

## مطالعه تجربی تأثیر پارامترهای مؤثر بر ضریب هدایت حرارتی نانوسیال هیبریدی پنج جزئی

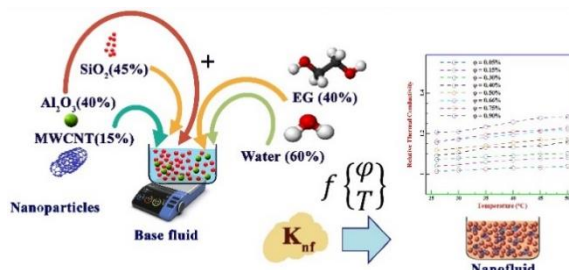
محمد همت اسفه<sup>\*۱</sup>، سیدمجید مطلبی<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup>دانشیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه جامع امام حسین (ع)، تهران، ایران  
<sup>۲</sup>آکارشناسی ارشد، گروه مهندسی شیمی، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه جامع امام حسین (ع)، تهران، ایران

### برجسته‌ها

- بیش‌ترین افزایش ضریب هدایت حرارتی به میزان ۲۸/۳٪ در کسر حجمی و دمای ۵۰ °C و ۰/۱۹٪ حاصل شد.
- ضریب هدایت حرارتی نسبی نانوسیال در کسر حجمی‌ها و دماهای بالا، بسیار بیش‌تر از کسر حجمی‌های پایین است.

### چکیده گرافیکی



### مشخصات مقاله

تاریخچه مقاله:

نوع مقاله: علمی پژوهشی

دریافت: ۱۴۰۱/۰۲/۱۶

بازنگری: ۱۴۰۱/۰۳/۱۹

پذیرش: ۱۴۰۱/۰۵/۰۱

ارائه برخط: ۱۴۰۱/۰۵/۲۴

\*نویسنده مسئول:

m.hemmatesfe@semnan.ac.ir

کلیدواژه‌ها:

نانوسیالات هیبریدی

ضریب هدایت حرارتی

مطالعه تجربی

اعتبار سنجی مدل

### چکیده

در این پژوهش رفتار حرارتی نانوسیال هیبریدی پنج جزئی  $\text{SiO}_2$  (۴۵٪) -  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (۴۰٪) -  $\text{MWCNT}$  (۱۵٪) /  $\text{Water}$  (۶۰٪) -  $\text{EG}$  (۴۰٪) در شرایط آزمایشگاهی مختلف مورد تجزیه و تحلیل و بررسی قرار گرفت. بررسی این نانوسیال با توجه به اهمیت نانولوله‌های کربنی و اینکه نانوسیالات هیبریدی دارای خواص ویژه‌ای هستند و کم بودن مطالعاتی با حضور سه نانوذره و دو سیال پایه، دارای اهمیت است. اندازه‌گیری‌های تجربی ضریب هدایت حرارتی توسط دستگاه KD2 Pro در کسر حجمی‌های ۰/۰۹ - ۰/۰۵ و دماهای ۲۶-۵۰ °C انجام گردید. برای شناسایی، تأیید ساختار و مورفولوژی نانوذرات از روش‌های عکس‌برداری TEM، SEM و آنالیز XRD استفاده گردید. نتایج نشان داد که ضریب هدایت حرارتی نسبی در کسر حجمی‌ها و دماهای بالا، بسیار بیش‌تر از کسر حجمی‌های پایین است. علت این موضوع، افزایش انرژی جنبشی و حضور بیش‌تر نانوذرات است. همچنین افزایش دما تأثیر کمی بر روی افزایش ضریب هدایت حرارتی نسبی داشت. بیش‌ترین افزایش ضریب هدایت حرارتی به میزان ۲۸/۳٪ در کسر حجمی و دمای ۰/۱۹٪ و ۵۰ °C به ترتیب حاصل شد. کمترین افزایش ضریب هدایت حرارتی به میزان ۱/۴٪ در دمای ۲۶ °C و کسر حجمی ۰/۰۵٪ به دست آمد. مدل ارائه‌شده برای پیش‌بینی ضریب هدایت حرارتی نانوسیال با استفاده از روش سطح پاسخ دارای دقت خوبی بود به‌گونه‌ای که تطابق خوبی بین نتایج مدل‌سازی و داده‌های آزمایشگاهی وجود دارد. مقادیر  $R^2=0/9936$ ،  $CV\%=0/55$ ،  $F\text{-Value}=1059/23$  و  $P\text{-Value}<0/05$ ،  $-1.85\% < MOD < +0/91\%$  خوب مدل‌سازی هستند. نتایج آنالیز حساسیت نیز بیانگر افزایش میزان حساسیت با افزایش کسر حجمی نانوذرات است.





## ۱- مقدمه

مان و همکاران [۱۴] به بررسی عملکرد رئولوژیکی-حرارتی سه نمونه نانوسیال  $\text{CuO}$ ،  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  و  $\text{CuO} + \text{Fe}_3\text{O}_4$  بر پایه آب در یک دوره ۲۰ روزه پرداختند. اثر سورفکتانت‌ها بر پایداری نانوسیالات نیز بررسی شد. افزودن نانوذرات باعث افزایش هدایت حرارتی به میزان ۵/۴۷، ۳/۱۱ و ۳/۹۵ درصد به ترتیب برای نانوسیالات  $\text{CuO}$ ،  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  و  $\text{CuO} + \text{Fe}_3\text{O}_4$  شد. سورفکتانت‌های CTAB و SDS پایدارترین نمونه‌ها را ارائه دادند. مطالعات متعددی برای بررسی خواص حرارتی-فیزیکی نانوسیال‌ها و نانوسیال‌های هیبریدی انجام شده است، اما بیشتر مطالعات بر روی ارزیابی هدایت حرارتی، به‌ویژه نانوسیال‌های آلومینا متمرکز شده‌اند.

کانگ و همکاران [۱۵] آزمایش هدایت حرارتی نانوسیال الماس (UDD)، نقره و  $\text{SiO}_2$  را با استفاده از روش سیم داغ گذرا بررسی کردند. نتایج حاکی از افزایش رسانایی حرارتی نانوسیالات در مقایسه با سیال پایه است. واردارو و همکاران [۱۶] به مطالعه نانوسیال هیبریدی شامل نانوذرات اکسید گرافن (GO) و اکسید سیلیکون (Si) بر پایه آب و در محدوده دمایی  $50-25^\circ\text{C}$  پرداختند. تغییرات نسبت بین نانوذرات و تأثیرات دما بر هدایت حرارتی بررسی شد. از روش‌های بهبودیافته هامر و پیرولیز لیزر برای سنتز نانوذرات استفاده شد. بررسی پایداری و یافتن مشخصات نانوذرات با استفاده از روش‌های SEM، XRD، پتانسیل Zeta و DLS صورت گرفت. نتایج نشان داد حداکثر افزایش در هدایت حرارتی به میزان ۷/۹۷ درصد و برای نسبت ۰/۸ و ۰/۲ به ترتیب برای Si و GO به دست آمد. آزمایش‌های مربوط به هدایت حرارتی نانوسیالات  $\text{SiO}_2$ /آب توسط جهانشاهی و همکاران انجام شد [۱۷]. آن‌ها رسانایی حرارتی را در محدوده کسر حجمی نانوذرات ۱ تا ۴ درصد اندازه‌گیری کردند و نتایج افزایش رسانایی حرارتی را تا ۲۴ درصد در کسر حجمی نانوذرات ۴ درصد نشان داد.

چرچ و همکاران [۱۸] به مطالعه تجربی پیچیده‌ای شامل PEG 400 تقویت‌شده با سه نوع نانوذره  $\text{ZnO}$ ،  $\text{Al}_2\text{O}_3$  و MWCNT پرداخته است. تأثیر دما و حضور نانوذرات بر عملکرد حرارتی سیال پایه بررسی شد. نتایج نشان داد هدایت حرارتی PEG 400 دارای مقدار ثابتی در افزایش دما

نانوسیالات، سوسپانسیون‌هایی هستند که از یک سیال پایه (مانند آب، اتیلن گلیکول و روغن‌موتور) و ذرات جامد در ابعاد نانویی تشکیل شده‌اند [۱-۳]. به دلیل رسانایی حرارتی بالاتر ذرات جامد در مقایسه با خنک‌کننده‌های معمولی، استفاده از ترکیب ذرات با ابعاد میکرو و میلی‌متری در سیالات سنتی مورد توجه قرار گرفته و باعث افزایش قابل توجهی در رسانایی حرارتی گردید. این نوع سیالات، محدودیت‌ها و مشکلاتی را برای سیستم‌های حرارتی ایجاد می‌کند که می‌توان به گرفتگی، رسوب و افت فشار مجاری سیال اشاره کرد. ظهور نانوسیال به‌عنوان یک محیط انتقال حرارت جدید با رسانایی حرارتی بالا (از زمانی که این مفهوم برای اولین بار در سال ۱۹۹۵ توسط چوی و همکارانش [۴] باهدف بهبود خواص حرارتی آب با پراکندگی نانوذرات مختلف اکسید فلزی مطرح شد توجه روزافزونی را به خود برانگیخت و با گذر زمان باعث بهبود سرعت انتقال حرارت و کاهش ابعاد مبدل حرارتی و نیز کاهش مشکلات ناشی از به‌کارگیری ذرات در ابعاد میکرو و میلی‌متری گردیده است. فناوری نانوسیال به چالش جدیدی برای سیال انتقال حرارت تبدیل می‌شود، زیرا گزارش شده است که هدایت حرارتی نانوسیال به‌طور غیرعادی در کسر حجمی بسیار کم افزایش می‌یابد. افزودن نانوذره با غلظت حجمی کمتر از ۱ درصد، افزایش تقریباً دو برابری در هدایت حرارتی برخی سیالات مشاهده شد [۵]. محققان با بررسی خواص ترموفیزیکی در طول سال‌های گذشته عوامل مؤثر مختلفی مانند دما، کسر حجمی، پایداری، سورفکتانت‌ها و ... را بر هدایت حرارتی نانوسیال دخیل دانستند [۶-۹].

با درک خواص منحصر به فرد نانوسیال‌ها و پتانسیل آن‌ها، در سال‌های گذشته، کلاس جدیدی از نانوسیال‌ها که از دو یا چند ذره جامد معلق در سیال پایه تشکیل شده است، به نام نانوسیالات هیبریدی، ساخته شد [۱۰-۱۳]. این نانوسیالات هیبریدی جدید به‌عنوان سیالات انتقال حرارت نسل پیشرفته برای کاربردهای انتقال حرارت، نوید بزرگی را نشان دادند.

MWCTs-SiC [۲۶]	EG/آب	۲۵-۵۰	۰-۰/۷۵	+۳۳
TiO <sub>2</sub> -SiO <sub>2</sub> [۲۷]	EG/آب	۳۰-۸۰	۰/۱۵-۳	+۲۲/۸

محققان مدل‌های پیش‌بینی خود را در سال‌های اخیر برای هدایت حرارتی نانوسیال‌ها منتشر کردند. جدول ۲ برخی از مدل‌های تجربی ارائه شده است. خواص ترموفیزیکی نانوسیالات دارای ویژگی‌های منحصربه‌فردی می‌باشد که سبب شد در این مطالعه به بررسی هدایت حرارتی نانوسیال هیبریدی (MWCNT) (۷۵%) - (۴۰%) - (۴۰%) A بر پایه (۴۰%) EG - (۶۰%) Water به صورت آزمایشگاهی، تحلیلی و مدل‌سازی پرداخته شود. در ابتدا به بیان روند تهیه نانوسیالات در کسر حجمی‌های مختلف و ویژگی‌های آن پرداخته می‌شود. سپس نحوه اندازه‌گیری و اعتبار سنجی ضریب هدایت حرارتی تشریح می‌شود. تأثیرات پارامترهای مختلف دما و کسر حجمی بر روی ضریب هدایت حرارتی تجزیه و تحلیل شد و بیشترین و کمترین تأثیرات مربوط به هر کدام بیان گردید. مدل‌سازی ضریب هدایت حرارتی نانوسیال به منظور صرفه‌جویی در وقت و هزینه با روش سطح پاسخ انجام گرفت و همگرایی مربوطه ارائه گردید. با روش‌های مختلف انحراف از معیار (MOD) و آنالیز حساسیت به ترتیب به بررسی دقت و تأثیرپذیری غلظت بر ضریب هدایت حرارتی پرداخته شد.

**جدول (۲):** برخی از مدل‌های تجربی پیش‌بینی در مطالعات مختلف محققان

مرجع	معادله همگرایی
[۲۸]	$TCR = (0.83411.1\phi^{+0.243}T^{-0.289})$
[۲۹]	$TCR = [0.907exp(0.36\phi^{0.3111} + 0.000956T)]$
[۳۰]	$k_{nf} = 0.4 + 0.0332 + 0.00101T + 0.000619T + 0.0687^3 + 0.0148^5 - 0.00218^6 - 0.0419^4 - 0.0604^2$
[۳۱]	$TCR = 1.01 + 0.007685\phi T - 0.5136\phi^2 T^{-0.1578} + 11.5\phi^3 T^{-1.175}$
[۳۲]	$TCR = 0.9787 + exp(0.3081\phi^{0.3097} - 0.002T)$
[۳۳]	$TCR = 0.9969 - 0.001225T + 26.758\phi + 9.7434T\phi + 0.01505T^2 - 1157.438\phi^2$
[۳۴]	$k_{nf} = -0.4501\phi^{-0.0484} \left(\frac{1}{T}\right)^{0.6002} + 50.34 \left(\frac{1}{T}\right)^{2.509} + 0.3313$
[۳۵]	$k_{nf} = 0.006(\phi^{1.099})T^{1.051} + 1.014$

است. افزودن نانوذرات نیز باعث افزایش هدایت حرارتی نانوسیال گردید.

زی و همکاران [۱۹] رسانایی حرارتی  $Al_2O_3$ ,  $MgO$ ,  $TiO_2$ ,  $ZnO$  و  $SiO_2$  را با اندازه نانوذره ۲۰ نانومتر پراکنده در اتیلن گلیکول بررسی کردند. آن‌ها افزایش رسانایی حرارتی تقریباً ۲۵ درصدی در کسر حجمی نانوذرات ۵٪ برای نانوسیال  $SiO_2$ /اتیلن گلیکول ایجاد کردند، درحالی‌که برای  $\gamma/EG-Al_2O_3$  افزایش رسانایی گرمایی در همان کسر حجمی تقریباً ۲۸ درصد بود. اثرات دما و کسر حجمی نانوذرات بر هدایت حرارتی آب و اتیلن گلیکول بر اساس نانوذرات  $SiO_2$  توسط ژو و همکاران بررسی شد [۲۰]. آن‌ها مشاهده کردند که افزایش دما و کسر حجمی منجر به افزایش رسانایی حرارتی نانوسیالات مورد مطالعه می‌شود. آن‌ها افزایش هدایت حرارتی  $SiO_2$ /آب و  $SiO_2$ /اتیلن گلیکول را به ترتیب ۴۶/۲٪ و ۶۲/۸٪ در کسر حجمی ۵٪ و دمای ۵۰ °C گزارش کردند.

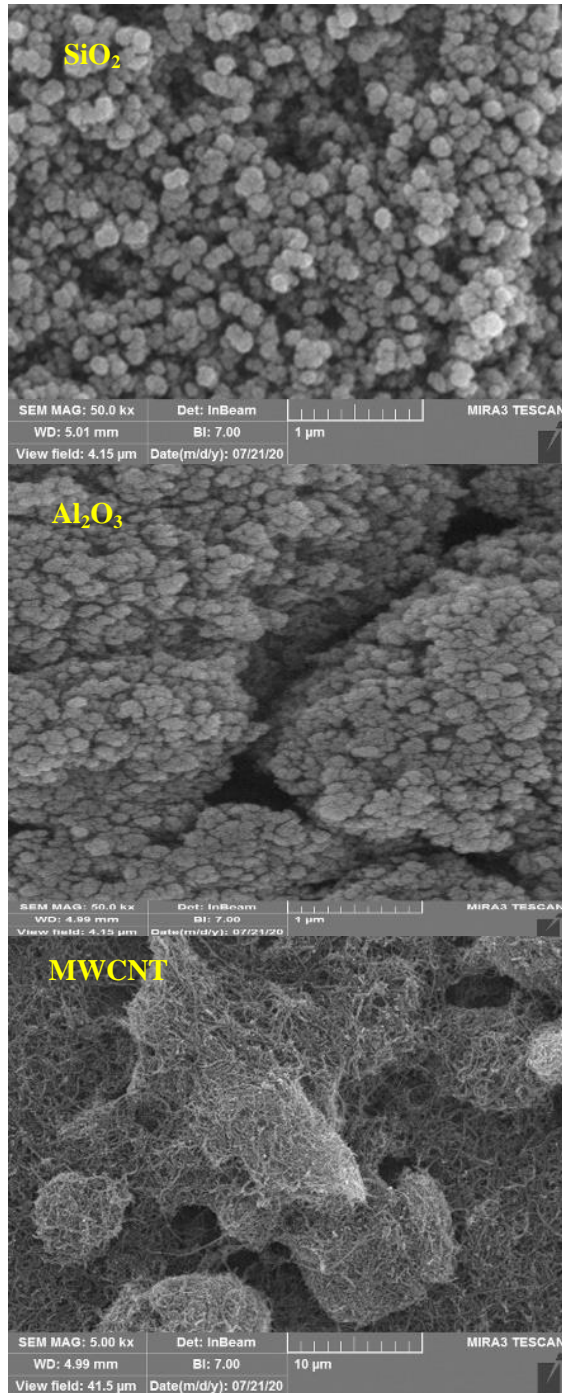
Zhang و همکاران [۲۱] به بررسی رسانایی حرارتی نانومبردها شامل  $Al_2O_3-R141b$ ,  $TiO_2-R141b$  و  $SiO_2-R141b$  در غلظت‌ها، دماها و اندازه‌های مختلف نانوذرات پرداختند. نتایج نشان داد هدایت حرارتی مؤثر با افزایش غلظت و دما افزایش و با افزایش اندازه نانوذرات کاهش می‌یابد. در جدول ۱ برخی از مطالعات تجربی بر روی موضوع هدایت حرارتی بر اساس فاکتورهای دما و کسر حجمی توسط محققان مختلف گزارش شده است. مدل‌سازی و شبیه‌سازی جریان نانوسیال برای کاربردهای مختلف به دلیل هزینه بالای مطالعات تجربی اهمیت پیدا کرد.

**جدول (۱):** مطالعات مروری هدایت حرارتی نانوسیالات

نانوذرات	سیال پایه	محدوده دما (°C)	کسر حجمی (%)	ماکزیمم افزایش (%)
$Al_2O_3$ و $SiO_2$ (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ) [۲۲]	آب	-	۰/۰۰۵-۰/۵	+۱۰/۷۴
$SiO_2$ [۲۳]	اتانول	۲۵-۷۰	۰/۱۵-۱/۱۷	+۹/۵
$TiO_2-SiO_2$ [۲۴]	EG/آب	۳۰-۸۰	۱	+۱۶
MWCNT- $Al_2O_3-ZnO$ [۲۵]	آب	۲۵	۰/۱	-۱
			۰/۴	-۳۷

SiO<sub>2</sub> ۹۹/۵ ۳۰-۲۰ ۶۰۰-۱۸۰ سفید ۲/۴

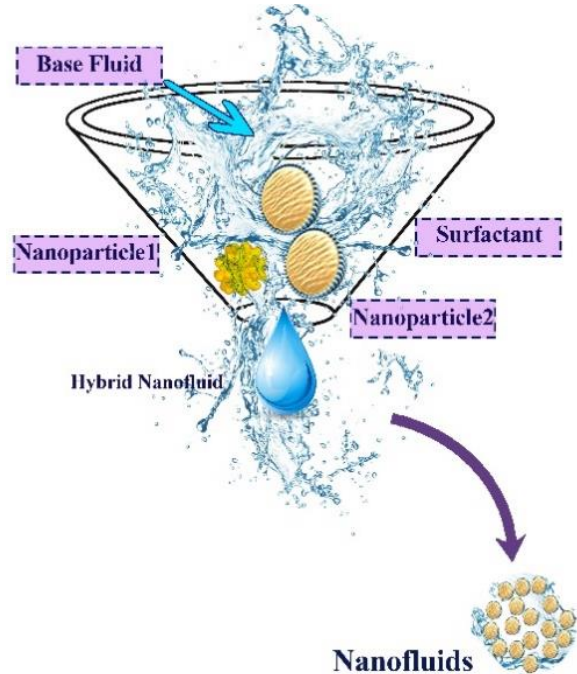
تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) برای تأیید ساختار و شناسایی نانوذرات و نیز خواص مورفولوژی (اندازه و شکل) در شکل ۲ ارائه شده است. همان طور که در شکل ۲ مشاهده می‌شود، تصاویر SEM اندازه نانومتر را برای ذرات تأیید می‌کند.



## ۲- فرآیند تجربی

### ۲-۱- تهیه نمونه

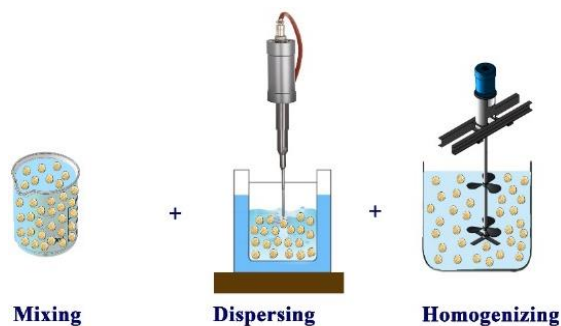
در مطالعه تجربی حاضر از نانوذرات آلومینا (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)، سیلیکا (SiO<sub>2</sub>) و نانولوله کربنی (MWCNT) استفاده شد. نانوذرات در سیالات مبتنی بر آب و اتیلن گلیکول (EG) معلق شدند. نانوذرات به صورت دمرحله‌ای در سیالات پایه معلق شدند. نانوذرات Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>، SiO<sub>2</sub> و MWCNT معلق در سیال پایه مخلوط آب-EG به ترتیب با نسبت حجمی ۴۰، ۴۵ و ۱۵ درصد آماده شد. اهمیت بررسی نانوسیالات با غلظت‌های کم و غلظت‌های قابل توجه و نیز در دماهای معمول و متداول، سبب شد نانوسیالات با غلظت‌های ۰/۹٪، ۰/۵٪ و محدوده دمایی ۲۶-۵۰°C برای این مطالعه در نظر گرفته شوند. در شکل ۱ شماتیک تهیه نانوسیال مشاهده می‌شود. مشخصات ظاهری و فیزیکی نانوذرات در جدول ۳ گزارش شده است.



شکل (۱): شماتیک تهیه نانوسیال

جدول (۳): مشخصات فیزیکی نانوذرات

چگالی واقعی (g/cm <sup>3</sup> )	رنگ ماده	SSA (m <sup>2</sup> /g)	APS (nm)	خلوص مواد (wt%)	نانوذرات
~۲/۱	سیاه	۲۳۳	۵-۱۵	۹۵ >	MWCNTs
۳/۹۷	سفید	۱۳۸	۲۰	۹۹ ≥	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>



شکل (۴): شماتیکی از فرآیند پایدارسازی نانوسیال

به صورت مرحله به مرحله

پایداری نانوسیالات در یک دوره دوهفته‌ای بررسی شد. پایداری نانوسیالات با بررسی دانسیته و مشاهدات آزمایشگاهی انجام گردید. بعد از گذشت ۲ هفته از آماده‌سازی نمونه‌ها، مقادیر مربوط به دانسیته، تغییرات قابل توجهی نداشت و تغییری در ظاهر نانوسیالات اتفاق نیفتاد؛ بنابراین نمونه‌ها از پایداری مناسبی برخوردار بودند.

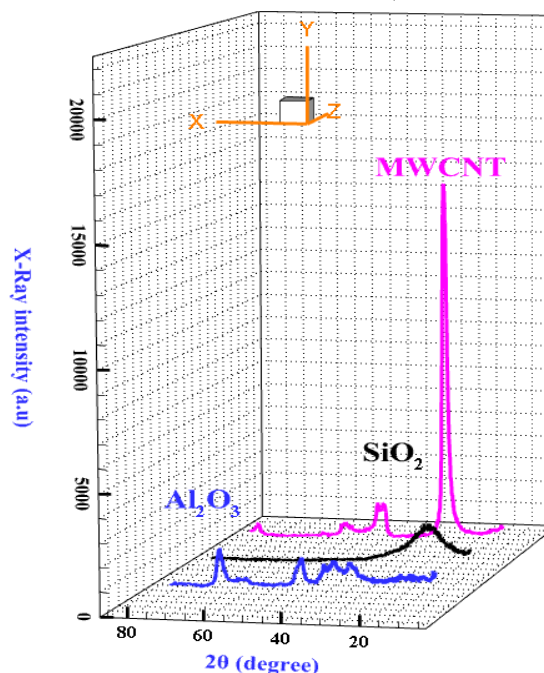
## ۲-۲- اندازه‌گیری ضریب هدایت حرارتی

اندازه‌گیری هدایت حرارتی نانوسیال در شرایط مختلف آزمایشگاهی با استفاده از تحلیلگر خواص حرارتی KD2 Pro (ساخته شده توسط Decagon Devices, Inc. USA) انجام شده است (شکل ۵). اندازه‌گیری در محدوده W/m.K ۰/۰۲-۲ عمل می‌کند. این دستگاه مجهز به حسگر سوزن از نوع KS-1 است که به‌طور عمودی و مرکزی در ظرف نانوسیال قرار می‌گیرد. مکانیسم اندازه‌گیری بر اساس روش سیم داغ گذرا است. برای کنترل دمای نمونه در طول اندازه‌گیری از حمام آب استفاده شده است. فاصله زمانی ۳۰ دقیقه بین اندازه‌گیری‌های بعدی در نظر گرفته شده است تا اثر افزایش دما در مجاورت کاوشگر به دلیل گرمای گذرا از بین برود. از این رو نتایج به دست آمده ثابت و قابل تکرار هستند. میانگین سه اندازه‌گیری هدایت حرارتی برای هر نمونه گرفته شده است تا از دقت و سازگاری نتایج اطمینان حاصل شود.

شکل (۲): نمونه SEM نانوذرات

مشخصه‌یابی نانوذرات با آنالیز اندازه ذرات، توپوگرافی پراش اشعه ایکس برای تعیین ساختاری و تخمین اندازه کریستال انجام شد. پیک‌های آشکار در شکل ۳ نشان‌دهنده تبلور خوب نانوذرات است که هیچ پیک، مشخصه‌ای از هیچ فاز دیگری از نانوذرات را نشان نمی‌دهد. مطالعات پراش اشعه ایکس تأیید کرد که مواد سنتز شده، از نانوذرات  $Al_2O_3$  و  $SiO_2$  هستند و تمام پیک‌های پراش مطابق با منابع مونوکلینیک نانوذرات JCPDS مطابقت دارند.

پس از آماده‌سازی نانوسیال در غلظت‌های مختلف حجمی، به‌منظور حذف نانوذرات خوشه‌ای، رسوب‌زدایی و همگن‌سازی، فرآیند پایدارسازی و بهبود کیفیت نانو محلول با استفاده از دستگاه همزن مغناطیسی و ارتعاش اولتراسونیک انجام گردید (شکل ۴).



شکل (۳): آنالیز XRD نانوذرات

۰/۳۰	۳۵	۱/۰۸۶
۰/۴۰	۴۰	۱/۱۳۳
۰/۵۰	۴۵	۱/۱۶۹
۰/۶۶	۵۰	۱/۲۲۱
۰/۷۵	۳۰	۱/۱۷۴
۰/۹۰	۵۰	۱/۲۸۲

### ۲-۳- تحلیل عدم قطعیت

عدم قطعیت دستگاه اندازه‌گیری هدایت حرارتی یا KD2 Pro در این بخش بررسی می‌شود. مقادیر دقت دستگاه از راهنمای دستگاه به دست می‌آید. برای محدوده هدایت حرارتی  $0.2-2 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$  دقت دستگاه برابر با  $\pm 5\%$  گزارش شده است. رابطه (۱) بیانگر عدم قطعیت می‌باشد.

$$U = \frac{S}{\sqrt{N}} \quad (1)$$

در رابطه (۱)،  $U$  بیانگر عدم قطعیت و  $N$  تعداد آزمایش‌ها و  $S$  انحراف از معیار است. مقدار  $S$  را با رابطه ۲ می‌توان محاسبه کرد.

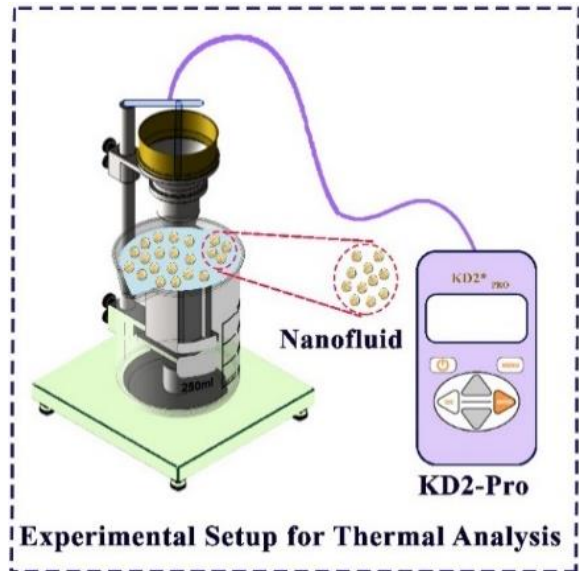
$$S = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2} \quad (2)$$

$X_i$  و  $\bar{X}$  به ترتیب برابر با مقدار میانگین و مقدار اندازه‌گیری شده می‌باشند. برای ضریب هدایت حرارتی نانوسیال  $\text{Al}_2\text{O}_3 (40\%) - \text{SiO}_2 (45\%) - \text{MWCNT} (15\%)$  بر پایه  $\text{Water} (60\%) - \text{EG} (40\%)$  مقدار  $0.438$  به دست آمد که میانگین سه آزمایش و مطابق با جدول ۵ است؛ بنابراین، مقدار عدم اطمینان برابر با  $0.016$  است.

جدول (۵): عدم اطمینان در اندازه‌گیری ویسکوزیته

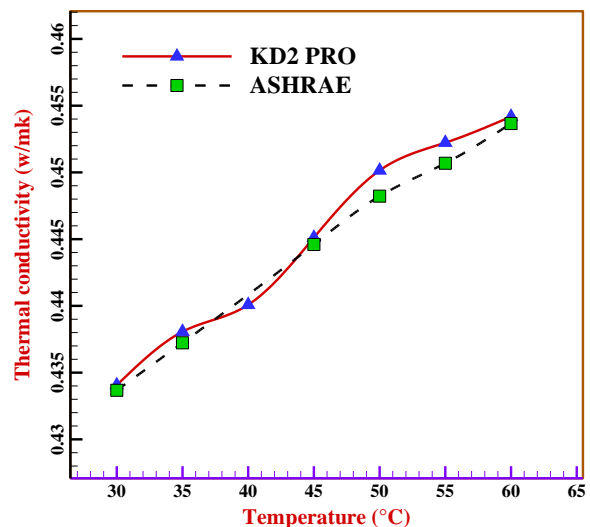
شماره آزمایش	هدایت حرارتی اندازه‌گیری شده
۱	۰/۴۱۷
۲	۰/۴۶۹
۳	۰/۴۲۹
میانگین	۰/۴۳۸
S	۰/۰۲۷
U	۰/۰۱۶

### ۳- نتایج و بحث



شکل (۵): شماتیک دستگاه KD2 pro (Decagon device, Inc. USA)

در جدول ۴ برخی از داده‌های تجربی هدایت حرارتی گزارش شده است. به‌منظور اطمینان از عملکرد دستگاه، اعتبارسنجی با بانک داده‌های آشرایی [۳۶] صورت گرفت که نتایج آن با دقت قابل قبولی در شکل ۶ مشاهده می‌شود.



شکل (۶): اعتبارسنجی نتایج KD2-pro (دستگاه

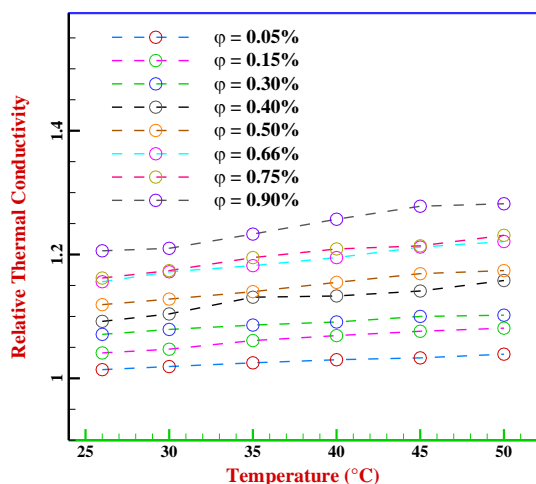
اندازه‌گیری هدایت حرارتی) با نتایج ASHRAE.

جدول (۴): برخی از اندازه‌گیری‌های ضریب هدایت حرارتی

هدایت حرارتی نسبی	دما (°C)	کسر حجمی (%)	نانوسیال
۱/۰۱۴	۲۶	۰/۰۵	$\text{Al}_2\text{O}_3 (40\%) / \text{SiO}_2 (45\%)$
۱/۰۴۷	۳۰	۰/۱۵	$\text{Al}_2\text{O}_3 (40\%) / \text{SiO}_2 (45\%)$



نشان می‌دهد. افزایش دما در کسر حجمی‌های کم، تأثیر ناچیزی بر روی افزایش ضریب هدایت حرارتی نسبی داشته است و علت را در تأثیرگذاری هم‌زمان افزایش فاصله بین اجزا و افزایش یافتن حرکت ذرات می‌توان یافت. افزایش دما باعث افزایش فاصله بین نانوذرات و اجزا می‌شود و عاملی برای کاهش هدایت حرارتی است و از طرفی باعث افزایش تحرک اجزا می‌گردد که عاملی برای افزایش هدایت حرارتی است و بنابراین تأثیرات متضادی بر روی ضریب هدایت حرارتی دارند و مقدار ضریب هدایت حرارتی تقریباً ثابت می‌ماند. افزایش دما در بالاترین کسر حجمی‌ها باعث افزایش ضریب هدایت حرارتی شد. علت افزایش ضریب هدایت حرارتی، بیش‌تر شدن خوشه‌بندی و بنابراین انتقال بیشتر انرژی می‌باشد. همان‌طور که در شکل ۹ مشاهده می‌شود در  $\phi = 1\%$ ، با افزایش دما از ۲۶ به ۵۰ درجه سانتی‌گراد، RTC از  $20/6\%$  به  $28/2\%$  افزایش یافته است. چراکه در دماها و کسر حجمی‌های بالاتر به دلیل سستی پیوندهای بین‌مولکولی و ایجاد خوشه‌های بزرگ‌تر و افزایش سطح نانوذرات، خواص حرارتی نانوسیال بهبود می‌یابد. البته باید توجه داشت که با افزایش دما به بیش از ۶۰ درجه سانتی‌گراد، اثرات عوامل فعال سطحی از بین می‌رود و نانوسیال‌ها از حالت تعلیق و کلونید خارج می‌شوند و در نتیجه هدایت حرارتی کاهش می‌یابد.



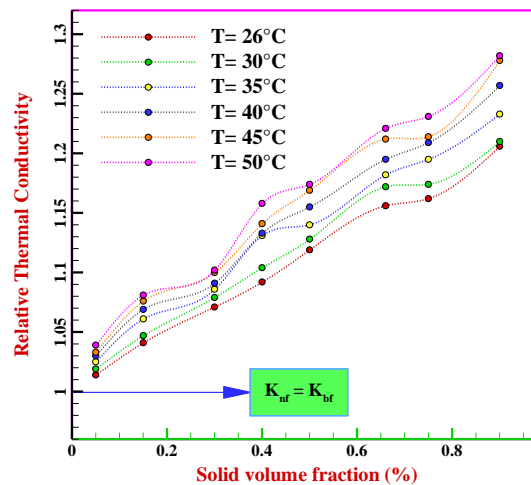
شکل (۸): تغییرات نسبت ضریب هدایت حرارتی به دما.

### ۳-۳- افزایش هدایت حرارتی

در بخش ۳ به‌منظور درک بهتر رفتار حرارتی نانوسیال هیبریدی چند ذره‌ای به تأثیرپذیری ضریب هدایت حرارتی نسبت به فاکتورهای دما و کسر حجمی همراه با ارائه نمودار پرداخته می‌شود.

### ۳-۱- تأثیر کسر حجمی نانوذره بر هدایت حرارتی سیال

در شکل ۷ تغییرات RTC نسبت به کسر حجمی‌های مختلف در دماهای گوناگون را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در کسر حجمی‌ها و دماهای بالاتر، مقدار RTC بسیار بیشتر از کسر حجمی‌های کمتر است. تراکم بیش‌تر نانوذرات در سیال پایه و نیز افزایش یافتن انرژی جنبشی نانوذرات در دماهای بیش‌تر، باعث افزایش هدایت حرارتی نانوسیال در کسر حجمی‌ها و دماهای بالاتر گردیده است. تراکم بیش‌تر نانوذرات با توجه به بالاتر بودن هدایت حرارتی آن‌ها نسبت به سیال پایه باعث می‌شود که تراکم بیش‌تر منجر به هدایت حرارتی بالاتر شود. با مطالعه نتایج می‌توان گفت که با افزایش کسر حجمی در همان دما، هدایت حرارتی افزایش می‌یابد و شیب نمودار نیز افزایش می‌یابد. بالاترین RTC در  $\phi = 1\%$  و دمای  $50^\circ\text{C}$ ،  $28/2\%$  نسبت به سیال پایه است.



شکل (۷): تغییرات نسبت ضریب هدایت حرارتی به کسر حجمی.

### ۳-۲- تأثیر دما بر هدایت حرارتی سیال

شکل ۸ نسبت هدایت حرارتی ( $k_{nf}/k_{bf}$ ) نانوسیال را در محدوده دمایی  $26 - 50^\circ\text{C}$  و در کسر حجمی‌های مختلف

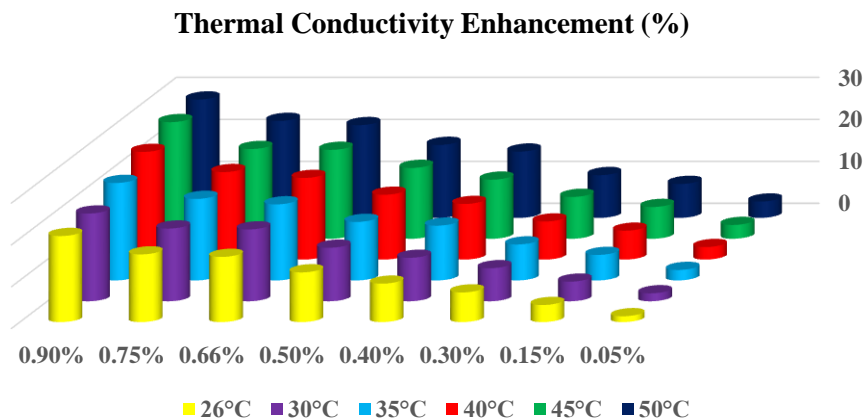
بهینه‌سازی آزمایش‌ها و تعیین برهمکنش با حداقل تعداد آزمایش استفاده شده است. روش سطح پاسخ نیز یک ابزار تجزیه و تحلیل قابل اعتماد در بررسی فرآیندهای شیمیایی است. برای بررسی معناداری ضرایب مدل، تحلیل واریانس انجام شده است. جداول ۷ و ۸ نتایج ANOVA را برای ضریب هدایت حرارتی نشان می‌دهد. در بین مقادیر گزارش شده در این جداول، ضریب تعیین برای ارزیابی کیفیت برازش چندجمله‌ای استفاده می‌شود و اهمیت استاتیکی را می‌توان با مقدار F بررسی کرد. اهمیت و اعتبار مدل را می‌توان با توجه به جداول ۷ و ۸ که در آن مقدار P کوچک‌تر از ۰/۰۵، مقادیر F بسیار بالا و نیز اختلاف کم ضریب تعیین‌های چندگانه و ضریب آماری تعدیل شده مورد بررسی قرار داد. همان‌طور که در جدول ۶ و ۷ مشاهده می‌شود مدل منتخب دارای اعتبار قابل قبولی است. همچنین با توجه به مقدار F-Value مشاهده می‌شود که تأثیر عامل فرآیند دما (F-Value= ۴۴۶/۹۱) تأثیر بیشتری نسبت به دیگر متغیرهای مستقل و برهمکنش آن‌ها دارد. با توجه به مقایسه داده‌ها (شکل ۱ و ۲) و بر اساس آزمون‌های آماری (جدول ۷ و ۸)، مدل مذکور می‌تواند به‌عنوان مدلی قابل اعتماد برای شبیه‌سازی و بهینه‌سازی RTC در نظر گرفته شوند. مقدار  $C.V. \% < 1$  در جدول ۸ نشان می‌دهد که مدل از قابلیت تکرار خوبی برخوردار است.

در این بخش به بررسی موضوع افزایش هدایت حرارتی نانوسیال نسبت به سیال پایه EG/H<sub>2</sub>O با افزودن نانوذرات پرداخته می‌شود. از رابطه ۳ برای تعیین TCE بکار گرفته شد. نمودار میله‌ای کمینه و بیشینه افزایش ضریب هدایت حرارتی در شکل ۹ نشان داده شده است. سطوح جدول ۶، تغییرات رسانایی حرارتی نانوسیال را در کسرهای حجمی مختلف نانوذرات با افزایش دما از ۲۶ تا ۵۰ درجه سانتی‌گراد نشان می‌دهد که بر مبنای آن میزان کمینه و بیشینه افزایش، گزارش شده است. نتایج نشان می‌دهد افزایش کسر حجمی نانوذرات باعث افزایش ضریب هدایت حرارتی می‌شود به‌گونه‌ای که بیش‌ترین افزایش در کسر حجمی ۰/۹ و دمای ۵۰°C به دست آمد.

$$TCE = \frac{k_{nf} - k_{bf}}{k_{bf}} \times 100 \quad (3)$$

#### ۳-۴- نتایج روش سطح پاسخ

در این بخش از روش سطح پاسخ برای پیش‌بینی و بهینه‌سازی داده‌های تجربی و در نهایت ارائه رابطه همبستگی استفاده شده است. یکی از جنبه‌های استفاده از روش سطح پاسخ استفاده از طراحی آزمایش است. روش‌های DOE، تعداد و هزینه آزمایش‌ها را کاهش می‌دهند و تعاملات بین متغیرها را به‌طور هم‌زمان تعیین می‌کنند؛ بنابراین، این روش‌ها به‌عنوان ابزاری قدرتمند در شبیه‌سازی و بهینه‌سازی فرآیند، مورد توجه قرار گرفته‌اند. روش سطح پاسخ یک روش آماری در طراحی آزمایش است که برای



شکل (۹): نمودار میله‌ای کمینه و بیشینه افزایش ضریب هدایت حرارتی.

جدول (۶): درصد افزایش ضریب هدایت حرارتی در شرایط مختلف آزمایشگاهی

دما (°C)	کسر حجمی (%)						
	۰/۰۵	۰/۱۵	۰/۳۰	۰/۴۰	۰/۵۰	۰/۶۶	۰/۷۵
T=۲۶	۱/۴	۴/۱	۷/۱	۹/۲	۱۱/۹	۱۵/۶	۱۶/۲
T=۳۰	۱/۹	۴/۷	۷/۹	۱۰/۴	۱۲/۸	۱۷/۲	۱۷/۴
T=۳۵	۲/۵	۶/۱	۸/۶	۱۳/۱	۱۴	۱۸/۲	۱۹/۵
T=۴۰	۳	۶/۹	۹/۱	۱۳/۳	۱۵/۵	۱۹/۵	۲۰/۹
T=۴۵	۳/۳	۷/۶	۱۰	۱۴/۱	۱۶/۹	۲۱/۲	۲۱/۴
T=۵۰	۳/۹	۸/۱	۱۰/۲	۱۵/۸	۱۷/۴	۲۲/۱	۲۳/۱

جدول (۷): گزارش آماری تحلیل رگرسیون مدل سطح پاسخ مرتبه پنجم

مدل	مجموع مربعات	df	میانگین مربعات	F-Value	P-value (Prob > F)
مدل	۰/۲۵	۶	۰/۰۴۱	۱۰۵۹/۲۳	< ۰/۰۰۰۱
A-Phi	۰/۰۱۲	۱	۰/۰۱۲	۲۹۸/۴۰	< ۰/۰۰۰۱
B-T	۰/۰۱۷	۱	۰/۰۱۷	۴۴۶/۹۱	< ۰/۰۰۰۱
AB	$1/823 \times 10^{-3}$	۱	$1/823 \times 10^{-3}$	۴۶/۷۸	< ۰/۰۰۰۱
A <sup>3</sup>	$5/292 \times 10^{-4}$	۱	$5/292 \times 10^{-4}$	۱۳/۵۸	۰/۰۰۰۷
A <sup>2</sup> B <sup>2</sup>	$2/834 \times 10^{-4}$	۱	$2/834 \times 10^{-4}$	۷/۲۷	۰/۰۱۰۱
A <sup>5</sup>	$6/13 \times 10^{-4}$	۱	$6/13 \times 10^{-4}$	۱۵/۷۳	۰/۰۰۰۳
Residual	$1/598 \times 10^{-3}$	۴۱	$3/897 \times 10^{-5}$		
Cor Total	۰/۲۵	۴۷			

### ۶-۳- انحراف معیار

شکل ۱۱ حاشیه انحراف نانوسیال را در شرایط مختلف آزمایشگاهی نشان می‌دهد و همچنین مقایسه بین خطاهای خروجی در مدل همبستگی با داده‌های تجربی نشان می‌دهد. حاشیه انحراف بین نتایج آزمایشگاهی و معادلات تجربی استخراج شده را می‌توان با استفاده از رابطه (۵) به دست آورد. مطابق با شکل ۱۱، حاشیه انحراف در محدوده ۰/۹۱٪ و ۱/۸۵٪- قرار گرفته است که کوچک بودن این بازه، بیانگر دقت خوب مدل‌سازی و کوچک بودن پراکندگی داده‌های MOD می‌باشد. مقادیر MOD نشان می‌دهد مقادیر هدایت حرارتی نسبی حاصل از مدل‌سازی به میزان کافی به مقادیر هدایت حرارتی نسبی حاصل از داده‌های آزمایشگاهی نزدیک می‌باشد و مدل‌سازی دارای اعتبار می‌باشد.

$$MOD = \frac{RTC_{rel\ pre} - RTC_{rel\ exp}}{RTC_{rel\ exp}} \times 100 \quad (5)$$

جدول (۸): مقادیر ضریب تعیین مدل تجربی

Std.Dev.	$6/243 \times 10^{-3}$	R-Squared	۰/۹۹۳۶
Mean	۱/۱۴	Adj R-Squared	۰/۹۹۲۷
C.V. %	۰/۵۵	Pred R-Squared	۰/۹۹۱۴
PRESS	$2/137 \times 10^{-3}$	Adeq Precision	۱۱۴/۷۴۶

### ۳-۵- مدل رگرسیونی پاسخ‌ها و بهینه‌سازی

معادله (۴)، رابطه همبستگی بین فاکتورهای RTC و  $\phi$  و T را بر مبنای تابع مرتبه ۵، ارائه کرده است.

$$RTC = +0/97923 + 0/16278\phi + 9/12478E - 0/04T + 3/42031E - 0/03\phi T - 0/087227\phi^3 - 1/03387E - 0/05\phi^2 T^2 + 0/072901\phi^5 \quad (4)$$

نتایج مقایسه بین مقادیر پاسخ‌ها را که توسط معادلات رگرسیون تعیین می‌شود و داده‌های تجربی در شکل ۱۰ نشان داده شده است. با توجه به شکل ۱۰، داده‌های مدل شده از قابلیت اطمینان و همبستگی خوبی برخوردار است.

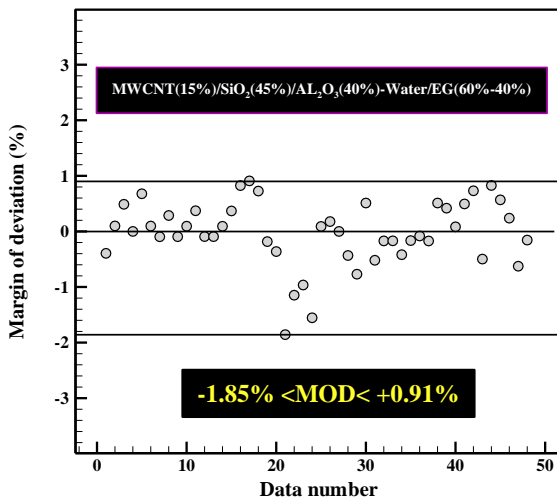
### ۷-۳- آنالیز حساسیت

برای بررسی میزان تأثیر رفتار حرارتی از متغیرهای مؤثر بر آن از روش آنالیز حساسیت استفاده شد. برای این منظور از رابطه (۶) در تعیین مقادیر حساسیت بکار گرفته شد. در شکل مقادیر آنالیز حساسیت برای کسر حجمی‌های مختلف رسم شده است. شکل ۱۲ حساسیت RTC را نسبت به اعمال ۱۰٪ افزایش، نسبت به متغیر کسر حجمی را نشان می‌دهد. مشخص است که با افزودن نانوذرات به سیال پایه، میزان حساسیت افزایش یافته است به طوری که این افزایش در کسر حجمی ۰/۷۵٪ بالاترین میزان را ثبت کرده است.

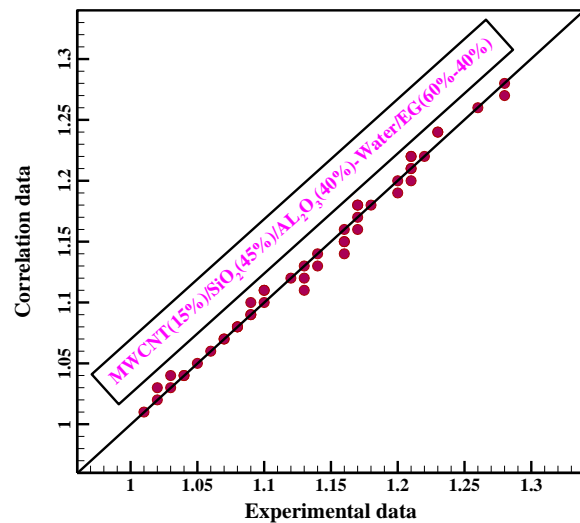
افزایش دما برای کسر حجمی‌های مختلف، تأثیرات مختلفی بر روی حساسیت نانوسیال داشته است و در برخی موارد بیش‌تر شدن حساسیت و در موارد دیگری باعث کاهش یافتن حساسیت شده است. علت این موضوع در تفاوت در درصد تغییرات ضریب هدایت حرارتی اولیه و درصد تغییرات با افزودن ۱۰ درصد از نانوذرات به نانوسیال است.

Relative Thermal Conductivity sensitivity analysis =

$$\frac{\left( \frac{RTC_{after\ change}}{RTC_{before\ change}} \right)_{Pre} - \left( \frac{RTC_{after\ change}}{RTC_{before\ change}} \right)_{exp}}{\left( \frac{TCR_{after\ change}}{TCR_{before\ change}} \right)_{exp}} \times 100 \quad (6)$$

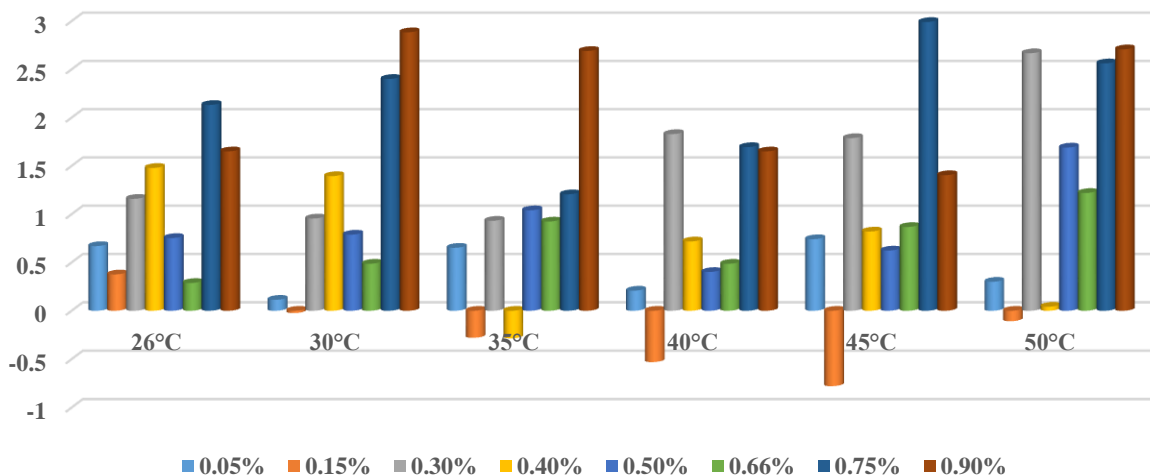


شکل (۱۱): MOD در شرایط مختلف آزمایشگاهی



شکل (۱۰): همبستگی داده‌های مدل شده با تجربی

### Sensitivity Analysis



شکل (۱۲): آنالیز حساسیت با توجه به تغییرات ۱۰٪ در فاکتور کسر حجمی

#### ۴- نتیجه گیری

برای بررسی رفتار RTC نانوسیال هیبریدی چند ذره‌ای (۱۵٪) MWCNT - (۴۵٪) SiO<sub>۲</sub> - (۴۰٪) Al<sub>۲</sub>O<sub>۳</sub> بر پایه (۴۰٪) EG - (۶۰٪) Water از مطالعه تجربی و آماری استفاده گردیده است. هدف در این مطالعه، شناخت رفتار ترموفیزیکی نانوسیال در شرایط مختلف آزمایشگاهی و چگونگی تأثیرپذیری RTC نسبت به فاکتورهای دما و کسر حجمی و نیز بهینه‌سازی رابطه آن‌ها از طریق روش RSM است. اهم نتایج پژوهش در موارد زیر خلاصه شده است:

- مطالعه آزمایشگاهی نشان داده که با افزایش نانوذرات در سیال پایه، ضریب هدایت حرارتی نانوسیال بیشتر می‌شود.
- مشخص گردید که نرخ افزایش انتقال حرارت در کسر حجمی‌ها و دماهای بالا نسبت به کسر حجمی‌های پایین بیشتر است. چراکه در دماهای بالا به دلیل افزایش تعداد برخورد نانوذرات و افزایش انرژی جنبشی و حرارتی، رسانایی نانوسیال بیشتر می‌شود.
- کمینه و بیشینه افزایش RTC نانوسیال به ترتیب برابر با ۲۸/۲٪ و ۱/۴٪ در کسر حجمی‌های ۰/۹٪ و ۰/۵٪ و دماهای ۵۰ °C و ۲۶ °C رخ داد.
- نتایج آماری حاصل از نتایج تجربی نشان می‌دهد که در همه شرایط آزمایشگاهی، RTC نانوسیال نسبت به سیال پایه بیشتر شده است.
- با توجه به نتایج آماری RSM، مدل تجربی همبستگی متغیرها از نوع دومتغیره-مرتبه ۵، دارای اعتبار و کیفیت قابل قبول بوده است.
- بر اساس تحلیل ANOVA، مقادیر  $P\text{-Value} < 0/05$ ،  $F\text{-Value} = 1059/23$ ،  $CV\% = 0/55$ ،  $R^2 = 0/9936$  و  $MOD < +0/91\%$   $< -1/85\%$  به خوبی معناداری مدل را نشان دادند.

در این مطالعه به بررسی ضریب هدایت حرارتی نانوسیال به صورت آزمایشگاهی و مدل‌سازی پرداخته شد. بررسی

مواردی مانند قابلیت به کارگیری در صنعت، آسیب‌های ناشی از خوردگی و رسوب در مقیاس‌های بزرگ به عنوان موارد پیشنهادی برای مطالعات آینده در نظر گرفته می‌شوند.

#### ۵- فهرست علائم

k	ضریب هدایت حرارتی
R <sup>2</sup>	ضریب رگرسیون
T	دما
<b>مخفف‌ها</b>	
Adj	تنظیم‌شده
C.V.	ضریب تغییرات
DOE	طراحی آزمایش
EG	اتیلن گلیکول
EXP	آزمایشگاهی
GO	اکسید گرافن
MOD	حاشیه انحراف
MWCNT	نانولوله کربنی چند جداره
Pred	پیش‌بینی شده
Rel	نسبی
RSME	ریشه میانگین مربعات خطا
RSM	روش‌شناسی سطح پاسخ
SEM	میکروسکوپ الکترونی روبشی
TEM	میکروسکوپ الکترونی انتقالی
TCR	هدایت حرارتی نسبی
TCE	افزایش هدایت حرارتی
XRD	اشعه پراش ایکس
<b>نماد یونانی</b>	
ε	خطای تجربی
φ	کسر حجمی
μ	ویسکوزیته
ρ	چگالی
<b>زیرنویس</b>	
bf	سیال پایه
nf	نانوسیال

hybrid nano-additives containing graphene and silica: A comparative experimental study. *International Communications in Heat and Mass Transfer*. 2020;116:104648.

[11] Boroomandpour A, Toghraie D, Hashemian M. A comprehensive experimental investigation of thermal conductivity of a ternary hybrid nanofluid containing MWCNTs-titania-zinc oxide/water-ethylene glycol (80: 20) as well as binary and mono nanofluids. *Synthetic Metals*. 2020;268:116501.

[12] Moradi A, Zareh M, Afrand M, Khayat M. Effects of temperature and volume concentration on thermal conductivity of TiO<sub>2</sub>-MWCNTs (70-30)/EG-water hybrid nano-fluid. *Powder Technology*. 2020;362:578-85.

[13] Wanatasanapan VV, Abdullah M, Gunnasegaran P. Effect of TiO<sub>2</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanoparticle mixing ratio on the thermal conductivity, rheological properties, and dynamic viscosity of water-based hybrid nanofluid. *Journal of Materials Research and Technology*. 2020;9(6):13781-92.

[14] Mane NS, Hemadri V. Experimental investigation of stability, properties and thermo-rheological behaviour of water-based hybrid CuO and Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> nanofluids. *International Journal of Thermophysics*. 2022;43(1):1-22.

[15] Kang HU, Kim SH, Oh JM. Estimation of thermal conductivity of nanofluid using experimental effective particle volume. *Experimental Heat Transfer*. 2006;19(3):181-91.

[16] Vărdaru A, Huminic G, Huminic A, Fleacă C, Dumitrache F, Morjan I. Synthesis, characterization and thermal conductivity of water based graphene oxide-silicon hybrid nanofluids: An experimental approach. *Alexandria Engineering Journal*. 2022;61(12):12111-22.

[17] Jahanshahi M, Hosseinizadeh S, Alipanah M, Dehghani A, Vakilinejad G. Numerical simulation of free convection based on experimental measured conductivity in a square cavity using Water/SiO<sub>2</sub> nanofluid. *International communications in heat and mass transfer*. 2010;37(6):687-94.

[18] Chereches M, Vardaru A, Huminic G, Chereches EI, Minea AA, Huminic A. Thermal conductivity of stabilized PEG 400 based nanofluids: An experimental approach. *International Communications in Heat and Mass Transfer*. 2022;130:105798.

نانوذره NP  
وزن W

## ۶- مراجع

[1] Esfe MH, Alidoust S, Ardeshtiri EM, Toghraie D. The effect of different parameters on ability of the proposed correlations for the rheological behavior of SiO<sub>2</sub>-MWCNT (90: 10)/SAE40 oil-based hybrid nano-lubricant and presenting five new correlations. *ISA transactions*. 2021.

[2] Gulzar O, Qayoum A, Gupta R. Experimental study on thermal conductivity of mono and hybrid Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-TiO<sub>2</sub> nanofluids for concentrating solar collectors. *International Journal of Energy Research*. 2021;45(3):4370-84.

[3] Riahi A, Khamlich S, Balghouthi M, Khamliche T, Doyle TB, Dimassi W, et al. Study of thermal conductivity of synthesized Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-water nanofluid by pulsed laser ablation in liquid. *Journal of Molecular Liquids*. 2020;304:112694.

[4] Choi SU, Eastman JA. Enhancing thermal conductivity of fluids with nanoparticles. Argonne National Lab.(ANL), Argonne, IL (United States); 1995.

[5] Choi S, Zhang ZG, Yu W, Lockwood F, Grulke E. Anomalous thermal conductivity enhancement in nanotube suspensions. *Applied physics letters*. 2001;79(14):2252-4.

[6] Wang Q, Gui N, Huang X, Yang X, Tu J, Jiang S. The effect of temperature and cascade collision on thermal conductivity of 3C-SiC: A molecular dynamics study. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2021;180:121822.

[7] Li Z, Asadi S, Karimipour A, Abdollahi A, Tlili I. Experimental study of temperature and mass fraction effects on thermal conductivity and dynamic viscosity of SiO<sub>2</sub>-oleic acid/liquid paraffin nanofluid. *International Communications in Heat and Mass Transfer*. 2020;110:104436.

[8] Almanassra IW, Manasrah AD, Al-Mubaiyedh UA, Al-Ansari T, Malaibari ZO, Atieh MA. An experimental study on stability and thermal conductivity of water/CNTs nanofluids using different surfactants: A comparison study. *Journal of Molecular Liquids*. 2020;304:111025.

[9] Ma M, Zhai Y, Yao P, Li Y, Wang H. Effect of surfactant on the rheological behavior and thermophysical properties of hybrid nanofluids. *Powder Technology*. 2021;379:373-83.

[10] Kazemi I, Sefid M, Afrand M. Improving the thermal conductivity of water by adding mono &

- correlation. *Applied Thermal Engineering*. 2017;110:1111-9.
- [29] Zadkhast M, Toghraie D, Karimipour A. Developing a new correlation to estimate the thermal conductivity of MWCNT-CuO/water hybrid nanofluid via an experimental investigation. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. 2017;129(2):859-67.
- [30] Esfe MH, Afrand M, Karimipour A, Yan W-M, Sina N. An experimental study on thermal conductivity of MgO nanoparticles suspended in a binary mixture of water and ethylene glycol. *International Communications in Heat and Mass Transfer*. 2015;67:173-5.
- [31] Hemmat Esfe M, Esfandeh S, Rejvani M. Modeling of thermal conductivity of MWCNT-SiO<sub>2</sub> (30: 70%)/EG hybrid nanofluid, sensitivity analyzing and cost performance for industrial applications. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. 2018;131(2):1437-47.
- [32] Vafaei M, Afrand M, Sina N, Kalbasi R, Sourani F, Teimouri H. Evaluation of thermal conductivity of MgO-MWCNTs/EG hybrid nanofluids based on experimental data by selecting optimal artificial neural networks. *Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures*. 2017;85:90-6.
- [33] Rostami S, Kalbasi R, Talebkeikhah M, Goldanlou AS. Improving the thermal conductivity of ethylene glycol by addition of hybrid nano-materials containing multi-walled carbon nanotubes and titanium dioxide: applicable for cooling and heating. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. 2021;143(2):1701-12.
- [34] Li L, Zhai Y, Jin Y, Wang J, Wang H, Ma M. Stability, thermal performance and artificial neural network modeling of viscosity and thermal conductivity of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-ethylene glycol nanofluids. *Powder Technology*. 2020;363:360-8.
- [35] Akhgar A, Toghraie D. An experimental study on the stability and thermal conductivity of water-ethylene glycol/TiO<sub>2</sub>-MWCNTs hybrid nanofluid: developing a new correlation. *Powder Technology*. 2018;338:806-18.
- [36] ASHRAE A. Handbook—Fundamentals (SI Edition). American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc. 2017;2017.
- [19] Xie H, Yu W, Chen W. MgO nanofluids: higher thermal conductivity and lower viscosity among ethylene glycol-based nanofluids containing oxide nanoparticles. *Journal of Experimental Nanoscience*. 2010;5(5):463-72.
- [20] Zhu BJ, Zhao WL, Li DD, Li JK, editors. Effect of volume fraction and temperature on thermal conductivity of SiO<sub>2</sub> nanofluids. *Advanced Materials Research*; 2011: Trans Tech Publ.
- [21] Zhang S, Li Y, Xu Z, Liu C, Liu Z, Ge Z, et al. Experimental investigation and intelligent modeling of thermal conductivity of R141b based nanorefrigerants containing metallic oxide nanoparticles. *Powder Technology*. 2022;395:850-71.
- [22] Pang C, Jung J-Y, Lee JW, Kang YT. Thermal conductivity measurement of methanol-based nanofluids with Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and SiO<sub>2</sub> nanoparticles. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2012;55(21-22):5597-602.
- [23] Darvanjooghi MHK, Esfahany MN. Experimental investigation of the effect of nanoparticle size on thermal conductivity of in-situ prepared silica-ethanol nanofluid. *International Communications in Heat and Mass Transfer*. 2016;77:148-54.
- [24] Hamid KA, Azmi W, Nabil M, Mamat R, Sharma K. Experimental investigation of thermal conductivity and dynamic viscosity on nanoparticle mixture ratios of TiO<sub>2</sub>-SiO<sub>2</sub> nanofluids. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2018;116:1143-52.
- [25] Bindu M, Herbert GJ. Experimental investigation of stability, optical property and thermal conductivity of water based MWCNT-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-ZnO mono, binary and ternary nanofluid. *Synthetic Metals*. 2022;287:117058.
- [26] Kakavandi A, Akbari M. Experimental investigation of thermal conductivity of nanofluids containing of hybrid nanoparticles suspended in binary base fluids and propose a new correlation. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2018;124:742-51.
- [27] Nabil M, Azmi W, Hamid KA, Mamat R, Hagos FY. An experimental study on the thermal conductivity and dynamic viscosity of TiO<sub>2</sub>-SiO<sub>2</sub> nanofluids in water: ethylene glycol mixture. *International Communications in Heat and Mass Transfer*. 2017;86:181-9.
- [28] Afrand M. Experimental study on thermal conductivity of ethylene glycol containing hybrid nano-additives and development of a new



## Experimental Study of the Effect of Effective Parameters on the Thermal Conductivity of a Five-component Hybrid Nanofluid

Mohammad Hemmat Esfe<sup>1\*</sup>, Sayyid Majid Motallebi<sup>2</sup>

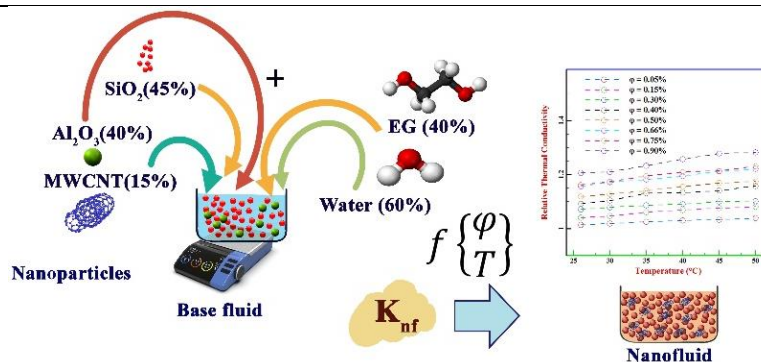
<sup>1</sup> Associate Professor, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Imam Hossein University, Tehran, Iran

<sup>2</sup> M.Sc., Department of Chemical Engineering, Faculty of Engineering, Imam Hossein University, Tehran, Iran

### HIGHLIGHTS

- The maximum increase in thermal conductivity coefficient is achieved by 28.3% in volume fraction and temperature of 0.9% and 50 °C.
- The relative thermal conductivity coefficient of nanofluid in high volume fractions and temperatures is much higher than low volume fractions.

### GRAPHICAL ABSTRACT



### ARTICLE INFO

Article history:

Article Type: Research paper

Received: 6 May 2022

Received in revised form: 9 June 2022

Accepted: 23 July 2022

Available online: 15 August 2022

\*Correspondence:

m.hemmatesfe@semnan.ac.ir

How to cite this article:

M. Hemmat Esfe, S.M. Motallebi. Experimental study of the effect of effective parameters on the thermal conductivity of a five-component hybrid nanofluid. Journal of Aerospace Mechanics. 2022; 18(3):141-154.

Keywords:

Hybrid nanofluids  
Thermal conductivity  
Experimental study  
Model validation

### ABSTRACT

In this study, the thermal behavior of a five-component hybrid nanofluid Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (40%) / SiO<sub>2</sub> (45%) / MWCNT (15%) - Water (60%) / EG (40%) for the first time in different laboratory conditions is analyzed. The study of this nanofluid is important because of the importance of carbon nanotubes, the fact that hybrid nanofluids have special properties and the few studies with the presence of three nanoparticles and two base fluids. Experimental measurements of thermal conductivity are performed by KD2 Pro in volumetric fractions of 0.05-0.9% and temperatures of 26-50°C. TEM, SEM and XRD analysis methods are used to identify and confirm the structure and morphology of nanoparticles. The results show that the relative thermal conductivity in the high-volume fraction and temperatures is much higher than the low volume fraction. This is due to the increased kinetic energy and the presence of more nanoparticles. Also, increasing the temperature has a small effect on increasing the relative thermal conductivity. The highest increase in thermal conductivity is 28.3% in volume fraction and temperature of 0.9% and 50 ° C, respectively. The lowest increase in thermal conductivity is 1.4% at 26 ° C and volume fraction of 0.05%. The proposed model for predicting the thermal conductivity of nanofluid using the response surface method is so accurate that there is a good agreement between the modeling results and laboratory data. The values of R-squared = 0.9936, CV% = 0.55, -1.85% <MOD <+ 0.91%, p-value <0.05 and F-value = 1059.23 indicate good modeling accuracy. The results of sensitivity analysis also indicate an increase in sensitivity with increasing volume fraction of nanoparticles.

\* Copyrights for this article are retained by the author(s) with publishing rights granted to Imam Hossein University Press. The content of this article is subject to the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC-BY-NC 4.0) License. For more information, please visit <https://www.creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode>.



