

محاسبه ضریب هدایت حرارتی نانو سیال آب و TiO_2 با مدل های مختلف

سید مهدی سجادی^۱، اکرم توکلی^{۲*}

۱- دانشجوی دکتری مهندسی شیمی، دانشگاه صنعتی سهند

۲- دانشیار مهندسی شیمی، دانشگاه صنعتی سهند

پیام‌نگار: a.tavakoli@sut.ac.ir

چکیده

هدایت حرارتی یکی از خواص ماده و بیان‌گر توانایی ماده در هدایت گرما است. به معنای دیگر، هدایت حرارتی اندازه‌گیری تمایل طبیعی ماده به پراکندگی انرژی در زمانی است که در اثر تحمیل یک گرادیان دمایی، حالت تعادل مختل می‌شود؛ لذا نقش چشم‌گیری در مسائل انتقال حرارت دارد. یکی از راهکارهای ارتقای هدایت حرارتی سیال، استفاده از نانوسیالات می‌باشد. به علت کاربردهای گسترده مواد نانومقیاس، در کاربردهای حرارتی و اهمیت تعیین هدایت حرارتی نانوسیالات، در این تحقیق به بررسی یازده مدل برای پیش‌بینی هدایت حرارتی نانوسیالات (سیستم حاوی آب و نانوذرات TiO_2) و مقایسه نتایج محاسبات با نتایج آزمایشگاهی موجود در مقالات پرداخته شده است. بر این اساس، مشخص شد که نسبت ضریب هدایت حرارتی مؤثر (ضریب هدایت حرارتی مخلوط سیال پایه و نانو ذره) به ضریب هدایت حرارتی سیال پایه (k_{eff}/k_f) در حالتی که مقدار حجمی نانوذره توزیع شده در سیال پایه در حدود ۱ الی ۳ درصد حجمی باشد، در محدوده ۱/۰۱ تا ۱/۱ می‌باشد، به عبارت دیگر، افزودن نانوذره در محدوده ۱ الی ۳ درصد حجمی، این توانایی را دارد که نسبت k_{eff}/k_f را تا ۱/۱ (یا ۱۰ درصد) ارتقا دهد و توانایی هدایت حرارتی مجموعه سیال پایه و نانوذره در مقایسه با سیال پایه تا ۱۰ درصد افزایش یابد. هم‌چنین افزایش قطر نانوذرات میزان بهبود ضریب هدایت حرارتی را کاهش می‌دهد.

تاریخ دریافت: ۹۷/۰۷/۲۸

تاریخ پذیرش: ۹۸/۰۹/۱۵

شماره صفحات: ۲۲ تا ۳۰

کلیدواژه‌ها: انتقال حرارت،

مدل‌سازی هدایت حرارتی،

نانوسیال، نانوذره

۱. مقدمه

جامدات معمولاً بیشتر از سیالات می‌باشد، سعی نمودند با معلق نمودن ذرات جامد با اندازه میکرو و یا بزرگتر در سیال مرجع، هدایت حرارتی را افزایش دهند. علی‌رغم تلاش‌های انجام شده، به دلیل اندازه بزرگ و چگالی بالای ذرات جامد، روش مناسبی برای حفظ آویزش (سوسپانسیون) و جلوگیری از ته‌نشینی ذرات یافت

انتقال حرارت جابه‌جایی را می‌توان به صورت مؤثری با تغییر هندسه جریان، شرایط مرزی و یا با ارتقادادن هدایت حرارتی سیال بهبود داد. هم‌چنین تعدادی از پژوهشگران بر این اساس که هدایت حرارتی

* تبریز، دانشگاه صنعتی سهند، دانشکده مهندسی شیمی

نانوسیالات توسط بسیاری از پژوهشگران توصیه شده است [۳-۵]. علاوه بر این، استفاده از سیالات پایه ترکیبی به عنوان یک زمینه تحقیقاتی جدید، مورد توجه قرار گرفته است. براساس پژوهش‌های انجام شده، مشخص شده است که دمای محیط در مقایسه با غلظت نانوذرات تأثیر کمتری بر ضریب هدایت حرارتی نانو سیال دارد، ولی دما نیز مؤلفه مهمی است که منجر به بهبود ضریب هدایت حرارتی نانو سیالات می‌شود؛ با توجه به این که کلوخه شدن (اگلومره شدن) منجر به از دست رفتن مزیت استفاده از نانو سیالات می‌شود. بنابراین، استفاده از سورفاکتانت مناسب و امواج اولتراسوند می‌تواند منجر به بهبود رفتار توزیع نانوذرات شده و تأثیر مثبتی بر ضریب هدایت حرارتی نانو سیالات داشته باشد. مشخص شده است که ضریب هدایت حرارتی با افزایش مقدار pH تا حد مشخص (۸-۹/۵)، افزایش می‌یابد ولی در مقادیر بالاتر از آن، pH تأثیر منفی بر ضریب هدایت حرارتی دارد [۳ و ۷-۵]. نانو سیالات با نانوذرات فلزی و یا نانوذرات اکسیدی توسط پژوهشگران متعددی هم چون [۱] چوی، داس^۲ و همکاران [۸]، خوان^۳ و همکاران [۹]، ایستمن^۴ و همکاران [۱۰ و ۱۱] و لی^۵ و همکاران [۱۲] مورد بررسی قرار گرفته‌اند. آن‌ها دریافتند که افزودن کسر حجمی ۵-۱۰٪ می‌تواند منجر به افزایش قابل توجه ضریب هدایت حرارتی شود. در پژوهش‌های مختلف، از نانوذرات مختلفی هم چون Al_2O_3 ، ZnO ، TiO_2 ، Fe و SiO_2 و دیگر نانوذرات و سیال‌های پایه مختلف هم چون آب، اتانول، تولوئن و سیالات پایه دیگر استفاده شده است. در این مقاله به بررسی تعدادی از مدل‌های مورد استفاده برای پیش‌بینی ضریب هدایت حرارتی نانو سیال (مخلوط TiO_2 و آب) و مقایسه نتایج این محاسبات با تعدادی از نتایج آزمایشگاهی موجود در مقالات پرداخته خواهد شد.

۲. معادلات و مدل‌های محاسبه ضریب هدایت حرارتی در نانو سیال‌ها

به مخلوطی از ذرات نانوفلزی یا غیرفلزی که در یک سیال پایه معلق شده باشند، نانو سیال اطلاق می‌شود. نانوذرات معلق باعث می‌شوند که خواص انتقالی سیال کاملاً تغییر کند و انتقال حرارت به طور قابل ملاحظه‌ای بهبود یابد. به دلیل این خواص ویژه، نانو سیال‌ها کاربرد

نشد؛ در نتیجه به دلیل عدم تعادل چنین آویزش‌هایی، مقاومت سیال در برابر انتقال حرارت تشدید می‌شود. به سیالاتی با نانوذرات معلق در آن‌ها، نانو سیال گفته می‌شود که این واژه اولین بار در سال ۱۹۹۵ توسط چوی^۱ ابداع شد [۱]. سیال پایه که نانو ذرات در آن توزیع می‌شوند عمدتاً آب است. نانو سیالات را می‌توان به عنوان نسل جدید سیالات هادی حرارت در نظر گرفت که در مقایسه با سیالات متداول فرصت‌های بسیار جالب توجهی را به منظور بهبود انتقال حرارت ارائه می‌کنند.

از مزایای نانو سیالات می‌توان به موارد زیر اشاره نمود: (۱) بهبود پایداری در مقایسه با سیالات حاوی ذراتی با ابعاد میکرومتر و یا میلی‌متر. (۲) قابلیت هدایت حرارتی بیشتر در مقایسه با سیالات پایه. نانو سیالات کاربردهای زیادی در حوزه‌های مهمی هم چون الکترونیک، حمل و نقل، پزشکی، گرمایش، تهویه و تهویه مطبوع دارند؛ لذا به منظور بهره‌برداری از مزایای بالقوه و کاربردی آن‌ها، نیاز به درک اساسی از نحوه انتقال حرارت در نانو سیالات وجود دارد [۲]. با توجه به این سهم قابل توجه نانو سیالات در حیطه‌های مختلف علمی، می‌توان دریافت که مؤلفه اصلی تأثیرگذار بر خواص انتقال حرارت نانو سیال عبارتند از: غلظت نانوذرات، اندازه نانوذرات، شکل نانوذرات، ضریب هدایت حرارتی نانوذرات، نوع سیال پایه، دمای نانو سیال و روش آماده‌سازی نانوذرات. مؤلفه کلیدی که تأثیر بسیار مهمی بر ضریب هدایت حرارتی نانو سیال دارد، غلظت نانوذرات می‌باشد. در اکثر مراجع به رابطه مستقیم مابین ضریب هدایت حرارتی نانو سیال و غلظت نانوذرات اشاره شده است [۳]. با این حال، ارتقای ضریب هدایت حرارتی با افزایش غلظت نانوذرات تا مقادیر معینی از غلظت برقرار است و افزایش بیش از حد غلظت نانوذرات می‌تواند تأثیر منفی بر ضریب هدایت حرارتی داشته باشد [۳]. بر اساس مراجع در ارتباط با اندازه ذرات مشخص شده است که رابطه معکوسی مابین پیشرفت ضریب هدایت حرارتی و اندازه ذرات کروی وجود دارد؛ در حالی که ذرات استوانه‌ای شکل بزرگتر می‌توانند بیشتر از ذرات کروی کوچکتر، ضریب هدایت حرارتی را ارتقا دهند. هم چنین مشخص شده که نانولوله‌ها می‌توانند ضریب هدایت حرارتی را بیشتر از نانوذرات کروی ارتقا دهند، در حالی که فولرن‌ها توانایی ارتقا کمتری دارند. انتخاب ذرات با ضریب هدایت حرارتی بالاتر، هم چون ذرات فلزی، به منظور افزایش ضریب هدایت حرارتی

2. Das
3. Xuan
4. Eastman
5. Lee

1. Choi

که نانو ذرات Al_2O_3 بوده، نشان داده است [۱۲]. در مدل دیگری که توسط یو^۴ و چوی برای محاسبه k_{eff} ارائه شد (رابطه (۳)) β نسبت ضخامت نانولایه به شعاع ذره است. عموماً این ثابت، ۰/۱ در نظر گرفته می‌شود [۱۶ و ۱۷]. در جدول (۱) مدل‌های مختلفی که برای هدایت حرارتی نانوسیالات معرفی شده‌اند، ارائه شده است.

لازم به ذکر است که ثابت‌های a و b در مدل لو-لین^۵ به ترتیب برابر ۳ و $4/51$ می‌باشند [۱۸]. با توجه به منحنی ارائه شده در مقاله داویس^۶ مقدار f بر اساس نسبت هدایت حرارتی نانوذره به هدایت حرارتی سیال پایه تغییر می‌کند. برای مثال، این مقدار برای سیستم حاوی آب و TiO_2 در دمای $25^\circ C$ تقریباً $0/45$ می‌باشد [۱۹]. در مدل‌های مذکور، مؤلفه مشخصی که تأثیر اندازه نانوذرات را بر میزان بهبود هدایت حرارتی اعمال نماید، در نظر گرفته نشده بود؛ لذا در این قسمت به بررسی مدل‌هایی پرداخته می‌شود، که در ساختار آن‌ها قطر ذرات به صورت یک عامل مشخص لحاظ شده است.

در فرمول معرفی شده توسط سورسیون^۷ و همکارانش، هدایت حرارتی نانوسیال به صورت تابعی از اندازه متوسط ذرات، دمای سیال، جزء حجمی، عدد رینولدز و هدایت حرارتی سیال و نانوذره (رابطه (۱۰)) ارائه شده است. T_{ff} در رابطه (۱۰)، نقطه انجماد سیال پایه است که برای آب در حدود $273/15$ کلوین می‌باشد، k_B نشان دهنده ثابت بولتزمن، d_p قطر متوسط ذرات و μ_f گرانشی (ویسکوزیته) سیال پایه (عمدتاً آب) است [۲۰ و ۲۱].

مدل دیگری که به پیش‌بینی هدایت حرارتی در نانوسیالات با در نظر گرفتن قطر آن‌ها می‌پردازد، روش خوی^۸ و خو^۹ [۲۷] می‌باشد. این روش غیرصریح (رابطه (۱۱)- الف) علاوه بر در نظر گرفتن اندازه ذرات، هدایت حرارتی لایه مابین ذره و سیال پایه را نیز لحاظ می‌نماید. مقدار هدایت حرارتی بین سطحی (k_L) از طریق رابطه ارائه شده توسط خوی^{۱۰} و همکارانش [۲۸] (رابطه (۱۱)- ب) محاسبه شده است. در روابط زیر δ نشان دهنده ضخامت نانولایه است، هم‌چنین γ برابر با نسبت ضخامت نانولایه به شعاع ذره (r_p) است.

گسترده‌ای در انتقال حرارت دارند. مهم‌ترین کاربرد آن‌ها به عنوان خنک کننده است. سه عاملی که باعث می‌شود تا نانوسیال‌ها خنک‌کننده‌های مناسبی باشند، عبارتند از: بالا بودن هدایت حرارتی، بالا بودن انتقال حرارت در یک فاز و بالا بودن شار حرارتی بحرانی. برای اندازه‌گیری ضریب هدایت گرمایی نانوسیالات، مدل‌های متعددی ارائه شده که یکی از روش‌های متداول، در نظر گرفتن سیال به صورت تک‌فازی است. از آن جایی که نانوسیال‌های مورد استفاده برای انتقال حرارت، بسیار رقیق هستند و ذرات جامد نیز فوق ریز هستند (کوچکتر از ۱۰۰ نانومتر) به راحتی سیال می‌شوند، بنابراین به طور تقریبی می‌توان آن‌ها را به عنوان سیال در نظر گرفت. راه حل بعدی در نظر گرفتن نانوسیالات به صورت مخلوط‌های دوتایی با ذرات درشت‌تر در ابعاد میکرومتر و میلی‌متر است که در آن‌ها هدایت گرمایی سوسپانسیون فقط به درصد حجمی و شکل نانوذرات بستگی دارد و مستقل از اندازه و توزیع ذرات است. یکی از روابط ارائه شده برای محاسبه هدایت مؤثر، رابطه ماکسول^۱ است [۱۳ و ۱۴]:

$$k_{eff} = \frac{k_p + 2k_f + 2(k_p - k_f)\phi}{k_p + 2k_f - (k_p - k_f)\phi} k_f \quad (1)$$

در این رابطه k_p ، k_f و k_{eff} به ترتیب هدایت سیال پایه، ذرات کروی شکل و نانوسیال و ϕ درصد حجمی هستند. مدل مشهور دیگری که برای هدایت حرارتی نانوسیالات به کار می‌رود، هامیلتون^۲ و کروسر^۳ می‌باشد که به صورت زیر ارائه شده است [۱۵]:

$$\frac{k_{eff}}{k_f} = \frac{k_p + (n-1)k_f - (n-1)\phi(k_f - k_p)}{k_p + (n-1)k_f + \phi(k_f - k_p)} \quad 0.5 < n < 6 \quad n = 3/\psi \quad (2)$$

در رابطه فوق، n عامل شکل تجربی بوده و ψ در ارتباط با کرویت بوده و انحراف از کروی بودن را به صورت نسبت سطح کره هم حجم با ذره به سطح ذره در نظر می‌گیرد. برای ذرات کروی $\psi = 1$ و برای ذرات استوانه‌ای $\psi = 0/5$ می‌باشد [۱۵]. لی و همکارانش اعلام کرده‌اند که ذرات کروی ($\psi = 1$) تطابق خوبی را با آزمایش‌های آن‌ها

1. Maxwell
2. Hamilton
3. Crosser

4. Yu
5. Lu-Lin
6. Davis
7. Corcione
8. Xue
9. Xu
10. Xei

جدول ۱. تغییرات مدل‌های ارائه شده برای محاسبه هدایت حرارتی نانوسیالات.

مدل ارائه شده	مدل	مرجع	رابطه
$k_{eff} = \frac{k_p + 2k_f + 2(k_p - k_f)(1 + \beta)^3 \varphi}{k_p + 2k_f - (k_p - k_f)(1 + \beta)^3 \varphi} k_f$	یو و چوی	[۱۶ و ۱۷]	(۳)
$k_{eff} = \frac{1}{4} [(3\varphi - 1)k_p + (2 - 3\varphi)k_f] + \frac{k_f}{4} \sqrt{\Delta}$ $\Delta = (U_1 + U_2) * U_3$ $U_1 = (3\varphi - 1)^2 \left(\frac{k_p}{k_f} \right)^2 + (2 - 3\varphi)^2$ $U_2 = 2(2 + 9\varphi - 9\varphi^2) \left(\frac{k_p}{k_f} \right)$ $U_3 = \frac{k_p + 2k_f + 2(k_p - k_f)\varphi}{k_p + 2k_f - (k_p - k_f)\varphi} k_f$	براگمن ^۱	[۲۲]	(۴)
$k_{eff} = \frac{k_p + 2k_f - 2(k_f - k_p)\varphi}{k_p + 2k_f + (k_f - k_p)\varphi} k_f$	واسپ ^۲	[۲۳]	(۵)
$\frac{k_{eff}}{k_f} = 1 + 3 \left(\frac{k_p/k_f - 1}{k_p/k_f + 2} \right) \varphi + (U_4 + U_5)(U_6)$ $U_4 = 3 \left(\frac{k_p/k_f - 1}{k_p/k_f + 2} \right)^2 + \frac{3}{4} \left(\frac{k_p/k_f - 1}{k_p/k_f + 2} \right)^2$ $U_5 = \frac{9}{16} \left(\frac{k_p/k_f - 1}{k_p/k_f + 2} \right)^3 * \left(\frac{k_p/k_f + 2}{2k_p/k_f + 3} \right)$ $U_6 = \left(\frac{k_p/k_f + 2}{2k_p/k_f + 3} \right) \varphi^2$	جفری ^۳	[۲۴]	(۶)
$k_{eff} = (1 + 3\varphi)k_f$	تیموفیوا ^۴	[۲۵]	(۷)
$\frac{k_{eff}}{k_f} = 1 + a\varphi + b\varphi^2$	لو-لین	[۱۸ و ۲۶]	(۸)
$\frac{k_{eff}}{k_f} = 1 + \frac{3(k_p/k_f - 1)}{(k_p/k_f + 2) - (k_p/k_f - 1)\varphi} * (U_7)$ $U_7 = (\varphi + f(k_p/k_f)\varphi^2 + O(\varphi^3))$	داویس	[۱۹]	(۹)

1. Bruggeman
2. Wasp
3. Jeffrey
4. Timofeeva

۳. نتایج و بحث

با توجه به اهمیت بحث نانوسیالات در انتقال حرارت، در این قسمت هدایت حرارتی مؤثر (هدایت مربوط به سیال + نانوذره توزیع شده) برای سیستم شامل آب و TiO_2 در محدوده ۱ تا ۵ درصد حجمی از نانوذرات TiO_2 با استفاده از ۱۱ مدل ذکر شده (روابط ۱ تا ۱۱) محاسبه شد (شکل (۱)). هم‌چنین نتایج اندازه‌گیری‌های تجربی از مقالات مختلف [۳۰-۲۴، ۲۱ و ۲] استخراج و نمودار آن‌ها در شکل (۲) در محدوده ۱ تا ۵ درصد حجمی از نانوذرات TiO_2 رسم شد. لازم به ذکر است که محدوده ۱ تا ۵ درصد حجمی بر اساس نتایج پژوهش‌های انجام شده که نشان دادند افزودن ۰/۱ الی ۵ درصد حجمی از نانوذرات می‌تواند منجر به بهبود قابل توجهی در هدایت حرارتی سیالات شود، انتخاب شده است [۷ و ۳]. مقایسه نتایج این دو نمودار در کنار هم مشخص می‌کند که نسبت هدایت حرارتی مؤثر به هدایت حرارتی سیال (k_{eff}/k_f) برای ۱ الی ۳ درصد حجمی از نانوذرات (شکل (۳)) که منطقه متمرکز هر دو نمودار را در برمی‌گیرد) در محدوده ۱/۰۱ تا ۱/۱ می‌باشد. هدایت حرارتی TiO_2 و آب خالص در دماهای مختلف در شکل (۲) ارائه شده‌است.

$$\frac{k_{eff}}{k_f} = 1 + 4.4 Re_p^{0.4} Pr_f^{0.66} \left(\frac{T}{T_{fr}} \right)^{10} \left(\frac{k_p}{k_f} \right)^{0.03} \phi^{0.66} \quad (10)$$

$$Re_p = \frac{2p_f k_B T}{\pi \mu_f^2 d_p}$$

$$\left(1 - \frac{\phi}{W} \right) \left(\frac{k_{eff} - k_f}{2k_{eff} + k_f} \right) +$$

$$\frac{\phi (k_{eff} - k_L)(2k_{eff} + k_p) - W(k_p - k_L)(2k_L + k_{eff})}{W(2k_{eff} + k_L)(2k_{eff} + k_p) + 2W(k_p - k_L)(k_L - k_{eff})} = 0$$

$$W = \frac{r_p}{r_p + \delta}$$

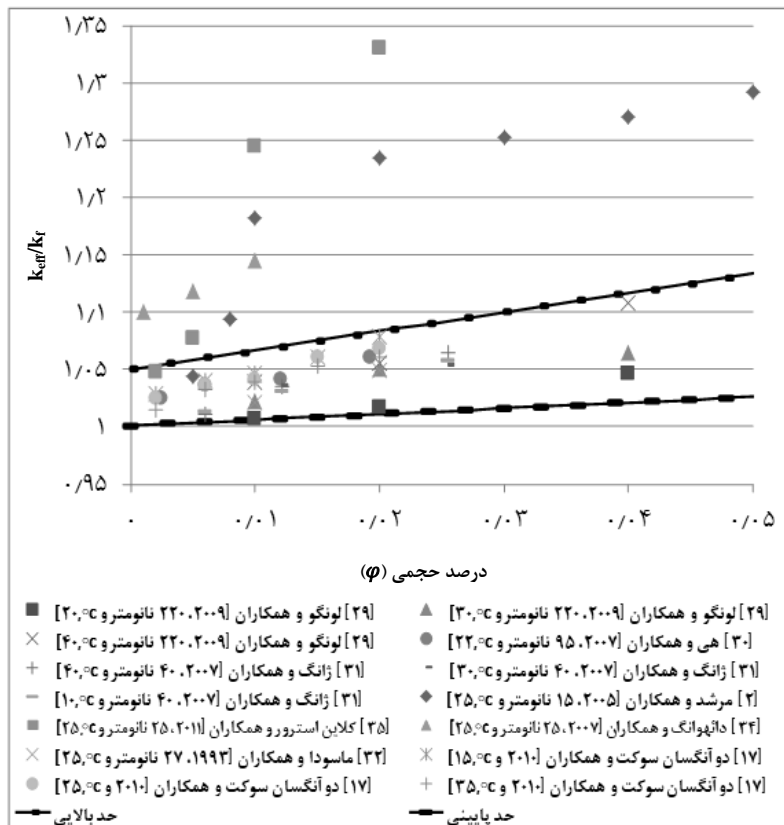
(۱۱- الف)

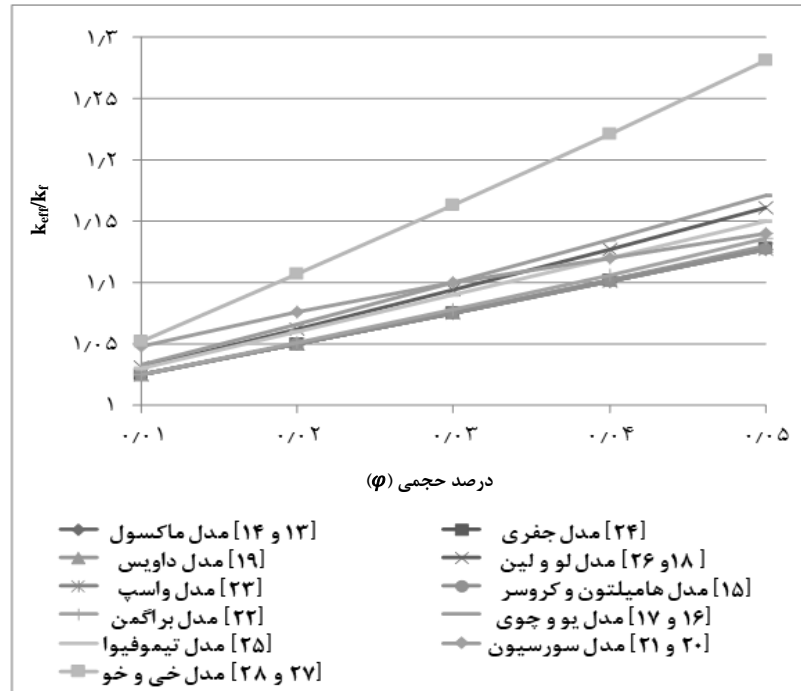
$$k_L = \frac{k_t M^2}{(M - \gamma) \ln(1 + M) + \gamma M} \quad (11- ب)$$

$$M = \varepsilon_p (1 + \gamma) - 1$$

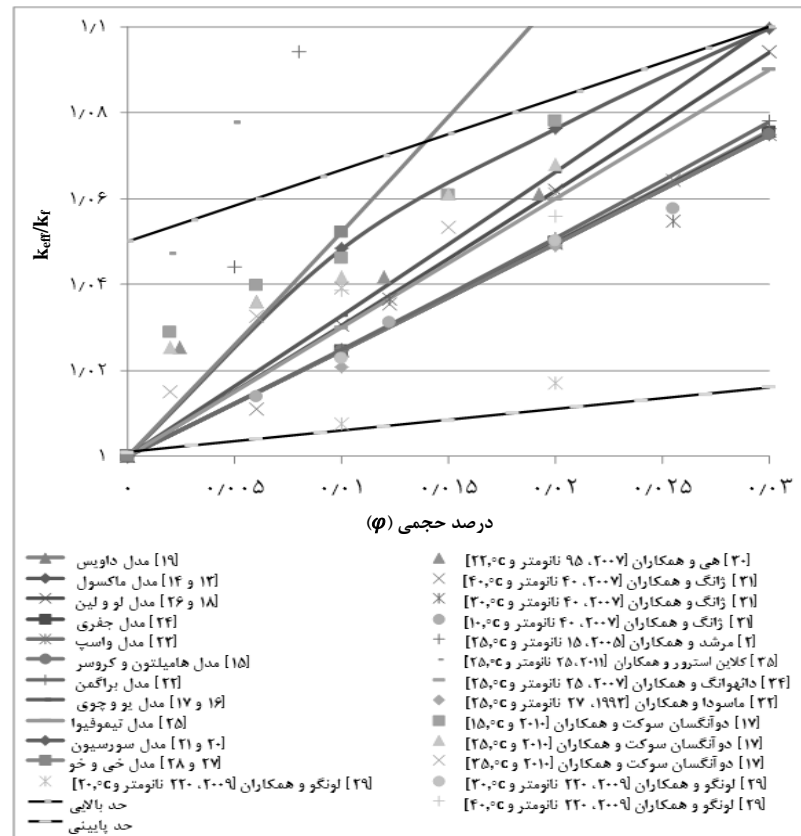
$$\varepsilon_p = \frac{\lambda_p}{\lambda_f} \quad (11- پ)$$

$$\gamma = \frac{\delta}{r_p}$$

شکل ۱. نتایج آزمایشگاهی k_{eff}/k_f بر حسب ϕ .



شکل ۲. نمودار k_{eff}/k_f برحسب ϕ بر اساس مدل‌های مختلف ارائه شده برای پیش‌بینی هدایت حرارتی.



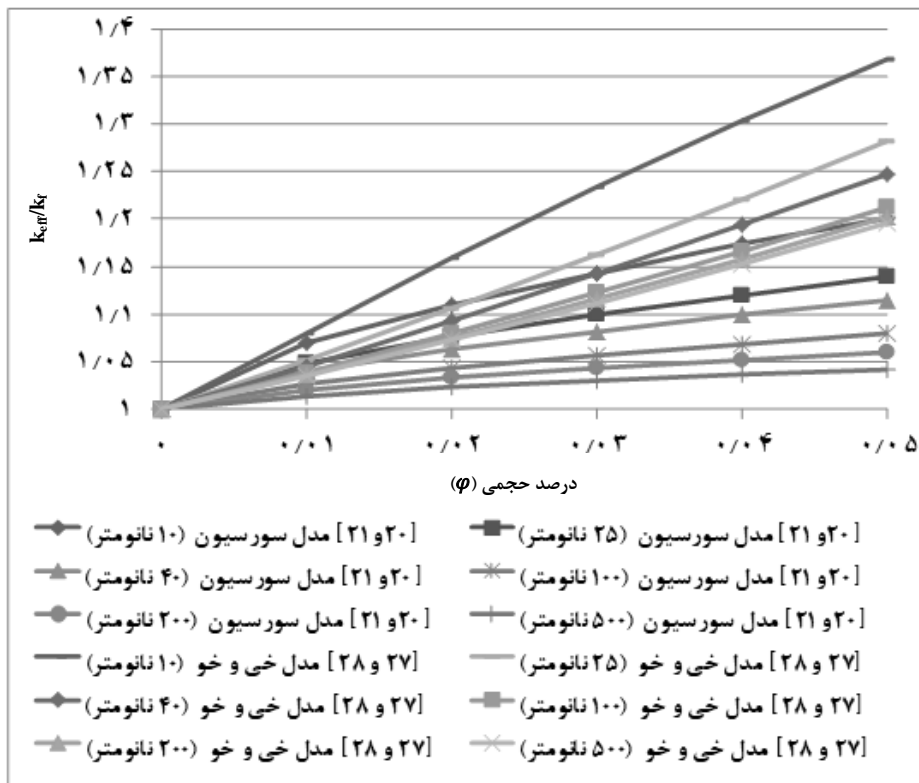
شکل ۳. نمودار k_{eff}/k_f برحسب ϕ - مقایسه نتایج حاصل از پیش‌بینی مدل‌ها و نتایج تجربی ارائه شده در مقالات.

هندسه جریان، شرایط مرزی و با ارتقادادن هدایت حرارتی سیال، بهبود داد. یکی از راهکارهای ارتقای هدایت حرارتی سیال، استفاده از نانوسیالات است. با توجه به گستره کاربردی وسیع نانوسیالات در حوزه‌های مختلف علمی، در این مقاله به بررسی و مقایسه تعدادی از مدل‌های مورد استفاده برای پیش‌بینی هدایت حرارتی نانوسیالات و تعدادی از نتایج آزمایشگاهی موجود در مقالات پرداخته شد. در نتیجه مشخص شد که نسبت ضریب هدایت حرارتی مؤثر (ضریب هدایت حرارتی مخلوط سیال پایه و نانو ذره) به ضریب هدایت حرارتی سیال پایه (k_{eff}/k_f) در حالتی که مقدار حجمی نانوذره توزیع شده در سیال پایه ۱ الی ۳ درصد حجمی باشد، در محدوده ۱/۰۱ تا ۱/۱ می‌باشد. به عبارت دیگر افزودن نانوذره در محدوده ۱ الی ۳ درصد حجمی این توانایی را دارد که نسبت k_{eff}/k_f را تا ۱/۱ (یا ۱۰ درصد) ارتقا دهد و توانایی هدایت حرارتی مجموعه سیال پایه و نانوذره در مقایسه با سیال پایه تا ۱۰ درصد افزایش یابد. هم‌چنین افزایش قطر نانوذرات میزان بهبود هدایت حرارتی را کاهش می‌دهد.

به منظور ارزیابی تأثیر اندازه نانوذرات بر هدایت حرارتی، نسبت (k_{eff}/k_f) با استفاده از دو مدل سورسیون و مدل خوی و خو، در سیستم‌هایی با قطر ذرات متفاوت، محاسبه شد و نتایج آن‌ها در شکل (۴) ترسیم شده است. لازم به ذکر است که در این بررسی‌ها ذرات به صورت کروی در نظر گرفته شدند و قطر ذرات در محدوده ۲۵ تا ۵۰۰ nm متغیر می‌باشد. هم‌چنین محدوده تغییر در صد حجمی (ϕ) از ۰/۰۱ تا ۰/۰۵ می‌باشد. با توجه به شکل مشخص می‌شود که نسبت (k_{eff}/k_f) برای نانوذراتی با اندازه کوچکتر، بیشتر می‌باشد. این مطلب با توجه به وابستگی مستقیم انتقال انرژی گرمایی به مساحت سطح و این مطلب که ذراتی با ابعاد کوچکتر به ازای یک واحد حجم معین، سطح بیشتری را برای انتقال انرژی فراهم می‌نمایند، صحیح می‌باشد. بنابراین هدایت حرارتی مؤثر برای نانوسیالات با ذرات کوچکتر، بالاتر است؛ که این ادعا بر اساس نتایج آزمایشگاهی گزارش شده توسط ژانگ و همکارانش نیز تأیید می‌شود [۳۱].

۴. نتیجه‌گیری کلی

ضریب هدایت حرارتی مؤثر را می‌توان به صورت مؤثری با تغییر



شکل ۴. نمودار (k_{eff}/k_f) بر حسب ϕ - بررسی تأثیر اندازه ذرات در نسبت هدایت حرارتی مؤثر بر هدایت سیال پایه.

- [1] Choi, S. U. S., Eastman, J. A., "Enhancing thermal conductivity of fluids with nanoparticles," presented at the ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition, San Francisco, California, (1995).
- [2] Murshed, S. M. S., Leong, K. C., Yang, C., "Enhanced thermal conductivity of TiO_2 -water based nanofluids," *Int. J. Therm. Sci.*, Vol. 44, pp. 367-373, (2005).
- [3] Tawfik, M. M., "Experimental studies of nanofluid thermal conductivity enhancement and applications: A review," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, Vol. 75, pp. 1239-1253, (2017).
- [4] Maheshwary, P. B., Handa, C. C., Nemade, K. R., "A comprehensive study of effect of concentration, particle size and particle shape on thermal conductivity of titania/water based nanofluid," *Appl. Therm. Eng.*, Vol. 119, pp. 79-88, (2017).
- [5] Ahmadi, M. H., Mirlohi, A., Alhuyi Nazari, M., Ghasempour, R., "A review of thermal conductivity of various nanofluids," *J. Mol. Liq.*, Vol. 265, pp. 181-188, (2018).
- [6] Yu, W., France, D. M., Routbort, J. L., Choi, S. U. S., "Review and Comparison of Nanofluid Thermal Conductivity and Heat Transfer Enhancements," *Heat Transfer Eng.*, Vol. 29, pp. 432-460, (2008).
- [7] Ruan, J., Wang, K., Song, H., Xu, X., Ji, J., Cui, D., "Biocompatibility of hydrophilic silica-coated CdTe quantum dots and magnetic nanoparticle," *Nanoscale Res Lett.*, Vol. 6, pp. 1-13, (2011).
- [8] Das, S. K., Putra, N., Thiesen, P., Roetzel, W., "Temperature Dependence of Thermal Conductivity Enhancement for Nanofluids," *J Heat Transf.*, Vol. 125, pp. 567-574, (2003).
- [9] Xuan, Y., Li, Q., Hu, W., "Aggregation structure and thermal conductivity of nanofluids," *AIChE Journal*, Vol. 49, pp. 1038-1043, (2003).
- [10] Eastman, J. A., Choi, S. U. S., Li, S., Yu, W., Thompson, L. J., "Anomalously increased effective thermal conductivities of ethylene glycol-based nanofluids containing copper nanoparticles," *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 78, pp. 718-720, (2001).
- [11] Eastman, J. A., Choi, U. S., Li, S., Thompson, L. J., Lee, S., "Enhanced Thermal Conductivity through the Development of Nanofluids," *MRS Online Proceedings Library Archive*, Vol. 457, p. 3, (1996).
- [12] Lee, S., Choi, S. U. S., Li, S., Eastman, J. A., "Measuring Thermal Conductivity of Fluids Containing Oxide Nanoparticles," *J Heat Transf.*, Vol. 121, pp. 280-289, (1999).
- [13] Wang, X. Q., Mujumdar, A. S., "Heat transfer characteristics of nanofluids: a review," *Int. J. Therm. Sci.*, Vol. 46, pp. 1-19, (2007).
- [14] Maxwell, J. C., "A treatise on electricity and magnetism. Vol. 1", 1th ed, Clarendon press, Oxford, London, p. 489, (1873).
- [15] Hamilton, R. L., Crosser, O. K., "Thermal Conductivity of Heterogeneous Two-Component, " Systems, I&EC Fundamentals, Vol. 1, pp. 182-191, (1962).
- [16] Yu, W., Choi, S. U. S., "The Role of Interfacial Layers in the Enhanced Thermal Conductivity of Nanofluids: A Renovated Maxwell Model," *J. Nanoparticle Res.*, Vol. 5, pp. 167-171, (2003).
- [17] Duangthongsuk, W., Wongwises, S., "Measurement of temperature-dependent thermal conductivity and viscosity of TiO_2 -water nanofluids," *Exp Therm Fluid Sci.*, Vol. 33, pp. 706-714, (2009).
- [18] Xue, Q. Z., "Model for thermal conductivity of carbon nanotube-based composites," *Physica B Condens. Matter*, Vol. 368, pp. 302-307, (2005).
- [19] Davis, R. H., "The effective thermal conductivity of a composite material with spherical inclusions," *Int. J. Thermophys.*, Vol. 7, pp. 609-620, (1986).
- [20] Abbasian Arani, A. A., Amani, J., "Experimental investigation of diameter effect on heat transfer performance and pressure drop of TiO_2 -water nanofluid," *Exp Therm Fluid Sci.*, Vol. 44, pp. 520-533, (2013).
- [21] Corcione, M., "Empirical correlating equations for predicting the effective thermal conductivity and dynamic viscosity of nanofluids," *Energy Convers. Manag.*, Vol. 52, pp. 789-793, (2011).
- [22] Bruggeman, D. A. G., "Berechnung verschiedener physikalischer Konstanten von heterogenen Substanzen. I. Dielektrizitätskonstanten und Leitfähigkeiten der Mischkörper aus isotropen Substanzen," *Ann. Phys.*, Vol. 416, pp. 636-664, (1935).
- [23] Wasp, E. J., Kenny, J. P., Gandhi, R. L., "Solid-liquid slurry pipeline transportation," *Trans. Tech. publication, Clausthal, Germany*, (1977).
- [24] Jeffrey, D. J., "Conduction through a Random Suspension of Spheres," *P Roy Soc A-Math Phy.*, Vol. 335, pp. 355-367, (1973).
- [25] Timofeeva, E. V., Gavrilov, A. N., McCloskey, J. M., Tolmachev, Y. V., Sprunt, S., Lopatina, L. M., Selinger, J. V., "Thermal conductivity and particle agglomeration in alumina nanofluids: Experiment and theory," *Phys. Rev. E*, Vol. 76, pp. 061203(1-16), (2007).
- [26] Lu, S. Y., Lin, H. C., "Effective conductivity of composites containing aligned spheroidal inclusions of finite conductivity," *J. Appl. Phys.*, Vol. 79, pp. 6761-6769, (1996).

- [27] Xue, Q., Xu, W. M., "A model of thermal conductivity of nanofluids with interfacial shells," *Mater. Chem. Phys.*, Vol. 90, pp. 298-301, (2005).
- [28] Xie, H., Fujii, M., Zhang, X., "Effect of interfacial nanolayer on the effective thermal conductivity of nanoparticle-fluid mixture," *Int. J. Heat Mass Transf.*, Vol. 48, pp. 2926-2932, (2005).
- [29] Longo, G. A., Zilio, C., "Experimental measurement of thermophysical properties of oxide water nano-fluids down to ice-point," *Exp Therm Fluid Sci.*, Vol. 35, pp. 1313-1324, (2011).
- [30] He, Y., Jin, Y., Chen, H., Ding, Y., Cang, D., Lu, H., "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, pp. 2272-2281, (2007).
- [31] Zhang, X., Gu, H., Fujii, M., "Effective thermal conductivity and thermal diffusivity of nanofluids containing spherical and cylindrical nanoparticles," *Exp Therm Fluid Sci.*, Vol. 31, pp. 593-599, (2007).
- [32] Masuda, H., Ebata, A., Teramae, K., Hishinuma, N., "Alteration of Thermal Conductivity and Viscosity of Liquid by Dispersing Ultra-Fine Particles Dispersion of Al₂O₃, SiO₂ and TiO₂ Ultra-Fine Particles," *Netsu Bussei*, Vol. 7, pp. 227-233, (1993).
- [33] Duangthongsuk, W., Wongwises, S., "An experimental study on the heat transfer performance and pressure drop of TiO₂-water nanofluids flowing under a turbulent flow regime," *Int. J. Heat Mass Transf.*, Vol. 53, pp. 334-344, (2010).
- [34] Yoo, D. H., Hong, K. S., Yang, H. S., "Study of thermal conductivity of nanofluids for the application of heat transfer fluids," *Thermochimica Acta*, Vol. 455, pp. 66-69, (2007).
- [35] Kleinstreue, C., Y. Feng, Y., "Experimental and theoretical studies of nanofluid thermal conductivity enhancement: a review," *Nanoscale Res Lett.*, Vol. 6, p. 229, (2011).