# مطالعه تجربی و ارائه رابطه جدید ویسکوزیته دینامیکی نانو سیال اتیلن گلیکول- اکسیدروی با در نظر گرفتن اثرات دمای نانو سیال و کسر حجمی نانو ذرات

**امین طهماسبی[۱]، اشکان غفوری[۲و*]**

[۱] گروه مهندسی مکانیک، واحد دزفول، دانشگاه آزاد اسلامی، دزفول، ایران
[۲] گروه مهندسی مکانیک، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران

دریافت: پائیز ۹۸ پذیرش:زمستان ۹۸

**چکیده**

نانو سیالات نوع جدیدی از سیالات در انتقال حرارت هستند، که از پخش کردن یکنواخت و پایداری ذراتی در اندازه نانو در یک سیال پایه تولید شده اند. نانو سیالات حاوی نانو ذرات جامد نسبت به سیالات متعارف کاری، ویسکوزیته بالاتری دارند. این خصوصیت نانوسیالات باعث شده توجه بسیاری از محققین را به خود جلب کنند. در این پژوهش به اندازه گیری تجربی ویسکوزیته دینامیکی نانو سیال اتیلن گلیکول- اکسیدروی و ارائه مدل های حاکم بر آن ها پرداخته شده است. به منظور آماده سازی نانوسیال اتیلن گلیکول- اکسید روی از روش دو مرحله ای تعلیق نانوذرات در سیال پایه با استفاده از دستگاه همزن آلتراسونیک استفاده گردید. بدین منظور از نانوذرات با قطر۲۰ نانومتر در کسر های حجمی ۰/۲، ۰/۴، ۰/۶، ۰/۸ و ۱ درصد در دماهای ۲۰، ۲۵، ۳۰، ۳۵، ۴۰، ۴۵ و۵۰ درجه سانتیگراد استفاده شده است. در ابتدا از دستگاه ویسکومتر بروکفیلد مدل DV3-TLV برای اندازه گیری ویسکوزیته دینامیکی در کسرهای حجمی مختلف استفاده شد و سپس با استفاده از نتایج و مقادیر تجربی بدست آمده، مدل تجربی دو متغیره به کمک رگرسیون خطی با $R^2$=۰.۹۹۳ به منظور تخمین ویسکوزیته دینامیکی با لحاظ کردن کسر حجمی نانوذرات و دمای نانوسیال ارائه شد.

* **عهده‌دار مکاتبات:** a.ghafouri@iauahvaz.ac.ir

**کلمات کلیدی:** نانو سیال، اکسید روی ، اتیلن گلیکول، ویسکوزیته دینامیکی، رگرسیون خطی

**Abstract**

Nanofluids are a new generation of heat transfer fluid, which are produced by the uniform and stable dispersion of nano particles in a base fluid. Nanofluids containing solid nanoparticles have a higher viscosity than conventional working fluids. This characteristic of nanofluids has attracted the attention of many researchers. In this study, we have experimentally measured the dynamic viscosity of Ethylene Glycol- Zinc oxide nanofluid and presented the new governing correlation. In order to prepare Ethylene Glycol-Zinc oxide nanofluid, the two-step suspension method was used by ultrasonic mixer. For this purpose, nanoparticles with diameter of 20 nm in volume fractions of 0.2, 0.4, 0.6, 0.8 and 1% were used at temperatures of 20, 25, 30, 35, 40, 45 and 50 ° C. Initially, the Brookfield DV3-TLV viscometer was used to measure dynamic viscosity in different volume fractions, and then using the experimental results, a two-variable experimental correlation was presented with linear regression with $R^2$ = 0.993 in order to estimate dynamic viscosity by considering the effects of volume fraction of nanoparticle and nanofluid temperature.

## ۱- مقدمه

سیستم های خنک کننده، از مهمترین دغدغه های بخش صنعت است که با انتقال گرما مواجه هستند. سیالات رایج نظیر آب، روغن ها و اتیلن گلیکول که معمولاً به عنوان واسط انتقال حرارت مورد استفاده قرار می گیرند، توانایی محدودی از لحاظ خواص حرارتی دارند که اولین مانع برای کوچک سازی و بالا بردن راندمان کاری مبدلهای حرارتی و در نتیجه کاهش مصرف انرژی می باشد. یکی از روش های بهبود انتقال حرارت افزودن نانو ذرات به سیال است. این روش در مورد سیالاتی که از ذرات با اندازه میلیمتر یا میکرومتر استفاده می کنند به دلیل پایداری کم، ته نشینی سریع، ایجاد انسداد و گرفتگی مسیر جریان، ایجاد سایش و فرسایش سریع دیواره لوله و تجهیزات و افزایش شدید افت فشار در جریان سیال، مورد استقبال قرار نگرفت، در سال ۱۹۹۵میلادی چوی گونه جدیدی از سیال با نام نانوسیال را معرفی کرد که از یک سیال پایه که حاوی ذرات جامد در اندازه نانو با ضریب رسانایی بالا و نسبت حجمی کم، تشکیل شده بود[۱]. تحقیقات نشان داد که نانوسیال ها رفتار کاملاً متفاوتی نسبت به مخلوط سیالهای رایج با ذرات میلیمتری و میکرومتری دارند، در مقایسه با مخلوط های شامل ذرات معلق میلیمتری و



[ Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08 ]

[ DOR: 20.1001.1.20089813.1399.7.1.2.9 ]

میکرومتری، مخلوط شامل ذرات نانومتری، پایداری و خواص جریانی بهتری را از خود نشان داد[۲]. نانو سیالات حاوی نانو ذرات جامد نسبت به سیالات متعارف کاری ویسکوزیته ی بالاتری دارند، بنابراین سنجش ویسکوزیته برای طراحی سیستم های حرارتی و تخمین زدن قدرت پمپ مورد نیاز ضروری است[۳]. همچنین پارامترهای مختلف تاثیرگذار بر ویسکوزیته توسط محققان در تحقیقات جداگانه ای مورد بررسی قرار گرفته است از جمله، برای نخستین بار ماسودا و همکاران در سال ۱۹۹۳ به اندازه گیری ویسکوزیته دینامیکی نانوسیالی با سیال پایه آب در دماهای مختلف (از دمای محیط تا ۳۴۰ کلوین)را مورد بررسی قرار دادند[۴]. پس از آن پاک و چو در سال ۱۹۹۸ در ادامه این تحقیق، به بررسی ویسکوزیته دینامیکی نانوسیال اکسیدآلومنیوم-آب پرداختند. همچنین در تحقیقی دیگر آنها رفتار ویسکوزیته دینامیکی نانوسیالات اکسیدآلومنیوم-آب و اکسیدتیتانیم -آب پرداختند. نتایج آنها نشان داد که در کسرحجمی ۱۰درصد، ویسکوزیته نسبی نانوسیال اکسیدتیتانیوم - آب و اکسیدآلومنیوم-آب به ترتیب به مقدار ۳ و ۱۰ برابر افزایش می یابد[۵]. وی و همکاران در سال ۲۰۰۹ به بررسی نانو سیال دارای پایه اتیلن گلیکول حاوی نانوذرات اکسید روی پرداختند، نتایج نشان داد که نانوسیال اتیلن گلیکول- اکسید روی با کسر حجمی کمتر و مساوی ۰.۰۲ با افزایش دما، ویسکوزیته به شدت کاهش می یابد[۶]. پاستوریزا و همکاران در سال ۲۰۱۴ به بررسی مقادیر هدایت گرمایی، ویسکوزیته و چگالی نانو ذره اکسید روی در اتیلن گلیکول پرداختند. تاثیر متغیرهایی همچون سایز ذره، دما و کسر حجمی بر ویژگیهای ترمو فیزیکی آنها هم در غلظت هایی تا ٪۶.۲ مطالعه گردید. نتایج آزمایشگاهی حاکی از آن هستند، که ویسکوزیته با افزایش غلظت و کاهش سایز ذره افزایش یافته و با افزایش دما کاهش می یابد. همچنین مقادیر آزمایشگاهی ویسکوزیته با تخمین های ارائه شده توسط چند مدل نظری ساده مقایسه شده اند[۷]. مهبوبول و همکاران در سال۲۰۱۲ به بررسی ویژگی های مختلف ویسکوزیتهٔ نانوسیال ها شامل روش آماده سازی نانو سیال، دما، سایز و شکل ذره، و تاثیرات کسرحجمی پرداختند. علاوه بر این یک بررسی دقیق روی مدل های نظری، روابط مدل های متعارف مربوط به ویسکوزیتهٔ نانو سیال انجام دادند. نتایج آزمایشی موجود در مورد ویسکوزیتهٔ نانو سیال ها به وضوح نشان می دهند، که با افزایش غلظت حجمی، ویسکوزیته افزایش یافته و با افزایش دما کاهش می یابد. با این حال چند نتیجهٔ متناقض درمورد تاثیرات دما بر ویسکوزیته وجود دارد، علاوه بر این ثابت شد که سایز ذره تاثیرات مهمی بر ویسکوزیته نانو سیال ها دارد[۸]. سیام و همکاران در سال ۲۰۱۳ به بررسی درک نظری و عملی ویسکوزیته نانو سیال ها در مقالات موجود، و ویسکوزیته نانوسیال ها با تاثیر غلظت حجم ذره ای، دما، سایز ذره، شکل ذره و سیال پایه پرداختند. اغلب محققان با پراکنده کردن نانو ذرات در سیال پایه و افزایش غلظت آنها توانستند، ویسکوزیته را افزایش ، و با افزایش دما، ویسکوزیته را کاهش دهند، روابطی تجربی برای تخمین زدن ویسکوزیته نانوسیال ها با تاثیر دما و غلظت حجم ذره، و چند رابطه هم برای تخمین ویسکوزیته با تاثیر سایز ذره بدست آوردند، همچنین هیچ رابطه تجربی و مدل نظری رایجی برای تخمین ویسکوزیته تمام نانوسیال ها با توجه به تاثیر غلظت ذره ای، سایز نانوذرات و دما وجود ندارد[۹]. همت و همکاران در سال ۲۰۱۴ از طریق مطالعه آزمایشگاهی به بررسی تاثیرات دما و غلظت حجمی نانو ذره بر ویسکوزیته دینامیکی نانو سیال اتیلن گلیکول- اکسید روی با قطر نانو ذره میانگین ۱۸ نانو متر پرداختند. آزمایش ها برای یک دامنه دمایی از دمای اتاق تا دمای ۵۰ درجه سیلیسیوس انجام شدند و کسر حجمی نانو ذرات در دامنه ٪۰.۲۵تا ٪۵ قرار داشتند. نتایج این پژوهش نشان داد که ویسکوزیته دینامیکی نانو سیال بطور چشمگیری با کسر حجمی ذرات افزایش می یابد، اما با افزایش دما چندان تغییری نشان نمی دهد[۱۰]. هااوران و همکاران در سال ۲۰۱۵ نانو ذرات اکسید روی با پایه ترکیبی اتیلن گلیکول و آب دیونیزه شده، در سیالات پایه ای مختلف شامل ترکیب های ۷۵:۲۵، ۸۵:۱۵ و ۹۵:۵ ، تهیه کردند، که این ارقام طبق حجم هستند، آزمایش های ویسکوزیته در دماهای ۱۵-۵۵ درجه سیلیسیوس و کسر جرم نانو ذره ٪۵.۲۵ انجام شدند، و به این نتیجه رسیدند، که با افزایش غلظت اتیلن گلیکول و دما بترتیب ویسکوزیته نانو سیال افزایش و کاهش می یابد[۱۱]. بشیرنژاد و همکاران در سال ۲۰۱۶ به بررسی جدیدترین مطالعات آزمایشگاهی روی ویسکوزیته نانوسیالات حاوی نانو ذرات مختلف پرداختند، در اغلب مطالعات افزایش ویسکوزیته بدلیل افزایش کسر حجمی نانو ذرات و کاهش دما می باشد، همچنین در بیشتر این مطالعات فقط تاثیر یک یا دو پارامتر بطور همزمان بررسی شده است. بنابراین برای کارهای آینده محققان می توانند مطالعات خود را با در نظر گرفتن تمام فاکتورهای تاثیرگذار مانند دما، سایز نانو ذرات، توده شدن ذرات، نوع سیال پایه و غیره انجام داده تا درک صحیح تری برای رفتار ویسکوزیته نانوسیال بدست آیند. این کار به مهندسین کمک می کند تا سیستم های حرارتی را با دقت بالاتری طراحی کنند[۳]. به منظور ارائه مدلهایی با متغیرهای بیشتر نایک و همکاران در سال ۲۰۱۱ ویسکوزیته نانوذرات اکسید مس در اتیلن گلیکول را مورد مطالعه قرار داد. آنها دریافتند که ویسکوزیته این نانوسیال با افزایش دما، کاهش می یابد. همچنین آنها به این نتیجه رسیدند، با افزایش کسر حجمی نانوذرات، ویسکوزیته نانوسیال افزایش می یابد[۱۲]. همچنین لی و همکاران، یامساوا و همکاران و اشگرف و همکاران همگی به این نتیجه رسیدند که کسرحجمی و دما از متغییرهای تاثیر گذار بر ویسکوزیته دینامیکی می باشند[۱۵-۱۴-۱۳].

## ۲- مدل های ویسکوزیته دینامیکی نانوسیالات

شبیه سازی دقیق ویسکوزیته دینامیکی نانوسیال یکی از موضوعات بسیار مهم در مدل سازی نانوسیال است. سالهاست که دانشمندان درخصوص مدل سازی این متغیر تحقیقات گوناگونی انجام داده‌اند، و به کمک روشهای آزمایشگاهی، عددی و تئوری مدل‌های گوناگونی را گزارش نموده اند. تفاوت عمده در این مدل‌ها نیز همانند مدل‌های ضریب هدایت حرارتی، روش مطالعه استاتیکی یا دینامیکی و همچنین لحاظ نمودن متغیرهای گوناگون از جمله قطر نانوذرات، کسر حجمی نانوذرات، دمای بالک نانوسیال و غیره در مدل‌ها می‌باشد. برای ویسکوزیته دینامیکی نانوسیال مدل‌های گوناگونی پیشنهاد شده، که در اینجا برخی از آنها که از لحاظ جامعیت و کاربرد نسبت به سایر مدل‌ها برتری داشته و در



[ Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08 ]

[ DOR: 20.1001.1.20089813.1399.7.1.2.9 ]

مقالات بیشتری به آنها ارجاع شده، مطالعه شده و به تفکیک به بررسی پارامترهای این مدل‌ها پرداخته خواهد شد. بریکمن[1] یکی از پرکاربردترین مدل‌ها در پیش بینی ویسکوزیته نانوسیال مدل بریکمن می باشد، که ویسکوزیته موثر را بر اساس ویسکوزیته سیال شامل ذرات کروی با غلظت کم به شکل زیر مدل سازی نموده بود:

$$\frac{\mu_{nf}}{\mu_{bf}} = \frac{1}{(1-\varphi)^{25}} \quad (۱)$$

این مدل ساختار ذرات را بر لزجت دینامیکی نانوسیال تاثیر گذار در نظر گرفته است[۱۶]. کریگر[2] و دُوگرتی[3] مدل خود را به کمک یک رابطه توانی نیمه تجربی که ذرات را به صورت منفرد با پراکندگی رندوم لحاظ می کند، بدست آورده و آن را به شکل زیر ارائه داده‌اند :

$$\frac{\mu_{nf}}{\mu_{bf}} = \left(1 - \frac{\varphi_p}{\varphi_m}\right)^{-\eta\varphi_m} \quad (۲)$$

در رابطه فوق بیشینه ذرات مجتمع $(\varphi_m)$ برابر ۰/۶۴ و ویسکوزیته ذاتی $(\eta)$ برابر ۲/۵ می باشد[۱۷]. نیلسن[4] رابطه ای کلی برای ویسکوزیته دینامیکی نانوسیال به سیال پایه، بر اساس غلظت پخش نانو ذرات به شکل زیر ارائه نموده است:

$$\frac{\mu_{eff}}{\mu_{bf}} = (1 + 1.5\varphi_p)e^{\frac{\varphi_p}{(1-\varphi_m)}} \quad (۳)$$

در این رابطه $(\varphi_p)$ معرف کسر حجمی نانوذرات و $(\varphi_m)$ کسر تجمعی بیشینه می باشد[۱۸]. بَچلر[5] با توسعه مدل بریکمن و با در نظر گرفتن اثر حرکت براونی نانوذرات مدل زیر را پیشنهاد داد:

$$\frac{\mu_{nf}}{\mu_{bf}}\left(1 + 2.5\varphi + 6.5\varphi^2\right) \quad (۴)$$

مدل بالا با در نظر گرفتن تعلیق ایزوتروپیک نانو ذرات کروی و صلب در سیال پایه بدست آمده است، همچنین اثر برخورد جفت ذرات نیز در نظر گرفته شده است[۱۹]. مدل‌های بریکمن، کریگر و دُوگرتی، نیلسن و بَچلر به عنوان مدل‌های ویسکوزیته کلاسیک محسوب می شوند، به نوعی در رده مدل‌های پیش از سال ۲۰۰۰ میلادی قرار می گیرند، آخرین مدلی که در آن کسر حجمی نانو ذرات به عنوان تنها پارامتر تاثیرگذار معرفی شده مدل وانگ[6] و همکاران می باشد[۲۰].

$$\frac{\mu_{nf}}{\mu_{bf}} = (1 + 7.3\varphi + 123\varphi^2) \quad (۵)$$

ازمی[7] و همکاران با بررسی داده های تجربی بسیاری، مدل پیشنهادی خود را به صورت زیر ارائه دادند:

$$\frac{\mu_{nf}}{\mu_{bf}} = \left(1 + \frac{\varphi}{100}\right)^{11.3}\left(1 + \frac{T}{70}\right)^{-0.038}\left(+\frac{d_p}{170}\right)^{-0.061} \quad (۶)$$

در رابطه فوق، ویسکوزیته نسبی تابعی از کسر حجمی، دما و قطر نانوذرات می باشد. آن ها مقادیر بدست آمده از مدل خود را با نتایج تجربی مقایسه کردند[۲۱]. حداد و همکاران در سال ۲۰۱۲ با استفاده از یافته های تجربی نگوین و همکاران مدل زیر را برای ویسکوزیته دینامیکی آب- کوپریک مس ارایه داده‌اند[۲۲]:

$$\mu_{cuo} = -0.6967 + \frac{15.937}{T} + 1.238\varphi + \frac{1356.14}{T^2} - 0.259\varphi^2 - 30.88\frac{\varphi}{T} - \frac{19652.74}{T^3} + 0.01593\varphi^3 + 4.38206\frac{\varphi^2}{T} + 147.573\frac{\varphi}{T^2} \quad (۷)$$

در این پژوهش با در نظر گرفتن و بررسی تجربی نقش پارامترهایی مانند کسر حجمی نانو ذرات، دمای سیال در قطر ۲۰ نانومتر برای نانوسیال اتیلن گلیکول- اکسید روی، درک دقیق رفتار ویسکوزیته دینامیکی این نانوسیال و نقش هر یک از پارامترهای مورد اشاره در افزایش یا کاهش آن مد نظر است. همچنین به کمک روش رگرسیون خطی یک مدل دو متغیره برای ویسکوزیته دینامیکی این نانوسیال ارائه خواهد شد که در پژوهش های پیشین مشاهده نگردیده است

## ۳- روش انجام آزمایش

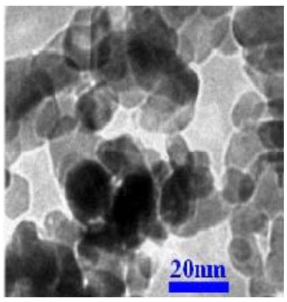
اولین گام در انجام بررسی تجربی حاضر، آماده سازی نانوسیال و تعلیق پایدار نانوذرات درون سیال پایه می باشد. در این پژوهش برای آماده سازی نانوسیال اتیلن گلیکول- اکسیدروی از روش دومرحله ای استفاده شد. نانوذرات تهیه شده محصول شرکت هوستن آمریکا که در شکل(۱) تصویر میکروسکوپ الکترونی نشان داده شده است و اتیلن گلیکول تهیه شده با خلوص ۹۹.۵٪ محصول شرکت سامچون کره می باشد. به منظور پایداری نانوذرات در سیال پایه ابتدا از دستگاه همزن مغناطیسی مدل هیدولف با دور $(\mathbf{rpm})$ ۷۰۰ به مدت ۲۴ ساعت و سپس همزن آلتراسونیک شرکت ایرانیان پژوهش نصیر (فاپن) با توان $(\mathbf{W})$ ۶۰۰ به مدت ۳ ساعت استفاده شد، سپس ویسکوزیته دینامیکی نانوسیال با قطر ذرات ۲۰ نانومتر در پنج کسر حجمی ۰/۲، ۰/۴، ۰/۶، ۰/۸ و ۱ درصد و در پنج نقطه دمایی از ۲۰ درجه سانتی گراد تا ۵۰ درجه سانتیگراد با

1- Brikman.1952
2- Krieger.1959
3- Dougherty.1959
4- Nielsen.1979
5- Batchelor.1977
6- Wang et al.1999
7- Azmi et al.2012



[ Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08 ]
[ DOR: 20.1001.1.20089813.1399.7.1.2.9 ]

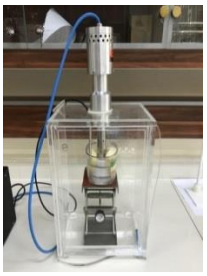
اختلاف ۵ درجه سانتیگراد، با استفاده از دستگاه ویسکومتر بروکفیلد مدل (DV3-TLV)، محاسبه شد. برای ثبات دمای آزمایش ها از حمام ساخت شرکت بروکفیلد مدل (TC-650 ) استفاده گردید. با استفاده از نتایج و مقادیر تجربی بدست آمده، مدل تجربی دو متغیره به منظور تخمین ویسکوزیته دینامیکی این نانوسیال با لحاظ کردن پارامترهای مورد بررسی و با عدم قطعیت قابل قبول در یافته ها، ارائه می گردد. در شکلهای (۲)، (۳) و (۴) نمایی از تجهیزات و در شکل (۵) نانوسیال اتیلن گلیکول- اکسید روی در قطر۲۰ نانومتر در کسر حجمی های مختلف نشان داده شده است.




**شکل ۱: تصاویر میکروسکوپ الکترونی عبوری مربوط به نانوذرات اکسید روی در قطرهای ۱۰ تا ۳۰**



**شکل۲: نمایی از دستگاه همزن مغناطیسی**



**شکل۳: نمایی از همزن آلتراسونیک**



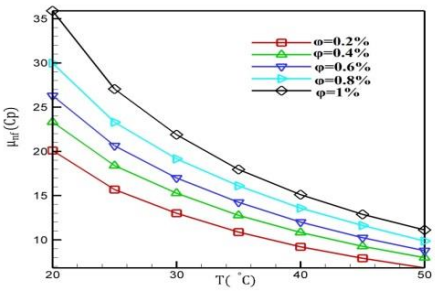
**شکل۴: نمایی از دستگاه های ویسکوزمتر بروکفیلد و حمام دمایی**



**شکل۵: نانوسیال اتیلن گلیکول- اکسیدروی در قطر ۲۰ نانومتر و کسرحجمی های مختلف**

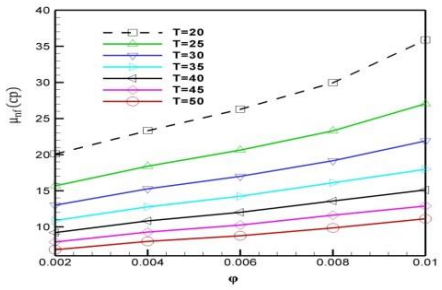
## ۴- نتایج و بحث

در این بخش به بررسی پارامترهای مختلف بر ویسکوزیته نانوسیال اتیلن گلیکول- اکسیدروی بر اساس داده های آزمایشگاهی از جمله دما و کسر حجمی در قطر ۲۰ نانومتر اکسیدروی پرداخته می شود. همانطور که در شکل(۵) مشاهده می شود، با افزایش دما ویسکوزیته دینامیکی نانو سیال در قطر ۲۰ نانومترکاهش می یابد، که این نشان دهنده تاثیرات کاهشی دما بر ویسکوزیته دینامیکی می باشد.




**شکل۵: تاثیر دما بر ویسکوزیته دینامیکی نانوسیال اتیلن گلیکول- اکسید روی در قطر ۲۰ نانومتر**

همچنین که از شکل(۶)، مشخص است در قطر ثابت ۲۰ نانومتر با افزایش کسر حجمی ویسکوزیته دینامیکی افزایش می یابد.




**شکل۶: تاثیر کسر حجمی بر ویسکوزیته دینامیکی نانوسیال اتیلن گلیکول- اکسیدروی در قطر ثابت ۲۰ نانومتر**

به منظور بدست آوردن مقدار ویسکوزیته دینامیکی نانوسیال اتیلن گلیکول- اکسیدروی رابطه ای همبستگی زیر بر حسب دما و کسر حجمی نانوذرات به کمک رگرسیون خطی و بکار گیری نرم افزار۲۳ Spss ارائه شده است، در این رابطه T دما نانوسیال و φ کسر حجمی نانوذرات می-باشد:



[ Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08 ]

[ DOR: 20.1001.1.20089813.1399.7.1.2.9 ]

$$\frac{\mu_{nf}}{\mu_{bf}} = 0.757 + 124.314\varphi - 11013.634\varphi^2 + 707204.744\varphi^3 - 0.001T + (3.802 * 10^{-7})T^3 \quad (۸)$$

مقدار $R^2$ که میزان پراکندگی رگرسیون به پراکندگی کل داده ها است برای رابطه (۷) برابر است با ۰.۹۹۳ می باشد، که هر چه میزان $R^2$ به ۱ نزدیک تر باشد، رابطه رگرسیون بهتری ارائه می دهد. میزان خطای نسبی مقادیر حاصل از مدل نسبت به نتایج آزمایشاهی از تقسیم خطای مطلق بر مقدار واقعی کمیت بدست می آید که معمولا بر حسب درصد نیز می‌توان بیان کرد و بدون بُعد است[۲۳].

$$\text{درصدخطای نسبی} = \frac{\left|\text{مقدارمدل} - \text{مقدارآزمایش}\right|}{\text{مقدارآزمایش}} \times 100 \quad (۹)$$

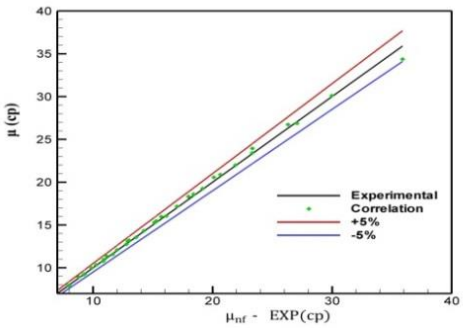
میانگین درصد خطای نسبی مدل فوق بر پایه رابطه (۹) برابر است با: ۱.۱۳۴

رابطه (۸) به عنوان یک رابطه جدید برای ویسکوزیته دینامیکی نانو سیال اکسید روی- اتیلن گلیکول با در نظر گرفتن اثرات دمای نانو سیال و کسر حجمی نانو در محدوده کسرحجمی، دما و قطر مشخص که در جدول (۱) نشان داده شده است، اعتبار دارد.

**جدول ۱: محدوده متغیرهای رابطه جدید**

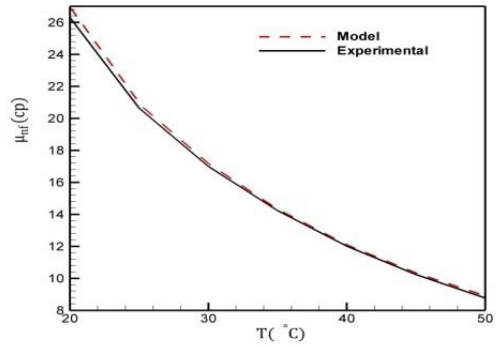
| متغییرها | نماد | واحد | محدوده |
|---|---|---|---|
| کسر حجمی | $\varphi$ | درصد | $0.2 \le \varphi \le 1$ |
| دما | T | ℃ | $20 \le T \le 50$ |
| قطر | d | nm | 20 |

همانطور که از شکل(۷) مشخص است، مقادیر بدست آمده از مدل که همان رابطه (۸) می باشد، در بازه نتایج آزمایشگاهی با انحراف ٪۵± قرار گرفته، که قابل قبول می باشد.



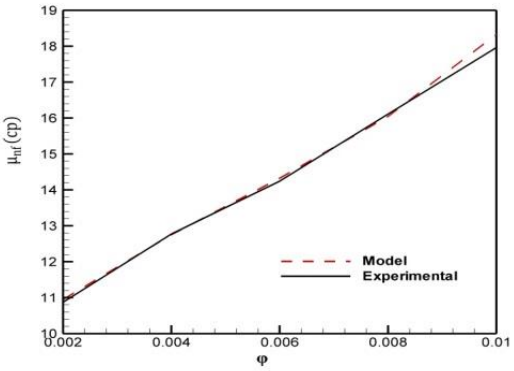

**شکل ۷: مقایسه ویسکوزیته دینامیکی نتایج آزمایشگاهی کار حاضر با نتایج مدل**

در این قسمت به مقایسه مدل بدست آمده از نتایج تجربی و نتایج آزمایشگاهی پرداخته شده است. مدل ارائه شده برای ویسکوزیته دینامیکی در دماهای مختلف برای نانوذره اکسیدروی در کسر حجمی ٪۰.۶ و قطر ذرات ۲۰ نانومتر با هم مقایسه شده و نتایج در شکل (۸) نشان داده شده است. می توان مشاهده کرد که روابط بدست آمده از تطابق رضایت بخشی برخوردار هستند.




**شکل ۸: نمودار مقایسه ویسکوزیته دینامیکی ارائه شده توسط مدل با نتایج آزمایشگاهی در دماهای مختلف**

همچنین مدلهای ارائه شده برای ویسکوزیته دینامیکی در کسر حجمی های مختلف برای نانوذره اکسیدروی در دمای ۳۵ درجه سانتی گراد و قطر ذرات ۲۰ نانومتر با هم مقایسه شده و نتایج در شکل (۹) نشان داده شده است. همانطور که از شکل مشخص است، مشخص است که مدل تطابق رضایت بخشی با نتایج آزمایشگاهی دارد.




**شکل ۹: نمودار مقایسه ویسکوزیته دینامیکی ارائه شده توسط مدل با نتایج آزمایشگاهی در کسر حجمی های مختلف**

## ۵- نتیجه گیری

در این پژوهش به مطالعه آزمایشگاهی ویسکوزیته دینامیکی نانوسیال اتیلن گلیکول- اکسیدروی پرداخته شد و پارامتر های دما، کسر حجمی در قطر ذرات ۲۰ نانومتر لحاظ شده است. در این تحقیق برای آماده سازی نانوسیال اتیلن گلیکول-اکسید روی از روش دومرحله ای استفاده شد و به منظور آماده سازی نانوسیال به وسیله تعلیق کردن نانوذرات در



[ Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08 ]

[ DOR: 20.1001.1.20089813.1399.7.1.2.9 ]

سیال پایه، از دستگاه مخصوص همزن آلتراسونیک استفاده شد. و با استفاده از ویسکومتر بروکفیلد مدل (DV3TLV) ویسکوزیته دینامیکی نانوسیال بررسی گردید. سپس با استفاده از نتایج و مقادیر تجربی بدست آمده، مدل های تجربی دو متغیره، به منظور تخمین ویسکوزیته دینامیکی با لحاظ کردن پارامترهای مورد بررسی در این آزمایش ارایه شد و در انتها حاشیه انحراف مدل پیشنهادی با داده های تجربی موجود مورد سنجش قرار گرفت. تاثیر دما بر ویسکوزیته دینامیکی نانو سیال نشان می دهد که افزایش دما باعث کاهش ویسکوزیته دینامیکی نانوسیال می شود و تاثیر کسر حجمی بر ویسکوزیته دینامیکی نانوسیال در قطر ۲۰ نانومتر می تواند منجر به افزایش ویسکوزیته دینامیکی نانوسیال شود. در آخر نیز مدل پیشنهادی می تواند ویسکوزیته دینامیکی نانوسیال اتیلن گلیکول- اکسید روی را به خوبی تخمین زد.

## فهرست علامت‌ها

### علائم انگلیسی

| | |
|---|---|
| قطر نانو ذره، nm | $d_p$ |
| دمای نانو سیال، ℃ | T |

### علائم یونانی

| | |
|---|---|
| ویسکوزیته دینامیکی نانوسیال، cP | $\mu_{nf}$ |
| ویسکوزیته دینامیکی سیال پایه، cP | $\mu_{bf}$ |
| کسر حجمی، درصد | $\varphi$ |

## مراجع


[1] Choi. S, Enhancing thermal conductivity of fluids with nanoparticles, Developments Applications of Non-Newtonian Flows, Vol. 231, No. 66, pp. 99-105, 1995.

[2] Available from: http://www.futuretimeline.net/subject/nanotechnology.htm

[3] Kazem Bashirnezhad, Shahab Bazri, Mohammad Reza Safaei, Marjan Goodarzi, Mahidzal Dahari, Omid Mahian, Ahmet SelimDalkılıça, Somchai Wongwises, 2016, Viscosity of nanofluids: A review of recent experimental studies, International Communications in Heat and Mass Transfer, vol.73,114–123.

[4] Masuda.H,. Ebata. A, and K. Teramae, "Alteration of thermal conductivity and viscosity of liquid by dispersing ultra-fine particles. Dispersion of Al2O3, SiO2 and TiO2 ultra-fine particles," 1993.

[5] Pak. B. C and Y. I. Cho, "Hydrodynamic and heat transfer study of dispersed fluids with submicron metallic oxide particles," Experimental Heat Transfer an International Journal, vol. 11, pp. 151-170, 1998.

[6] Wei Yu, Huaqing Xie, Lifei Chen, Yang Li, 2009, Investigation of thermal conductivity and viscosity of ethyleneglycol based ZnO nanofluid, Thermochimica Acta, vol.491,92-96.

[7] Pastoriza-Gallego, M.J., Lugo, L., Cabaleiro, D., Legido, J.L. , Pieiro, M.M., 2014,Thermophysical profile of ethylene glycol-based ZnO nanofluids, J. Chem. Thermodynamics, vol.73,23–30.

[8] Mahbubul, I.M., Saidur, R., Amalina, M.A., 2012, Latest developments on the viscosity of nanofluids, International Journal of Heat and Mass Transfer, vol.55,874–885.

[9] SyamSundar,L., Sharma,K.V., Naik,M.T., ManojK.Singh, 2013,Empirical and theoretical correlate-onson viscosity of nanofluids: A review,Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol.25,670–686.

[10] Mohammad Hemmat Esfe, Seyfolah Saedodin, 2014, An experimental investigation and new correlation of viscosity of ZnO–EG nanofluid at various temperatures and different solid volume fractions, Experimental Thermal and Fluid Science, vol.55,1–5.

[11] Haoran Li, Yurong He, Yanwei Hu, Baocheng Jiang, Yimin Huang, 2015, Thermophysical and natural convection characteristics of ethylene glycol and water mixture based ZnO nanofluids, International Journal of Heat andMass Transfer, vol.91,385–389.

[12] M. Naik and L.Sundar, Investigation into Thermophysical Properties of Glycol based CuO Nanofluid for Heat Transfer Applications. World Academy of Science, Engineering and Technology 59 2011.

[13] Li. Q, Yimin Xuan, Jian Wang, “ Experimental investigations on transport properties of magnetic fluids. “,Experimental Thermal and Fluid Science 30 (2005) 109–611.

[14] O. M. T. Yiamsawas, A. Selim Dalkilic, S. Kaewnai, S. Wongwises, Experimental studies on the viscosity of TiO2 and Al2O3 nanoparticles suspended in a mixture of ethylene glycol and water for high temperature applications, Applied Energy, Vol. 111, No. 1, pp. 40-45, 2013.

[15] H. Eshgarf, M. Afrand, M. Hemmat Esfe, Experimental investigation of the effects of temperature and nanoparticles volume fraction on the viscosity of non-Newtonian hybrid


[ Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08 ]

[ DOR: 20.1001.1.20089813.1399.7.1.2.9 ]

nanofluid, Modares Mechanical Engineering, Vol. 16, No. 3, pp. 98-104, 2016.

[16] Brinkman, H.C., The viscosity of concentrated suspensions and solutions. The Journal of Chemical Physics, 1952. 20(4): p. 571-581.

[17] Krieger, I.M. and T.J. Dougherty, A mechanism for non-Newtonian flow in suspensions of rigid spheres. Transactions of The Society of Rheology, 1959. 3(1): p. 137-152.

[18] Nielsen, L.E., Generalized equation for the elastic moduli of composite materials. Journal of Applied Physics, 1970. 41(11): p. 4626-4627.

[19] Batchelor, G.K., The effect of Brownian motion on the bulk stress in a suspension of spherical particles. Journal of Fluid Mechanics, 1977. 83(01): p. 97-117.

[20] Wang, X., X. Xu, and S.U.S. Choi, Thermal conductivity of nanoparticle-fluid mixture. Journal of thermophysics and heat transfer, 1999. 13(4): p. 474-480.

[21] Azmi,W.H., Sharma, K .V, Rizalman Mamat, Alias, A.B.S., Izan Izwan Misnon, 2012, Correlations for thermal conductivity and viscosity of water based nanofluids, 1st International Conference on Mechanical Engineering Research, vol.36,012029.

[22] Haddad, Z., et al., Natural convection in nanofluids: Are the thermophoresis and Brownian motion effects significant in nanofluid heat transfer enhancement International Journal of Thermal Sciences, 2012. 57: p. 152-162.

[۲۳] مقدمه‌ای بر اصول اولیه‌ی محاسبه خطا و اندازه‌گیری گردآورنده و نویسنده: علی معتضدی فرد اردیبهشت ۱۳۹۴ انجمن فیزیک ایران.

[ Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08 ]

[ DOR: 20.1001.1.20089813.1399.7.1.2.9 ]