# مروری بر اثر افزودن نانوذرات بر ویژگی ترموفیزیکی سیالات یونی

سمیرا اصل شیرین*

عضو هیئت علمی گروه مهندسی شیمی دانشگاه آزاد اسلامی واحد بروجرد

چکیده

سیالات انتقال حرارت باید دارای پایداری حرارتی بالایی باشند تا بتوان از آنها در دماهای بالا نیز استفاده کرد نانوسیالات یونی دارای خواص منحصر به فردی نسبت به نانوسیالات هستند که باعث شده گزینه بسیار مناسبی برای سیالات انتقال حرارت باشند. در این مقاله مروری بر اثر اضافه کردن نانوذرات بر هدایت حرارتی سیالات یونی انجام شده همچنین مدلهایی که تاکنون برای اندازه گیری ضریب هدایت حرارتی نانوسیالات ارائه شده، مورد بررسی قرار گرفته است. افزایش غلظت نانوذرات باعث افزایش ضریب هدایت حرارتی می شود اثر افزایش دما بر خواص ترموفیزیکی نانوسیالات یونی بررسی شده به طوری که هدایت حرارتی و ظرفیت گرمایی نانوسیال یونی نسبت به سیال یونی پایه، با افزایش دما، افزایش و گرانروی کاهش می‌یابد. در برخی مقالات اثر شکل نانو ذرات را در مقدار هدایت حرارتی بررسی کردند و نشان داده شده است که نانوذرات غیرکروی باعث ایجاد هدایت حرارتی بیشتری در سیال یونی نسبت به ذرات کروی می‌شوند.

**واژه‌های کلیدی:** *نانوسیالات یونی، ضریب هدایت حرارتی، مدل‌های ضریب هدایت حرارتی*

Samira.Asleshirin@gmail.com

## ۱ـ مقدمه

در سال‌هاي اخير، نانوفناوري به يكي از مهمترين زمينه هاي پيشرو در علم فيزيک، شيمي و مهندسي تبديل شده است. ماده نانوساختار به هر ماده اي كه حداقل يكي از ابعاد آن در مقياس نانومتر باشد، گفته مي‌شود. چنين ذراتي داراي نسبت و شدت حرارتي كه به وسيله سطح اين ذرات در داخل سيال منتقل مي‌شود، بسيار زياد است. بيشترين كاربرد نانوسيالات در مبحث انتقال حرارت است، دلايل عمده افزايش انتقال حرارت بوسيله اين ذرات عبارتند از: ذرات معلق به علت كوچكي زياد داراي مساحت سطح زيادي براي انتقال حرارت هستند. ذرات معلق جامد چون نسبت به سيال داراي ضريب هدايت حرارتي بالاتري هستند، باعث افزايش ضريب هدايت حرارتي مي شوند. از طرفي، حركت و جابجايي ذرات نانو ، باعث تلاطم و اختلاط سيال و افزايش انتقال حرارت مي شود. سيالات انتقال حرارت بايد داراي پايداري حرارتي بالايي باشند تا بتوان از آنها در دماهای بالا نیز استفاده کرد[۱] . نانوسیالات یونی به‌تازگی بسیار مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است، دارای ویژگی منحصر به فردی نسبت به نانوسیالات است که باعث شده گزینه بسیار مناسبی برای سیالات انتقال حرارت باشند. ساختار مولکولی سیالات یونی متشکل از کاتیون ها و آنیون های متفاوت است. به‌طور معمول نقش کاتیون را یک ترکیب آلی حجیم اما آنیون‌ها از لحاظ حجم بسیار کوچک تر از کاتیون ها هستند و ساختار آنها معدنی است. به دلیل تفاوت اندازه بین آنیون ها و کاتیون ها، پیوند میان دو جزء تشکیل دهنده مایعات یونی ضعیف است و این ترکیبات در دمای زیر ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد به صورت مایع هستند. سیالات یونی با دمای جوش بالا و فشار بخار پایین، پایداری حرارتی و شیمیایی بالا، سیالاتی مناسب برای انتقال حرارت هستند که می توانند جایگزین سیالات انتقال حرارت کنونی باشند. بر اساس پژوهش‌های انجام شده، افزودن نانوذرات به سیالات یونی باعث بهبود

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۸/۲۰ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۱۰/۲۲ تاریخ چاپ: ۱۳۹۸/۱۱/۲۰

ویژگی حرارتی سیالات یونی می‌شود [۲و۳]. موارد کاربرد نانوسیالات یونی بیشتر در مبدل‌های حرارتی و کلکتورهای خورشیدی است [ ۶-۴] .

## ۲-مروری بر اندازه‌گیری ویژگی ترموفیزیکی نانوسیالات یونی

نوع جدیدتری از سیالات انتقال حرارت، نانوسیالات یونی هستند، بیشترین تحقیقات در این زمینه را Nieto انجام داده است. همچنین، اصطلاح Ionanofluids نخستین بار در سال ۲۰۰۹ توسط Nieto مورد استفاده قرار گرفته است[۷-۹]. در ادامه، برخی از مقالات در این زمینه مورد بررسی قرار گرفته است.

Ribeiro و همکارانش ویژگی حرارتی سیالات یونی با افزودن نانوذرات و بدون حضور نانوذرات را مورد بررسی قرار دادند. ازسیالات یونی $[C_4mim][PF_6]$، $[C_6mim][BF_4]$، $[C_6mim][PF_6]$، $[C_4mim][CF_3SO_3]$، $[C_4mpyrr][(CF_3SO_2)_2N]$ و نانولوله‌های کربنی تک دیواره استفاده شده است. تغییرات دمایی بین ۲۹۳تا ۳۵۳ کلوین و فشار ۰/۱ مگاپاسکال است. برای اندازه گیری ضریب هدایت حرارتی از دستگاه KD2 استفاده شده و برای محاسبه ظرفیت حرارتی از دستگاه DSC استفاده شده است.

آنها نشان دادند افزودن نانوذرات به سیالات یونی هدایت حرارتی را از ۲% تا ۹% و ظرفیت حرارتی را بیشتر از ۸% افزایش می‌دهد [۱۰].

Nieto و همکارانش دو ویژگی ترمودینامیکی مهم ضریب هدایت حرارتی و ظرفیت گرمایی را برای سیالات یونی $[C_4mim][NTf_2]$ و$[C_4mim][Cl]$ به همراه نانولوله های کربنی چنددیواره اندازه‌گیری کردند آنها نشان دادند افزایش غلظت نانولوله‌های کربنی باعث افزایش هدایت حرارتی می‌شود. همچنین، ظرفیت حرارتی با افزودن نانولوله‌های کربنی نسبت به سیالات یونی افزایش کمی می‌یابد، آنها اثر شکل نانوذرات را در مقدار هدایت حرارتی بررسی و نشان دادند نانوذرات غیر کروی هدایت بیشتری نسبت به ذرات کروی دارند[۱۱].

Baogang Wang و همکارانش ویژگی ترمودینامیکی، گرانروی، چگالی نانوسیالات یونی را با افزودن گرافن برای دماهای متوسط تا زیاد مورد بررسی قرار دادند. چون سیالات معمولی مانند آب و اتیلن گلایکول برای دماهای بالا مناسب نیستند از مایعات یونی استفاده کردند زیرا مایعات یونی دارای چگالی بالا، ظرفیت حرارتی بالا و فشاربخار پایین و پایداری بالا برخوردارند، سیالات مناسبی برای انتقال حرارت هستند، از نانو ذرات CNT Cuo Au، $Al_2O_3$ و سیال یونی تترافلورو بورات ([HMIM]BF4) استفاده شده است. برای ایجاد پایداری از اولتراسونیک به تنهایی استفاده شده است. آنها نشان دادند با افزایش درصد گرافن، ضریب هدایت حرارتی افزایش و چگالی کاهش یافته و با افزایش دما چگالی کاهش هدایت حرارتی به صورت خطی افزایش و گرانروی کاهش یافته است. همچنین، کاربرد گرافن در نانوسیالات یونی پایداری حرارتی را مقدار کمی افزایش داده است[۱۲].

Franca و همکارانش ویژگی ترمودینامیکی سیال یونی دی سیانامید شامل۱- اتیل۳- متیل ایمیدازولیم دی سیانامید ($_{C2mim}$[dca])، ۱-بوتیل۱-متیل پیرولیدینیم دی سیانامید $[C_4mpyr][dca]$ به همراه نانولوله‌های کربنی را در گستره بین ۲۹۳ تا ۳۴۳ کلوین مورد بررسی قرار دادند. آنها نشان دادند که افزودن ماده فعال در سطح باعث کاهش پایداری و کاهش هدایت حرارتی نانوسیال یونی می‌شود[۱۳]. تنها از اولتراسونیک برای ایجاد سیال پایدار استفاده کردند[۱۴]. آنها اثر دما بر هدایت حرارتی نانوسیالات یونی را مورد بررسی قرار دادند و بررسی سازوکارهای هدایت حرارتی در نانوسیالات یونی را برای آیندگان پیشنهاد کرده‌اند.

Baogang و همکارانش اثر پارامتهای متفاوت دما، شرایط پراکندگی، اندازه نانوذرات، گرانروی سیال پایه را بر هدایت حرارتی سیال یونی به همراه نانوذرات طلا و سازوکارهای انتقال حرارت را مورد بررسی قرار دادند. نانوسیال یونی را به دو روش تک مرحله‌ای و دو مرحله‌ای تولید کردند. آنها اثر حرکت براونی را پارامتر تاثیرگذار بر افزایش هدایت حرارتی سیالات یونی در حضور نانوذرات دانستند و مدل‌هایی را برای هدایت حرارتی نانوسیالات یونی ارائه دادند[۱۵].

Elise و همکارانش از سیال یونی یک بوتیل ۲و۳ دی متیل ایمیدازولیم بیس تری فلورومتیل سولفونیل ایمید[C4mim][Tf2N] با درصدهای متفاوت وزنی نانو ذرات $ZnO,Al_2O_3,SiO_2,CNT$ و گرافن استفاده کرده است و نشان دادند پایداری حرارتی با افزودن ۱۰% نانوذره بهبود یافته است. نوع نانوذره بر گرانروی نانوسیال یونی تاثیر می‌گذارد. با افزایش دما گرانروی سریع کاهش می‌یابد. دما بر

هدایت حرارتی سیال یونی بدون نانوذره و با گرافن و کربن سیاه تاثیر چندانی ندارد. در نانو لوله‌های کربنی با افزایش دما هدایت حرارتی کاهش می یابد ولی برای نانوذرات$Al_2O_3$ با افزایش دما هدایت افزایش یافته است، هدایت بقیه نانوسیالات یونی تابع ریخت‌شناسی و ساختار شیمیایی آن است. در این پژوهش،از نانوذرات آهن اکسید کره‌ای و میله-ای استفاده شده است[۱۶].

Titan و همکارانش از ۱% وزنی نانوذرات اکسید آلومینیم در سیال یونی [C4mim][NTf2] استفاده کرد و نشان داد افزودن نانوذرات ضریب هدایت حرارتی را ۶% و ظرفیت حرارتی را ۲۳% نسبت به سیال یونی افزایش می‌دهد و بیان می‌کنند نانوسیالات یونی برای کلکتورهای خورشیدی گزینه مناسبی هستند [۱۷].

Franca و همکارانش از نانوسیال یونی با سیال پایه$[C_4mim][(CF_3SO_2)_2N]$و $[C_2mim][EtSO_4]$ با نانولوله‌های کربنی استفاده کردند و هدایت حرارتی مورد سنجش قرار گرفته است. همچنین، نشان داده شد که افزودن آب به این نانوسیال یونی هدایت حرارتی را کاهش می‌دهد.اثر افزایش دما بر هدایت حرارتی این دو نانوسیال یونی بررسی شده است[۱۸]. مدلی که برای محاسبه هدایت حرارتی در این پژوهش، به کار رفته مدلی است که توسط Nieto ارائه شده است [۱۹]. آنها نشان دادند افزودن نانولوله‌های کربنی به دوسیال یونی هدایت حرارتی را ۶ تا ۲۶% نسبت به هدایت حرارتی سیالات یونی بدون ذرات نانو افزایش می‌دهد.

Jian Liu و همکارانش از سیال یونی $HMIM(BF_4)$ و نانوذرات گرافن در دمای ۲۵ تا ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد استفاده کرد. او نشان داد هدایت حرارتی ۱۵ تا ۲۲% نسبت به هدایت حرارتی سیال پایه افزایش یافته است. همچنین، چگالی و ظرفیت حرارتی نسبت به سیال پایه کاهش یافته است و نانوسیالات یونی را سیالاتی مناسب برای کاربرد در کلکتور خورشیدی برشمرده است [۲۰].

Titan و همکارانش نانوسیال یونی N41111-NTF2 و نانوذرات اکسید آلومینیم و کربن سیاه استفاده کردند و اثر شکل نانوذرات (میله‌ای و کره‌ای) را بر ویژگی ترموفیزیکی را مورد بررسی قرار داده است و نشان داد نانوذرات میله‌ای هدایت حرارتی بالاتری را باعث می‌شوند و با افزایش دما،گرانروی نانوسیال یونی به سرعت کاهش می-یابد[۲۱].

Fuxian و همکارانش ازسیال یونی $HMIM(BF_4)$ و نانوذرات گرافن بدون ماده فعال در سطح در دمای ۲۵ تا ۶۵ درجه سانتی گراد استفاده کرد و نشان داد هدایت حرارتی و ظرفیت حرارتی نسبت به سیال پایه افزایش دما، افزایش و گرانروی کاهش می-یابد[۲۲].

Ferreira و همکارانش از چهار سیال یونی متفاوت فسفونیم و نانولوله های کربنی استفاده کردند و نشان دادند با افزایش درصد وزنی نانوذرات هدایت حرارتی افزایش می یابد. همچنین، ظرفیت حرارتی و پایداری حرارتی نانوسیال یونی نسبت به سیال پایه مورد بررسی قرار گرفته است[۲۳].

Titan و همکارانش از درصدهای وزنی متفاوت اکسید آلومینیم (۰/۵، ۱، ۲/۵ درصد) درچهارسیال یونی متفاوت استفاده کرده است. گرانروی، هدایت حرارتی و ظرفیت گرمایی را اندازه‌گیری و با سیال پایه مقایسه کرده است. همچنین، اطلاعات آزمایشگاهی را با مدل‌های متفاوت هدایت حرارتی تطبیق داده و بهترین مدل را بیان داشته است[۲۴].

Hua Xie و همکارانش از نانولوله‌های کربنی در سیال یونی۱-اتیل۳-متیل ایمیدازولیم دی‌اتیل فسفات EMIM(Dep) به همراه آب و بدون حضور ماده فعال در سطح استفاده کرده است و اثر دما، درصدهای متفاوت مولی آب و درصدهای وزنی متفاوت نانوذرات بر ویژگی ترموفیزیکی شامل: هدایت حرارتی، گرانروی، چگالی مورد بررسی قرار داده است و نشان داده که هدایت حرارتی ۱/۳ تا ۹/۷ نسبت به سیال پایه افزایش یافته است و وابستگی هدایت حرارتی به دما خطی است.همچنین، گرانروی و چگالی نانوسیال یونی نسبت به سیال پایه افزایش یافته است[۲۵] .

## ۳-مدل‌های ارائه شده برای ضریب هدایت حرارتی نانوسیالات

مدل‌های ارائه شده برای ضریب هدایت حرارتی نانوسیالات استاتیکی و یا دینامیکی هستند، در مدلهای استاتیکی ذرات ساکن فرض می‌شوند و مدلهای متفاوت دینامیکی برای هدایت حرارتی بر اساس سازوکارهای متفاوت انتقال حرارت در نانوسیالات بیان شده اند این مدل ها عبارتند از:

- حرکت براونی نانوذرات در سیال
- خوشه بندی نانوذرات
- تشکیل لایه‌ای از مایع در اطراف نانوذرات

براساس سازوکارهای بالا، مدلهای تئوری متفاوتی برای محاسبه هدایت حرارتی نانوسیالات پیشنهاد شده است.

**۳-۱-مدل‌های استاتیکی ارائه شده**

Maxwell برای نخستین بار معادله ای را برای اندازه گیری هدایت حرارتی مخلوطهای جامد – مایع با ذرات کروی پیشنهاد کرد:

$$k_{eff} = \frac{k_P + 2k_f + 2(k_P - k_f)\phi}{k_P + 2k_f - (k_P - k_f)\phi} k_f \qquad (۱)$$

در این رابطه kf هدایت حرارتی سیال پایه ، kp هدایت حرارتی ذرات جامد و keff هدایت حرارتی نانوسیال و $\phi$ کسر حجمی ذرات جامد در مخلوط است. در این رابطه تاثیر اندازه و شکل نانوذرات بر هدایت حرارتی لحاظ نشده است[۲۶].

Hamilton و همکارانش اثر شکل نانوذرات را نیز در رابطه لحاظ کردند:

$$k_{eff} = \frac{k_P + (n-1)k_f - (n-1)\phi(k_f - k_P)}{k_P + (n-1)k_1 + \phi(k_f - k_P)} k_f \qquad (۲)$$

در این رابطه n ضریب شکل تجربی و $\psi$ کرویت است.

$$n = \frac{3}{\psi} \qquad (۳)$$

روابط Maxwell و Hamilton برای ذرات با اندازه میلی یا میکرو کاربرد داشت[۲۷].

**۳-۲-مدلهای دینامیکی ارائه شده**

براساس سازوکارهای متفاوت انتقال حرارت مدلهای دینامیکی دیگری آورده شده است، یکی از این سازوکارهای انتقال حرارت در نانوسیالات حرکت براونی نانوذرات است. Bhattacharya و همکارانش با در نظر گرفتن حرکت براونی نانوذرات رابطه زیر را برای هدایت حرارتی موثر نانوسیالات پیشنهاد کرده‌اند[۲۸].

$$k_{eff} = \phi k_P + (1-\phi)k_f \qquad (۴)$$

Jang_Choi و همکارانش علاوه بر حرکت براونی، دما و اندازه ذرات را نیز بر هدایت حرارتی موثر دانسته و رابطه زیر را پیشنهاد کرده‌اند.

$$k_{eff} = k_f(1-\phi) + k_P^*\phi + 3C_1 \frac{d_f}{d_P} k_f \, \mathrm{Re}_d^2 \, \mathrm{Pr}_f \, \phi \qquad (۵)$$

در این رابطه $C_1$ ثابت تناسب، $d_P$ قطر نانوذرات، $\mathrm{Pr}_f$ پرنتل سیال پایه و در $k_P^*$ مقاومت کاپیزا [ ۲۹ ] را نیز لحاظ کرده‌اند[۳۰].

Koo و همکارانش هدایت حرارتی را به دو بخش اثر هدایت استاتیک و اثرحرکت براونی تقسیم کرده و رابطه زیر را پیشنهاد داده‌اند:

$$k_{eff} = k_{static} + k_{Brownian} \qquad (۶)$$

در این رابطه $k_{static}$ را از رابطه Maxwell و $k_{Brownian}$ از رابطه زیر محاسبه شده است:

$$k_{Brownian} = 5\times10^4 \beta\phi\rho_f c_{P,f} \sqrt{\frac{k_B T}{\rho_P d_P} f} \qquad (۷)$$

f تابعیت دمایی دارد که می توان آن را از رابطه (۸) بدست آورد[۳۱]:

$$f = (-134.63 + 1722.3\phi) + (0.4705 - 6.04\phi)T \qquad (۸)$$

سازوکار دیگر، برای هدایت حرارتی خوشه بندی نانوذرات است که براین اساس مدل‌هایی برای هدایت حرارتی موثر نانوسیالات پیشنهاد شده است.

Prasher و همکارانش مدل زیر را ارائه کردند:

$$\frac{k_{eff}}{k_f} = \frac{(k_{cl} + 2k_f) + 2\phi_{cl}(k_{cl} - k_f)}{(k_{cl} + 2k_f) - \phi_{cl}(k_{cl} - k_f)} \qquad (۹)$$

که در این مدل $k_{cl}$ هدایت حرارتی خوشه و $\phi_{cl}$ کسر حجمی خوشه‌ها است[۳۲]. Evans و همکارانش در یک شبیه‌سازی و مقایسه با نتایج تئوری بیان کردند که هر چه اندازه خوشه ها بزرگتر شود هدایت حرارتی افزایش می‌یابد[۳۳].

Xuan و همکارانش اثر همزمان دو سازوکار حرکت براونی و خوشه‌بندی را بر هدایت حرارتی در روابط لحاظ کرده‌اند.

$$\frac{k_{eff}}{k_f} = \frac{k_P + 2k_f - 2\phi(k_f - k_P)}{k_P + 2k_f + \phi(k_f - k_P)} + \frac{\rho_P \phi c_{P,P}}{2k_f} \sqrt{\frac{k_B T}{3\pi r_{cl} \mu_f}} \qquad (۱۰)$$

که $r_{cl}$ شعاع خوشه های نانوذرات است. ترم اول سمت چپ، رابطه Maxwell برای ضریب هدایت حرارتی و جمله دوم اثر حرکات تصادفی نانوذرات است. تاثیر جمله دوم در رابطه بالا با در نظر گرفتن تشکیل خوشه ها کاهش می‌یابد[۳۴].

سازوکار دیگر تشکیل لایه ای از مایع در اطراف نانوذرات است[۳۵]. Yu و همکارانش اثر تشکیل لایه مایع در اطراف نانوذرات را در مدل پیشنهادی خود لحاظ کرده‌اند:[۳۶]

$$k_{eff} = \frac{k_{Pe} + 2k_f + 2(k_{Pe} - k_f)(1+\beta)^3\phi}{k_{Pe} + 2k_f - (k_{Pe} - k_f)(1+\beta)^3\phi} k_f \qquad (۱۱)$$

$$\beta = \frac{t}{r_P} \qquad (۱۲)$$

$$\gamma = \frac{k_1}{k_P} \qquad (۱۳)$$

که $k_{Pe}$ از رابطه (۱۴) تعیین می‌شود. $k_l$ هدایت حرارتی نانولایه مایع، t ضخامت نانولایه و $r_P$ شعاع نانوذرات است.

$$k_{Pe} = \frac{[2(1-\gamma)+(1+\beta)^3(1+2\gamma)]\gamma}{-(1-\gamma)+(1+\beta)^3(1+2\gamma)} k_P \qquad (۱۴)$$

Feng و همکارانش اثر تشکیل خوشه‌ها و تشکیل لایه مایع اطراف نانوذرات بر هدایت حرارتی را در رابطه هدایت حرارتی لحاظ کردند و (۱۵) را برای محاسبه هدایت حرارتی برحسب کسری از ذراتی که تشکیل خوشه داده‌اند و ذراتی که خوشه‌ای نشده‌اند، ارائه دادند:[۳۷]

$$k_{eff} = \phi_e k_{agg} + (1-\phi_e) k_{non-agg} \qquad (۱۵)$$

$$k_{agg} = \left[\left(1-\frac{3}{2}\phi_e\right)k_m + \frac{3k_m\phi_e}{\beta}\left[\frac{1}{\beta}\ln\frac{1}{1-\beta}-1\right]\right] \qquad (۱۶)$$

در این رابطه $\beta = 1-\frac{k_m}{k_{pe}}$ است و $k_{non-agg}$ از رابطه (۱۱) تعیین می شود.

Xie و همکارانش نیز مدلی را برای هدایت حرارتی نانوسیالات با درنظر گرفتن اثر تشکیل لایه اطراف نانوذرات ارائه دادند:[۳۸]

$$k_{eff} = k_m + 3\theta\phi_e k_m + \frac{3\theta^2\phi_e^2}{1-\theta\phi_e} k_m \qquad (۱۷)$$

که در این رابطه $\theta, \phi_e$ و $k_l$ به صورت روابط (۱۸) و (۱۹) تعریف می‌شوند:

$$\theta = \frac{\left(\frac{k_l-k_m}{k_l+2k_m}\right)\left[(1+\delta)^3 - \frac{\frac{k_p-k_l}{k_p+2k_l}}{\frac{k_m-k_l}{k_m+2k_l}}\right]}{(1+\delta)^3 + 2\left(\frac{k_l-k_m}{k_l+2k_m}\right)\frac{k_p-k_l}{k_p+2k_l}}, \phi_e = \phi(1+\delta)^3 \qquad (۱۸)$$

$$k_l = \frac{k_m\left[\frac{k_p}{k_m}(1+\delta)-1\right]}{\left\{\left[\frac{k_p}{k_m}(1+\delta)-1\right]-\delta\right\}\ln\left\{1+\left[\frac{k_p}{k_m}(1+\delta)-1\right]\right\}+\delta\left[\frac{k_p}{k_m}(1+\delta)-1\right]} \qquad (۱۹)$$

Li Ch و همکارانش اثر هر سه سازوکار به طور همزمان(حرکت براونی، خوشه بندی و تشکیل لایه اطراف نانوذرات) را در مدل خود لحاظ کرده‌اند:

$$k_P = \frac{(\frac{3r^*}{4})}{(\frac{3r^*}{4}+1)} k_b \qquad (۲۰)$$

که در این رابطه $k_b$ هدایت حرارتی مواد در توده سیال و $r^* = \frac{r_p}{\lambda}$ که $\lambda$ پویش آزاد متوسط است و از رابطه

$$\lambda = \frac{10aT_m}{\gamma T} \qquad (۲۱)$$

محاسبه می شود. a و $\gamma$ ثابت هستند و Tm دمای ذوب جامد است [۳۹].

## ۴-نتیجه گیری

به‌تازگی، نانوسیالات یونی به‌عنوان سیالات انتقال حرارت بسیار مورد توجه قرار گرفته اند، در این مقاله مروری بر اثر افزودن نانوذرات بر ویژگی ترموفیزیکی سیالات یونی بررسی شده و اثرشکل نانوذرات، دما، کسر حجمی نانوذرات بر هدایت حرارتی نانوسیالات یونی مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین، مدلهایی که تاکنون برای اندازه گیری ضریب هدایت حرارتی نانوسیالات ارائه شده است، مورد بررسی قرار گرفته‌اند.

## ۵-منابع


[1] Choi SUS. Developments and applications of Non-Newtonian flows. ASME FED; 66: 99-105(1995).

[2] H. Chen, Y. He, J. Zhu, H. Alias, Y. Ding, P. Nancarrow, C. Hardacre, D. Rooney, C.Tan, Rheological and heat transfer behaviour of the ionic liquid [C4mim] [NTf2], Int. J. Heat Fluid Flow 29 149–155, (2008).

[3] A.P. Froba, M.H. Rausch, K. Krzeminski, D. Assenbaum, P. Wasserscheid, A.Leipertz, Thermal conductivity of ionic liquids: measurement and prediction,Int. J. Thermophys. 31 2059–2077, (2010).

[4] K.Y.Leong a,n, HwaiChyuanOng b, N.H.Amer a, M.J.Norazrina c, M.S.Risby a, K.Z. KuAhmad, An overview on current

capacity of carbon nanotubes ionanofluids, International Journal of Thermal Sciences 62, 34-39, (2012).

[13] J. M. P. Franc¸a, S. I. C. Vieira, M. J. V. Lourenc¸o, Thermal Conductivity of [C4mim][$(CF_3SO_2)_2N$] and [C2mim][EtSO4] and Their IoNanofluids with Carbon Nanotubes: Experiment and Theory,journal of chemical &engineering data,14, 78-85, (2013)

[14] S.M.S. Murshed, C.A. Nieto de Castro, M.J.V Lourenço, J. Nanofluids, 1 ,175–179, (2012).

[15] Baogang Wang , Xiaobo Wang , Wenjing Lou, Ionic liquid-based stable nanofluids containing gold nanoparticles, Journal of Colloid and Interface Science 362, 5–14, (2011).

[16] Elise B. Fox, Ann E. Visser, Nicholas J. Bridges, Thermophysical Properties of Nanoparticle-Enhanced Ionic Liquids (NEILs) Heat-Transfer Fluids, Energy Fuel, 47, 85-96, (2013).

[17] Titan C.Paul,AKM Morshed, Nanoparticle enhanced ionic liquids(NEILS)as working fluid for the next generation solar collector, Procedia Engineering 56, 631 – 636, ( 2013 ).

[18] J.M.P. França , F. Reis , S.I.C. Vieira, Thermophysical properties of ionic liquid dicyanamide (DCA) nanosystems, J. Chem. Thermodynamics 79, 248–257, (2014).

[19] Nieto de Castro, C. A.; Lourenc¸o, M. J. V.; Ribeiro, A. P. C.; Langa, E.; Vieira, S. I. C. Thermal Properties of Ionic Liquids and IoNanofluids of Imidazolinium and Pyrrolinium Liquids. J. Chem. Eng.Data 55, 653-661, (2010).

[20] Jian Liu, Fuxian Wang, Long Zhang, Xiaoming Fang, Zhengguo Zhang; Thermodynamic properties and thermal stability of ionic liquid-based nanofluids containing graphene as advanced heat transfer fluids for medium-to-high-temperature applications. Renewable Energy 63, 519-523, (2014)

application of nanofluids in solar thermal collector and itschallenges, RenewableandSustainableEnergyReviews53,1092–1105,(2016).

[5] AanalysisMeseret Amdea,b, Zhi-Qiang Tana, Rui Liua, Jing-Fu Liu, Nanofluid of zinc oxide nanoparticles in ionic liquid for single dropliquid microextraction of fungicides in environmental waters prior tohigh performance liquid chromatographic analysis, Journal of Chromatography A(2015).

[6] Titan C. Paula, A.K.M. M. Morshedb, Jamil A. Khan, Effect of nanoparticle dispersion on thermophysical properties of ionic liquids for its potential application in solar collector, Procedia Engineering 90, 643 – 648, (2014 )

[7] A.P.C. Ribeiro, M.J.V. Lourenço, C.A. Nieto de Castro, Thermal conductivity of ionanofluids, 7th Symp. Thermophysical Properties, Boulder, USA,6, 21–26. (2009).

[8] C.A. Nieto de Castro, M.J.V. Lourenco, A.P.C. Ribeiro, E. Langa, S.I.C. Vieira, Thermal properties of ionic liquids and ionanofluids of imidazolium and pyrrolidinium liquids, J. Chem. Eng. Data 55 (2), 653–661, (2010).

[9] C.A. Nieto de Castro, S.M.S. Murshed,M.J.V. Lourenço, F.J.V. Santos, M.L.M. Lopes, Enhanced thermal conductivity and specific heat capacity of carbon nanotubes ionanofluids, Int. J. Therm. Sci. 62, 34–39, (2012).

[10] A.P.C. Ribeiro, S. I. C. Vieira, J. M. França, C. S. Queirós, E. Langa, Thermal Properties of Ionic Liquids and Ionanofluids,78,120-128, (2010).

[11] C.A. Nieto de Castro*, S.M.S. Murshed, M.J.V. Lourenço, Enhanced thermal conductivity and specific heat capacity of carbon nanotubes ionanofluids, International Journal of Thermal Sciences 62, 34-39, (2012).

[12] C.A. Nieto de Castro*, S.M.S. Murshed, M.J.V. Lourenço, Enhanced thermal conductivity and specific heat

[21] Titan C. Paula, A.K.M. M. Morshedb, Jamil A. Khana, Effect of nanoparticle dispersion on thermophysical properties of ionic liquids for its potential application in solar collector, Procedia Engineering ,90 643 – 648, (2014 ).
[22] Fuxian Wang1, Lijuan Han1, Zhengguo Zhang1*, Xiaoming Fang1, Surfactant-free ionic liquid-based nanofluids with remarkable thermal conductivity enhancement atvery low loading of graphene, Nanoscale Research Letters 7, 314-320, (2012).
[23] A.G.M. Ferreira, P.N. Simões, A.F. Ferreira, M.A. Fonseca, M.S.A. Oliveira, A. Trino, Transport and thermal properties of quaternary phosphonium ionic liquids and IoNanofluids, J. Chem. Thermodynamics. (2013)
[24] Titan C. Paul a, A.K.M.M. Morshed b, Elise B. Fox c, Jamil A. Khan, Enhanced thermophysical properties of NEILs as heat transfer fluids for solar thermal application, Applied Thermal Engineering 110, 1–9, (2017).
[25] Hua Xie,Zongchang Zhao,Jianhua Zhao,Measurment of thermal conductivity ,viscosity and density of ionic liquid[EMIM][DEP]-based nanofluids,Chinese journal of chemical engineering 24, 331-338, (2016).
[26] Maxwell JC , A treatise on electricity and magnetism. Clarendon Press, Oxford, (1873).
[27] Hamilton RL, Crosser OK , Thermal conductivity of heterogeneous two-component systems. Ind Eng Chem 1,187–191,(1962).
[28] Bhattacharya P, Saha SK, Yadav A, Phelan PE, Prasher RS ,Brownian dynamics simulation to determine the effective thermal conductivity of nanofluids. J Appl Phys 95, 6492–6494, (2004).
[29] Einstein A ,Investigation on the theory of Brownian movement. Dover, New York, (1956).
[30] Jang SP, Choi SUS ,Role of Brownian motion in the enhanced thermal conductivity of nanofluids. Appl Phys Lett 84,4316–4318,(2004).
[31] Koo J, Kleinstreuer C, A new thermal conductivity model for nanofluids. J Nanopart Res 6, 577–588, (2004).
[32] Prasher R, Phelan PE, Bhattacharya P ,Effect of aggregation kinetics on the thermal conductivity of nanoscale colloidal solutions (nanofluid). Nano Lett 6, 1529–1534, (2006).
[33] Evans W, Prasher R, Fish J, Meakin P, Phelan P, Keblinski P ,Effect of aggregation and interfacial thermal resistance on thermal conductivity of nanocomposites and colloidal nanofluids. Int J Heat Mass Transf 51, 1431–1438,(2008).
[34] Xuan Y, Li Q, Hu W ,Aggregation structure and thermal conductivity of nanofluids. AIChE J 49, 1038–1043, (2003).
[35] Yu C-J, Richter AG, Datta A, Durbin MK, Dutta P ,Observation of molecular layering in thin liquid films using Xray reflectivity. Phys Rev Lett 82, 2326–2329, (1999).
[36] Y. Feng, B. Yu, P. Xu, M. Zou, The effective thermal conductivity of nanofluids based on the nanolayer and the aggregation of nanoparticles, Journal of Physics D: Applied Physics 40, 3164-3171, (2007).
[37] Yu W, Choi SUS, The role of interfacial layers in the enhanced thermal conductivity of nanofluids: a renovated Hamilton– Crosser model. J Nanopart Res 6, 355–361,(2004).
[38] H. Xie, M. Fujii, X. Zhang, Effect of interfacial nanolayer on the effective thermal conductivity of nanoparticle-fluid mixture, Int. Journal of Heat and Mass Transfer 48, 2926-2932, (2005).
[39] Li CH, Williams W, Buongiorno J, Hu LW, Peterson GP, Transient and steady-state experimental comparison study of effective thermal conductivity of

$Al_2O_3$/water nanofluids. J Heat Transf 130, 86-98, (2008).