

## Experimental study of thermal conductivity in a hybrid nanofluid (MWCNT and SiO<sub>2</sub>) in the base fluids of ethylene glycol and water and presentation of a new experimental Correlation

M. Hemmat Esfe<sup>1</sup>H. Sharifi Doost<sup>\*2</sup>

Imam Hossein University, Tehran, Iran.

(Received: 2024/04/12, Revised: 2024/06/11, Accepted: 2024/07/02, Published: 2024/07/22)

DOR: <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.23223278.1403.13.1.3.9>

### ABSTRACT

This experimental study investigates the thermal properties and conductivity of a hybrid nanofluid composed of 89% SiO<sub>2</sub> and 11% MWCNT in a mixture of 45% ethylene glycol and 55% water. The nanofluid was prepared using a two-step method, and its thermal conductivity was measured across various volume fractions (ranging from 0.1% to 1.45%) and temperatures (from 26.7°C to 50°C) using a KD2 Pro device. The results indicated a 25.1% increase at a volume fraction of 1.45% and a temperature of 50°C. By employing the response surface method, a 5th-degree polynomial equation accurately describes the complex interaction between temperature and volume fraction ( $R^2=0.9996$ ). The model's high accuracy is demonstrated by a Response surface method margin of deviation ranging from 0.238% to 0.355%.

**Keywords:** Hybrid Nanofluid, Conductive Heat Transfer, Multi-Walled Carbon Nanotube, Thermal Conductivity Coefficient, Response Surface Method

## مطالعه تجربی رسانایی حرارتی نانوسیال هیبریدی (MWCNT و SiO<sub>2</sub>) در سیال پایه اتیلن گلیکول و آب و ارائه یک رابطه تجربی جدید

حامد شریفی دوست<sup>\*2</sup>محمد همت اسفه<sup>1</sup>

دانشگاه جامع امام حسین (ع)، تهران، ایران.

(دریافت: ۱۴۰۳/۰۱/۲۴، بازنگری: ۱۴۰۳/۰۳/۲۲، پذیرش: ۱۴۰۳/۰۴/۱۲، انتشار: ۱۴۰۳/۰۵/۰۱)

### چکیده

این مطالعه تجربی یک کاوش تجربی از خواص حرارتی و ضریب هدایت حرارتی یک نانوسیال هیبریدی حاوی ۸۹ درصد حجمی دی اکسید سیلیکون (SiO<sub>2</sub>) و ۱۱ درصد حجمی نانولوله‌های کربنی چند دیواره (MWCNT) پراکنده شده در ترکیبی از ۴۵ درصد حجمی اتیلن گلیکول و ۵۵ درصد حجمی آب ارائه می‌کند. نانوسیال هیبریدی به‌دقت با استفاده از روش دومرحله‌ای تهیه شد و هدایت حرارتی آن به‌طور سیستماتیک در کسرهای حجمی (۰/۱٪ تا ۱/۴۵٪) و دماهای (۲۶/۷°C تا ۵۰°C) اندازه‌گیری شد. با استفاده از دستگاه KD2 Pro، هدایت حرارتی نسبی به‌صورت تجربی تعیین شد که بیشترین درصد افزایش را در کسر حجمی ۱/۴۵٪ و دمای ۵۰°C به میزان ۲۵/۱٪ نشان داد. سپس داده‌های تجربی با استفاده از روش سطح پاسخ در نرم‌افزار Design Expert مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. همبستگی جدید توسط یک معادله چندجمله‌ای درجه ۵ ایجاد شد که تعامل پیچیده دما و کسر حجمی را برای نانوسیال هیبریدی در بر می‌گیرد. همبستگی تجربی ایجاد شده دارای دقت قابل توجهی با ضریب تعیین ( $R^2=0.9996$ ) می‌باشد. همچنین حاشیه انحراف برای روش سطح پاسخ  $0.238\% < MOD < 0.355\%$  بود که نشانه دقت بالای مدل است.

**واژه‌های کلیدی:** نانوسیال هیبریدی، انتقال حرارت هدایتی، نانولوله کربنی چند دیواره، ضریب هدایت حرارتی، روش سطح پاسخ

۱- دانشیار (نویسنده پاسخگو): m.hemmatesfe@semnan.ac.ir

۲- کارشناسی ارشد: Hamedsh.doost@Gmail.com

## فهرست علائم و اختصارات

|       |                            |
|-------|----------------------------|
| K     | ضریب هدایت حرارتی          |
| XRD   | بلورنگاری (پراش) پرتو ایکس |
| SEM   | میکروسکوپ الکترونی روبشی   |
| RSM   | روش سطح پاسخ               |
| MWCNT | نانولوله کربنی چند دیواره  |
| DWCNT | نانولوله کربنی دو دیواره   |
| EG    | اتیلن گلیکول               |
| MOD   | حاشیه انحراف               |
| Rel   | نسبی                       |
| RTC   | هدایت حرارتی نسبی          |
| T     | دما (°C)                   |

## علائم یونانی

|             |                    |
|-------------|--------------------|
| $\emptyset$ | کسر حجمی جامد      |
| $\rho$      | چگالی ( $g/cm^3$ ) |

## زیرنویس

|    |          |
|----|----------|
| bf | سیال     |
| nf | نانوسیال |
| p  | ذره      |

## ۱- مقدمه

در دهه گذشته، ظهور فناوری نانو، پیشرفت‌های قابل توجهی را در زمینه علوم مهندسی ایجاد کرده است. محققان متعددی با پشتکار جنبه‌های مختلف علم نانو را بررسی کرده‌اند که شامل حوزه‌های متنوعی مانند ذرات، پودرها، الیاف، سیالات و غیره است [۱-۴]. نوعی ماده در مقیاس نانومتری با نام نانومواد، توسط ماکسول [۵]، معرفی شد. مفهوم نانوسیالات که به عنوان سوسپانسیون‌های حاوی نانوذرات با قطر کمتر از ۱۰۰ nm در یک سیال پایه مشخص می‌شود، در ابتدا توسط چوی معرفی شد [۶]. چوی در کار مهم خود، اصطلاح «نانوسیال» را به معنای سیال آغشته به ذرات معلق در اندازه نانو ابداع کرد. علاوه بر این، چوی تشریح کرد که معرفی یک مقدار کوچک از نانوذرات به مایعات معمولی باعث افزایش قابل توجهی، در هدایت حرارتی نانوسیال حاصل می‌شود. رسانایی حرارتی به عنوان یک پارامتر محوری در حوزه نانوسیالات است و به عنوان یک شاخص کلیدی از قابلیت‌های انتقال حرارت و رسانایی مواد عمل می‌کند [۷]. بسیاری از محققان این ویژگی را در طیفی از نانوسیالات به دقت ارزیابی و مستند کرده‌اند و به

مجموعه گسترده‌ای از دانش در این زمینه کمک می‌کنند [۸-۱۱]. نانوسیالات هیبریدی از ترکیب دو یا چند نوع نانوذره با یک سیال پایه هستند، برای افزایش رسانایی حرارتی نانوسیال حاصل ایجاد می‌شوند. این افزایش در هدایت حرارتی به ویژه در نانوسیالات هیبریدی در مقایسه با نانوسیالات تک ذره‌ای یا نانوسیالات تک مشهود است [۱۲]. اندازه نانوذرات عامل مهمی است که بر هدایت حرارتی نانوسیالات تأثیر می‌گذارد. نانوذرات استوانه‌ای و کروی در مطالعات نانوسیال مورد استفاده قرار گرفته‌اند، ذرات استوانه‌ای شکل بهبود بیشتری را در هدایت حرارتی نشان می‌دهند [۱۳]. دما همچنین در افزایش هدایت حرارتی نانوسیالات نقش دارد. با افزایش دما، هدایت حرارتی نانوسیالات بهبود می‌یابد. با این حال، اضافه کردن مقدار مناسبی از مواد افزودنی یا سورفکتانت‌ها به نانوسیال برای دستیابی به هدایت حرارتی بهتر ضروری است [۱۴]. تکنیک‌های مختلف، از جمله تکنیک سنتز حرارتی-شیمیایی [۱۵]، روش درجا [۱۶]، آسیاب گلوله‌ای [۱۷]، رسوب‌دهی شیمیایی کاتالیزوری بخار [۱۸]، روش رسوب شیمیایی بخار [۱۹]، تجزیه در اثر حرارت اسپری [۲۰]، مرطوب روش شیمیایی [۲۱]، روش آلیاژسازی مکانیکی [۲۲]، فرآیند حلال گرمایی [۲۳] و فرآیند آسیاب گلوله مرطوب [۲۴] برای سنتز نانوذرات هیبریدی در دسترس هستند. سیالات پایه رایج برای تهیه نانوسیالاتی هیبریدی آب [۲۵-۲۷]، اتیلن گلیکول [۲۸، ۲۹] و روغن موتور [۳۰]، [۳۱] هستند. مرشد و همکاران [۳۲] به طور سیستماتیک تأثیر حرکت براونی را بر رسانایی حرارتی نانوسیالات مورد بررسی قرار دادند که یافته‌های متفاوتی را در جامعه تحقیقاتی به دست آورد. در حالی که برخی تحقیقات اثر محسوس حرکت براونی را بر رسانایی حرارتی نانوسیال نشان می‌دهند، برخی دیگر چنین تأثیری را به چالش می‌کشند. همچنین در مطالعاتی رودیاک و همکاران [۳۳]، پولوجو و همکاران [۳۴] و هان و همکاران [۳۵] تأثیر سورفکتانت‌های متمایز بر هدایت حرارتی نانوسیال را بررسی کرد. در همین راستا رستمیان و همکاران [۳۶] به طور دقیق دما و کسر حجمی جامد را به عنوان پارامترهای تأثیرگذار در زمینه نانوسیال هیبریدی CuO-SWCNTs/EG-Water (40: 60) بررسی کردند. همچنین آتش افروز و همکاران [۳۷] در مطالعه خود اثرات متقابل

همبستگی تجربی برای پیش‌بینی هدایت حرارتی نانوسیالات پیشنهاد شده‌اند. این مدل فرض می‌کند که نانوذرات به خوبی در سیال پایه پراکنده شده‌اند و با یکدیگر برهمکنش ندارند. هدایت حرارتی موثر بر اساس کسر حجمی نانوذرات و هدایت حرارتی آن‌ها محاسبه می‌شود. این مدل‌ها را می‌توان به طور کلی به دو دسته (الف) استاتیک و (ب) پویا تقسیم کرد. در مدل‌های استاتیک فرض می‌شود نانوذرات در سیال پایه ثابت هستند و هدایت حرارتی با استفاده از یک مدل مبتنی بر رسانایی پیش‌بینی می‌شود که رسانایی اجزای فاز (هدایت دو فاز جامد و مایع نانوسیال) و کسرهای حجمی جامد را در نظر می‌گیرد. در این مدل، یک ناحیه سطحی به ضخامت نانومتر بین نانوذرات جامد و سیال پایه وجود دارد. در این فصل مشترک، مولکول‌های سیال جهت یا پیوند می‌یابند که در نتیجه خواص ترموفیزیکی منحصربه‌فردی دارند که هم با ذرات و هم از سیال پایه متفاوت است. بنابراین، مهم است که این لایه سطحی را به عنوان یک جزء جداگانه در مخلوط ذره-سیال در نظر بگیریم تا اثرات آن بر مخلوط نانوسیال را در نظر بگیریم [۵۱]. مدل‌های دینامیکی [۵۲، ۵۳] برای هدایت حرارتی نانوسیالات، حرکت براونی را که حرکت تصادفی نانوذرات در سیال است، و همچنین همرفت میکرو مایع را که مسئول انتقال انرژی است از طریق برخورد بین نانوذرات، در نظر می‌گیرد. این مدل‌ها مکانیسم‌های مختلفی، از جمله اختلاط و همرفت نانوذرات را در نظر می‌گیرند که به افزایش هدایت حرارتی در نانوسیالات کمک می‌کنند [۵۱]. در مطالعه‌ای توسط شاطری و همکاران [۵۴] از مدل شبیه‌سازی دینامیک مولکولی برای محاسبه ویسکوزیته نانوسیال حاوی نانوذرات مس استفاده شد، از بین روش‌های دینامیک تعادلی و دینامیک غیرتعادلی، روش دینامیک تعادلی و معادله گرین-کوبو برای محاسبه ویسکوزیته به کار گرفته شد. نتایج به دست آمده نشان داد که به طور کلی با اضافه شدن نانوذرات مس به سیال آب و افزایش درصد کسر حجمی، مقدار ویسکوزیته نیز افزایش می‌یابد. همچنین مرشد و همکاران [۵۱] یک مدل جامع پیشنهاد کردند که هر دو مکانیسم استاتیک و دینامیکی را برای پیش‌بینی هدایت حرارتی مؤثر نانوسیالات ترکیب می‌کند. این مدل چندین عامل کلیدی مانند اندازه ذرات، لایه سطحی، حرکت براونی و پتانسیل

میدان مغناطیسی و نانو ذرات جامد بر جریان جابه‌جایی اجباری سه‌بعدی در یک کانال افقی مورد بررسی و مطالعه قرار دادند. سیال کاری در این کانال، نانوسیال آب-اکسید آلومینیوم در نظر گرفته شد نتایج آنان نشان داد که رفتارهای هیدرودینامیکی و حرارتی جریان به‌طور قابل توجه‌ای به قدرت میدان مغناطیسی و درصد حجمی نانو ذرات اکسید آلومینیوم وابسته است. علاوه بر این، همت اسفه و همکاران مطالعات متنوعی را برای تجزیه و تحلیل هدایت حرارتی و ویسکوزیته نانوسیالات مختلف، [۳۸] SiO<sub>2</sub> (60%) MWCNT (40%) / SAE40 oil، [۳۹] MWCNT (40%) - TiO<sub>2</sub> (60%) / 10W40 oil، [۴۰] MWCNT - TiO<sub>2</sub> / Water-EG، [۴۱] و [۴۲] Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub>-MWCNT/EG-Water انجام دادند. یک نتیجه ثابت در سراسر این مطالعات و سایر مطالعات ظاهر شد، با افزایش کسر حجمی جامد رسانایی حرارتی نانوسیال نیز افزایش یافت. البته تغییرات در میزان این افزایش، در آزمایش‌های مختلف متفاوت بود. علاوه بر این، بررسی تأثیر اندازه و شکل نانو ذرات بر هدایت حرارتی توجه بسیاری را به خود جلب کرده است. با توجه به آرایه‌های متنوع اندازه‌ها و شکل‌های نانوذرات، مطالعات متعددی به تجزیه و تحلیل آن‌ها اختصاص یافته است [۴۳-۴۶]. یو و همکاران [۴۷] تحقیقی بر روی نانوذرات اکسید روی معلق در اتیلن گلیکول در غلظت‌های مختلف (۵٪-۱۰٪) انجام داده‌اند. یافته‌های آن‌ها نشان‌دهنده همبستگی مستقیم بین غلظت حجمی نانوذرات و هدایت حرارتی است که نشان‌دهنده افزایش با غلظت‌های بالاتر است. این افزایش در هدایت حرارتی در سیالات پایه شامل اتیلن گلیکول-آب [۴۸] و پروپیلن گلیکول-آب [۴۹] بیشتر مورد بررسی قرار گرفت و افزایش مداوم با غلظت‌های حجمی متفاوت را نشان داد. در یک مطالعه تکمیلی، گوپتا و همکاران [۵۰] رفتار اکسیدهای فلزی را در یک سیال پایه اتیلن گلیکول (۵۰٪) و آب (۵۰٪) بررسی کردند، آن‌ها افزایش هدایت حرارتی را با افزایش دما گزارش کردند. علیرغم افزایش قابل ملاحظه خواص ترموفیزیکی ناشی از افزودن نانوذرات به سیالات معمولی، ذکر این نکته ضروری است که وجود یک نانوذره منفرد ممکن است تمام خواص ضروری مورد نیاز برای کاربردهای خاص را ارائه نکند. چندین مدل نظری و

انتخاب یک نظریه یا مدل مناسب برای پیش‌بینی رسانایی حرارتی نانوسیال منوط به کاربرد منحصر به فرد و خواص ذاتی نانوسیال است. ترکیبی هوشمندانه از مدل‌سازی نظری و اعتبار تجربی برای پیش‌بینی‌های دقیق ضروری است. با این حال، محدودیت‌ها ناشی از ماهیت محدود مجموعه داده‌های مورد استفاده در استخراج مدل است که مانع برون‌یابی به نانو سیالات دیگر یا مخلوط‌ها می‌شود. هدف این تحقیق ارزیابی تأثیر جمعی دمای کاری، غلظت حجمی نانوذرات و برهم‌کنش آن‌ها بر رسانایی حرارتی نانوسیال هیبریدی است. علاوه بر این، هدف بهینه‌سازی پارامترهای مربوطه برای به حداکثر رساندن هدایت حرارتی، استفاده از روش سطح پاسخ برای ساده‌سازی شرایط تجربی، کاهش تعداد آزمایش‌ها و هزینه‌های منابع مرتبط است. بخش‌های بعدی آماده‌سازی نانوسیال، روش‌های تثبیت و اندازه‌گیری‌های پایداری را مشخص می‌کند. همچنین روش اندازه‌گیری هدایت حرارتی، طراحی تجربی، استقرار مدل، و ارزیابی دقت مدل در برابر داده‌های تجربی به تفصیل آمده است. یک همبستگی، مبتنی بر تعاملات پارامترهای عملیاتی، فرموله شده و به دقت برای قابلیت اطمینان در برابر داده‌های تجربی مورد بررسی قرار می‌گیرد. در نهایت، مدل توسعه یافته برای اعتبارسنجی نتایج بهینه‌سازی بهینه شده است. در شکل ۱ الف) نانوذرات نانولوله‌های کربنی چند دیواره و ب) نانوذره سیلیکا استفاده شده در این مطالعه تجربی مشاهده می‌شود. همچنین جزئیات خاص مربوط به نانولوله‌های کربنی چند دیواره و نانوذرات  $\text{SiO}_2$  را می‌توان در جدول ۲ یافت. در ادامه شکل ۲ الف) تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی برای ذرات نانولوله‌های کربنی چند دیواره و ب) نیز تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی برای دی‌اکسید سیلیکون را نشان می‌دهد.

## ۲- مواد و روش‌ها

### ۲-۱ روش تهیه نانوسیال هیبریدی

در فرآیند آماده‌سازی نانوسیال، نسبت‌های دقیق نانوذرات سیلیس (۸۹٪) و نانولوله‌های کربنی چند دیواره (۱۱٪) به دقت اندازه‌گیری شد. پس از این تعیین ترکیب، این نانوذرات به طور یکنواخت در یک سیال پایه شامل اتیلن گلیکول (۴۵٪) و آب (۵۵٪) پراکنده شدند. کسرهای حجمی مختلف از ۰/۱٪، ۰/۲۵٪، ۰/۵٪، ۰/۷۳٪، ۰/۹۵٪ و

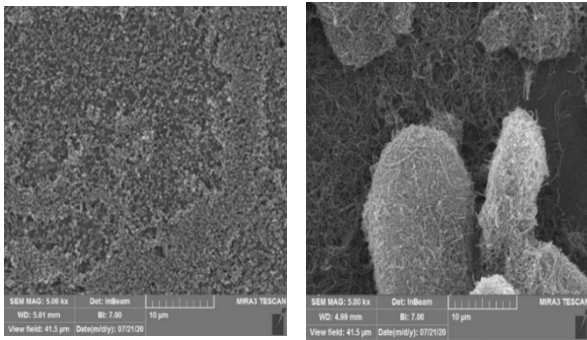
تعامل بین نانوذرات را در نظر می‌گیرد. این مدل تأثیر برهم‌کنش‌های بین ذرات و لایه سطحی را در نظر می‌گیرد و زمانی که هیچ تعاملی بین این دو وجود نداشته باشد، مدل ماکسول آن را به خوبی بیان می‌کند. ماکسول در سال ۱۸۸۱، [۵۵] معادله‌ی (۱) را برای تخمین رسانایی گرمایی موثر مخلوط‌های جامد-مایع با دو فاز پیشنهاد کرد. این معادله به طور گسترده‌ای به عنوان نقطه شروع برای ارزیابی هدایت حرارتی نانوسیالات استفاده می‌شود. از آن زمان، مدل‌های نظری مختلفی برای پیش‌بینی رسانایی حرارتی نانوسیالات توسعه یافته‌اند. مدل ماکسول برای پیش‌بینی هدایت حرارتی ذرات کروی در بخش‌های با حجم جامد کم و در شرایط محیطی مناسب است.

$$\left[ \frac{k_{nf}}{k_{bf}} \right] = \left[ \frac{k_p + 2k_{bf} + 2\phi(k_p - k_{bf})}{k_p + 2k_{bf} - 2\phi(k_p - k_{bf})} \right] \quad (1)$$

که در آن  $k_p$ ،  $k_{bf}$  و  $k_{nf}$  به ترتیب رسانایی حرارتی نانوسیال، سیال پایه و نانوذره هستند،  $\phi$  کسر حجمی جامد است. همبستگی‌های تجربی بر اساس داده‌های تجربی است و اغلب برای پیش‌بینی هدایت حرارتی نانو سیالات استفاده می‌شود. این همبستگی‌ها هدایت حرارتی نانو سیالات را به پارامترهای مختلفی مانند اندازه نانوذرات، کسر حجمی و خواص سیال پایه مرتبط می‌کند. در جدول ۱ هدایت حرارتی نانو سیالات مختلف در دما و کسرهای حجمی مختلف، توسط محققین برجسته در سال‌های اخیر بیان شد.

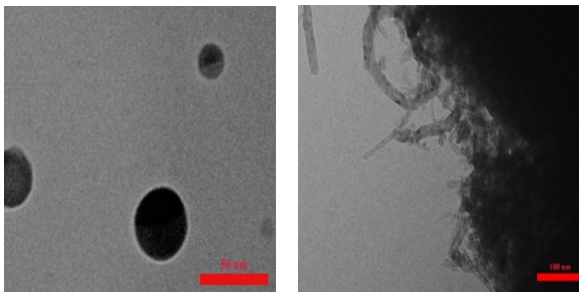
جدول (۱). مروری بر هدایت حرارتی نانو سیالات

| نانوذرات- مرجع                         | سیال پایه               | محدوده دما ( $^{\circ}\text{C}$ ) | محدوده کسر حجمی (%) | بیشینه افزایش (%) |
|--|-------------------------|-----------------------------------|---------------------|-------------------|
| SWCNT+<br>$\text{Fe}_3\text{O}_4$ [56] | اتیلن<br>گلیکول         | ۵۰-۳۰                             | ۰/۰۲-۱              | ۴۰                |
| $\text{SiO}_2$ +Ag<br>[۵۷]             | آب مقطر                 | ۴۵-۵                              | -۰/۰۱<br>۰/۰۷       | ۳۱/۸۴             |
| GNSs-WO <sub>3</sub><br>[58]           | پارافین<br>مایع         | ۷۰-۲۵                             | ۵-۰/۰۰۵             | ۳۵                |
| MWCNT-<br>CuO-SiO <sub>2</sub><br>[۵۹] | آب                      | ۴۵-۲۹                             | -۰/۰۴<br>۰/۹۵       | ۳۷/۱۰             |
| MWCNT+<br>TiO <sub>2</sub> [40]        | آب -<br>اتیلن<br>گلیکول | ۶۰-۳۰                             | -۱/۱۲<br>۰/۱        | ۳۶/۳۰             |
| TiO <sub>2</sub> [۶۰]                  | آب                      | ۶۰-۳۵                             | -۰/۱<br>۰/۴         | ۱۸/۴۷             |



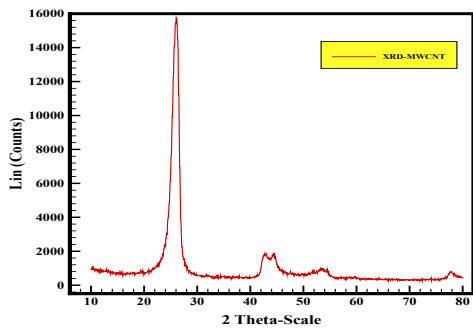
(الف) (ب)

شکل (۲). الف) تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی برای نانولوله کربنی چند دیواره و ب) تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی برای دی اکسید سیلیکون

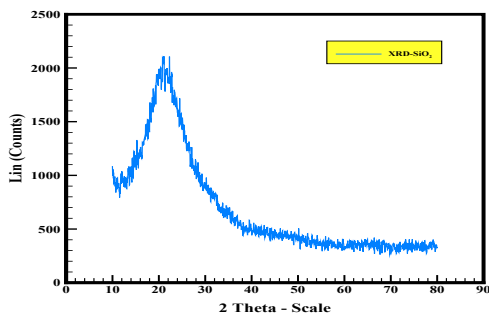


(الف) (ب)

شکل (۳). تصویر میکروسکوپ الکترونی انتقالی برای نانوذره الف) MWCNT و ب) دی اکسید سیلیکون



(الف)



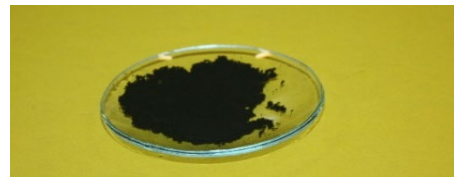
(ب)

شکل (۴). آنالیز XRD برای الف) نانولوله کربنی چند دیواره و ب) سیلیکا

۱/۰۴۵ به طور سیستماتیک به نانوسیال هیبریدی وارد شدند و ساختار خوبی برای بررسی ایجاد کردند. کسر حجمی کل نانوذرات در نانوسیال هیبریدی با استفاده از رابطه ۲ به صورت کمی تعیین شد:

$$\phi = \frac{\left(\frac{m}{\rho}\right)SiO_2 + \left(\frac{m}{\rho}\right)MWCNT}{\left(\frac{m}{\rho}\right)B_{F(EG+Water)} + \left(\frac{m}{\rho}\right)SiO_2 + \left(\frac{m}{\rho}\right)MWCNT} \quad (2)$$

در معادله (۲)،  $\phi$  کسر حجمی نانوذرات،  $m$  به جرم و  $\rho$  به چگالی اشاره دارد. این استراتژی آماده سازی دقیق، که با تغییر در انواع و غلظت نانوذرات مشخص می شود، پایه و اساس یک کاوش سیستماتیک از خواص هدایت حرارتی نانوسیال هیبریدی حاصل را تشکیل می دهد. چنین دقتی در فرمولاسیون برای روشن کردن روابط پیچیده بین غلظت نانوذرات، ترکیب سیال پایه و ویژگی های حرارتی متعاقب آن ضروری است.



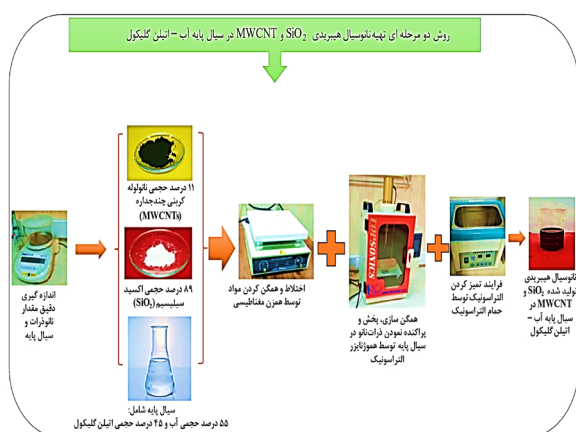
(الف)



ب

شکل (۱): الف) نانوذرات دی اکسید سیلیکون استفاده شده ب) نانوذرات نانولوله های کربنی چند دیواره استفاده شده جدول (۲): مشخصات نانوذرات مورد استفاده

| خواص          | نانولوله کربنی چند دیواره (MWCNT)     | دی اکسید سیلیکون (SiO <sub>2</sub> ) |
|---------------|---------------------------------------|--------------------------------------|
| خلوص نانوذرات | ٪۹۵                                   | ٪۹۹                                  |
| رنگ           | سیاه                                  | سفید                                 |
| اندازه        | قطر خارجی: ۳۰ nm<br>قطر داخلی: ۳-۵ nm | ۱۱-۱۳ nm                             |
| چگالی (ρ)     | ۲/۱ g/cm <sup>3</sup>                 | ۲/۴ g/cm <sup>3</sup>                |
| سطح ویژه      | ۲۲۳ m <sup>2</sup> /g                 | ۲۰۰ m <sup>2</sup> /g                |



شکل (۵): مراحل و روش تهیه نانوسیال هیبریدی حاوی MWCNT و  $\text{SiO}_2$  به روش دومرحله‌ای

### ۳- اندازه‌گیری هدایت حرارتی

با استفاده از تحلیلگر خواص حرارتی KD2 pro توسعه یافته توسط Decagon ایالات متحده، ارزیابی‌های هدایت حرارتی از طریق استفاده از روش سیم داغ گذرا انجام شد. این روش شامل تجویز کنترل شده یک پالس حرارتی به یک سوزن و ارزیابی بعدی پاسخ دما در سوزن مجاور در طول و بعد از اعمال حرارت است. محققان مشهور [۴۵، ۶۱-۶۴] از تحلیلگر خواص حرارتی KD2 pro که بر اساس روش سیم داغ گذرا ساخته شده است، برای بررسی دقیق خواص حرارتی استفاده کرده‌اند. در این روش، افزایش دما با استفاده از یک سنسور دیسک داغ تنظیم می‌شود و تکامل دمای حاصل از آن در طول زمان از طریق یک دماسنج مقاومتی نظارت می‌شود. این دستگاه قابلیت قابل توجهی را نشان می‌دهد و با دقت رسانیی حرارتی را در محدوده  $0.1 \text{ W.mK}^{-1}$  تا  $2 \text{ W.mK}^{-1}$  اندازه‌گیری می‌کند. با استفاده از روش منبع حرارت سیم گذرا، سنسور KS1 از فولاد ضد زنگ با ابعاد  $1/28 \text{ mm}$  قطر و  $60 \text{ mm}$  طول یکپارچه شده است. برای کاهش نادرستی‌های احتمالی، قرار دادن دقیق عمودی پروب در سیال ضروری است. برای اطمینان از اعتبارسنجی، هر اندازه‌گیری پنج بار تکرار شد. شکل ۶ نشان دهنده تحلیلگر خواص حرارتی KD2 Pro است.

### ۳-۱ تحلیل عدم قطعیت

به منظور بررسی عدم قطعیت دستگاه اندازه‌گیری هدایت حرارتی مطالعه حاضر، مقادیر دقت دستگاه توسط راهنمای دستگاه به دست می‌آید. برای محدوده هدایت حرارتی

همان‌طور که در شکل ۲ قابل مشاهده است تصاویر مربوط به میکروسکوپ الکترونی روبشی برای تایید ساختار و شناسایی نانوذرات و همچنین خواص مورفولوژی از جمله شکل و اندازه ارائه شده است. تصاویر در شکل ۲ تایید کننده اندازه نانومتر برای ذرات می‌باشد. همچنین در شکل ۳ در قسمت (الف) تصویر میکروسکوپ الکترونی انتقالی (TEM) از یک نانولوله کربنی چند جداره، ساختارهای لوله‌ای متحدالمرکز متعددی را مشاهده می‌کنید که در کنار هم قرار گرفته‌اند، که آرایش شبکه شش ضلعی اتم‌های کربن را در یک الگوی استوانه‌ای نشان می‌دهد، تشکیل شده‌اند. تصویر مطلوب دیواره‌های کاملاً مشخص را با فاصله بین لایه‌ای ثابت نشان می‌دهد که نشان‌دهنده ساختار نانولوله‌های کربنی چند جداره با کیفیت بالا است. با توجه به قسمت (ب) شکل ۳ نانوذرات دی‌اکسید سیلیکون، نانوذره‌ای متشکل از اتم‌های سیلیکون و اکسیژن را نشان می‌دهد که در ساختار شبکه‌ای کریستالی چیده شده‌اند. تصویر مطلوب اندازه، شکل و مورفولوژی سطح ذرات یکنواخت را نشان می‌دهد که نشان‌دهنده سنتز کنترل شده و دقیق نانوذرات دی‌اکسید سیلیکون با خلوص و همگنی بالا است. در شکل ۴ نیز برای الف) نانولوله کربنی چند دیواره و ب) دی‌اکسید سیلیکون، آنالیز XRD طیف طول موج نانوذره مربوط ترسیم گردیده است. نانوذرات از طریق تجزیه و تحلیل اندازه ذرات و توپوگرافی پراش اشعه ایکس برای تعیین ساختار و اندازه کریستال نانوذرات مشخص‌سازی شدند. شکل ۴ به وضوح قله‌های متمایز را نشان می‌دهد که نشان‌دهنده تبلور کاملاً مشخص نانوذرات بدون نشان دادن ویژگی‌های سایر فازها است. مطالعات پراش اشعه ایکس تایید کرد که مواد سنتز شده از نانوذرات  $\text{SiO}_2$  و MWCNT تشکیل شده‌اند که تمام پیک‌های پراش با منابع مونوکلینیک نانوذرات JCPDS مطابقت دارند. پس از ادغام اولیه سیال پایه با نانوذرات، یک میکسر مغناطیسی به مدت یک ساعت برای همگن‌سازی بیشتر نانوسیال استفاده شد. متعاقباً، برای بهینه‌سازی پراکندگی و افزایش پایداری نانوسیال، این مخلوط تحت یک فرآیند همگن‌سازی ۶ ساعته با استفاده از ویراتور اولتراسونیک ( $1200 \text{ W}$ )،  $19/9 \text{ kHz}$ ) عرضه شده توسط نانو دانش کیمیا قرار گرفت. روش جامع برای تهیه نانوسیال هیبریدی حاوی نانولوله‌های کربنی چند دیواره و دی‌اکسید سیلیکون ( $\text{SiO}_2$ )، که در آزمایشگاه انجام شده است، در شکل ۵ نشان داده شده است.

#### ۴- روش سطح پاسخ

در زمینه تخمین رسانایی حرارتی نانوسیال هیبریدی متشکل از نانولوله‌های کربنی چند دیواره و دی‌اکسید سیلیکون در سیال پایه اتیلن گلیکول و آب، روش سطح پاسخ به‌عنوان یک ابزار پیش‌بینی برای هدایت حرارتی نسبی عمل می‌کند. این شامل استفاده از روش سطح پاسخ برای بررسی و پیش‌بینی تأثیر تغییرات دما و کسر حجمی جامد بر روی هدایت حرارتی نسبی نانوسیال هیبریدی است. در اصل، کاربرد روش سطح پاسخ در پیش‌بینی هدایت حرارتی نسبی یک نانوسیال هیبریدی، با در نظر گرفتن دما و کسر حجمی جامد، شامل استفاده از تکنیک‌های آماری و مدل‌سازی تأثیر این پارامترها بر خواص حرارتی نانوسیال است. هدف کلی بهینه‌سازی عملکرد آن برای کاربردهای متنوع است. در این مطالعه مقادیر آزمایشگاهی هدایت حرارتی نسبی اندازه‌گیری شده توسط KD2 pro به‌عنوان سطح پاسخ و همچنین پارامترهای دما و کسر حجمی که مقادیر دما برابر با ۲۶/۷°C تا ۵۰°C و همچنین مقادیر کسر حجمی برابر با ۰/۱٪ تا ۱/۴۵٪ به‌عنوان عامل دیگر این روش در نرم‌افزار دیزاین اکسپرت ۱۳ به‌عنوان داده‌های ورودی، وارد شد. در ادامه مقادیر بررسی شده و به‌دست‌آمده توسط روش سطح پاسخ بیان خواهد شد که از آن‌ها می‌توان به ارائه یک رابطه تجربی جدید در محدوده شرایط آزمایش این مطالعه جهت پیش‌بینی داده‌های تجربی و مدل‌سازی تابع هدف اشاره کرد. در جدول ۴ گزارش کامل روش سطح پاسخ برای ۴۲ مورد هدایت حرارتی نسبی وارد شده است. فاصله کوچک تغییر در ضرایب رگرسیون را زمانی که یک داده خاص از مجموعه داده حذف می‌شود اندازه‌گیری می‌کند. مقادیر بالای فاصله کوچک نشان می‌دهد که حذف یک داده خاص منجر به تغییر قابل توجهی در ضرایب رگرسیون می‌شود که نشان می‌دهد مشاهده تأثیر قابل توجهی بر مدل دارد. تأثیر بر ارزش تناسب DFFITS به تأثیر حذف یک نقطه داده خاص بر روی مقادیر برازش مدل رگرسیون اشاره دارد. قدرمطلق بالای DFFITS نشان می‌دهد که حذف آن مشاهدات منجر به تغییر قابل توجهی در مقادیر پیش‌بینی شده می‌شود. همچنین در جدول ۵ مشخصات آزمایش طراحی شده سطح پاسخ برای داده‌های آزمایشگاهی توسط نرم افزار دیزاین اکسپرت به طور کلی بیان شده است. همچنین مشخص شده است که برای میزان ۴۲ اجرا برای هر دما (°C) و کسر حجمی با یک سطح پاسخ متفاوت که هدایت

۰/۲-۲W/(m.K) دقت دستگاه برابر با  $\pm 5\%$  گزارش شده است. رابطه زیر بیانگر عدم قطعیت است:

$$U = \frac{S}{\sqrt{N}} \quad (3)$$

در رابطه ۳، U بیانگر عدم قطعیت و N تعداد آزمایش‌ها و S انحراف از معیار است. مقدار S را با رابطه ۴ می‌توان محاسبه کرد.

$$S = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2} \quad (4)$$

در رابطه ۴ نیز بیانگر مقدار میانگین و بیانگر مقدار اندازه‌گیری شده می‌باشد. در این آزمایش برای نانوسیال هیبریدی نانولوله کربنی چند دیواره (۱۱٪) و دی‌اکسید سیلیکون (۸۹٪) در سیال پایه اتیلن گلیکول (۴۵ درصد حجمی) و آب (۵۵ درصد حجمی) در دمای 30°C و کسر حجمی ۰/۲۵ میزان هدایت حرارتی نسبی میانگین برابر با ۱/۰۳۴ بدست آمد که مطابق با جدول ۳ برای ۳ آزمایش بیان شده است و مقدار عدم اطمینان نیز برابر با ۰/۰۶۶ می‌باشد.

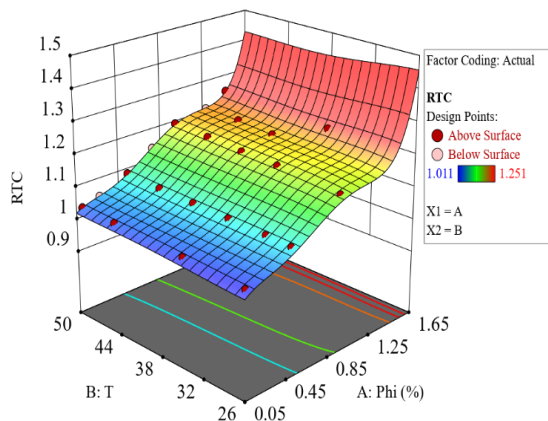
**جدول (۳): عدم اطمینان در اندازه‌گیری هدایت حرارتی**

| شماره آزمایش | هدایت حرارتی اندازه‌گیری شده |
|--------------|------------------------------|
| ۱            | ۱/۰۲۲                        |
| ۲            | ۰/۹۳۵                        |
| ۳            | ۱/۱۴۵                        |
| میانگین      | ۱/۰۳۴                        |
| S            | ۰/۰۹۴                        |
| U            | ۰/۰۶۶                        |



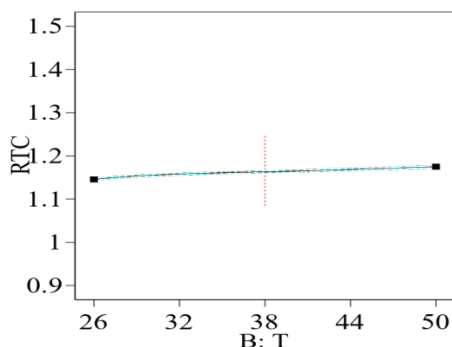
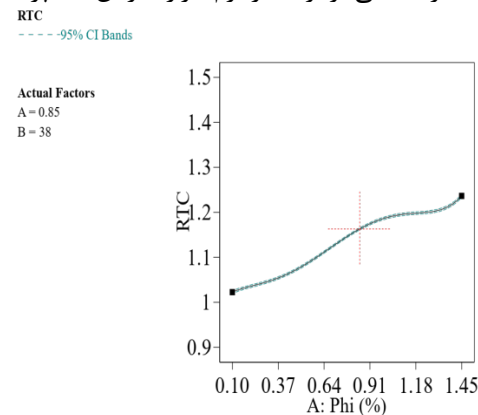
شکل (۶). دستگاه تحلیل گر خواص حرارتی مدل KD2 pro به همراه لوازم همراه

تاثیر افزایش پارامترهای دما و کسر حجمی را با توجه به مقادیر تجربی هدایت حرارتی نسبی بدست آمده از  $1/0.11$  تا  $1/2.51$  ترسیم شده است. باتوجه به شکل ۸ نیز که در آن نمودار تاثیر دما ( $^{\circ}\text{C}$ ) بر هدایت حرارتی نانوسیال هیبریدی و همچنین نمودار تاثیر عامل کسر حجمی بر هدایت حرارتی نسبی ترسیم شده است، این برداشت می شود که تاثیر عامل کسر حجمی و افزایش آن بر هدایت حرارتی نسبی نانوسیال هیبریدی به مراتب بیشتر از افزایش میزان دما بر رفتار هدایت حرارتی نسبی خواهد بود.



شکل (۷): شمای ۳ بعدی هدایت حرارتی نسبی، دما ( $^{\circ}\text{C}$ )

و کسر حجمی برگرفته از نرم افزار دیزاین اکسپرت



شکل (۸): نمودار تاثیر عامل های دما ( $^{\circ}\text{C}$ ) و کسر حجمی

بر رفتار هدایت حرارتی نسبی نانوسیال هیبریدی

حرارتی نسبی می باشد توسط نرم افزار دیزاین اکسپرت به مدت ۱ms در مدل مکعبی طراحی شده است.

آنالیز واریانس (ANOVA) برای ارزیابی اثرات معنی دار متغیرهای مستقل بر روی متغیر پاسخ یعنی هدایت حرارتی نسبی انجام پذیرفت. انحراف معیار یکی از شاخص های پراکندگی است که نشان می دهد به طور میانگین داده ها چه مقدار از مقدار متوسط فاصله دارند. اگر انحراف معیار مجموعه ای از داده ها نزدیک به صفر باشد، نشانه آن است که داده ها نزدیک به میانگین هستند و پراکندگی اندکی دارند در صورتی که انحراف معیار بزرگ تر بیان کننده پراکندگی بیشتر داده ها می باشد. در جدول ۶ نیز کیفیت برازش مدل چندجمله ای با ضریب  $R^2$  بیان شد. به منظور انتخاب مدل های تجربی برای پیش بینی پاسخ، رابطه خطی، چندجمله ای درجه دوم، سوم، چهارم، پنجم و ششم بر داده های به دست آمده از آزمایش ها برازش شدند. از نظر آماری مدل درجه ۵ مناسب است، زیرا مدلی مناسب است که آزمون برازش آن معنی دار نباشد و بالاترین مقدار  $R^2_{adjusted}$ ،  $R^2_{predicted}$  (پیش بینی شده) بالاتری داشته و مجموع مربعات باقی مانده خطای پیش بینی پایینی را داشته باشند. برای به دست آوردن  $R^2$  از رابطه ۵ استفاده می شود.

$$R^2_{Adjusted} = 1 - \frac{SS_{residual}}{SS_{total}} \quad (5)$$

که در آن  $SS_{residual}$  مجموع مجذور باقیمانده (خطاها) مدل رگرسیون و  $SS_{total}$  مجموع مجذورات است. همچنین  $R^2_{adjusted}$  نیز از رابطه ۶ بدست می آید.

$$R^2_{Adjusted} = 1 - \left[ \frac{\left( \frac{SS_{residual}}{df_{residual}} \right)}{\frac{SS_{residual}}{df_{residual}} + \frac{SS_{model}}{df_{model}}} \right] \quad (6)$$

که در آن  $SS_{model}$  مجموع مجذور مدل است.

$$R^2_{Pre} = 1 - \left[ \frac{PRESS}{SS_{residual} + SS_{model}} \right] \quad (7)$$

که در آن PRESS مجموع باقیمانده مربعات پیش بینی شده در یک آزمایش طراحی شده اشاره دارد.

در جدول ۷ نیز دقت مدل همبستگی برای رابطه درجه ۵ بیان شده را می توان ملاحظه کرد. از معیارهای ANOVA، دقت کافی بیانگر اختلاف مقدار پاسخ پیش بینی شده مدل با مقدار متوسط خطای پیش بینی می باشد و مقادیر بیش از ۴ بیانگر دقت کافی مدل است در این مطالعه میزان بدست آمده ۱۴۹/۹۵۱۷ در شکل ۷ تصویر ۳ بعدی میزان



**جدول (۴).** گزارش کلی روش سطح پاسخ برای ۴۲ هدایت حرارتی نسبی بدست آمده

| ترتیب اجرا | مقدار واقعی | مقدار پیش‌بینی شده | باقی مانده | قدرت نفوذ | باقی مانده داخلی | باقی مانده خارجی | فاصله کوچک | تاثیر DFITS بر ارزش برازش |
|------------|-------------|--------------------|------------|-----------|------------------|------------------|------------|---------------------------|
| ۱          | ۱/۰۱        | ۱/۰۱               | -۰/۰۰۸     | ۰/۸۲۶     | ۰/۸۹۲            | ۰/۸۸۸            | ۰/۱۸۰      | ۱/۹۳۴                     |
| ۲          | ۱/۰۱        | ۱/۰۱               | -۰/۰۰۲     | ۰/۵۹۵     | -۰/۱۲۱           | -۰/۱۱۸           | ۰/۰۰۱      | -۰/۱۴۳                    |
| ۳          | ۱/۰۲        | ۱/۰۲               | -۰/۰۰۷     | ۰/۵۳۸     | ۰/۴۳۹            | ۰/۴۳۱            | ۰/۰۱۱      | ۰/۴۶۵                     |
| ۴          | ۱/۰۲        | ۱/۰۲               | -۰/۰۰۴     | ۰/۵۳۶     | -۰/۲۸۹           | -۰/۲۸۳           | ۰/۰۰۵      | -۰/۳۰۴                    |
| ۵          | ۱/۰۳        | ۱/۰۳               | -۰/۰۰۶     | ۰/۶۵۰     | ۰/۴۶۵            | ۰/۴۵۶            | ۰/۰۱۹      | ۰/۶۲۱                     |
| ۶          | ۱/۰۳        | ۱/۰۳               | -۰/۰۰۱     | ۰/۸۷۲     | ۰/۱۱۶            | ۰/۱۱۳            | ۰/۰۰۴      | ۰/۲۹۵                     |
| ۷          | ۱/۰۳        | ۱/۰۳               | -۰/۰۰۱۵    | ۰/۵۴۴     | -۰/۹۸۲           | -۰/۹۸۱           | ۰/۰۵۵      | -۱/۰۷۲                    |
| ۸          | ۱/۰۳        | ۱/۰۳               | -۰/۰۰۴     | ۰/۴۴۲     | -۰/۲۱۸           | -۰/۲۱۳           | ۰/۰۰۲      | -۰/۱۹۰                    |
| ۹          | ۱/۰۴        | ۱/۰۴               | -۰/۰۰۱۹    | ۰/۳۷۲     | -۱/۰۳۶           | -۱/۰۳۷           | ۰/۰۳۰      | -۰/۷۹۹                    |
| ۱۰         | ۱/۰۴        | ۱/۰۴               | -۰/۰۰۰۱    | ۰/۳۸۰     | -۰/۰۴۹           | -۰/۰۴۸           | ۰/۰۰۰      | -۰/۰۳۸                    |
| ۱۱         | ۱/۰۴        | ۱/۰۴               | -۰/۰۰۰۹    | ۰/۴۵۱     | -۰/۵۱۵           | -۰/۵۰۶           | ۰/۰۱۰      | -۰/۴۵۸                    |
| ۱۲         | ۱/۰۵        | ۱/۰۵               | -۰/۰۰۰۶    | ۰/۵۷۳     | -۰/۴۳۹           | -۰/۴۳۰           | ۰/۰۱۲      | -۰/۴۹۸                    |
| ۱۳         | ۱/۰۷        | ۱/۰۷               | -۰/۰۰۰۸    | ۰/۴۷۸     | ۰/۵۱۶            | ۰/۵۰۷            | ۰/۰۱۲      | ۰/۴۸۵                     |
| ۱۴         | ۱/۰۷        | ۱/۰۸               | -۰/۰۰۲۰    | ۰/۳۳۵     | ۱/۰۹۶            | ۱/۱۰۱            | ۰/۰۲۹      | ۰/۷۸۲                     |
| ۱۵         | ۱/۰۸        | ۱/۰۸               | -۰/۰۰۲۶    | ۰/۳۴۱     | ۱/۳۹۱            | ۱/۴۲۵            | ۰/۰۴۸      | ۱/۰۲۶                     |
| ۱۶         | ۱/۰۸        | ۱/۰۸               | -۰/۰۰۲۴    | ۰/۳۴۵     | ۱/۳۳۶            | ۱/۳۶۴            | ۰/۰۴۵      | ۰/۹۹۰                     |
| ۱۷         | ۱/۰۸        | ۱/۰۸               | -۰/۰۰۱۶    | ۰/۳۵۲     | ۰/۸۸۷            | ۰/۸۸۲            | ۰/۰۲۰      | ۰/۶۵۱                     |
| ۱۸         | ۱/۰۹        | ۱/۰۹               | -۰/۰۰۱۴    | ۰/۵۱۱     | ۰/۹۰۹            | ۰/۹۰۵            | ۰/۰۴۱      | ۰/۹۲۶                     |
| ۱۹         | ۱/۱۲        | ۱/۱۲               | -۰/۰۰۱۰    | ۰/۴۲۴     | -۰/۶۰۷           | -۰/۵۹۸           | ۰/۰۱۳      | -۰/۵۱۳                    |
| ۲۰         | ۱/۱۳        | ۱/۱۳               | -۰/۰۰۰۸    | ۰/۳۰۶     | -۰/۳۹۹           | -۰/۳۹۱           | ۰/۰۰۳      | -۰/۲۶۰                    |
| ۲۱         | ۱/۱۳        | ۱/۱۳               | -۰/۰۰۴۰    | ۰/۲۹۶     | -۲/۱۱۱           | -۲/۳۲۱           | ۰/۰۸۹      | -۱/۵۰۷                    |
| ۲۲         | ۱/۱۴        | ۱/۱۴               | -۰/۰۰۲۱    | ۰/۳۷۷     | -۱/۰۹۹           | -۱/۱۰۵           | ۰/۰۳۲      | -۰/۶۸۳                    |
| ۲۳         | ۱/۱۴        | ۱/۱۴               | -۰/۰۰۴۰    | ۰/۳۳۳     | -۲/۱۶۳           | -۲/۳۹۴           | ۰/۱۱۱      | -۱/۶۹۳                    |
| ۲۴         | ۱/۱۵        | ۱/۱۴               | -۰/۰۰۲۱    | ۰/۴۵۰     | -۱/۲۷۶           | -۱/۲۹۶           | ۰/۰۶۳      | -۱/۱۷۱                    |
| ۲۵         | ۱/۱۶        | ۱/۱۶               | -۰/۰۰۱۰    | ۰/۴۹۲     | ۰/۶۲۸            | ۰/۶۱۹            | ۰/۰۱۸      | ۰/۶۰۹                     |
| ۲۶         | ۱/۱۷        | ۱/۱۷               | -۰/۰۰۰۶    | ۰/۳۵۲     | -۰/۳۲۹           | -۰/۳۲۲           | ۰/۰۰۳      | -۰/۲۳۸                    |
| ۲۷         | ۱/۱۸        | ۱/۱۸               | -۰/۰۰۲۸    | ۰/۳۵۹     | ۱/۵۴۹            | ۱/۶۰۷            | ۰/۰۶۴      | ۱/۲۰۲                     |
| ۲۸         | ۱/۱۸        | ۱/۱۸               | -۰/۰۰۰۹    | ۰/۳۵۳     | ۰/۴۸۸            | ۰/۴۷۹            | ۰/۰۰۶      | ۰/۳۵۴                     |
| ۲۹         | ۱/۱۹        | ۱/۱۹               | -۰/۰۰۲۲    | ۰/۳۷۷     | ۱/۲۵۵            | ۱/۲۷۴            | ۰/۰۴۵      | ۰/۹۹۱                     |
| ۳۰         | ۱/۲۰        | ۱/۲۰               | -۰/۰۰۲۸    | ۰/۵۲۳     | ۱/۷۶۶            | ۱/۸۶۸            | ۰/۱۶۳      | ۱/۹۵۴                     |
| ۳۱         | ۱/۱۸        | ۱/۱۸               | -۰/۰۰۰۱    | ۰/۶۲۹     | -۰/۰۶۰           | -۰/۰۵۹           | ۰/۰۰۰      | -۰/۰۷۷                    |
| ۳۲         | ۱/۱۹        | ۱/۱۹               | -۰/۰۰۰۱    | ۰/۴۷۶     | -۰/۰۴۰           | -۰/۰۳۹           | ۰/۰۰۰      | -۰/۰۳۷                    |
| ۳۳         | ۱/۲۰        | ۱/۲۰               | -۰/۰۰۱۲    | ۰/۴۰۰     | -۰/۷۱۰           | -۰/۷۰۲           | ۰/۰۱۶      | -۰/۵۷۲                    |
| ۳۴         | ۱/۲۰        | ۱/۲۰               | -۰/۰۰۰۲    | ۰/۴۱۳     | ۰/۱۱۵            | ۰/۱۱۲            | ۰/۰۰۰      | ۰/۰۹۴                     |
| ۳۵         | ۱/۲۱        | ۱/۲۱               | -۰/۰۰۰۷    | ۰/۴۸۱     | ۰/۴۲۴            | ۰/۴۱۶            | ۰/۰۰۸      | ۰/۴۰۱                     |
| ۳۶         | ۱/۲۱        | ۱/۲۱               | -۰/۰۰۲۵    | ۰/۶۷۵     | -۱/۹۲۹           | -۲/۰۷۵           | ۰/۳۶۷      | (فراتر از حد)<br>۲/۹۸۸    |
| ۳۷         | ۱/۲۳        | ۱/۲۳               | -۰/۰۰۰۱    | ۰/۸۷۰     | -۰/۰۸۷           | -۰/۰۸۵           | ۰/۰۰۲      | -۰/۲۳۰                    |
| ۳۸         | ۱/۲۴        | ۱/۲۴               | -۰/۰۰۰۱    | ۰/۶۳۱     | -۰/۰۴۵           | -۰/۰۴۴           | ۰/۰۰۰      | -۰/۰۵۷                    |
| ۳۹         | ۱/۲۴        | ۱/۲۴               | -۰/۰۰۱۱    | ۰/۵۶۶     | ۰/۷۱۹            | ۰/۷۱۰            | ۰/۰۳۲      | ۰/۸۱۲                     |
| ۴۰         | ۱/۲۴        | ۱/۲۴               | -۰/۰۰۰۹    | ۰/۵۶۵     | -۰/۵۹۵           | -۰/۵۸۵           | ۰/۰۲۲      | -۰/۶۶۷                    |
| ۴۱         | ۱/۲۴        | ۱/۲۴               | -۰/۰۰۰۳    | ۰/۶۹۳     | -۰/۲۴۸           | -۰/۲۴۲           | ۰/۰۰۷      | -۰/۳۶۴                    |
| ۴۲         | ۱/۲۵        | ۱/۲۵               | -۰/۰۰۱۰    | ۰/۹۱۵     | ۱/۴۹۸            | ۱/۵۴۷            | ۱/۱۵۵      | (فراتر از حد)<br>۵/۰۸۶    |

**جدول (۵).** مشخصات آزمایش طراحی شده سطح پاسخ برای داده‌های آزمایشگاهی توسط نرم افزار دیزاین اکسپرت

| نسخه نرم افزار | ۱۳          | زمان ساخت (میلی ثانیه) | ۱         |
|----------------|-------------|------------------------|-----------|
| نوع مطالعه     | سطح پاسخ    | زیرگروه                | تصادفی    |
| نوع طراحی      | صفحه گسترده | تعداد اجرا             | ۴۲        |
| مدل طراحی      | مکعبی       | بلوک‌ها                | بدون بلوک |

**جدول (۶).** آمار خلاصه مدل‌ها جهت ارزیابی اثرات معنی دار متغیرهای مستقل بر روی متغیرهای پاسخ

| منبع      | انحراف معیار | R <sup>2</sup> | تنظیم (تعدیل) شده R <sup>2</sup> | پیش بینی شده R <sup>2</sup> | PRESS  |
|-----------|--------------|----------------|----------------------------------|-----------------------------|--------|
| خطی       | ۰/۰۱۰۷       | ۰/۹۸۲۴         | ۰/۹۸۱۵                           | ۰/۹۸۰۰                      | ۰/۰۰۵۱ |
| 2FI       | ۰/۰۱۰۸       | ۰/۹۸۲۵         | ۰/۹۸۱۱                           | ۰/۹۷۹۶                      | ۰/۰۰۵۲ |
| درجه دوم  | ۰/۰۰۹۹       | ۰/۹۸۶۰         | ۰/۹۸۴۱                           | ۰/۹۸۱۵                      | ۰/۰۰۴۷ |
| درجه سوم  | ۰/۰۰۹۶       | ۰/۹۸۸۴         | ۰/۹۸۵۱                           | ۰/۹۷۹۳                      | ۰/۰۰۵۳ |
| درجه چهار | ۰/۰۰۶۷       | ۰/۹۹۵۳         | ۰/۹۹۲۸                           | ۰/۹۸۸۰                      | ۰/۰۰۳۱ |
| درجه پنج  | ۰/۰۰۲۳       | ۰/۹۹۹۶         | ۰/۹۹۹۲                           | ۰/۹۹۸۱                      | ۰/۰۰۰۵ |
| درجه شش   | ۰/۰۰۱۳       | ۰/۹۹۹۹         | ۰/۹۹۹۷                           | ۰/۹۹۹۰                      | ۰/۰۰۰۳ |

**جدول (۷).** شاخص‌های دقت همبستگی برای مدل درجه ۵

| شاخص‌های دقت مدل همبستگی |        |                             |          |
|--------------------------|--------|-----------------------------|----------|
| انحراف معیار             | ۰/۰۰۲۳ | R <sup>2</sup>              | ۰/۹۹۹۶   |
| متوسط (mean)             | ۱/۱۳   | R <sup>2</sup> تنظیم شده    | ۰/۹۹۹۲   |
| C.V. %                   | ۰/۲۰۰۶ | پیش‌بینی شده R <sup>2</sup> | ۰/۹۹۸۱   |
|                          |        | دقت کافی                    | ۱۴۹/۹۵۱۷ |

در جدول ۸ نتایج آنالیز ANOVA و اثرات متقابل بین آن‌ها بررسی شده است، مجموع مربعات نوع III جزئی است. مقدار F، نسبت مربعات مدل به نسبت مربعات خطاها را نشان می‌دهد، که مقدار بالای F نشانگر مقدار کم خطا و

**جدول (۹).** ضرایب بر حسب عامل‌های کدگذاری شده

| عامل             | تخمین ضریب | خطای استاندارد | ۹۵٪ فاصله اطمینان کم | ۹۵٪ فاصله اطمینان بالا | ضریب تورم واریانس (VIF) |
|------------------|------------|----------------|----------------------|------------------------|-------------------------|
| رهگیری           | ۱/۱۶       | ۰/۰۰۱۱         | ۱/۱۶                 | ۱/۱۷                   |                         |
| A-Phi            | ۰/۱۶۷۹     | ۰/۰۰۳۹         | ۰/۱۵۹۷               | ۰/۱۷۶۰                 | ۴۲/۸۰                   |
| AB               | ۰/۰۱۶۴     | ۰/۰۰۴۰         | ۰/۰۰۸۱               | ۰/۰۲۴۶                 | ۲۱/۰۸                   |
| A <sup>2</sup>   | -۰/۱۷۴۹    | ۰/۰۰۶۹         | -۰/۱۸۹۲              | -۰/۱۶۰۷                | ۳۴/۴۹                   |
| A <sup>3</sup>   | -۰/۲۰۰۳    | ۰/۰۱۵۲         | -۰/۲۳۱۹              | -۰/۱۶۸۶                | ۲۶۳/۰۲                  |
| A <sup>3</sup> B | -۰/۰۳۱۴    | ۰/۰۰۵۹         | -۰/۰۴۳۶              | -۰/۰۱۹۲                | ۱۹/۶۵                   |
| A□               | ۰/۲۳۲۱     | ۰/۰۱۰۴         | ۰/۲۱۰۴               | ۰/۲۵۳۷                 | ۶۰/۸۵                   |
| A□               | ۰/۲۳۹۸     | ۰/۰۱۶۷         | ۰/۲۰۵۱               | ۰/۲۷۴۵                 | ۱۸۵/۱۷                  |

تبدیل Box-Cox در درجه اول برای برخورد با داده‌هایی استفاده می‌شود که با مفروضات نرمال بودن، خطی بودن و همسانی بودن که توسط بسیاری از تکنیک‌های آماری از جمله رگرسیون خطی مورد نیاز است، مطابقت ندارند. برای تثبیت واریانس و تقریب بیشتر داده‌ها با توزیع نرمال طراحی شده است. ایده اصلی تبدیل Box-Cox یافتن تبدیل توان توسط رابطه ۸ بیان شده است.

$$Y(\lambda) = \begin{cases} \frac{Y^\lambda - 1}{\lambda}, & \text{if } \lambda \neq 0 \\ \ln(Y), & \text{if } \lambda = 0 \end{cases} \quad (8)$$

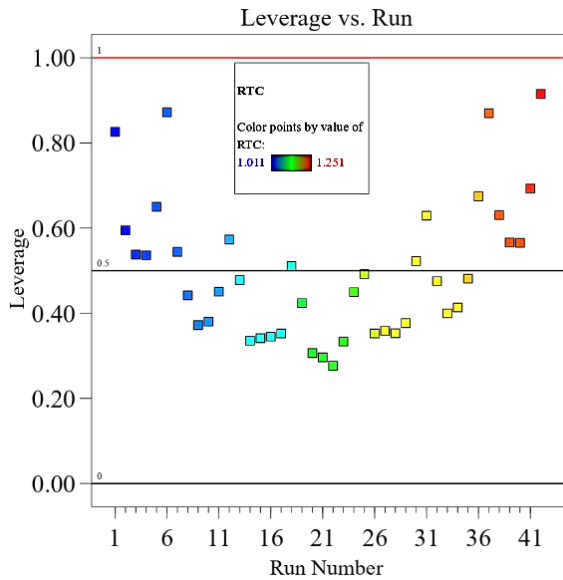
$Y(\lambda)$  متغیر تبدیل شده است،  $Y$  متغیر اصلی است،  $\lambda$  پارامتری است که باید از روی داده‌ها تخمین زده شود. شکل ۹ نشان‌دهنده نمودار تبدیل Box-Cox می‌باشد که برای کمک به تعیین مقدار بهینه پارامتر ( $\lambda$ )، برای تبدیل Box-Cox یک مجموعه داده معین استفاده می‌شود. نمودار شکل ۹ به‌ویژه زمانی مفید است که می‌خواهید مقدار لامبدا را پیدا کنید که نرمال بودن داده‌های شما را به حداکثر می‌رساند. برای ما مقدار لامبدا با توجه به پرتی یکی از داده‌ها برابر با مقدار ۱ می‌باشد.

تطابق بالای مدل را نشان می‌دهد. از سویی می‌توان گفت هرچه میزان  $P$  کمتر باشد ضریب مرتبط با آن فاکتور (متغیر مستقل) تأثیرگذارتر می‌باشد و از اهمیت بیشتری برخوردار است در مدل درجه ۵ مقدار  $F$  برابر است با  $۲۴۹۲/۵۰$  که بیانگر خطای کم این مدل نیز می‌باشد. مقادیر  $P$  کمتر از  $۰/۰۵۰۰$  نیز نشان می‌دهد که تأثیر ضریب مرتبط با آن فاکتور در مدل قابل توجه است و غیر قابل چشم‌پوشی است. در این مورد  $A, AB, A^2, A^3, A^3B, A^4, A^5$  عوامل مدل قابل توجهی هستند. جدول ۹ برای بررسی ضرایب بر حسب عامل‌های کدگذاری شده ارائه شده است. تخمین ضریب نشان‌دهنده تغییر مورد انتظار در پاسخ به ازای واحد تغییر در مقدار عامل زمانی است که همه عوامل باقی‌مانده ثابت نگه داشته‌شوند. در یک طراحی متعامد، فاصله میانگین کلی پاسخ است. وقتی فاکتورها متعامد هستند، فاکتورهای تورم واریانس (VIF)، ۱ هستند. فاکتورهای تورم واریانس بزرگتر از ۱ نشان‌دهنده چند خطی بودن است، هر چه فاکتورهای تورم واریانس بالاتر باشد همبستگی عوامل شدیدتر است. به‌عنوان یک قانون تقریبی، فاکتورهای تورم واریانس کمتر از ۱۰ قابل تحمل هستند.

**جدول (۸).** نتایج آنالیز ANOVA و اثرات متقابل بین آن

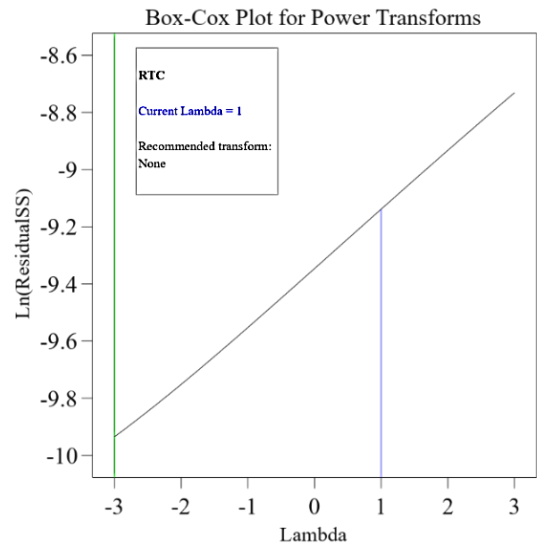
| منبع             | مجموع مربعات | میانگین مربعات | مقدار $F$ | مقدار $p$ |
|------------------|--------------|----------------|-----------|-----------|
| مدل              | ۰/۲۵۵۱       | ۰/۰۱۲۸         | ۲۴۹۲/۵۰   | ۰/۰۰۰۱    |
| A-Phi            | ۰/۰۰۹۴       | ۰/۰۰۹۴         | ۱۸۲۸/۰۱   | ۰/۰۰۰۱    |
| AB               | ۰/۰۰۰۱       | ۰/۰۰۰۱         | ۱۷/۰۴     | ۰/۰۰۰۵    |
| A <sup>2</sup>   | ۰/۰۰۳۳       | ۰/۰۰۳۳         | ۶۴۹/۳۶    | ۰/۰۰۰۱    |
| A <sup>3</sup>   | ۰/۰۰۰۹       | ۰/۰۰۰۹         | ۱۷۳/۳۶    | ۰/۰۰۰۱    |
| A <sup>3</sup> B | ۰/۰۰۰۱       | ۰/۰۰۰۱         | ۲۸/۵۶     | ۰/۰۰۰۱    |
| A <sup>4</sup>   | ۰/۰۰۲۵       | ۰/۰۰۲۵         | ۴۹۶/۵۷    | ۰/۰۰۰۱    |
| A <sup>5</sup>   | ۰/۰۰۱۱       | ۰/۰۰۱۱         | ۲۰۶/۲۴    | ۰/۰۰۰۱    |
| باقیمانده        | ۰/۰۰۰۱       | ۵/۱۱۷*۱۰-۶     |           |           |
| کل               | ۰/۲۵۵۲       |                |           |           |

در زمینه تحلیل رگرسیون، "اهرم" یا (قدرت نفوذ) به تأثیر بالقوه یا تأثیر نقاط داده منفرد بر ضرایب تخمینی مدل رگرسیون اشاره دارد. نقاط اهرمی بالا، نقاط داده‌ای هستند که پتانسیل تأثیر قابل توجهی بر تناسب یا پارامترهای مدل دارند. همان‌طور که در شکل ۱۱ مشاهده می‌کنید در محدوده داده‌ها چهل و دومین داده که برای میزان کسر حجمی ۱/۴۵٪ و دمای ۵۰ °C بود اهرم ۰/۹۱۵۳ را داشت، هرچه این عدد بالاتر باشد، میزان تأثیر بیشتری در ضرایب تخمینی رگرسیون خواهد گذاشت، پایین‌ترین میزان هم برای دمای ۴۰ °C با کسر حجمی ۰/۷۳٪ بود که مقدار ۰/۲۷۶۷۵ را برای اهرم در برداشت.



شکل (۱۱). نمودار قدرت نفوذ (Leverage)

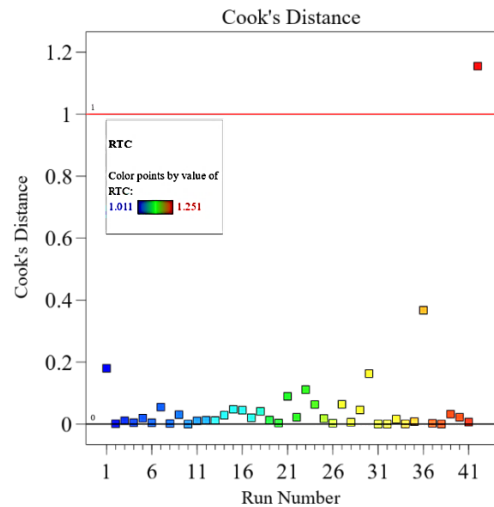
میزان باقی‌مانده‌های استیودنتایز خارجی<sup>۳</sup> نشان داده شده در شکل ۱۲ که نوعی باقیمانده هستند، برای در نظر گرفتن تأثیر هر نقطه داده بر پارامترهای مدل تنظیم شده است. آن‌ها برای شناسایی مشاهدات تأثیرگذار یا نقاط پرت در تحلیل رگرسیون استفاده می‌شوند. برای محاسبه یک باقیمانده استیودنتایز خارجی برای یک نقطه داده خاص، لازم است این مراحل دنبال شود: ابتدا مدل رگرسیون را با مجموعه داده، شامل تمام نقاط داده، برازش داده شود. سپس باقیمانده‌ها برای همه نقاط داده، از جمله نقطه مورد نظر، محاسبه می‌شود. آنگاه نقطه داده مورد نظر حذف شده و مدل مجدداً در داده‌های باقیمانده قرار داده شود. باقیمانده‌های این مدل کاهش یافته، با خطای استاندارد



شکل (۹). نمودار باکس-کاکس برای تشخیص تبدیل توان

هدایت حرارتی نسبی

به طور خلاصه، نمودار باکس - کاکس ابزاری است که در تحلیل رگرسیون برای شناسایی مشاهدات تأثیرگذار با کمی کردن تأثیر آن‌ها بر مدل پس از اعمال تبدیل Box-Cox به داده‌ها استفاده می‌شود. این یک تکنیک ارزشمند برای بهبود اعتبار مدل‌های رگرسیون در هنگام برخورد با داده‌های غیرعادی توزیع شده است. در روش شناسی سطح پاسخ، فاصله کوک معیاری است که برای ارزیابی تأثیر نقاط داده‌ای فردی بر مدل رگرسیون استفاده می‌شود. این به شناسایی نقاط پرت کمک می‌کند که ممکن است تأثیر قابل توجهی بر ضرایب و پیش‌بینی‌های مدل داشته باشند. همان‌طور که در شکل ۱۰ مشاهده می‌گردد تقریباً تمامی داده‌ها توزیع عادی و متناسبی دارند.

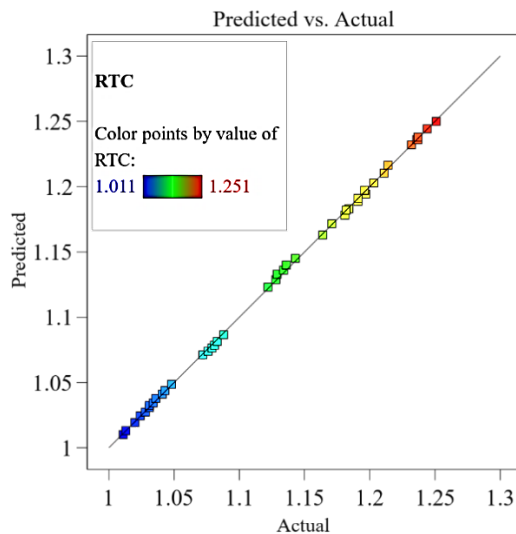


شکل (۱۰). نمودار فاصله کوک تشخیص اجرا برای هدایت

حرارتی نسبی

<sup>3</sup> Externally Studentized Residual

در شکل ۱۴ نمودار همبستگی هدایت حرارتی پیش بینی شده نسبت به مقدار واقعی ترسیم گردیده است. با بررسی آن می توان دریافت که اکثر داده ها انطباق قابل پذیرشی دارند که بدین معناست رابطه ی تجربی جدید معرفی شده توسط روش سطح پاسخ از توانایی قابل قبولی برخوردار می باشد و در پیش بینی داده ها نسبتاً موفق عمل کند و همچنین دارای خطای قابل چشم پوشی باشد.



شکل (۱۴): نمودار همبستگی داده های هدایت حرارتی پیش بینی شده نسبت به مقدار واقعی

#### ۵- ارائه یک رابطه تجربی جدید

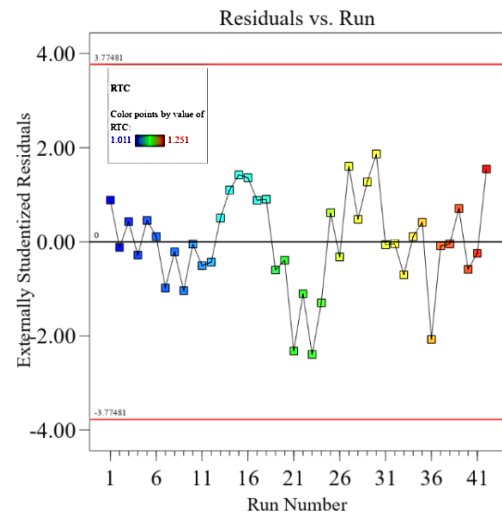
برای پیش بینی هدایت حرارتی نسبی نانوسیال هیبریدی مطالعه حاضر و مدل سازی تابع هدف و بهینه سازی آن یک رابطه نظری مرتبه ۵ پیشنهاد می شود. رابطه (۹) توسط نرم افزار دیزاین اکسپرت طراحی شده است که در آن  $T$  بیانگر دما ( $\square$ )،  $\phi$  کسر حجمی نانوسیال و  $K_{Relative}$  نیز هدایت حرارتی نسبی نانوسیال می باشد. رابطه ۹ فقط برای نانوسیال موجود در این مطالعه بوده و برای پیش بینی سایر نانو سیالات مناسب نمی باشد.

$$K_{Relative} = +1.16787 + 0.131356\phi * T - 1.91065\phi^2 + 3.17601\phi^3 - 0.014676\phi^3 * T - 2.44380\phi^4 + 0.731748\phi^5 \quad (9)$$

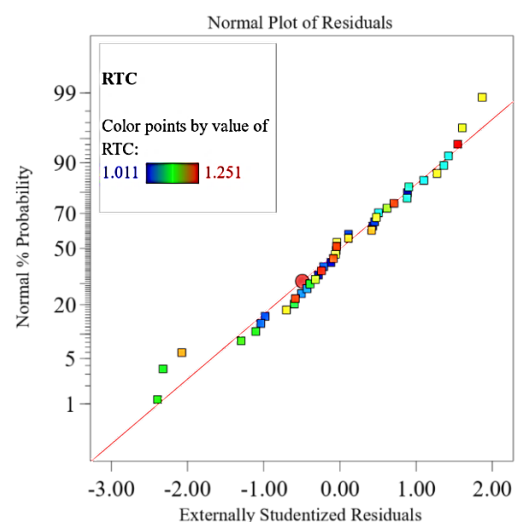
#### ۶- حاشیه انحراف<sup>۴</sup>

برای اعتبارسنجی روش تجربی مورد مطالعه و اثبات همبستگی موجود بین داده های تجربی و پیش بینی شده از

محاسبه شود. باقیمانده برای نقطه داده مورد نظر، بر خطای استاندارد آن تقسیم شده و باقیمانده استیودنتایز حاصل اندازه گیری می کند تا مشخص شود تأثیر اضافه کردن یک نقطه داده خاص بر ضرایب تخمینی مدل رگرسیون چه مقدار خواهد بود. مقادیر مطلق بزرگ باقیمانده های استیودنتایز خارجی نشان می دهد که یک نقطه داده تأثیر قابل توجهی بر مدل دارد.



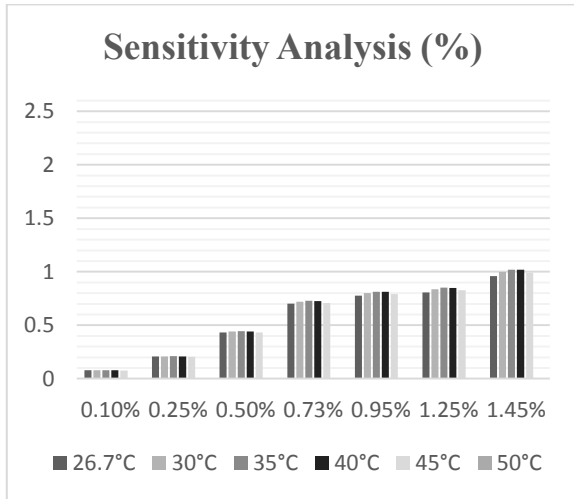
شکل (۱۲). نمودار باقی مانده های استیودنتایز خارجی برای هدایت حرارتی نانوسیال هیبریدی در روش سطح پاسخ در شکل ۱۳ بردار نرمال باقی مانده ها ترسیم شده است. اگر باقیمانده ها به طور معمول توزیع شوند، نقاط باید تقریباً در امتداد یک خط مورب با شیب ۴۵ درجه قرار گیرند. انحراف از این خط مورب نشان دهنده انحراف از حالت عادی است. با توجه به خط ۴۵ درجه، باقی مانده ها در توزیع مناسبی قرار گرفته اند، که نشان دهنده اعتبار مدل می باشد.



شکل (۱۳). بردار نرمال باقی مانده ها

<sup>4</sup> Margin of Deviation

قابل ذکر است که سطوح حساسیت با افزودن نانوذرات افزایش یافت و در کسر حجمی ۱/۴۵٪ به اوج رسید. تغییرات دما در بخش‌های حجمی مختلف تأثیرات متفاوتی بر حساسیت نانوسیال به همراه داشت. این تغییر به تفاوت در درصد تغییرات ضرایب هدایت حرارتی قبل و بعد از افزودن نانوذرات به سیال پایه نسبت داده می‌شود.



شکل (۱۶). آنالیز حساسیت با توجه به تغییرات ۱۰٪ در فاکتور کسر حجمی

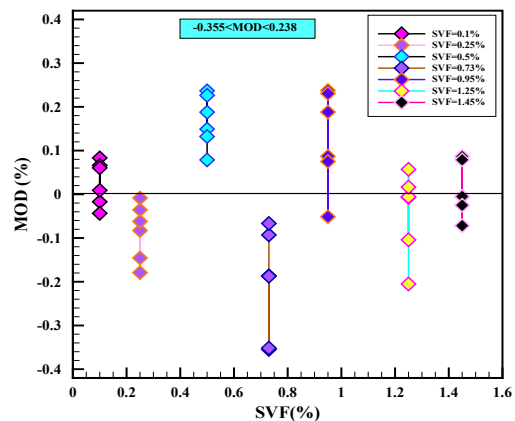
### ۸- نتیجه‌گیری

در این تحقیق، یک روش آماری دقیق شامل روش سطح پاسخ (RSM) با آنالیز واریانس (ANOVA) برای پیش‌بینی هدایت حرارتی نانوسیال هیبریدی سیلیکا (۸۹٪) و نانولوله کربنی (۱۱٪) در سیال پایه آب (۵۵٪) و اتیلن گلیکول (۴۵٪) استفاده شد. ارزیابی‌های آزمایشی سیستماتیک هدایت حرارتی نانوسیال هیبریدی در دماهای (۲۶/۷°C تا ۵۰°C) و کسر حجمی (۰/۱٪-۱/۴۵٪) انجام شد. مدل توسعه‌یافته قابلیت پیش‌بینی استثنایی را نشان می‌دهد، انحرافات کمتر از ۰/۲۳۸٪ نسبت به داده‌های تجربی در محدوده دمایی ۲۶/۷°C تا ۵۰°C و کسر حجمی ۰/۱٪ تا ۱/۴۵٪ را نشان می‌دهد. یک تجزیه و تحلیل دقیق با استفاده از توزیع احتمال نرمال، توزیع خطای یکنواخت و نرمال را نشان داد که نشان‌دهنده سازگاری ماهرانه مدل با داده‌های تجربی است. علاوه بر این، معیارهای آماری، به طور خاص R<sup>2</sup> و R<sup>2</sup> تعدیل شده (R<sup>2</sup><sub>adj</sub>)، به ترتیب ۰/۹۹۹۶ و ۰/۹۹۹۲ محاسبه شدند که بر دقت مدل سطح پاسخ توسعه‌یافته تأکید می‌کند. استفاده از ANOVA اهمیت نتایج به‌دست‌آمده از همبستگی پیشنهادی را اثبات کرد.

روش سطح پاسخ می‌تواند از روش حاشیه انحراف که از رابطه ۱۰ مقادیر آن بدست می‌آید، استفاده کرد.

$$MOD = \frac{RTC_{rel\exp} - RTC_{relpre}}{RTC_{rel\exp}} \times 100 \quad (10)$$

منظور از RTC<sub>rel<sub>exp</sub></sub> هدایت حرارتی نسبی آزمایشگاهی و RTC<sub>rel<sub>pre</sub></sub> هدایت حرارتی نسبی پیش‌بینی شده است. تمامی مقادیر حاشیه انحراف توسط رابطه فوق بدست آمده و برای اعتبار سنجی در این مدل آماری در نمودار شکل ۱۵ ترسیم شده است. محدوده مقادیر MOD در شکل ۱۵ رسم شده است، باتوجه به اینکه این مقادیر بین ۰/۲۳۸ تا ۰/۲۵۵- درصد در نوسان هست که توزیع انحراف حول صفر متمرکز می‌باشد، به این معنی که مدل سطح پاسخ دقت مناسبی دارد، همچنان می‌توان دریافت با توجه به انطباق قابل قبول داده‌ها نسبت به هم این یک مدل آماری توانمند می‌باشد.



شکل (۱۵). پراکندگی حاشیه انحراف داده‌های تجربی و پیش‌بینی شده، نسبت به کسر حجمی

### ۷- آنالیز حساسیت

برای ارزیابی اینکه چگونه رفتار حرارتی بر متغیرهای مربوطه تأثیر می‌گذارد، از تحلیل حساسیت استفاده شد. با استفاده از رابطه ۱۱، مقادیر حساسیت برای تجزیه و تحلیل اثر کسر شکل ۱۶ هدایت حرارتی نانوسیال هیبریدی را نسبت به اعمال ۱۰٪ افزایش نسبت به متغیر کسر حجمی را نشان می‌دهد.

$$RTC_{SA} = \frac{RTC_{AfterChange_{pre}} - RTC_{BeforeChange_{pre}}}{RTC_{BeforeChange_{pre}}} \times 100 \quad (11)$$

در رابطه ۱۱، مقدار آنالیز حساسیت بدست آمده، RTC<sub>AfterChange<sub>pre</sub></sub> هدایت حرارتی قبل از افزودن ۱۰ درصد نانوسیال و RTC<sub>BeforeChange<sub>pre</sub></sub> هدایت حرارتی قبل از افزودن ۱۰ درصد نانوسیال می‌باشد.

## ۹- مراجع

13. Paul G, Pal T, Manna I. Thermo-physical property measurement of nano-gold dispersed water based nanofluids prepared by chemical precipitation technique. *J. Colloid Interface Sci.* 2010;349(1):434-7. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2010.05.086>
14. Gupta M, Singh V, Kumar S, Kumar S, Dilbaghi N, Said Z. Up to date review on the synthesis and thermophysical properties of hybrid nanofluids. *J. Clean. Prod.* 2018;190:169-92. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.04.146>
15. Suresh S, Venkataraj K, Selvakumar P, Chandrasekar M. Effect of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Cu/water hybrid nanofluid in heat transfer. *Exp. Therm. Fluid Sci.* 2012;38:54-60. <https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2011.11.007>
16. Sundar LS, Singh MK, Sousa AC. Enhanced heat transfer and friction factor of MWCNT-Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>/water hybrid nanofluids. *ICHMT.* 2014;52:73-83. <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2014.01.012>
17. Batmunkh M, Tanshen MR, Nine MJ, Myekhlai M, Choi H, Chung H, Jeong H. Thermal conductivity of TiO<sub>2</sub> nanoparticles based aqueous nanofluids with an addition of a modified silver particle. *Ind. Eng. Chem. Res.* 2014;53(20):8445-51. <https://doi.org/10.1021/ie403712f>
18. Baby TT, Ramaprabhu S. Synthesis and nanofluid application of silver nanoparticles decorated graphene. *J. Mater. Chem.* 2011;21(26):9702-9. <https://doi.org/10.1039/C0JM04106H>
19. Aravind SJ, Ramaprabhu S. Graphene-multiwalled carbon nanotube-based nanofluids for improved heat dissipation. *Rsc Advances.* 2013;3(13):4199-206. <https://doi.org/10.1039/C3RA22653K>
20. Han Z, Yang B, Kim SH, Zachariah MR. Application of hybrid sphere/carbon nanotube particles in nanofluids. *Nanotechnol.* 2007;18(10):105701. <https://doi.org/10.1088/0957-4484/18/10/105701>
21. Baghbanzadeh M, Rashidi A, Rashtchian D, Lotfi R, Amrollahi A. Synthesis of spherical silica/multiwall carbon nanotubes hybrid nanostructures and investigation of thermal conductivity of related nanofluids. *Thermochim. Acta.* 2012;549:87-94. <https://doi.org/10.1016/j.tca.2012.09.006>
22. Paul G, Philip J, Raj B, Das PK, Manna I. Synthesis, characterization, and thermal property measurement of nano-Al<sub>95</sub>Zn<sub>05</sub> dispersed nanofluid prepared by a two-step process. *Int. J. Heat Mass Transf.* 2011;54(15-16):3783-8. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2011.02.044>
23. Abbasi SM, Rashidi A, Nemati A, Arzani K. The effect of functionalisation method on the stability and the thermal conductivity of nanofluid hybrids of carbon nanotubes/gamma alumina. *Ceram. Int.* 2013;39(4):3885-91. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2012.10.232>
24. Nine M, Munkhbayar B, Rahman M, Chung H, Jeong H. Highly productive synthesis process of well dispersed Cu<sub>2</sub>O and Cu/Cu<sub>2</sub>O nanoparticles
1. Sepehrnia M, Mohammadzadeh K, Veyseh MM, Agah E, Amani M. Rheological behavior of engine oil based hybrid nanofluid containing MWCNTs and ZnO nanopowders: Experimental analysis, developing a novel correlation, and neural network modeling. *Powder Technol.* 2022;404:117492. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2022.117492>
2. Selmani A, Kovačević D, Bohinc K. Nanoparticles: From synthesis to applications and beyond. *Adv. Colloid Interface Sci.* 2022;303:102640. <https://doi.org/10.1016/j.cis.2022.102640>
3. Yang Y, Du Y, Zhang J, Zhang H, Guo B. Structural and functional design of electrospun nanofibers for hemostasis and wound healing. *AFM.* 2022;4(5):1027-57. <https://doi.org/10.1007/s42765-022-00178-z>
4. Hamzat AK, Omisanya MI, Sahin AZ, Oyetunji OR, Olaitan NA. Application of nanofluid in solar energy harvesting devices: A comprehensive review. *Energy Convers. Manage.* 2022;266:115790. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2022.115790>
5. Maxwell JC. *The Scientific Letters and Papers of James Clerk Maxwell: Volume 1, 1846-1862*: CUP Archive; 1990.
6. Choi SU, Eastman JA. Enhancing thermal conductivity of fluids with nanoparticles. ANL, Argonne, IL (United States); 1995.
7. Hosseinzadeh K, Moghaddam ME, Hatami M, Ganji D, Ommi F. Experimental and numerical study for the effect of aqueous solution on heat transfer characteristics of two phase close thermosyphon. *ICHMT.* 2022;135:106129. <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2022.10.6129>
8. Younes H, Mao M, Murshed SS, Lou D, Hong H, Peterson G. Nanofluids: Key parameters to enhance thermal conductivity and its applications. *Appl. Therm. Eng.* 2022;207:118202. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2022.118202>
9. Wohld J, Beck J, Inman K, Palmer M, Cummings M, Fulmer R, Vafaei S. Hybrid Nanofluid Thermal Conductivity and Optimization: Original Approach and Background. *Nanomater.* 2022;12(16):2847. <https://doi.org/10.3390/nano12162847>
10. Yasir M, Hafeez A, Khan M. Thermal conductivity performance in hybrid (SWCNTs-CuO/Ethylene glycol) nanofluid flow: Dual solutions. *ASEJ.* 2022;13(5):101703. <https://doi.org/10.1016/j.asej.2022.101703>
11. Rashidi M, Alhuyi Nazari M, Mahariq I, Ali N. Modeling and sensitivity analysis of thermal conductivity of ethylene glycol-water based nanofluids with alumina nanoparticles. *Exp. Tech.* 2023;47(1):83-90. <https://doi.org/10.1007/s40799-022-00567-4>
12. Qiu L, Zhu N, Feng Y, Michaelides EE, Żyła G, Jing D, et al. A review of recent advances in thermophysical properties at the nanoscale: From solid state to colloids. *Phys. Rep.* 2020;843:1-81. <https://doi.org/10.1016/j.physrep.2019.12.001>

35. Han X, Liang H, Wang Q. Unraveling the effect of surfactant on the preparation of 40 nm Cu<sub>2</sub>O nanofluids for enhanced thermal conductivity. *Inorg. Chem. Commun.* 2023;153:110725. <https://doi.org/10.1016/j.inoche.2023.110725>
36. Rostamian SH, Biglari M, Saedodin S, Esfe MH. An inspection of thermal conductivity of CuO-SWCNTs hybrid nanofluid versus temperature and concentration using experimental data, ANN modeling and new correlation. *J. Mol. Liq.* 2017;231:364-9. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2017.02.015>
37. Atashafroz M, Barchipour K, and Aminizadeh N, Three-dimensional analysis of forced displacement flow in a stepped channel with consideration of the mutual effects of magnetic field and solid nanoparticles, <https://civilica.com/doc/1187024> 2019. (InPersian) [https://fma.ihu.ac.ir/article\\_205832.html](https://fma.ihu.ac.ir/article_205832.html)
38. Esfe MH, Tamrabad SNH, Hatami H, Alidoust S, Toghraie D. Using the RSM to evaluate the rheological behavior of SiO<sub>2</sub> (60%)-MWCNT (40%) /SAE40 oil hybrid nanofluid and investigating the effect of different parameters on the viscosity. *Tribol. Int.* 2023;184:108479. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2023.108479>
39. Esfe MH, Motallebi SM, Toghraie D. Optimal viscosity modelling of 10W40 oil-based MWCNT (40%)-TiO<sub>2</sub> (60%) nanofluid using Response Surface Methodology (RSM). *Heliyon.* 2022;8(12). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e11944>
40. Esfe MH, Alidoust S, Tamrabad SNH, Toghraie D, Hatami H. Thermal conductivity of MWCNT-TiO<sub>2</sub>/Water-EG hybrid nanofluids: Calculating the price performance factor (PPF) using statistical and experimental methods (RSM). *Case Stud. Therm. Eng.* 2023;48:103094. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2023.103094>
41. Esfe M H, Laboratory and comparative study of thermophysical properties of different nanofluids with the aim of choosing the best nanolubricant, vol. 18, pp. 125-142 2022. [Online]. Available: <https://sid.ir/paper/1052188/fa> (In Persian) [https://maj.ihu.ac.ir/article\\_207377.html](https://maj.ihu.ac.ir/article_207377.html)
42. Esfe M H and Motallebii S, "Experimental study of the effect of effective parameters on the coefficient of thermal conductivity of five-component hybrid nanofluid," pp. 141–154 .2022. (In persian) [https://maj.ihu.ac.ir/article\\_207382.html?lang=fa](https://maj.ihu.ac.ir/article_207382.html?lang=fa)
43. Zhang R, Qing S, Zhang X, Luo Z, Liu Y. Enhanced thermal conductivity in Ag-H<sub>2</sub>O nanofluids by nanoparticles of different shapes: Insights from molecular dynamics simulation. *J. Mol. Liq.* 2023;388:122750. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2023.122750>
44. Zhang R, Zhang X, Qing S, Luo Z, Liu Y. Investigation of nanoparticles shape that influence the thermal conductivity and viscosity in argon-based nanofluids: A molecular dynamics simulation. *Int. J. Heat Mass Transf.* 2023;207:124031. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2023.124031>
45. Ghafouri A, Toghraie D. Experimental study on thermal conductivity of SiC-ZnO/ethylene glycol and its thermal characterization. 2013. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2013.05.032>
25. Lin C, Zhou J, Lu Q, Khabaz MK, Andani AK, Al-Yasiri M, Pan G. Thermal conductivity prediction of WO<sub>3</sub>-CuO-Ag (35: 40: 25)/water hybrid ternary nanofluid with Artificial Neural Network and back-propagation algorithm. *Mater. Today Commun.* 2023;36:106807. <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2023.106807>
26. Alsangur R, Doganay S, Ates İ, Turgut A, Cetin L, Rebay M. Magnetic field dependent thermal conductivity investigation of water based Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>/CNT and Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>/graphene magnetic hybrid nanofluids using a Helmholtz coil system setup. *Diam. Relat. Mater.* 2024;141:110716. <https://doi.org/10.1016/j.diamond.2023.110716>
27. Qu Y, Jasim DJ, Sajadi SM, Salahshour S, Rahmanian A, Baghaei S. Artificial neural network modeling of thermal characteristics of WO<sub>3</sub>-CuO (50: 50)/water hybrid nanofluid with a back-propagation algorithm. *Mater. Today Commun.* 2024;38:108169. <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2024.108169>
28. Wanatasanappan VV, Kanti PK, Sharma P, Husna N, Abdullah M. Viscosity and rheological behavior of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/water-EG based hybrid nanofluid: A new correlation based on mixture ratio. *J. Mol. Liq.* 2023;375:121365. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2023.121365>
29. Pavithra K, Hanumagowda B, Raju SSK, Varma S, Murshid N, Mulki H, Al-Kouz W. Thermal Radiation and Mass Transfer Analysis in an Inclined Channel Flow of a Clear Viscous Fluid and H<sub>2</sub>O/EG-Based Nanofluids through a Porous Medium. *Sustainability.* 2023;15(5):4342. <https://doi.org/10.3390/su15054342>
30. Yahya AU, Salamat N, Huang W-H, Siddique I, Abdal S, Hussain S. Thermal characteristics for the flow of Williamson hybrid nanofluid (MoS<sub>2</sub>+ ZnO) based with engine oil over a stretched sheet. *Case Stud. Therm. Eng.* 2021;26:101196. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2021.101196>
31. Sepehrnia M, Mohammadzadeh K, Rozbahani MH, Ghiasi MJ, Amani M. Experimental study, prediction modeling, sensitivity analysis, and optimization of rheological behavior and dynamic viscosity of 5W30 engine oil based SiO<sub>2</sub>/MWCNT hybrid nanofluid. *ASEJ.* 2023:102257. <https://doi.org/10.1016/j.asej.2023.102257>
32. Murshed SS, de Castro CN, editors. Contribution of Brownian motion in thermal conductivity of nanofluids. *Proceedings of the world congress on engineering*; 2011.
33. Rudyak VY, Pryazhnikov MI, Minakov AV, Shupik AA. Comparison of thermal conductivity of nanofluids with single-walled and multi-walled carbon nanotubes. *Diam. Relat. Mater.* 2023;139:110376. <https://doi.org/10.1016/j.diamond.2023.110376>
34. Poloju VK, Khadanga V, Mukherjee S, Mishra PC, Aljuwayhel NF, Ali N. Thermal conductivity and dispersion properties of SDBS decorated ternary nanofluid: Impacts of surfactant inclusion, sonication time and ageing. *J. Mol. Liq.* 2022;368:120832. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2022.120832>

57. Selvan P, Jebakani D, Jeyasubramanian K, Jebaraj DJJ. Enhancement of thermal conductivity of water based individual and hybrid SiO<sub>2</sub>/Ag nanofluids with the usage of calcium carbonate nano particles as stabilizing agent. *J. Mol. Liq.* 2022;345:117846. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2021.117846>
58. Dehkordi MHR, Alizadeh Aa, Zekri H, Rasti E, Kholoud MJ, Abdollahi A, Azimy H. Experimental study of thermal conductivity coefficient of GNSs-WO<sub>3</sub>/LP107160 hybrid nanofluid and development of a practical ANN modeling for estimating thermal conductivity. *Heliyon.* 2023;9(6). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e17539>
59. Esfe MH, Alidoust S, Toghraie D. Comparison of thermal conductivity of water-based nanofluids with various combinations of MWCNT, CuO, and SiO<sub>2</sub> nanoparticles for using in heating systems. *Case Stud. Therm. Eng.* 2023;42:102683. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2022.102683>
60. Khan IA. Experimental validation of enhancement in thermal conductivity of titania/water nanofluid by the addition of silver nanoparticles. *ICHMT.* 2021;120:104910. <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2020.104910>
61. Esfe MH, Alidoust S, Esfandeh S, Toghraie D, Hatami H, Kamyab MH, Ardeshiri EM. Theoretical-experimental study of factors affecting the thermal conductivity of SWCNT-CuO (25:75)/water nanofluid and challenging comparison with CuO nanofluids/water. *Arab. J. Chem.* 2023;16(5):104689. <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2023.104689>
62. Sundar LS, Sangaraju S, Mouli KVC. Effect of magnetic field on the thermal conductivity and viscosity of magnetic manganese oxide/ethylene glycol nanofluids: An experimental and ANFIS approach. *J. Magn. Magn. Mater.* 2023;588:171386. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2023.171386>
63. Pavithra K, Parol V, Brusly Solomon A, Yashoda M. Investigation of thermal conductivity and thermal performance of heat pipes by structurally designed copolymer stabilized ZnO nanofluid. *Sci. Rep.* 2023;13(1):14219. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-39598-1>
64. Sahin F, Genc O, Gökcek M, Çolak AB. An experimental and new study on thermal conductivity and zeta potential of Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>/water nanofluid: Machine learning modeling and proposing a new correlation. *Powder Technol.* 2023;420:118388. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2023.118388>
- hybrid nanofluid: proposing an optimized multivariate correlation. *J. Taiwan Inst. Chem. Eng.* 2023;148:104824. <https://doi.org/10.1016/j.jtice.2023.104824>
46. Milyani AH, Al-Ebrahim MA, Attar ET, Abu-Hamdeh NH, Mostafa ME, Nusier OK, et al. Artificial intelligence optimization and experimental procedure for the effect of silicon dioxide particle size in silicon dioxide/deionized water nanofluid: Preparation, stability measurement and estimate the thermal conductivity of produced mixture. *JMR&T.* 2023;26:2575-86. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.08.074>
47. Duangthongsuk W, Wongwises S. An experimental study on the heat transfer performance and pressure drop of TiO<sub>2</sub>-water nanofluids flowing under a turbulent flow regime. *Int. J. Heat Mass Transf.* 2010;53(1-3):334-44. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2009.09.024>
48. Suganthi K, Vinodhan VL, Rajan K. Heat transfer performance and transport properties of ZnO-ethylene glycol and ZnO-ethylene glycol-water nanofluid coolants. *Appl. Energy.* 2014;135:548-59. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.09.023>
49. Satti JR, Das DK, Ray D. Investigation of the thermal conductivity of propylene glycol nanofluids and comparison with correlations. *Int. J. Heat Mass Transf.* 2017;107:871-81. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2016.10.121>
50. Gupta J, Pandey BK, Dwivedi D, Mishra S, Jaiswal RL, Pandey S. Experimental studies on thermal conductivity of metal oxides/water-ethylene glycol (50%-50%) nanofluids with varying temperature and concentration using ultrasonic interferometer. *Physica B Condens. Matter.* 2023;670:415376. <https://doi.org/10.1016/j.physb.2023.415376>
51. Murshed S, Leong K, Yang C. A combined model for the effective thermal conductivity of nanofluids. *Appl. Therm. Eng.* 2009;29(11-12):2477-83. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2008.12.018>
52. Jang SP, Choi SU. Role of Brownian motion in the enhanced thermal conductivity of nanofluids. *Appl. Phys. Lett.* 2004;84(21):4316-8. <https://doi.org/10.1063/1.1756684>
53. Prasher R, Bhattacharya P, Phelan PE. Brownian-motion-based convective-conductive model for the effective thermal conductivity of nanofluids. 2006. <https://doi.org/10.1115/1.2188509>
54. Shatri A, Zarei Kurdshuli M, and Zarei, calculation of the viscosity of nanofluid SPC hypothetical model of water in molecular dynamics, pp. 67–78 . 2016.(InPersian) <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.23223278.1396.6.1.6.3>
55. Maxwell JC. A treatise on electricity and magnetism: Oxford: Clarendon Press; 1873.
56. Esfe MH, Alirezaie A, Toghraie D. Thermal conductivity of ethylene glycol based nanofluids containing hybrid nanoparticles of SWCNT and Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> and its price-performance analysis for energy management. *JMR&T.* 2021;14:1754-60. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2021.07.033>