

# تهیه و شناسایی نانوسیال های حاوی نانولوله های کربنی اصلاح شده با اسیدهای معدنی، سدیم دودسیل سولفات و نانوذرات مغناطیسی $Fe_2O_3$ و مقایسه ضریب هدایت حرارتی آن ها

محمدحسین آقابزرگ<sup>۱</sup> | علیمراد رشیدی<sup>۲\*</sup>

۱. گروه مکترونیک، دانشگاه علوم و تحقیقات دانشگاه آزاد اسلامی، کرمانشاه، ایران

۲. مرکز تحقیقات نانو فناوری، پژوهشگاه صنعت نفت، تهران، ایران

## چکیده

در این پژوهش برای بررسی و مقایسه شرایط بهبود ضریب هدایت حرارتی نانوسیال مغناطیسی با دیگر نانوسیالات، سه نمونه نانوسیال عاملدار، نانوسیال با ماده فعال سطحی و نانوسیال مغناطیسی با استفاده از هیبرید نانو لوله کربنی-اکسید آهن برای درصد های وزنی ۱٪، ۱۵٪، ۲۰٪ و ۳۰٪ که همگی زیر ۱٪ هستند در آب مقطر به عنوان سیال پایه تهیه شد. ابتدا برای نانو سیال عاملدار، نانو لوله های کربنی چند دیواره به روش اکسیداسیون اسیدی با گروه عاملی کربوکسیل عاملدار شد، سپس تهیه نانو سیالات با ماده فعال سطحی سدیم دو سولفات سولفات (SDS) صورت گرفت و برای نانوسیال مغناطیسی ابتدا سنتز نانو ذرات مغناطیسی هیبریدی  $CNT-Fe_3O_4$  با بکارگیری فرسوس و تولوئن انجام و درصدهای مختلف وزنی نانوسیال مغناطیسی تهیه شدند. نانو ذرات مغناطیسی هیبریدی سنتز شده با روش TEM شناسایی شدند. برای اولین بار در میان تمامی پژوهش های صورت گرفته تاکنون، ساخت و استفاده از نانو ذرات مغناطیسی هیبرید  $CNT-Fe_3O_4$ ، انجام شده است. ضریب هدایت حرارتی نمونه های تهیه شده با دستگاه KD۲ برای سه دمای ۲۵، ۳۵ و ۴۵ درجه سانتیگراد اندازه گیری شد. نتایج نشان دادند که برای درصد های وزنی زیر یک درصد، با افزایش دما و افزایش درصد وزنی نانوسیالات مغناطیسی در مقایسه با دوروش دیگر، افزایش ضریب هدایت حرارتی بیش تری را حاصل کرد.

**واژگان کلیدی:** ضریب هدایت حرارتی، نانوذرات اکسید آهن، نانوسیالات مغناطیسی، نانو لوله های کربنی، هیبرید.

## ۱. مقدمه

بیشترین تحقیقات روی هدایت حرارتی نانوسیالات، در زمینه سیالات حاوی نانوذرات اکسید فلزی انجام شده است. استفاده از نانو ذرات اکسیدهای فلزی برای افزایش ضریب هدایت حرارتی سیال پایه در تجهیزات انتقال گرما مورد توجه بسیاری از محققان بوده است. همچنین تحقیقات انجام شده بر روی نانو سیالات حاوی اکسیدهای فلزی مربوط به اکسیدهای آلومینیم، تیتانیوم و مس می باشد ولی در خصوص مقدار ضریب هدایت حرارتی نانو سیال مغناطیسی هیبرید نانو لوله های کربنی-اکسید آهن ( $CNT-Fe_3O_4$ ) بر پایه سیال آبی، تحقیقی صورت نگرفته است. انتخاب نانو ذرات اکسید آهن به این دلیل است که اکسید آهن در آب در مقایسه با اکسیدهای آلومینیم، تیتانیوم، روی و مس ماکزیمم افزایش هدایت حرارتی را از خود نشان می دهد [۱].

اما در تحقیقات صورت گرفته توسط پژوهشگران در خصوص نانو ذرات اکسید فلزی، ماسودا و همکارانش [۲]، افزایش ۳۰ درصدی هدایت گرما را با افزودن ۴/۳ درصد حجمی آلومینا به آب گزارش کرده اند.

لی و همکارانش [۳]، افزایش ۱۵ درصدی را برای همین نوع نانوسیال با همین درصد حجمی گزارش کرده است که تفاوت این نتایج را ناشی از تفاوت در اندازه نانوذرات به کار رفته در این دو تحقیق می داند. قطر متوسط ذرات آلومینای به کار رفته در آزمایش اول ۱۳ نانومتر و در آزمایش دوم ۳۳ نانومتر بوده است. همچنین لی بر روی هدایت گرمای نانو سیالات حاوی نانوذرات اکسید مس انجام داد که در مقایسه با نانوذرات آلومینا بهبود نسبتاً کمتری را برای ضریب هدایت حرارتی مشاهده کرد.

هیبرید اکسید آهن-نانولوله کربنی به عنوان نانوسیال در مقایسه با دیگر پژوهش‌ها استفاده شده است. از طرفی دیگر از آنجا که نانوسیالات مغناطیسی به طور همزمان خواص سیال و مغناطیسی را نشان می‌دهند، در صورت لزوم می‌توان نانوذرات مغناطیسی را با ایجاد یک میدان مغناطیسی به راحتی از سیال جدا کرد.

## ۲. بخش تجربی

در این پژوهش سه نمونه نانو سیال عاملدار شده، نانوسیال با ماده فعال سطحی و نانوسیال مغناطیسی تهیه و از لحاظ میزان ضریب هدایت حرارتی با یکدیگر در دماها و درصد های وزنی مختلف مقایسه و در جداول و نمودارها مورد بررسی قرار گرفتند.

### ۱.۲. روش تهیه نانوسیال عاملدار شده

برای عاملدار کردن مناسب ۱۰ گرم نانولوله های کربنی چند دیواره (MWCNT)، ابتدا ۳۰۰ میلی لیتر سولفوریک اسید ( $H_2SO_4$ ) و پس از آن ۱۰۰ میلی لیتر نیتریک اسید ( $HNO_3$ ) افزوده شد. نانوسیال آماده شده برای پراکنده سازی، (Dispersion) مناسب ذرات در سیال، داخل حمام اولتراسونیک تحت دمای اتاق با توان ۱۰۰ وات (KQ۲۲۰۰DE Ultrasonic cleanser) به مدت ۳ ساعت قرار گرفت. بعد از پراکنده سازی نانوسیال با مخلوط یخ و آب مقطر شستشو داده شد تا pH نانوسیال به عدد ۷ برسد. همچنین بر طبق روش گفته شده، شرایط برقراری پیوندها بر روی نانولوله ها با طیف IR مورد بررسی قرار گرفته است [۸].

از سویی دیگر با عاملدار کردن، سوسپانسیون نانولوله های کربنی پایداری خوبی در سیال پایه آب بدست می‌آورند و این به دلیل تغییر طبیعت آب گریز به آبدوست است که ناشی از تولید گروه هیدروکسیل است. درصد های وزنی استفاده شده ۰/۱٪، ۰/۱۵٪، ۰/۲٪ و ۰/۳٪ برای اندازه گیری هدایت حرارتی توسط دستگاه KD۲ طبق فرمول زیر بدست آمدند

$$(۱) \quad \text{مقدار درصد وزنی} = ۱۰۰ \times \frac{\text{مقدار نانوذره}}{\text{مقدار نانوسیال}}$$

$$(۲) \quad \text{مقدار نانو سیال} = \text{مقدار نانوذره} + \text{سیال پایه}$$

در حالی که ونگ و همکارش [۴] مقدار ۱۷ درصد افزایش هدایت گرما را برای فقط ۴٪ درصد حجمی از نانوذرات اکسید مس در آب گزارش کرده اند. برای نانو سیال با پایه اتیلن گلیکول، افزایش بالای ۴۰ درصد برای ۳٪ درصد حجمی مس با متوسط قطره نانومتر گزارش شده است.

اما برای نانو ذرات اکسید آهن نتایج حاصل از پژوهش دانشمندان اینگونه بود:

زای و همکارانش [۵] افزایش ۳۴ درصدی نانو ذرات مغناطیسی  $Fe_3O_4$  در نفت سفید که با الوئیک اسید پوشش داده شده اند را برای ۱ درصد حجمی گزارش کرده اند. پارخ و لی [۶] نیز در کاری مشابه با زای و همکارانش، افزایش ۳۰٪ هدایت حرارتی با کسر حجمی ۴/۷٪ تحت میدان مغناطیسی عرضی را مشاهده کردند. دلیل اختلاف نتایج بدست آمده را می‌توان به تفاوت شرایط ساخت نانو سیالات نسبت داد که یکی از این موارد، تغییر دما و مدت زمان گرم کردن است.

یو و همکاران [۷]، نفت سفید را بر اساس نانو سیال  $Fe_3O_4$  و اسید اولئیک بررسی کردند و افزایش ۳۴ درصدی هدایت حرارتی را برای کسر حجمی ۱٪ با ذرات متوسط به اندازه ۱۵۵ نانومتر تحت گستره دمایی ۱۰ تا ۶۰ درجه سانتی گراد بدست آوردند.

هدف از این تحقیق، بررسی ضریب هدایت انتقال حرارت نانو اکسید آهن در سیال آبی (نانوسیال مغناطیسی) به منظور بهبود انتقال حرارت بود بنابراین نانو سیالات حاوی نانو ذرات اکسید آهن در سیال پایه آبی با غلظت های حجمی مختلف ساخته و پارامترهای تأثیر درصد وزنی نانو ذرات بر روی میزان افزایش هدایت حرارتی نانو سیال و بررسی بهترین درصد وزنی برای بیش ترین ضریب هدایت حرارتی، همچنین اثر درصد های وزنی و تأثیر دما در سه حالت نانو سیال عاملدار، نانو سیال با ماده فعال سطحی و نانو سیال مغناطیسی بر روی ضریب هدایت حرارتی و مقایسه نمونه ها مورد بررسی قرار گرفت.

از طرفی دیگر همان گونه که مشاهده شد در پژوهش های صورت گرفته تمامی درصد های وزنی بالای ۱٪ هستند، در حالیکه در این پژوهش درصد های وزنی ۰/۱٪، ۰/۱۵٪، ۰/۲۰٪ و ۰/۳۰٪ مورد بررسی قرار گرفتند که همگی کم تر از ۱٪ درصد وزنی می باشند و بر این اساس میزان افزایش هدایت حرارتی برای درصدهای وزنی کم مورد بررسی قرار گرفت. همچنین برای نخستین بار از

صورت پذیرفت. برای انجام این کار فروسن به عنوان یک منبع کاتالیستی و تولوئن به عنوان منبع کربنی استفاده شدند. غلظت فروسن در تولوئن ۲/۵٪ و دمای تنظیم شده کوره هم ۱۰۰۰ درجه سانتیگراد در نظر گرفته شد. پس از آن که دمای کوره به تعادل رسید، گاز حامل نیتروژن (N<sub>۲</sub>) به مدت ۱۰ دقیقه قبل از آغاز واکنش، به منظور حذف هوا و ایجاد جو نیتروژن از داخل کوره عبور داده شد. نیتروژن وارد ظرف فلاسک شد و سپس شیر باز شد تا مخلوط تولوئن و فروسن از نازل اسپری عبور کند. مخلوط نیتروژن/فروسن/تولوئن بدون هیچ گونه حرارت دادنی با نرخ جریان ۲/۵ میلی‌لیتر/دقیقه به داخل راکتور از جنس استیل ۳۱۰ پاشیده شد. خروجی راکتور به حباب ساز گاز وصل بود. پس از تشکیل رسوب، کوره خاموش شد و تحت جریان نیتروژن تا دمای محیط خنک شد. پس از آن، فیلم سیاه تشکیل شده از هیبرید CNT-Fe<sub>۳</sub>O<sub>۳</sub> بر روی سطح داخلی راکتور، جمع آوری شد. نانوسیال مغناطیسی با درصد‌های وزنی ۰/۱٪، ۰/۱۵٪، ۰/۲٪ و ۰/۳٪ در آب مقطر تهیه شد. جدول ۳ نحوه تهیه هر درصد وزنی بزای نانوسیال مغناطیسی را نشان می‌دهد.

(۴)

مقدار نانوسیال مغناطیسی = مقدار نانولوله کربنی + مقدار فعال سطحی + سیال پایه

$$\text{مقدار درصد وزنی} = \frac{\text{مقدار نانوذره مغناطیسی}}{\text{مقدار نانوسیال مغناطیسی}} \times 100 \quad (۵)$$

جدول ۳ داده‌های آزمایشگاهی نانوسیال مغناطیسی در درصد‌های وزنی مختلف

نمونه	مقدار درصد وزنی	مقدار نانوذره مغناطیسی* (g)	مقدار ماده فعال سطحی (تر پلیمر)	مقدار نانوسیال مغناطیسی (g)
۱	۰/۱۰٪	۰/۰۵	۰/۰۵	۵۰
۲	۰/۱۵٪	۰/۰۷۵	۰/۰۷۵	۵۰
۳	۰/۲۰٪	۰/۱۰	۰/۱۰	۵۰
۴	۰/۳۰٪	۰/۱۵	۰/۱۵	۵۰

لازم به ذکر است به علت آنکه پلیمر (۳۱۰۰-Acumer) مقاومت بهتری در مقابل فشار و دما دارد و از سوی دیگر دارای سه گروه عاملی نسبت به سدیم دودسیل سولفات (SDS) است، بنابراین برای جلوگیری از خوشه ای شدن ذرات و پایداری و پراکندگی بهتر نانو ذرات اکسید آهن سیال پایه آب و همین طور حفظ خاصیت مغناطیسی ذرات از تر پلیمر برای ساخت نانوسیال

جدول ۱ داده‌های آزمایشگاهی نانوسیال عاملدار شده در درصد‌های وزنی مختلف (سیال پایه آب)

نمونه	مقدار درصد وزنی	مقدار نانوذره عاملدار شده	مقدار نانوسیال (g)
۱	۰/۱۰٪	۰/۰۵	۵۰
۲	۰/۱۵٪	۰/۰۷۵	۵۰
۳	۰/۲۰٪	۰/۱۰	۵۰
۴	۰/۳۰٪	۰/۱۵	۵۰

### ۲.۲ روش تهیه نانوسیال با ماده فعال سطحی

برای تهیه نانوسیالات آب/نانولوله کربنی از سورفکتانت سدیم دو دسیل سولفات (SDS) استفاده شد. مزیت استفاده از ماده فعال سطحی در آن است که پوشش لازم را برای ایجاد نیروهای دافعه الکترواستاتیک و جبران نیروهای جاذبه واندرالس بین ذرات را فراهم می‌کند [۷]. نحوه آماده سازی این مرحله بدین گونه بود که با نسبت سه برابر سورفکتانت به نانولوله کربنی اولیه و اضافه کردن آب مقطر وزن نانو سیال مورد نظر را به ۱۰۰ گرم رسانده شد. با توجه به هر کدام از درصد‌های وزنی مورد نیاز مقادیر سورفکتانت و نانولوله کربنی انتخاب و محاسبه شد. لازم به ذکر است برای نسبت سورفکتانت به نانو ذره با توجه به آنکه نسبت ۱ به ۱ و حتی ۲ به ۱ منجر به پایداری نشد، لذا از نسبت ۳ به ۱ که پایداری خوبی ایجاد کرد، استفاده شد.

داده‌ها و مقادیر محاسبه شده با توجه به فرمول زیر در جدول ۲ آمده است.

۳) مقدار نانوسیال = مقدار نانولوله کربنی + مقدار فعال سطحی + سیال پایه

جدول ۲ داده‌های آزمایشگاهی نانوسیال با ماده فعال سطحی در درصد‌های وزنی مختلف

نمونه	مقدار درصد وزنی	مقدار نانولوله کربنی* (g)	مقدار ماده فعال سطحی (سدیم دو دسیل سولفات)	مقدار نانوسیال (g)
۱	۰/۱۰٪	۰/۱	۰/۳۰	۱۰۰
۲	۰/۱۵٪	۰/۱۵	۰/۴۵	۱۰۰
۳	۰/۲۰٪	۰/۲۰	۰/۶۰	۱۰۰
۴	۰/۳۰٪	۰/۳۰	۰/۹۰	۱۰۰

\* (نسبت سورفکتانت به نانوذره: ۳ به ۱)

### ۳.۲ روش سنتز و تهیه نانوسیال مغناطیسی:

مرحله سوم تهیه نانوسیال مغناطیسی صورت گرفت که ابتدا سنتز نانو هیبرید CNT-Fe<sub>۳</sub>O<sub>۳</sub> (اکسید آهن- نانولوله کربنی)

یکی از عامل های ناپایداری این نوع نانوسیالات باشد. بنابراین، برای پایداری سامانه، این گونه نانوسیالات بایستی به دور از میدان های خارجی به کار گرفته شود و صرفاً برای جداسازی نانو ذرات مغناطیسی از سیال می توان از میدان های مغناطیسی یا از آهنربا های خاص استفاده نمود. اندازه گیری هدایت حرارتی با استفاده از دستگاه (KD۲ Pro (Decagon Devices صورت گرفت که این دستگاه از روش سیم داغ حالت ناپایدار استفاده می کند. دستگاه KD۲ Pro سه سنسور مختلف دارد. در این پروژه از سنسور ۶ سانتی متری استفاده شده است.



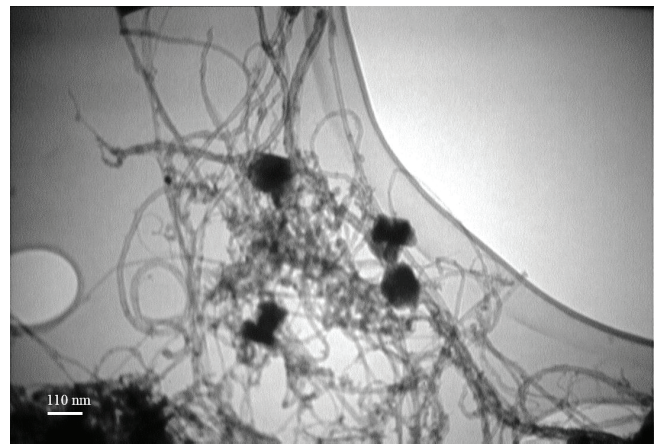
شکل ۲ | دستگاه اندازه گیری هدایت حرارتی KD۲ Pro

در این روش با استفاده از سیرکولاتور (Julabo F۱۲-ED) که به منظور خنک سازی استفاده شد، سوزن سنسور دستگاه KD۲ داخل ظرف مخصوص نمونه نانوسیال قرار گرفت و با توجه به دماهای انتخاب شده میزان هدایت حرارتی در فواصل معین اندازه گیری شد، این مراحل اندازه گیری برای درصد های وزنی و دماهای انتخابی ۳ مرتبه تکرار شد و برای هر کدام از درصد های وزنی ۱۰ تا ۱۵ بار کار اندازه گیری صورت پذیرفت و میانگین اعداد اندازه گیری شده ضرایب هدایت حرارتی محاسبه و به عنوان عدد نهایی درصد وزنی معین در دمای مشخص گزارش شده است.

مغناطیسی استفاده شد. در حالیکه برای حالت نانو سیال با ماده فعال سطحی، چون ذرات مغناطیسی وجود نداشت از ماده فعال سطحی SDS استفاده شده است.

### ۳. نتایج و بحث

در شکل ۱ تصاویر نانو ذرات مغناطیسی سنتز شده نمایش داده شده است. همان طور که مشاهده می شود نانو ذرات مغناطیسی به صورت نقاط تیره بر روی نانو لوله های کربنی قرار گرفته اند. با توجه به این تصویر اندازه نانو ذرات مغناطیسی در حدود ۲۰ نانومتر برآورد می شود.



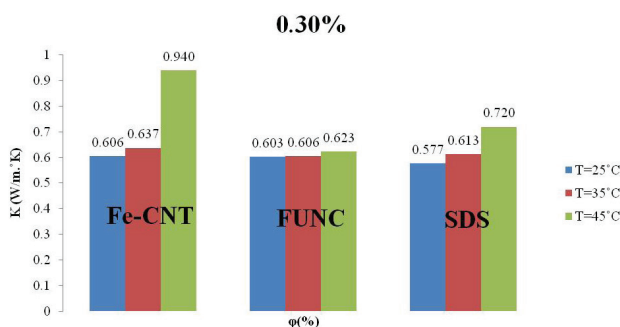
شکل ۱ | تصویر TEM نانو ذرات مغناطیسی سنتز شده

همچنین برای بررسی پایداری نانوسیال مغناطیسی (Fe-CNT) یکی از مهمترین روش های یافتن کیفیت پایداری نانوسیال مغناطیسی از طریق رفتار الکتروفوریتیک (حرکت ذرات یک محلول کلئیدی بر اثر جریان الکتریسیته) آن است. بر اساس یک تئوری پایداری، اگر پتانسیل زتا دارای مقدار مطلق بالایی باشد، دافعه الکتروستاتیک بین ذرات افزایش می یابد. که این منجر به پایداری خوب سوسپانسیون می شود. ذراتی که بار سطحی بالایی دارند تمایلی به تشکیل خوشه ندارند. میزان پتانسیل زتا نانو سیال مغناطیسی با ماده فعال سطحی تر پلیمر در آب، با دستگاه زتا پتانسیل مورد اندازه گیری قرار گرفت. عموماً یک سوسپانسیون با پتانسیل زتای بالاتر از  $\pm 30$  میلی ولت با پایداری خوب ارزیابی می گردد. پتانسیل زتای نانوسیال اکسید آهن در حضور ماده فعال سطحی تر پلیمر برابر  $35/3$  - میلی ولت است که دلیل بر پایداری آن می باشد. مقادیر کم تر از قدر مطلق  $30$  میلی ولت دلیل بر ناپایداری و یا پایداری کم نانوسیال بوده و نانو ذرات به سهولت در سیال پایه آب رسوب می نمایند. بدیهی است که به کارگیری میدان های مغناطیسی خارجی می تواند

**جدول ۵** داده‌های سه حالت نانوسیال با سورفکتانت، نانوسیال عاملدار شده و نانوسیال مغناطیسی در سه دمای ۲۵، ۳۵ و ۴۵ درجه سانتیگراد برای درصد وزنی ۰/۳۰.

CNT-Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> (W/m.K)	FUNC (W/m.K)	SDS (W/m.K)	T (°C) - (°F, °C)
۶۰۶/۰	۰/۶۰۳	۰/۵۷۷	۲۵
۶۳۷/۰	۰/۶۰۶	۰/۶۱۳	۳۵
۹۴۰/۰	۰/۶۲۳	۰/۷۲۰	۴۵

نمودار ۱ مقایسه جدول بالا را به خوبی نشان می‌دهد.



**نمودار ۱** نمودار ضریب هدایت حرارتی برای نمونه دارای درصد وزنی ۰/۳۰ برای سه حالت نانوسیال با سورفکتانت، نانوسیال عاملدار شده و نانوسیال مغناطیسی در سه دمای ۲۵، ۳۵ و ۴۵ درجه سانتیگراد (ضریب هدایت حرارتی برحسب W/m.K)

با بررسی نتایج در می‌یابیم که در حالت ۰/۳۰ درصد وزنی بیش‌ترین ضریب هدایت حرارتی در حالت نانوسیال مغناطیسی برای دمای ۴۵ درجه اتفاق افتاده است. می‌توان علت را اینگونه نتیجه گرفت که با افزایش درصد وزنی و افزایش دما در حالت نانوسیال مغناطیسی، ضریب هدایت حرارتی نیز افزایش می‌یابد. در واقع با بالا رفتن درصد وزنی میزان ضریب هدایت حرارت نانوسیال مغناطیسی هم افزایش یافت که خواص فیزیکی خاص این گونه نانو سیالات به علت مغناطیسی شدن نانو ذرات است که در درصد‌های وزنی بالاتر ضریب هدایت حرارتی را بیش‌تر افزایش می‌دهد [۱۴].

از طرفی دیگر در درصد‌های وزنی بالاتر خوشه تشکیل می‌شود و باعث ته نشینی و کاهش میزان پایداری نانو سیالات می‌گردد. همان‌طور که می‌دانیم خوشه‌ها مسیری با مقاومت حرارتی کم‌تر را برای عبور گرما فراهم می‌آورند.

همچنین مقدار افزایش ضریب هدایت حرارتی با افزایش دما برای ذرات کوچک قابل ملاحظه‌تر است ولی اگر دما را به طور مداوم بالا ببریم بر روی خواص مغناطیسی و ساختار نانو ذرات مغناطیسی تاثیر منفی می‌گذارد. بنابراین افزایش دما و غلظت

لازم به ذکر است تمامی اعداد محاسبه شده با خطای ۰/۹۹۹۵ مورد بررسی قرار گرفته‌اند. در میان سه دمای در نظر گرفته شده ۲۵، ۳۵ و ۴۵ درجه سانتیگراد، دمای ۴۵ درجه بهترین نتایج داده‌های آزمایشگاهی ضریب هدایت حرارتی را حاصل کرد که در جدول ۴ نشان داده شده است. همان‌طور که در جدول ۴ نشان داده شده، بیش‌ترین میزان هدایت حرارتی مربوط به نانو سیال مغناطیسی هیبرید اکسید آهن-نانو لوله کربنی برای درصد وزنی ۰/۳۰٪ با مقدار ۰/۹۴۰ W/m.K است. این میزان افزایش در مقایسه با کار دیگر پژوهشگران، بالاترین مقدار گزارش شده برای نانوسیال مغناطیسی اکسید آهن / آب است. [۱۳-۱۰]

**جدول ۴** داده‌های آزمایشگاهی ضریب هدایت حرارتی نانوسیالات و نانوسیال مغناطیسی برای دمای بهینه ۴۵ درجه سانتیگراد

ضریب هدایت حرارتی (W/m.K)	درصد وزنی نانوذره	سیال / نانوسیال
۶۰۹/۰	۰	آب
۶۹۶/۰	۰/۱	آب / MWNT+SDS (نانو سیال با ماده فعال سطحی)
۷۰۹/۰	۰/۱۵	
۶۹۷/۰	۰/۲۰	
۰/۷۲۰	۰/۳۰	
۰/۸۷۱	۰/۱	آب / FMWNT (نانو سیال عاملدار)
۰/۸۵۰	۰/۱۵	
۰/۷۳۳	۰/۲۰	
۰/۶۲۳	۰/۳۰	
۰/۷۸۸	۰/۱	آب / CNT-Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> (نانوسیال مغناطیسی)
۰/۷۹۲	۰/۱۵	
۰/۸۷۷	۰/۲۰	
۰/۹۴۰	۰/۳۰	

بنابراین برای مقایسه، هر سه نمونه تهیه شده در سه دمای ۲۵، ۳۵ و ۴۵ در درصد وزنی ۰/۳۰٪ در جدول ۵ مورد بررسی قرار گرفته‌اند.

### ۱.۳. بررسی هدایت حرارتی بر حسب دما

ضریب هدایت حرارتی در دماها و کسرهای حجمی مختلف برای نانوسیالات با سورفکتانت، عاملدار و همین طور نانوسیالات مغناطیسی را برای سه دمای ۲۵، ۳۵ و ۴۵ درجه سانتیگراد اندازه‌گیری و با یکدیگر مقایسه شده اند که ابتدا جداول مربوط به آنها و در ادامه نمودار داده‌ها رسم شده است. در جداول زیر هم درصدهای وزنی به همراه دما و مقدار نسبت هدایت حرارتی که از تقسیم ضریب هدایت حرارتی نانوسیال بر سیال پایه بدست آمده، نمایش داده شده اند. با مقایسه سه روش آزمایش صورت گرفته نانوسیال مغناطیسی بهترین عملکرد حرارتی را نسبت به سیال پایه آب دارد که نشان می‌دهد با توجه به نظریه هانگ و همکارانش [۱۸] شکست خوشه‌های نانو ذرات آهن توسط ارتعاش فرا صوت به خوبی انجام شده و بر نیروهای قوی واندروالس مابین ذرات مغناطیسی غلبه شده تا باعث افزایش هدایت حرارتی در مقایسه با نسبت های روش عاملدار و استفاده از ماده فعال سطحی قرار دارد. برای این منظور قبل از اندازه‌گیری هدایت حرارتی نمونه‌ها برای پراکنده سازی مناسب و انجام فرایند ذکر شده به مدت ۲۰ دقیقه تحت توان ۱۰۰ وات در دمای اتاق فرایند اولتراسونیک انجام شده است. از طرفی دیگر این میزان افزایش نسبت هدایت حرارتی در نانوسیال مغناطیسی را می‌توان اینگونه توجیه کرد که سوسپانسیون های با تجمع فراکتالی افزایش بیش تری در ضریب هدایت حرارتی را نشان می‌دهند [۱۹].

در جداول ۷ تا ۹ مقادیر ضریب هدایت حرارتی که توسط دستگاه KD۲ اندازه‌گیری شده برای هر کدام از سه روش استفاده شده به طور مجزا آورده شده است.

**جدول ۷** داده‌های نانو سیال مغناطیسی با نسبت ضریب هدایت حرارتی نانو سیال به سیال پایه آب

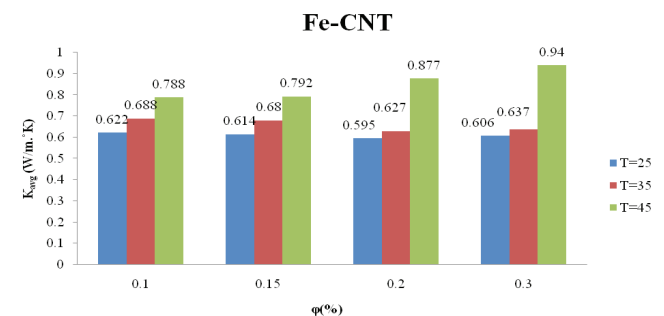
Fe-CNT [K(Nano fluid / K(Base fluid)]				
دما (°C)	%/۱۰	%/۱۵	%/۲۰	%/۳۰
۲۵	۱/۰۳۰	۱/۰۱۵	۱/۰۸۶	۱/۰۰۳
۳۵	۱/۱۳۱	۱/۱۱۸	۱/۱۹۷	۱/۰۴۷
۴۵	۱/۲۹۴	۱/۳۰۰	۱/۴۴۰	۱/۵۴۳

تاثیر منفی بر عملکرد هدایت حرارتی می‌گذارد. پس از بررسی هر یک از درصدهای وزنی به صورت مجزا، شرایط هدایت حرارتی نانو سیال مغناطیسی در جدول ۶ مورد ارزیابی قرار گرفت:

**جدول ۶** داده‌های حالت نانوسیال مغناطیسی در سه دمای ۲۵، ۳۵ و ۴۵ درجه سانتیگراد برای هر چهار درصد وزنی ۱۰٪، ۱۵٪، ۲۰٪ و ۳۰٪

Fe-CNT (۰,۱٪)	Fe-CNT (۰,۱۵٪)	Fe-CNT (۰,۲۰٪)	Fe-CNT (۰,۳۰٪)	T (°C)
۰/۶۲۲	۰/۶۱۴	۰/۵۹۵	۰/۶۰۶	۲۵
۰/۶۸۸	۰/۶۸۰	۰/۶۲۷	۰/۶۳۷	۳۵
۰/۷۸۸	۰/۷۹۲	۰/۸۷۷	۰/۹۴۰	۴۵

نمودار ۲ تغییرات نانوسیال مغناطیسی برای چهار درصد وزنی ۱٪، ۱۵٪، ۲۰٪، ۳۰٪ در سه دمای ۲۵، ۳۵ و ۴۵ درجه سانتیگراد مورد بررسی قرار گرفتند.



**نمودار ۲** نمودار ضریب هدایت حرارتی برای هر چهار درصد وزنی ۱۰٪، ۱۵٪، ۲۰٪ و ۳۰٪ در حالت نانوسیال مغناطیسی در سه دمای ۲۵، ۳۵ و ۴۵ درجه سانتیگراد (ضریب هدایت حرارتی بر حسب W/m.K)

همان طور که در نمودار مشاهده می‌شود برای نانو سیال مغناطیسی با افزایش دما و درصد وزنی ضریب هدایت حرارتی افزایش یافته که بیشترین میزان هدایت حرارتی در وضعیت ۳۰٪ درصد وزنی و در دمای ۴۵ درجه سانتیگراد رخ داده است. در غلظت های ۲٪ و ۳٪ با افزایش دما از ۳۵ به ۴۵، افزایش جهشی در ضریب هدایت حرارتی ایجاد شده است، علت این غیر خطی بودن افزایش هدایت حرارتی به خاطر کنش ایجاد شده بین ذرات است. از سویی دیگر سوسپانسیون ها با تجمع فراکتالی، افزایش بیش تری در ضریب هدایت حرارتی ایجاد می‌کند. نتایج مشابهی برای افزایش دما و درصد وزنی که موجب افزایش ضریب هدایت حرارتی می‌شود، در دیگر آزمایشات توسط چو، مینستا و تیموفیوا برای نانوسیال CuO, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> و TiO<sub>2</sub> هم گزارش شده است [۱۷-۱۵].

نوع نانو ذره و نیز ماهیت سیال پایه اشاره کرد. مشاهدات تجربی نشان می دهند که با افزایش درصد وزنی نانو ذرات عموماً هدایت حرارتی سیال رشد صعودی می کند [۲۱]. مکانیزم دیگری که بر افزایش ضریب هدایت حرارتی تأثیر گذار بوده حرکت براونی است که وابستگی زیادی با دمای سیال دارد. بنابراین مقدار افزایش ضریب هدایت حرارتی با دما برای ذرات کوچکتر در دماهای بالاتر به مراتب بیش تر از افزایش هدایت حرارتی برای ذرات درشت تر است در دمای پایین حرکت براونی از اهمیت کمتری برخوردار بوده و لذا اختلاف افزایش ضریب هدایت حرارتی توسط ذرات کوچک تر و درشت تر کاهش پیدا می کند [۲۲-۲۳].

جدول ۱۰ مقادیر افزایش هدایت حرارتی برای چهار درصد وزنی در نظر گرفته شده برای بهترین حالت دمایی یعنی ۴۵ درجه سانتیگراد را نشان می دهد

**جدول ۱۰** اثر دما روی ضریب هدایت حرارتی نانو سیال مغناطیسی آب / CNT در دمای ۴۵ درجه سانتیگراد طبق داده های آزمایشگاهی

درصدهای وزنی نانو سیال مغناطیسی	افزایش هدایت حرارتی %
٪۰/۱۰	۲۹/۴۰
٪۰/۱۵	۳۰
٪۰/۲۰	۴۴
٪۰/۳۰	۵۴/۳

جدول ۱۱ میزان افزایش ضریب هدایت حرارتی نانوسیال مغناطیسی به سیال پایه آب را نشان می دهد که طبق فرمول زیر محاسبات جدول انجام شده است:

(۶)

$$\text{درصد افزایش هدایت حرارتی} = \frac{\text{سیال پایه} - \text{نانوسیال مغناطیسی}}{\text{سیال پایه}}$$

همان طور که مشاهده شد برای نانو سیال مغناطیسی ساخته شده با افزایش دما میزان هدایت حرارتی هم افزایش یافته است که با یافته های تجربی تبیین شده که اشاره دارد با افزایش دما اثر نانو ذرات بر افزایش هدایت حرارتی نیز به شدت افزایش می یابد، مطابقت دارد [۲۴]. لذا با توجه به مغناطیسی بودن نانو ذرات،

**جدول ۸** داده های نانو سیال عاملدار با نسبت ضریب هدایت حرارتی نانو سیال به سیال پایه آب

FUNCTIONAL [K(Nano fluid / K(Base fluid))]				
دما (°C)	٪۰/۱۰	٪۰/۱۵	٪۰/۲۰	٪۰/۳۰
۲۵	۰/۹۴۵	۱/۰۱۱	۱/۰۲۰	۰/۹۹۸
۳۵	۰/۹۱۴	۱/۱۰۸	۱/۲۳۰	۰/۹۹۷
۴۵	۱/۴۳۰	۱/۳۹۶	۱/۲۰۳	۱/۰۲۲

**جدول ۹** داده های نانو سیال با ماده فعال سطحی با نسبت ضریب هدایت حرارتی نانو سیال به سیال پایه آب

SURFACTANT (SDS) [K(Nano fluid / K(Base fluid))]				
دما (°C)	٪۰/۱۰	٪۰/۱۵	٪۰/۲۰	٪۰/۳۰
۲۵	۱/۰۴۳	۰/۹۷۸	۰/۹۰۵	۰/۹۵۵
۳۵	۱/۱۵۱	۰/۹۵۲	۱/۰۵۵	۱/۰۰۸
۴۵	۱/۱۴۲	۱/۱۶۴	۱/۱۴۴	۱/۱۸۲

نتایج نشان می دهد که درصد بهبود هدایت حرارتی نانو سیالات مغناطیسی به مانند نانو سیالات عموماً در دمای بالا بیش تر است و به طور کلی با افزایش دما و درصد وزنی (غلظت) میزان ضریب هدایت حرارتی هم افزایش یافته که دلیل این افزایش به این صورت است که با افزودن ذرات جامد نانومتری از قبیل ذرات نانومتری فلزی و اکسیدی و یا نانولوله های کربنی به یک سیال، افزایش قابل توجه هدایت حرارتی مخلوط نسبت به سیال پایه ایجاد شد. از طرفی با توجه به تحقیق پاول کپلینسکی و همکارانش، فلزات در شکل جامد خود دارای هدایت حرارتی بسیار بالایی نسبت به سیالات هستند، از آنجایی که نانو ذرات مغناطیسی به عنوان ماده جامد درون سیال قرار گرفته اند و از طرفی دیگر چون هدایت حرارتی سیالات فلزی نیز بسیار بیش تر از سیالات غیر فلزی است در نتیجه سیالات حاوی ذرات جامد معلق شده دارای هدایت حرارتی بیش تری نسبت به سیال خالص است که نتایج حاصل شده طبق جدول و آزمایشات انجام شده در این پژوهش مطابقت مناسبی با نظریه این دانشمندان دارد [۲۰].

از سویی دیگر هدایت حرارتی نانوسیال به چندین پارامتر بستگی داشته و از آنها متاثر است. از جمله این پارامترها می توان به غلظت ذرات نانو، دما، pH سوسپانسیون، اندازه نانوذرات،

مهمترین نتایج کلیدی در این تحقیق به شرح زیر می باشند:

- با افزایش غلظت نانوذرات میزان ضریب هدایت حرارتی نانوسیال مغناطیسی اکسید آهن / آب افزایش می یابد. به طوری که میزان افزایش هدایت حرارتی نانوسیال با درصدهای وزنی ۱۰٪، ۱۵٪، ۲۰٪، ۳۰٪ و ۴۰٪ از نانوسیال مغناطیسی نسبت به سیال پایه در دمای ۴۵ درجه سانتیگراد به ترتیب ۲۹/۴، ۳۰، ۴۴ و ۵۴/۳ درصد، می باشد.

- در کار حاضر بالاترین میزان افزایش ضریب هدایت حرارتی برای نانوسیال مغناطیسی اکسید آهن / آب با غلظت ۳۰٪ درصد وزنی برابر ۵۴/۳ درصد در دمای ۴۵ درجه سانتیگراد بوده است که این میزان افزایش در مقایسه با کار دیگر محققان، بالاترین مقدار گزارش شده برای نانوسیال مغناطیسی اکسید آهن / آب تاکنون می باشد.

- میزان هدایت حرارتی نانوسیال مغناطیسی با افزایش دما، افزایش می یابد برای نانو ذرات در محدوده دمای ۲۵ تا ۴۵ درجه سانتی گراد به عنوان نمونه غلظت حجمی ۱۰٪ درصد، میزان افزایش در دمای ۲۵، ۳۵ و ۴۵ درجه سانتی گراد به ترتیب ۳٪، ۱۳/۱٪ و ۲۹/۴٪ درصد و همچنین برای نانو ذرات در محدوده دمای ۲۵ تا ۴۵ درجه سانتی گراد و غلظت حجمی ۲۰٪ درصد، میزان افزایش در دمای ۲۵، ۳۵ و ۴۵ درجه سانتی گراد به ترتیب ۸/۶٪، ۱۹/۷٪ و ۴۴٪ درصد بوده است.

می توان نتیجه گرفت که با مغناطیسی کردن نانو ذرات درصد افزایش ضریب هدایت حرارتی به میزان قابل توجهی بهبود می یابد. در جدول ۱۰ به صورت تفکیک شده برای هر درصد وزنی و سه دمای در نظر گرفته شده، افزایش درصد هدایت حرارتی نشان داده شده، به عنوان نمونه برای ۱/۰٪ درصد وزنی نانو سیال مغناطیسی در دمای ۴۵ درجه سانتیگراد میزان افزایش هدایت حرارتی ۲۹/۴٪ نسبت به سیال پایه مشاهده شد. با افزایش غلظت نانوذرات میزان ضریب هدایت حرارتی نانوسیال مغناطیسی اکسید آهن / آب افزایش می یابد. به طوری که میزان افزایش هدایت حرارتی نانوسیال با درصدهای وزنی ۱۰٪، ۱۵٪، ۲۰٪، ۳۰٪ و ۴۰٪ از نانوسیال مغناطیسی نسبت به سیال پایه در دمای ۴۵ درجه سانتیگراد به ترتیب ۲۹/۴، ۳۰، ۴۴ و ۵۴/۳ درصد است. قابل ذکر است میزان غلظت نانوذرات اکسید آهن در سیال پایه آبی باید بهینه شود. زیرا در غلظت های بالاتر از مقدار بهینه، نانوذرات کلوخه شده و باعث عدم پایداری نانوسیال و افت کارایی مبدل حرارتی می شوند. بنابراین در روش نانو سیال مغناطیسی به دلیل اشباع شدن ذرات مغناطیسی و عدم افزایش هدایت حرارتی در غلظت های بالاتر از ۰/۳ درصد وزنی، مقدار بهینه ۰/۳ درصد وزنی در نظر گرفته شد.

#### ۴. نتیجه گیری

نانوفناوری یکی از فناوری های کلیدی و تأثیرگذار در افزایش راندمان حرارتی دستگاهها و تجهیزات تبادل گرما و سرما و همچنین کاهش مصرف انرژی در آنها می باشد. نانوذرات هیبرید اکسید آهن-نانولوله کربنی به دلیل ابعاد نانومتری، مساحت سطح ویژه بالایی داشته و فعالیت سطحی قوی تر نسبت به مواد با ابعاد میکرو و معمولی دارند. لذا حضور آنها در سیال پایه به طور قابل ملاحظه ای باعث افزایش ضریب هدایت حرارتی می شود. در این تحقیق سه نوع نانوسیال طراحی و ساخته شد. نانو سیال عاملدار به روش دو مرحله ای، نانو سیال با ماده فعال سطحی و نانو سیال مغناطیسی به روش تک مرحله ای در سیال پایه آبی ساخته شد. اثر پارامترهای مختلف شامل درصد وزنی و اندازه نانوذرات، دما، مقدار درصد وزنی ماده فعال سطحی و مغناطیسی شدن نانو ذرات بر میزان ضریب هدایت حرارتی نانوسیال های آماده شده مورد بررسی قرار گرفت.



## مراجع

- [1] U. Ojha, S. Das, and S. Chakraborty, "Stability, pH and viscosity relationships in zinc oxide based nanofluids subject to heating and cooling cycles," *J. Mater. Sci. Eng.*, vol. 4, no. 7, pp. 24–29, 2010.
- [2] H. Masuda, A. Ebata, and K. Teramae, "Alteration of thermal conductivity and viscosity of liquid by dispersing ultra-fine particles. Dispersion of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, SiO<sub>2</sub> and TiO<sub>2</sub> ultra-fine particles," 1993.
- [3] Q. Li, Y. Xuan, and J. Wang, "Experimental investigations on transport properties of magnetic fluids," *Exp. Therm. Fluid Sci.*, vol. 30, no. 2, pp. 109–116, 2005.
- [4] J.X. Wang, H.T. Zhu, C.Y. Zhang, S.B. Chang, "Preparation of CuO nanoparticles under ultrasonic and microwave irradiation", 14<sup>th</sup> Chinese Advanced Ceramics Conference, Luoyang, China, 2006.
- [5] W. Yu, H. Xie, L. Chen, and Y. Li, "Enhancement of thermal conductivity of kerosene-based Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> nanofluids prepared via phase-transfer method," *Colloids Surfaces A Physicochem. Eng. Asp.*, vol. 355, no. 1, pp. 109–113, 2010.
- [6] K. Parekh and H. S. Lee, "Magnetic field induced enhancement in thermal conductivity of magnetite nanofluid," *J. Appl. Phys.*, vol. 107, no. 9, p. 09A310, 2010.
- [7] W. Yu, H. Xie, L. Chen, and Y. Li, "Enhancement of thermal conductivity of kerosene-based Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> nanofluids prepared via phase-transfer method," *Colloids Surfaces A Physicochem. Eng. Asp.*, vol. 355, no. 1, pp. 109–113, 2010.
- [8] A. Nasiri, M. Shariaty-Niasar, A. Rashidi, A. Amrollahi, and R. Khodafarin, "Effect of dispersion method on thermal conductivity and stability of nanofluid," *Exp. Therm. fluid Sci.*, vol. 35, no. 4, pp. 717–723, 2011.
- [9] Y. Hwang, J.-K. Lee, J.-K. Lee, Y.-M. Jeong, S. Cheong, Y.-C. Ahn, and S. H. Kim, "Production and dispersion stability of nanoparticles in nanofluids," *Powder Technol.*, vol. 186, no. 2, pp. 145–153, 2008.
- [10] V. Bashtovoy and B. M. Berkovsky, "Magnetic fluids and applications handbook," *Ser. Learn. Mater. New York Begell house*, 1996.
- [11] A. Gavili, F. Zabihi, T. D. Isfahani, and J. Sabbaghzadeh, "The thermal conductivity of water base ferrofluids under magnetic field," *Exp. Therm. Fluid Sci.*, vol. 41, pp. 94–98, 2012.
- [12] L. S. Sundar, M. K. Singh, and A. C. M. Sousa, "Investigation of thermal conductivity and viscosity of Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> nanofluid for heat transfer applications," *Int. Commun. Heat Mass Transf.*, vol. 44, pp. 7–14, 2013.
- [13] Y. Ding, H. Alias, D. Wen, and R. A. Williams, "Heat transfer of aqueous suspensions of carbon nanotubes (CNT nanofluids)," *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 49, no. 1, pp. 240–250, 2006.
- [14] A. Gavili, F. Zabihi, T. D. Isfahani, and J. Sabbaghzadeh, "The thermal conductivity of water base ferrofluids under magnetic field," *Exp. Therm. Fluid Sci.*, vol. 41, pp. 94–98, 2012.
- [15] B. C. Pak and Y. I. Cho, "Hydrodynamic and heat transfer study of dispersed fluids with submicron metallic oxide particles," *Exp. Heat Transf. an Int. J.*, vol. 11, no. 2, pp. 151–170, 1998.
- [16] E. Timofeeva, A. Gavrilov, J. McCloskey, Y. Tolmachev, S. Sprunt, L. Lopatina, and J. Selinger, "Thermal conductivity and particle agglomeration in alumina nanofluids: Experiment and theory," *Phys. Rev. E*, vol. 76, no. 6, p. 061203, 2007.
- [17] H. A. Mints, G. Roy, C. T. Nguyen, and D. Doucet, "New temperature dependent thermal conductivity data for water-based nanofluids," *Int. J. Therm. Sci.*, vol. 48, no. 2, pp. 363–371, 2009.
- [18] K. S. Hong, T.-K. Hong, and H.-S. Yang, "Thermal conductivity of Fe nanofluids depending on the cluster size of nanoparticles," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 88, no. 3, p. 31901, 2006.
- [19] S. Kakac and A. Pramuanjaroenkij, "Review of convective heat transfer enhancement with nanofluids," *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 52, no. 13, pp. 3187–3196, 2009.
- [20] P. Keblinski, J. A. Eastman, and D. G. Cahill, "Nanofluids for thermal transport," *Mater. today*, vol. 8, no. 6, pp. 36–44, 2005.
- [21] S. K. Das, S. U. Choi, W. Yu, and T. Pradeep, *Nanofluids: science and technology*. John Wiley & Sons, 2007.
- [22] P. K. Singh, P. V. Harikrishna, T. Sundararajan, and S. K. Das, "Experimental and numerical investigation into the hydrodynamics of nanofluids in microchannels," *Exp. Therm. Fluid Sci.*, vol. 42, pp. 174–186, 2012.
- [23] H. E. Patel, T. Sundararajan, and S. K. Das, "An experimental investigation into the thermal conductivity enhancement in oxide and metallic nanofluids," *J. Nanoparticle Res.*, vol. 12, no. 3, pp. 1015–1031, 2010.
- [24] S. K. Das, N. Putra, P. Thiesen, and W. Roetzel, "Temperature dependence of thermal conductivity enhancement for nanofluids," *J. Heat Transfer*, vol. 125, no. 4, pp. 567–574, 2003.

# Preparation and Characterization of Nanofluids Containing Carbon Nanotubes Modified Using Inorganic Acids, Sodium Dodecyl Sulfate and Magnetic Nanoparticles $\text{Fe}_2\text{O}_3$ and Comparison of Their Thermal Conductivity Coefficient

M.H. Aghabozorg<sup>1</sup> | A.M. Rashidi<sup>\*2</sup>

1.Department of Mechatronics Engineering, Research and Science Azad University, Kermanshah, Iran

2.Nanotechnology Research Center, Research Institute of Petroleum Industry, Tehran, Iran

## Abstract

In this study for comparing the thermal conductivity of magnetic nanofluids with other nanofluids, three sample nanofluids prepared. Functionalized nanofluids, nanofluids with surface active substance and magnetic nanofluids using hybrid carbon nanotube-iron oxide for weight percentages under 1% in distilled water as a base fluid. First functionalized nanofluids, multi-walled carbon nanotubes functionalized with carboxyl functional group was pickling, then preparing nanofluids with Sodium dodecyl sulfate (SDS) surfactant then magnetic nanoparticles was synthesized with hybrid  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ -CNT for the first time. The thermal conductivity coefficient were measured by KD2pro device. The results showed that with enhancement of temperature and weight percentage the thermal conductivity coefficient were increased. magnetic nanofluids showed higher thermal conductivity in comparison with functionalized and nanofluids with surfactant SDS.

## Keywords

Magnetic Nanofluids, Thermal conductivity coefficient, Heat transfer, Iron oxide nanoparticles, Hybrid.