



Investigation of the viscosity of CuO-ZnO hybrid nanolubricant for application in internal combustion engines with a MD approach

Mohamad Bashiri¹, Ali Qasemian^{1*}, Mohammad Hassan Shojaeefard²

1- School of Automotive Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran

2- School of Mechanical Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran

ARTICLE INFO

Keywords:

Molecular Dynamic Simulation
Experimental Investigation
Nano Particle
Viscosity
Hybrid Nano-lubricant

ABSTRACT

Lubricants are essential for the efficient operation of internal-combustion engines. Dispersing nanoparticles—especially hybrid nano-additives—offers a new route to upgrade lubricant performance. Earlier work has relied almost exclusively on experiments, an approach that is expensive and often unable to predict the full behaviour of hybrid systems. Here, we combine molecular-dynamics (MD) simulations with bench tests to examine the viscosity of a 20W-50 engine oil containing a 50:50 mixture of ZnO and CuO nanoparticles. Samples were prepared at 0.25, 0.50 and 0.75 wt % and characterised at 27, 40, 50 and 100 °C. Stability was verified by zeta-potential measurements and visual inspection. The largest discrepancy between simulated and measured viscosities was 9.8 %, confirming that the MD model is reliable. ANOVA and t-test analyses showed that both temperature and concentration exert statistically significant effects on viscosity ($p < 0.05$). As expected, raising the temperature lowers the viscosity, whereas increasing the nanoparticle loading raises it. Compared with an oil containing only ZnO, the hybrid formulation gives a markedly lower viscosity—by 13–16 % at 100 °C—demonstrating its advantage under realistic engine conditions. The reduction surpasses those reported for conventional additives such as MoS₂ and Al₂O₃ and indicates the potential for lower friction and improved engine efficiency.



© 2025 Iranian Society of Engine, Tehran, Iran. This article is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution Noncommercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0 license). (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).

* Corresponding author

E-mail address: qasemian@iust.ac.ir (A. Qasemian)

Received 27 July 2025; Accepted 18 September 2025

E-ISSN: 2345-4121/ISSN: 1735-5214

Cite this article: Bashiri M, Qasemian A, Shojaeefard MH. Investigation of the viscosity of CuO-ZnO hybrid nanolubricant for application in internal combustion engines with a MD approach. The Journal of Engine Research. 2025 Nov 22;72(3):64-84. doi: [10.22034/ER.2025.2067218.1098](https://doi.org/10.22034/ER.2025.2067218.1098)

بررسی گرانیوی نانوروانکار ترکیبی CuO-ZnO برای کاربرد در موتورهای احتراق داخلی با رویکرد دینامیک مولکولی

محمد بشیری^۱، علی قاسمیان^{۱*}، محمد حسن شجاعی فرد^۲

۱- دانشکده مهندسی خودرو، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران
۲- دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

چکیده

روانکارها نقشی حیاتی در بهینه‌سازی عملکرد موتورهای احتراق داخلی دارند. استفاده از نانوذرات، بویژه نانوروانکارهای ترکیبی، راهبردی نوین برای بهبود خواص آنهاست. اغلب مطالعات پیشین بر پایه روش‌های تجربی انجام شده که هزینه‌بر بوده و در پیش‌بینی کامل رفتار سامانه‌های ترکیبی محدودیت دارند. در این پژوهش، گرانیوی روغن موتور پایه 20W50 حاوی نانوذرات ترکیبی اکسید روی و اکسید مس (ZnO-CuO) با نسبت برابر با استفاده از شبیه‌سازی دینامیک مولکولی و روش‌های تجربی مورد بررسی قرار گرفت. نمونه‌های نانوروانکار با غلظت‌های ۰٫۵، ۰٫۷۵ و ۱٫۰ درصد وزنی در دماهای ۲۷، ۴۰، ۵۰ و ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد آماده‌سازی و ارزیابی شدند. پایداری نمونه‌ها از طریق اندازه‌گیری پتانسیل زتا و مشاهده چشمی تأیید شد. بیشینه انحراف بین نتایج شبیه‌سازی و تجربی حدود ۹٫۸ درصد بود که دقت مناسب شبیه‌سازی را نشان می‌دهد. تحلیل آماری داده‌های تجربی با استفاده از آزمون‌های ANOVA و t-test نیز اثر معنی‌دار دما و غلظت بر گرانیوی را تأیید کرد ($p < 0.05$). نتایج نشان داد که افزایش دما گرانیوی را کاهش و افزایش غلظت آن را افزایش می‌دهد. همچنین مقایسه با نانوروانکار حاوی تنها ZnO نشان داد که افزودن CuO موجب کاهش چشمگیر گرانیوی، بویژه در دماهای بالا (حدود ۱۳ تا ۱۶ درصد در ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد) می‌شود. این کاهش گرانیوی، عملکرد نانوروانکار ترکیبی را در دماهای کاری موتور نسبت به افزودنی‌های تجاری رایج مانند MoS_2 و Al_2O_3 نیز مطلوب‌تر نشان می‌دهد که می‌تواند به کاهش تلفات اصطکاکی و بهبود بازده موتور کمک کند.

اطلاعات مقاله

کلیدواژه‌ها:

شبیه‌سازی دینامیک مولکولی
تحلیل تجربی
نانو ذرات
گرانیوی
نانو روانکار ترکیبی



© 2025 Iranian Society of Engine, Tehran, Iran. This article is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution Noncommercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0 license). (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).

* نویسنده مسئول

پست الکترونیکی: qasemian@iust.ac.ir (علی قاسمیان)

دریافت ۵ مرداد ۱۴۰۴؛ پذیرش ۲۷ شهریور ۱۴۰۴
شاپای الکترونیکی: ۴۱۲۱-۲۳۴۵ / شاپای چاپی: ۵۲۱۴-۱۷۳۵

Cite this article: Bashiri M, Qasemian A, Shojaeefard MH. Investigation of the viscosity of CuO-ZnO hybrid nanolubricant for application in internal combustion engines with a MD approach. The Journal of Engine Research. 2025 Nov 22;72(3):64-84. doi: 10.22034/ER.2025.2067218.1098

۱- مقدمه

امروزه پژوهش‌های گسترده‌ای در زمینه نانو فناوری و کاربردهای وسیع آن در بخش‌های مختلف صنعتی، بویژه در صنعت موتورهای احتراق داخلی، انجام شده است [۱، ۲]. از جمله این کاربردها، اصلاح روانکارهای متداول با استفاده از نانوذرات است که افق‌های جدیدی را برای بهبود عملکرد و دوام سامانه‌های مکانیکی گشوده است. نانوروانکارها که شامل روانکار پایه بهبود یافته با نانوذرات پراکنده شده یکنواخت هستند، به‌عنوان یکی از امیدبخش‌ترین راهکارها برای ارتقای همزمان خواص کیفیت سطح و حرارتی روغن‌های موتور سنتی مطرح شده‌اند [۳، ۴]. این نانوسیالات خواصی همچون گرانروی بهبود یافته، رسانایی حرارتی بیشتر و ویژگی‌های ضدسایش و ضداصطکاک تقویت شده از خود نشان می‌دهند که برای سامانه‌هایی که تحت شرایط کاری شدید مانند بار بالا، دمای زیاد و تنش مکانیکی مداوم عمل می‌کنند، همچون موتورهای احتراق داخلی، بسیار سودمند است. بهبود روانکاری در چنین سامانه‌هایی به‌طور مستقیم به افزایش بازده موتور، طول عمر بیشتر قطعات، کاهش مصرف سوخت و کمینه‌سازی آلاینده‌های خروجی منجر می‌شود [۵، ۶]. علاوه بر این، استفاده از روانکارهای پیشرفته همسو با تلاش‌های جهانی برای بهبود صرفه‌جویی سوخت و رعایت الزامات سخت‌گیرانه زیست‌محیطی است.

در میان انواع مختلف نانوروانکارها، نانوروانکارهای ترکیبی، که شامل دو یا چند نوع متفاوت از نانوذرات هستند، اخیراً توجه فزاینده‌ای را به خود جلب کرده‌اند. منطق ترکیب ترکیبی در این است که بتوان مزایای فردی هر نوع نانوذره را ادغام کرده و اثرات هم‌افزایی ایجاد نمود که اغلب برتر از سامانه‌های تک‌جزئی هستند. برای نمونه، ترکیب نانوذرات اکسید فلزی با خواص مکمل می‌تواند روانکارهایی تولید کند که به‌طور همزمان انتقال حرارت بهتر، پایداری گرانروی بالاتر و مقاومت بیشتر در برابر تخریب اکسیداتیو ارائه دهند. نانوروانکارهای ترکیبی این امکان را فراهم می‌کنند که با تنظیم نسبت نانوذرات، شکل و اندازه آن‌ها و غلظت، ویژگی‌های روانکار به‌طور دقیق‌تری کنترل شده و عملکرد پایداری تحت شرایط کاری متغیر تضمین شود [۷]. این قابلیت بویژه در موتورهای احتراق داخلی مدرن اهمیت دارد، جایی که روانکار باید در شرایطی همچون شروع سرد، کارکرد با دور تند و چرخه‌های طولانی مدت دمایی پایدار عمل کند.

مطالعات تجربی متعددی بر بررسی رفتار گرانروی نانوروانکارها متمرکز بوده‌اند. برای مثال، عواد و همکاران [۸] نانوروانکارهای مبتنی بر SiO_2 را بررسی کرده و افزایش قابل توجه گرانروی در غلظت‌های متوسط را گزارش دادند؛ همچنین مشاهده کردند که افزایش دما باعث کاهش پیش‌بینی‌پذیر گرانروی می‌شود که نشان‌دهنده نازک‌شدگی حرارتی روغن پایه است. به‌طور مشابه، نیک و همکاران [۹] نشان دادند که افزودن نانوذرات TiO_2 منجر به افزایش محسوس گرانروی دینامیک، بویژه در غلظت‌های بالاتر از ۰.۵ درصد می‌شود که حاکی از برهم‌کنش قوی ذره-سیال است. کدزیرسکی و همکاران [۱۰] گزارش کردند که نانوروانکارهای Al_2O_3 با افزایش دما کاهش گرانروی نشان می‌دهند، اما همچنین تأکید کردند که نانوذرات کوچکتر این افت را به دلیل فعالیت سطحی بالاتر تعدیل می‌کنند. کدزیرسکی و همکاران [۱۱] نانوذرات CuO را بررسی کرده و روند تقریباً خطی گرانروی برحسب غلظت را مشاهده کردند که نشان می‌دهد کیفیت پراکنش نقش غالبی در تعیین رفتار جریان شناختی دارد.

در مطالعات اخیر، تمرکز به‌سوی سامانه‌های ترکیبی برای بررسی رفتار پیچیده‌تر آن‌ها معطوف شده است. مولدو و همکاران [۱۲] افزایش غیرخطی گرانروی در هیبریدهای $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2$ بویژه در بارگذاری‌های بالای ذرات را گزارش کردند که آن را به تشکیل شبکه‌های متراکم ذرات نسبت دادند. ژای و همکاران [۱۳] مشاهده کردند که هیبریدهای ZnO-CuO پایداری نسبی گرانروی در بازه دمایی گسترده‌ای نشان می‌دهند که بیانگر پایداری متقابل فازهای پراکنده است. نادوشن و همکاران [۱۴] هیبریدهای $\text{Fe}_3\text{O}_4\text{-MWCNT}$ را بررسی کرده و افزایش چشمگیر هم در گرانروی و هم در پایداری حرارتی گزارش کردند که آن‌ها را برای کاربردهای روانکاری سنگین مناسب می‌سازد. فائودزی و همکاران [۱۵] نیز نشان دادند که هیبریدهای $\text{MoS}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ در روغن موجب بهبود ویسکوزیته و ضریب رسانش

حرارتی می‌شوند. این مطالعات بطور کلی نشان می‌دهند که رویکرد ترکیبی گزینه‌ای کارآمد برای دستیابی همزمان به چند هدف عملکردی است.

اگرچه مطالعات تجربی بینش‌های ارزشمندی ارائه می‌دهند، محدودیت‌های قابل توجهی همچون هزینه بالای مواد و آماده‌سازی، زمان‌بر بودن آزمون‌ها و دشواری در تنظیم ساختاری متغیرهای نانوذرات نظیر اندازه، شکل و شیمی سطحی دارند. این چالش‌ها در مطالعه سامانه‌های ترکیبی که تعاملات میان ذرات مختلف لایه‌ای اضافی از پیچیدگی ایجاد می‌کند، بارزتر می‌شوند. روش‌های محاسباتی، بویژه شبیه‌سازی دینامیک مولکولی^۱، به‌عنوان جایگزینی توانمند مطرح شده‌اند. دینامیک مولکولی امکان بررسی رفتار نانوسیالات را در مقیاس اتمی فراهم می‌کند و پدیده‌های کلیدی همچون برهم‌کنش نانوذره-سیال، تشکیل ریزساختار و تغییرات گرانروی وابسته به دما را ثبت می‌کند. برخلاف الگوهای تجربی، شبیه‌سازی دینامیک مولکولی به پژوهشگران اجازه می‌دهد خواص را تحت شرایطی که تکرار آن‌ها در آزمایش دشوار یا پرهزینه است پیش‌بینی کنند و درک عمیق‌تری از سازوکارهای زیربنایی ارائه دهند.

چندین مطالعه قابلیت اطمینان شبیه‌سازی‌های دینامیک مولکولی را برای نانوسیالات ساده‌تر تأیید کرده‌اند. برای نمونه، نانوسیالات آب-Fe₂O₃ از نظر اندازه ذره، کسر حجمی و دما توسط صادقی و همکاران [۱۶] بررسی شده‌اند و نتایج نشان‌دهنده تطابق نزدیک با داده‌های تجربی گرانروی و وجود لایه‌های ساختاریافته سیال در اطراف نانوذرات است. به‌طور مشابه، رودیاک و همکاران [۱۷] با بررسی نانوسیالات آب-Cu نشان داده‌اند که افزایش غلظت نانوذرات به‌طور کلی گرانروی را افزایش می‌دهد، در حالی که کاهش اندازه ذرات این اثر را به دلیل نسبت سطح به حجم بالاتر تشدید می‌کند. این یافته‌ها نشان می‌دهد شبیه‌سازی مقیاس اتمی می‌تواند روندهای ماکروسکوپی مشاهده‌شده در آزمایش‌ها را تبیین کرده و مبنایی برای گسترش این رویکرد به سامانه‌های پیچیده‌تر فراهم کند.

با وجود گسترش کاربرد روش‌های دینامیک مولکولی، هنوز شکاف پژوهشی قابل توجهی در تمرکز بر نانوروانکارهای ترکیبی برای روغن‌های موتور با ترکیب‌های پیچیده وجود دارد و مطالعات زیادی به این روش برای ترکیبات پیچیده مانند نانوروانکارهای ترکیبی صورت نگرفته است. این شکاف ضرورت انجام مطالعات محاسباتی جامع به روش دینامیک مولکولی برای تکمیل داده‌های تجربی و بهینه‌سازی انتخاب و غلظت نانوذرات در کاربردهای عملی خودرویی را برجسته می‌کند.

مطالعات گذشته نشان می‌دهند که استفاده از ZnO و CuO به‌صورت جداگانه، اثرات متفاوتی بر خواص روانکارها دارد. به‌طور مثال، نانوذرات ZnO به دلیل پایداری بالاتر در روغن، قیمت پایین‌تر و دسترسی آسان‌تر گزینه‌ای مناسب برای افزایش پایداری نانوسیالات شناخته می‌شوند [۱۸]. در مقابل، نانوذرات CuO اگرچه در برخی شرایط پایداری کمتری دارند، اما موجب بهبود چشمگیر هدایت حرارتی و گرانروی روانکار می‌گردند [۱۹، ۲۰].

از این رو، در پژوهش حاضر با استفاده از ترکیب ترکیبی ZnO-CuO تلاش شده است تا مزایای هر دو نانوذره به‌طور هم‌زمان به‌دست آید. به بیان دیگر، ZnO نقش تقویت‌کننده پایداری و CuO نقش بهبوددهنده خواص حرارتی و گرانروی را ایفا می‌کنند و ترکیب آن‌ها منجر به جبران نقاط ضعف یکدیگر می‌شود. این موضوع دلیل اصلی انتخاب نانوذرات ترکیبی در این پژوهش بوده است.

هدف اصلی این پژوهش بررسی رفتار گرانروی نانوروانکار ترکیبی متشکل از نانوذرات اکسید روی و اکسید مس با نسبت مساوی (۵۰:۵۰)، پراکنده‌شده در روغن موتور پایه 20w50 (بهران پیش‌تاز) است. این مطالعه سه غلظت نانوذره (۰، ۲۵، ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ درصد وزنی) و چهار دمای کاری (۲۷، ۴۰، ۵۰ و ۱۰۰ درجه سلسیوس) را با استفاده از شبیه‌سازی دینامیک مولکولی مورد بررسی قرار می‌دهد. الگوی روغن پایه بر اساس ساختار مولکولی C₃₀H₆₂ ساخته شده است [۲۱]، [۲۲]. برای اعتبارسنجی نتایج محاسباتی، اندازه‌گیری‌های تجربی موازی تحت شرایط مشابه انجام شده است. این تحلیل

¹ Molecular Dynamic (MD)

مقایسه‌ای نه تنها دقت شبیه‌سازی دینامیک مولکولی در پیش‌بینی گرانیوی را نشان می‌دهد بلکه پتانسیل آن را به‌عنوان ابزاری کارآمد و مقرون‌به‌صرفه برای توسعه نانوروانکارهای ترکیبی در کاربردهای موتورهای احتراق داخلی برجسته می‌کند. اغلب مطالعات پیشین شبیه‌سازی دینامیک مولکولی روی نانوروانکارها عمدتاً بر سامانه‌های نسبتاً ساده، شامل یک نوع نانوذره منفرد پراکنده در آب یا سیالات پایه دیگر، متمرکز بوده‌اند. این مطالعه با ارائه یکی از نخستین تحقیقات ترکیبی محاسباتی-تجربی روی نانوروانکارهای ترکیبی ZnO-CuO پراکنده شده در روغن موتور، بینش‌های جدیدی در مورد ویژگی‌های گرانیوی آن‌ها تحت شرایط عملیاتی مرتبط ارائه می‌دهد. افزون بر این، این مطالعه رفتار گرانیوی سامانه ترکیبی ZnO-CuO را با نانوذرات منفرد ZnO مقایسه می‌کند تا کارایی نانوروانکارهای ترکیبی نسبت به حالت غیر ترکیبی مشخص شود.

نوآوری اصلی این پژوهش در سه محور است: نخست، بکارگیری شبیه‌سازی دینامیک مولکولی برای ترکیب پیچیده نانوروانکار ترکیبی ZnO-CuO در روغن موتور با فرمول شیمیایی $C_{30}H_{62}$ ؛ دوم، معرفی و بررسی ترکیب ترکیبی ZnO-CuO که کمتر مورد مطالعه قرار گرفته و از نظر عملکرد و هزینه برتری‌هایی نسبت به تک‌نانوذرات دارد؛ و سوم، مقایسه میان نتایج شبیه‌سازی و آزمایشگاهی که به‌روشنی اعتبار روش دینامیک مولکولی را تأیید می‌کند.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- شبیه‌سازی دینامیک مولکولی و محاسبه گرانیوی

دینامیک مولکولی یک روش شبیه‌سازی محاسباتی است که با حل عددی معادلات حرکت نیوتن برای تمامی ذرات موجود در یک سامانه، مسیر حرکت اتم‌ها و مولکول‌ها را پیش‌بینی می‌کند. در این روش، نیروهای بین‌اتمی و انرژی‌های پتانسیل با استفاده از پتانسیل‌های بین‌اتمی یا میدان‌های نیرو که بر اساس اصول مکانیک مولکولی تعریف می‌شوند، ارزیابی می‌گردند [۲۳].

در مطالعه حاضر، از روش دینامیک مولکولی در حالت تعادلی^۱ به همراه معادله گرین-کوبو^۲ برای تحلیل و محاسبه گرانیوی روانکار نانو ترکیبی استفاده شده است [۲۴، ۲۵]. بر این اساس، گرانیوی دینامیکی (μ) از رابطه زیر قابل محاسبه است [۲۶، ۲۷]:

$$\mu = \frac{V}{K_B T} \int_0^{\infty} [\tau_{xy}(t) \tau_{xy}(0)] dt \quad (1)$$

که μ گرانیوی دینامیکی، V حجم سامانه، K_B ثابت بولتزمن، T دمای سامانه و τ_{xy} مؤلفه‌ای از تانسور تنش است. تانسور تنش مطابق معادله^۲ تعیین می‌شود:

$$\tau_{xy} = \frac{1}{V} \left[\sum_j m_j v_{jx} v_{jy} + \sum_{i \neq j} r_{ijx} f_{ijy} \right] \quad (2)$$

که m_i جرم اتم i ، r_{ij} بردار فاصله بین اتم‌های i و j و f_{ij} بردار نیروی واردشده بین آن‌هاست. نیروی بین‌اتمی f_{ij} بازتابی از برهم‌کنش‌های ذرات مجاور بوده و بر اساس الگوی پتانسیل واکنشی انتخاب‌شده تعیین می‌شود [۲۸، ۲۹].

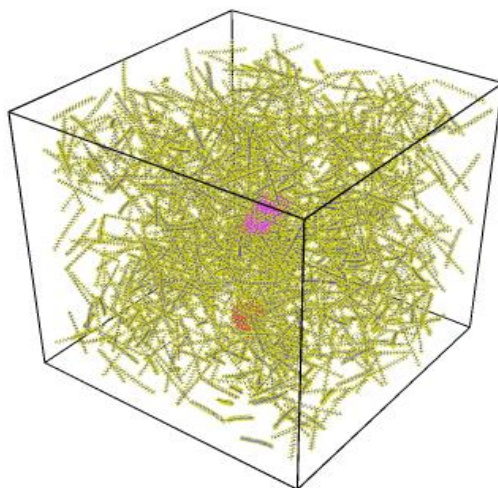
۲-۲- تنظیمات شبیه‌سازی

در این مطالعه، روغن موتور با فرمول شیمیایی $C_{30}H_{62}$ به‌عنوان سیال پایه انتخاب شد. شبیه‌سازی درون جعبه‌ای مکعبی با ابعاد $1000 \times 1000 \times 1000$ نانومتر مکعب شامل ۳۶۰۰ مولکول روغن انجام گردید. برای شبیه‌سازی

¹ Equilibrium Molecular Dynamics (EMD)

² Green-Kubo

نانوروانکارهای ترکیبی در غلظت‌های مختلف وزنی (۰،۲۵، ۰،۵ و ۰،۷۵ درصد)، بترتیب ۱، ۲ و ۳ مولکول از هر نوع نانوذره اکسید روی و اکسید مس با نسبت مساوی (۵۰-۵۰) به سامانه افزوده شد. شکل جعبه شبیه‌سازی و مولکول‌های مورد استفاده در شکل ۱ نمایش داده شده است.



شکل ۱ تصویر جعبه شبیه‌سازی مولکول‌های روغن و نانوذرات اکسید روی و مس (نانوروانکار ترکیبی)

تمامی شبیه‌سازی‌های دینامیک مولکولی در این مقاله با استفاده از نرم‌افزار متن باز لمپس^۱ انجام شدند. شرایط مرزی تناوبی در هر سه راستای فضایی اعمال گردید. برای برقراری تعادل سامانه، فشار با استفاده از باروستات برندن^۲ کنترل شد و دما به کمک دمابان نوز - هوور^۳ با ضریب میرایی ۱۰ در دماهای هدف شبیه‌سازی تنظیم گردید. پس از رسیدن به تعادل اولیه، سامانه نانوسیال تحت مجموعه‌های NVT (تعداد ذرات، حجم و دما ثابت) و NVE (تعداد ذرات، حجم و انرژی ثابت) شبیه‌سازی گردید تا پایداری ترمودینامیکی آن بررسی شود. زمان کل شبیه‌سازی ۱۰ نانوثانیه می‌باشد. پس از دستیابی به تعادل، از معادله گرین-کوبو برای محاسبه گرانیروی استفاده شد. گام انتگرال‌گیری در شبیه‌سازی برابر با ۰،۱ فمتوثانیه در نظر گرفته شد.

۲-۳- انرژی پتانسیل و میدان نیرو

تعیین دقیق انرژی پتانسیل و برهم‌کنش‌های نیرو در شبیه‌سازی‌های دینامیک مولکولی اهمیت اساسی دارد. انرژی پتانسیل کلی در یک سامانه مولکولی معمولاً به صورت مجموع برهم‌کنش‌های پیوندی و غیرپیوندی بیان می‌شود و بدین صورت است [۲۸، ۲۹]:

$$U = U_{bonded} + U_{nonbonded} = \sum_{bonded} U_b(l) + \sum_{angle} U_\theta(\theta) + \sum_{dihedrals} U_\varphi(\varphi) + \sum_{nonbonded} U_{nb}(r) \quad (3)$$

$$U_{bonds} = \frac{K_r}{2} (l - l_0)^2 \quad (4)$$

$$U_{angles} = \frac{K_\theta}{2} (\theta - \theta_0)^2 \quad (5)$$

¹ LAMMPS

² Berendsen Barostat

³ Nosé-Hoover Thermostat

$$U_{dihedral} = K_{\phi} [1 + \cos(n\phi)] \quad (6)$$

برهم کنش‌های پیوندی با استفاده از پتانسیل‌های هارمونیک بر اساس قانون هوک شبیه‌سازی شدند. مقادیر ثابت‌ها و متغیرهای مرتبط، نظیر طول تعادلی پیوند (l_0) و زاویه تعادلی (θ_0) از منابع معتبر استاندارد استخراج گردید [۲۸، ۲۹]. برای برهم کنش‌های غیرپیوندی، از پتانسیل ۱۲-۶ لnard-جونز^۱ استفاده شد که بدین صورت تعریف می‌شود:

$$U(r) = 4\varepsilon \left[\left(\frac{\sigma}{r} \right)^{12} - \left(\frac{\sigma}{r} \right)^6 \right] \quad (7)$$

که r فاصله بین اتم‌ها، ε عمق چاه پتانسیل (متغیر انرژی) و σ فاصله مشخصه‌ای است که در آن پتانسیل صفر می‌شود. این متغیرها از مطالعات پیشین اخذ و برای سامانه حاضر به کار گرفته شدند [۲۸، ۲۹].

در سامانه‌های چندجزئی، لازم است برهم کنش‌های وان‌دروالس میان گونه‌های اتمی ناهمسان نیز لحاظ شوند. آنجا که تعیین مستقیم این متغیرها پیچیده و زمان‌بر است، از قواعد ترکیبی رایج برای تخمین متغیرهای برهم کنش متقابل استفاده می‌شود. در این پژوهش، قواعد اختلاط لورنتس-برتلو^۲ به کار گرفته شد که بدین شکل است:

$$\sigma_{AB} = \frac{1}{2} (\sigma_{AA} + \sigma_{BB}) \quad (8)$$

$$\varepsilon_{AB} = \sqrt{\varepsilon_{AA}\varepsilon_{BB}} \quad (9)$$

متغیرهای میدان نیرو از میدان‌های نیروی DREIDING و UFF استخراج گردیدند [۲۸، ۲۹]. ثابت‌ها و متغیرهای برهم کنش در جداول ۱ الی ۳ ارائه شده‌اند. همچنین، شعاع قطع^۳ برای برهم کنش‌های غیرپیوندی برابر با ۱۲ آنگستروم در نظر گرفته شد [۲۸، ۲۹].

شکل ۲ همگرایی انرژی کل سامانه و رسیدن آن به حالت تعادل را در این شبیه‌سازی نشان می‌دهد. این همگرایی بیانگر انتخاب صحیح متغیرهای شبیه‌سازی در این سامانه است.

جدول ۱ ضرایب برهمکنش غیرپیوندی (پتانسیل لnard-جونز) در مطالعه حاضر [۲۸، ۲۹]

نوع اتم	ε (eV)	σ (Angstrom)
C	۰,۰۱۳۲۲۶۰۶۰۰	۳,۷۲۵
Cu	۰,۰۰۰۲۱۶۸۲۱۰	۳,۴۹۵
Zn	۰,۰۰۵۳۸۹۰۴	۲,۷۶۳
H	۰,۰۰۰۴۳۳۶۴۱۲	۲,۸۵۲
O	۰,۰۰۲۶۰۱۸۰۰۰	۳,۵۰۰

جدول ۲ ضرایب برهمکنش پیوندی (ساده و زاویه‌ای) در مطالعه حاضر [۲۸، ۲۹]

نوع پیوند	K_r, K_{θ}	r_0, θ_0
C-C	۱۵,۱۸	۱,۵۳
C-H	۱۵,۱۸	۱,۰۹
C-C-C	۲,۱۷	۱۰۹,۴۷۱
C-C-H	۲,۱۷	۱۰۹,۴۷۱
H-C-H	۲,۱۷	۱۰۹,۴۷۱

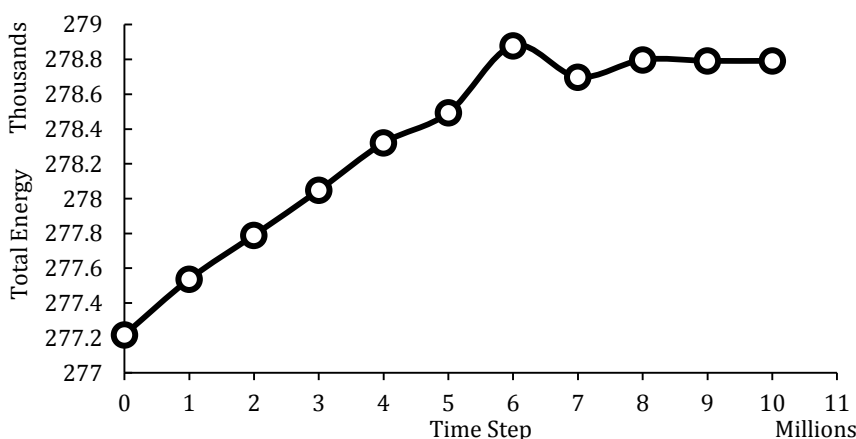
¹ Lennard-Jones

² Lorentz-Berthelot

³ Cut off Radius

جدول ۳ ضرایب برهمکنش دایهدرال^۱ در مطالعه حاضر [۲۸، ۲۹]

N	Kφ	نوع پیوند
۲	۰,۵۴۲۰۵	C-C-C-C
۲	۰,۵۴۲۰۵	C-C-C-H
۲	۰,۵۴۲۰۵	H-C-C-H



شکل ۲ نمودار تغییرات و همگرایی انرژی کل سیستم شبیه‌سازی نانو-روانکار ترکیبی اکسید روی - اکسید مس در غلظت ۰,۲۵ درصد و نسبت برابر (۵۰-۵۰)

۲-۴- مشخصات نانوروانکار و روش تهیه آن

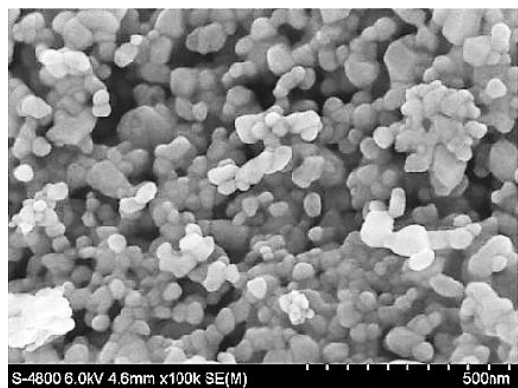
در این پژوهش، از نانوذرات اکسید مس (CuO) و اکسید روی (ZnO) به‌عنوان افزودنی در روغن موتور استفاده شد. هر دو نوع نانوذره به‌صورت تجاری تهیه شده و دارای خلوص بالا بودند. نانواکسید مس با خلوص ۹۹,۹٪، قطر متوسط حدود ۵۰ نانومتر، شکل تقریباً کروی و چگالی ۶,۳ گرم بر سانتی‌متر مکعب و نانواکسید روی با خلوص ۹۹,۸٪، قطر متوسط حدود ۵۰ نانومتر، ساختار تقریباً کروی و چگالی ۵,۶ گرم بر سانتی‌متر مکعب می‌باشند. تصاویر ریزبین الکترونی روبشی^۲ نشان‌دهنده قطر تقریبی نانوذرات، شکل کروی، توزیع یکنواخت و عدم تجمع قابل توجه ذرات می‌باشند که در شکل ۳ نشان داده شده‌است.

تحلیل پراش پرتو ایکس^۳ جهت شناسایی ساختار بلوری نانوذرات اکسید روی انجام شد. الگوی پراش پرتو ایکس که در شکل ۴-الف نشان داده شده‌است، حضور قله‌های مشخص در زوایای $31,7^\circ$ ، $34,4^\circ$ و $36,2^\circ$ را نشان می‌دهد که برترتیب با صفحات (۱۰۰)، (۰۰۲) و (۱۰۱) ساختار ورتزایت^۴ همگراگونال مطابقت دارند. علاوه بر این، قله‌های ضعیف‌تر دیگر در زوایای $47,5^\circ$ ، $56,6^\circ$ ، $62,8^\circ$ ، $66,3^\circ$ ، $68,0^\circ$ و $69,2^\circ$ درجه مشاهده شدند که همگی با ساختار مذکور مطابق هستند. عدم مشاهده قله‌های اضافی مؤید خلوص بالای نمونه و عدم وجود ناخالصی‌های ثانویه است.

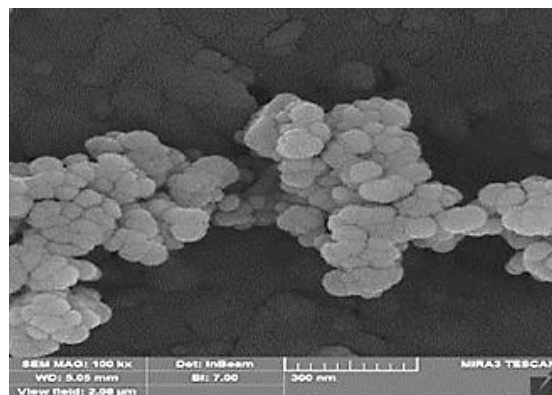
ساختار بلوری و خلوص فازی نانوذرات اکسید مس با پراش پرتو ایکس بررسی شد. الگوی پراش پرتو ایکس که در شکل ۴-ب نشان داده شده است، نشان‌دهنده حضور قله مشخص در زوایای $32,5^\circ$ ، $35,5^\circ$ و $38,7^\circ$ است که برترتیب با صفحات بلوری (۱۱۰)، (۱۱-۱) و (۱۱۱) در ساختار تک‌کلینیک^۵ اکسید مس مطابقت دارند. علاوه بر این، چندین قله

1 Dihedral
2 SEM
3 XRD
4 Wurtzite
5 Monoclinic

ضعیف‌تر نیز در محدوده 48° تا 66° مشاهده گردید که همگی متعلق به حالت تک‌کلینیک هستند. عدم مشاهده قله‌های اضافی بیانگر خلوص مناسب نمونه و نبود ناخالصی‌های ثانویه است.

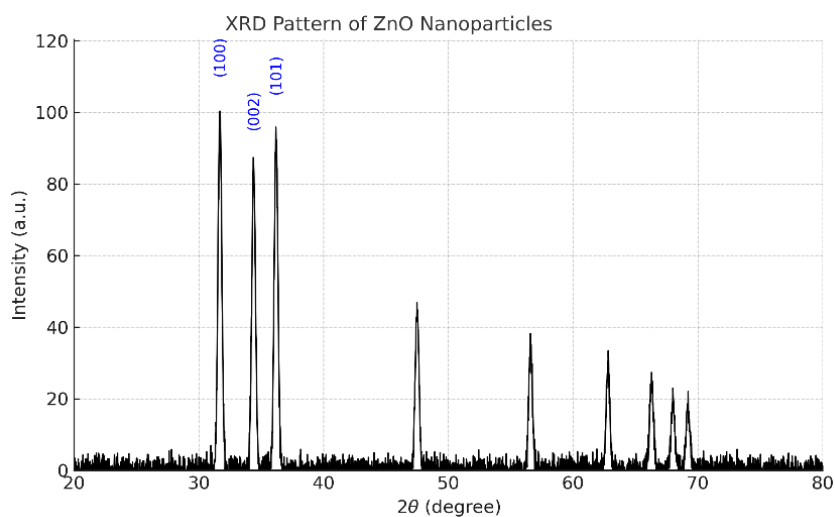


(ب)

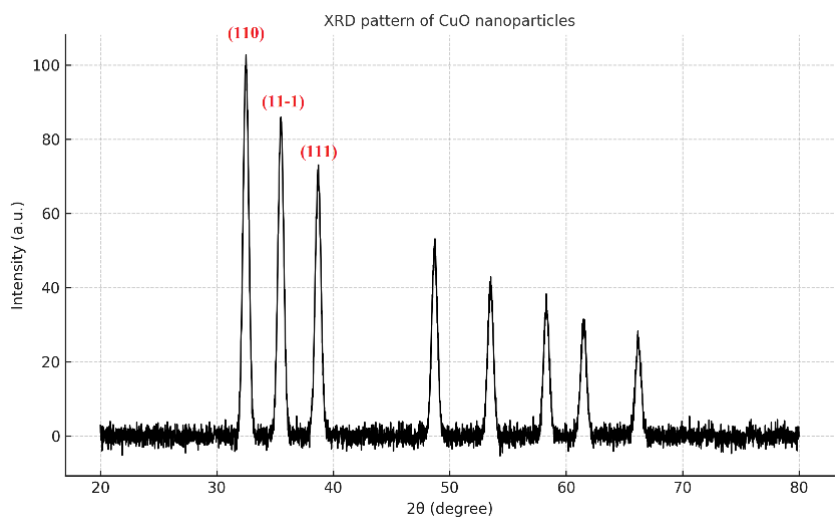


(الف)

شکل ۳ تصاویر ریزبین الکترونی روبشی نانوذرات پژوهش. (الف) نانوذرات اکسید مس، (ب) نانوذرات اکسید روی



(الف)



(ب)

شکل ۴ پراش پرتو ایکس نانوذرات. (الف) نانوذرات اکسید روی (ب) نانوذرات اکسید مس

روغن پایه مورد استفاده، روغن موتور تجاری بهران پیشتاز 20w50 شرکت نفت بهران، می‌باشد. خواص فیزیکی و شیمیایی آن در جدول ۴ ارائه شده است [۳۰].

جدول ۴ خواص فیزیکی و شیمیایی روغن موتور بهران پیشتاز 20w50 در این پژوهش [۳۰]

ویژگی	مقدار	واحد
گرانروی سینماتیک در ۴۰ درجه سانتی‌گراد	۱۷۲,۱۱	mm ² /s
گرانروی سینماتیک در ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد	۱۹,۸	mm ² /s
چگالی در ۱۵ درجه سانتی‌گراد	۰,۸۸۹	g/cm ³
نقطه اشتعال	۲۲۴	°C
نقطه ریزش	-۲۷	°C

نمونه‌های نانوروانکار با استفاده به روش فراصوت تهیه شدند. بدین منظور، مقادیر مشخصی از نانوذرات اکسید مس و اکسید روی (مطابق غلظت مورد نیاز برای آزمایشات) در روغن پایه توزین شده و به کمک دستگاه اولتراسونیک ۲۰ کیلوهرتز، توان ۲۰۰ وات به مدت ۳۰ دقیقه در دمای محیط (حدوداً ۲۵ درجه سانتی‌گراد) پخش شدند. این روش به‌طور گسترده در مطالعات مشابه به‌عنوان یک روش مؤثر برای پراکندگی یکنواخت و بهبود پایداری نانوروانکارها گزارش شده است [۳۱-۳۳]. شکل ۵-الف نمونه نانوروانکار مورد استفاده در این پژوهش را نشان می‌دهد.



(ب)



(الف)

شکل ۵ الف) نمونه نانو روانکار حاوی نانوذرات اکسید مس و اکسید مس، ب) دستگاه سنجش زتا پتانسیل

پایداری نمونه‌ها هم از نظر آزمایش زتا پتانسیل (شکل ۵-ب) و هم از نظر مشاهده چشمی بررسی شد. نتایج نشان داد که تمامی نمونه‌ها در غلظت‌های زیر ۱ دارای زتا پتانسیل بالاتر از ۲۵ میلی‌ولت بوده که نشان‌دهنده پایداری کلوییدی مناسب بر اساس مراجع و معیارهای ارائه شده در مطالعات گذشته است، در حالی که در غلظت ۱٪ مقدار زتا حدود ۲۱,۱ میلی‌ولت به دست آمد که طبق گزارش‌های گذشته از مرز پایداری کمتر است و احتمال ناپایداری در این غلظت وجود دارد [۳۴، ۳۵]. همچنین در مدت نگهداری ۳۰ روزه هیچ‌گونه ته‌نشینی قابل توجه در غلظت‌های کمتر از ۱ درصد مشاهده نشد. این نتایج با گزارش‌های پیشین در خصوص نانوروانکارهای حاوی اکسید مس و اکسید مس همخوانی دارد [۳۶، ۳۷].

در این پژوهش، غلظت‌های ۰,۲۵، ۰,۵۰ و ۰,۷۵ درصد وزنی برای مطالعه و بررسی گرانروی انتخاب شدند. دلیل این انتخاب، پایداری مناسب بر اساس بررسی پتانسیل زتا و پیشنهاد توسط مطالعات گذشته [۳۶، ۳۷] بدلیل مطلوب بودن

نانوروانکار در این بازه بود. بر اساس گزارش‌های گذشته، در غلظت‌های بالاتر از ۱ درصد احتمال ته‌نشینی و افزایش شدید گرانروی وجود دارد که منجر به رفتار غیرنیوتونی و کاهش بازده روانکار می‌شود [۲۰، ۳۸، ۳۹]. در مقابل، در غلظت‌های زیر ۱ رفتار سیال عمدتاً نیوتونی گزارش شده است [۴۰]. بنابراین، در این پژوهش فرض بر نیوتونی بودن رفتار جریان‌شناختی نانوروانکارها در این محدوده غلظتی قرار گرفت. از سوی دیگر، انتخاب دماهای ۲۷، ۴۰، ۵۰ و ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد به‌منظور پوشش شرایط سرد، معتدل و داغ موتور صورت گرفت. این بازه دمایی علاوه بر تطابق با شرایط واقعی عملکرد موتور، در مطالعات مشابه نیز به‌عنوان دماهای مرجع برای بررسی گرانروی یا سایر پارامترهای نانوسیالات به‌کار رفته است [۳۰، ۴۱، ۴۲].

۲-۵- تحلیل آزمایشگاهی

در این پژوهش، گرانروی نانوروانکار ترکیبی تهیه‌شده با استفاده از گرانروی‌سنج^۱ ساخت شرکت استن‌هوپ-ستا^۲ انگلستان اندازه‌گیری شد. آزمایش‌ها در دماهای ۲۷، ۴۰، ۵۰ و ۱۰۰ درجه سلسیوس با بهره‌گیری از حمام دمایی انجام گرفت تا پایداری حرارتی نمونه‌ها در طول فرآیند اندازه‌گیری تضمین شود. به‌منظور حفظ دقت اندازه‌گیری، گرانروی‌سنج پیش از هر آزمون با حلال مناسب به‌طور کامل شست‌وشو شد. آزمون‌های گرانروی در سه غلظت وزنی ۰،۲۵، ۰،۵ و ۰،۷۵ درصد نانوذرات ترکیبی و در دماهای مشخص‌شده انجام شدند.

نتایج آزمایشگاهی به‌دست‌آمده در این بخش برای اعتبارسنجی داده‌های شبیه‌سازی دینامیک مولکولی و همچنین برای بررسی تأثیر غلظت نانوذرات ترکیبی و دما بر رفتار گرانروی نانوروانکار ترکیبی استفاده شده است. شکل ۶ گرانروی‌سنج به‌کاررفته در این مطالعه را نشان می‌دهد.



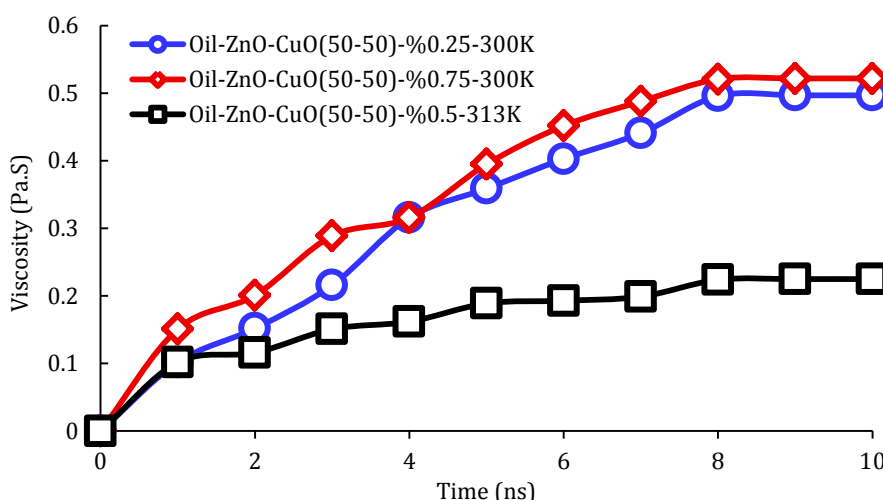
شکل ۶ دستگاه گرانروی‌سنج مورد استفاده به‌منظور اندازه‌گیری گرانروی نانوروانکار ترکیبی مورد تحلیل در این مطالعه

۳- نتایج و بحث

شکل ۷ همگرایی مقادیر گرانروی برای روغن موتور نانوروانکار حاوی نانوذرات اکسید روی و اکسید مس را که با استفاده از شبیه‌سازی دینامیک مولکولی در غلظت‌ها و دماهای مختلف محاسبه شده است، نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، مقادیر از مقدار اولیه مشخصی شروع شده و در طول شبیه‌سازی به یک مقدار پایدار همگرا شده و دیگر نوسانی ندارند.

¹ Viscometer

² Stanhope-Seta



شکل ۷ همگرایی گرانیوی در شبیه‌سازی دینامیک مولکولی در غلظت‌های مختلف نانوذرات ترکیبی ZnO-CuO (۵۰-۵۰) و دماهای مختلف

به‌منظور اطمینان از صحت نتایج شبیه‌سازی، این داده‌ها با نتایج آزمایشگاهی حاصل از اندازه‌گیری با گرانیوی سنج مقایسه شدند. شکل ۸ نتایج شبیه‌سازی و آزمایشگاهی را در غلظت‌های مختلف نانوذرات ترکیبی و دماهای گوناگون مقایسه می‌کند. همان‌طور که مشخص است، نتایج شبیه‌سازی بسیار نزدیک به نتایج آزمایشگاهی بوده و حداکثر اختلاف میان دو روش حدود ۹٫۸ درصد است. همچنین از شکل ۸ مشاهده می‌شود که با افزایش دما، گرانیوی نانوروانکار ترکیبی در تمامی غلظت‌ها کاهش می‌یابد. این کاهش گرانیوی ناشی از افزایش حرکت مولکولی در دماهای بالاتر است که منجر به تضعیف برهم‌کنش‌های بین‌مولکولی مانند نیروهای واندروالس می‌شود. در نتیجه، مقاومت مولکول‌ها در برابر جریان کاهش یافته و سیال روان‌تر می‌شود [۴۳].

شکل ۹ اثر افزایش غلظت نانوذرات ترکیبی ZnO-CuO به نسبت (۵۰-۵۰) بر گرانیوی نانوروانکار را نشان می‌دهد. نتایج شبیه‌سازی دینامیک مولکولی در شکل ۹ بیانگر این است که با افزایش غلظت نانوذرات ترکیبی، بویژه در دماهای پایین، گرانیوی نانوروانکار ترکیبی افزایش می‌یابد. علت این موضوع آن است که غلظت‌های بالاتر باعث برخورداری بیشتر بین ذرات شده و اصطکاک و تنش داخلی سیستم را افزایش می‌دهد و در نتیجه گرانیوی بیشتر می‌شود. همان‌طور که در شکل ۹ نشان داده شده است، افزایش غلظت نانوذرات ترکیبی ZnO-CuO در دماهای بالا اثر قابل‌توجهی بر گرانیوی ندارد. در دماهای بالا، حرکت مولکولی آن‌قدر سریع و بدون محدودیت است که اثر مانع‌کنندگی نانوذرات بر حرکت سیال به‌طور قابل‌توجهی کاهش می‌یابد [۴۴]. این رفتار برای کاربردهای موتورهای احتراق داخلی مطلوب است، زیرا روانکارها در شرایط دمای بالا عمل می‌کنند و این ویژگی به حفظ عملکرد و کاهش افت فشار کمک می‌کند.

برای ارزیابی عملکرد نانوروانکار ترکیبی، گرانیوی نانوذرات ترکیبی ZnO-CuO به نسبت برابر (۵۰-۵۰) با گرانیوی ZnO خالص در دماهای ۳۱۳ و ۳۷۳ کلوین با استفاده از روش شبیه‌سازی دینامیک مولکولی مقایسه شد. شکل ۱۰ نتایج مقایسه گرانیوی نانوروانکار در دو حالت ترکیبی ZnO-CuO به نسبت برابر (۵۰-۵۰) و حالت فقط نانوذرات اکسید روی در غلظت‌های مختلف و در دو دمای ۳۱۳ و ۳۷۳ کلوین (۴۰ و ۱۰۰ درجه سلسیوس) را نشان می‌دهد. نتایج شبیه‌سازی دینامیک مولکولی نشان داد که در دمای ۳۱۳ کلوین، کاهش گرانیوی ناشی از هیبرید شدن در محدوده ۱٫۷ تا ۱٫۸ درصد است. این کاهش اندک در دماهای متوسط (متناظر با شرایط اولیه عملکرد موتور) می‌تواند مفید تلقی شود، زیرا انرژی مورد نیاز برای پمپاژ روغن را کاهش می‌دهد بدون اینکه به‌طور چشمگیری ضخامت لایه روانکار را تحت‌تأثیر قرار دهد. در مقابل، در دمای ۳۷۳ کلوین کاهش گرانیوی نسبت به حالت اکسید روی خالص در محدوده ۱۳ تا ۱۶ درصد قرار داشت و این کاهش در غلظت‌های بالاتر نانوذرات مشهودتر بود. چنین کاهش قابل‌توجهی در دماهای بالا که

معمولاً متناظر با شرایط پایدار عملکرد موتور است، می‌تواند به کاهش تلفات اصطکاک داخلی و بهبود بازده حجمی موتور کمک کند، مشروط بر اینکه گرانروی در محدوده عملیاتی مجاز روانکار باقی بماند. این رفتار را می‌توان به تغییر آرایش فضایی و ساختار بین‌مولکولی ناشی از حضور همزمان نانوذرات اکسید روی و اکسید مس نسبت داد که مقاومت برشی روغن پایه را کاهش می‌دهد.

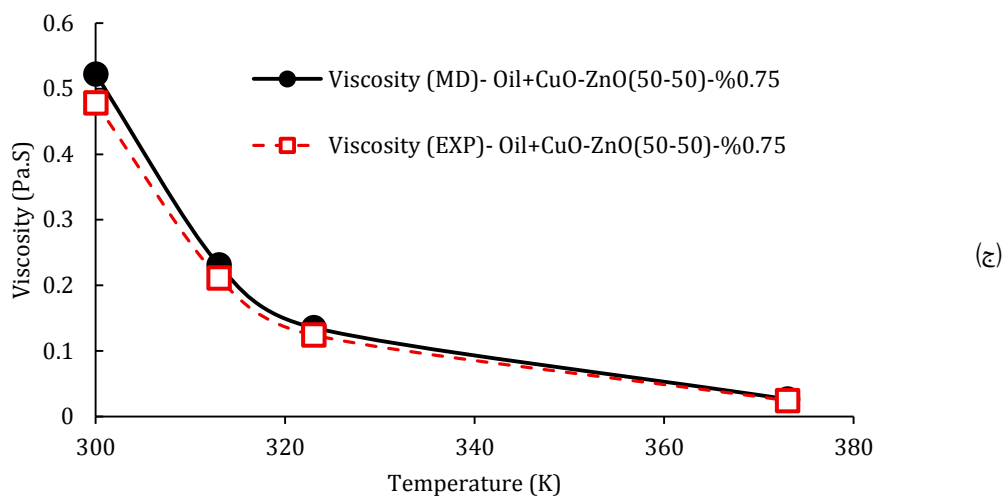
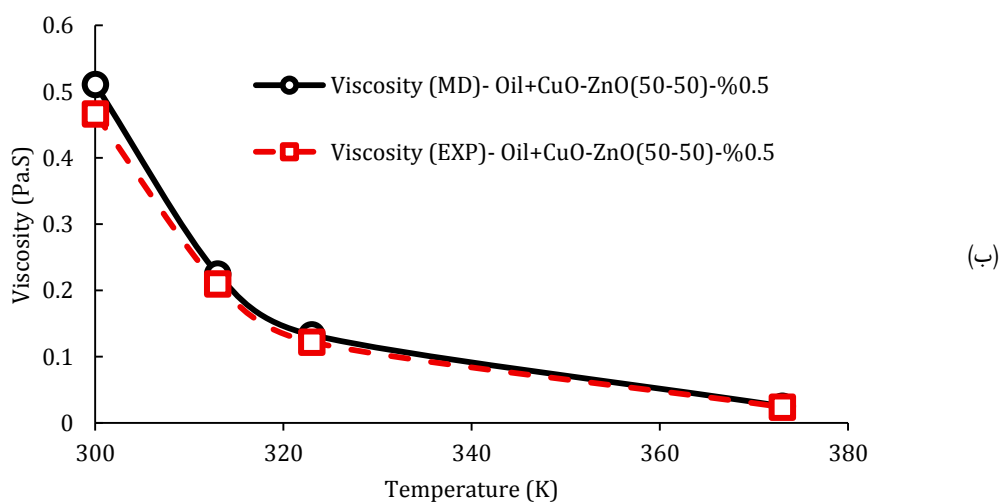
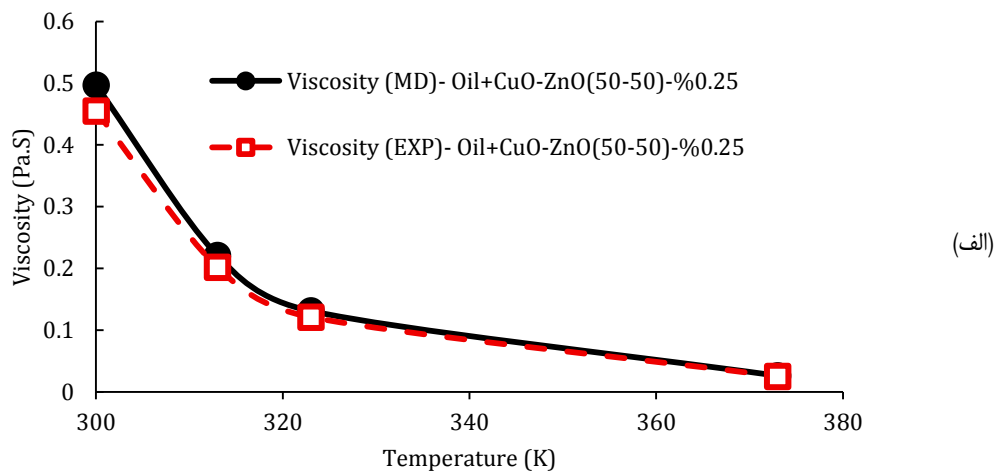
چنین کاهش قابل توجهی در گرانروی در دماهای داغ، که معمولاً متناظر با شرایط پایدار عملکرد موتور است، می‌تواند به کاهش تلفات اصطکاک داخلی و بهبود عملکرد هیدرودینامیکی روانکار منجر شود. در این حالت، گردش آسان تر روانکار موجب کاهش افت فشار روغن و توان مصرفی پمپ روغن می‌شود که نهایتاً به کاهش مصرف سوخت و بهبود بازده موتور منجر خواهد شد. این ارتباط در مطالعات پیشین نیز گزارش شده است؛ به عنوان مثال، گوسای و همکاران [۴۵] کاهش حدود ۱۵٪ مصرف سوخت را در موتورهای احتراق داخلی با استفاده از نانوروانکارها گزارش کردند. همچنین آسنیدا و همکاران [۴۶] بصورت تجربی کاهش سایش در قطعات موتورهای احتراق داخلی بعد از افزودن نانوذرات اکسید مس در روغن را مشاهده کردند. همچنین موسوی و همکاران [۴۷] نشان دادند که با افزایش دما در روان کار حاوی نانوذرات اکسید روی و مولیبدن دی سولفید ویسکوزیته (در دماهای بالای عملیاتی) کاهش می‌یابد که این امر موجب بهبود عملکرد سامانه روغن کاری و کاهش انرژی مورد نیاز برای پمپاژ می‌شود. در پژوهش حاضر نیز مشاهده شد که افزودن اکسید مس به اکسید روی و تشکیل نانوروانکار ترکیبی، در دمای ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد حدود ۱۳-۱۶٪ کاهش گرانروی نسبت به نانوروانکار تک‌جزئی اکسید روی ایجاد کرد. این کاهش، مشابه یا حتی بالاتر از نتایج گزارش شده در مطالعات پیشین [۴۸] است. چنین رفتاری نشان می‌دهد که در شرایط کاری موتور، علاوه بر بهبود روانی جریان روغن و کاهش اصطکاک هیدرودینامیکی، مصرف سوخت کاهش یافته و طول عمر اجزای موتور به دلیل کاهش سایش افزایش خواهد یافت که به عنوان نمونه، گوسای و همکاران [۴۵] بهبود حدود ۱۸٪ در بازده حرارتی را گزارش کردند. بدین ترتیب، یافته‌های این پژوهش علاوه بر اعتبارسنجی نتایج شبیه‌سازی و آزمایش‌های تجربی، در عمل نیز اهمیت بالایی برای موتورهای احتراق داخلی دارند.

در مجموع، این یافته‌ها نشان می‌دهند که استفاده از فرمولاسیون ترکیبی ZnO-CuO راهبردی امیدبخش برای بهینه‌سازی گرانروی نانوروانکار در دماهای مختلف، بویژه تحت شرایط کاری موتور احتراق داخلی است. با این حال، هدف اصلی این پژوهش بررسی گرانروی نانوروانکار ترکیبی ZnO-CuO با استفاده از دو رویکرد شبیه‌سازی دینامیک مولکولی و آزمایش تجربی بوده است. بنابراین، پیشنهاد می‌شود که در پژوهش‌های آینده عملکرد این نانوروانکار در موتورهای احتراق داخلی به صورت تجربی مورد بررسی قرار گیرد.

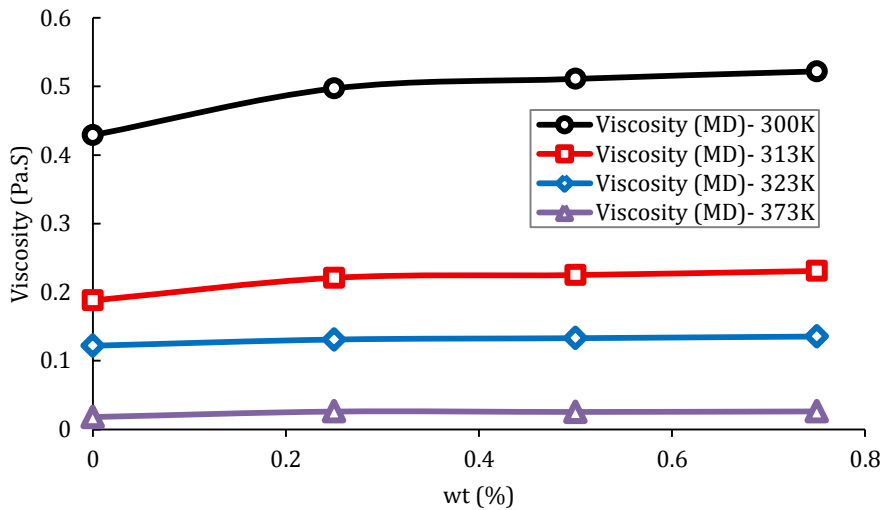
برای روشن تر شدن جایگاه نتایج حاضر، مقایسه‌ای با روانکارهای نانویی تجاری گزارش شده در پژوهش‌های گذشته انجام شد. نتایج نشان داد که گرانروی نانوروانکار ترکیبی ZnO-CuO در غلظت ۰٫۷۵٪ و دمای ۳۱۳ کلوین به حدود ۰٫۲۱۱ پاسکال ثانیه رسید. این مقدار تا حدودی کمتر از مقادیر گزارش شده برای روانکارهای حاوی نانوذرات MoS₂ با ویسکوزیته حدود ۰٫۲۳۱ پاسکال ثانیه (حدود ۹٪ بالاتر) و روانکارهای حاوی نانو ذرات Al₂O₃ حدود ۰٫۲۱۵ پاسکال ثانیه (حدود ۲٪ بالاتر) است [۴۹، ۵۰]. این نتایج حاکی از آن است که ترکیب ZnO-CuO به ویژه در شرایط دمایی بالا (دمای کاری موتور) می‌تواند نسبت به نانوافزودنی‌های متداول مزیت عملکردی داشته باشد.

اگرچه داده‌های این تحقیق بر پایه آزمون‌های آزمایشگاهی و شبیه‌سازی مولکولی استوار است، اما مطالعات گذشته رفتار روانکارهای نانویی را در موتورهای واقعی بررسی کرده‌اند. برای نمونه، اسگروی و همکاران [۵۱] نشان دادند که افزودن MoS₂ و Al₂O₃ به روغن موتور سبب کاهش مصرف سوخت تا حدود ۱ درصد در شرایط رانندگی شهری و بزرگراهی می‌شود. همچنین، علی و همکاران [۵۲] گزارش کردند که روانکارهای حاوی نانوذرات در چرخه‌های واقعی کار موتور پایداری حرارتی بالاتری نسبت به روغن پایه دارند. مقایسه کیفی این یافته‌ها با نتایج حاضر نشان می‌دهد که روند

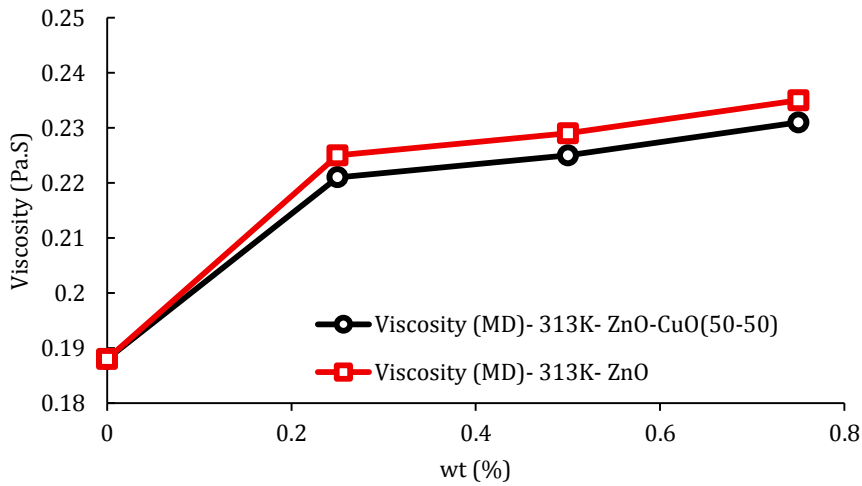
کاهش گرانروی در دماهای بالا (۳۷۳ کلوین) در روانکار نانو ZnO-CuO همسو با رفتار گزارش شده در موتور واقعی است. بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که ترکیب پیشنهادی علاوه بر آزمون‌های آزمایشگاهی، از منظر صنعتی نیز دارای پتانسیل بالایی است. با این وجود، اجرای آزمون‌های میدانی موتور می‌تواند در آینده ارزش افزوده بیشتری ایجاد کند.



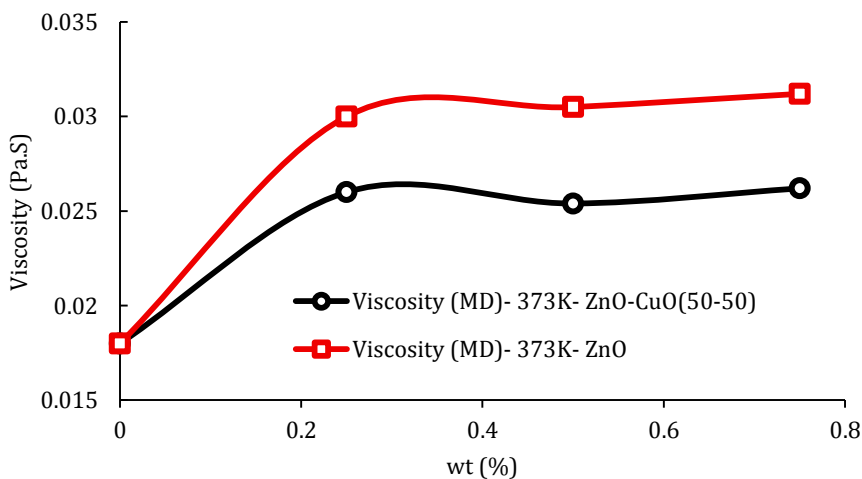
شکل ۸ نتایج شبیه‌سازی دینامیک مولکولی و نتایج تجربی گرانروی نانوروانکار ترکیبی بر حسب دما در غلظت‌های مختلف نانوذرات ترکیبی ZnO-CuO با نسبت (۵۰-۵۰). الف) غلظت ۰,۲۵ درصد، ب) غلظت ۰,۵ درصد و ج) غلظت ۰,۷۵ درصد



شکل ۹ نتایج تأثیر غلظت نانوذرات ترکیبی ZnO-CuO با نسبت (۵۰-۵۰) بر گرانیروی با استفاده از روش دینامیک مولکولی در دماهای مختلف



(الف)



(ب)

شکل ۱۰ نتایج گرانیروی نانو روانکار در حالت ترکیبی ZnO-CuO با نسبت (۵۰-۵۰) و حالت فقط حاوی نانو ذره ZnO با استفاده از روش دینامیک مولکولی در غلظت‌های مختلف و دو دمای متفاوت. الف) ۳۱۳ کلوین (۴۰ درجه سانتی‌گراد)، ب) دمای ۳۷۳ کلوین (۱۰۰ درجه سانتی‌گراد)

یکی از عوامل کلیدی برای پذیرش صنعتی نانوروانکارها، هزینه ساخت و اثرات زیست‌محیطی آنها است. مطالعات گذشته نشان داده‌اند که نانوذرات اکسید فلزی مانند اکسید روی و اکسید مس نسبت به ترکیبات گران قیمت‌تر از مزیت اقتصادی برخوردارند و همچنین امکان سنتز آنها به روش‌های ساده و با هزینه کمتر وجود دارد و خطر زیست محیطی کمتری دارد. [۵۳-۵۵]. در بعد زیست‌محیطی، بررسی‌های چرخه عمر نشان داده است که استفاده از روانکار نانوها می‌تواند مصرف سوخت و آلاینده‌های موتور را کاهش دهد، هرچند دفع پساب‌ها و ذرات فرسایشی نیازمند مدیریت دقیق است [۴۵].

علاوه بر این، کاهش گرانروی و بهبود جریان‌پذیری روانکار می‌تواند مستقیماً بر کاهش اصطکاک در سازوکار لنگ-استوانه و مجموعه دریچه‌ها تأثیر بگذارد، زیرا این نواحی در حالت روانکاری هیدرودینامیکی و مختلط قرار دارند. کاهش ضخامت لایه روغن با حفظ پایداری روانکار منجر به کاهش نیروی برشی در سطح تماس و کاهش انرژی اصطکاکی می‌گردد. مطالعات گذشته نشان داده‌اند که استفاده از نانوروانکارها می‌تواند حدود ۵۰٪ توان تلف‌شده ناشی از اصطکاک در مجموعه لنگ و استوانه را کاهش دهد [۵۶].

بر این اساس می‌توان گفت که ترکیب ZnO-CuO نه تنها از منظر بهبود گرانروی، بلکه از نظر اقتصادی نیز در مقایسه با برخی افزودنی‌های متداول قابلیت تجاری‌سازی دارد.

۳-۱- تحلیل آماری داده‌های تجربی

به منظور افزایش اعتبار نتایج تجربی، تمامی آزمایش‌های گرانروی برای هر نمونه (سه غلظت نانوذره ترکیبی ZnO-CuO در چهار دمای مختلف) به‌طور مستقل سه مرتبه تکرار شد و میانگین و انحراف معیار مقادیر گزارش گردید. در این مطالعه، مقادیر انحراف معیار به‌طور میانگین در بازه ۲-۴٪ مقدار گرانروی به دست آمد که در محدوده قابل قبول برای آزمون‌های گرانروی سنج ثقلی استند هوپ و نیز مقالات مشابه قرار دارد [۵۷، ۵۸]. برای نمونه، جدول ۴ چند داده تجربی منتخب همراه با انحراف معیار را نشان می‌دهد:

جدول ۴ نتایج تحلیل آماری تعدادی از داده‌های تجربی

دما (کلوین)	غلظت (درصد)	گرانروی میانگین (Pa.s)	انحراف معیار	درصد خطا (درصد)
۳۰۰	۰٫۲۵	۰٫۴۴۵	۰٫۰۱۲	۲٫۶
۳۱۳	۰٫۵۰	۰٫۲۱۰	۰٫۰۰۶	۲٫۹
۳۲۳	۰٫۷۵	۰٫۱۲۴	۰٫۰۰۴	۳٫۲
۳۷۳	۰٫۲۵	۰٫۰۲۵	۰٫۰۰۱	۴٫۰

همان‌گونه که مشاهده می‌شود، خطای آزمایش در تمامی شرایط محدود بوده و تأثیر معنی‌داری بر روند کلی نتایج ندارد.

برای بررسی اثر دما و غلظت بر گرانروی، آزمون ANOVA یک‌طرفه بر روی داده‌ها انجام شد. نتایج نشان داد:

۱. اثر دما: در هر غلظت مشخص، افزایش دما موجب کاهش معنی‌دار گرانروی می‌شود ($p < 0.001$). این کاهش ناشی از افزایش انرژی جنبشی مولکولی و تضعیف نیروهای بین‌مولکولی است.
۲. اثر غلظت: در هر دمای مشخص، افزایش غلظت نانوذرات ترکیبی (از ۰٫۲۵ به ۰٫۷۵ درصد) موجب افزایش معنی‌دار گرانروی می‌شود ($p < 0.05$). این اثر در دماهای پایین شدیدتر بوده و در دماهای بالا کاهش می‌یابد.

برای ارزیابی بیشتر اثر غلظت در هر دما، آزمون t-test زوجی بین داده‌های تجربی انجام شد. نتایج نشان داد که تفاوت بین غلظت‌های مختلف از نظر آماری معنی‌دار است ($p < 0.05$). به عنوان نمونه، در دمای ۳۰۰ کلوین، مقایسه

غلظت‌های ۰,۲۵ و ۰,۷۵ درصد مقدار $t = 4.12$ و $p = 0.012$ به دست آمد. مقادیر به دست آمده در سایر دماها نیز همگی کمتر از ۰,۰۵ بوده‌اند، که تأیید می‌کند تغییرات گرانروی ناشی از تغییر غلظت واقعی بوده و صرفاً از خطای آزمایش ناشی نمی‌شود. این نتایج با یافته‌های آزمون ANOVA سازگار است. بنابراین، از دیدگاه آماری می‌توان نتیجه گرفت که هر دو متغیر دما و غلظت نانوذرات ترکیبی اثر قطعی و معنی‌داری بر گرانروی روغن موتور دارند.

۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، اثر افزودن نانوذرات ترکیبی متشکل از نسبت مساوی اکسید مس و اکسید روی در غلظت‌ها و دماهای مختلف بر گرانروی روغن موتور تجاری 20w50 (بهران پیشتاز) با استفاده از روش‌های آزمایشگاهی و شبیه‌سازی دینامیک مولکولی بررسی شد.

نوآوری اصلی این مقاله در استفاده از این روش برای ترکیب پیچیده‌ای مانند نانوروانکار ترکیبی ZnO-CuO بود که مزایای قابل توجهی نسبت به رویکردهای صرفاً تجربی دارد. نتایج نشان داد که رویکرد دینامیک مولکولی با دقت بالایی قادر به پیش‌بینی رفتار گرانروی نانوروانکارهاست، به طوری که حداکثر انحراف از نتایج تجربی حدود ۹,۸ درصد بود. یافته‌ها نشان داد افزایش دما موجب کاهش گرانروی و افزایش غلظت نانوذرات، بویژه در دماهای پایین، موجب افزایش آن می‌شود. تحلیل آماری نیز تأیید کرد که اثر هر دو متغیر دما و غلظت بر گرانروی از نظر آماری معنی‌دار است. این رفتار در دماهای بالا مطلوب است؛ زیرا در شرایط کاری موتور، روانکار ضمن حفظ روانی کافی، گرانروی مطلوبی ارائه می‌دهد.

افزون بر این، تحلیل مقایسه‌ای نشان داد که هیبرید کردن با اکسید مس باعث کاهش گرانروی در دماهای داغ شده و عملکرد نانوروانکار ترکیبی را نسبت به نانواضافه‌های متداول مانند MoS_2 و Al_2O_3 نیز مطلوب‌تر می‌سازد.

در مجموع، این پژوهش نشان داد که شبیه‌سازی دینامیک مولکولی نه تنها ابزاری قابل اعتماد برای پیش‌بینی گرانروی نانوروانکارهاست، بلکه به عنوان روشی کم‌هزینه و کارآمد جایگزین آزمایش‌های تجربی، بویژه در شرایط محدودیت منابع آزمایشگاهی یا پیچیدگی تولید نانوروانکارهای متنوع، قابل استفاده است، که نوآوری پژوهش حاضر نیز بکارگیری این روش برای تحلیل گرانروی این ترکیب پیچیده است. علاوه بر این یافته‌های نتایج نشان داد که ترکیب ترکیبی ZnO-CuO نه تنها از نظر بهبود گرانروی مناسب هست، بلکه این ترکیب قابلیت رقابت با سایر نانوروانکارهای رایج را دارد.

۵- پیشنهادها

اگرچه در این مطالعه گرانروی نانوروانکار ترکیبی ZnO-CuO تنها در دماهای ایستا (۲۷، ۴۰، ۵۰ و ۱۰۰) درجه سانتی‌گراد بررسی شد، اما در کاربردهای واقعی موتور، روغن در معرض چرخه‌های گرمایش و سرمایش متوالی قرار دارد. مطالعات پیشین نشان داده‌اند که حضور نانوذرات می‌تواند موجب پایداری بهتر گرانروی در چرخه‌های حرارتی گردد [۵۹]. بنابراین، انجام آزمون‌های چرخه حرارتی برای ارزیابی دقیق‌تر پایداری این نانوروانکار پیشنهاد می‌شود. یکی دیگر از محدودیت‌های این پژوهش، عدم بررسی مستقیم نقش نانوروانکار در کاهش انرژی اصطکاکی موتور است. با توجه به نتایج کاهش گرانروی، انتظار می‌رود که در شرایط عملی، مصرف توان تلمبه روغن و تلفات اصطکاکی کاهش یابد همانطور که در مطالعات گذشته نیز به این نتیجه رسیده‌اند [۴۵، ۵۶]. پیشنهاد می‌شود که در پژوهش‌های آتی این موضوع برای نانوروانکار ترکیبی معرفی شده در این مقاله با استفاده از الگوی انرژی اصطکاکی و تحلیل لایه روانکار در موتورهای واقعی و بررسی سایر خواص کیفیت سطح نظیر کارایی خواص ضد سایش و ضد اصطکاک مشابه تحقیقات گذشته [۶۰-۶۲] بررسی شود.

References

- [1] Adeli AH, Nabiei O, Azadi M, Biglari M. Study of the effect of nanoparticles on thermophysical properties and rheological behavior of cooling fluid in combustion engines. *The Journal of Engine Research*. 2023 Nov 22;70(3):1-7. doi: 10.22034/er.2024.2019916.1023 [In Persian]
- [2] Rahmatinejad B, Rahimi Asiabarakhi H, Azimpour Shishevan F, Mohtadi Bonab MA. Experimental analysis of the effect of using aluminum oxide nanofluid in improving the heat transfer of XU7 engine radiator. *The Journal of Engine Research*. 2023 Jun 22;70(2):66-79. doi: 10.22034/er.2023.2011671.1015 [In Persian]
- [3] Ettefaghi E, Ahmadi H, Rashidi AM, Mohtasebi SS, Soltani R. Effects of Nano-Particles on Properties of Engine Oil and its Functionality Rate on Wear Reduction. *The Journal of Engine Research*. 2022 Nov 27;24(24):3-12. [In Persian]
- [4] Saeedpour M, Qasemian A, Hemmati M, Dolatyar M. The effect of using copper nanoparticles in engine oil on fuel consumption. *The Journal of Engine Research*. 2024 Mar 20;71(1):52-66. doi: 10.22034/er.2024.2025005.1032 [In Persian]
- [5] Ali MK, Fuming P, Younus HA, Abdelkareem MA, Essa FA, Elagouz A, Xianjun H. Fuel economy in gasoline engines using Al₂O₃/TiO₂ nanomaterials as nanolubricant additives. *Applied energy*. 2018 Feb 1;211:461-78. doi: 10.1016/j.apenergy.2017.11.013
- [6] Das SK, Choi SU, Yu W, Pradeep T. *Nanofluids: science and technology*. John Wiley & Sons; 2007 Dec 26.
- [7] Sepehrnia M, Farrokh MJ, Karimi M, Mohammadzadeh K. Experimental study and development of mathematical model using surface response method to predict the rheological performance of CeO₂-CuO/10W40 hybrid nanolubricant. *Arabian Journal of Chemistry*. 2023 Jun 1;16(6):104721. doi: 10.1016/j.arabjc.2023.104721
- [8] Awad AM, Sukkar KA, Jaed DM. Development of an extremely efficient Iraqi nano-lubricating oil (Base-60) employing SiO₂ and Al₂O₃ nanoparticles. In *AIP Conference Proceedings* 2022 Jul 11 (Vol. 2443, No. 1, p. 030049). AIP Publishing LLC. doi: 10.1063/5.0091951
- [9] Roselina NN, Mohamad NS, Kasolang S. Evaluation of TiO₂ nanoparticles as viscosity modifier in palm oil bio-lubricant. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* 2020 Apr 1 (Vol. 834, No. 1, p. 012032). IOP Publishing. doi: 10.1088/1757-899X/834/1/012032
- [10] Kedzierski MA, Brignoli R, Quine KT, Brown JS. Viscosity, density, and thermal conductivity of aluminum oxide and zinc oxide nanolubricants. *International Journal of Refrigeration*. 2017 Feb 1;74:3-11. doi: 10.1016/j.ijrefrig.2016.10.003
- [11] Kedzierski MA. Viscosity and density of CuO nanolubricant. *International journal of refrigeration*. 2012 Nov 1;35(7):1997-2002. doi: 10.1016/j.ijrefrig.2012.06.012
- [12] Moldoveanu GM, Minea AA, Iacob M, Ibanescu C, Danu M. Experimental study on viscosity of stabilized Al₂O₃, TiO₂ nanofluids and their hybrid. *Thermochimica Acta*. 2018 Jan 10;659:203-12. doi: 10.1016/j.tca.2017.12.008
- [13] Zhai Y, Li L, Xuan Z, Ma M, Wang H. Experimental performance evaluation and artificial-neural network modeling of ZnO-CuO/EG-W hybrid nanofluids. *Fluid Dynam Mater Process*. 2022 Feb 21;18:629-46. doi: 10.32604/fdmp.2022.017485
- [14] Nadooshan AA, Eshgarf H, Afrand M. Measuring the viscosity of Fe₃O₄-MWCNTs/EG hybrid nanofluid for evaluation of thermal efficiency: Newtonian and non-Newtonian behavior. *Journal of Molecular Liquids*. 2018 Mar 1;253:169-77. doi: 10.1016/j.molliq.2018.01.012
- [15] Faudzi SM, Khalil AN, Azmi AI, Sowi SA. Thermophysical properties of molybdenum disulfide (MoS₂) and aluminium oxide (Al₂O₃) in bio-based coconut oil hybrid nanolubricant for cleaner metalworking cutting fluid applications. *Tribology in Industry*. 2023;44(2):247. doi: 10.24874/ti.1446.02.23.05
- [16] Sadeghi SS, Hadi A, Mashhadi MM. Viscosity of Fe₂O₃-water nanofluids by molecular dynamics simulations: Effects of nanoparticle content, temperature and size. *Journal of Molecular Liquids*. 2023 Jul 15;382:121859. doi: 10.1016/j.molliq.2023.121859
- [17] Rudyak V, Krasnolutskaa S, Belkin A, Lezhnev E. Molecular dynamics simulation of water-based nanofluids viscosity. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. 2021 Sep;145(6):2983-90. doi: 10.1007/s10973-020-09873-8
- [18] Hernaiz M, Elexpe I, Aranzabe E, Fernández B, Fernández X, Fernández S, Cortada-García M, Aguayo AT. Study of the effect of ZnO functionalization on the performance of a fully formulated engine oil. *Nanomaterials*. 2023 Sep 11;13(18):2540. doi: 10.3390/nano13182540

- [19] Sofiah AG, Pasupuleti J, Samykano M, Rajamony RK, Pandey AK, Sulaiman NF. Thermo-economic performance analysis and multi-objective optimization of viscosity ratio and thermal conductivity ratio of copper oxide-palm oil nanolubricants. *Physics of Fluids*. 2024 Nov 1;36(11). doi: 10.1063/5.0233392
- [20] Nallusamy S, Logeshwaran J. Experimental analysis on nanolubricants used in multi cylinder petrol engine with copper oxide as nanoparticle. *Rasayan Journal of Chemistry*. 2017 Jul;10(3):1050-5. doi: 10.7324/RJC.2017.1031861
- [21] Sautermeister FA, Priest M, Lee PM, Fox MF. Impact of sulphuric acid on cylinder lubrication for large 2-stroke marine diesel engines: Contact angle, interfacial tension and chemical interaction. *Tribology International*. 2013 Mar 1;59:47-56. doi: 10.1016/j.triboint.2012.06.002
- [22] Diaby M, Sablier M, Le Negrate A, El Fassi M. Kinetic study of the thermo-oxidative degradation of squalane (C₃₀H₆₂) modeling the base oil of engine lubricants. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*. 2010;132(3):032805-1. doi: 10.1115/1.3155797
- [23] Weinberg N, Edwards E, Huber L, Sentell Z, Spooner J. A Newtonian algorithm for constant pressure molecular dynamics with periodic boundary conditions. *Molecular Physics*. 2022 May 19;120(10):e2060145. doi: 10.1080/00268976.2022.2060145
- [24] Lou Z, Yang M. Molecular dynamics simulations on the shear viscosity of Al₂O₃ nanofluids. *Computers & Fluids*. 2015 Aug 31;117:17-23.
- [25] Mondello M, Grest GS. Viscosity calculations of n-alkanes by equilibrium molecular dynamics. *The Journal of chemical physics*. 1997 Jun 8;106(22):9327-36.
- [26] Green MS. Markoff random processes and the statistical mechanics of time-dependent phenomena. II. Irreversible processes in fluids. *The Journal of chemical physics*. 1954 Mar 1;22(3):398-413. doi: 10.1063/1.1740082
- [27] Kubo R. Statistical-mechanical theory of irreversible processes. I. General theory and simple applications to magnetic and conduction problems. *Journal of the physical society of Japan*. 1957 Jun;12(6):570-86. doi: 10.1143/jpsj.12.570
- [28] Mayo SL, Olafson BD, Goddard WA. DREIDING: a generic force field for molecular simulations. *Journal of Physical chemistry*. 1990 Dec;94(26):8897-909. doi: 10.1021/j100389a010
- [29] Meier K, Laesecke A, Kabelac S. Transport coefficients of the Lennard-Jones model fluid. I. Viscosity. *The Journal of chemical physics*. 2004 Aug 22;121(8):3671-87. doi: 10.1063/1.1770695
- [30] Etefaghi EO, Ahmadi H, Rashidi A, Mohtasebi SS, Alaei M. Experimental evaluation of engine oil properties containing copper oxide nanoparticles as a nanoadditive. *International Journal of Industrial Chemistry*. 2013 Dec;4(1):28. doi: 10.1186/2228-5547-4-28
- [31] Chen H, Ding Y, He Y, Tan C. Rheological behaviour of ethylene glycol based titania nanofluids. *Chemical physics letters*. 2007 Aug 27;444(4-6):333-7.
- [32] Ionescu TF, Guglea D, Georgescu C, Dima D, Deleanu L. Influence of ZnO concentration in rapeseed oil on tribological behavior. In: *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* 2020 (Vol. 724, No. 1, p. 012045). IOP Publishing. doi: 10.1088/1757-899X/724/1/012045
- [33] Jama M, Singh T, Gamaleldin SM, Koc M, Samara A, Isaifan RJ, Atieh MA. Critical review on nanofluids: preparation, characterization, and applications. *Journal of Nanomaterials*. 2016;2016(1):6717624.
- [34] Abdel-Rehim AA, Akl S, Elsouady S. Investigation of the tribological behavior of mineral lubricant using copper oxide nano additives. *Lubricants*. 2021 Feb 7;9(2):16. doi: 10.3390/lubricants9020016
- [35] Yu W, Xie H. A review on nanofluids: preparation, stability mechanisms, and applications. *Journal of nanomaterials*. 2012;2012(1):435873. doi: 10.1155/2012/435873
- [36] Musa FU, Jamo HU, Muhammad DH, Gwadabe SH, Ismail UI, Turaki S, Aliyu SA, Tolufase E, Bello OM, Nura I. Effects of zinc oxide nanoparticles on viscosity of transesterified neem oil. *Science World Journal*. 2022 Nov 11;17(3):386-9. doi: 10.4314/swj.v17i3
- [37] Szabó ÁI, Pápai PB. Investigation of the Effects of CuO Nanoparticles on the Tribological Properties of Thermally Aged Group III Base Oil. *Engineering Proceedings*. 2024 Nov 12;79(1):82. doi: 10.3390/engproc2024079082
- [38] Alves SM, Silva e Mello V, Sinatora A. Nanolubrication mechanisms: Influence of size and concentration of CuO nanoparticles. *Materials Performance and Characterization*. 2018 Oct 1;7(3):226-41. doi: 10.1520/MPC20170064

- [39] Kole M, Dey TK. Viscosity of alumina nanoparticles dispersed in car engine coolant. *Experimental Thermal and Fluid Science*. 2010 Sep 1;34(6):677-83.
- [40] Sepyani K, Afrand M, Esfe MH. An experimental evaluation of the effect of ZnO nanoparticles on the rheological behavior of engine oil. *Journal of Molecular Liquids*. 2017 Jun 1;236:198-204. doi: [10.1016/j.molliq.2017.04.016](https://doi.org/10.1016/j.molliq.2017.04.016)
- [41] Al-enezy J, Yapıcı R, Hameed A. Experimental investigation of absorption and thermal analysis of different types of nanoparticles with motor oil based nanofluids. *Konya Journal of Engineering Sciences*. 2023;11(1):87-102. doi: [10.36306/konjes.1164260](https://doi.org/10.36306/konjes.1164260)
- [42] Koo J, Kleinstreuer C. A new thermal conductivity model for nanofluids. *Journal of Nanoparticle research*. 2004 Dec;6(6):577-88.
- [43] Apmann K, Fulmer R, Soto A, Vafaei S. Thermal conductivity and viscosity: Review and optimization of effects of nanoparticles. *Materials*. 2021 Mar 8;14(5):1291. doi: [10.3390/ma14051291](https://doi.org/10.3390/ma14051291)
- [44] Nguyen CT, Desgranges F, Roy G, Galanis N, Maré T, Boucher E, Mintsa HA. Temperature and particle-size dependent viscosity data for water-based nanofluids–hysteresis phenomenon. *International journal of heat and fluid flow*. 2007 Dec 1;28(6):1492-506. doi: [10.1016/j.ijheatfluidflow.2007.02.004](https://doi.org/10.1016/j.ijheatfluidflow.2007.02.004)
- [45] Gosai DC, Modi AJ, Gillawat AK. Impact of nano-fuel additives and nano-lubricant oil additives on diesel engine performance and emission characteristics. *Journal of Heat and Mass Transfer Research*. 2025 May 1;12(1):103-22. doi: [10.22075/JHMTR.2024.33460.1531](https://doi.org/10.22075/JHMTR.2024.33460.1531)
- [46] Asnida M, Hisham S, Awang NW, Amirruddin AK, Noor MM, Kadirgama K, Ramasamy D, Najafi G, Tarlochan F. Copper (II) oxide nanoparticles as additive in engine oil to increase the durability of piston-liner contact. *Fuel*. 2018 Jan 15;212:656-67. doi: [10.1016/j.fuel.2017.10.002](https://doi.org/10.1016/j.fuel.2017.10.002)
- [47] Mousavi SB, Heris SZ, Estellé P. Viscosity, tribological and physicochemical features of ZnO and MoS₂ diesel oil-based nanofluids: An experimental study. *Fuel*. 2021 Jun 1;293:120481. doi: [10.1016/j.fuel.2021.120481](https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.120481)
- [48] Giwa SO, Sharifpur M, Ahmadi MH, Sohel Murshed SM, Meyer JP. Experimental investigation on stability, viscosity, and electrical conductivity of water-based hybrid nanofluid of MWCNT-Fe₂O₃. *Nanomaterials*. 2021 Jan 8;11(1):136. doi: [10.3390/nano11010136](https://doi.org/10.3390/nano11010136)
- [49] Hassan MU, Usman M, Bashir R, Naeem Shah A, Ijaz Malik MA, Mujtaba MA, Elkhatib SE, Kalam MA. Tribological analysis of molybdenum disulfide (MOS₂) additivated in the Castor and mineral oil used in diesel engine. *Sustainability*. 2022 Aug 23;14(17):10485. doi: [10.3390/su141710485](https://doi.org/10.3390/su141710485)
- [50] Kedzierski MA. Viscosity and density of aluminum oxide nanolubricant. *International journal of refrigeration*. 2013 Jun 1;36(4):1333-40. doi: [10.1016/j.ijrefrig.2013.02.017](https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2013.02.017)
- [51] Sgroi MF, Asti M, Gili F, Deorsola FA, Bensaid S, Fino D, Kraft G, Garcia I, Dassenoy F. Engine bench and road testing of an engine oil containing MoS₂ particles as nano-additive for friction reduction. *Tribology International*. 2017 Jan 1;105:317-25. doi: [10.1016/j.triboint.2016.10.013](https://doi.org/10.1016/j.triboint.2016.10.013)
- [52] Ali MK, Xianjun H. Improving the heat transfer capability and thermal stability of vehicle engine oils using Al₂O₃/TiO₂ nanomaterials. *Powder Technology*. 2020 Mar 1;363:48-58. doi: [10.1016/j.powtec.2019.12.051](https://doi.org/10.1016/j.powtec.2019.12.051)
- [53] Bhanushali S, Ghosh P, Ganesh A, Cheng W. 1D copper nanostructures: progress, challenges and opportunities. *Small*. 2015 Mar;11(11):1232-52. doi: [10.1002/sml.201402295](https://doi.org/10.1002/sml.201402295)
- [54] Li J, Li Y, Wu H, Naraginti S, Wu Y. Facile synthesis of ZnO nanoparticles by *Actinidia deliciosa* fruit peel extract: Bactericidal, anticancer and detoxification properties. *Environmental Research*. 2021 Sep 1;200:111433. doi: [10.1016/j.envres.2021.111433](https://doi.org/10.1016/j.envres.2021.111433)
- [55] Radulescu DM, Surdu VA, Ficai A, Ficai D, Grumezescu AM, Andronescu E. Green synthesis of metal and metal oxide nanoparticles: a review of the principles and biomedical applications. *International Journal of Molecular Sciences*. 2023 Oct 20;24(20):15397. doi: [10.3390/ijms242015397](https://doi.org/10.3390/ijms242015397)
- [56] Ali MK, Xianjun H, Mai L, Bicheng C, Turkson RF, Qingping C. Reducing frictional power losses and improving the scuffing resistance in automotive engines using hybrid nanomaterials as nano-lubricant additives. *Wear*. 2016 Oct 15;364:270-81. doi: [10.1016/j.wear.2016.08.005](https://doi.org/10.1016/j.wear.2016.08.005)
- [57] Mallepally RR, Bamgbade BA, Rowane AJ, Rokni HB, Newkirk MS, McHugh MA. Fluid properties at high pressures and temperatures: Experimental and modelling challenges. *The*

- Journal of Supercritical Fluids. 2018 Apr 1;134:33-40. doi: 10.1016/j.supflu.2017.12.003
- [58] Kornaeva EP, Stebakov IN, Kornaev AV, Dremin VV, Popov SG, Vinokurov AY. A method to measure non-Newtonian fluids viscosity using inertial viscometer with a computer vision system. International journal of mechanical sciences. 2023 Mar 15;242:107967. doi: 10.1016/j.ijmecsci.2022.107967
- [59] Ojha U, Das S, Chakraborty S. Stability, pH and viscosity relationships in zinc oxide based nanofluids subject to heating and cooling cycles. Journal of materials science and engineering. 2010 Jul 1;4(7).
- [60] Birleanu C, Pustan M, Cioaza M, Molea A, Popa F, Contiu G. Effect of TiO₂ nanoparticles on the tribological properties of lubricating oil: an experimental investigation. Scientific Reports. 2022 Mar 25;12(1):5201. doi: 10.1038/s41598-022-09245-2
- [61] Patel J, Pereira G, Irvine D, Kiani A. Friction and wear properties of base oil enhanced by different forms of reduced graphene. AIP Advances. 2019 Apr 1;9(4). doi: 10.1063/1.5089107
- [62] Qiao YL, Sun XF, Xu BS, Ma SN. High temperature tribological behaviors of nano-diamond as oil additive. Journal of Central South University of Technology. 2005 Oct;12(2):181-5. doi: 10.1007/s11771-005-0036-7