انتقال حرارتی را افزایش داده اند و به نظر می رسند که گزینه امیدبخشی برای سیستم های گرمایی نسل بعدی باشند. به همین منظور پارامترهای مختلفی که بر روی ضریب رسانش گرمایی نانوسیالات اثر می گذارند بررسی شده است و حتی مدل های مختلفی هم برای پیش بینی ضریب رسانش گرمایی آن ها ارائه شده است اما هنوز مدل واحدی که بتواند همه ی مکانیزم های احتمالی انتقال حرارت را برای نانوسیالات در نظر بگیرد وجود ندارد.

کلمات کلیدی: نانوسیالات، ضریب رسانش گرمایی، انتقال حرارت.

۱- مقدمه

با پیشرفت تکنولوژی تجهیزات با انرژی بالا مانند قطعات الکترونیکی، مبدلهای گرمایی و... تمایل به کوچکتر شدن دارند. آن ها انرژی گرمایی زیادی تولید می کنند، این انرژی گرمایی باید حذف شوند بنابراین افزایش شار گرما یک زمینه تحقیقاتی جدی است. رسانش گرمایی سیالات فاکتور اصلی اثرگذار بر بازده انتقال گرمای همرفتی شناخته شده است و رسانش گرمایی سیالات مرسوم مانند آب، روغن و اتیلن گلیکول یک محدودیت اولیه در افزایش بازده انرژی محیط انتقال گرماست. معلق کردن ذرات جامد کوچک در سیالات به منظور تغییر خواص انتقال گرمای سیالات یک روش مؤثر برای افزایش رسانش گرمایی سیالات است. ماکسول [۱] در سال ۱۸۸۱ ایده ی استفاده از ذرات فلزی برای افزایش دادن ضریب رسانش گرمایی سیالات را پیشنهاد داد. او یک تئوری برای ضریب رسانش گرمایی مؤثر سوسپانسیون ها با پخش کردن ذراتی با اندازه میلی متر یا میکرومتر در مایعات ارائه داد.

اینکه اضافه کردن ذرات جامد با اندازه میلی متر یا میکرومتر به سیال پایه می تواند ضریب رسانش گرمایی سیال را بهبود ببخشد بحثی قابل قبول است. اگرچه این گونه افزودنی ها ی جامد ممکن است ضریب رسانش گرمایی سیالات را بهبود ببخشد ولی کاربرد عملی محدودی به خاطر ته نشینی ذرات بزرگ، گرفتگی کانال های جریان، خوردگی لوله ها و ایجاد افت فشار دارند. نانوسیالات دسته ای از سوسپانسیون رقیق ذرات یا فیبرهایی با اندازه نانومتری و معمولا با اندازه کمتر از ۱۰۰ نانومتر پخش شده در سیالی مانند آب، روغن و اتیلن گلیکول هستند. به خاطر اینکه نانوسیالات می توانند به راحتی در میکروکانالها بدون گرفتگی حرکت کنند و از طرف دیگر اندازه سیستم انتقال گرما به علت بازده انتقال گرمای بالای نانوسیالات کاهش می یابد، می توان گفت انتخاب نانوسیالات به عنوان سیالات انتقال حرارتی انتخابی امیدبخش است. مفهوم نانوسیال اولین بار توسط چوئی [۲] به عنوان یک دسته ی جدید از سیالات با استفاده از معلق کردن برخی از





۱- روش تک مرحله ای ۲- روش دومرحله ای

جدول ۱: ضریب رسانش گرمایی نانوذرات و سیالات پایه

مواد	ضریب رسانش گرمایی (W/mK)	مواد
Cu	401	جامدات فلزی
Al	237	
Ag	428	
Au	318	
Fe	83.5	
Al ₂ O ₃	40	غیرفلزی
CuO	76.5	
Si	148	
SiC	270	
CNTs	3000(MWCNTs)- 600(SWCNTs)	
BNNTs	260-600	
H ₂ O	0.613	سیال پایه
Ethylene glycol (EG)	0.253	
Engine oil (EO)	0.145	

ذرات فلزی در سیالات معمولی برای افزایش ضریب رسانش گرمایی سیال پیشنهاد شد. از آن به بعد علاقه به استفاده از سیالات با معلق سازی بقیه ی نانوساختارها مانند اکسید نانوذرات، نانوفیبرها و کربن نانوتیوب ها افزایش یافت. ولی هنوز فقدان سازگاری بین داده های آزمایشگاهی و تئوری ها وجود دارد. از طرفی خواص ترموفیزیکی نانوسیالات به دمای عملیاتی نانوسیال بستگی دارد. بنابراین اندازه گیری دقیق خواص وابسته به دما ضروری است. هدف این مقاله ی مروری، مشخص کردن پارامترهای آزمایشگاهی بررسی شده در پیشینه به منظور یافتن نقاط متناقض در نتایج بدست آمده برای درک رفتار گرمایی نانوسیالات و ارائه چندین مدل تئوری برای ضریب رسانش گرمایی است.

۲- روش های اندازه گیری ضریب رسانش گرمایی

نانوسیالات افزایش چشمگیری در ضریب رسانش گرمایی نشان می دهند. این افزایش به بهتر بودن ضریب رسانش گرمایی ذرات جامد نسبت به ضریب رسانش گرمایی سیال پایه و همچنین بالابودن سطح ویژه ی نانوذرات مربوط می شود. سطح ویژه ی نانوذرات می تواند ۱۰۰۰ برابر بزرگتر از سطح ویژه ذرات با اندازه میکرومتر باشد و به خاطر اینکه انتقال حرارت روی سطح ذرات رخ می دهد سطح ویژه ی بالای نانوذرات توانایی انتقال گرمای هدایتی را افزایش می دهد. اندازه گیری ضریب رسانش گرمایی نانوذرات می تواند با روش های مختلفی انجام شود که رایج ترین آن ها ۱- روش سیم داغ گذرا [۳] ۲- روش فرکانس دمایی [۴] و ۳- روش W-۳ [۵] است.

۳- تهیه ی نانوسیالات

به صورت تئوری همه ی نانوذرات جامد با ضریب رسانش گرمایی بالا می توانند به عنوان افزودنی نانوسیالات استفاده شوند. برخی از این نانوذرات که اغلب برای تهیه ی نانوسیالات گزارش شده اند عبارتند از: ۱- ذرات فلزی (Cu, Al, Fe, Au, Ag)، ۲- ذرات غیرفلزی (Al₂O₃, CuO, Si, SiC) و ۳- کربن نانوتیوب ها. سیالات پایه که معمولاً استفاده می شوند، شامل: ۱- آب، ۲- روغن و ۳- اتیلن گلیکول هستند.

بطور کلی ضریب رسانش گرمایی جامدات معمولاً نسبت به مایعات بالاتر هستند که در جدول ۱ برخی از آنها آورده شده اند. تهیه ی نانوسیالات یک گام کلیدی در استفاده از نانوذرات برای افزایش ضریب رسانش گرمایی سیالات می باشد که دو روش برای تهیه ی نانوسیالات استفاده می شود:

۱-۳- روش تک مرحله ای

روش تک مرحله ای روشی است که در آن فرآیند تهیه نانوذرات با سنتز نانوسیالات به طور همزمان صورت می گیرد. برای اینکه تهیه نانوذرات به طور مستقیم بوسیله ی تکنیک فشار بخار فیزیکی انجام می شود. در این روش فرآیندهای خشک کردن، ذخیره سازی، انتقال و پخش شدن نانوذرات حذف می شود و در نتیجه تجمع نانوذرات به حداقل می رسد و پایداری سیالات بالا می رود. اما ایراد این روش آن است که فقط سیالاتی با فشار بخار کم با این فرآیند سازگار هستند، که استفاده از این روش را محدود می کند [۳]، [۶]، [۷].

۲-۳- روش دومرحله ای

در روش دومرحله ای برای تهیه ی نانوسیالات، نانوذرات در سیال پایه پخش می شوند. نانوذرات یا کربن نانوتیوب هایی که در این روش استفاده می شوند ابتدا به عنوان پودر خشکی در اندازه نانومتری بوسیله ی روش های شیمیایی یا فیزیکی

تولید می شوند، سپس در مرحله ی دوم به درون سیال پایه پخش می شوند که این مراحل کاملاً ایزوله شده انجام می شوند. تجمع نانوذرات ممکن است در هر دو مرحله به خصوص در فرآیند خشک کردن، ذخیره سازی و انتقال نانوذرات رخ دهد. تکنیک های ساده ای همچون استفاده از دستگاه آلتراسونیک یا اضافه کردن سرفکتانت به سیال اغلب برای کم کردن تجمع ذرات و بهتر پخش شدن آن ها استفاده می شوند. مزیت این روش آن است که می توان نانوسیالات متفاوتی با غلظتی دلخواه تولید کرد اما مهم ترین مشکل این روش آن است که پایداری نانوسیال تولیدی باید فراهم شود [۸]-[۱۱].

۴- پارامترهای مؤثر بر ضریب رسانش گرمایی

در میان همه ی خواص ترموفیزیکی نانوسیالات، ضریب رسانش گرمایی پیچیده ترین و برای بسیاری از تجهیزات یکی از مهم ترین عوامل است. از نتایج آزمایشگاهی بسیاری از محققین فهمیده می شود که ضریب رسانش گرمایی نانوسیالات بستگی به عوامل بسیاری دارد از جمله:

۴-۱- تأثیر غلظت

بسیاری از محققین تأثیر غلظت نانوذرات در نانوسیالات بر ضریب رسانش گرمایی را بررسی کردند. اکثر آن ها دریافتند که هرچه غلظت نانوذرات بیشتر باشد ضریب رسانش گرمایی نانوسیال بیشتر افزایش می یابد. برخی از آن ها گزارش کرده اند که این رابطه غیرخطی است [۸]، [۱۲]-[۱۴] درحالی که تعدادی دریافتند که خطی است [۱۰]، [۱۱]، [۱۵]، [۱۶].

۴-۲- تأثیر دما

تأثیر دمای نانوسیالات بر روی بهبود ضریب رسانش گرمایی آن ها توسط بسیاری از محققین مورد مطالعه قرار گرفته است. دات و همکاران [۱۷] به طور نظامند رابطه ی بین ضریب رسانش گرمایی و دما برای نانوسیالات را بررسی کردند و افزایش چشمگیری در ضریب رسانش گرمایی مشاهده کردند. پاتل و همکاران [۱۸] مشاهده کردند که ضریب رسانش گرمایی نانوسیالات نسبت مستقیمی با دما دارد. این نتیجه با مشاهدات گزارش شده ی بعدی مطابقت داشت [۱۹]-[۲۴]. نتایج بک و همکاران [۲۵] نشان می دهد که افزایش ضریب رسانش گرمایی نسبت به تغییر دما نزدیک به ضریب رسانش گرمایی سیال پایه می باشد. برعکس نتایج قبلی، ونگ وایز و همکاران [۲۶] نشان دادند که افزایش ضریب رسانش گرمایی

نانوسیالات با افزایش دما کاهش می یابد و رابطه ی عکس باهم دارند.

۳-۴- تأثیر اندازه ذره

اندازه ذرات نقش بزرگی در افزایش ضریب رسانش گرمایی نانوسیالات ایفا می کنند. آزمایش انجام شده توسط چون و همکاران [۲۰] برای نانوسیالات آب - آلومینیم اکسید نشان می دهد که ضریب رسانش گرمایی وقتی که اندازه از ۱۵۰ نانومتر به ۴۷ نانومتر و ۱۱ نانومتر کاهش می یابد در غلظت ۱٪ افزایش می یابد. آن ها حرکت براونی نانوذرات را علت آن می دانند زیرا ذرات کوچکتر تمایل بیشتری به حرکت کردن دارند و در نتیجه می توانند انتقال گرما را بهبود ببخشند.

لی و همکاران [۲۷] دریافتند که با کاهش اندازه ذره، ضریب رسانش گرمایی نانوسیالات افزایش می یابد. این رابطه برعکس، بین اندازه ذره و افزایش ضریب رسانش گرمایی توسط تعداد دیگری از محققین تأیید شده است [۲۰]، [۲۱]، [۲۵]، [۲۸]-[۳۱]. علاوه بر این، بک و همکاران [۳۲] ضریب رسانش گرمایی نانوسیالات آب- آلومینیم اکسید و اتیلن گلیکول- آلومینیم اکسید را برای اندازه ذره از ۸ تا ۲۸۲ نانومتر اندازه گیری کردند و دریافتند، زمانی که اندازه ذره به کمتر از ۵۰ نانومتر می رسد، افزایش ضریب رسانش گرمایی کاهش می یابد.

۴-۴- تأثیر سیال پایه

برای نانوسیالاتی با نانوذراتی یکسان، صرف نظر از شکل نانوذره، افزایش ضریب رسانش گرمایی نسبتی عکس با ضریب رسانش گرمایی سیال پایه دارد. این نتیجه گیری که افزایش ضریب رسانش گرمایی بالاتر برای نانوسیالاتی با اتیلن گلیکول به عنوان سیال پایه در مقایسه با بقیه نانوسیالاتی که آب به عنوان سیال پایه است، تأیید شده است [۱۱]، [۲۵]، [۲۷]، [۲۹]، [۳۳]، [۳۴]. برعکس این نتیجه، مشاهدات گزارش شده توسط [۳۵]، [۳۶] نشان می دهند که در غلظت یکسان استفاده از اتیلن گلیکول به عنوان سیال پایه منجر به افزایش بیشتر ضریب رسانش گرمایی در مقایسه با نمونه ی استفاده شده از روغن به عنوان سیال پایه می باشد. این تناقض با مشاهدات به دست آمده توسط [۲۸] تأیید شد زمانی که آن ها بر روی نانوسیالاتی با سیال پایه ی آبی آزمایش انجام می دادند و نشان دادند که افزایش در ضریب رسانش گرمایی در مقایسه با سیال پایه ی اتیلن گلیکولی در غلظتی یکسان بیشتر است.





۴-۵- تأثیر ضریب رسانش گرمایی نانوذرات

انتخاب نانوذراتی که ضریب رسانش گرمایی بالاتری دارند توسط مرشد و همکاران [۱۰] و ایستمن و همکاران [۳] پیشنهاد شدند. آن‌ها دریافتند ضریب رسانش گرمایی نانوسیالاتی که شامل نانوذرات فلزی هستند بیشتر از نانوذرات اکسید فلزات می باشد. ژانگ و همکاران [۳۷] مشاهده کردند که ضریب رسانش گرمایی نانوسیال با افزایش ضریب رسانش گرمایی نانوذره افزایش می یابد. این یافته ها توسط نتایج دیگران [۱۷]، [۲۷]، [۲۹]، [۳۷]، [۳۸] تایید شدند.

۴-۶- تأثیر شکل نانوذرات

نانوسیالاتی با نانوذرات کروی شکل افزایش کمتری در ضریب رسانش گرمایی در مقایسه با نانوسیالاتی شامل نانوذرات استوانه‌ای شکل نشان می دهند به خاطر اینکه ذرات استوانه‌ای شکل نسبت طول به قطر بزرگتری دارند. مرشد و همکاران [۱۰] نانوسیالاتی با نانوذرات اکسید تیتانیم به شکل استوانه‌ای با قطر ۱۰ نانومتر و قطر ۴۰ نانومتر و ذرات کروی شکل با اندازه ۱۵ نانومتر را در آب پخش کردند و ضریب رسانش گرمایی نانوسیالات حاصله را مقایسه کردند. آن‌ها نشان دادند که شکل ذره می تواند در افزایش ضریب رسانش گرمایی اثر گذارد به طوری که افزایش در ضریب رسانش گرمایی برای نانوسیالات با نانوذرات استوانه‌ای شکل بیشتر از نانوسیالات با ذرات کروی شکل است. این نتیجه‌گیری با

نتایج کارهای بعدی تأیید شدند [۱۱]، [۳۳]-[۳۵]، [۳۹].

۵- مدل های تئوری برای ضریب رسانش گرمایی نانوسیالات

تاکنون مدل های تئوری گوناگونی برای پیش‌بینی ضریب رسانش گرمایی نانوسیالات ارائه شده اند اما مدلی که بتواند به طور دقیق ضریب رسانش گرمایی نانوسیالات را پیش‌بینی کند وجود ندارد. به‌طور کلی این مدل ها به دو دسته ی مدل‌های استاتیکی و مدل های دینامیکی تقسیم می شوند.

۵-۱- مدل های استاتیکی

مدل های استاتیک پتانسیل پیش‌بینی ضریب رسانش گرمایی نانوسیالات را به‌طور دقیق ندارند به دلیل اینکه این مدل ها تأثیر دما، اندازه ذره و سطح مشترک ذره - سیال، توزیع اندازه ذرات، تجمع نانوذرات و حرارت براونی ذرات را در نظر نمی‌گیرند. مدل های ماکسول، داویس و جفری برای ذرات کروی شکل و مدل همیلتون برای ذرات غیرکروی نمونه ای از مدل های استاتیکی هستند که در جدول ۲ به‌طور خلاصه این مدل ها آورده شده اند.

۵-۲- مدل های دینامیکی

مدل های دینامیکی بر اساس این حقیقت استوار هستند که نانوذرات در سیال پایه حرکت تصادفی دارند. حرکت ذرات

جدول ۲. مدل های استاتیکی برای ضریب رسانش گرمایی سوسپانسیون ها

مدل	روابط ریاضی	ویژگی
[41] ماکسول	$\frac{k_{eff}}{k_{bf}} = \frac{k_{np} + 2k_{bf} + 2(k_{np} - k_{bf})\phi}{k_{np} + 2k_{bf} - 2(k_{np} - k_{bf})\phi}$	ذرات کروی شکل
[40] داویس	$\frac{k_{eff}}{k_{bf}} = 1 + \frac{3(\alpha - 1)}{[\alpha + 2 - (\alpha - 1)\phi]} [\phi + f(\alpha)\phi^2 + \dots]$	اثر متقابل بین ذرات کروی
[41] همیلتون	$\frac{k_{eff}}{k_{bf}} = \frac{k_{np} + (n - 1)k_{bf} - (n - 1)(k_{bf} - k_{np})\phi}{k_{np} + (n - 1)k_{bf} + (k_{bf} - k_{np})\phi}$	n = 3 برای ذرات کروی
[42] جفری	$\frac{k_{eff}}{k_{bf}} = 1 + 3\beta\phi + (3\beta^2 + \frac{3\beta^3}{4} + \frac{9\beta^3}{16} \frac{\alpha + 2}{2\alpha + 3} + \frac{3\beta^4}{64} + \dots)\phi^2$	ذرات کروی شکل

باعث برخورد به یکدیگر و در نتیجه تجمع ذرات می شود. محققین مختلف مکانیزم های متفاوتی از انتقال حرارت در نانوسیالات را پیشنهاد کرده اند. مکانیزم های پیشنهادی بحث شده در پیشینه به صورت زیر می باشد.

۱-۲-۵- حرکت براونی نانوذرات

برخلاف ذرات بزرگتر، نانوذرات در سیال ثابت نیستند. زمانی که ابعاد ذره کوچک و کوچکتر (مخصوصاً اندازه نانو) می شوند ثابت نگه داشتن آن ها در یک مکان، به شدت دشوار است. آن ها طبیعتاً تمایل به حرکت دارند و در نتیجه حرکت براونی باعث اثر بزرگی می شود. حرکت براونی حرکت تصادفی ذرات معلق در سیال با سرعت بسیار بالا می باشد. این حرکت تصادفی انرژی را توسط نانوذرات منتقل می کند. برخورد مستقیم نانوذره - نانوذره با هم در نانوسیال می تواند باعث افزایش ضریب رسانش گرمایی شود. تأثیر افزایش ضریب رسانش گرمایی نانوسیالات توسط کو و همکاران [۴۳] به علت حرکت براونی بررسی شد. این مدل تأثیر دینامیکی ذرات را در نظر می گیرد. برای حل ضریب رسانش گرمایی، قسمت استاتیکی از مدل ماکسول استفاده می کند و ضریب رسانش گرمایی ناشی از حرکت براونی شامل تأثیر حرکت ذرات مایع اطراف نانوذرات و نانوذرات با هم است و در مجموع مدل زیر پیشنهاد شده است.

$$k_{\text{Brownian}} = 5 \times 10^4 \gamma \phi \rho_{\text{bf}} c_{\text{pbf}} \sqrt{\frac{k_B T}{\rho_{\text{np}} d_{\text{np}}}} f \quad (1)$$

که در آن ρ_{np} و ρ_{bf} به ترتیب چگالی نانوذره و سیال پایه $(\frac{gr}{cm^3})$ است. C_{pbf} ظرفیت گرمایی ویژه سیال پایه $(\frac{J}{gr \cdot ^\circ C})$ و K_B ثابت بولتزمن در دمای مورد نظر (T) هستند و γ اثر متقابل بین نانوذرات و مایع اطراف آنها را نشان می دهند که کو و همکاران خاطرنشان کردند که این پارامتر با افزایش غلظت، مؤثرتر می شود. پارامتر f وابستگی دمایی مدل را نشان می دهد.

۲-۲-۵- اثر لایه سازی اطراف نانوذرات

مولکول های مایع در اطراف سطح ذرات جامد لایه ای ایجاد می کنند که این لایه خواص ترموفیزیکی متفاوتی از بقیه مایع و ذرات جامد دارد. به خاطر ساختار تشکیل شده نانولایه، انتظار می رود که این نانولایه ضریب رسانش گرمایی بالاتری نسبت به سیال پایه داشته باشد. ضخامت این نانولایه در سطح

مشترک ذره و سیال نقش به سزایی را در انتقال گرما از جامد به سیال اطرافش ایفا می کند.

یو و چویی [۴۴] کسر حجمی و و ضریب رسانش گرمایی مؤثر را به صورت زیر پیشنهاد می کند:

$$\phi_{\text{eff}} = \phi(1 + \beta)^3 \quad (2)$$

$$\frac{k_{\text{eff}}}{k_{\text{bf}}} = \frac{k_{\text{np}} + (n-1)k_{\text{bf}} - \phi_{\text{eff}}(n-1)(k_{\text{bf}} - k_{\text{np}})}{k_{\text{np}} + (n-1)k_{\text{bf}} + \phi_{\text{eff}}(k_{\text{bf}} - k_{\text{np}})} \quad (3)$$

که در آن β ضخامت نانولایه $(\frac{t}{d_{\text{np}}})$ نسبت ضخامت نانولایه به قطر نانوذره می باشد. با کمک کسر حجمی مؤثر برای محاسبه ضریب رسانش گرمایی نانوسیال از مدل نیمه تجربی همیلتون استفاده کردند، به شرطی که ضخامت نانولایه تقریباً ۳ نانومتر باشد و زمانی که این ضخامت با ساختار سطح و شکل ذره تغییر کند باید به طور دقیق تری برآورد شود.

مدل تئوری دیگری که برای محاسبه ی ضریب رسانش گرمایی نانوسیالات توسط خو و همکاران [۴۵] ارائه شده است. طبق این مدل، آن ها نشان دادند که اطراف نانوذرات، نانولایه ای وجود دارد که ضریب رسانش گرمایی ویژه ای دارند که مدل ضمنی پیشنهادی آن ها به صورت زیر می باشد:

$$(1 - \frac{\phi}{\alpha}) \frac{k_{\text{eff}} - k_{\text{bf}}}{2k_{\text{eff}} + k_{\text{bf}}} + \frac{\phi(k_{\text{eff}} - k_{\text{tr}})(2k_{\text{tr}} + k_{\text{np}}) - \alpha(k_{\text{np}} - k_{\text{tr}})(2k_{\text{tr}} + k_{\text{eff}})}{\alpha(2k_{\text{eff}} + k_{\text{tr}})(2k_{\text{tr}} + k_{\text{np}}) - 2\alpha(k_{\text{np}} - k_{\text{tr}})(k_{\text{tr}} + k_{\text{eff}})} = 0 \quad (4)$$

که در آن زیروند Γ مربوط به نانولایه می باشد. α نیز از رابطه ی زیر محاسبه می شود:

$$\alpha = \left(\frac{d_{\text{np}}}{d_{\text{np}} + t} \right)^3 \quad (5)$$

۳-۲-۵- تأثیر تجمع نانوذرات

با گذشت زمان نانوذرات تشکیل خوشه می دهند. خوشه ای شدن، تشکیل ذرات خیلی بزرگتر به خاطر تجمع نانوذرات می باشد. اگر ذرات تشکیل تجمع یابند، می توانند مسیری با رسانش بالاتر ایجاد کنند و بدین ترتیب تأثیر بسزایی بر ضریب رسانش گرمایی دارند. اوانس و همکاران [۴۶] پیشنهاد کردند که خوشه ای شدن می تواند مسیری را ایجاد کند که انتقال حرارت سریعتر صورت گیرد، به دلیل این که حرارت در

که در آن r_{agg} و r_{np} به ترتیب شعاع تجمع تشکیل شده و نانوذره می باشد. d_f بعد فرکتال است که برای نانوسیال اتانول- سلیسیم اکسید (۲۵ نانومتری) ۶/۵٪ وزنی برابر با ۱/۶۶ است.

تابع توزیع شعاعی است که به صورت زیر تعریف می شود:

$$n(r) = \frac{1}{r_{agg} \sqrt{2\pi} \ln \sigma} \exp \left\{ - \left[\frac{\ln \left(\frac{r_{agg}}{r_{gg}} \right)}{\sqrt{2\pi} \ln \sigma} \right]^2 \right\} \quad (10)$$

که در آن r_{agg} شعاع متوسط ذرات تجمع یافته است که پیشنهاد شده است برابر با میانگین شعاع ذرات گرفته شود و σ انحراف از استاندارد است که معمولا ۱/۵ در نظر گرفته می شود.

۶- نتیجه گیری

هدف این مقاله مروری، ارائه خلاصه ای از کارهای تحقیقاتی اعم از آزمایشگاهی و مدل های تئوری انجام شده درباره ضریب رسانش گرمایی نانوسیالات می باشد. در حال حاضر اختلافات شگرفی در داده های مربوط به ضریب رسانش گرمایی نانوسیالات وجود دارد. برای کاربرد عملی نانوسیالات به عنوان سیال خنک کننده، این اختلافات باید بوسیله ی بررسی نظامند اثر پارامترهای مختلف بر روی ضریب رسانش گرمایی تاحد قابل قبولی کم یا حذف شوند. این پارامترها می تواند شامل اثر تجمع نانوذرات، غلظت، دما و ... باشد. از طرفی دانستن خصوصیات نانوذرات درک مناسبی از کاربرد نانوسیالات در سناریوهای واقعی فراهم می کند. در پیشینه ی نانوسیالات مدل های زیادی برای پیش بینی ضریب رسانش گرمایی نانوسیالات ارائه شده است اما یک مدل واحد که بتواند همه ی مکانیزم های افزایش انتقال حرارت را دربر بگیرد وجود ندارد.

ذرات جامد در مقایسه با سیال پایه خیلی سریعتر منتقل می شوند. اما خوشه های خیلی بزرگ نامطلوب هستند به این دلیل که منجر به تنشینی ذرات می شوند که این افزایش ضریب رسانش گرمایی را کاهش می دهد.

خوآن و همکاران [۴۷] مدلی برای ضریب رسانش گرمایی نانوسیالات با در نظر گرفتن حرکت براونی و تجمع نانوذرات ارائه کردند.

$$\frac{k_{eff}}{k_{bf}} = \frac{k_{np} + 2k_{bf} + 2(k_{np} - k_{bf})\phi}{k_{np} + 2k_{bf} - 2(k_{np} - k_{bf})\phi} k_{bf} + \frac{\rho_{np}\phi c_{p,np}}{2k_{bf}} \sqrt{\frac{k_B T}{3\pi r_{agg} \mu_{bf}}} \quad (6)$$

که در آن r_{agg} شعاع ظاهری تجمع نانوذرات می باشد که باید از طریق آزمایش به دست آیند. μ_{bf} ویسکوزیته دینامیکی سیال پایه است. اولین عبارت سمت راست مدل بالا همان فرمول ارائه شده برای ضریب رسانش گرمایی سوسپانسیون ذرات جامد در سیال توسط ماکسول می باشد و عبارت دوم سمت راست تأثیر تجمع نانوذرات را نشان می دهد و برای نشان دادن سهم این عبارت در ضریب رسانش گرمایی نانوسیال، آنها نانوسیال آب- مس با اندازه ۵۰ نانومتر را برای غلظت ۰/۰۳٪ در نظر گرفتند و متوجه شدند وقتی که تجمع رخ می دهد سهم این عبارت ۱۱٪ و زمانی که تجمع رخ نمی دهد ۱۷٪ می باشد.

رویکرد دیگری برای پیش بینی ضریب رسانش گرمایی توسط وانگ و همکارانش [۴۸] ارائه شد.

$$\frac{k_{eff}}{k_{bf}} = \frac{(1-\phi) + 3\phi \int_0^\infty \frac{k_{agg}(r)n(r)}{k_{agg}(r) + 2k_{bf}} dr}{(1-\phi) + 3\phi \int_0^\infty \frac{k_{bf}n(r)}{k_{agg}(r) + 2k_{bf}} dr} \quad (7)$$

که در آن ضریب رسانش گرمایی نانوذرات تجمع یافته می باشد و از مدل براگمن [۴۹] به دست می آید.

$$k_{agg} = (3\phi^* - 1)k_{np} + [3(1 - \phi^*) - 1]k_{bf} + \sqrt{\Delta} \quad (8)$$

$$\phi^* = \left(\frac{r_{agg}}{r_{np}} \right)^{d_f - 3} \quad (9)$$

- 2005.
11. H. Xie, J. Wang, T. Xi, Y. Liu, F. Ai, and Q. Wu, "Thermal conductivity enhancement of suspensions containing nanosized alumina particles," *J. Appl. Phys.*, vol. 91, no. 7, p. 4568, 2002.
 12. C.-W. Nan, G. Liu, Y. Lin, and M. Li, "Interface effect on thermal conductivity of carbon nanotube composites," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 85, no. 16, p. 3549, 2004.
 13. Y. Ding, H. Alias, D. Wen, and R. A. Williams, "Heat transfer of aqueous suspensions of carbon nanotubes (CNT nanofluids)," *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 49, no. 1-2, pp. 240-250, 2006.
 14. Y. He, Y. Jin, H. Chen, Y. Ding, D. Cang, and H. Lu, "Heat transfer and flow behaviour of aqueous suspensions of TiO₂ nanoparticles (nanofluids) flowing upward through a vertical pipe," *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 50, no. 11-12, pp. 2272-2281, 2007.
 15. D. Oh, A. Jain, J. K. Eaton, K. E. Goodson, and J. Sik, "Thermal conductivity measurement and sedimentation detection of aluminum oxide nanofluids by using the 3 x method," vol. 29, pp. 1456-1461, 2008.
 16. C. H. Li and G. P. Peterson, "Experimental investigation of temperature and volume fraction variations on the effective thermal conductivity of nanoparticle suspensions (nanofluids)," *J. Appl. Phys.*, vol. 99, no. 8, 2006.
 17. S. K. Das, N. Putra, P. Thiesen, and W. Roetzel, "Temperature Dependence of Thermal Conductivity Enhancement for Nanofluids," *J. Heat Transfer*, vol. 125, no. 4, pp. 567-574, 2003.
 18. H. E. Patel, S. K. Das, T. Sundararajan, A. Sreekumaran Nair, B. George, and T. Pradeep, "Thermal conductivities of naked and monolayer protected metal nanoparticle based
 1. J. C. Maxwell, *A treatise on electricity and magnetism*, vol. 1. Clarendon press, 1881.
 2. S. U. S. Choi and J. A. Eastman, "Enhancing thermal conductivity of fluids with nanoparticles," *ASME Int. Mech. Eng. Congr. Expo.*, vol. 66, no5, pp. 99-105, 1995.
 3. J. A. Eastman, S. U. S. Choi, S. Li, W. Yu, and L. J. Thompson, "Anomalous increased effective thermal conductivities of ethylene glycol-based nanofluids containing copper nanoparticles," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 78, no. 6, pp. 718-720, 2001.
 4. P. C. Mishra, S. K. Nayak, and S. Mukherjee, "Thermal Conductivity of Nanofluids-An Extensive Literature Review," *Int. J. Eng. Res. Technol.*, vol. 2, no. 9, pp. 734-745, 2013.
 5. G. Paul, M. Chopkar, I. Manna, and P. K. Das, "Techniques for measuring the thermal conductivity of nanofluids: A review," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 14, no. 7, pp. 1913-1924, 2010.
 6. Y. Li, J. Zhou, S. Tung, E. Schneider, and S. Xi, "A review on development of nanofluid preparation and characterization," *Powder Technol.*, vol. 196, no. 2, pp. 89-101, 2009.
 7. M. S. Liu, M. C. C. Lin, C. Y. Tsai, and C. C. Wang, "Enhancement of thermal conductivity with Cu for nanofluids using chemical reduction method," *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 49, no. 17-18, pp. 3028-3033, 2006.
 8. T. Hong, H. Yang, and C. Choi, "Study of the enhanced thermal conductivity of Fe nanofluids," *J. Appl. Phys.*, vol. 97, pp. 64311-1-4, 2005.
 9. Y. Xuan and Q. Li, "Heat transfer enhancement of nanofluids," vol. 21, pp. 58-64, 2000.
 10. S. M. S. Murshed, K. C. Leong, and C. Yang, "Enhanced thermal conductivity of TiO₂-water based nanofluids," vol. 44, pp. 367-373,



- nanofluids,” *Exp. Therm. Fluid Sci.*, vol. 33, no. 4, pp. 706–714, 2009.
27. S. Lee, S.-S. Choi, S. Li and, and J. A. Eastman, “Measuring thermal conductivity of fluids containing oxide nanoparticles,” *J. Heat Transfer*, vol. 121, no. 2, pp. 280–289, 1999.
 28. M. Chopkar, S. Sudarshan, P. K. Das, and I. Manna, “Effect of Particle Size on Thermal Conductivity of Nanofluid,” *Metall. Mater. Trans. A*, vol. 39, no. 7, pp. 1535–1542, 2008.
 29. D.-H. Yoo, K. S. Hong, and H.-S. Yang, “Study of thermal conductivity of nanofluids for the application of heat transfer fluids,” *Thermochim. Acta*, vol. 455, no. 1, pp. 66–69, 2007.
 30. H. Chen, S. Witharana, Y. Jin, C. Kim, and Y. Ding, “Predicting thermal conductivity of liquid suspensions of nanoparticles (nanofluids) based on rheology,” *Particuology*, vol. 7, no. 2, pp. 151–157, 2009.
 31. M. Xing, J. Yu, and R. Wang, “Experimental investigation and modelling on the thermal conductivity of CNTs based nanofluids,” *Int. J. Therm. Sci.*, vol. 104, pp. 404–411, 2016.
 32. M. P. Beck, Y. Yuan, P. Warriar, and A. S. Teja, “The effect of particle size on the thermal conductivity of alumina nanofluids,” *J. Nanoparticle Res.*, vol. 11, no. 5, pp. 1129–1136, 2009.
 33. H. Xie, H. Lee, W. Youn, and M. Choi, “Nanofluids containing multiwalled carbon nanotubes and their enhanced thermal conductivities,” *J. Appl. Phys.*, vol. 94, no. 8, pp. 4967–4971, 2003.
 34. Y. J. Hwang et al., “Investigation on characteristics of thermal conductivity enhancement of nanofluids,” vol. 6, pp. 1068–1071, 2006.
 35. M.-S. Liu, M. Ching-Cheng Lin, I.-T. Huang, and C.-C. Wang, “Enhancement of thermal conductivity with carbon nanotube for nanofluids,” *Int. Commun. Heat Mass Transf.*, vol. nanofluids: Manifestation of anomalous enhancement and chemical effects,” *Appl. Phys. Lett.*, vol. 83, no. 14, pp. 2931–2933, 2003.
 19. W. Roetzel, S. Prinzen, and Y. Xuan, “Measurement of thermal diffusivity using temperature oscillations,” *Therm. Conduct.*, vol. 21, pp. 201–207, 1990.
 20. C. H. Chon, K. D. Kihm, S. P. Lee, and S. U. S. Choi, “Empirical correlation finding the role of temperature and particle size for nanofluid (Al₂O₃) thermal conductivity enhancement,” *Appl. Phys. Lett.*, vol. 87, no. 15, pp. 1–3, 2005.
 21. R. Prasher, I. Corporation, W. Chandler, and V. Boule, “Effect of Aggregation Kinetics on the Thermal Conductivity of Nanoscale Colloidal Solutions (Nanofluid),” pp. 8–12, 2006.
 22. D. Zhu, X. Li, N. Wang, X. Wang, J. Gao, and H. Li, “Dispersion behavior and thermal conductivity characteristics of Al₂O₃-H₂O nanofluids,” *Curr. Appl. Phys.*, vol. 9, no. 1, pp. 131–139, 2009.
 23. S. W. Lee, S. D. Park, S. Kang, I. C. Bang, and J. H. Kim, “Investigation of viscosity and thermal conductivity of SiC nanofluids for heat transfer applications,” *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 54, no. 1–3, pp. 433–438, 2011.
 24. S. Harish et al., “Temperature Dependent Thermal Conductivity Increase of Aqueous Nanofluid with Single Walled Carbon Nanotube Inclusion,” *Mater. Express*, vol. 2, no. 3, pp. 213–223, 2012.
 25. M. P. Beck, Y. Yuan, P. Warriar, and A. S. Teja, “The thermal conductivity of alumina nanofluids in water, ethylene glycol, and ethylene glycol + water mixtures,” *J. Nanoparticle Res.*, vol. 12, no. 4, pp. 1469–1477, 2010.
 26. W. Duangthongsuk and S. Wongwises, “Measurement of temperature-dependent thermal conductivity and viscosity of TiO₂-water





45. Q. Xue and W. M. Xu, "A model of thermal conductivity of nanofluids with interfacial shells," *Mater. Chem. Phys.*, vol. 90, no. 2–3, pp. 298–301, 2005.
46. W. Evans, R. Prasher, J. Fish, P. Meakin, P. Phelan, and P. Keblinski, "Effect of aggregation and interfacial thermal resistance on thermal conductivity of nanocomposites and colloidal nanofluids," vol. 51, pp. 1431–1438, 2008.
47. Y. Xuan, Q. Li, and W. Hu, "Aggregation structure and thermal conductivity of nanofluids," *AIChE J.*, vol. 49, no. 4, pp. 1038–1043, 2003.
48. B. Wang, L. Zhou, and X. Peng, "A fractal model for predicting the effective thermal conductivity of liquid with suspension of nanoparticles," vol. 46, pp. 2665–2672, 2003.
49. D. A. G. Bruggeman, "Berechnung verschiedener physikalischer Konstanten von heterogenen Substanzen. III. Die elastischen Konstanten der quasiisotropen Mischkörper aus isotropen Substanzen," *Ann. Phys.*, vol. 421, no. 2, pp. 160–178, 1937.
- 32, no. 9, pp. 1202–1210, 2005.
36. R. Agarwal, K. Verma, N. K. Agrawal, R. K. Duchaniya, and R. Singh, "Synthesis, characterization, thermal conductivity and sensitivity of CuO nanofluids," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 102, pp. 1024–1036, 2016.
37. X. Zhang, H. Gu, and M. Fujii, "Effective thermal conductivity and thermal diffusivity of nanofluids containing spherical and cylindrical nanoparticles," *Exp. Therm. Fluid Sci.*, vol. 31, no. 6, pp. 593–599, 2007.
38. S. M. S. Murshed, K. C. Leong, and C. Yang, "Investigations of thermal conductivity and viscosity of nanofluids," vol. 47, pp. 560–568, 2008.
39. Y. Ding, H. Alias, D. Wen, and R. A. Williams, "Heat transfer of aqueous suspensions of carbon nanotubes (CNT nanofluids)," vol. 49, pp. 240–250, 2006.
40. [40] R. H. Davis, "The effective thermal conductivity of a composite material with spherical inclusions," *Int. J. Thermophys.*, vol. 7, no. 3, pp. 609–620, 1986.
41. R. L. Hamilton and O. K. Crosser, "Thermal Conductivity of Heterogeneous Two-Component Systems," *IEC Fundamentals*, vol. 1, no. 3, pp. 187–191, 1959.
42. D. J. Jeffrey, "Conduction Through a Random Suspension of Spheres," *Proc. R. Soc. London A Math. Phys. Eng. Sci.*, vol. 335, no. 1602, pp. 355–367, 1973.
43. J. Koo and C. Kleinstreuer, "A new thermal conductivity model for nanofluids," *J. Nanoparticle Res.*, vol. 6, no. 6, pp. 577–588, 2004.
44. W. Yu and S. U. S. Choi, "The role of interfacial layers in the enhanced thermal conductivity of nanofluids: A renovated Maxwell model," *J. Nanoparticle Res.*, vol. 5, no. 1–2, pp. 167–171, 2003.

A Review on Theoretical and Experimental Studies on Improving the Thermal Conductivity Coefficient of Nanofluids

Masoud Bahrami^{1*}, Somayyeh Alidoust¹

1-Iran, Khozestan, Ahwaz, Petroleum University of Technology (RIPI), P.O.Box 6343

Corresponding Author, Email: m.bahrami@put.ac.ir

Abstract

Conventional heat transfer fluids, such as water, oil and ethylene glycol, are used in a variety of industries, such as chemical processes, refrigeration, cooling and heating processes, transportation, power plants and micro-sized industries with a low-heat transfer characteristic. Increasing the coefficient of thermal conductivity is the key idea to improving the heat transfer properties of conventional fluids. Solid particles have higher thermal conductivity than the base fluid, as a consequence it is expected that the heat transfer coefficient could be increased by suspending solid particles in the base fluid. Nanofluids, which are diluted suspensions containing nano-particles, seem to be a hopeful option for next generation of thermal systems. However, there are several researches reported the various parameters affecting heat transfer coefficient of nanofluids. In spite of several models have been proposed to predict their thermal conductivity coefficient, still a unique model that can predict all possible heat transfer mechanisms of nanoparticles is lacking.

Keywords: Nanofluids, Thermal conductivity coefficient, Heat transfer.

