بررسی مدلهای ریاضی ارائه شده برای محاسبهٔ ضریب رسانش گرمایی نانوسیالات

علی اصغر حمیدی [۱]* , آزاده امراللهی [۱], علیمراد رشیدی [۲], عبدالرضا مقدسی [۳], سیدمسعود حسینی [۳]

۱- تهران، دانشگاه تهران، دانشکده فنی، دانشکده مهندسی شیمی

۲ - تهران، پژوهشگاه صنعت نفت،پژوهشکده گاز

۳- اراک، دانشگاه اراک، دانشکده فنی و مهندسی، گروه مهندسی شیمی

پیام نگار: aahamidi@ut.ac.ir

چکیده:

تحقیقات ماکروسکوپی صورت گرفته در مورد سوسپانسیونهای نانوذرات، حاکی از افزایش غیرعادی و قابل توجهی در انتقال گرما است. نتیجه این تحقیقات بیان مکانیسم هایی بوده است که منجر به نتایج آزمایشگاهی موثرتری شده است. اندازه گیری های اخیر در مورد نانوسیالات نشان می دهد که ضریب رسانش گرمایی با کاهش اندازه ذره، افزایش می یابد. به هر حال چنین افزایشی با تئوری های موجود قابل توجیه نیست. چهار نظریه ممکن در مورد افزایش غیرعادی ضریب رسانش گرمایی مطرح شده اند که عبارتند از: حرکت براونی ذرات، لایه سازی مایع در سطح مشترک آن با جامد، انتقال گرما توسط فونون ها و تاثیرات توده نانوذرات. نشان داده شده است که عوامل اصلی در درک ویژگی های گرمایی نانوسیالات، عوامل پرتابه ای هستند. در خصوص ضریب رسانش گرمایی موثر نانوسیالات با لایه های بین وجهین مدلهایی ارائه شده اند که در آنها ضریب رسانش گرمایی موثر یک نانوسیال نه فقط به ضرایب رسانش گرمایی نانوذره جامد و مایع پایه، و جزء حجمی نانوذرات بستگی دارد بلکه به اندازه ذره و ویژگی های لایه بین وجهین نیز وابسته است. همچنین تاثیرات نسبی مکانیسم های حرکت نانوذرات و سوسپانسیونهای رقیق مانند حرکت براونی، ترموفورز و اسموفورز به صورت تئوری روی ضریب رسانش گرمایی مورد تحقیق قرار گرفته است.

کلمات کلیدی: نانو سیال, نانوذره, رسانش گرمایی مؤثر

۱-مقدمه:

با توجه به اینکه جامدات فلزی و اکسیدهای آنها رسانش بالاتری نسبت به سیالات دارند, ایده پراکنده سازی ذرات جامد در سیال برای بالا بردن رسانش سیال به وجود آمد, که این ایده در سال ۱۸۸۱ به وسیله پراکنده سازی ذرات جامدِ میکرو و میلی متری در سیال عملی شد[۱]، ولی همواره مشکلات عدم پایداری, ته نشینی, سائیدگی و فرسایش مجاری و مسدود کردن لوله ها درمورد این سیالات مانع از دستیابی به یک محصول تجاری میشد. چوی درسال ۱۹۹۵میلادی درمؤسسه تحقیقاتی آرگونه [۱] درآمریکا, اولین کسی بود که از لفظ" نانو سیال" برای سوسپانسیون های نانوذره درمایع استفاده کرد و ادّعا کرد که چنین سیالاتی هم از نظر تهیه و هم از نظر خواص پایداری و انتقالی در مقایسه با سوسپانسیون های معمولی جامد- مایع و ماکرو سیالات تفاوتهای فراوانی دارند. ضریب رسانش گرمایی سیالات را بوسیله افزودن مقدار بسیار کمی از نانوذرات فلزی یا نانوذرات اکسیدهای فلزی نظیر مس،

1. Argonne

اکسـید مس ، آلومینا و یا نانو لوله های کربنی به سیال افزایش میدهند. روشـهایی که برای تهیه نانو سیال استفاده می شوند همه به نوعی روی خواص سطحی سوسپانسیون تاثیر گذاشته تا از تشکیل خوشه[1] جلوگیری کنند و سوسپانسیون پایای تشکیل شود روشهایی مانند تغییر اسیدیته, اسـتفاده از مواد فعال سـطحی, لرزاننده‌های مافوق صوت که در مقیاس آزمایشگاهی برای تهیه نانو سیالات مورد استفاده قرار می گیرد.

۲- کاربردهای نانو سیالات :

بیشـترین تاثیر ذرات نانو در خواص انتقالی این سیال به ویژه در خواص انتقـال گرما می باشـد. اسـتفاده از این مواد در صنعـت حمل و نقل به صورت مسـتقیم و غیر مستقیم مقدار انرژی مصرفی را با کوچکتر کردن رادیاتور ماشین ها کاهش می دهند[۲] . در همین راستا می توان از نانو سـیالات در مبدل های گرمایی که منجر به کاهش چشـمگیری در دبی سـیال عامل می شـود اسـتفاده کرد , که در نهایت مبدل های گرمایی بـا اندازه و وزن کمتر طراحی می‌شـود که در صنایع هـوا و فضا نیاز به چنین سیستم هایی بیشتر احساس می شود. همچنین نانو ذرات به علت انرژی جنبشـی کمی که در برخورد با سطح ایجاد می کنند اصطکاک و فرسـایش کمی را ایجاد کرده و صدمه کمتری را به کانال ها و پمپ ها می زنند [۳] . آزمایشـات نشان می دهد که در سرعتهای بالای سیستمِ سرمایشِ روغن موتور, افزودن نانو ذرات مس باعث کاهش بیشتر ضریب اصطکاک نسـبت به سیال پایه می‌شـود. همچنین با کاهش دبی سیال مقـدار انرژی که بوسـیله پمپ ها برای به جریان انداختن سـیالِ عامل مصرف می شـود به مقدار چشـمگیری کاهش می یابد. از سـال ۱۹۶۰ میلادی بحث کوچک سـازی و میکرو ماشـین ها باعث تغییرات زیادی در علـم و فناوری شـد. برای خنک کردن سیسـتم هـای میکرو الکترو مکانیک,که شـار گرمایـی بالایی ایجاد میکنند, باید از کانالهای بسـیار باریک برای جریان سیالِ خنک کننده استفاده شود که سیالات معمولی توانایی لازم را برای خنک کردن این سیستم ها را ندارند. در حالیکه نانو سـیالات بدون مسدود کردن این کانالها , میتواند منتقل کننده این شار بالای گرمایی باشد[۴].

۳- تفاوت نانو سیالات با سوسپانسیونهای ماکرو :

تفاوت اساسی نانو سیالات با سوسپانسیون های معمولی از اندازه بسیار ریز ذرات پراکنده نشأت می‌گیرد[۵]. بسیاری از نیرو های موثر در بعد ماکرو, با کوچک شدن ذرات وسطح بسیار بالای آنها, تأثیر خود را از دست می‌دهند و جای خود را به نیرو های بین مولکولی می دهند. در مقیاس نانو نیروهای بین مولکولی تاثیر بیشـتری نسبت به نیروهای هیدرودینامیکی دارند و با توجه به اینکه خواص موجی شکل (مکانیک کوانتوم) الکترون‌های داخل ماده و اثر متقابل آنها روی یکدیگر از جابجایی مواد در مقیاس نانو تأثیر می پذیرد, امکان کنترل و تغییر در خواص ذاتی مواد از جمله خواص گرمایی, الکتریکی, نوری , مغناطیسـی و بار هسـته وغیره بدون تغییر در خواص شـیمیایی وجود دارد . از دید مولکولی, فرضیات جریان ماکرو زیر سـوال می‌رود زیرا رفتار سـیال در مقیاس کوچک تغییر می‌کند و مقیاس طول اهمیت پیدا می کند . فرضیه پیوسـتگی, در ابعاد ملکولی, به علت وجود فواصل بین مولکولی صدق نمی کند. بنابراین برای توجیه رفتار سـیالات در ایـن بعد, یا مدل هـای اتمی و مولکولی که فرضیه پیوسـتگی در آن نقشی ندارد را در نظر می گیرند و یا فرضیه پیوستگی را با در نظر گرفتن محدودیت‌هایی استفاده می کنند.

۴- رسانش گرمایی نانو سیال :

ضریـب رسـانش گرمایی مهمترین پارامتر برای نشـان دادن پتانسـیل سوسپانسـیون ذرات (نانـو - مایع) برای افزایش انتقال گرما می باشـد. مطالعـات تجربی در زمینهٔ ضزیب رسـانش گرمایی نانوسـیال در چند سـال اخیر رشد زیادی نموده و مشخص شـده که نتایج اکثر آزمایشات انجام گرفته بیشـتر از پیش بینی های ریاضی برای رسانش می‌باشد . در ارائه مدلهای ریاضی ضریب رسانشـی سـیال معمولا به دو صورت عمل می شـود: یا از مدلهای ماکرو, با ایجـاد محدودیت ها و ضرایب تصحیح استفاده می کنند ویا از مدلهای مولکولی که فرض پیوستگی در آن اثری ندارد, استفاده می‌شود.

۴-۱- کاربرد مدلهای ماکرو در زمینهٔ رسانش گرمایی نانوسیال :

از اولیـن مـدل های ریاضی برای رسـانش گرمایی سوسپانسـیون های ماکرو, مدل *ماکسـول* [۶] میباشـد که این مدل فقط برای ذرات کروی خوب جواب می دهد و در مورد ذرات غیر کروی خطای بالائی را از خود نشان می دهد . در این مدل رسانش گرمایی سوسپانسیون فقط تابعی از

1. Cluster

جزء حجمی ذره و رسانش گرمایی سیال و ذره می باشد :

$$k_{\text{eff,Maxwell}} = \frac{k_p + 2k_l + 2(k_p - k_l)\phi}{k_p + 2k_l - (k_p - k_l)\phi} k_l \qquad (۱)$$

k_p : رسانش گرمایی ذره $(W/m.^oK)$

k_l : رسانش گرمایی سیال پایه $(W/m.^oK)$

φ :جزء حجمی ذره در سیال پایه

پس از مدل ماکسول, مدل همیلتون کروز[۶] در سال ۱۹۶۲ میلادی برای رسانش گرمایی موثر مخلوط دو جزئی ارائه شدکه علاوه بر جزء حجمی و رسانش گرمایی سیال و ذره , شکل ذرات معلق را نیز در رسانش گرمایی سوسپانسیون موثر دانست :

$$k_{\text{eff,Hamilton}} = \frac{k_p + (n-1)k_l - (n-1)(k_l - k_p)\phi}{k_p + (n-1)k_l + (k_l - k_p)\phi} k_l \qquad (۲)$$

$$n = 3/\psi$$

n فاکتور شکل وψ عبارتست از نسبت مساحت سطح کره (با حجمی برابر حجم ذره) به مساحت سطح ذره ؛ که نشان دهندهٔ افزایش رسانش مؤثر ذرات غیر کروی می باشد .

از دیگر تئوری ها در رابطه با ضریب رسانش گرمایی موثر سیالات، تئوری‌های جفری و دیویس می باشند [۷-۸] :

$$\frac{K_{eff\ (Jeffrey)}}{K_l} = 1 + 3\beta\nu + \left[3\beta^2 + \frac{3\beta^2}{4} + \frac{9\beta^3}{16}\frac{\alpha+2}{2\alpha+3} + \ldots\right]\nu^2 \qquad (۳)$$

$$\frac{K_{\text{eff (Davis)}}}{K_l} = 1 + \frac{3(\alpha-1)+}{(\alpha+2)-(\alpha-1)\nu}\left[\nu + f(\alpha)\nu^2 + o(\nu^3)\right] \qquad (۴)$$

در این معادلات K_{eff} ضریب رسانش گرمایی موثر نانوسیال، $\alpha = \frac{K_p}{K_l}$ و $\beta = \frac{\alpha-1}{\alpha+2}$ می باشند. دراین دو معادله، ترم های با درجه بالا بر هم کنش تصادفی هر جفت از ذرات کروی پراکنده را ارائه میدهند. همچنین در معادله ۴ برای آلفا ی برابر ۱۰, ۲/۵ = $f(\alpha)$ و برای آلفای بینهایت، ۰/۵ = $f(\alpha)$ می باشد.

با توجه به اینکه این سه مدل که در مقیاس ماکرو برای سوسپانسیون‌های جامد / مایع ارائه شده اند , انطباق خوبی بر روی نانو سیالات ندارند دانشمندان در چند سال اخیر در پی ارائه مدلهای مناسب و اصلاحات لازم روی این مدلها بوده اند. یکی از اساسی ترین مشکل این مدلها عدم در نظر گرفتن اندازه ذره می باشد در حالیکه آزمایشاتی که روی اندازه‌های متفاوت ذرات انجام شده است به خوبی این موضوع را آشکار می‌سازد که با کوچکتر شدن ذره, رسانش بیشتری در سوسپانسیون بوجود می آید.

۴-۲- مکانیسم های بالقوه افزایش ضریب رسانش گرمایی در نانوسیالات:

کبلینسکی , ایستمن و چوی [۹] چهارعامل دیگر رادر افزایش رسانش نانو سیال ها مؤثر می دانند که می توان با بررسی آنها رفتار غیر عادی نانو سیال ها را تو جیه کرد :

- حرکت براونی نانوذرات
- نانو لایه های ایجاد شده در مرز نانو ذرات و سیال پایه
- طبیعت انتقال گرما در نانو ذرات و بررسی انتقال فونونی
- تاثیر خوشه شدن[1] نانوذرات .

۴-۲-۱- رسانش ناشی از حرکت براونی:

حرکات براونی در مدل همیلتون درنظرگرفته نشده وسیال در حالت ایستا وساکن درنظر گرفته شده است . حرکت براونی توسط ثابت نفوذ ذره مشخص می شود که این پارامتر با رابطه زیر داده می شود[۹] :

$$D = \frac{K_B T}{3\pi\eta d} \qquad (۵)$$

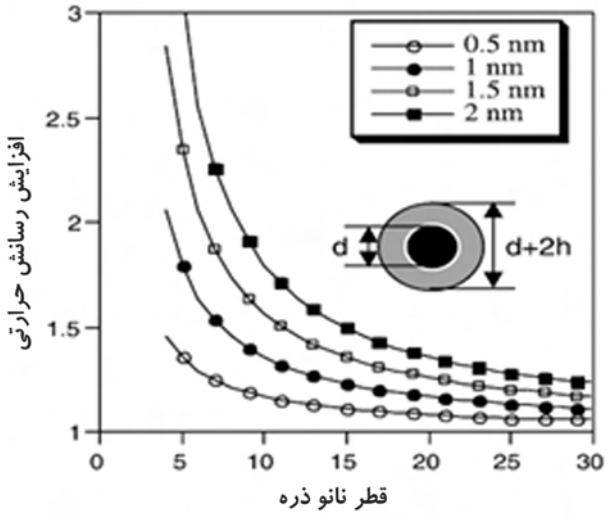
K_B ثابت بولتزمن، η ویسکوزیته سیال، α قطر ذره و T نیز دما می‌باشد. با این معادله می توان تاثیر حرکت براونی روی ضریب رسانش گرمایی را تخمین زد که این تخمین بوسیله مقایسه مقیاس زمانی حرکت ذره با مقیاس زمانی نفوذ گرمایی در مایع بدست می آید. نتایج حاصل از مقایسهٔ زمان لازم برای جابجایی ذره به اندازه خودش و زمان لازم برای انتقال گرما در مایع به اندازهٔ خود ذره نشان می دهد که نفوذ گرمایی خیلی سریعتر از حرکت براونی یا نفوذ جرمی صورت میگیرد وحرکت براونی نمیتواند عامل تشدید نفوذ گرمایی باشد. ولی نقش حرکت براونی در افزایش رسانش گرمایی نانوسیال از جنبه های دیگر قابل بررسی و تحقیق می‌باشد بطور مثال تاثیر حرکت بروانی در ایجاد خوشه بسیار پر اهمیت بوده و این حرکات تصادفی از طریق افزایش احتمال تشکیل

1.Clustering

خوشه در اثر برخورد نانوذره باعث افزایش رسانش می‌شوند .

۴-۲-۲-لایه سازی مایع در سطح مشترک آن با ذره جامد:

سطح مشترک که به صورت لایه نازکی از مایع در اطراف ذره تشکیل می‌شود به عنوان فاز سوم نانو سیال مطرح می‌شود که می تواند به عنوان یک پل یا یک مانع در انتقال گرما, عمل کند . آزمایشات نشان داده که این لایه باعث افزایش رسانش می شود و دارای رسانشی شبیه به جامد می‌باشد. ساختمان اتمی این لایه که ضخامت حدود ۵ تا۶ ملکول دارد (در حد نانومتر) اهمیت زیادی نسبت به توده سیالی دارد وافزایش ضخامت این نانو لایه در افزایش رسانش نانو سیال موثر است. البته با توجه به سطح زیاد نانو ذرات این سطح مشترک نیز افزایش می‌یابد (شکل(۱)).

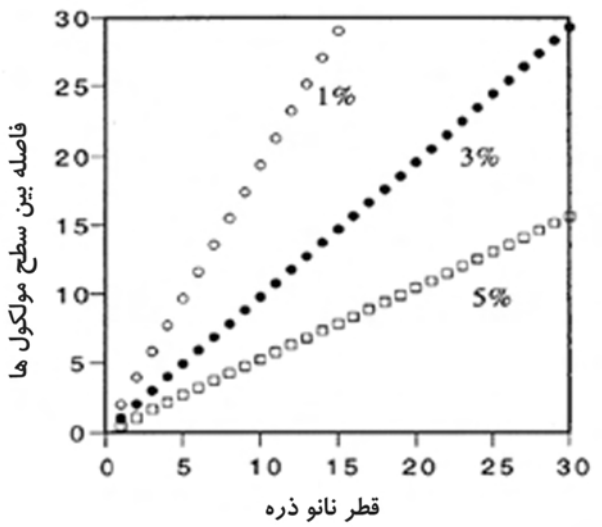


شکل۱- رسانش گرمایی به صورت تابعی از قطر ذره d و ضخامت سطح مشترک h [۹].

نانوذراتی که در سوسپانسیون، چنین لایه سازی روی آنها انجام گرفته، نانوذرات کمپلکس نام دارند که شامل ذره جامد و لایه اطراف آن معروف به لایه بین وجهین[1]، می باشند.

۴-۲-۳-انتقال گرما توسط فونونها:

با توجه به اهمیت انتقال بوسیله فونون ها باید مدل های ریاضی که بر مبنای انتقال فونون هایِ بالستیک هستند ارائه شود زیرا که مدلهای ماکروسکوپی نفوذی, پیش بینی های درستی برای رسانش نانوذرات جامد انجام نمی دهند و این در حالی است که این مکانیسم در مواد غیر فلزی مکانیسم کنترل کننده ای محسوب میگردد. از آنجائی که فاصله پویش آزاد فونون در مایع نسبت به ذرات جامد بسیار کوچک می باشد اثر این پدیده در سوسپانسیون ها وقتی مشخص میشود که فاصله بین ذرات بسیار کم باشد . چنانچه در شکل ۲ مشخص است هر چه درصد حجمی ذره بالاتر و ذره کوچکتر باشد فاصله بین ذرات کمترمی شود و در حقیقت عامل اصلی افزایش بوسیلهٔ فونونها , حرکت براونی ذرات جامد است که باعث نزدیکی ذرات و اثر فونون ها می شود.



شکل۲- فاصله بین سطح ملکولها با تغییر قطر و درصد حجمی ذره [۹].

در جامدات کریستالی مانندی که در نانوسیالات استفاده می شوند، گرما توسط فونون ها منتقل می شود مانند انتقال از طریق ارتعاشات شبکه ای. این فونون ها به صورت بی نظم و تصادفی حرکت کرده و در مسیرهای تصادفی انتقال می یابند و بدین طریق توسط یکدیگر پراکنده می‌شوند. در ساده ترین تئوری دبای، مفهوم مسیر آزاد (L) فونون توسط معادله زیر داده می شود :

$$L = \frac{10aTm}{\gamma T} \qquad (۶)$$

T_m نقطه ذوب ، a ثابت شبکه (تقریباً ۵۰ نانومتر) و γ پارامتر گرونیزن (که تقریباً ۱ است) می‌باشند. انتقال های فونون به دو صورت نفوذ سریع و نفوذ پرتابه ای انجام می گیرد. برای هر یک از این انتقال ها، دمای

1. Interfacial shell

۴-۳-۲-تئوری کو :

کو و همکاران [۱۱] سه مکانیسم حرکت نانوذرات را بررسی کرده و آنها را با هم مقایسه نموده است . از نظر میکروسکوپی، مکانیسم های فیزیکی انتقال (رسانایی) بسیار پیچیده اند که این مکانیسم ها شامل چندین پدیده مانند برخورد مولکولی در گازها، ارتعاش شبکه ای در کریستال ها و جریان الکترون های آزاد در فلزات می باشند. در مقابل آن حرکت های ترموفورز[1] و اسموفورز[2] میتوانند پدیده های انتقال گرما به حساب آیند. این دانشمندان ابتدا فرض کردند که ضریب رسانش افزایش یافته یک نانوسیال اساساً به دلیل حرکت براونی است. این اثر برای ضریب رسانش گرمایی یک سوسپانسیون رقیق استاتیکی، قابل ایجاد شدن است:

$$K_{eff} = K_{static} + K_{Brownian} \qquad (۸)$$

K_{static} می تواند همان تئوری ماکسول و $K_{Brownian}$ نیز میتواند به فرم معادله زیر باشد:

$$K_{Brownian} = 5\times10^{4}\,\beta\alpha_d\rho_l C_l\sqrt{\frac{KT}{\rho_d D}}.f(T,\alpha_d,etc) \qquad (۹)$$

به علاوه ذراتی که در سوسپانسیون حرکت می کنند، سیال احاطه کننده را به دلیل تاثیرات ویسکوز بودن با خود حمل می کنند، که با در نظر گرفتن این اثر، ضریب رسانش گرمایی ناشی از ترموفورز اینگونه بیان شده است:

$$K_{TP} = n\bar{u}m_d C_d = \frac{1}{6\pi}\frac{\alpha_d K}{\mu_C}\frac{3K_C}{K_d+2K_C}(1\times10^{5}\rho_l C_l)\nabla T \qquad (۱۰)$$

در این معادله n دانسیته، $\overline{U}$ سرعت ترموفورز، K_d و K_c به ترتیب ضریب رسانش گرمایی ذره جامد و سیال پایه، α_d جزء حجمی ذره و μ_C ویسکوزیته سیال پایه است.

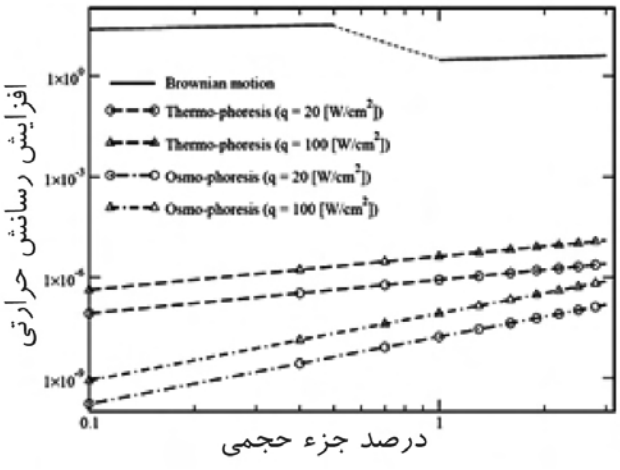
همچنین وقتی که در محلولی، گرادیان دمایی وجود دارد، یک ذره معلق، یک نیروی خالص را متحمل می شود زیرا مولکول هایی که از مسیری با دمای بالا وارد می شوند دارای مومنتوم بزرگتری نسبت به مولکولهایی هستند که از مسیر با دمای پایین تر وارد می شوند. با توجه به این امر، معادله ای که برای رسانش گرمایی در اثر اسموفورز و با در نظر گرفتن تاثیرات ویسکوزیته بدست آمد، به فرم زیر است:

$$K_{osp} = \frac{1}{3\pi}\frac{\alpha_d K}{\mu_C}\frac{3K_C}{K_d+2K_C}(1\times10^{5}\rho_l C_l)\nabla T \qquad (۱۱)$$

1. Thermo- phoresis
2. Osmo-phoresis

نتایج این تحقیقِ کو و کلینستر در شکل (۴) آورده شده و تاثیر نیروهای براونی و اسمتیک و ترموپورسیس با هم مقایسه شده که نتایج نشان دهندهٔ اهمیت بالای حرکت براونی می باشد .

روابط ضریب رسانش گرمایی القا شده توسط ترموفورز و اسموفورز مستقل از اندازه ذره هستند در حالی که در مورد حرکت براونی عکس این نتیجه وجود دارد.



شکل ۴- نتایج کو و کلینستردر مقایسه حرکت براونی و نیروهای اسمتیک و ترموپورسیس [۱۱].

علاوه بر این نظریه، کو و همکارانش [۱۲] در رابطه با ضریب رسانش گرمایی ناشی از حرکت براونی، معادله ای را ارائه دادند که در اینجا به اختصار بیان می گردد:

$$K_{Brownian} = 5\times10^{4}\,\beta\alpha_d\rho_l C_l\sqrt{\frac{KT}{\rho_d D}}.f(T,\alpha_d,etc) \qquad (۱۲)$$

در این معادله پارامتر β شامل برهم کنش بین ذرات و نیز سیال تحت تاثیر واقع شده است. f هم تابعی از وابستگی دمایی ناشی از برهم کنش های ذره ای است. براساس نتایجی که *کبلینسکی*[۹] بدست آورد، حرکت براونی تاثیر کمتری نسبت به عوامل دیگر دارد و می تواند قابل اغماض باشد. این امر به دلیل برخورد نانوذرات ناشی از حرکت براونی است که پدیده ای بسیار آهسته و کند است. چوی[۱۳] براساس این نظریه مدلی را به صورت زیر ارائه دادند:

$$K_{eff,jang} = K_1(1-\nu) + Kp\nu + 3C\frac{d_1}{d_p}K_1 R_{edp}^2.P_r\nu \qquad (۱۳)$$

که Re_{dp} عدد رینولدز است که با رابطه $Re_{dp} = (\overline{C}_{R,M} dp)/\nu$ داده می شود و C یک ثابت است. $C_{R,M}$ سرعت حرکت تصادفی نانوذرات و ν سرعت دینامیکی سیال پایه است و Pr هم عدد پرانتل می باشد. تخمین های حاصل از این مدل در تطابق خوبی با نتایج آزمایشگاهی ایستمن و همکاران هستند [۴،۱۴،۱۵].

۴-۳-۳-تئوری هیو و لی :

دانشمندان دیگری بنام هیو و *لی* [۱۶] از نظریهٔ پراکندگی استفاده کردند و از توده ها[1] بجای ذرات خوشه ای, در مدل استفاده کردند. آنها رسانش نانو سیال را تابعِ ویسکوزیته نانوسیال , رسانش سیال پایه و نانوذره , ظرفیت گرمایی ذره ,جزء حجمی موثر ذره و زاویه چرخش خوشه (r_c) می دانند. با کوچک شدن شعاع چرخش (کوچکتر شدن ذره)، خوشه سریعتر حرکت می‌کند و با افزایش رسانش گرمایی باعث افزایش انتقال گرما می شود . در این تحقیق، رسانش گرمایی نانوسیال را حاصل مجموع رسانش ناشی از حرکت براونی و تغییر ترکیب سیال پایه می دانند . از تئوری ماکسول برای رسانش موثر نانو سیال مس با شعاع متوسط ۲۰ نانومتر استفاده می کنند و تاثیر حرکت براونی را بوسیله مدل پراکندگی بررسی می کنند. معادلهٔ تغییر مکان در هر ثانیه برای هر خوشه با شعاع چرخش متوسط r_c به صورت رابطه ۱۴ می باشد که از معادلهٔ لانگوین بدست می آید :

$$q_f = -\frac{1}{2} n_c m_c c_p l \frac{\partial T}{\partial x} \qquad (۱۴)$$

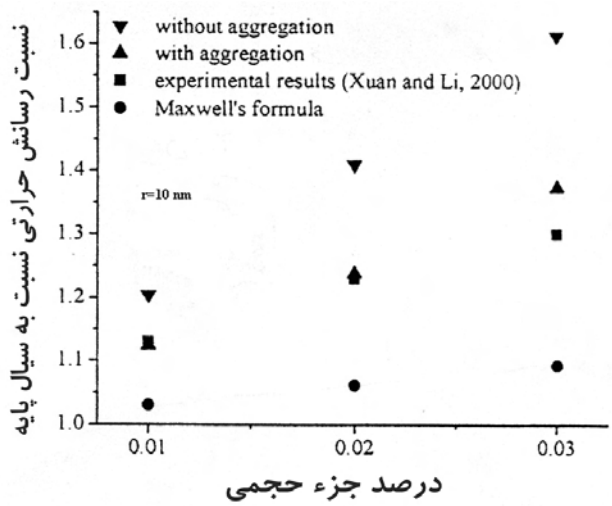
هنگامی که شعاع چرخش خوشه بزرگتر از شعاع چرخش یک نانوذره باشد تغییر مکان خوشه کوچکتر از تغییر مکان یک ذره می باشد. اگر یک سیستم سوسپانسیون شامل n_c تا کلاستر نانوذره باشد, فرض میشود نیمی از آنها به سمت راست محور مختصات و نیمی به سمت چپ حرکت کنند . با روشی مشابه با روش بِرد شار انتقال انرژی در اثر حرکت تصادفی ازرابطه ۱۵ بدست می آید :

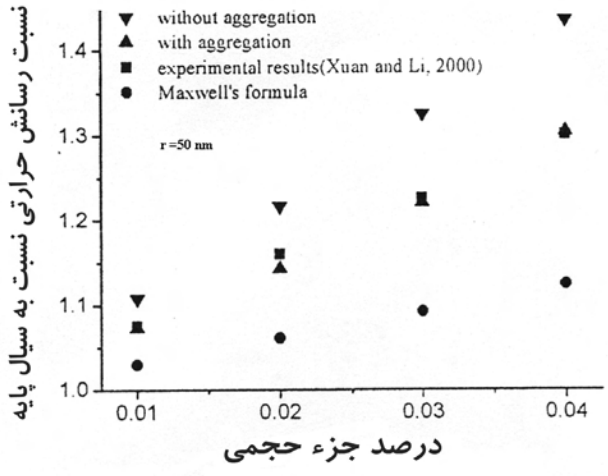
$$q_f = -\frac{1}{2} n_c m_c c_p l \frac{\partial T}{\partial x} \qquad (۱۵)$$

m_c جرم خوشه می باشد. از نظر ماکروسکوپی این شار می تواند توسط قانون فوریه نیز بیان شود و با معادل قرار دادن این دو معادله, رسانشی که توسط حرکات تصادفی ایجاد می شود بوسیلهٔ رابطهٔ ۱۶ محاسبه میشود :

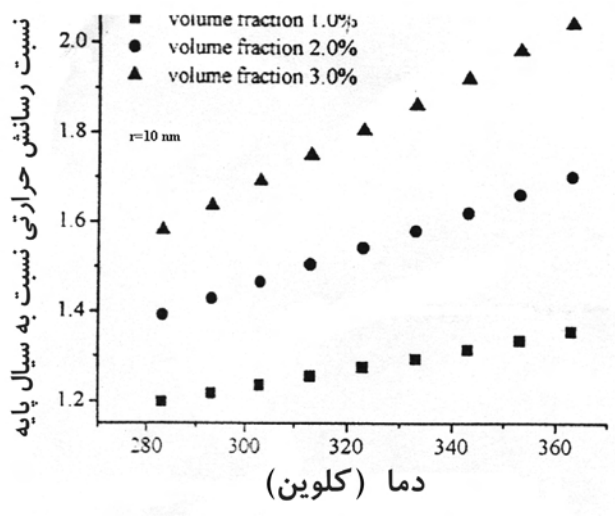
$$k_{eff,f} = 0.5 \rho_p \phi c_p \sqrt{\frac{k_B T}{3\pi r_c \eta}} \qquad (۱۶)$$

φ جزء حجمی , η ویسکوزیته نانوسیال و k_B ثابت بولتزمن می باشد. به این ترتیب با مجموع رسانش بروانی و رسانش گرمایی ماکسول مدلی ارائه شده است که مطابقت خوبی نیز با نتایج تجربی داشت. از نکات دیگری که در این تحقیق به آن پرداخته شده, تغییر شدید رسانش نانوسیال با دما به علت تشدید حرکات براونی و کم شدن لزجت نانوسیال می‌باشد .





1. Agglomerate



شکل۵) : نتایج مدل هیو و لی برای نانو سیال (مس / آب) [۱۶].

۴-۳-۴- تئوری کینگ زونسو:

کینگ زونسو و همکارانش [۱۷]توانستند برای سوسپانسیون هایی که شامل نانوذرات کروی هستند، مدلی را در خصوص ضریب رسانش گرمایی موثر این نانوسیالات ارائه دهند که این مدل بدین صورت است:

$$(1-\frac{\nu}{\alpha})\frac{K_e-K_m}{2K_e+K_m}+\frac{\nu}{\alpha}\frac{\lambda(K_e-K_2)-\alpha(2K_2+K_e)}{\lambda(2K_e+K_2)+2\alpha(K_2-K_e)}=0 \qquad (۲۲)$$

در این مدل، ν جزء حجمی ذره جامد، K_e ضریب رسانش گرمایی موثر نانوسیال، K_m ضریب رسانش گرمایی سیال پایه، K_2 ضریب رسانش گرمایی لایه بین وجهین، K_1 ضریب رسانش گرمایی نانوذره جامد و $\lambda=(2K_2+K_1)/(K_1-K_2)$.

α نیز تابعی از شعاع ذره جامد R و ضخامت لایه بین وجهین t می باشد که دارای رابطه ای بدین شکل است:

$$\alpha=\left(\frac{R}{R+t}\right)^3 \qquad (۲۳)$$

این مدل نه تنها به ضریب رسانش گرمایی ذره جامد و مایع پایه و جزء حجمی ذره، بلکه به اندازه ذره و ویژگی های لایه بین وجهین نیز بستگی دارد. کینگ با استفاده از این مدل، ضریب رسانش گرمایی نانوسیال (آب/ آلومینا) را مورد بررسی قرار داد و نشان داد که ضریب رسانش گرمایی موثر این نانوسیال با کاهش اندازه ذره و افزایش ضخامت لایه بین وجهین به سرعت افزایش می یابد و این امر با پدیده های آزمایشگاهی مطابقت خوبی داشته است. همچنین در این تئوری ، علی رغم تئوری های دیگر (مثلاً مدل ماکسول)، ضریب رسانش گرمایی موثر نانوسیال با جزء حجمی نانوذره، رابطه ای غیرخطی دارد.

۴-۳-۵- تئوری یو و چوی:

از مدل های دیگری که در این مورد ارائه شد، مدل یو و چوی[۱۸] است. آنها بیان کردند که مدل ساختاری نانوسیالات ممکن است شامل مایع بالک، نانو ذره جامد و نانو لایه شبه جامد (همان لایه بین وجهین) باشد که نانولایه شبه جامد مانند یک پل گرمایی بین نانوذره جامد و مایع بالک عمل می کند. این مدل به فرم زیر است:

$$K_{eff,Yu}=K_1\left[\frac{K_P+2K_1+2(K_P-K_1)(1+\beta)^3\nu}{K_P+2K_1-(K_P-K_1)(1+\beta)^3\nu}\right] \qquad (۲۴)$$

که β نسبت ضخامت نانولایه به شعاع ذره اصلی است. در این مدل، تخمین ضریب رسانش گرمایی، هنگامی که قطر ذره کمتر از ۱۰ نانومتر باشد، دارای صحت و دقت بیشتری است.

۵- مقایسه مدلهای ارائه شده :

با وجود اینکه نانوسیال بسیار شبیه سیال تک فازی عمل میکند تا مخلوط متداول (سیال/ جامد)، نانوسیال طبیعتاً دو فازی و گونه ای از مخلوط سیال/ جامد است. بنابراین پرسش مطرح شده این است که چگونه جریان دو فازی را می توان برای توصیف خواص گرمایی نانوسیال بکار برد . معادلات سیالات ماکرو که در آن خواص نانوسیال بکار رفته است افزایش رسانش گرمایی را فقط ناشی از افزایش ضریب رسانش گرمایی نانوذره و سیال حامل و شکل ذره بیان میکند و در نتیجه به دلیل عدم توجه به اندازهٔ ذرات و خواص سطحی و حرکت بروانی و نقشی که در انتقال گرما دارند در پیش بینی ضریب رسانش گرمایی نانو سیال موفق نیستند. نظر به اینکه مدلهای ارائه شده از مدلهای پراگندگی منتج شده اند و با توجه به اینکه علاوه بر افزایش ضریب رسانش گرمایی نقش حرکات تصادفی ذرات بسیار ریز و پراکندگی گرمایی را در رسانش گرمایی در نظر می‌گیرند نسبت به مدلهای ماکرو موفق تر عمل می‌کنند. ولی برای مد نظر قرار دادن عواملی نظیر رسانش فونونی , ابعاد و خواص سطحی دقیق نانو ذره , خلوص نانو ذره در رسانش گرمایی نانو سیالات مختلف نیاز به مطالعات بیشتر در ساختار و نوع نانو ذره می‌باشد.

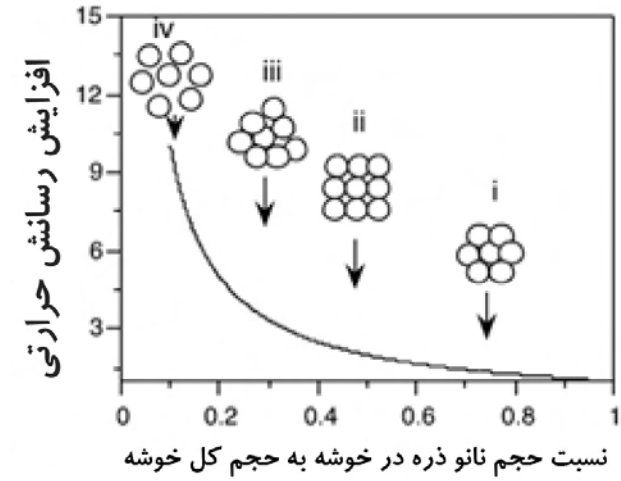
۶- نتیجه گیری :

این مقاله ارائه دهنده پیشرفت های اخیر در تحقیقات روی انتقال گرما نانوسیالات می‌باشد. در این مقاله مدلهای ریاضی موجود در زمینهٔ

داخل ذره الزاماً ثابت خواهد ماند و بدین سان شرایط مرزی یکسانی برای جریان گرما در مایعی که دارای ضریب رسانش گرمایی پایینی است، فراهم می آید. به هر حال اثرات پرتابه ای فونون می تواند منجر به افزایش قابل توجهی در ضریب رسانش گرمایی شود به ویژه اگر فونون های پرتابه ای در یک ذره قرار گیرند، می توانند در داخل مایع مانده و به ذره نزدیکتر دست یابند که در این صورت یک افزایش مهم در ضریب رسانش گرمایی انتظار می رود زیرا مسیر آزاد فونون در مایع بسیارکوتاهتراز این مسیر در ذره است.

۴-۲-۴-تاثیر خوشه شدن نانو ذرات:

در اثر نیروهای جذب واندروالس , نانو ذرات خوشه ای بوجود می آید که در اثر این پدیده محل عبوری با مقاومت گرمایی کمتر برای انتقال گرما بوجود می آید . البته پدیده خوشه شدن از دو جهت هم ممکن است اثر منفی روی نانو سیال داشته باشد . این پدیده با ایجاد توده های بزرگ ممکن است باعث عدم پایای سوسپانسیون شود و همچنین با ایجاد نواحی خالی از ذرات نانو در مایع و بالا رفتن مقاومت گرمایی باعث کاهش انتقال گرما شود.خوشه شدن باعث بالا رفتن درصد حجمی میشود و هر چه در صد حجمی نانو ذره بیشتر باشد افزایش بیشتری در رسانش نانو سیال مشاهده می شود که علت آن هم خوشه های نامتراکم تر و افزایش درصد حجمی مؤثر می‌باشد. درخوشه هایی که آزادتر(شلتر[1]) هستند ذرات بوسیله نانو لایه ای از مایع, احاطه می‌شوند که این لایه تاثیر بسزایی در افزایش رسانش خوشه دارد .



شکل ۳) : اثر خوشه شدن و درصد حجمی مؤثر روی رسانش گرمایی اضافی[۹].

1. loosely

برای تعیین اثر هر یک از مکانیسم ها میتوان از شبیه سازی های مولکولی (مانند مدل دینامیک مولکولی) استفاده کرد. این نظریه ها، مدل های پیچیده ای هستند که بر اساس محاسبه شار انتقال جرم و گرما روی سطح مولکولیِ هر سه فاز جامد , مایع و نانو لایه عمل می کند.

۴-۳-مدلهای ریاضی ارائه شده در زمینهٔ رسانش گرمایی نانوسیال:

۴-۳-۱- تئوری وانگ:

وانگ و همکاران [۱۰] بوسیلهٔ مدل پراکندگی و تابع توزیع ذرات, مدلی را برای پیش بینی رسانش نانو سیال ارائه کرده اند و همچنین با در نظر گرفتن لایهٔ فصل مشترک مدلی را برای نانو ذره کامل بدست آورده اند. آنها نانو سیال دی اکسید سیلیکون را در اندازه ۲۵ نانومتر تشکیل دادند و با بررسی عکس های میکروسکوپ اسکن تونلی[2] دریافتندکه خوشه ها اثر زیادی روی افزایش رسانش دارد . این دانشمندان از یک روش پایا برای اندازه گیری رسانش گرمایی استفاده کردند . این مدل به قرار داده شده در معادله ۷ است.

$$K_{eff,wang} = \frac{(1-\nu)+3\nu\int_0^{\infty}\frac{K_{CL}(r)n(r)}{K_{CL}(r)+2K_1}dr}{(1-\nu)+3\nu\int_0^{\infty}\frac{K_{CL}n(r)}{K_{CL}(r)+2K_1}dr}K_1 \qquad (۷)$$

در این معادله، K_1 ضریب رسانش گرمایی سیال پایه،$K_{cl}(r)$ ضریب رسانش گرمایی توده های ذره و $n(r)$ تابع توزیع شعاعی ذره است. این مدل با داده های آزمایشگاهی در مورد سوسپانسیون نانوذرات اکسید مس با قطر ۵۰ نانو متر در آب دیونیزه شده و جزء حجمی پایین تر از ۲۵٪ برای نانوذرات اکسید مس مطابقت خوبی دارد. همچنین در مورد توده ذرات، نشان داده شده که با ایجاد کردن مسیرهایی با مقاومت گرمایی پایین تر، توده هایی از ذرات تشکیل می شود . از آنجا که داخل چنین توده هایی گرما می تواند بسیار سریع حرکت کند، جزء حجمی فاز رسانشی یعنی ذرات جامد می تواند بطور قابل توجهی ضریب رسانش گرمایی را افزایش دهد که $K_{CL}(r)$در معادله فوق مربوط به همین پدیده است.

2. Scanning Tunnel Microscopic-STM

رســانش گرمایی نانو ســیالات و تفاوت آن با مدلهای ماکرو مورد بررسی و مطالعه قرار گرفت.

نتایج بررســی نشانگر بهبود خواص گرمایی سیالات در صورت استفاده از ذرات نانو در ســاختار آنها اســت که این بهبود بیشترین تاثیر خود را از افزایش رســانش گرمایی به عنوان مهمترین پارامتر نانو سیال می‌گیرد . اکثر مدلهای ارائه شده بر اساس مدلهای ماکرو(مدل ماکسول و همیلتون و کروزر) شکل گرفته که مورد تصحیح قرار گرفته اند. در رابطه با ضریب رسانش گرمایی سوسپانســیون های نانوذرات، در ابتدا تئوری‌هایی ارائه شــدند که این تئوری ها تنها به ضرایب رســانش گرمایی جامد و مایع و جزء حجمی ذرات جامد بستگی داشتند اما مکانیسم ها و مدل هایی که به دنبال آنها مطرح شــدند، بیانگر عدم توانایی این تئوری ها در تحلیل و توجیــه افزایش ضریب رســانش گرمایی در نانوســیالات بودند. در کل افزایش ضریب رســانش گرمایی نانوســیالات به جزء حجمی ذره، اندازه و شکل نانوذرات، نوع ســیال پایه و نانوذرات، مقدار اسیدیته نانوسیالات و نوع پوشــش ذره بســتگی دارد. نتایج حاصل از این تحقیقات اگر بطور مفصل مورد بررسی قرار گیرند، دو راه کار متمایز را ایجاد می‌کنند:

الف- کاربرد مســتقیم ایــن نتایج در فناوری هــای مختلف جهت بهبود بازدهی عملیاتی و کاهش هزینه های بالای این عملیات.

ب- یافتن مکانیســم های صحیح و مناســب و تئوری هایی که می توانند زمینه ساز اســتفاده از این سیالات در فرایند های پیشرفته گردد و همچنین بیانگر عملکرد تجهیز اتی باشند که از این مواد بهره می گیرند .

مراجع:

[1] S.U.S.Choi,"Enhancing thermal conductivity of fluid with nanoparticles ",Developments and application of non Newtonian flow,D.A.siginer and H.P.wang ds.,FED.v.231/ MD.v.66,p99,1995.

[2] Y.Xuan , Q.Li ". Heat transfer enhancement of nanofluids". Int J Heat Fluid Flow ;21:58–64.2000.

[3] S.U.S.Choi , Z.G.Zhang "nanofluid for thermal management" society of autom- otive engineers,LNG,v.01,p.1711,2001.

[4] S.Lee, S.U.S.Choi,s.Li & J.A.Eastman,"measuring thermal conductivityof fluids containing oxide nanoparticle" ,J.Heat Transfer,v.121,p.280,1999.

[5] Ali Beskok , George karniadakis ,"Micro flow and nano flow fundamental and simiulation" publication of the book Elsevier-2003.

[6] X.Wang ,X. Xu,SUS. Choi ."Thermal conductivity of nanoparticle–fluid mixture". J Therm Phys Heat Transfer;13:474–80,1999.

[7] D. J. Jeffrey, Proc. R. Soc. London, ser. A 335 (1973).

[8] R. H. Davis, Int. J. Thermophys. 7 (1986)609.

[9] P. Keblinski P, SR. Phillpot , SUS.Choi , JA.Eastman ." "Mechanisms of heat flow in suspensions of nano-sized particles (nanofluids)". Int J Heat Mass Transfer;45:855–63. 2002.

[10] BX.Wang, LP.Zhou , XF.Peng . "A fractal model for predicting the effective thermal conductivity of liquid with suspension of nanoparticles". Int J Heat Mass Transfer;46:2665–72,2003.

[11] J. Koo, C. Kleinstreuer "A new thermal conductivity model for nanofluids" Journal of Nanoparticle Research 6:577–588,2004.

[12] J. Koo, C. Kleinstreuer, International Journal of Heat and mass transfer 2005; 6, 577.

[13] SP.Jang , SUS.Chio ."Role of Brownian notion in the enhanced thermal conductivity of nanofluid". Appl. Phys. Lett 2004; 84: 43164318 .

[14] JA.Eastman ,SUS. Chio , Yu.Lis, LJ. Thomson . "Anomalously in creased effective thermal conductivities of ethylene glycol-based nanofluids containing copper nanoparticles". Appl phys Lett 2001; 78: 718-720.

[15]SK. Das,N. putra , W.Roetzel. "pool boiling characteristics of nanofluids. International Journal of Heat and Mass transfer" 2003; 46: 851-862.

[16]y.Xuan,q.Li,w.Hu "Aggregation structure and Thermal conductivity of Nanofluids"AICHI j,v49,N4,p1038,2003.

[17] Q.Xue, wen-MeiXu, A model of thermal conductivity of nanofluids with interfacial shells, Journal of material chemistry and physics 2005; 90, 298-301.

[18] w.Yu , SUS.choi ."The role of interfacial layers in the enhanced thermal conductivity of nanofluids: a renovated Maxwell model". J nanoparticle Res 2003; 5: 167-171.