

## Experimental Investigation and Presentation of Superior Models in Forecasting of Dynamic Viscosity of MWCNT-ZnO Nanofluid Using Response Surface Method (RSM)

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

<sup>1</sup> Masters Student, Imam Hussain University, Tehran, Iran (majid.jalilian9412@ihu.ac.ir)

<sup>2</sup> Associate Professor, Imam Hussain University, Tehran, Iran (\*Correspondence: m.hemmatesfe@semnan.ac.ir)

### ARTICLE INFO

#### Article history:

Article Type: Research Paper

Received: 6 June 2025

Received in Revised form: 30 July 2025

Accepted: 11 August 2025

Available Online: 29 August 2025

### GRAPHICAL

In this study, the dynamic viscosity of the hybrid nanofluid, including ZnO-MWCNT nanoparticles with a ratio of (20%-80%) on the 40w10 oil base fluid in the range of 5 °C to 55 °C and six volume fractions in the range of 0.05 to 1% and a shear of to 11997s<sup>-1</sup> is investigated. With the help of response surface analysis method (RSM), different models are investigated. In this comparison, analysis of important parameters of different models including R<sup>2</sup>, Adjusted R, Predicted R<sup>2</sup>, CV%, Std. Dev are studied. The results showed that the fourth order model has the best performance among different models and its important values are R<sup>2</sup>=0.9993, Adjusted R<sup>2</sup>=0.9994, Predicted R<sup>2</sup>=0.9991, Cv%=2.46 and Std. Dev. =4.57 respectively. Also, the trend of viscosity changes is investigated. The results showed that temperature has the greatest effect on viscosity. Also, in order to reduce costs and save time, the optimal relationship for predicting the dynamic viscosity is presented.

#### Keywords:

Hybrid Nanofluid

Experimental Investigation

Multiwall Carbon Zinc Oxide

Response Surface Method

Dynamic Viscosity

Jalilian, M ,Hemmat Esfe, M. Experimental Investigation and Presentation of Superior Models in Forecasting of Dynamic Viscosity of MWCNT-ZnO Nanofluid Using Response Surface Method (RSM). Fluid Mechanics and Aerodynamics 2025; 14 (1): 143-158. DOI: <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.23223278.1404.14.1.10.3>



©The Author(s).

Publisher: Imam Hossein University

## بررسی تجربی و ارائه مدل برتر در پیش‌بینی ویسکوزیته دینامیکی نانو سیال هیبریدی کربن چند جداره - اکسید روی با استفاده از روش سطح پاسخ (RSM)

محمد همت اسفه<sup>۱\*</sup>، مجید جلیلیان<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup> دانشیار، دانشگاه جامع امام حسین (ع)، تهران، ایران (نویسنده مسئول: m.hemmatesfe@semnan.ac.ir)

<sup>۲</sup> دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشگاه جامع امام حسین (ع)، تهران، ایران (نویسنده مسئول: majid.jalilian9412@ihu.ac.ir)

| چکیده                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | مشخصات مقاله                                                                                                                                                                          |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| در این مطالعه به بررسی ویسکوزیته دینامیکی نانو سیال هیبریدی، شامل نانوذره‌های ZnO- MWCNT با نسبت ترکیب (۲۰٪-۸۰٪) بر سیال پایه روغن ۱۰W۴۰ در محدوده دمایی ۵ °C تا ۵۵ °C و شش کسر حجمی در محدوده ۰/۰۵ تا ۱ درصد و نرخ برشی از ۶۶۶/۵ s <sup>-1</sup> تا ۱۱۹۹۷ s <sup>-1</sup> پرداخته شد. با کمک روش تحلیلی سطح پاسخ (RSM) مدل‌های مختلف بررسی شدند. در این مقایسه، تجزیه و تحلیل عامل‌های مهم آماری مدل‌های مختلف شامل R <sup>2</sup> ، Adjusted R <sup>2</sup> ، Predicted R <sup>2</sup> ، CV%، Std. Dev صورت گرفت. نتایج نشان داد که مدل مرتبه چهارم، بهترین عملکرد را بین مدل‌های مختلف دارد و مقدار عامل‌های مهم آن به ترتیب ۰/۹۹۹۳، ۰/۹۹۹۴، ۰/۹۹۹۱، ۲/۴۶ و ۴/۵۷ است. همچنین روند تغییرات ویسکوزیته بررسی شد. نتایج نشان داد که دما بیشترین تأثیر را بر ویسکوزیته دارد. همچنین جهت کاهش هزینه‌ها و صرفه‌جویی در وقت، رابطه بهینه جهت پیش‌بینی ویسکوزیته دینامیکی نانو سیال موردنظر، تولید و ارائه شد. | <p><b>تاریخچه مقاله:</b></p> <p>نوع مقاله: علمی پژوهشی</p> <p>دریافت: ۱۶ خرداد ۱۴۰۴</p> <p>بازنگری: ۰۸ مرداد ۱۴۰۴</p> <p>پذیرش: ۲۰ مرداد ۱۴۰۴</p> <p>ارائه آنلاین: ۰۱ شهریور ۱۴۰۴</p> |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | <p><b>کلید واژه‌ها:</b></p> <p>نانو سیال هیبریدی</p> <p>بررسی تجربی کربن چند جداره - اکسید روی</p> <p>روش سطح پاسخ</p> <p>ویسکوزیته دینامیکی</p>                                      |

**استناد:** جلیلیان، مجید، همت اسفه، محمد، بررسی تجربی و ارائه مدل برتر در پیش‌بینی ویسکوزیته دینامیکی نانو سیال هیبریدی کربن چند جداره - اکسید روی با استفاده از روش سطح پاسخ (RSM). مکانیک سیالات و آیرودینامیک. (۱۴۰۴)؛ ۱۴ (۱): ۱۵۸-۱۴۳.

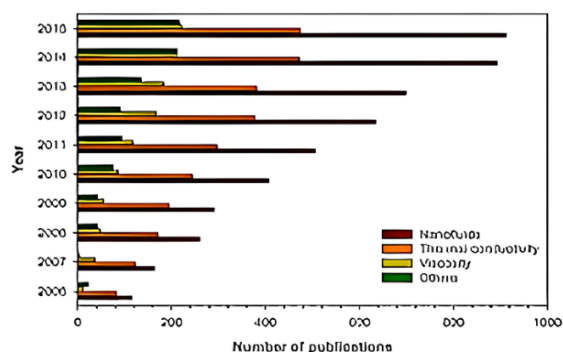
DOI: <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.23223278.1404.14.1.10.3>

ناشر: دانشگاه جامع امام حسین (ع).

© نویسندگان.



OPEN ACCESS



شکل (۱): زمینه‌های مختلف نانو سیال‌ها

به دلیل عدم توانایی در پیش‌بینی ویسکوزیته نانو سیال توسط مدل‌های نظری و همچنین هزینه آزمایش‌های متعدد، مدل‌سازی ویسکوزیته می‌تواند یک راه‌حل مناسب برای کاهش هزینه‌ها و دقت بالا باشد، این مدل با در نظر گرفتن متغیرهای وابسته و مستقل در RSM، رابطه‌ای به دست می‌آید. رابطه‌ای توسط نرم‌افزار دیزاین اکسپرت، با توجه به داده‌های تجربی موجود طراحی و تولید می‌شود. RSM، ابتدا از دیدگاه گرافیکی ایجاد شد اما پس از تناسب با مدل‌های ریاضی به‌طور گسترده در علوم مختلف از جمله علم شیمی سنجی، مورداستفاده قرار گرفت. روش موردنظر شامل گروهی از فن‌های ریاضی و آماری که بر اساس تطابق مدل‌های پیش‌بینی با داده‌های EXP جهت طراحی آزمایشی به‌دست آمده است. برای این هدف، از توابع چندجمله‌ای خطی یا مربعی برای توصیف سیستم مورد مطالعه و در نتیجه برای بررسی شرایط تجربی تا بهینه‌سازی استفاده می‌شود [9-11]. در تعریفی دیگر می‌توان گفت که RSM، مجموعه‌ای از رویه‌های عددی و قابل اندازه‌گیری برای توسعه مدل‌ها از طریق طرح دقیق تحقیقات است. هدف روش موردنظر، ساده کردن واکنش (متغیر بازده) است که تحت تأثیر چند عامل آزاد (ورودی) است [12]. همچنین هدف از گروه‌بندی آن‌ها، دنبال یک متغیر یا پارامتر مشترک و تابع یا پاسخ هدف است [14]. این روش، بینشی در مورد اینکه چقدر واریانس این نتایج قابل توجه است ارائه می‌دهد [15]. لاهاری و همکاران [16] در مطالعه‌ای به بررسی هدایت حرارتی و ویسکوزیته دینامیکی نانو سیال هیبریدی، شامل اکسید سیلیسیم  $23/5 \text{ nm}$  در سیال پایه با ترکیب گلیسرین و آب (۳۰:۷۰) پرداختند. نتایج نشان داد که ویسکوزیته نانو سیال‌ها با افزایش کسر حجمی، افزایش و با افزایش دما، کاهش می‌یابد. همچنین با افزایش کسر حجمی و دما، هدایت حرارتی نانو سیال، افزایش می‌یابد. در دمای ۲۰ درجه سانتی‌گراد و کسر حجمی ۱ درصد، نانو سیال هیبریدی دارای حداکثر ویسکوزیته  $4/09$  است. شیا گوئودونگ و همکاران [17] در مطالعه‌ای به بررسی نانو سیال‌هایی پرداختند که از طریق چاه‌های گرمایی میکرو کانالی جریان می‌یابند. در این

## ۱- مقدمه

از مهم‌ترین موانع افزایش ظرفیت صنایع مختلف، عدم پاسخگویی دستگاه‌های حرارتی در ظرفیت‌های بالاتر است. علاوه بر این، افزایش ظرفیت منجر به افزایش افت فشار می‌شود و این یکی از مهم‌ترین محدودیت‌های صنایع بزرگ است. روش‌های مرسوم افزایش انتقال حرارت، افت فشار را افزایش می‌دهد و با توجه به نتایج استفاده از نانو سیال‌های ویژه می‌توان گفت که راندمان حرارتی مبدل حرارتی در دستگاه‌های حرارتی، افزایش یافت [۱]. رشد واحدهای مهندسی مختلف مانند نیروگاه‌ها، واحدهای تهویه مطبوع، دستگاه‌های الکترونیکی، کارخانه‌های شیمیایی، راکتورهای هسته‌ای، صنایع خودروسازی و انرژی‌های تجدید پذیر، نیاز به صرفه‌جویی در انرژی را نشان می‌دهد. نانو ذرات دسته وسیعی از مواد است که در ابعاد  $1 \text{ nm}$  تا  $100 \text{ nm}$  هستند. در سه دهه گذشته، نانو سیال توجه زیادی را به خود جلب کرده است [۳]. چوی و ایستمن در سال ۱۹۹۵ و در آزمایشگاه ملی آرگون، ایالات متحده آمریکا نانو ذرات را در سیال پایه سنتز کردند. بر اساس انواع نانو ذرات مورداستفاده برای سنتز، نانو سیال را می‌توان به چهار دسته متمایز طبقه‌بندی کرد: (الف) مبتنی بر فلز (ب) مبتنی بر اکسید فلز (ج) مبتنی بر کربن و (د) هیبریدی/مخلوط بر اساس فلز. این نانو ذرات در سیال پایه یعنی آب، متانول، EG، نفت سفید، روغن ترانسفورماتور و غیره برای تشکیل نانو سیال معلق می‌شوند [۴-۷]. دنیای فناوری محور، محققان را تشویق کرد تا بیشتر تحقیق کنند. ویسکوزیته نانو سیال یکی از مهم‌ترین حوزه تحقیق محققان است. جهت طراحی یک سیستم حرارتی که در آن یک نانو سیال، سیال عامل است، لازم است خواص ترموفیزیکی نانو سیال از جمله هدایت حرارتی، ویسکوزیته، ظرفیت گرمایی و چگالی را بدانیم. در میان خواص نانو سیال، ویسکوزیته یک ویژگی مهم است، زیرا نشان‌دهنده مقاومت سیال در برابر حرکت است. با افزایش ویسکوزیته، انرژی موردنیاز برای پمپاژ و اختلاط افزایش می‌یابد. همچنین، قدرت پمپاژ و افت فشار دو عامل کلیدی هستند که به ویسکوزیته بستگی دارند. با انجام چندین آزمایش روی ویسکوزیته نانو سیالات، مشخص شد که برخی از پارامترها مانند کسر حجمی، دما، شکل و اندازه ذرات، سورفکتانت‌ها<sup>۱</sup> و اسیدیته<sup>۲</sup> تأثیر مستقیمی بر ویسکوزیته دارند. در انتشارات سالانه‌ای که در مورد نانو سیالات در Web of science در ۲۴ نوامبر ۲۰۱۵ منتشر شد، نشان داد که تحقیقات در مورد ویسکوزیته افزایش‌یافته است شکل ۱ انتشارات سالانه Web of science در زمینه‌های مختلف نانو سیال‌ها را نشان می‌دهد [8].

<sup>1</sup> Surfactant agent

<sup>2</sup> Potential of Hydrogen Ion

مطالعه، نانو سیال اکسید آلومینیوم و اکسید تیتانیوم بر پایه آب دیونیزه با کسر حجمی ذرات ۰، ۰/۱، ۰/۵، ۱ درصد به روش پراکندگی دومرحله‌ای تهیه شد. نتایج مطالعات نشان داد که هدایت حرارتی و ویسکوزیته دینامیکی نانو سیال‌های اکسید آلومینیوم و اکسید تیتانیوم هر دو با افزایش کسر حجمی ذرات، بهبود می‌یابند. در مقایسه با یک چاه گرمایی میکرو کانالی مستطیلی، عملکرد انتقال حرارت در چاه گرمایی میکرو کانالی فن شکل با استفاده از نانو سیال اکسید آلومینیوم، تقویت می‌شود. همت و همکاران [18] در مطالعه‌ای خواص ترموفیزیکی نانولوله‌های کربنی - اکسید روی با ترکیب (۵۰:۵۰)، روغن پایه ۵W۳۰ بررسی کردند. نتایج نشان داد که با افزایش دما، تأثیر ویژه‌ای بر کاهش ویسکوزیته دارد. با افزایش دما، نیروهای بین‌مولکولی کاهش می‌یابند و باعث کاهش ویسکوزیته می‌شوند. برای همبستگی این رابطه از روش رگرسیون گام‌به‌گام استفاده شد. مقدار  $R^2 = 0.9982$  که تطابق خوبی با نتایج تجربی دارد. همت و همکاران [19] در مطالعه‌ای، برای اولین بار، رفتار رئولوژیکی نانو روانکارهای هیبریدی حاوی درصد مشابهی از نانو ذرات ZnO و MWCNT در سیال پایه ۵۰SAE، ۴۰SAE و ۵۰SAE به‌صورت آماری و جامع موردبررسی قرار گرفت. با افزودن نانو ذرات به روغن پایه ۵W۵۰ در کسر حجمی ۱٪ (بیشترین) و دمای ۵ درجه سانتی‌گراد، ویسکوزیته حدود ۳۰٪ افزایش یافت که بالاترین افزایش ویسکوزیته در بین نانو روانکارهای مورد مطالعه است. علاوه بر نتایج تجربی، RSM اعمال شد و یک مدل کوارتیک برای مدل‌سازی رفتار ویسکوزیته با دقت ۰/۹۹۹۶  $R =$  در قالب یک همبستگی ریاضی استفاده شد. اکبری و زارعی [20] در مطالعه‌ای، اثر دما و ویسکوزیته نانو سیال هیبریدی شامل نانولوله‌های کربنی چند جداره و اکسید منیزیم با مخلوط سیال پایه EG و آب را مورد مطالعه قرار دادند. در این مطالعه نانو سیال‌ها، با کسرهای حجمی ۰/۰۲۵، ۰/۰۵، ۰/۰۱، ۰/۰۲، ۰/۰۴، ۰/۰۶ و ۰/۰۸ درصد و در محدوده دمایی ۲۵ تا ۶۰ درجه سانتی‌گراد، تهیه گردید. با بررسی رفتار رئولوژیکی نانو سیال در برابر نرخ برشی، رفتار نیوتنی نانو سیال مشاهده شد. نتایج به‌دست‌آمده از آزمایش‌ها، افزایش ویسکوزیته دینامیکی را با افزایش کسر حجمی، نشان می‌دهد. همچنین در دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد، کسر حجمی، تأثیر زیادی بر ویسکوزیته دینامیکی نانو سیال ندارد که این موضوع به‌عنوان یک دستاورد مهم در کاربردهای صنعتی و مهندسی در نظر گرفته شد. مقدم و مطهری [21] در پژوهشی، تغییرات رئولوژیکی نانو روان کننده هیبریدی شامل نانولوله‌های کربنی چند جداره و اکسید مس را با سیال پایه روغن‌موتور ۴۰SAE، مورد بررسی قرار دادند. مطالعه مورد نظر برای بررسی ویسکوزیته در محدوده کسر حجمی ۰/۰۶۲۵ تا ۱ درصد و در دماهای ۲۵ الی ۵۰ درجه، انجام شد.

نتایج به‌دست‌آمده، نشان می‌دهد که در کسر حجمی ۱ درصد، ویسکوزیته نانو روان کننده‌های هیبریدی ۲۹/۴۷ درصد، بیشتر از ویسکوزیته روغن پایه است. همچنین مطالعات بر روی رفتار رئولوژیکی ثابت کرد که نانو روانکار و روغن خالص غیر نیوتنی هستند. علیرضایی و همکاران [22] در مطالعه‌ای به بررسی رفتار نانو سیال هیبریدی متشکل از نانولوله‌های کربنی چند جداره و اکسید منیزیم با سیال پایه روغن، پرداختند. در این مطالعه، شش کسر حجمی مختلف با درصدهای ۰/۰۶۲۵، ۰/۱۲۵، ۰/۰۲۵، ۰/۰۵، ۰/۰۷۵ و ۱ در دماهای مختلف ۲۵ تا ۵۰ درجه سانتی‌گراد و شش نرخ برش از ۶۷۰ تا ۸۷۰ مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که ویسکوزیته دینامیکی نانو سیالات با افزایش دما به‌شدت کاهش می‌یابد. همچنین نانو سیالات نسبتاً رفتار غیر نیوتنی از خود نشان می‌دهند اما این رفتار چندان چشمگیر نیست و در دماهای بالاتر این رفتار کاملاً نیوتنی می‌شود. در نتیجه، افزایش کسر حجمی باعث افزایش ویسکوزیته می‌شود. همت اسفه و همکاران [23] در مطالعه‌ای به بررسی ویژگی ترموفیزیکی و ویسکوزیته نانو سیال هیبریدی متشکل از اکسید تیتانیوم- نانولوله‌های کربنی چند جداره در سیال پایه روغن ۴۰W۱۰ در محدوده دمای ۵ تا ۵۵ سانتی‌گراد و با کسر حجمی جامد از ۰/۵ تا ۱ درصد پرداختند. داده‌های تجربی برای مدل‌سازی ویسکوزیته دینامیکی با استفاده از RSM استفاده شد. با تجزیه و تحلیل پارامترهای آماری به این نتیجه رسید که مدل مرتبه پنجم با ضریب همبستگی ۰/۹۹۹۹ بهترین عملکرد را دارد. روند تغییرات در ویسکوزیته نشان داد که افزایش دما، تأثیر زیادی بر ویسکوزیته دارد و تأثیر آن نیز بیشتر از تغییرات نرخ برش و کسر حجمی است، مقدار بهینه ویسکوزیته ۱۵۸/۱ است و در کسر حجمی ۰/۰۵ درصد، نرخ برشی  $s^{-1}$  ۱۱۹۹۶ و دمای ۱۴/۹۷ مقدار کاربردی این پارامتر ۰/۸۰۸ است. یو مینگ چو و همکاران [24] در پژوهشی، نانو سیال هیبریدی اکسید تیتانیوم- نانولوله‌های کربنی چند جداره بر پایه ۴۰W۵۰ را به‌صورت EXP مورد بررسی قرار دادند. اندازه‌گیری ویسکوزیته در دمای ۲۰ تا ۶۰ درجه سانتی‌گراد و ۰/۰۵ تا ۱ درصد حجمی با استفاده از ویسکومتر بروکفیلد<sup>۱</sup> اندازه‌گیری شد. ویسکوزیته نانو سیال با کاهش نرخ برش و همچنین دما و افزایش کسر حجمی تشدید شد. حضور نانو ذرات، ویسکوزیته نانو سیال را تا ۷۹۰ درصد تقویت کرد. همچنین ضریب پیش‌بینی همگرایی ویسکوزیته ۰/۹۹۹ بود. عبدالله بن محفوظ و همکاران [25] در تحقیقی که هدف آن استفاده از روش‌شناسی سطح پاسخ برای توسعه یک مدل پیش‌بینی برای ویسکوزیته بود از نانو سیال متشکل از نانولوله‌های کربنی و اکسید تیتانیوم در سیال پایه EG

<sup>۱</sup> CAP2000+(Brookfield, USA)

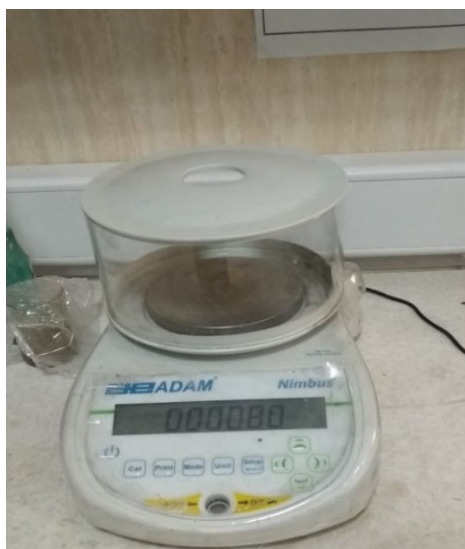
و آب استفاده کردند. این تحقیق برای کسرهای جرمی مختلف نانولوله‌ها از ۰ تا ۱ درصد و دما در محدوده ۲۵ تا ۶۵ سانتی‌گراد انجام شد. مطالعه موردی برای حداکثر کردن و به حداقل رساندن ویسکوزیته، مورد بررسی قرار گرفت. نتایج بهینه‌سازی نشان داد که شرایط بهینه برای بهینه‌سازی ویسکوزیته دارای عامل‌های ورودی کسر حجمی، دما و نرخ برش به ترتیب برابر با ۰/۶۷۵ درصد، ۲۵ سانتی‌گراد و  $(s^{-1})$  ۲۰۵ برای حداکثر ویسکوزیته ۰/۰۳۷ است. همت اسفه و همکاران [26] در مطالعه‌ای تجربی و تحلیلی، برای اولین بار به بررسی ویسکوزیته نانو سیال هیبریدی متشکل از MWCNT-ZnO با ترکیب (۱۰:۹۰) در سیال پایه ۱۰W۴۰ در کسرهای حجمی مختلف ۰/۰۵ تا ۱ درصد و دماهای ۵ تا ۵۵ درجه سانتی‌گراد پرداختند. نتایج نشان داد که افزودن نانو ذرات منجر به افزایش اصطکاک و در نتیجه مقاومت لایه‌های سیال در برابر حرکت می‌شود. برای دمای ۵ درجه سانتی‌گراد و نرخ برش  $(s^{-1})$  ۳۹۹۹، ویسکوزیته ۲۳/۵۳ درصد، افزایش یافت. همچنین برای دمای ۱۵ درجه سانتی‌گراد و نرخ برش  $(s^{-1})$  ۶۶۶۵، ویسکوزیته ۲۲/۸۹ درصد، افزایش می‌یابد. همت اسفه و همکاران [27] با ارائه مدلی مبتنی بر مدیریت دانش در مدل‌سازی و بهینه‌سازی ویسکوزیته دینامیکی ZnO-MWCNT با ترکیب (۷۰٪-۳۰٪) و سیال پایه SAE۴۰ با RSM برای مصارف صنعتی پرداختند. مطالعه ویسکوزیته در درصدهای مختلف از حجم جامد، دما و نرخ‌های برشی مورد بررسی قرار گرفت و مدل مرتبه پنجم، بهتر از سایر مدل‌ها بود. مقادیر  $R^2$ ،  $R^2$  پیش‌بینی‌شده و RSM تنظیم‌شده برای هر سه پارامتر ۰/۹۹۹۸ بود که دقت خوبی را در مدل‌سازی نشان می‌دهد. چرخه مدیریت دانش برای ارزیابی مدل برای افزایش اطمینان کافی استفاده شد. با کمک مدیریت دانش دریافتن بهترین حالت، مقدار ویسکوزیته بهینه در دمای ۱۳۱/۱۵۶ درجه سانتی‌گراد و کسر حجمی ۰/۰۶۳ درصد، برابر با ۲۰۹/۵۳ cP شد. همت اسفه و همکاران [28] در مطالعه‌ای انواع روابط همبستگی توسط مدل‌های مختلف برای پیش‌بینی ویسکوزیته دینامیکی نانو ذرات اکسید مس در EG (۸۰٪) - آب (۲۰٪) سیال پایه با استفاده از RSM روش آماری در شرایط دمایی ۱۵ تا ۵۰، کسر حجمی ۰/۰۵ تا ۱ درصد و نرخ برش  $s^{-1}$  ۲۶/۶ تا  $s^{-1}$  ۹۳۳/۱ مورد بررسی قرار گرفت. از بین این چهار مدل، مدل کوارتیک به‌عنوان مدل برتر انتخاب‌شده و برای بهینه‌سازی ویسکوزیته نانو سیال استفاده شده است. بهینه‌سازی در شرایط محیطی سرد انجام شد و متغیرهای کسر حجمی، دما، نرخ برشی و ویسکوزیته به‌عنوان حداقل مقادیر انتخاب و بر روی سیستم اعمال شد. در شرایط دمایی ۲۵/۳۰۳ درجه سانتی‌گراد، کسر حجمی ۰/۰۵ درصد و نرخ برشی  $s^{-1}$  ۲۶/۶۶، بهینه‌ترین مقدار ویسکوزیته نانو سیال ۸/۵۶۵ mPa.sec بود. همت اسفه و همکاران [29] در مطالعه‌ای با استفاده از RSM به ارزیابی رفتار

رئولوژیکی MWCNT - SiO<sub>2</sub> بر پایه SAE۴۰ و تأثیر پارامترهای مختلف بر ویسکوزیته پرداختند. این مطالعه در شرایط EXP کسر حجمی در محدوده ۰ تا ۱ درصد، دمای ۲۵ تا ۵۰ درجه سانتی‌گراد و نرخ برش  $(s^{-1})$  ۶۶۶/۵ -  $(s^{-1})$  ۹۳۳/۱ انجام شد. مدل کوارتیک به‌عنوان مدل بهینه انتخاب شد. همچنین به دلیل وابستگی ویسکوزیته به نرخ برشی، رفتار نانو سیال غیر نیوتنی است. مقادیر  $R^2$ ، Std. Dev، P-value، C.D و CV% برای مدل انتخاب‌شده به ترتیب ۰/۹۹۶۰، ۶/۶۷، ۰/۹۹۶۰، ۵۴۸۵۸۴۹۷۴، ۱۰/۲۱۸۰ - ۴. ۷۶۰ < C.D و ۸/۵۵۱ و ۳ بود.

در این مطالعه برای اولین بار نانو ذرات ZnO - MWCNT با ترکیب (۲۰-۸۰) درصد با سیال پایه ۱۰W۴۰ مورد بررسی قرار گرفت و داده‌های تجربی استخراج شد. همچنین با توجه به اهمیت پارامتر ویسکوزیته در نانو سیال، یک رابطه تجربی جدید و منحصر به فرد، جهت ارزیابی ویسکوزیته دینامیکی نانو سیال مورد نظر، برای پیش‌بینی دقیق رفتار نانو سیال تولید شد که این رابطه جدید سبب کاهش هزینه‌ها و زمان می‌شود. با استفاده نانو ذرات هیبریدی ZnO-MWCNT با نسبت (۲۰٪-۸۰٪) بر پایه روغن ۱۰W۴۰، دمای ۵ تا ۵۵ درجه سانتی‌گراد، نانو سیال در آزمایشگاه در کسر حجمی‌های ۰/۰۵، ۰/۱، ۰/۲۵، ۰/۵، ۰/۷۵، ۱ درصد تهیه گردید و مقادیر ویسکوزیته در دما و کسر حجمی و نرخ برشی‌های مختلف به دست آمد، سپس به تجزیه و تحلیل داده‌های به‌دست‌آمده در آزمایشگاه پرداخته شد. همچنین با مشخص کردن ضریب تعیین، ضریب تنظیم‌شده، ضریب پیش‌بینی و ارزیابی ضریب تغییرات، بهترین انتخاب شد. همچنین اثر پارامترها را بر روی ویسکوزیته دینامیکی مشخص و کانتورهای دو و سه‌بعدی برای مدل برتر، ارائه می‌شود.

## ۲- روش آزمایشگاهی

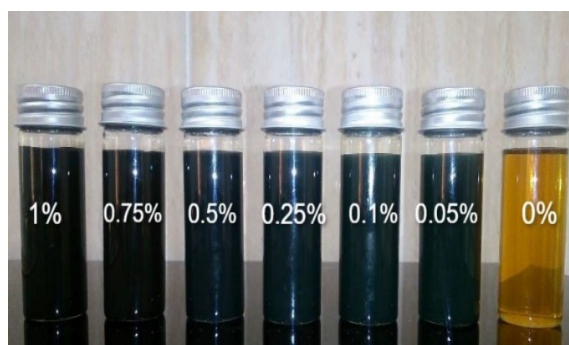
یکی از اصلی‌ترین بخش‌های هر کار تحقیقاتی، روش انجام آن است. در این تحقیق از ترازوی یک‌هزارم گرمی آدم (شکل ۳) مدل NBL-E با ساختار آزمایشگاهی و محفظه شیشه‌ای منحصر به فرد خود که مانع از عبور جریان هوا و تأثیرگذاری منفی روی سینی توزین استفاده شد، ضمن اینکه بدنه این ترازو گرمی با کیفیت‌ترین نوع پلاستیک ساخته شده و در برابر ضربه و تکان‌های شدید مقاومت بالایی دارد. ترازوی آزمایشگاهی آدم با حساسیت اندازه‌گیری ۰/۰۰۱ گرم و ظرفیت ۴۲۰ گرم به ترازوی چهار صفر هم معروف است. همچنین در گذشته برای همگن‌سازی در مصارف خانگی و حتی آزمایشگاهی از انواع هاون‌ها استفاده می‌شد. امروزه دستگاه‌های پیشرفته دیگری نیز در این زمینه به وجود آمده‌اند که سرعت، دقت و کارآمدی بالاتری دارند. یکی از تجهیزات پرکاربرد این حوزه‌ها دستگاه اولتراسونیک (شکل ۴)



شکل (۳): ترازوی دیجیتال آزمایشگاهی ADAM



شکل (۴): دستگاه اولتراسونیک برای انجام آزمایش

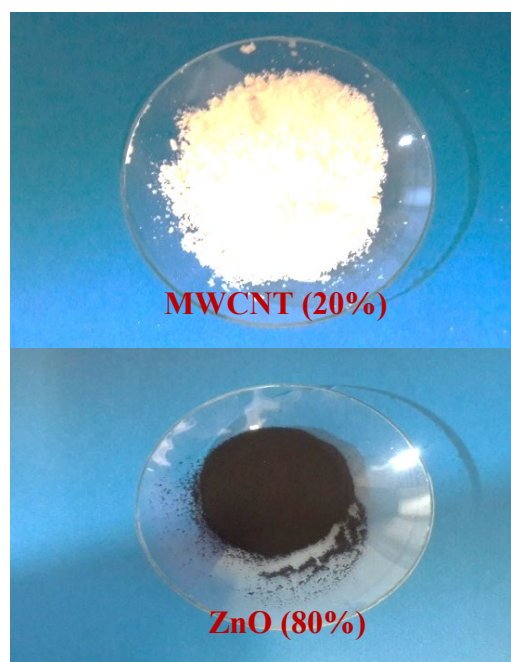


شکل (۵): نانو سیال تهیه شده

### ۳- تحلیل آماری و مدل سازی ویسکوزیته

RSM مجموعه‌ای از فن‌ها برای ارتباط بین متغیرهای مستقل متعدد و یک یا چند متغیر پاسخ است. مدل‌های ریاضی خطی، درجه دوم، چندجمله‌ای و غیره حاصل می‌شود و سپس مدل با

است. این دستگاه از جایگاه ویژه‌ای در سنتز و مشخصه یابی مواد برخوردار است. در این مطالعه برای تولید نانو سیال با نانو ذرات ZnO - MWCNT (شکل ۲) با ترکیب (۲۰-۸۰) درصد با سیال پایه ۱۰w۴۰ از روش دومرحله‌ای استفاده شد. فن دومرحله‌ای ساده‌تر و کم‌هزینه‌تر از تک‌مرحله‌ای است. در این روش، مقادیر لازم برای نانو ذرات به دستیابی به کسر حجمی موردنظر در سیال پایه پراکنده می‌شوند. اندازه و توزیع نانو ذرات در سیال پایه نقش مهمی در تعیین رفتار هیدرولیکی نانو سیال دارد. از این رو، بیشترین مسئله مهمی که در رویکرد دومرحله‌ای مدنظر قرار گرفته می‌شود حل مشکل تراکم و چسبندگی نانو ذرات است. برای این منظور، نانو سیال با استفاده از یک همزن مغناطیسی به مدت ۳ ساعت می‌چرخد، تا فرآیند تعلیق انجام شود و نانو سیال پایدار شود. نانو سیالات به مدت ۷ ساعت در معرض امواج اولتراسونیک قرار می‌گیرد [30].



شکل (۲): تصاویر نانوذره‌های ZnO - MWCNT

با توجه به درصد جرمی موردنیاز، نانو ذرات آهسته در سیال پایه ریخته شده و به وسیله همزن به‌طور هم‌زمان مخلوط شدند. سپس مدت کوتاهی سوسپانسیون را ساکن گذاشته و بعد در داخل همزنایزر اولتراسونیک قرار گرفت و محلول برای مدت سی دقیقه داخل دستگاه همزنایزر اولتراسونیک قرار داده شد. تا از کلوخه‌ای شدن نانو ذرات جلوگیری شود و ته‌نشینی نانو ذرات در نانو سیال به حداقل برسد. شکل ۵ تصاویر نانو سیال تهیه شده در آزمایشگاه را در کسر حجمی‌های مختلف را نشان می‌دهد.

استفاده از آمار ریاضی تأیید می‌شود. همچنین می‌توان از مدل پیوند برای بهینه‌سازی و پیش‌بینی استفاده کرد [31]. فن مدل‌سازی را می‌توان به پنج قسمت تقسیم کرد: الف) تعریف ب) طراحی ج) اجرای آزمایش د) تناسب و تشخیص ه) تأیید مدل.

#### ۴- روش سطح پاسخ (RSM)

##### ۴-۱- داده‌های ورودی و خروجی

در ابتدای کار با استفاده از نرم‌افزار دیزاین اکسپرت، داده‌هایی را به عنوان ورودی نرم‌افزار و همچنین داده‌ای دیگر را به عنوان پاسخ یا خروجی در نظر گرفته شد. مشخصات پارامترهای EXP شامل، شش کسر حجمی ۰/۰۵، ۰/۱، ۰/۲۵، ۰/۵، ۰/۷۵ و ۱ درصد، دما از ۵ تا ۵۵ درجه سانتی‌گراد و نرخ برشی از  $666/5 \text{ (s}^{-1}\text{)}$  تا  $666/5 \text{ (s}^{-1}\text{)}$  استفاده از RSM به تحلیل ویسکوزیته دینامیکی به عنوان پاسخ خروجی برای مدل‌سازی ویسکوزیته پرداخته شد.

##### ۴-۲- تحلیل اولیه مدل‌های RSM

با استفاده از نرم‌افزار Design Expert، داده‌های EXP را بر اساس مدل‌های مختلف مورد ارزیابی قرار گرفت. این مدل‌ها شامل خطی، ۲FI، درجه دوم، درجه سوم و درجه چهارم است و همچنین عامل‌های مورد بررسی این مدل‌ها شامل  $R^2$ ، Adjusted  $R^2$ ، Predicted  $R^2$ ، CV، Std Dev هستند که هر کدام به ترتیب بیانگر ضریب تعیین، ضریب تنظیم‌شده، ضریب پیش‌بینی، ضریب ارزیابی و انحراف استاندارد می‌باشند (جدول ۱). در مواقعی که آزمایش‌هایی صورت می‌گیرد و قرار است داده‌ها ارائه گردد چندین روش برای نشان دادن و ارائه داده‌ها وجود دارد. می‌توان داده‌ها را در جدولی فهرست نمود یا نموداری از داده‌ها رسم کرد یا اینکه رابطه‌ای برای داده‌ها ارائه نمود. در زیر رابطه‌های ارائه‌شده توسط نرم‌افزار دیزاین اکسپرت، با توجه به داده‌های تجربی موجود طراحی و تولیدشده است. در رابطه ویسکوزیته دینامیکی نانو سیال هیبریدی ارائه‌شده، کسر حجمی ( $\phi$ )، دما (T) بر حسب درجه سانتی‌گراد، نرخ برشی می‌باشند. رابطه همبستگی مدل‌های مورد نظر در جدول ۲ ارائه شده است.

##### ۴-۳- مقایسه مهم‌ترین عامل‌ها

##### ۴-۳-۱- ضریب $R^2$

ضریب تعیین که به آن ضریب تشخیص نیز گفته می‌شود و تقریباً همه‌جا با علامت  $R^2$  نمایش داده می‌شود، معروف‌ترین معیار سنجش نیکویی برازش مدل است و همچنین رایج‌ترین مقایسه مورد استفاده برای ارزیابی مدل ساختاری است. این ضریب دقت پیش‌بینی مدل است؛ یعنی توان دوم ضریب همبستگی بین مقادیر واقعی متغیر وابسته و مقادیر برآورد شده حاصل از مدل

بنا بر تعریف، ضریب همبستگی می‌بایست بین ۱- و ۱ قرار گیرد. در نتیجه  $R^2$  که توان دوم آن است بین صفر و یک قرار خواهد داشت. اگر این همبستگی زیاد باشد، مدل داده‌ها را خوب برازش کرده است، درحالی‌که اگر همبستگی پایین (نزدیک به صفر) باشد، مدل برازش خوبی از داده‌ها ارائه نداده است. در تعریفی دیگر از ضریب تعیین، می‌توان گفت که میزان ارتباط خطی بین دو متغیر را اندازه‌گیری می‌کند. محدوده ضریب تعیین بین ۰ و ۱ است که به ترتیب نشان‌دهنده بی‌اثر بودن عامل‌های ورودی به سیستم و تأثیر متغیرهای ورودی بر متغیر پاسخ است. با توجه به جدول ۱ و شکل ۶، مقدار  $R^2$  مدل مرتبه چهارم برابر با ۰/۹۹۹۴ است که پیش‌بینی رفتار رئولوژیکی نانو سیال هیبریدی مورد مطالعه نسبت به دیگر مدل‌های، بهتر است.

##### ۴-۳-۲- ضریب تنظیم‌شده

درصد نشان داده‌شده توسط ضریب تعیین، تأثیر همه متغیرهای مستقل بر متغیر وابسته است؛ اما در ضریب تنظیم‌شده، درصد نشان داده‌شده فقط حاصل از تأثیر واقعی متغیرهای مستقل مدل بر وابسته است و نه همه متغیرهای مستقل. تفاوت دیگر این است که مناسب بودن متغیرها برای مدل توسط ضریب تعیین حتی با وجود مقدار بالا، قابل تشخیص نیست در صورتی‌که می‌توان به مقدار برآورد شده توسط ضریب تنظیم‌شده، اعتماد کرد و این ضریب به صورت معادله ۱ قابل محاسبه است. در شکل ۷، مقدار ضریب تنظیم‌شده مدل Quartic برابر ۰/۹۹۹۳ است که بیشترین مقدار در بین مدل‌های مختلف است.

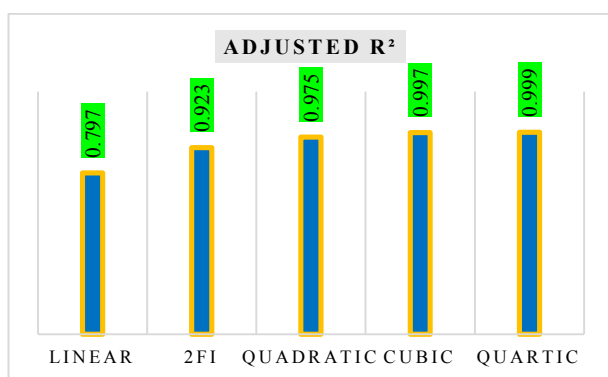
$$\text{Adj. } R^2 = 1 - \left[ \frac{\left( \frac{SS_{\text{residual}}}{df_{\text{residual}}} \right)}{\left( \frac{SS_{\text{residual}} + SS_{\text{mod el}}}{df_{\text{residual}} + df_{\text{mod el}}} \right)} \right] = 1 - \left[ \frac{\left( \frac{SS_{\text{residual}}}{df_{\text{residual}}} \right)}{\left( \frac{SS_{\text{total}} - SS_{\text{curvature}} - SS_{\text{block}}}{df_{\text{total}} - df_{\text{curvature}} - df_{\text{block}}} \right)} \right] \quad (1)$$

##### ۴-۳-۴- ارزیابی ضریب تغییرات

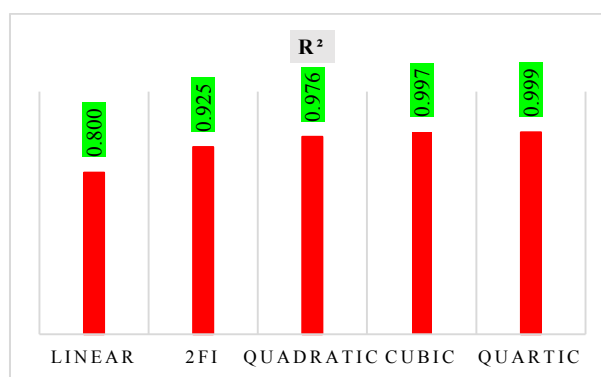
برای مقایسه پراکندگی دو یا چند متغیر از ضریب تغییرات استفاده می‌شود. این شاخص یکی از عامل‌های آماری برای ارزیابی کیفیت مدل است. همچنین کاربرد اصلی ضریب تغییرات، مقایسه متغیرهایی است که واحدهای اندازه‌گیری متفاوتی دارند. C.V، میزان پراکندگی در واحد میانگین را بیان می‌کند. شکل ۹ محدوده C.V را برای مدل‌های مختلف نشان می‌دهد. مطابق شکل ۹، مدل چهارم با ضریب تغییرات ۰/۳٪ در مقایسه با سایر مدل‌ها از دقت بیشتری برخوردار است.

جدول (۱): عامل‌های مهم مدل‌های مختلف

| Quartic | Cubic | Quadratic | 2FI   | Linear | مدل                      |
|---------|-------|-----------|-------|--------|--------------------------|
| ۰,۹۹۹۴  | ۰,۹۹۷ | ۰,۹۷۶     | ۰,۹۲۵ | ۰,۸۰۰  | R <sup>2</sup>           |
| ۰,۹۹۹۳  | ۰,۹۹۷ | ۰,۹۷۵     | ۰,۹۲۳ | ۰,۷۹۷  | Adjusted R <sup>2</sup>  |
| ۰,۹۹۹۱  | ۰,۹۹۶ | ۰,۹۷۴     | ۰,۹۱۹ | ۰,۷۹۱  | Predicted R <sup>2</sup> |
| ۲,۴۶    | ۴,۷۱  | ۱۴,۰۶     | ۲۴,۸۷ | ۴۰,۵۰  | CV%                      |
| ۴,۵۷    | ۸,۷۵  | ۲۶,۱۱     | ۴۶,۱۹ | ۷۵,۲۲  | Std. Dev.                |



شکل (۷): ضریب تنظیم‌شده

شکل (۶): مقدار ضریب R<sup>2</sup>

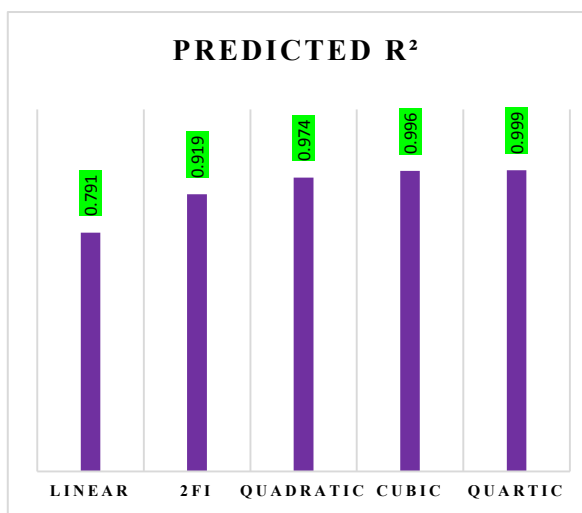
جدول (۲): رابطه همبستگی مدل‌های مختلف

| مدل‌های مختلف روش سطح پاسخ                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |     |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Linear                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |     |
| Viscosity= +451.99408+41.83173 $\varphi$ -8.50014T -0.044894 $\dot{\gamma}$                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | (۱) |
| 2FI                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |     |
| Viscosity= +625.57986 +91.08411 $\varphi$ -14.46375T -0.672631 $\dot{\gamma}$ -1.77640 $\varphi * T$ +0.033267 $\varphi * \dot{\gamma}$ +0.017454T * $\dot{\gamma}$                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | (۲) |
| Quadratic                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |     |
| Viscosity= +634.77328 +124.87433 $\varphi$ -23.51617T -0.229172 $\dot{\gamma}$ 2.11017 $\varphi * T$ +0.000247 $\varphi * \dot{\gamma}$ +0.005484T * $\dot{\gamma}$ -16.26635 $\varphi^2$ +0.230361T <sup>2</sup> -0.000060 $\dot{\gamma}^2$                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | (۳) |
| Cubic                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |     |
| Viscosity= +727.48822 +209.09248 $\varphi$ -36.68204T -0.545953 $\dot{\gamma}$ -7.60109 $\varphi * T$ +0.025749 $\varphi * \dot{\gamma}$ +0.015422T * $\dot{\gamma}$ -55.47285 $\varphi^2$ +0.736958T <sup>2</sup> +0.000380 $\dot{\gamma}^2$ +0.000898 $\varphi * T * \dot{\gamma}$ +1.33683 $\varphi^2 * T$ -0.053040 $\varphi^2 * \dot{\gamma}$ +0.062603 $\varphi * T^2$ -0.000022 $\varphi * \dot{\gamma}^2$ -0.000056T <sup>2</sup> * $\dot{\gamma}$ -0.000012 T * $\dot{\gamma}^2$ +12.30636 $\varphi^3$ -0.005538T <sup>3</sup> +1.34035 * ۱۰ <sup>-7</sup> $\dot{\gamma}^3$                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             | (۴) |
| Quartic                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |     |
| viscosity= +779.28530 +341.45400 $\varphi$ -45.33549T -0.948521 $\dot{\gamma}$ -12.57255 $\varphi * T$ -0.001745 $\varphi * \dot{\gamma}$ +0.031430 T * $\dot{\gamma}$ -570.64623 $\varphi^2$ +1.27229T <sup>2</sup> +0.001614 $\dot{\gamma}^2$ -0.003184 $\varphi * T * \dot{\gamma}$ +1.97845 $\varphi^2 * T$ +0.126825 $\varphi^2 * \dot{\gamma}$ +0.268575 $\varphi * T^2$ -0.000023 $\varphi * \dot{\gamma}^2$ -0.000195T <sup>2</sup> * $\dot{\gamma}$ -0.000050 T * $\dot{\gamma}^2$ +808.29168 $\varphi^3$ -0.019146T <sup>3</sup> -6. * ۱۰ <sup>-7</sup> $\dot{\gamma}^3$ -0.046258 $\varphi^2 * T^2$ +0.001878 $\varphi^2 * T * \dot{\gamma}$ +0.000018 $\varphi^2 * \dot{\gamma}^2$ +0.000076 $\varphi * T^2 * \dot{\gamma}$ -3.07798 * ۱۰ <sup>-06</sup> $\varphi * T * \dot{\gamma}^2$ -2.09431 * ۱۰ <sup>-07</sup> T <sup>2</sup> * $\dot{\gamma}^2$ +0.765398 $\varphi^3 * T$ -0.151524 $\varphi^3 * \dot{\gamma}$ -0.002067 $\varphi * T^3$ +7.51026 * ۱۰ <sup>-08</sup> $\varphi * \dot{\gamma}^3$ +2.72426 * ۱۰ <sup>-06</sup> T <sup>3</sup> * $\dot{\gamma}$ +4.93000 * ۱۰ <sup>-08</sup> T * $\dot{\gamma}^3$ -388.13164 $\varphi^4$ +0.000111 T <sup>4</sup> -7.98757 * ۱۰ <sup>-10</sup> $\dot{\gamma}^4$ | (۵) |

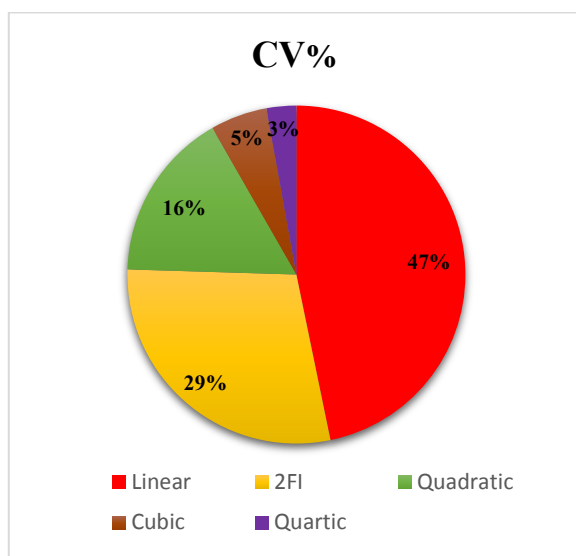
## ۴-۳-۳- ضریب پیش‌بینی

هرچه مقدار ضریب پیش‌بینی، بالاتر و نزدیک یک باشد مدل انتخابی بهتر است. در شکل ۸ ضریب پیش‌بینی مدل‌های مختلف نشان داده شده است که مقدار ضریب موردنظر برای مدل مرتبه چهارم ۰/۹۹۹۱ است که به عدد ۱ نزدیک‌تر است و همچنین این ضریب طبق معادله ۲ محاسبه می‌شود.

$$\text{Pred. } R^2 = 1 - \left[ \frac{\text{PRESS}}{\text{SS}_{\text{residual}} + \text{SS}_{\text{mod el}}} \right] = 1 - \left[ \frac{\text{PRESS}}{\text{SS}_{\text{total}} - \text{SS}_{\text{curvature}} - \text{SS}_{\text{block}}} \right] \quad (2)$$



شکل (۸): ضریب پیش‌بینی

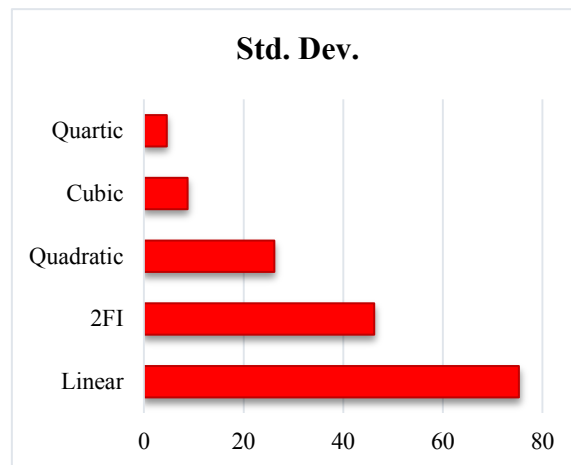


شکل (۹): ارزیابی ضریب تغییرات مدل‌های مختلف

## ۵-۳-۴- انحراف استاندارد

شاخص انحراف معیار، میزان تغییرات یا پراکندگی مجموعه‌ای از داده‌ها را نشان می‌دهد. اگر مقادیر Std. Dev کم باشد، به معنی

این است که مقادیر، تمایل به گسترش در محدوده مقدار میانگین دارند و همچنین دامنه تغییرات کوچک است. شکل ۱۰ انحراف معیار را برای پنج مدل مختلف، نشان می‌دهد. در مدل کوارتیک، Std. Dev نسبت به مدل‌های دیگر کمتر و برابر ۴/۵۷ درصد است.



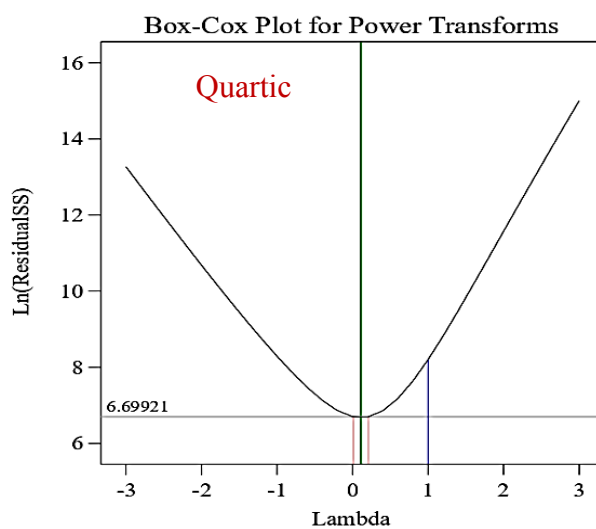
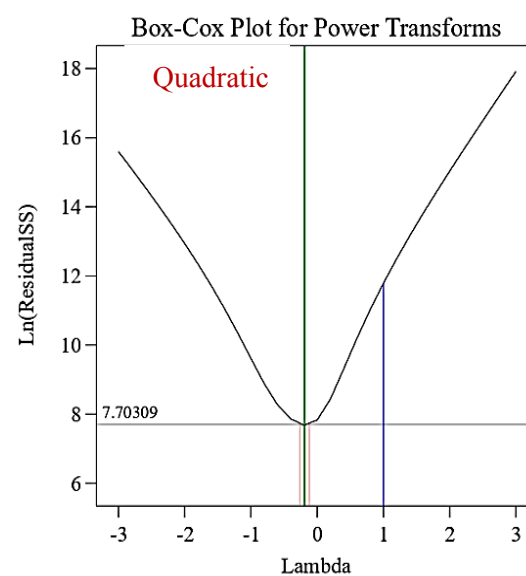
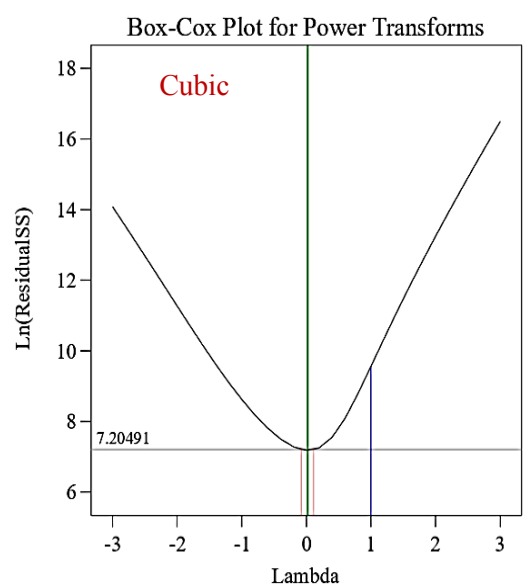
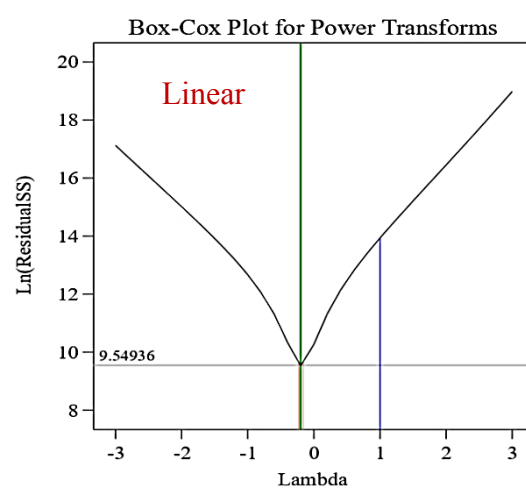
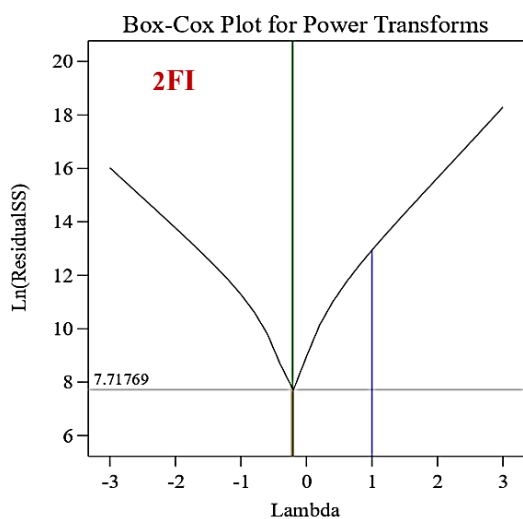
شکل (۱۰): انحراف استاندارد مدل‌های مختلف

## ۶-۳-۴- نمودارهای Box-Cox

در تجزیه و تحلیل طرح باکس - کاکس، مقدار لامبدا برابر با ۱ نشان‌دهنده تناسب خوب با داده‌های اصلی است. هدف از استفاده از نمودارهای Box-Cox، تبدیل توزیع داده‌ها به توزیع نرمال است. این نمودارها دستورالعمل‌هایی را برای انتخاب تابع انتقال صحیح ارائه می‌دهند. تابع انتقال بهینه بر اساس بهترین مقدار لامبدا که در پایین‌ترین نقطه منحنی قرار دارد پیشنهاد می‌شود. اگر فاصله اطمینان ۹۵٪ پیرامون این لامبدا شامل ۱ باشد نرم‌افزار هیچ تغییری را توصیه نمی‌کند. همان‌طور که در شکل ۱۱ نشان داده شده است، نمودار مدل مرتبه چهارم، رفتار بهتری را نشان می‌دهد و خط لامبدا، بیشتر در پایین منحنی قرار دارد.

## ۵- انتخاب مدل برتر

مقایسه عامل‌های  $R^2$ ،  $\text{Adjusted } R^2$ ،  $\text{Predicted } R^2$ ،  $\text{CV}\%$ ، Std. Dev و Box-Cox برای هر کدام از مدل‌های خطی، ۲FI، درجه دوم، درجه سوم و درجه چهارم صورت گرفت. نتایج نشان داد که مدل مرتبه چهارم بر اساس معیارهای اعتبارسنجی، دقت بیشتری نسبت به مدل‌های دیگر دارد. در جداول ۳ و ۴، جزئیات کامل ANOVA برای مدل Quartic گزارش شده است. با توجه به ANOVA در جدول ۳، هرچه مقدار p-value کمتر باشد، مدل از وضعیت مطلوب‌تری برخوردار است. در این آزمون، دما و کسر حجمی از اهمیت قابل‌توجهی برخوردار هستند.



شکل (۱۱): نمودارهای Box-Cox مدل‌های مختلف

جدول (۳): ANOVA برای مدل انتخاب‌شده

|         | p-value | F-value | Mean Square | df  | مجموع مربعات | Source                        |
|---------|---------|---------|-------------|-----|--------------|-------------------------------|
| معنادار | ۰/۰۰۰۱< | ۷۸۹۳/۸۳ | 1.651E+05   | ۳۴  | ۵/۶۱۵+۰۰۶E   | Model                         |
|         | ۰/۰۰۰۱< | ۶۶/۲۱   | ۱۳۸۵/۰۳     | ۱   | ۱۳۸۵/۰۳      | A-phi                         |
|         | ۰/۰۰۰۱< | ۱۵۹۱/۲۴ | ۳۳۲۸۸/۵۶    | ۱   | ۳۳۲۸۸/۵۶     | B-Temp                        |
|         | ۰/۲۲۵   | ۱/۳۲    | ۲۷/۶۶       | ۱   | ۲۷/۶۶        | C-shear rate                  |
|         | ۰/۰۰۰۱< | ۱۶/۸۲   | ۳۵۱/۸۶      | ۱   | ۳۵۱/۸۶       | AB                            |
|         | ۰/۹۹۵   | ۰/۰۰۰   | ۰/۰۰۰۸      | ۱   | ۰/۰۰۰۸       | AC                            |
|         | ۰/۸۸۰   | ۰/۰۵۹   | ۱/۲۴        | ۱   | ۱/۲۴         | BC                            |
|         | ۰/۰۰۰۱< | ۲۸/۴۶   | ۵۹۵/۴۰      | ۱   | ۵۹۵/۴۰       | A <sup>2</sup>                |
|         | ۰/۰۰۰۱< | ۲۸۶/۸۴  | ۶۰۰۰/۶۸     | ۱   | ۶۰۰۰/۶۸      | B <sup>2</sup>                |
|         | ۰/۴۶۷   | ۰/۵۳۱   | ۱۱/۱۲       | ۱   | ۱۱/۱۲        | C <sup>2</sup>                |
|         | ۰/۸۶۷   | ۰/۰۳۰   | ۰/۶۲۷       | ۱   | ۰/۶۲۷۲       | ABC                           |
|         | ۰/۰۰۶   | ۷/۶۳    | ۱۵۹/۵۶      | ۱   | ۱۵۹/۵۶       | A <sup>2</sup> B              |
|         | ۰/۵۰۷   | ۰/۴۴۲   | ۹/۲۵        | ۱   | ۹/۲۵         | A <sup>2</sup> C              |
|         | ۰/۰۰۰۱< | ۳۵/۸۹   | ۷۵۰/۷۵      | ۱   | ۷۵۰/۷۵       | AB <sup>2</sup>               |
|         | ۰/۹۲۸   | ۰/۰۰۸   | ۰/۱۷۰       | ۱   | ۰/۱۷         | AC <sup>2</sup>               |
|         | ۰/۲۹۴   | ۱/۱۱    | ۲۳/۱۷       | ۱   | ۲۳/۱۷        | B <sup>2</sup> C              |
|         | ۰/۵۴۶   | ۰/۳۶۶   | ۷/۶۶        | ۱   | ۷/۶۶         | BC <sup>2</sup>               |
|         | ۰/۲۹۴   | ۱/۱۱    | ۲۳/۱۸       | ۱   | ۲۳/۱۸        | A <sup>3</sup>                |
|         | ۰/۰۰۰۱< | ۱۲۲/۵۴  | ۲۵۶۳/۴۷     | ۱   | ۲۵۶۳/۴۷      | B <sup>3</sup>                |
|         | ۰/۰۳۱   | ۴/۶۹    | ۹۸/۱۴       | ۱   | ۹۸/۱۴        | C <sup>3</sup>                |
|         | ۰/۰۹۹   | ۲/۷۵    | ۵۷/۴۶       | ۱   | ۵۷/۴۶        | A <sup>2</sup> B <sup>2</sup> |
|         | ۰/۶۲۷   | ۰/۲۳۶   | ۴/۹۴        | ۱   | ۴/۹۴         | A <sup>2</sup> BC             |
|         | ۰/۹۲۸   | ۰/۰۰۸   | ۰/۱۷۰       | ۱   | ۰/۱۶۹        | A <sup>2</sup> C <sup>2</sup> |
|         | ۰/۵۱۹   | ۰/۴۱۷   | ۸/۷۲        | ۱   | ۸/۷۲         | AB <sup>2</sup> C             |
|         | ۰/۷۷۴   | ۰/۰۸۲   | ۱/۷۳        | ۱   | ۱/۷۳         | ABC <sup>2</sup>              |
|         | ۰/۷۲۷   | ۰/۱۲۲   | ۲/۵۶        | ۱   | ۲/۵۶         | B <sup>2</sup> C <sup>2</sup> |
|         | ۰/۹۵۳   | ۰/۳۷۷   | ۷/۹۰        | ۱   | ۷/۹۰         | A <sup>3</sup> B              |
|         | ۰/۴۱۴   | ۲/۱۶    | ۴۵/۱۴       | ۱   | ۴۵/۱۴        | A <sup>3</sup> C              |
|         | ۰/۰۰۲   | ۹/۷۳    | ۲۰۳/۵۴      | ۱   | ۲۰۳/۵۴       | AB <sup>3</sup>               |
|         | ۰/۸۵۵   | ۰/۰۳۳   | ۰/۶۹۹       | ۱   | ۰/۶۹۹        | AC <sup>3</sup>               |
|         | ۰/۶۰۰   | ۰/۲۷۶   | ۵/۷۸        | ۱   | ۵/۷۸         | B <sup>3</sup> C              |
|         | ۰/۵۱۸   | ۱/۷۷    | ۳۷/۱۱       | ۱   | ۳۷/۱۱        | BC <sup>3</sup>               |
|         | ۰/۰۰۰۱< | ۴۱/۰۱   | ۸۵۷/۹۶      | ۱   | ۸۵۷/۹۶       | A□                            |
|         | ۰/۰۰۰۱< | ۲۳/۵۷   | ۴۹۳/۱۷      | ۱   | ۴۹۳/۱۷       | B□                            |
|         | ۰/۴۰۹   | ۰/۶۸۵   | ۱۴/۳۳       | ۱   | ۱۴/۳۳        | C□                            |
|         |         |         | ۲۰/۹۲       | ۱۶۷ | ۳۴۹۳/۶۲      | Residual                      |
|         |         |         |             | ۲۰۱ | 5.618E+06    | Cor Total                     |

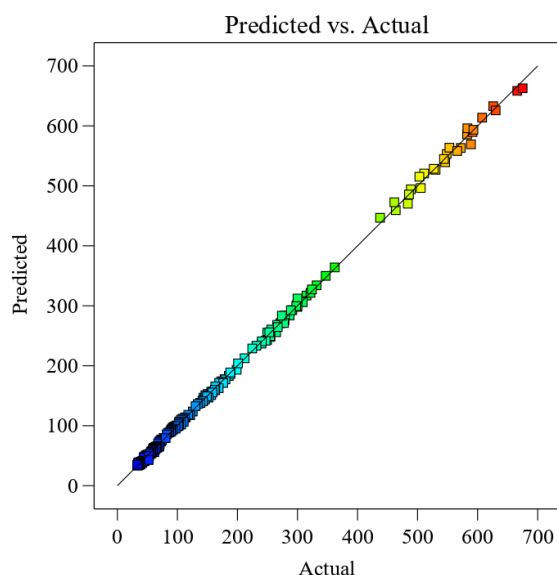
جدول (۴): مقادیر آماری مدل درجه چهارم

|         |                          |         |                   |
|---------|--------------------------|---------|-------------------|
| ۰/۹۹۹۴  | R <sup>2</sup>           | ۴/۵۷    | Std. Dev.         |
| ۰/۹۹۹۳  | Adjusted R <sup>2</sup>  | ۱۸۵/۷۲  | Mean              |
| ۰/۹۹۹۱  | Predicted R <sup>2</sup> | ۲/۴۶    | C.V. %            |
| ۳۳۱/۰۰۴ | Adeq Precision           | ۵۳۱۱/۱۱ | PRESS             |
| ۱۳۳۴/۸۳ | BIC                      | ۱۱۴۹/۰۴ | -2 Log Likelihood |
|         |                          | ۱۲۳۴/۲۲ | AICc              |

خط نیمساز باشد، و انحراف از خط کمتر باشد. مطابق شکل همبستگی، مدل مرتبه چهار، دقت بالایی را نشان داد و میزان Std. Dev آن ۴/۵۷ است.

### ۳-۶- توزیع نرمال مانده‌ها برای پاسخ ویسکوزیته

هر چه انحراف داده‌ها در یک مدل کمتر باشد، مدل دقت بالاتری دارد. حتی با وجود داده‌های تجربی، می‌توان گفت که برخی پراکنش‌های متوسط وجود دارد. با توجه به نمودار شکل ۱۴ توزیع نرمال مانده‌ها برای پاسخ ویسکوزیته، از نظم خوبی برخوردار هستند. در واقع می‌توان گفت که باقیمانده‌ها از یک خط مستقیم پیروی می‌کنند که نشان‌دهنده آن است که از توزیع احتمال نرمال پیروی می‌کنند.



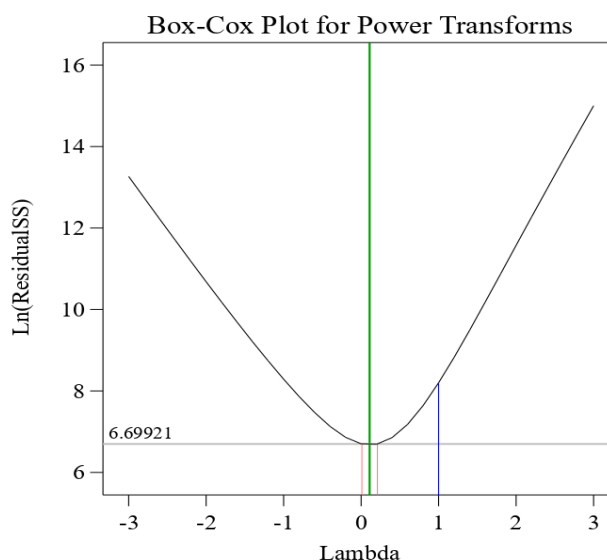
شکل (۱۳): نمودار وضعیت مقادیر پیش‌بینی شده مدل با مقادیر EXP ویسکوزیته

### ۱-۶- باکس - کاکس برای مدل برتر

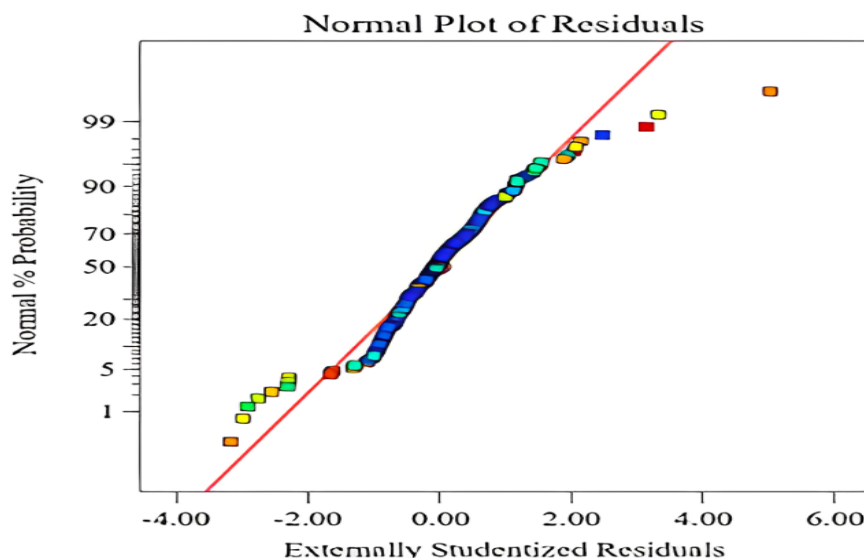
نمودار Box-Cox برای مدل مرتبه چهارم در شکل ۱۲ نشان داده شده است. در نمودار باکس - کاکس یک تابع انتقال بر اساس بهترین مقدار لامبدا پیشنهاد شده است. در شکل ۱۲ لامبدا یک و بیشتر خط در قسمت پایین قرار دارد؛ بنابراین مدل کوارتیک رفتار خوبی را از خود نشان می‌دهد.

### ۲-۶- وضعیت مقادیر پیش‌بینی شده مدل با مقادیر آزمایشگاهی ویسکوزیته

در شکل ۱۳، نمودار همبستگی مقادیر ویسکوزیته پیش‌بینی شده در مقایسه با مقادیر واقعی برای مدل‌های مختلف ارائه شده است. معیار ارزیابی مدل‌های بهتر در نمودار نیمساز این است که داده‌های یک مدل بیشتر روی



شکل (۱۲): نمودار باکس - کاکس برای مدل مرتبه چهارم

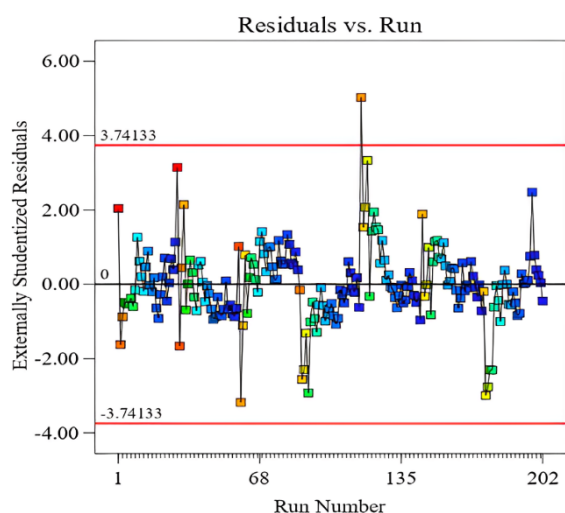


شکل (۱۴): نمودار توزیع نرمال مانده‌ها برای پاسخ ویسکوزیته مدل چهارم

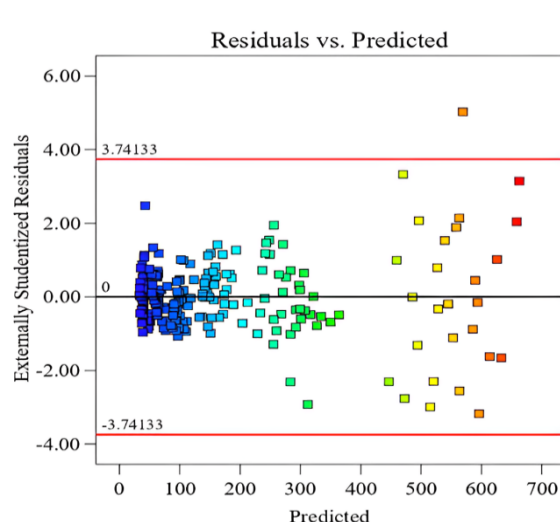
نمودار مانده استیودنتیده برای پاسخ ویسکوزیته، نشان‌دهنده مقدار انحراف برای شناسایی آسان‌تر نقاط غیرطبیعی است و حدود کنترل نیز به شکل دو خط قرمز آورده شده است. با توجه به نمودار شکل ۱۶، مقدار انحراف معیار داده‌های EXP از مقدار پیش‌بینی شده در محدوده مجاز قرار دارد.

#### ۴-۶- مقادیر آزمایشگاهی در مقابل مقادیر پیش‌بینی شده مدل پاسخ ویسکوزیته

در این نمودار مقادیر مانده‌ها را در مقابل مقادیر پیش‌بینی شده، به صورت یک گراف نشان داده و فرض واریانس ثابت را ارزیابی می‌کند. شکل ۱۵ نشان می‌دهد که مقادیر باقی‌مانده در محدوده  $\pm 3/74$  قرار دارند که مناسب است.



شکل (۱۶): نمودار مانده استیودنتیده بیرونی برای مدل مرتبه چهارم



شکل (۱۵): نمودار مقادیر EXP در مقابل مقادیر پیش‌بینی مدل برای مرتبه چهارم

#### ۶-۶- اغتشاش ویسکوزیته

نمودار اغتشاش، تأثیر پارامترهای مختلف را در اطراف یک نقطه خاص مقایسه می‌کند. معیار اندازه‌گیری تأثیر، شیب خط است و هر چه شیب یک پارامتر بیشتر باشد اثر آن پارامتر بر روی متغیر

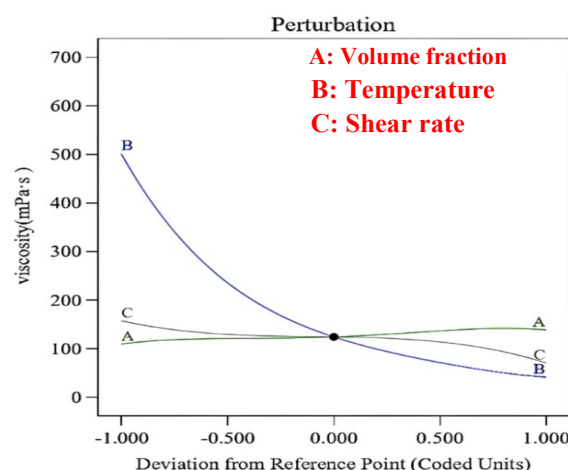
#### ۵-۶- مانده استیودنتیده بیرونی برای پاسخ ویسکوزیته

در شکل ۱۸، وضعیت سه مؤلفه کسر حجمی، دما و نرخ برشی نسبت به ویسکوزیته نمایش داده شده است. در این شکل، ویسکوزیته برای نرخ برشی  $475 \text{ (1/s)}$  به صورت گراف‌های سه‌بعدی و کانتور خروجی RSM نمایش داده شده است.

## ۷- نتیجه‌گیری

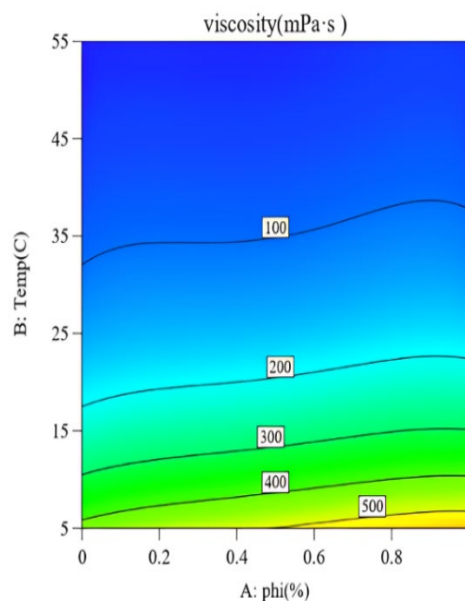
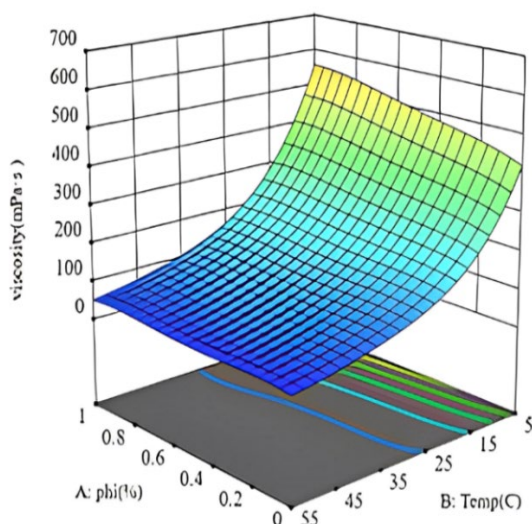
در این پژوهش به بررسی ویسکوزیته نانو سیال ZnO-MWCNT با نسبت (۲۰-۸۰) بر پایه روغن  $10W40$  در دمای ۵ تا ۵۵ درجه سانتی‌گراد و کسر حجمی ۰/۵ تا ۱ درصد پرداخته شد. با استفاده از روش تحلیلی RSM، مدل‌سازی ویسکوزیته دینامیکی مدل‌های مختلف، مورد ارزیابی قرار گرفت. این مدل‌ها شامل خطی،  $2FI$ ، درجه دوم، درجه سوم و درجه چهارم است. در این بررسی، عامل‌های مختلف شامل  $R^2$ ، Adjusted  $R^2$ ، Predicted  $R^2$ ، CV%، Std. Dev مورد بررسی قرار گرفت. بهترین مدل، مدل مرتبه چهارم انتخاب شد که مقدار عامل‌های مهم آن به ترتیب  $0.9993$ ،  $0.9994$ ،  $0.9991$ ،  $0.46$  و  $4.57$  است. در تحلیل و بررسی نمودار اغتشاش، تأثیر پارامترهای مختلف در اطراف یک نقطه خاص مشخص شد و معیار اندازه‌گیری، شیب‌خط است. نمودار اغتشاش ویسکوزیته، نشان می‌دهد که در مدل انتخاب‌شده، پارامتر دما بیشترین شیب و خطی که کسر حجمی را نشان می‌دهد، کمترین شیب را دارد؛ بنابراین پارامترهای دما و کسر حجمی به ترتیب بیشترین و کمترین تأثیر را بر ویسکوزیته نانو سیال هیبریدی دارند.

پاسخ، بیشتر است و هرچه شیب‌خط پارامترها کمتر باشد تأثیر آن پارامتر بر روی متغیر پاسخ، کمتر است. شکل ۱۷، نمودار اغتشاش ویسکوزیته را نشان می‌دهد. در مدل انتخاب شده در شکل موردنظر، خط B، پارامتر دما را نشان می‌دهد که بیشترین شیب را دارد و خط A پارامتر کسر حجمی را نشان می‌دهد و کمترین شیب را دارد؛ بنابراین، پارامترهای دما و کسر حجمی به ترتیب بیشترین و کمترین تأثیر را بر ویسکوزیته نانو سیال هیبریدی دارند.



شکل (۱۷): نمودار اغتشاش ویسکوزیته برای مدل انتخاب شده

## ۷-۶- کانتور دوبعدی و سه‌بعدی نتایج خروجی مدل ویسکوزیته دینامیکی



شکل (۱۸): پاسخ خروجی مدل ویسکوزیته دینامیکی RSM به صورت کانتور دو و سه‌بعدی برای مدل مرتبه چهارم

## ۸- فهرست علائم و اختصارات

| علائم یونانی             | دما، °C        | T   |
|--------------------------|----------------|-----|
| چگالی، kg/m <sup>3</sup> | روش سطح پاسخ   | RSM |
| نرخ برشی                 | ضریب تغییرات   | CV  |
| کسر حجمی                 | انحراف همبستگی | CD  |
|                          | نانومتر        | nm  |
|                          | اتیلن گلیکول   | EG  |
|                          | آزمایشگاهی     | EXP |

## ۹-مراجع

- [1] Pordanjani, A.H., et al., An updated review on application of nanofluids in heat exchangers for saving energy. *Energy Convers. Manage.*, 2019. 198: p. 111886. Doi: 10.1016/j.enconman.2019.111886
- [2] shakiba, A., karami zarandi, O., & vahedi, K. (2018). Numerical Investigation of the Effect of Adding Nanoparticles to Helicopter Motor Oil. *Fluid Mechanics & Aerodynamics Journal*, 7(1), 49-64. DOR: 20.1001.1.23223278.1397.7.1.5.9
- [3] Hemat asfe, M., & abasian arani, A. A. (2017). Experimental Study of Rheological Behavior of MgO-MWCNT/5W-50 Hybrid Nanofluid: Proposing a New Three-variable Correlation. *Fluid Mechanics & Aerodynamics Journal*, 6(2), 15-26. DOR: https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.23223278.1396.6.2.2.1(in Persian).
- [4] Mehta, B., et al., Synthesis, stability, thermophysical properties and heat transfer applications of nanofluid-A review. *J. Mol. Liq.*, 2022: p. 120034. Doi: 10.1016/j.molliq.2022.120034
- [5] Chakraborty, S. and P.K. Panigrahi, Stability of nanofluid: A review. *Appl. Therm. Eng.*, 2020. 174: p. 115259. Doi: 10.1016/j.applthermaleng.2020.115259
- [6] Guerra, A., et al., Non-Einsteinian viscosity reduction in boron nitride nanotube nanofluids. *J. Mol. Liq.*, 2024. 393: p. 123531. Doi: 10.1016/j.molliq.2023.123531
- [7] Hemmat Esfe, M., & Motallebi, S. M. (2022). Experimental Study of the Effect of Effective Parameters on the Thermal Conductivity of a Five-component Hybrid Nanofluid. *AEROSPACE MECHANICS JOURNAL*, 18(3), 141-154. DOR: https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.26455323.1401.18.3.1 0.2 (in Persian)
- [8] Bashirnezhad, K., et al., Viscosity of nanofluids: a review of recent experimental studies. *Int. Commun. Heat Mass Transfer*, 2016. 73: p. 114-123. Doi: 10.1016/j.icheatmasstransfer.2016.02.005
- [9] Bezerra, M.A., et al., Response surface methodology (RSM) as a tool for optimization in analytical chemistry. *Talanta*, 2008. 76(5): p. 965-977. Doi: 10.1016/j.talanta.2008.05.019
- [10] Esfe, M. H., Motallebi, S. M., Hatami, H., Amiri, M. K., Esfandeh, S., & Toghrade, D. (2023). Optimization of density and coefficient of thermal expansion of MWCNT in thermal oil nanofluid and modeling using MLP and response surface methodology. *Tribol. Int.*, 183, 108410. Doi: 10.1016/j.triboint.2023.108410
- [11] Nemati, M., & Sefid, M. (2023). Numerical Evaluation via Lattice Boltzmann Method to Analyze of Entropy Generation due to Conjugate Mixed Convection Heat Transfer of Non-Newtonian Nanofluid under the Influence of Magnetic Field. *AEROSPACE MECHANICS JOURNAL*, 19(2), 113-129. DOR: https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.26455323.1402.19.2.9.6(in Persian)
- [12] Nookaraju, B.C., M. Sohail, and R. Karthikeyan, Experimental investigation and optimization of process parameters of hybrid wick heat pipe using with RSM historical data design. *Mater. Today: Proceedings*, 2021. 46: p. 36-43. Doi: 10.1016/j.matpr.2020.05.634
- [13] Hemmat Esfe, M. (2022). Experimental and Comparative Study of Thermophysical Properties of Different Nanofluids with the Aim of Selecting the Best Nanolubricant. *AEROSPACE MECHANICS JOURNAL*, 18(2), 125-142. DOR: https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.26455323.1401.18.2.9.9(in Persian)
- [14] Liu, Z., et al., Oil debris and viscosity monitoring using optical measurement based on Response Surface Methodology. *Measurement*, 2022. 195: p. 111152. Doi: 10.1016/j.measurement.2022.111152
- [15] Kishore, R.A., M. Sanghadasa, and S. Priya, Optimization of segmented thermoelectric generator using Taguchi and ANOVA techniques. *Sci. Rep.*, 2017. 7(1): p. 16746. Doi: 10.1038/s41598-017-16372-8
- [16] Lahari, M.C., et al., Thermal conductivity and viscosity of glycerine-water based Cu-SiO<sub>2</sub> hybrid nanofluids. *Mater. Today: Proceedings*, 2022. 66: p. 1823-1829. Doi: 10.1016/j.matpr.2022.05.284
- [17] Xia, G., et al., The characteristics of convective heat transfer in microchannel heat sinks using Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and TiO<sub>2</sub> nanofluids. *Int. Commun. Heat Mass Transfer*, 2016. 76: p. 256-264. Doi: 10.1016/j.icheatmasstransfer.2016.05.034

- [18] Esfe, M.H., D. Toghraie, and S. Alidoust, *Experimental analysis on the rheological characteristics of MWCNT-ZnO (50: 50)/5W30 oil non-Newtonian hybrid nanofluid to obtain a new correlation*. Powder Technol, 2022. **407**: p. 117595. Doi: 10.1016/j.powtec.2022.1175952.
- [19] Hemmat Esfe, M., et al., Comparative rheological study on hybrid nanofluids with the same structure of MWCNT (50%)-ZnO(50%) /SAE XWX to select the best performance of nano-lubricants using response surface modeling. Colloids and Surfaces A: Colloids Surf., A Colloids and Surfaces A, 2022. **641**: p. 128543. Doi: 10.1016/j.colsurfa.2022.128543
- [20] Akbari, M. and A. Zareie, Experimental investigation of viscosity of MgO-MWCNTs hybrid nanofluid in Water-EG base fluid. Modares Mechanical Engineering, 2016. 16(6): p. 199-204. DOR: Akbari, M. and A. Zareie, Experimental investigation of viscosity of MgO-MWCNTs hybrid nanofluid in Water-EG base fluid. Modares Mechanical Engineering, 2016. 16(6): p. ۱۹۹-204. (in Persian)
- [21] Moghaddam, M.A. and K. Motahari, Experimental investigation, sensitivity analysis and modeling of rheological behavior of MWCNT-CuO (30–70)/SAE40 hybrid nano-lubricant. Appl. Therm. Eng. 2017. 123: p. 1419-1433. Doi: 10.1016/j.applthermaleng.2017.05.200
- [22] Alirezaie, A., et al., Investigation of rheological behavior of MWCNT (COOH-functionalized)/MgO-engine oil hybrid nanofluids and modelling the results with artificial neural networks. J. Mol. Liq, 2017. 241: p. 173-181. Doi: 10.1016/j.molliq.2017.05.121
- [23] Esfe, M.H., S.M. Motallebi, and D. Toghraie, Optimal viscosity modelling of 10W40 oil-based MWCNT (40%)-TiO2 (60%) nanofluid using Response Surface Methodology (RSM). Heliyon, 2022. 8(12). Doi: 10.1016/j.heliyon.2022.e11944
- [24] Chu, Y.-M., et al., Examining rheological behavior of MWCNT-TiO2/5W40 hybrid nanofluid based on experiments and RSM/ANN modeling. J. Mol. Liq, 2021. 333: p. 115969. Doi: 10.1016/j.molliq.2021.115969
- [25] Bin Mahfouz, A., et al., Optimization of viscosity of titania nanotubes ethylene glycol/water-based nanofluids using response surface methodology. Fuel, 2023. 347: p. 128334. Doi: 10.1016/j.fuel.2023.128334
- [26] Hemmat Esfe, M., S. Esfandeh, and S. Niazi, An experimental investigation, sensitivity analysis and RSM analysis of MWCNT(10)-ZnO(90)/10W40 nanofluid viscosity. J. Mol. Liq., 2019. 288: p. 111020. Doi: 10.1016/j.molliq.2019.111020
- [27] Esfe, M.H., et al., Presenting a model based on knowledge management in modeling and optimizing the dynamic viscosity of MWCNT (30%)-ZnO (70%) /SAE 40 oil hybrid nano-lubricant with response surface methodology (RSM) for industrial uses. Tribol. Int, 2024. 191: p. 109135. Doi: 10.1016/j.triboint.2023.109135
- [28] Esfe, M.H., et al., Presenting the best correlation relationship for predicting the dynamic viscosity of CuO nanoparticles in ethylene glycol-water base fluid using response surface methodology. Arabian J. Chem, 2024. 17(1): p. 105467. Doi:10.1016/j.arabjc.2023.105467
- Esfe, M.H., et al., Using the RSM to evaluate the rheological behavior of SiO2 (60%)-MWCNT (40%) /SAE40 oil hybrid nanofluid and investigating the effect of different parameters on the viscosity. Tribol. Int, 2023. 184: p. 108479. Doi: 10.1016/j.triboint.2023.108479
- [30] Sepehrnia, M., et al., Rheological behavior of engine oil based hybrid nanofluid containing MWCNTs and ZnO nanopowders: Experimental analysis, developing a novel correlation, and neural network modeling. Powder Technology, 2022. 404: p. 117492. Doi: 10.1016/j.powtec.2022.117492
- [31] Chen, W.-H., et al., A comprehensive review of thermoelectric generation optimization by statistical approach: Taguchi method, analysis of variance (ANOVA), and response surface methodology\_(RSM). Renewable Sustainable Energy Rev, 2022. 169: p. 112917. Doi: 10.1016/j.rser.2022.112917