

بررسی تجربی و آزمایشگاهی تاثیر قطر نانوذرات و دما بر ضریب هدایت حرارتی نانوسیال آب/ آهن در کسرهای حجمی پایین و ارائه مدل جدید بر مبنای مقادیر تجربی حاصله

محمد همت اسفه^{۱*} و سیف الله سعدالدین^۲

اطلاعات مقاله	چکیده
<p>واژگان کلیدی: ضریب هدایت حرارتی، قطر نانوذرات، دمای نانوسیال، کسر حجمی نانوذرات، نانوسیال.</p>	<p>در این پژوهش، تاثیر پارامترهایی مانند قطر نانوذرات، دمای نانوسیال و کسر حجمی نانوذرات بر روی ضریب هدایت حرارتی نانوسیال آب- آهن به صورت تجربی مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفته است. سپس نتایج آزمایشگاهی حاصله با مقادیر به دست آمده از مدل های کلاسیک پرکاربردی مانند همیلتون- کروسر و یو- چوی مورد مقایسه قرار گرفته است. در ادامه با تکیه بر یافته ها و مقادیر تجربی حاصله، مدل جدیدی به منظور تخمین ضریب هدایت حرارتی پیشنهاد گردیده است. مدل های پیشنهادی نیز در راستای تحقیق تابعیت قطر نانوذرات، دمای نانوسیال و کسر حجمی نانوذرات را دارند. نانوذرات آهن (Fe) در سه قطر مختلف ۳۵-۴۵ نانومتر، ۶۵-۷۵ نانومتر و ۹۵-۱۰۵ نانومتر پس از تهیه، در کسرهای حجمی ۰.۰۳۱۳، ۰.۰۶۲۵، ۰.۱۲۵، ۰.۰۵ و ۰.۱ درون سیال پایه آب دیونیزه تعلیق شده است. ضریب هدایت حرارتی نانوسیالات به دست آمده در کسرهای حجمی پایین (low concentration) و در قطر های مختلف فوق الذکر، در دماهای مختلف از جمله ۲۷، ۳۵، ۴۵ و ۵۵ درجه سانتی گراد به صورت تجربی به دست آمده است. در تحقیق حاضر از دستگاه آنالیزر حرارتی KD2 pro (decagon) و استفاده از روش سیم داغ گذرا به منظور اندازه گیری ضریب هدایت حرارتی نانوسیالات استفاده می شود. نتایج این تحقیق نشان می دهد با افزایش دما و کاهش قطر نانوذرات، ضریب هدایت حرارتی نانوسیال افزایش می یابد. همچنین نتایج تجربی به دست آمده، خصوصا در دماهای بالا و قطرهای کوچک نانوذرات، تطابق و همخوانی مناسبی با مدل های کلاسیک پیش بینی ضریب هدایت حرارتی ندارند که این مساله ضرورت ارائه مدل پیشنهادی را مضاعف می نماید. مدل پیشنهادی نیز با حداکثر ۲٪ حاشیه انحراف، قابلیت پیش بینی ضریب هدایت حرارتی را با تکیه بر پارامترهای اساسی مانند کسر حجمی، دمای نانوسیال و اندازه قطر نانوذرات دارد.</p>

۱- مقدمه

طراحی های مهندسی مورد استفاده قرار گرفته اند. مشکل عمده ای این نوع سیالات، رسانش حرارتی کم آنها می باشد که منجر به پایین ماندن نرخ انتقال حرارت آنها می گردد و همین به عنوان یکی از محدودیت های این نوع از سیالات، طراحی های مهندسی را با مشکلات و محدودیت های خاصی مواجه کرده است.

سیالات متداولی مانند آب، اتیلن گلیکول و انواع روغن ها در سال های متمادی به عنوان سیال عامل در صنعت و

* پست الکترونیک نویسنده مسئول: M.hemmatesfe@gmail.com

۱. دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه سمنان

۲. دانشیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه سمنان

یکی از روش‌های جدیدی که امروزه برای افزایش رسانش حرارتی این قبیل سیالات و در نتیجه‌ی آن، افزایش نرخ انتقال حرارت مورد استفاده قرار می‌گیرد، افزودن ذرات در سایز نانو به سیال است؛ به طوری که انتقال حرارت نانوسیال در درون محفظه‌ها و تاثیر خصوصیات ترموفیزیکی آنها از قبیل رسانش حرارتی، لزجت دینامیکی و ضریب انبساط حرارتی آنها مورد بحث و بررسی زیادی قرار گرفته است. بسیاری از پژوهشگران وجوه مختلفی از خواص نانوسیال را در کاربردهای مختلف مورد بررسی و توجه قرار داده اند [۵-۱۱].

در یک دهه اخیر، تحقیقات مختلفی درباره ضریب هدایت حرارتی نانوسیالات صورت پذیرفته است. تعداد و شرائط آزمایشات و مطالعات صورت گرفته، به هیچ وجه متناسب با گستردگی و دامنه بسیار زیاد نانوسیالات نبوده و به دلیل وجود پارامترهای موثر مختلف در ضریب هدایت حرارتی، هنوز مدل و رابطه منحصر به فرد و جامعی در این زمینه ارائه نشده است.

مطالعات صورت گرفته، علاوه بر ناکامی در تخمین یک مدل مشخص، هنوز توانایی توضیح و توجیه دقیق اختلاف و گاه تضاد بین نتایج مختلف به دست آمده از آزمایش‌های گوناگون را نیز ندارند.

تحقیقات تجربی دانشمندان در این زمینه، نشان از تاثیرگذاری پارامترهای زیر در افزایش و یا کاهش ضریب هدایت حرارتی می‌باشد:

(۱) کسر حجمی نانوذرات (۲) جنس ذرات معلق و سیال پایه (۳) تاثیر شکل و اندازه نانوذرات (۴) تاثیر دما (۵) تاثیر اندازه (۶) تاثیر سورفکتانت‌ها و پایدارکننده‌ها (۷) تاثیر نوع هم‌زن التراسونیک (۸) تاثیر زمان یا کلوخه شدن تدریجی

از سوی دیگر تاثیر متقابل هر یک از این پارامترها بر یک-دیگر از جمله موضوعات پیچیده و جدیدی است که به تازگی در میان محققین مطرح شده است و گروه‌های تحقیقاتی و پژوهشی تاثیرات مربوط به پارامترهای مختلف را به صورت‌های خاص، مورد بحث قرار می‌دهند.

بسیاری از آزمایش‌های انجام شده بر روی نانوسیال‌ها به بررسی اثر درصد حجمی نانوذرات بر خواص حرارتی نانوسیال متمرکز بوده است. تاثیر کسر حجمی نانوذرات با سیال پایه اتیلن گلیکول و اکسید مس توسط لی و همکاران [۶] مورد بررسی قرار گرفت. آن‌ها دریافتند مقدار ضریب هدایت حرارتی با افزودن ۱۵٪ نانوذرات به میزان ۵۰٪ افزایش می‌یابد. همچنین ونگ و همکاران [۷] نانوسیال آب-اکسید مس را با افزایش درصد حجمی نانو ذرات تا غلظت ۱۰٪ مورد بررسی قرار داده و نتایج مشابهی را بدست آوردند. ایستمن و همکاران [۸] ضریب رسانایی نانوسیالات Cu، CuO، Al₂O₃ را بررسی کرده و از دو سیال پایه آب و روغن HE-200 استفاده کرده‌اند. آن‌ها افزایش ۶۰٪ ضریب رسانایی نسبت به سیال پایه، با غلظت ۵٪ نانوذرات مشاهده کرده‌اند.

در تحقیق دیگری با تمرکز بر کسر حجمی و شکل نانوذرات، زی و همکارانش [۹] نانوذرات کربید سیلیسیم را به دو شکل کروی و استوانه‌ای به آب و اتیلن گلیکول افزودند و مشاهده کردند که نانوذرات استوانه‌ای شکل ضریب هدایت حرارتی را بیشتر افزایش می‌دهند. آن‌ها دریافتند که ضریب هدایت حرارتی برای نانوسیال‌های ساخته شده از نانوذرات استوانه‌ای حدود ۱۰٪ بیشتر از نانوسیال‌های ساخته شده از نانوذرات کروی می‌باشد. در پژوهشی دیگر، مرشد و همکاران [۱۰] ذرات اکسید تیتانیوم ۱۰×۴۰ نانومتر با شکل میله‌ای و ذرات ۱۵ نانومتر کروی شکل پخش شده در آب دیونیزه شده را مورد آزمایش قرار داده‌اند؛ آن‌ها حدود ۳۳٪ و ۳۰٪ افزایش ضریب رسانایی را به ترتیب برای ذرات TiO₂ گزارش کرده‌اند.

اگرچه بسیاری از محققین اثر دما بر روی افزایش ضریب هدایت حرارتی نانوسیال را در نظر نگرفته‌اند، اما مطالعات اخیر نشان می‌دهد که دمای نانوسیال اثر بسیار مهمی بر روی خواص نانوسیال دارد. داس و همکاران [۱۱] رفتار نانوسیال‌های آب و اکسیدمس و همچنین آب و اکسید آلومینیوم را با تغییر دما مورد مطالعه قرار دادند. آن‌ها

حرارتی نانوذرات اکسید آهن معلق در سیال صورت گرفته است که در این تحقیقات نیز اثر قطر مورد توجه قرار نگرفته است. در عموم مطالعات و آزمایش‌های صورت گرفته با اکسید آهن، اندازه گیری تغییرات ضریب هدایت حرارتی با تغییرات کسر حجمی [۱۷-۱۴] و بعضاً دما [۱۹،۱۸] و نوع سیال پایه [۲۰] صورت گرفته است. بنابراین این تحقیق می‌تواند به عنوان یک تحقیق اولیه در مورد نقش اندازه نانوذرات آهن در سیال پایه شناخته شده و تاثیرات متقابل آن با دما را مورد بررسی قرار می‌دهد.

۲- بررسی تجربی:

۲-۱ آماده سازی نانوسیال:

اولین گام در انجام بررسی تجربی حاضر، آماده‌سازی نانوسیال و تعلیق پایدار نانوذرات درون سیال پایه می‌باشد. در این تحقیق برای آماده‌سازی نانوسیال آب-آهن از روش دومرحله‌ای استفاده می‌شود. به منظور آماده‌سازی نانوسیال به وسیله تعلیق کردن نانوذرات در سیال پایه، از دستگاه مخصوص همزن التراسونیک استفاده می‌شود. کسر حجمی نانوذرات مورد نیاز در این تحقیق ۰.۳۱۳٪، ۰.۶۲۵٪، ۱.۲۵٪، ۰.۵٪ و ۱٪ در قطرهای ۳۵-۴۵، ۶۵-۷۵ و ۹۵-۱۰۵ نانومتر می‌باشد. لازم به ذکر است که نانوذرات مورد استفاده از محصولات شرکت Us research nanomaterial تهیه شده است. مشخصه‌های نانوذرات آهن خریداری شده در جداول ۱-۳ به ترتیب برای نانوذرات با قطر ۳۵-۶۵، ۶۵-۷۵ و ۹۵-۱۰۵ نانومتر آمده است.

نتیجه گرفتند که با افزایش دما، ضریب هدایت حرارتی نانوسیال نیز افزایش می‌یابد. در تحقیق دیگری کارتیک و همکاران [۱۲] به بررسی ضریب هدایت حرارتی نانوسیال آب-اکسید مس پرداختند. مطالعات آنها نیز نشان داد که دما تاثیرات قابل توجهی بر ضریب هدایت حرارتی نانوسیال دارد. فدلا و همکاران [۱۳] نیز با بررسی نانوذرات اکسید تیتانیوم در آب دریافتند که افزایش کسر حجمی و دمای نانوسیال باعث افزایش ضریب هدایت حرارتی نانوسیال می‌گردد. نتایج این تحقیق نیز به طور ضمنی نتایج آزمایشات مربوط به کارتیک و همکاران و داس و همکاران را تایید می‌کند.

توجه به نقش بسیار موثر ضریب هدایت حرارتی در کاربردهای حرارتی نانوسیالات و اهمیت درک و شناخت پارامترهای تاثیرگذار بر این خاصیت ترموفیزیکی، انگیزه اصلی انجام این تحقیق می‌باشد.

تحقیق حاضر با در نظر گرفتن و بررسی تجربی نقش پارامترهایی مانند کسر حجمی نانوذرات، دمای سیال و اندازه قطر نانوذرات برای نانوسیال آب-آهن درصد درک دقیق رفتار ضریب هدایت حرارتی و نقش هر یک از پارامترهای مورد اشاره در افزایش و یا کاهش آن می‌باشد. لازم به ذکر است تاکنون هیچ گونه تحقیقی پیرامون نقش اندازه قطر نانوذرات آهن در آب و تاثیر آن بر ضریب هدایت حرارتی گزارش نشده است. هم چنین طبق اطلاعات نویسندگان، گزارش‌های بسیار اندک و محدودی پیرامون تاثیر هم‌زمان دمای نانوسیال و اندازه قطر نانوذرات در نانوسیالات با ذرات فلزی گزارش شده است. شایان ذکر است تحقیقاتی در مورد اندازه گیری خواص

جدول (۱) مشخصه های نانوذرات آهن با قطر ۳۵-۴۵ نانومتر	
Purity(metal basis)	99.5+%
Color	black
APS(nm)	35-45
SSA(m ² /g)	8-14
Morphology	Spherical
Bulk Density(g/cm ³)	0.45
True Density(g/cm ³)	7.90

بسیار زیادی افزایش می‌یابد که این نشان‌دهنده افزایش سطح موثر نسبت به حجم نانوذرات در یک درصد وزنی یا حجمی خاص است.

موضوع مهمی که در جدول مشخصه‌ها حائز اهمیت است، تفاوت آشکار سطح ویژه (SSA) در قطره‌های مختلف می‌باشد. سطح ویژه نانوذرات با کوچکتر شدن قطر به میزان

جدول (۲) مشخصه های نانوذرات آهن با قطر ۶۵-۷۵ نانومتر	
Purity(metal basis)	99.5+%
Color	black
APS(nm)	65-75
SSA(m ² /g)	8
Morphology	Spherical
Bulk Density(g/cm ³)	0.5
True Density(g/cm ³)	7.90

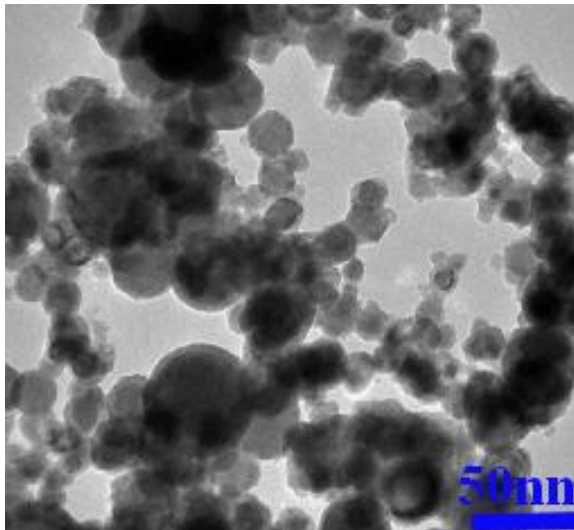
قطر نانوذرات، برخی کارکردها و خواص حرارتی نانوسیال نیز دستخوش تغییر شود.

این افزایش قابل توجه، عملکرد حرارتی نانوسیال را تحت تاثیر قرار می‌دهد و انتظار می‌رود با افزایش و یا کاهش

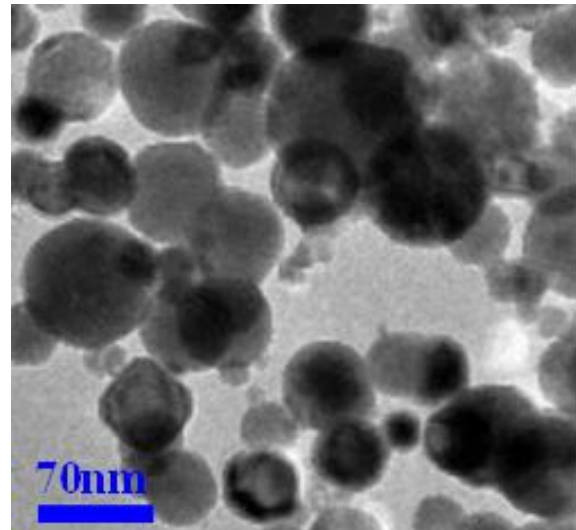
جدول (۳) مشخصه های نانوذرات آهن با قطر ۹۵-۱۰۵ نانومتر	
Purity(metal basis)	99.5+%
Color	black
APS(nm)	95-105
SSA(m ² /g)	4-6
Morphology	Spherical
Bulk Density(g/cm ³)	0.5
True Density(g/cm ³)	7.90

در این تحقیق از تصاویر میکروسکوپ عبوری الکترونی (TEM) به منظور درک خواص ساختاری نانوذرات آهن در قطره‌های مختلف استفاده می‌شود. این روش پیشتر در محدوده وسیعی از مطالعات مورد استفاده قرار گرفته است [۲۱-۲۴]. شکل (۱) تصاویر TEM مربوط به سه قطر مختلف مورد استفاده در این تحقیق را به صورت مجزا نمایش می‌دهد.

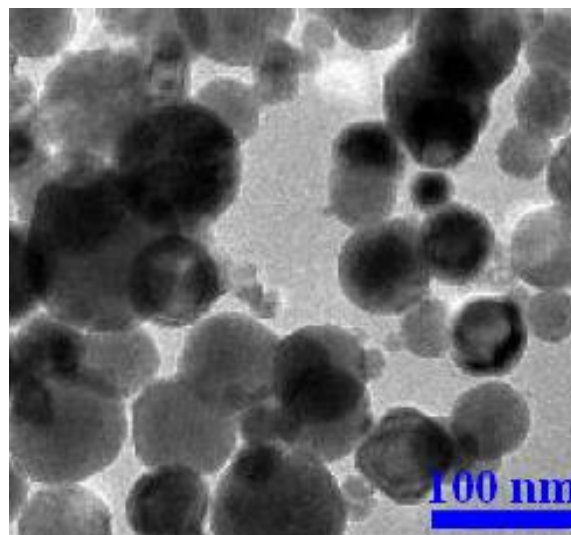
نانوسیال با کسرهای حجمی فوق‌الذکر با تعلیق مقادیر مشخصی از نانوذرات آهن در قطره‌های مختلف در سیال پایه آب و هم‌زدن آن به وسیله دستگاه التراسونیک به دست می‌آید. از دستگاه التراسونیک پرابی به مدت ۴/۵ ساعت برای هم‌زدن سیال و شکستن توده‌های ذرات برای دستیابی به نانوسیال با تعلیق پایدار و استفاده می‌شود.



(الف)



(ب)



(ج)

شکل (۱) تصاویر میکروسکوپ الکترونی عبوری مربوط به نانوذرات آهن در قطرهای مختلف (الف) ۳۵-۴۵ نانومتر (ب) ۶۵-۷۵ نانومتر (ج) ۹۵-۱۰۵ نانومتر

۲-۲ اندازه گیری ضریب هدایت حرارتی:

[۲۹] وجود دارد. در این تحقیق به دلیل دقت زیاد و سرعت بالای روش سیم داغ گذرا [۳۰]، از این روش استفاده می‌گردد. نانوسیال آب- آهن پس از تعلیق پایدار ذرات، با قطرهای مختلف درون سیال پایه به منظور اندازه‌گیری ضریب هدایت حرارتی مورد استفاده قرار می‌گیرد. از نانوسیال در کسرهای حجمی ۰,۰۳۱۳٪، ۰,۰۶۲۵٪، ۰,۱۲۵٪، ۰,۵٪ و ۱٪ با استفاده از دستگاه آنالیزر حرارتی KD2-PRO (decagon) برای اندازه‌گیری

به دلیل مکانیزم و ساختار پیچیده نانوسیالات، بسیاری از مدل‌های نوین و کلاسیک از تخمین ضریب هدایت حرارتی با دقت مطلوب عاجزند. بنابراین در این مقاله ضریب هدایت حرارتی نانوسیال به صورت تجربی مورد بررسی قرار می‌گیرد. برای اندازه‌گیری تجربی ضریب هدایت حرارتی روش‌های متعددی از جمله مانند روش سیم داغ گذرا [۲۵]، صفحات موازی حالت پایدار [۲۶]، سلول سیلندری [۲۷]، روش نوسانات دمایی [۲۸] و 3ω

لازم به ذکر است که از سنسور KS1 به منظور اندازه-گیری ضریب هدایت حرارتی نانوسیالات استفاده می‌شود.

ضریب هدایت حرارتی استفاده می‌شود. شکل این دستگاه و سنسورهای مربوطه در شکل (۲) نشان داده شده است.

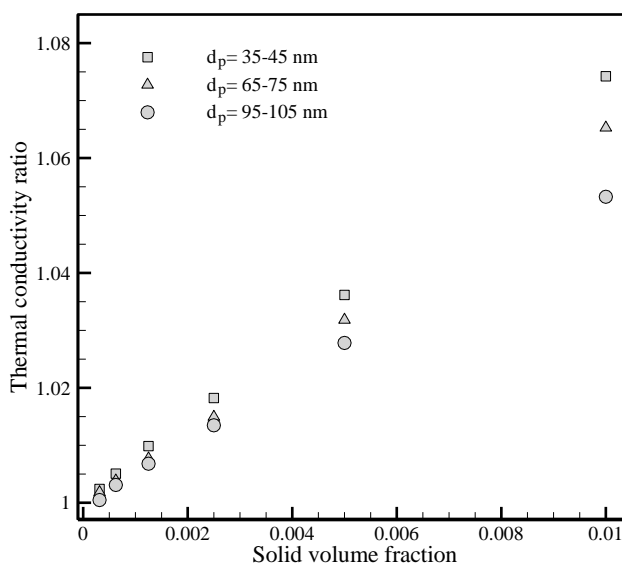


شکل (۲) دستگاه آنالیز حرارتی KD2-pro برای اندازه گیری ضریب هدایت حرارتی

و مدل یو - چوی [۳۲] مقایسه شده و انطباق آن‌ها بر یکدیگر مورد بحث قرار می‌گیرد. در ادامه نیز با استفاده از مقادیر تجربی موجود، مدل مشخصی به منظور تخمین ضریب هدایت حرارتی با لحاظ کردن پارامترهای مورد مطالعه در این آزمایش، پیشنهاد گردیده و در انتها حاشیه انحراف مدل پیشنهادی با داده‌های تجربی موجود سنجیده می‌شود.

۳- تحلیل و بررسی نتایج:

در مطالعه حاضر ضریب هدایت حرارتی برای نانوسیال آب- آهن در کسرهای حجمی 0.0625% ، 0.125% ، 0.5% و 1% ، چهار دمای $3\text{, }27\text{, }35\text{, }45$ و 55 درجه سانتیگراد و سه قطر متفاوت فوق الذکر به صورت تجربی حاصل می‌گردد. پس از آن داده‌های تجربی با مدل‌های پر کاربرد کلاسیک حاضر مانند مدل همیلتون- کروسر [۳۱]



شکل (۳) ضریب هدایت حرارتی نانوسیال در دمای $27,3$ درجه سانتی گراد برای قطرهای مختلف نانوذرات و کسرهای حجمی گوناگون

دمای ۲۷ درجه سانتی گراد تغییرات نسبت بهبود ضریب هدایت حرارتی نانوسیال با قطر ۴۵-۳۵ نانومتر نسبت به نانوسیال با قطر ۱۰۵-۹۵ نانومتر برابر ۳۹,۳۶٪ است در حالی که نسبت به قطر ذرات برابر ۶۵-۷۵ نانومتر برابر ۲۵,۰۷٪ می باشد. طبق مقادیر حاصله، تغییر نسبت بهبود ضریب هدایت حرارتی برای قطر ۶۵-۷۵ نانومتر نسبت به ۱۰۵-۹۵ نانومتر، در کسر حجمی ۰.۱٪ برابر ۱۱,۴٪ می باشد.

درصد افزایش بیشینه، کمینه و متوسط در نسبت بهبود ضریب هدایت حرارتی در قطرهای مختلف نسبت به یک-دیگر در جدول (۴) آمده است.

مقادیر تجربی ضریب هدایت حرارتی نانوسیال در دمای ۲۷ درجه سانتیگراد در قطرهای مختلف نانوذرات در کسرهای حجمی گوناگون در شکل (۳) آمده است. همان-گونه که در این شکل مشاهده می شود کاهش قطر منجر به افزایش ضریب هدایت حرارتی می گردد که این افزایش در کسرهای حجمی بالاتر محسوس تر می باشد. با استفاده از روش مقایسه ای ارائه شده در تحقیق یو و همکاران [۳۳]، نسبت بهبود ضریب هدایت حرارتی به شکل

$$\left(\frac{k_{nf} - k_f}{k_f}\right) (\%)$$

تعریف شده و برای مقایسه تغییرات

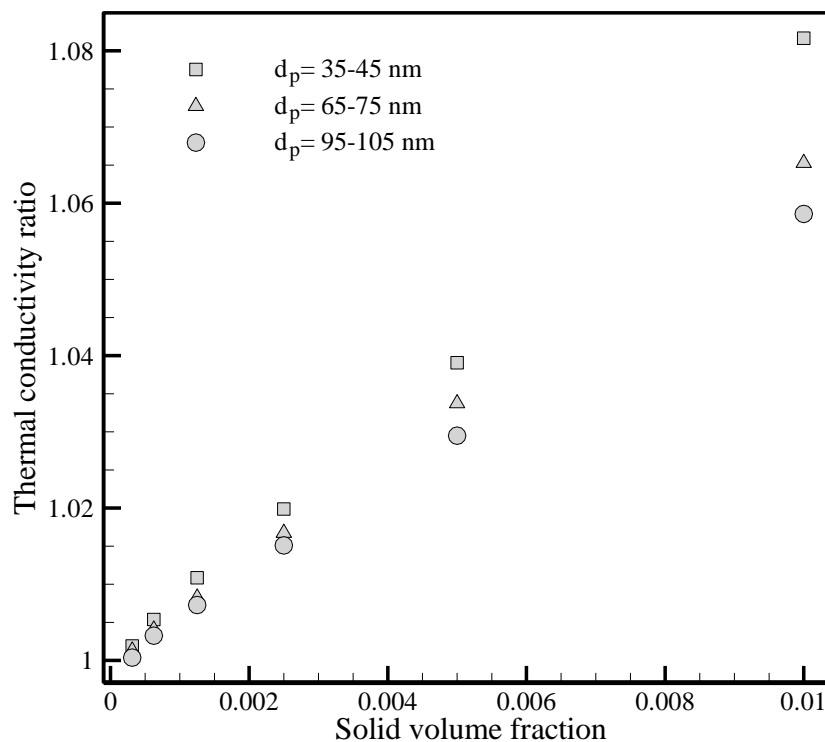
حاصله از آن استفاده می گردد. در کسر حجمی ۰.۱٪ و

جدول (۴) درصد افزایش میانگین، بیشینه و کمینه نسبت بهبود ضریب هدایت حرارتی با تغییر در قطرهای نانوذرات معلق در دمای ۲۷,۳ درجه سانتیگراد

	در ۴۵-۳۵ نسبت به ۱۰۵-۹۵ نانومتر	در ۴۵-۳۵ نسبت به ۶۵-۷۵ نانومتر	در ۶۵-۷۵ نسبت به ۱۰۵-۹۵ نانومتر
میانگین در همه کسرهای حجمی	٪۴۱,۶۵	٪۲۳,۳	٪۱۴,۷۴
بیشینه	٪۶۳,۵۴	٪۳۱,۷۶	٪۱۰,۸۴
کمینه	٪۲۹,۹۸	٪۱۳,۶	٪۲۴,۱۲

افزایش در ضریب هدایت حرارتی بالاخص در کسرهای حجمی بالاتر محسوس می باشد.

نسبت ضریب هدایت حرارتی محاسبه شده به صورت تجربی در دمای ۳۵ درجه سانتیگراد در قطرهای مختلف نانوذرات در شکل (۴) آمده است. در مقایسه با شکل (۳)



شکل (۴) ضریب هدایت حرارتی نانوسیال در دمای ۳۵ درجه سانتی گراد برای قطرهای مختلف نانوذرات و کسرهای حجمی گوناگون

بهبود نسبت بهبود ضریب هدایت حرارتی با استفاده از نانوذرات با قطر ۶۵-۷۵ نانومتر نسبت به نانوذرات با قطر ۹۵-۱۰۵ برابر ۱۱,۱۴٪ است. در جدول (۴) درصدهای مربوط به مقادیر کمینه، بیشینه و متوسط نسبت بهبود حرارتی با تغییر در قطر نانوذرات معلق در نانوسیال آب-آهن آمده است.

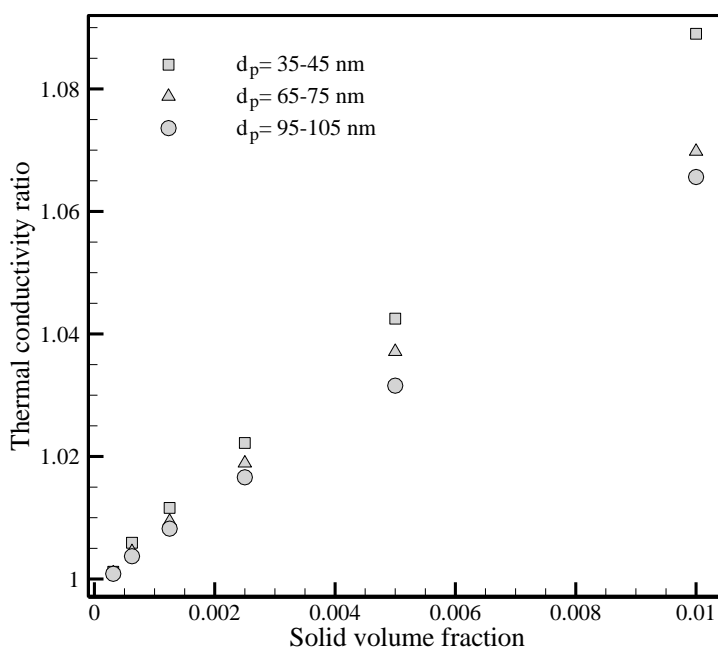
در این دما نیز تغییر نسبت بهبود ضریب هدایت حرارتی برای کسر حجمی ۱٪ با استفاده از نانوسیالات با قطرهای مختلف، محاسبه شده است. تغییر نسبت بهبود ضریب هدایت حرارتی با استفاده از نانوذرات با قطر ۳۵-۴۵ نانومتر نسبت به نانوذرات با قطر ۹۵-۱۰۵ نانومتر برابر ۳۸,۷۶٪ می‌باشد. این مقدار برای تغییر قطر از ۳۵-۴۵ نانومتر به ۶۵-۷۵ نانومتر برابر ۲۶,۲۷٪ است. هم‌چنین

جدول (۵) درصد افزایش میانگین، بیشینه و کمینه نسبت بهبود ضریب هدایت حرارتی با تغییر در قطرهای نانوذرات معلق در دمای ۳۵ درجه سانتیگراد

	در ۳۵-۴۵ نسبت به ۹۵-۱۰۵ نانومتر	در ۳۵-۴۵ نسبت به ۶۵-۷۵ نانومتر	در ۶۵-۷۵ نسبت به ۹۵-۱۰۵ نانومتر
میانگین در همه کسرهای حجمی	٪۴۲,۱۹	٪۲۳,۷۴	٪۱۴,۷۷
ماکزیمم	٪۶۵,۱۰	٪۳۳,۰۲	٪۲۴,۱۲
مینیمم	٪۳۱,۶	٪۱۵,۷۷	٪۱۰,۸۴

مقادیر موجود نسبت به اشکال (۳) و (۴) که دماهای پایین‌تر را مورد مطالعه قرار داده بودند، روند افزایشی دارد.

نسبت ضریب هدایت حرارتی نانوسیال در دمای ۴۵ درجه سانتیگراد برای نانوذرات با قطرهای مختلف در شکل (۵) آمده است. همانگونه که در این شکل نیز مشخص است،



شکل (۵) ضریب هدایت حرارتی نانوسیال در دمای ۴۵ درجه سانتیگراد برای قطرهای مختلف نانوذرات و کسرهای حجمی گوناگون

مختلف در رفتار نسبت بهبود ضریب هدایت حرارتی، به صورت آماری ارائه شده است.

با توجه به تمرکز این تحقیق بر روی اثر قطر نانوذرات و دمای نانوسیال، در جدول (۶) تاثیر استفاده از قطرهای

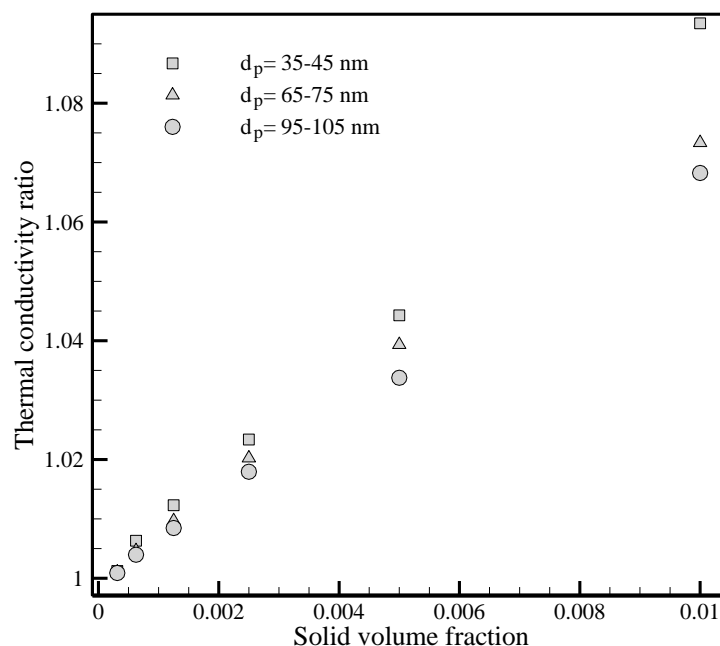
جدول (۶) درصد افزایش میانگین، بیشینه و کمینه نسبت بهبود ضریب هدایت حرارتی با تغییر در قطرهای نانوذرات معلق در دمای ۳۵ درجه سانتیگراد

	در ۳۵-۴۵ نسبت به ۹۵-۱۰۵ نانومتر	در ۳۵-۴۵ نسبت به ۶۵-۷۵ نانومتر	در ۶۵-۷۵ نسبت به ۹۵-۱۰۵ نانومتر
میانگین در همه کسرهای حجمی	٪۴۰،۷۱۱	٪۲۳،۱۶۳	٪۱۴،۲۵
ماکزیمم	٪۵۹،۳۱	٪۳۳،۰۲	٪۱۹،۷۶
مینیمم	٪۳۳،۹۹	٪۱۴،۷۲	٪۶،۴۴

ضریب هدایت حرارتی با توجه به دما را می توان به افزایش انرژی جنبشی ملکولهای نانوسیال و بهبود سطح انرژی آنها با افزایش دما مرتبط دانست.

این میزان افزایش نشان دهنده سهم قابل توجه دما در افزایش ضریب هدایت حرارتی نانوسیال می باشد. از سوی دیگر می توان نتیجه گرفت در نظر نگرفتن پارامترهای اثرگذار و مهمی مانند دما یا قطر نانوذرات در روابط و مدل های تخمین ضریب هدایت حرارتی نانوسیالات می تواند باعث عدم کارائی و کاهش نتیجه بخشی آنها شود.

شکل (۶) نسبت ضریب هدایت حرارتی را برای نانوسیال آب- آهن در کسرهای حجمی و قطرهای مختلف نانوذرات در دمای ۵۵ درجه سانتی گراد نشان می دهد. افزایش قابل توجه نسبت ضریب هدایت حرارتی در این دما نسبت به سایر دماهای مورد مطالعه به روشنی مشهود است. مقایسه نسبت بهبود ضریب هدایت حرارتی در دمای ۵۵ درجه نسبت به دمای ۲۷،۳ درجه سانتیگراد نشان می دهد که در کسر حجمی ۱٪ برای قطرهای ۳۵-۴۵ ، ۶۵-۷۵ و ۹۵-۱۰۵ نانومتر به ترتیب افزایشی برابر ۲۸،۱۲۸٪، ۲۳،۵۸۵٪ و ۲۵،۸۵۹٪ حاصل شده است. این افزایش در



شکل (۶) ضریب هدایت حرارتی نانوسیال در دمای ۵۵ درجه سانتی گراد برای قطرهای مختلف نانوذرات و کسرهای حجمی گوناگون

همان گونه که در اشکال و جداول موجود در این قسمت مشاهده گردید، دو پارامتر قطر نانوذرات و دمای نانوسیال

در جدول (۷) درصد افزایش میانگین، بیشینه و کمینه نسبت بهبود حرارتی با استفاده از قطرهای مختلف نانوذرات در کسرهای حجمی مختلف درج شده است.

صورت مستقیم لحاظ نکرده اند. بنابراین در ادامه ضمن قیاس داده های تجربی موجود با مدل های کلاسیک، به ارائه یک مدل وابسته به دما و قطر نانوذرات خواهیم پرداخت.

جدول (۷) درصد افزایش میانگین، بیشینه و کمینه نسبت بهبود ضریب هدایت حرارتی با تغییر در قطرهای نانوذرات معلق در دمای ۳۵ درجه سانتیگراد

	افزایش از ۳۵ به ۹۵	افزایش از ۳۵ به ۶۵	افزایش از ۶۵ به ۹۵
میانگین در همه کسرهای حجمی	۳۹,۹۲	۲۲,۹۱۲	۱۳,۸۶
ماکزیمم	۵۹,۳۱	۳۶,۸۵	۱۶,۵۰
مینیمم	۳۰,۲۷	۱۲,۵۶	۷,۴۷

در کنار پارامترهایی مانند کسر حجمی تاثیراتی تعیین کننده بر ضریب هدایت حرارتی نانوسیال دارند. از سوی دیگر بسیاری از مدل‌هایی که تاکنون به صورت تحلیلی و یا تجربی ارائه گردیده‌اند، میزان اثرگذاری این پارامترها را ناچیز فرض کرده و یا اثر این پارامترها را به

۴- انحراف مقادیر تجربی از مدل‌های کلاسیک

همیلتون - کروسر و یو - چوی:

که در آن β ، نسبت ضخامت نانولایه به شعاع نانوذره می‌باشد.

همان‌گونه که از روابط مربوط به مدل‌های همیلتون - کروسر و یو - چوی استنباط می‌شود، این دو مدل برای تخمین ضریب هدایت حرارتی نانوسیال تابع عواملی مانند کسر حجمی نانوذرات و شکل ذرات معلق می‌باشند و تاثیر عوامل بسیار مهم و تاثیرگذاری مانند دما و قطر نانوذرات در آنها لحاظ نشده است. به منظور نمایش میزان انطباق این مدل‌ها و مقادیر حاصله از بررسی تجربی ضریب هدایت حرارتی نانوسیال آب- آهن در کسرهای حجمی مختلف، در شکل (۷)، این مقادیر با یک‌دیگر قیاس شده اند. همان‌گونه که به وضوح در این شکل مشاهده می‌شود داده های تجربی در هر دو حالت ارائه شده (الف و ب) دارای انحراف قابل توجه نسبت به مدل همیلتون کروسر و اختلاف کمتر (ولی باز هم قابل توجه) با مدل یو - چوی هستند. این اختلاف‌ها در شکل (۷-ب) که ذرات جامد معلق را در قطر ۳۵-۴۵ نانومتر و در دمای ۵۵ درجه نشان می‌دهد به مراتب بیشتر از شکل (۷-الف) که نانوسیال با استفاده از ذرات با قطر ۹۵-۱۰۵ نانومتر در دمای محیط نشان داده شده‌اند، می‌باشد. ضعف بزرگ این مدل‌ها که عدم توجه به قطر نانوذرات و دمای نانوسیال در

از متداول‌ترین مدل‌های موجود به منظور تخمین ضریب هدایت حرارتی که در بسیاری از شبیه سازی‌های عددی و تحلیلی مربوط به نانوسیالات از آنها استفاده می‌شود، مدل همیلتون کروسر [۲۴] و مدل یو و چوی [۲۵] است. مدل همیلتون کروسر برای تخمین ضریب هدایت حرارتی در مخلوط‌هایی کاربرد دارد که در آنها نسبت ضریب هدایت ذرات جامد به سیال پایه بیش از ۱۰۰ باشد. این رابطه به صورت زیر بیان می‌شود:

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

که در آن n ضریب شکل نامیده می‌شود که عبارتست از:

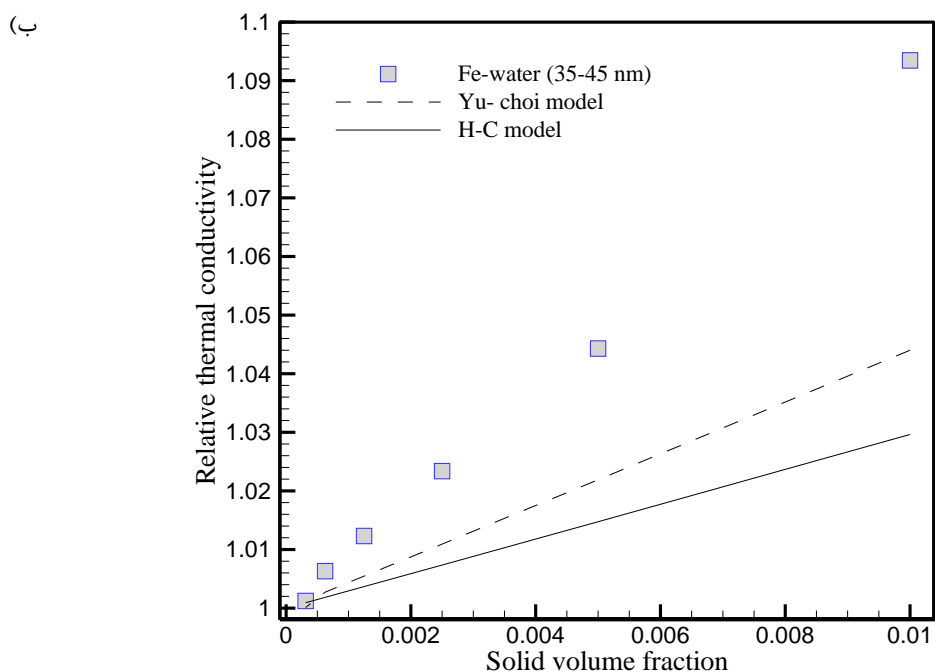
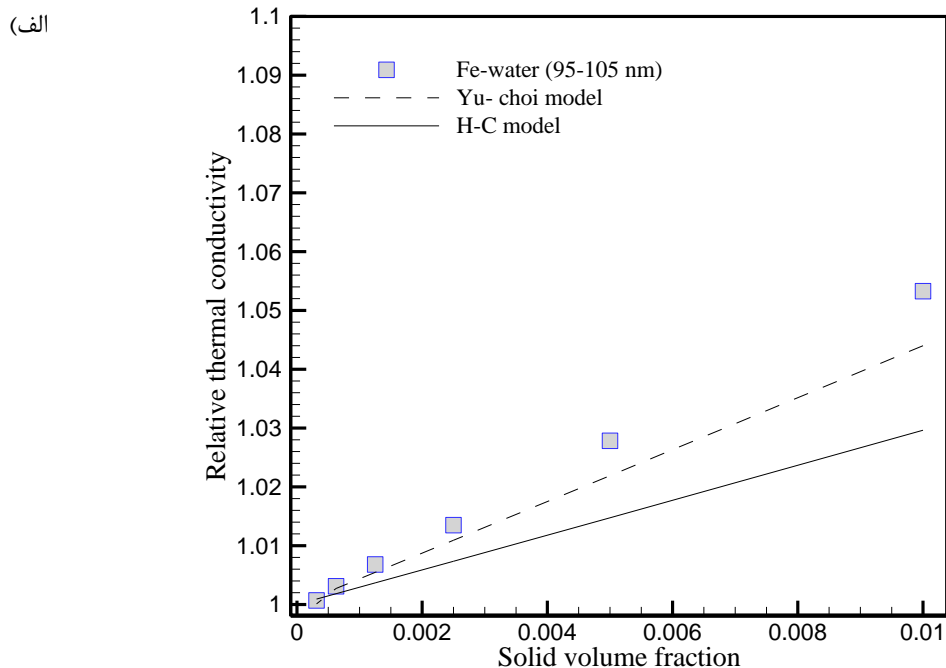
$$n = \frac{3}{\psi}$$

ψ نیز معرف کرویت ذره است که برای ذرات کروی برابر یک در نظر گرفته می‌شود.

یکی دیگر از مدل‌های متداول که بر پایه در نظر گرفتن نانولایه‌های میان ذرات جامد و سیال پایه شکل گرفته است، مدل یو و چوی [۲۵] می‌باشد. این مدل را می‌توان به صورت زیر بیان کرد:

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

تخمین ضریب هدایت حرارتی نانوسیال است، در این اشکال، به روشنی قابل مشاهده می‌باشد.



شکل (۷) مقایسه ضریب هدایت حرارتی حاصله از مدل‌های کلاسیک با مقادیر حاصله از آزمایش تجربی الف) در دمای ۲۷ درجه سانتی گراد (ب) در دمای ۵۵ درجه سانتی گراد

تجربی جدیدی با ابتناء بر یافته‌های تجربی ارائه خواهد شد. در این مدل ضعف بسیاری از مدل‌های کلاسیک در بی‌توجهی به دمای نانوسیال و اندازه قطر نانوذرات، پوشش داده شده است.

به منظور بسط و گسترش نتایج حاصله از این تحقیق در دماهای متفاوت و قطرهای مختلف نانوذرات و با توجه به اختلافی که میان مقادیر محاسبه شده با مدل‌های کلاسیک و مقادیر حاصله از نتایج تجربی وجود دارد، مدل

$$\frac{k_{nf}}{k_f} = A + (B \times T) + (C \times \varphi) + \left(D \times \frac{d_p}{10^9}\right) + (E \times (T^2)) + (F \times (\varphi^2)) + \left(G \times \left(\frac{d_p}{10^9}\right)^2\right) + (H \times (T^3)) + (I \times (\varphi^3)) + \left(J \times \left(\frac{d_p}{10^9}\right)^3\right) \quad (4)$$

حرارتی نانوسیال آب-آهن پیشنهاد می‌گردد. این رابطه به پارامترهایی مانند قطر نانوذرات، دمای نانوسیال و کسر حجمی نانوذرات وابسته می‌باشد. مقادیر مربوط به ثابت‌های رابطه بالا، در جدول (۸) آمده است.

۴-۲ ارائه مدل پیشنهادی تخمین ضریب هدایت حرارتی:

در ادامه این پژوهش، با استفاده از مقادیر ضریب هدایت حرارتی به دست آمده از طریق تجربی و استفاده از نرم افزارهای مربوطه، رابطه‌ای برای تخمین ضریب هدایت

جدول (۸) مقادیر ثابت‌های رابطه پیشنهادی به منظور تخمین ضریب هدایت حرارتی

A	B
1.094589	-0.30493×10^{-5}
C	D
8.74494	-0.497782×10^{-2}
E	F
0.846035×10^{-5}	-0.403043×10^3
G	H
0.7485×10^{-4}	-0.952078×10^{-7}
I	J
0.2516235×10^5	-0.354457×10^{-6}

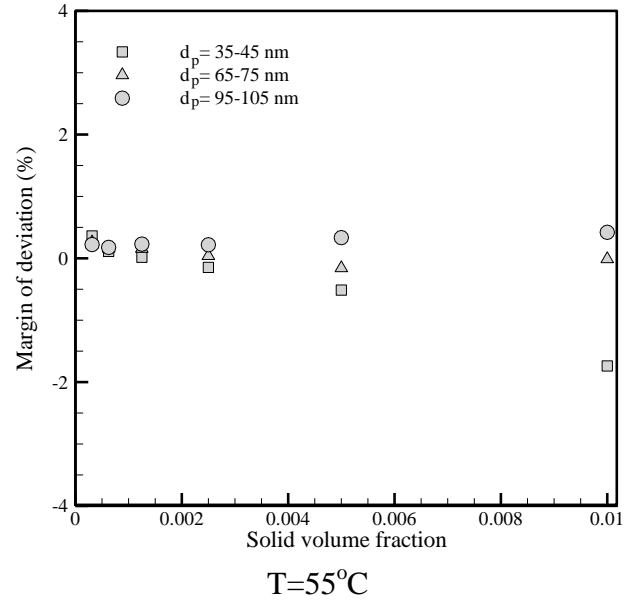
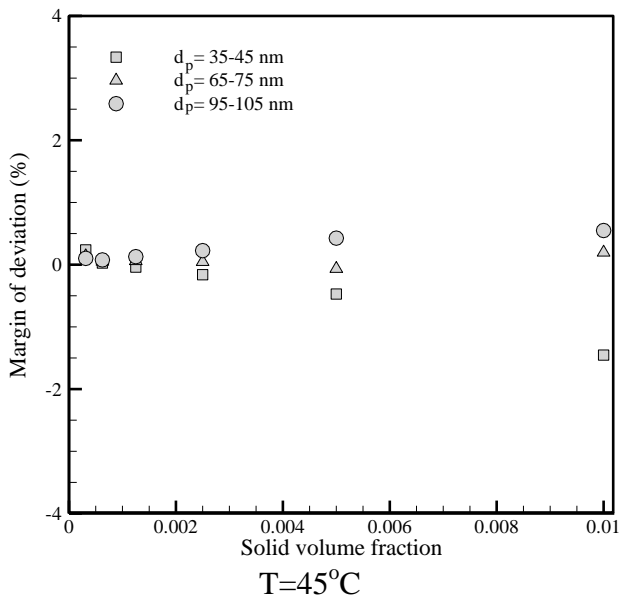
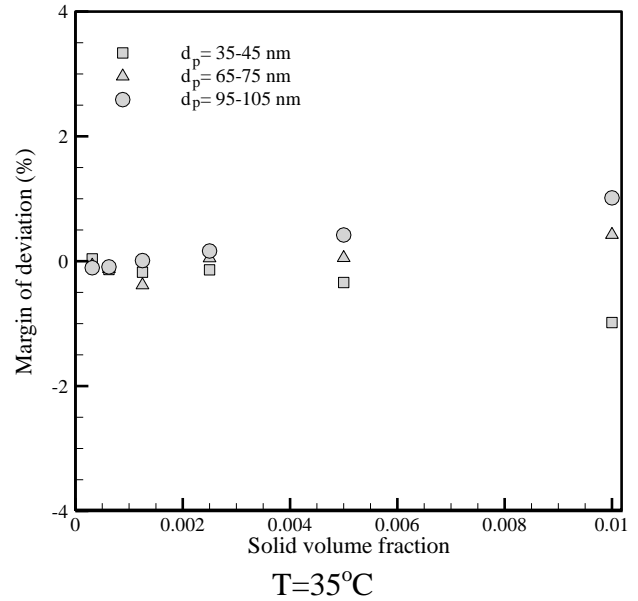
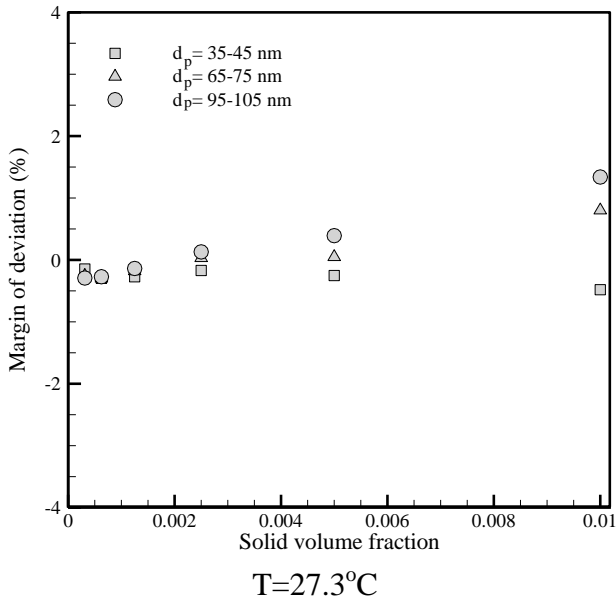
بدیهی است که کوچک بودن مقادیر حاشیه انحراف نشان‌دهنده تطابق بین مدل ارائه شده و نتایج تجربی می‌باشد. در شکل (۸) حاشیه انحراف مدل پیشنهادی در چهار دمای مورد مطالعه، ارائه شده است. همان‌گونه که در این اشکال مشخص است، حاشیه انحراف در تمامی حالات بسیار اندک و کمتر از ۲٪ می‌باشد. از سوی دیگر در کسرهای حجمی پایین، در تمامی دماهای مورد بررسی، حاشیه انحراف بسیار اندک و در برخی مواقع کمتر از ۰.۵٪ (برای کسرهای حجمی پایین تر از ۰.۲۵٪) می‌باشد. این موضوع نشان‌دهنده انطباق فوق العاده مدل پیشنهادی تخمین ضریب هدایت حرارتی با داده‌های به دست آمده از آزمایش‌های تجربی می‌باشد.

با توجه به مدل ارائه شده فوق می‌توان ضریب هدایت حرارتی نانوسیال را در قطرهای بین ۱۰ تا ۱۰۰ نانومتر، دمای نانوسیال از ۲۰ تا ۶۰ درجه سانتیگراد و کسرهای حجمی مورد مطالعه محاسبه نمود.

۴-۳ حاشیه انحراف مدل ارائه شده:

به منظور اطمینان از نتایج به دست آمده از مدل پیشنهادی و سنجش میزان تطابق آن بر مقادیر تجربی، حاشیه انحراف مدل به صورت زیر ارائه و محاسبه می‌گردد:

$$Dev = \left[\frac{(k_{Eq} - k_{Exp})}{k_{Exp}} \right] \times 100\%$$



شکل (۸) حاشیه انحراف بین ضریب هدایت حرارتی حاصله از مدل پیشنهاد شده با نتایج تجربی

۵- نتیجه گیری:

در تمامی کسرهای حجمی برای تمامی قطرهای فوق-الذکر، نانوسیال در دماهای ۳، ۲۷، ۳۵، ۴۵ و ۵۵ درجه سانتیگراد به صورت منفک اندازه‌گیری و مورد بحث قرار گرفت. پس از آن نتایج تجربی حاصله با مقادیر به دست آمده از مدل‌های کلاسیک پرکاربردی مانند همیلتون کروسر و یو چوی مورد مقایسه قرار گرفت. مهم‌ترین دستاوردهای این تحقیق عبارتند از:

در این نوشتار، تاثیر پارامترهایی مانند قطر نانوذرات، دمای نانوسیال و غلظت نانوذرات بر روی ضریب هدایت حرارتی نانوسیال آب- آهن به صورت آزمایشگاهی مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفت. نانوذرات آهن (Fe) در سه قطر مختلف ۳۵-۴۵ نانومتر، ۶۵-۷۵ نانومتر و ۹۵-۱۰۵ نانومتر پس از آماده‌سازی، در کسرهای حجمی ۰.۰۳۱۳٪، ۰.۰۶۲۵٪، ۰.۱۲۵٪، ۰.۵٪ و ۱٪ درون سیال پایه آب دیونیزه تعلیق شدند. ضمن بررسی ضریب هدایت حرارتی

نیستند که تغییرات موجود را به درستی پیش‌بینی نمایند. اختلاف میان داده‌های تجربی و مقادیر تخمینی در هنگام استفاده از ذرات با قطر کمتر و دمای بیشتر، بالاتر می‌رود. ۴- در این پژوهش با استفاده از مقادیر ضریب هدایت حرارتی به دست آمده از طریق تجربی و استفاده از نرم-افزارهای مربوطه، رابطه‌ای برای تخمین ضریب هدایت حرارتی نانوسیال آب-آهن پیشنهاد گردید. این رابطه به دمای نانوسیال، قطر نانوذرات و کسر حجمی وابسته می-باشد.

۵- حاشیه انحراف مدل پیشنهادی در چهار دمای مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج نشان می‌دهد بیشترین اختلاف میان نتایج تجربی و مقایر حاصله از مدل در حدود ۲٪ می‌باشد. این مقدار در کسر حجمی ۱٪ به دست می‌آید و در کسرهای حجمی پایین‌تر، حاشیه انحراف بسیار ناچیز می‌باشد.

۱- با افزایش قطر نانوذرات معلق در آب، ضریب هدایت حرارتی نانوسیال افزایش می‌یابد. به عنوان مثال ماکزیمم افزایش نسبت بهبود انتقال حرارت از قطر ۹۵-۱۰۵ به ۳۵-۴۵ در دمای ۲۷,۳ درجه سانتیگراد برابر ۶۳,۲٪ و این مقدار در دمای ۳۵ درجه سانتیگراد برابر ۶۵,۱٪ می‌باشد.

۲- با بالا رفتن دمای نانوسیال، ضریب هدایت حرارتی نانوسیال افزایش می‌یابد. مقایسه نسبت بهبود ضریب هدایت حرارتی در دمای ۵۵ نسبت به دمای ۲۷,۳ درجه سانتیگراد نشان می‌دهد که در کسر حجمی ۱٪ برای قطرهای ۳۵-۴۵، ۶۵-۷۵ و ۹۵-۱۰۵ نانومتر به ترتیب افزایشی برابر ۲۸,۱۲۸٪، ۲۳,۵۸۵٪ و ۲۵,۸۵۹٪ حاصل شده است.

۳- مقایسه یافته‌های تجربی با مقادیر به دست آمده از مدل کلاسیک تخمین ضریب هدایت حرارتی (مدل H-C و مدل یو-چوی)، نشان می‌دهد که این مدل‌ها قادر

مراجع

- [1] Hemat Esfe, M., ghadak, F., haghiri, A., mirtalebi S., (2012) Numerical Study of Mixed Convection Flows in a Two-sided Inclined Lid-driven Cavity Utilizing Nano-fluid with Various Inclination Angles and Ununiformed Temperature. *Aerospace Mechanics Journal.*; Vol. 8 (2), pp.69-83.
- [2] Abbasian Arani, A. A., Amani, J. and Hemmat Esfe, M., (2012) Numerical simulation of mixed convection flows in a square double lid-driven cavity partially heated using nanofluid, *Journal of nanostructure*, Vol. 2 , pp. 301-311.
- [3] Saedodin, S., Biglari, M., Hemmat Esfe, M., and Noroozi, M. J., (2013) Mixed Convection Heat Transfer Performance in a Ventilated Inclined Cavity Containing Heated Blocks: Effect of Dispersing Al₂O₃ in Water and Aspect Ratio of the Block, *Journal of Computational and Theoretical Nanoscience* Vol. 10.
- [4] Fereidoon, A., Saedodin, S., Hemmat Esfe, M. and Noroozi, M. J., (2013) Evaluation of mixed convection in inclined square lid driven cavity filled with Al₂O₃/water nanofluid, *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics*, Vol. 7(1), pp. 55-65.
- [5] Hemmat Esfe, M., Saedodin, S., (2012) . Flow behavior and thermal performance of double lid driven cavity subjected to nanofluid with variable properties. *Journal of Modeling in Engineering*. Vol. 10 (30) , pp. 43-60.
- [6] Lee, S., Choi, S. U. S., Li, S., Eastman, J. A. (1999). Measuring thermal conductivity of fluids containing oxide nanoparticles, *Trans. ASME, J. Heat Transfer*, Vol. 121, pp. 280-289.
- [7] Wang, X., Choi, S. U. S. (1999). Thermal conductivity of nanoparticle fluid mixture, *J. Thermophys. Heat Transfer*, Vol. 13, pp. 474-480.

- [8] Eastman, J. A., Choi, S. U. S., Li, S., Yu, W., Thomson, L. J. (2001). Anomalously increased effective thermal conductivities of ethylene glycol-based nanofluids containing copper nanoparticles, *Appl. Phys. Lett.* Vol. 78, pp. 18–20.
- [9] Xie, H., Fujii, M., Zhang, X. (2004). Effect of interfacial nanolayer on the effective thermal conductivity of nanoparticle-fluid mixture Institute for Materials Chemistry and Engineering, Kyushu University, Kasuga 816-825.
- [10] Murshed, S. M. S., Leong, K. C., Yang, C. (2005). Enhanced thermal conductivity of TiO₂- water based nanofluids, *Int. J. Therm. Sci.* Vol. 44, pp.367–373.
- [11] Das, S. K., Choi, S. U.S., Yu, W., Pradeep, T. (2008), *NANOFLUIDS*, pp. 9.
- [12] Karthik, R., Harish Nagarajan, R., Raja, B., Damodharan, P. (2012). Thermal conductivity of CuO–DI water nanofluids using 3-x measurement technique in a suspended micro-wire, *Experimental Thermal and Fluid Science.* Vol. 40, pp.1–9
- [13] Fedele, L., Colla, L., Bobbo, S.. (2012). Viscosity and thermal conductivity measurements of water-based nanofluids containing titanium oxide nanoparticles, *International Journal of Refrigeration* (2012), doi: 10.1016/j.ijrefrig. 03.012
- [14] A. Gavili, F. Zabihi, T.D. Isfahani, J. Sabbaghzadeh, The thermal conductivity of water base ferrofluids under magnetic field, *Experimental Thermal and Fluid Science* 41 (2012) 94–98.
- [15] R.M. Yasar, A. Mathias, F. Lars, W. Bernd, Thermal, electrical and magnetic studies of magnetite filled polyurethane shape memory polymers, *Materials Science and Engineering A — Structural Materials Properties Microstructure and Processing* 444 (2007) 227–235.
- [16] H. Zhu, C. Zhang, S. Liu, Y. Tang, Y. Yin, Effects of nanoparticle clustering and alignment on thermal conductivities of Fe₃O₄ aqueous nanofluids, *Applied Physics Letter* 89 (2006) 023123.
- [17] M. Abareishi, E. Goharshadi, S. Zebarjad, H.K. Fadafan, A. Youssefi, Fabrication characterization and measurement of thermal conductivity of Fe₃O₄ nanofluids, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* 322 (2010) 3895–3901.
- [18] V.E. Fertman, L.E. Golovicher, N.P. Matusевич, Thermal conductivity of magnetite magnetic fluids, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* 65 (1987) 211–14.
- [19] K. Parekh, H.S. Lee, Magnetic field induced enhancement in thermal conductivity of magnetite nanofluid, *Journal of Applied Physics* 107 (2010) 09A310.
- [20] W. Yu, H. Xie, L. Chen, Y. Li, Enhancement of thermal conductivity of kerosene-based Fe₃O₄ nanofluids prepared via phase-transfer method, *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects* 355 (2010) 109–113.
- [21] Murshed, S.M.S., Leong, K.C., Yang, C.(2005). Enhanced thermal conductivity of TiO₂- water based nanofluids, *Int. J. Therm. Sci.* Vol. 44 (4), pp. 367–373.
- [22] Wongcharee, Kh., Eiamsa-ard, S. (2011). Enhancement of heat transfer using CuO/ water nanofluid and twisted tape with alternate axis, *Int. Commun. Heat Mass Transfer.* Vol. 38 (6) ,pp.742–748.
- [23] Buongiorno, J. (2006). Convective transport in nanofluids, *J. Heat Transfer.* Vol. 128 (3), pp. 240–250.
- [24] Hemmat Esfe, M., Saedodin, S., Mahmoodi, M. (2013) Experimental studies on the convective heat transfer performance and thermophysical properties of MgO-Water nanofluid under turbulent flow, *Experimental Thermal and Fluid Science*, doi: [http://dx.doi.org /10.1016 /j.expthermflusci. 2013.08.023](http://dx.doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2013.08.023)
- [25] Yoo, D.H., Hong, K.S., Yang, H.S. (2007) Study of thermal conductivity of nanofluids for the application of heat transfer fluids, *Thermochimica Acta.* Vol. 455, pp. 66-69.
- [26] Challoner, A.R., Powell, R.W. (1956) Thermal conductivities of liquids: new determinations for seven liquids and appraisal of existing values, *Proceedings of the Royal Society of London. Series A. Mathematical and Physical Sciences.* Vol. 238, pp. 90-106.
- [27] Kurt, H., Kayfeci, M. (2009). Prediction of thermal conductivity of ethylene glycol/Water solutions by using artificial neural networks, *Applied Energy.* Vol. 86, pp. 2244-2248.

- [28] Czarnetzki, W., Roetzel, W. (1995). Temperature oscillation techniques for simultaneous measurement of thermal diffusivity and conductivity, *International Journal of Thermophysics*. Vol 16, pp. 413-422.
- [29] Cahill, D.G. (1990). Thermal conductivity measurement from 30 to 750 K: the 3w method, *Review of Scientific Instruments*. Vol. 61, pp.802-808.
- [30] Iranidokht, V., Hamian, S., Mohammadi, N., Behshad Shafii, M. (2013). Thermal conductivity of mixed nanofluids under controlled pH conditions, *International Journal of Thermal Sciences*. Vol. 74, pp. 63-71.
- [31] Hamilton, R., Crosser, O. (1962). Thermal conductivity of heterogeneous two component systems, *Ind. Eng. Chem. Fund.* Vol.1 (3), pp. 187–191.
- [32] Yu, W., Choi, S.U.S. (2003). The role of interfacial layers in the enhanced thermal conductivity of nanofluids: a renovated Maxwell model, *J. Nanopart. Res.* Vol. 5, pp. 167–171.
- [33] Yu, W., Xie, H., Chen, L., Li, Y. (2009). Investigation of thermal conductivity and viscosity of ethylene glycol based ZnO nanofluid, *Thermochimica Acta*. Vol. 491, pp. 92–96

Experimental investigation of the effect of diameter of nanoparticles and temperature on thermal conductivity of Fe-water nanofluid in low concentrations and developing a new model based on experimental data