

رفتار حرارتی نانوسیال هیبریدی

TiO₂(85%)-MWCNT(15%)/(CH₂OH)₂(50%)-H₂O(50%)

تحت تاثیر عوامل دما و کسر حجمی با رویکرد روش آزمایشگاهی و سطح پاسخ

محمد همت اسفه*

دانشیار، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه جامع امام حسین (ع)، تهران، ایران

2017

اطلاعات مقاله	چکیده
دریافت مقاله: پذیرش مقاله:	در این مطالعه برای نخستین بار به بررسی تجربی و آماری رفتار حرارتی نانوسیال هیبریدی (TiO ₂ (85%)/MWCNT(15%)-(CH ₂ OH) ₂ (50%)/H ₂ O(50%)) پرداخته شد. هدایت حرارتی نانوسیال توسط دستگاه KD ₂ PRO در کسر حجمی های ۰/۰۳-۰/۰۶ و دماهای T = ۲۸-۵۰°C اندازه گیری شد. تایید نانومقیاس و ساختار نانوذرات با استفاده از ابزارهای عکس برداری میکروسکوپ الکترونی عبوری (TEM) و روبشی (SEM) و آنالیز پراش اشعه ایکس (XRD) صورت گرفت. نتایج تجربی تحلیل های آزمایشگاهی ثابت کرده که با افزایش دما و کسر حجمی، هدایت حرارتی نسبی افزایشی است و میزان این افزایش برای کسر حجمی نسبت به دما شدیدتر است. نتایج آماری تحلیل تجربی نشان داده که کمینه و بیشینه افزایش هدایت حرارتی نانوسیال نسبت به سیال پایه به ترتیب برابر با ۱/۶٪ و ۱۷/۹٪ ثبت شده است. مدل سازی سطح پاسخ برای هدایت حرارتی نسبی نانوسیال نشان می دهد که مقادیر R ² و Adj R ² به ترتیب برابر با ۰/۹۸۸۲ و ۰/۹۸۶۰ و مقدار MOD بین ۱- و ۱+ است.
واژگان کلیدی: نانوسیال هیبریدی، هدایت حرارتی، حرکت براونی، روش سطح پاسخ، روش آزمایشگاهی، رابطه همبستگی.	

۱- مقدمه

فرسایش لوله ها می شود. این مشکلات توسط چوی [۲] با پراکندگی جامدات با اندازه نانو در یک سیال پایه به بررسی پرداخت. سوسپانسیون هایی با خواص حرارتی افزایش یافته را می توان با پراکنده کردن نانوذرات جامد که دارای رسانایی حرارتی ذاتی بالایی هستند در سیالات پایه مانند آب [۳-۵]، اتیلن گلیکول [۶-۸] و روغن ها [۹-۱۱] که هدایت حرارتی کمتری دارند ساخته شوند. بعبارت دیگر نانوسیال ها سوسپانسیون هایی از نانوذرات در سیالات پایه معمولی مانند آب، روغن ها یا اتیلن گلیکول ها هستند. افزایش رسانایی حرارتی در نانوسیالات به همرفت موضعی ناشی از حرکت

یکی از بزرگترین مشکلات ناشی از پیشرفت های تکنولوژی، تولید گرمای اضافی بیشتر به ازای حجم تجهیزات است. یکی از بهترین راه حل ها برای افزایش گرما، استفاده از خنک کننده هایی با خواص حرارتی بهبود یافته مانند نانوسیالات است. تولد نانوسیال به ایده ماکسول نسبت داده می شود که ذراتی در محدوده اندازه میکرومتر و میلی متر به سیال پایه اضافه کرده بود تا رسانایی حرارتی سیالات را افزایش دهد [۱]. این محدوده اندازه ذرات جامد باعث ایجاد چالش های جدی مانند گرفتگی، افزایش افت فشار و

* m.hemmatesfeh@gmail.com

* پست الکترونیک نویسنده مسئول: m.hemmatesfeh@gmail.com

استادیار، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه جامع امام حسین (ع)

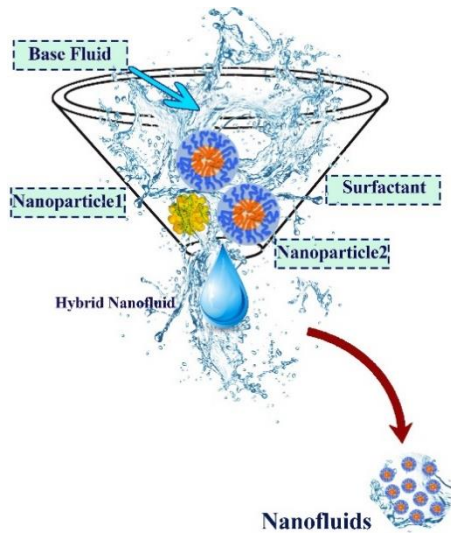
به افزایش رسانایی حرارتی می‌شود. حداکثر افزایش هدایت حرارتی در شرایط آزمایشگاهی با غلظت ۳٪ و دمای ۷۰°C برابر با ۲۲/۱٪ گزارش کردند. در مطالعه دیگر [۲۵]، نانوسیال TiO₂/آب در شرایط مختلف آزمایشگاهی برای بررسی تاثیر عوامل فرآیند بر روی عملکرد هدایت حرارتی مورد بررسی قرار گرفت. آنها بر اساس مشاهدات تجربی نشان دادند که در دمای بالاتر، افزایش رسانایی حرارتی نانوسیال با افزایش کسر حجمی جامد بیشتر است در حالی که در کسر حجمی پایین، اثر افزایش دما بر هدایت حرارتی کمتر مشاهده شد. بیشترین افزایش درصد هدایت حرارتی با غلظت ۳ درصد حجمی در دمای ۵۰ درجه سانتی گراد اتفاق افتاد که مقدار برابر با ۱۵/۶۹٪ تعیین شد. در سال ۲۰۲۰ [۲۶] مقاله‌ای با هدف بررسی تجربی اثرات دما و کسر حجمی بر روی افزایش هدایت حرارتی و عملکرد انتقال حرارت نانوسیال‌های Al₂O₃ و TiO₂ مبتنی بر آب ارائه شد. نتایج تجربی این مقاله نشان داد که نانوسیال حاوی Al₂O₃ بالاترین افزایش هدایت حرارتی به میزان حداکثر ۴۴ درصد را نسبت به نانوسیال حاوی TiO₂ داشته است. در جدول ۱ مروری بر مطالعات تجربی هدایت حرارتی انواع نانوسیالات هیبریدی که توسط محققان در شرایط مختلف آزمایشگاهی بررسی گردید گزارش شده است.

جدول ۱. برخی از مطالعات مروری در زمینه انتقال حرارت انواع نانوسیالات

مرجع	نانوسیال	شرایط	حداکثر افزایش هدایت حرارتی
[۲۷]	Cu-TiO ₂ /H ₂ O-EG	۲۰°C < T < ۶۰°C ۰/۱% < φ < ۲%	+۴۳%
[۲۸]	TiO ₂ -H ₂ O/EG	۳۰°C < T < ۸۰°C ۰/۵% < φ < ۱/۵%	+۱۵/۳۵%
[۲۹]	TiO ₂ -EG	T=۲۵°C ۰% < φ < ۷%	+۱۹/۵۲%
[۳۰]	TiO ₂ -H ₂ O	۳۰°C < T < ۷۰°C ۰/۵% < φ < ۱%	~+۹%
[۳۱]	TiO ₂ /MWCNTs-EG-H ₂ O	۲۰°C < T < ۶۰°C ۰/۱۲۵% < φ < ۱%	+ ۳۴/۳۱%

محققان برای صرفه جویی در هزینه و زمان انجام آزمایش و نیز افزایش سرعت در حصول نتایج از روش‌های آماری و عددی سطح پاسخ^۱ و شبکه عصبی مصنوعی^۲ جایگزین روش‌های پرهزینه و زمان بر آزمایش‌های تجربی کردند. در جدول ۲ برخی از مدل‌های عددی که ارتباط بین متغیرهای

برآونی نانوذرات نسبت داده شده است [۱۲]. نانوذرات مورد استفاده در نانوسیال‌ها معمولاً از فلزات، اکسیدها، کاربیدها یا نانولوله‌های کربنی ساخته می‌شوند. اولین موادی که برای نانوسیالات آزمایش شد، ذرات اکسید بودند، در درجه اول به این دلیل که تولید آنها آسان است و اینکه از نظر شیمیایی در محلول پایدار هستند [۱۳]. پس از آن، از نانولوله‌های کربنی برای تولید نانوسیال‌ها استفاده شد و افزایش رسانایی حرارتی بیشتری برای نانوسیال‌های CNT در مقایسه با نانوسیال‌های اکسیدی مشاهده شد [۱۴، ۱۵]. اخیراً نانوسیال هیبریدی به دلیل افزایش خواص حرارتی در مقایسه با نانوسیال منفرد مورد توجه محققین قرار گرفته است [۱۶-۱۸]. نانوسیال هیبریدی را می‌توان به عنوان ترکیبی از دو یا چند نوع مختلف نانوذرات پراکنده در یک سیال پایه تعریف کرد. نانوسیالات دارای خواص جدیدی هستند که آنها را به طور بالقوه در بسیاری از کاربردها در انتقال حرارت، از جمله میکروالکترونیک، سلول‌های سوختی، فرایندهای دارویی، موتورهای هیبریدی، خنک‌کننده موتور/مدیریت حرارتی خودرو، یخچال خانگی، چیلرها، مبدل حرارتی، خنک‌کننده راکتور هسته‌ای می‌سازد [۱۹-۲۱]. تأثیر عوامل متعددی مانند غلظت حجمی، نوع و اندازه نانوذرات، دما، نوع سیال پایه، سورفکتانت‌ها، pH و فرآیند ساخت بر روی رسانایی حرارتی نانوسیال مورد بررسی قرار گرفت [۱۷، ۲۲]. در مطالعه‌ای [۲۳] مشابه با پژوهش حاضر، اثرات عوامل مختلف دما و کسر حجمی بر روی هدایت حرارتی نانوسیال هیبریدی (Water(50%)-TiO₂(50%)-MWCNT(50%)/EG(50%) در کسر حجمی‌های مختلف ۱٪-۰/۵٪ و محدوده دمایی ۲۵°C-۵۰°C مورد بررسی قرار گرفت. نتایج تجربی آنها نشان داد که افزایش دما و کسر حجمی باعث افزایش رسانایی حرارتی نانوسیال می‌شود. همچنین تاثیر کسر حجمی نسبت به دما بر روی هدایت حرارتی برجسته‌تر بود. نتایج نشان داد که هدایت حرارتی نانوسیال می‌تواند حداکثر تا ۳۸/۷٪ افزایش یابد. در مطالعه‌ای [۲۴] به منظور درک بهتر در مورد خواص و رفتار حرارتی نانوسیال TiO₂-SiO₂/(EG)-water، اثرات عوامل مؤثر دما و کسر حجمی در شرایط مختلف آزمایشگاهی بر هدایت حرارتی مورد بررسی قرار گرفته شد. نتایج تجربی آنها اثبات می‌کند که افزایش غلظت و دما منجر

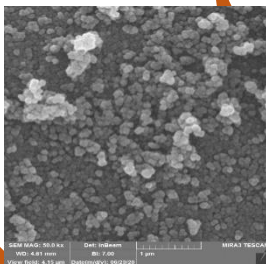


شکل ۱. شماتیک تهیه نانوسیال

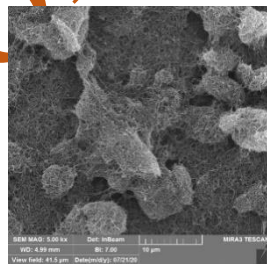
جدول ۳. مشخصات فیزیکی نانوسیالات

نانوذرات	درصد خلوط	APS	SSA	رنگ	دانسیتته واقعی
MWCNTs	> 95 wt%	5-15 nm	233 m ² /g	Black	~2.1 g/cm ³
TiO ₂	99%	20 nm	10-45 m ² /g	white	4.23 g/cm ³

برای مطالعه خواص سطحی، مورفولوژی (اندازه و شکل) و شناسایی ساختار نانوذرات از آنالیزهای TEM، SEM و XRD استفاده گردید. تصاویر مربوط به هر یک از نمونه‌های نانوذرات برای آنالیزهای مختلف در اشکال ۲، ۳ و ۴ مشاهده می‌شود.



TiO₂



MWCNT

شکل ۲. نمونه SEM نانوذرات

وابسته و مستقل را بصورت رابطه ریاضی برای انواع نانوسیالات تعیین نموده است گزارش شده است.

جدول ۲. برخی از مدل های تجربی هدایت حرارتی نانوسیالات

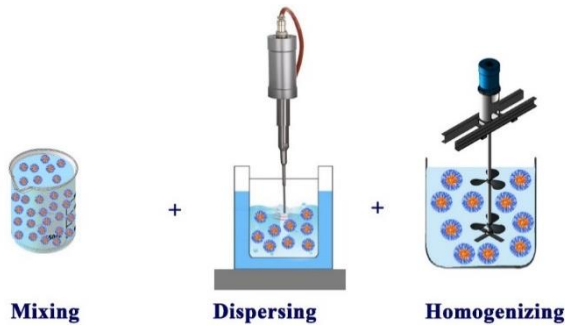
مرجع	روابط
[۳۲]	$TCR = (0.83411.1\phi^{+0.243}T^{-0.289})$
[۳۳]	$TCR = [0.907exp(0.36\phi^{0.3111} + 0.000956T)]$
[۳۴]	$TCR = (1.085e^{0.0013517+0.13\phi^2} + 0.0288ln(\phi))$
[۳۵]	$TCR = 1 + 4.4Re_p^{0.4} Pr_p^{0.66} \left(\frac{T}{T_r}\right)^{10} \left(\frac{k_p}{k_f}\right)^{0.02} \phi_v^{0.66}$
[۳۶]	$k_{nf} = (1.017 + 1.029^T * 0.072 * \phi^{0.243} T^{-0.289}) 0.5642e^{0.002748T}$
[۳۷]	$k_{nf} = 0.006(\phi^{1.099})T^{1.051} + 1.014$

در این پژوهش برای نخستین بار رفتار حرارتی نانوسیال هیبریدی TiO₂(85%)MWCNT(15%)/EG(50%)/water تحت تاثیر عوامل دما و کسر حجمی در شرایط مختلف آزمایشگاهی مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. هدف در این مطالعه، بررسی روند تغییرات خواص حرارتی نسبت به هریک از متغیرهای مؤثر دما و کسر حجمی، مدل سازی ارتباط بین متغیرهای مستقل و وابسته از طریق روش آماری RSM¹ و نیز بررسی میزان اثرگذاری فاکتور کسر حجمی بر رفتار هدایت حرارتی با استفاده از آنالیز حساسیت است.

۲- فرآیند تجربی

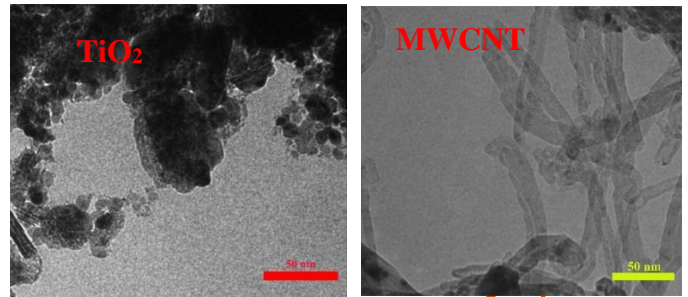
۲-۱- تهیه نمونه

در این پژوهش از روش دومرحله‌ای برای ساخت نانوسیال هیبریدی-TiO₂(85%)-MWCNT(15%)-EG(50%)-water(50%) استفاده گردید. تیتانیا و نانولوله کربنی با نسبت ترکیب‌های ۸۵ به ۱۵ درصد در نانوسیال پراکنده شدند. مشخصات ظاهری و خواص ترموفیزیکی نانوسیال در جدول ۳ گزارش شده است. در شکل ۱ شماتیکی از تهیه نانوسیال نشان داده شده است.

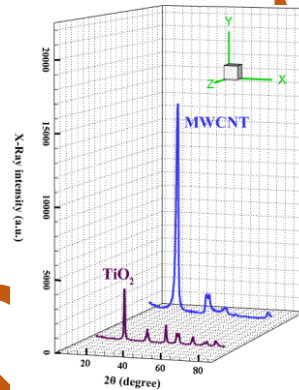


شکل ۵. شماتیکی از فرآیند پایدارسازی نانوسیال به صورت مرحله به مرحله

۲-۲- اندازه‌گیری ضریب هدایت حرارتی
 برای تحلیل خواص حرارتی لازم است تا مقادیر هدایت حرارتی نانوسیال در شرایط مختلف آزمایشگاهی بررسی شود. برای این منظور از دستگاه KD2 pro¹ استفاده گردید. شکل ۶ شماتیکی از دستگاه حرارت سنچ را نشان می‌دهد. اندازه‌گیری بر اساس مکانیزم سیم داغ گذرا و از ابزار فولاد ضد زنگ سوزنی KS-1 برای اندازه‌گیری ضریب هدایت حرارتی این نانوسیال ترکیبی در محدوده دمایی ۲۸ تا ۵۰ درجه سانتیگراد استفاده شد. این ابزار قادر است که هدایت حرارتی را در محدوده $0.2-2 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ اندازه‌گیری کند. به منظور افزایش دقت داده‌های تجربی، سوزن حسگر به طور کامل در سیال قرار گرفته است و اندازه‌گیری در حمام آب (برای حفظ دمای نانوسیال) بدون هیچ گونه نوسان و در شرایط کاملاً آرام صورت گرفت. دقت دمای تنظیم در حمام آب به 0.1 درجه سانتی‌گراد می‌رسد. به منظور دستیابی به دقت قابل قبول در فرآیند اندازه‌گیری، داده‌های آزمایشگاهی برای هر شرایط در سه نوبت با فاصله ۱۰ دقیقه ای اندازه‌گیری شدند و سپس میانگین داده‌ها ثبت شد. در جدول ۴ برخی از داده‌های تجربی در شرایط مختلف گزارش شد. رسانایی حرارتی سیال پایه نانوسیال در شرایط مختلف با بانک مرجع ASHRAE برای تأیید نتایج مقایسه شد [۳۷]. شکل ۷ نشان می‌دهد که مقادیر اندازه‌گیری شده تجربی انطباق خوبی با مرجع ASHRAE داشته است.



شکل ۳. نمونه TEM نانوذرات



شکل ۴. آنالیز اشعه پراش ایکس برای نمونه‌های نانوذرات TiO_2 و MWCNT

برای محاسبه جرم مورد نیاز نانوذرات در کسرجمی‌های مختلف ۰/۳٪، ۰/۰۶٪، ۰/۱٪، ۰/۲٪، ۰/۳٪، ۰/۴٪، ۰/۵٪ و ۰/۶٪ از رابطه ۱ استفاده گردید. همچنین برای توزین نانوذرات از ترازوی دیجیتالی با دقت 0.1 mgr بکار گرفته شد.

$$\phi = \frac{0.15 \frac{w}{p} \Big|_{\text{MWCNT}} + 0.85 \frac{w}{p} \Big|_{\text{TiO}_2}}{0.15 \frac{w}{p} \Big|_{\text{MWCNT}} + 0.85 \frac{w}{p} \Big|_{\text{TiO}_2} + 0.50 \frac{w}{p} \Big|_{\text{Water}} + 0.50 \frac{w}{p} \Big|_{\text{EG}}} \times 100 \quad (1)$$

برای همگن‌سازی اولیه و سپس شکستن خوشه‌های نانوذرات و رسوب زدایی و عدم نشینی نانوسیال تهیه شده از روش‌های پایدارسازی مانند استفاده از همزن مغناطیسی و ارتعاش اولتراسونیک بکار گرفته شد. افزایش پایداری و کیفیت نانومحلول، باعث بهینه‌سازی نتایج و دقت در تحلیل رفتار خواص ترموفیزیکی می‌شود و رکن اساسی در موضوعات نانوسیالاتی محسوب می‌شود. شکل ۵ شماتیکی از فرآیند پایدارسازی نانوسیال را نشان می‌دهد.

مطالب این بخش به طور کلی در دو قسمت ارائه می‌شوند که در ابتدا به بررسی داده‌های آزمایشگاهی و سپس به نتایج مدل‌سازی هدایت حرارتی نانوسیال پرداخته می‌شود.

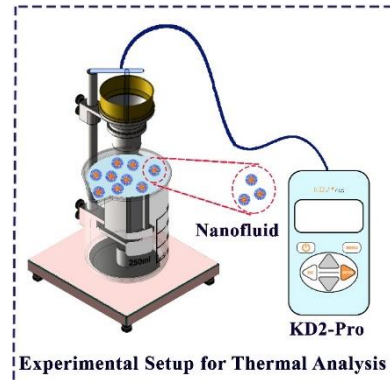
۳-۱- بررسی داده‌های آزمایشگاهی

در این بخش به بررسی و تحلیل داده‌های آزمایشگاهی بدست آمده از نانوسیال $\text{TiO}_2(85\%)/\text{MWCNT}(15\%)$ - $(\text{CH}_2\text{OH})_2(50\%)/\text{H}_2\text{O}(50\%)$ پرداخته می‌شود.

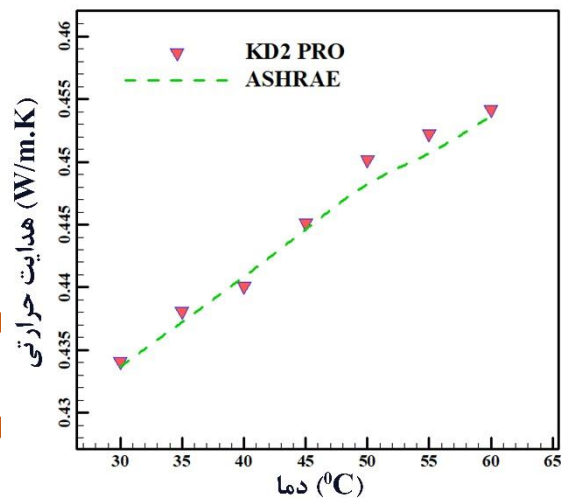
۳-۱-۱- تأثیر دما و کسر حجمی نانوذرات بر نسبت

هدایت حرارتی

به منظور ارزیابی دقیق تر افزایش هدایت حرارتی، تغییر RTC^1 نانوسیال هیبریدی در مقابل کسر حجمی و دما در شکل ۸ نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود در دماهای بالاتر، تغییرات RTC نسبت به کسر حجمی بیشتر از آن در دماهای پایین‌تر است. علاوه بر این، بررسی نسبت هدایت حرارتی روشن می‌کند که تأثیر دما بر نسبت هدایت حرارتی در کسرهای جامد بالاتر قابل توجه است. این امر به این دلیل است که در حضور مقادیر زیاد ذرات، تأثیر دما بر حرکت ذرات محسوس‌تر است. همچنین مشاهده می‌شود که با افزایش ϕ ، RTC نانوسیال در همه دماها افزایشی است. بر اساس این نمودار در دمای $T = 50^\circ\text{C}$ ، با افزایش کسر حجمی از ۰/۰۳٪ تا ۰/۶۰٪، RTC از ۱/۰۴۰ تا ۱/۱۷۹ تغییر می‌کند که بیشترین درصد افزایش هدایت حرارتی در شرایط آزمایشگاهی $T = 50^\circ\text{C}$ و $\phi = 0/60$ رخ داده که مقدار آن ۱۷/۹٪ بیشتر از سیال پایه بوده است.



شکل ۶. شماتیک دستگاه KD2 pro (Decagon device, Inc., USA)

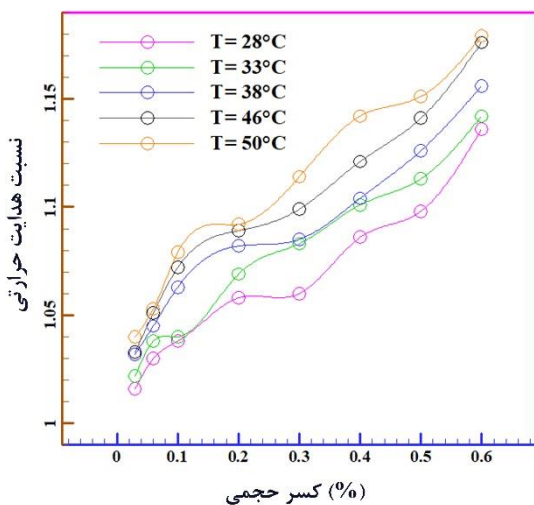


شکل ۷. اعتبار سنجی نتایج KD2-pro (دستگاه اندازه گیری هدایت حرارتی) با نتایج ASHRAE.

جدول ۴. برخی از اندازه گیری های ضریب هدایت حرارتی $\text{TiO}_2(85\%)/\text{MWCNT}(15\%)-\text{EG}(50\%)/\text{water}(50\%)$

کسر حجمی (%)	دما (°C)	نسبت هدایت حرارتی
۰/۰۳	۲۸	۱/۰۲۰
۰/۰۶	۳۳	۱/۰۴۰
۰/۱۰	۳۸	۱/۰۶۰
۰/۲۰	۴۶	۱/۰۹۰
۰/۳۰	۵۰	۱/۱۱۰
۰/۴۰	۲۸	۱/۰۹۰
۰/۵۰	۳۳	۱/۱۱۰
۰/۶۰	۵۰	۱/۱۸۰

۳- بحث و نتیجه گیری



¹Relative thermal conductivity

شکل ۸. نسبت هدایت حرارتی به کسر حجمی در دماهای مختلف نانوذرات

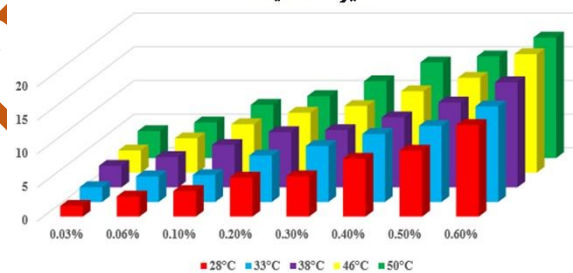
۳-۱-۲- افزایش هدایت حرارتی

برای درک بهتر اثربخشی نانوذرات بر k_{nf} و سهولت مقایسه، TCE^1 از معادله ۲ محاسبه شده است. این پارامتر درصد افزایش k_{nf} را نسبت به سیال پایه نشان می دهد.

$$TCE = \frac{K_{nf} - K_{bf}}{K_{bf}} \times 100 \quad (2)$$

در شکل ۹ مقدار افزایش هدایت حرارتی نانوسیال در شرایط مختلف آزمایشگاهی نسبت به سیال پایه رسم شده است. میتوان نتیجه گرفت که با افزودن مقدار ناچیز از نانوذره در سیال پایه، هدایت حرارتی افزایش می یابد به گونه ای که با توجه به جدول ۵ مقدار کمینه و بیشینه افزایش به ترتیب برابر با ۱/۶٪ و ۱۷/۹٪ گزارش شده است.

آنالیز حساسیت



شکل ۹. کمینه و بیشینه افزایش ضریب هدایت حرارتی

جدول ۵. مقادیر درصد افزایش ضریب هدایت حرارتی در شرایط مختلف آزمایشگاهی - $TiO_2(85\%)/MWCNT(15\%)(CH_2OH)_2(50\%)/H_2O(50\%)$

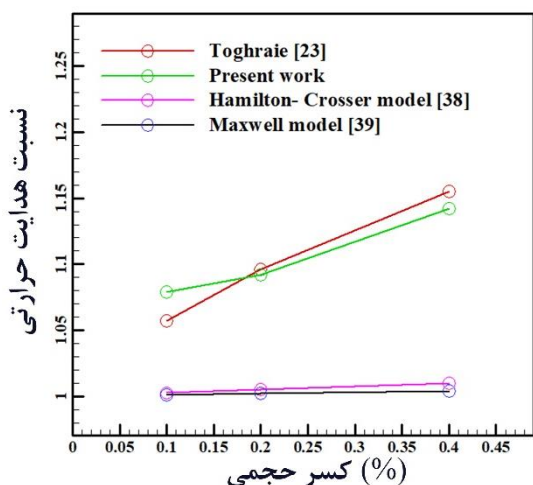
دمای (°C)	کسر حجمی (%)							
	۰.۳	۰.۶	۱.۰	۲.۰	۳.۰	۴.۰	۵.۰	
T= ۲۸	۱/۶	۳	۳/۸	۵/۸	۶	۸/۶	۹/۸	۱۳/۶
T= ۳۳	۲/۲	۳/۸	۴	۶/۹	۸/۳	۱/۱	۱/۳	۱۴/۲
T= ۳۸	۳/۲	۴/۵	۶/۳	۸/۲	۸/۵	۱/۴	۱/۶	۱۵/۶
T= ۴۶	۳/۳	۵/۱	۷/۲	۸/۹	۹/۹	۱/۱	۱/۱	۱۷/۶
T= ۵۰	۴	۵/۳	۷/۹	۹/۲	۱/۴	۱/۲	۱/۱	۱/۹

۳-۱-۳- نتایج بین کارهای حاضر و کارهای پیشین

در این بخش مطالعه ای مقایسه ای بر روی مدل های تئوری و تجربی با پژوهش حاضر شده است. داده های مدل های تئوری و نیز تجربی در دمای مشترک $T = 50^\circ C$ و کسر حجمی ۰/۱، ۰/۲ و ۰/۴ در جدول ۶ گزارش شده است. در شکل ۱۱، نتایج تجربی به دست آمده از کار حاضر و [۲۳] با نتایج مدل های تئوری ریاضی معروف همیلتون-کراسر [۳۸] و ماکسول [۳۹] ترسیم شده است. با توجه به شکل ۱۰ اثرات دیگر پارامترها مانند دما، اندازه، شکل و ... توسط مدل های تئوری در نظر گرفته نشده است.

جدول ۶. هدایت حرارتی نسبی به دست آمده از نتایج تجربی و مدل های موجود

مطالعه حاضر [۲۳]	T = 50°C		
	مدل مرجع [۲۳]	مدل ماکسول	مدل همیلتون-کراسر
۱/۰۷۹	۱/۰۵۷	۰/۰۰۰۹۹۸	۰/۰۰۲۴۹۳
۱/۰۹۲	۱/۰۹۶	۱/۰۰۱۹۹۴	۱/۰۰۴۹۸۱
۱/۱۴۲	۱/۱۵۵	۱/۰۰۳۹۸	۱/۰۰۹۹۴۴



شکل ۱۰. مقایسه نتایج تجربی با مدل های نظری

۳-۲- نتایج مدلسازی

۳-۲-۱- روش RSM

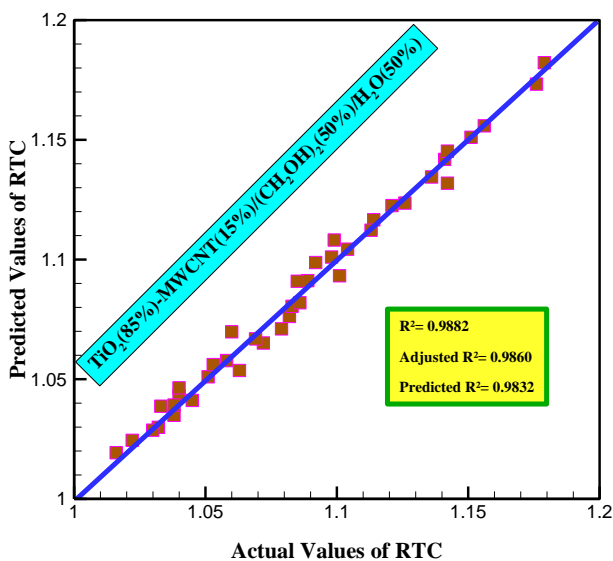
روش RSM از جمله روش های پرکاربرد در طراحی آزمایش و بهینه سازی می باشد و در واقع مجموعه ای از روش ها و تکنیک های آماری برای ساخت مدل های تجربی است. در روش سطح پاسخ، یک متغیر به عنوان پاسخ و متغیر هدف در نظر گرفته می شود و پارامترهای تاثیر گذار بر آن به عنوان متغیر مستقل یا ورودی لحاظ می شوند. در روش سطح پاسخ اثرات متقابل بین متغیرها بررسی می شود و

است مدل سازی معنادار² است. در جدول ۸ اطلاعات مربوط به دقت مدل سازی ارائه شده است و پارامترهای R^2 و $Adj R^2$ به ترتیب برابر با ۰/۹۸۸۲ و ۰/۹۸۶۰ بدست آمدند و با توجه به نزدیکی خوب این مقادیر به عدد ۱، بیانگر دقت خوب مدل سازی است.

جدول ۸. پارامترهای دقت مدل سازی

انحراف استاندارد	۰/۰۰۲۱	R-Squared	۰/۹۸۸۲
میانگین	۰/۰۳۵۶	Adj R-Squared	۰/۹۸۶۰
C.V. %	۵/۸۳	Pred R-Squared	۰/۹۸۳۲
Adeq Precision	۷۴/۱۴۵۴		

شکل ۱۱ میزان تطابق داده‌های واقعی و حاصل از آزمایش را با نتایج خروجی از مدل سازی را ارائه می‌دهد و نزدیکی بیش‌تر داده‌ها به خط ۴۵ درجه بیانگر دقت بیش‌تر مدل سازی است. همان‌طور که در شکل ۱۱ مشخص است داده‌ها به میزان خوبی به خط نیمساز نزدیک هستند و دقت مدل سازی مناسب است.



شکل ۱۱. تطابق داده‌های تجربی و مدل سازی

۲-۲-۳- حاشیه انحراف

پارامتر حاشیه انحراف که از جمله پارامترهای بیانگر دقت می‌باشد به صورت معادله ۴ برای هدایت حرارتی نسبی تعریف می‌شود و در واقع درصد تغییرات هدایت حرارتی نسبی در استفاده از مدل نسبت به نتایج آزمایشگاهی است.

Significant²

نتایج به صورت اعداد کمی بیان می‌گردد. روش‌هایی مانند RSM که مدل سازی داده‌های تجربی و عددی را انجام می‌دهند باعث صرفه جویی در وقت و هزینه می‌شود.

بررسی نتایج هدایت حرارتی نسبی نانوسیال $TiO_2(85\%)/MWCNT(15\%)-EG(50\%)/water(50\%)$ با استفاده از روش سطح پاسخ منجر به ارائه خروجی‌هایی از جمله معادله ۳ و جدول ۷ می‌شود. معادله ۳ بیانگر مدل ارائه شده برای هدایت حرارتی نسبی نانوسیال است که شامل پارامترهای دما و کسر حجمی می‌باشد.

$$\begin{aligned} \log_{10}(RTC) = & -0.007281 \\ & + 0.102261 \varphi \\ & + 0.000388 T \\ & + 0.002346 \varphi T \\ & - 0.332903 \varphi^2 \\ & - 0.002735 \varphi^2 \\ & * T \\ & + 0.453264 \varphi^3 \end{aligned} \quad (3)$$

جدول ۷. تجزیه و تحلیل آماری مدل سطح پاسخ

	مجموع مربعات	df	میانگین مربعات	F Value	p-value Prob > F	
Model	۰/۰۱۱۹	۶	۰/۰۰۲۰	۴۵۹/۵۳	< ۰/۰۰۰۱	معنادار
A-Phi	۰/۰۰۰۴	۱	۰/۰۰۰۴	۱۰۳/۰۳	< ۰/۰۰۰۱	
B-T	۰/۰۰۰۷	۱	۰/۰۰۰۷	۱۵۸/۴۷	۰/۰۰۵۰	
AB	۰/۰۰۰۰	۱	۰/۰۰۰۰	۹/۰۷	۰/۳۰۹۸	
A ³	۴/۵۸۸ E-۰۶	۱	۴/۵۸۸ E-۰۶	۱/۰۶	۰/۰۴۹۹	
A ² B	۰/۰۰۰۰	۱	۰/۰۰۰۰	۴/۱۴	< ۰/۰۰۰۱	
A ³	۰/۰۰۰۲	۱	۰/۰۰۰۲	۳۶/۰۸		
Residual	۰/۰۰۰۱	۳۳	۴/۳۱۲ E-۰۶			

جدول ۷. معروف به جدول ANOVA^۱ است و در آن پارامترهای موثر بر هدایت حرارتی نسبی به همراه مقادیر آماری مدل سازی آورده شده است. همان‌طور که مشخص

Analysis of variance^۱

کمینه و بیشینه افزایش هدایت حرارتی به ترتیب برابر با ۱/۴٪ و ۱۷/۹٪ ثبت شده است.

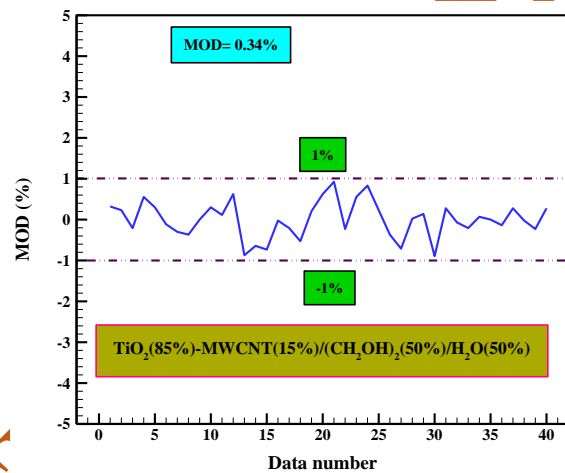
نتایج حاصل از مدلسازی RSM نشان داد که مقادیر R^2 و $Adj R^2$ به ترتیب برابر با ۰/۹۸۸۲ و ۰/۹۸۶۰ هستند و همچنین $1\% < MOD < 1\%$ بدست آمد که دقت خوب مدل هدایت حرارتی نسبی نانوسیال را نشان می‌دهد.

References

- [1] Maxwell, J.C., A treatise on electricity and magnetism. Vol. 1. 1873: Clarendon press.
- [2] Choi, S.U. and J.A. Eastman, Enhancing thermal conductivity of fluids with nanoparticles. 1995, Argonne National Lab., IL (United States).
- [3] Çolak, A.B.J.I.J.o.E.R., Experimental study for thermal conductivity of water-based zirconium oxide nanofluid: Developing optimal artificial neural network and proposing new correlation. 2021. 45(2): p. 2912-2930.
- [4] Rostami, S., et al., Measurement of the thermal conductivity of MWCNT-CuO/water hybrid nanofluid using artificial neural networks (ANNs). 2021. 143(2): p. 1097-1105.
- [5] Pourrajab, R., et al., An efficient enhancement in thermal conductivity of water-based hybrid nanofluid containing MWCNTs-COOH and Ag nanoparticles: experimental study. 2021. 143(5): p. 3331-3343.
- [6] Yan, S.-R., et al., Rheological behavior of hybrid MWCNTs-TiO₂/EG nanofluid: a comprehensive modeling and experimental study. 2020. 308: p. 113058.
- [7] Choi, T.J., et al., Experimental study on the effect of nanoparticle migration on the convective heat transfer coefficient of EG/water-based Al₂O₃ nanofluids. 2021. 169: p. 120903.
- [8] Wen, T., G. Zhu, and L.J.I.J.o.T.S. Lu, Experimental and artificial neural network based study on the heat transfer and flow performance of ZnO-EG/water nanofluid in a mini-channel with serrated fins. 2021. 170: p. 107149.
- [9] Jiang, H., et al., Temperature dependence of the stability and thermal conductivity of an oil-based nanofluid. 2014. 579: p. 27-30.
- [10] Liu, M.-S., et al., Enhancement of thermal conductivity with carbon nanotube for nanofluids. 2005. 32(9): p. 1202-1210.

نتایج MOD^۱ در شکل ۱۲ ارائه شده است که مقادیری بین -۱٪ و +۱٪ بدست آمده است و مقدار میانگین نتایج برابر با ۰/۳۴٪ شده است که دقت خوب مدل ارائه شده را نشان می‌دهد.

$$MOD = \frac{RTC_{relpre} - RTC_{relexp}}{RTC_{relexp}} \times 100 \quad (4)$$



شکل ۱۲. انحراف از معیار داده‌ها

۴- نتیجه گیری

در این پژوهش عملکرد حرارتی نانوسیال هیبریدی $TiO_2(85\%)/MWCNT(15\%)-(CH_2OH)_2(50\%)/H_2O(50\%)$ در شرایط مختلف آزمایشگاهی مورد تجزیه و تحلیل آزمایشگاهی و آماری قرار گرفته است. هدف در این مطالعه درک رفتار حرارتی نانوسیال بصورت آزمایشگاهی و بهینه سازی این رفتار با استفاده از روش RSM است. نتایج حاصل از تحلیل های آماری و آزمایشگاهی در موارد زیر خلاصه شده است:

مشاهدات نشان داده که تاثیر فاکتورهای دما و کسر حجمی رابطه مستقیمی بر رفتار حرارتی داشته است. یافته های آزمایشگاهی مشخص کرده که شدت افزایش هدایت حرارتی در کسر حجمی ها و دماهای بالا به دلیل اثر همزمان حرکت براونی و افزایش تعداد برخوردها و تشکیل ناخوشه ها بیشتر است. افزودن مقدار ناچیزی از نانوذرات در شرایط مختلف دمایی، هدایت حرارتی نانوسیال را افزایش داده است.

- thermal conductivity of water-ethylene glycol/TiO₂-MWCNTs hybrid nanofluid: developing a new correlation. 2018. 338: p. 806-818.
- [24] Hamid, K., et al. Improved thermal conductivity of TiO₂-SiO₂ hybrid nanofluid in ethylene glycol and water mixture. in IOP Conference series materials science and engineering. 2017. IOP Publishing.
- [25] Singh, R., K. Sharma, and A. Tiwari, An experimental investigation of thermal conductivity of TiO₂ nanofluid: proposing a new correlation. 2019.
- [26] Mukherjee, S., et al., Transient heat transfer characteristics and process intensification with Al₂O₃-water and TiO₂-water nanofluids: An experimental investigation. 2020. 150: p. 107887.
- [27] Esfe, M.H., et al., Thermal conductivity of Cu/TiO₂-water/EG hybrid nanofluid: Experimental data and modeling using artificial neural network and correlation. 2015. 66: p. 100-104.
- [28] Abdul Hamid, K., et al., Thermal conductivity enhancement of TiO₂ nanofluid in water and ethylene glycol (EG) mixture. 2016. 54(10): p. 651-655.
- [29] Khedkar, R.S., et al., Experimental investigations and theoretical determination of thermal conductivity and viscosity of TiO₂-ethylene glycol nanofluid. 2016. 73: p. 54-61.
- [30] Esfe, M.H., S.M. Motallebi, and M.J.C.J.o.P. Bahiraei, Employing response surface methodology and neural network to accurately model thermal conductivity of TiO₂-water nanofluid using experimental data. 2021. 70: p. 14-25.
- [31] Moradi, A., et al., Effects of temperature and volume concentration on thermal conductivity of TiO₂-MWCNTs (70-30)/EG-water hybrid nano-fluid. 2020. 362: p. 578-585.
- [32] Afrand, M.J.A.T.E., Experimental study on thermal conductivity of ethylene glycol containing hybrid nano-additives and development of a new correlation. 2017. 110: p. 1111-1119.
- [33] Zadkhast, M., et al., Developing a new correlation to estimate the thermal conductivity of MWCNT-CuO/water hybrid nanofluid via an experimental investigation. 2017. 129(2): p. 859-867.
- [34] Esfe, M.H., et al., Experimental study on thermal conductivity of DWCNT-
- [11] Esfe, M.H., et al., The effect of different parameters on ability of the proposed correlations for the rheological behavior of SiO₂-MWCNT (90/10) SAE40 oil-based hybrid nano-lubricant and presenting five new correlations. 2021.
- [12] Parsaiemehr, M., et al., Turbulent flow and heat transfer of Water/Al₂O₃ nanofluid inside a rectangular ribbed channel. 2018. 96: p. 73-84.
- [13] Lee, S., et al., Measuring thermal conductivity of fluids containing oxide nanoparticles. 1999.
- [14] Eastman, J.A., et al., Anomalous increased effective thermal conductivities of ethylene glycol-based nanofluids containing copper nanoparticles. 2001. 78(6): p. 718-720.
- [15] Choi, S., et al., Anomalous thermal conductivity enhancement in nanotube suspensions. 2001. 79(14): p. 2252-2254.
- [16] Yıldız, Ç., et al., Comparison of a theoretical and experimental thermal conductivity model on the heat transfer performance of Al₂O₃-SiO₂/water hybrid-nanofluid. 2019. 140: p. 598-605.
- [17] Safaei, M.R., et al., Evaluating the effect of temperature and concentration on the thermal conductivity of ZnO-TiO₂/EG hybrid nanofluid using artificial neural network and curve fitting on experimental data. 2019. 519: p. 209-216.
- [18] Kumar, V. and R.R.J.H.T.A.R. Sahoo, Viscosity and thermal conductivity comparative study for hybrid nanofluid in binary base fluids. 2019. 48(7): p. 3144-3161.
- [19] Taherialekouhi, R., et al., An experimental study on stability and thermal conductivity of water-graphene oxide/aluminum oxide nanoparticles as a cooling hybrid nanofluid. 2019. 145: p. 118751.
- [20] Chahregh, H.S., S.J.I.J.o.N.M.f.H. Dinarvand, and F. Flow, TiO₂-Ag/blood hybrid nanofluid flow through an artery with applications of drug delivery and blood circulation in the respiratory system. 2020.
- [21] Abbas, F., et al., Nanofluid: Potential evaluation in automotive radiator. 2020. 297: p. 112014.
- [22] Li, Y., et al., Effects of sonication duration and nanoparticles concentration on thermal conductivity of silica-ethylene glycol nanofluid under different temperatures: an experimental study. 2020. 367: p. 464-473.
- [23] Akhgar, A. and D.J.P.T. Toghraie, An experimental study on the stability and

ZnO/water-EG nanofluids. 2015 :٩٨ p. 248-251.

- [35] Corcione, M.J.E.c. and management, Empirical correlating equations for predicting the effective thermal conductivity and dynamic viscosity of nanofluids. 2011. 52(1): p. 789-793.
- [36] Moghadam, I.P., et al., Curve-fitting on experimental data for predicting the thermal-conductivity of a new generated hybrid nanofluid of graphene oxide-titanium oxide/water. 2020. 548: p. 122140.
- [37] ASHRAE. Handbook—Fundamentals (SI Edition), American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc. 2017.
- [38] Hamilton, R.L., O.J.I. Crosser, and E.c. fundamentals, Thermal conductivity of heterogeneous two-component systems. 1962. 1(3): p. 187-191.
- [39] Maxwell, J.C., A Treatise on Electricity and Magnetism: pt. III. Magnetism. pt. IV . Electromagnetism. Vol. 2. 1881: Clarendon press.

UNCORRECTED PROOF

**Thermal behavior of TiO₂ (85%) / MWCNT (15%) - (CH₂OH)₂ (50%) / H₂O (50%)
hybrid nanofluid under the influence of temperature and volume fraction factors
with laboratory and response surface methods**

ARTICLE INFO	ABSTRACT
Keywords: Hybrid nanofluid, Thermal conductivity, Brownie motion, Response surface method, laboratory method, Correlation	In this study, for the first time, the thermal behavior of TiO ₂ (85%) / MWCNT (15%) - (CH ₂ OH) ₂ (50%) / H ₂ O (50%) hybrid nanofluid thermal behavior is investigated. The thermal conductivity of the nanofluid is determined by KD2 PRO at fractional volumes of $\phi = 0.03\%$ - 0.6% and temperatures of $T = 28^\circ\text{C}$ - 50°C . Nanoscale and nanoparticle structure validation are performed using transmission electron microscopy (TEM) and scanning (SEM) and X-ray diffraction (XRD) analysis tools. Experimental results of laboratory analyzes have shown that with increasing temperature and volume fraction, relative thermal conductivity (RTC) is increasing and the amount of this increase is more severe for volume fraction than temperature. The statistical results of experimental analysis showed that the minimum and maximum increase in thermal conductivity of nanofluid compared to the base fluid are 1.6% and 17.9%, respectively. The modeling of the response surface for the relative thermal conductivity of nanofluid shows that the values of R^2 and $\text{Adj } R^2$ are equal to 0.9882 and 0.9860, respectively, and the MOD value is between -1 and +1.

UNCORRECTED PROOF