



## مدلی جدید برای لزجت دینامیکی نانوسیال نانولوله‌های کربنی چندجداره (MWCNTs) – اتیلن-گلیکول

محسن برات‌پور<sup>۱\*</sup>، آرش کریمی‌پور<sup>۲</sup> و سیف‌الله سعدالدین<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup> دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مکانیک، واحد خمینی‌شهر، دانشگاه آزاد اسلامی، خمینی‌شهر/اصفهان، ایران

<sup>۲</sup> استادیار، گروه مهندسی مکانیک، واحد نجف‌آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف‌آباد، ایران

<sup>۳</sup> دانشیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۴/۰۷/۱۴؛ تاریخ بازنگری: ۱۳۹۴/۰۸/۳۰؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۵/۰۴/۱۲

### چکیده

این مقاله به بررسی آزمایشگاهی اثر دما و کسر حجمی و ارایه مدلی جدید برای رابطه لزجت دینامیک نانوسیال اتیلن‌گلیکول-نانولوله‌های کربنی چندجداره می‌پردازد. لزجت نانولوله‌های کربنی چندجداره به قطر ۱ تا ۲ نانومتر در اتیلن‌گلیکول در دمای ۳۰ تا ۶۰ درجه سانتی‌گراد و در کسرهای حجمی ۰/۰۲۵ تا ۰/۳ با استفاده از ویسکومتر محاسبه می‌شود. ویسکومتر از نوع بروکفیلد و مدل DV-I Prime است. مشاهده می‌شود که با افزایش دما، لزجت کاهش می‌یابد و در کسرهای حجمی بالا نانوسیال خاصیت غیر نیوتنی پیدا می‌کند. چون تاکنون مطالعاتی در مورد این نانوسیال صورت نگرفته، رابطه‌ای جدید برای اولین بار در مورد لزجت بدست می‌آید و مدل‌های انیشتین و بچلر با روابط تجربی مقایسه می‌شود و علاوه بر مشاهده مشابهت‌ها، فرمولی جداگانه برای حالت نیوتنی ارایه می‌شود.

**کلمات کلیدی:** نانوسیال؛ لزجت دینامیکی؛ نانولوله‌های کربنی چندجداره؛ سیال اتیلن‌گلیکول.

## A New Model for Dynamic Viscosity of an MWCNTs-EG Nanofluid

M. Baratpour<sup>1\*</sup>, A. Karimipour<sup>2</sup>, S. Saedodin<sup>3</sup>

<sup>1</sup> MSc Student, Department of Mechanical Engineering, Khomeinishahr Branch, Islamic Azad University, Khomeinishahr/Isfahan, Iran.

<sup>2</sup> Assis. Prof., Department of Mechanical Engineering., Najafabad Branch, Islamic Azad University, Najafabad, Iran.

<sup>3</sup> Assoc. Prof., Faculty of Mechanical. Engineering., Semnan University, Semnan, Iran.

### Abstract

This work is an experimental study of the temperature and volume fraction effects, which provides a new model for the nanofluid viscosity of MWCNTs-EG. The MWCNT viscosity with a diameter between 1 and 2 nm in EG is calculated at 30 to 60 °C and the volume fractions of 0.025 to 0.3 using a viscometer. The type of viscometer is Brookfield, and its model is DV-I Prime. It was observed that the viscosity decreased, while the temperature increased, and at high volume fractions of the nanofluids, it showed non-Newtonian properties. Since no study has yet been carried out on this nanofluid, it is for the first time that a new equation about viscosity is obtained. The Einstein and Bachelor models are compared with the empirical relationships, and also to observe the similarities, a new Newtonian formula is offered.

**Keywords:** Nanofluid; Dynamic Viscosity; MWCNTs; EG.

## ۱- مقدمه

کوچک سازی سیستم‌های انتقال حرارت از یک سو و افزایش روز افزون لزوم شار حرارتی بالا در تجهیزات از سوی دیگر، نیاز به انتقال حرارت در زمان کوتاه و با شدت بالا را ضروری می‌سازد. مطالعات بسیار زیادی جهت افزایش شدت انتقال حرارت در تجهیزات صورت گرفته است که از میان آن‌ها می‌توان به افزایش سطوح حرارتی (پره‌ها)، لرزش سطوح حرارتی و ... اشاره کرد. این روش‌ها به سختی می‌تواند از عهده تقاضای زیاد انتقال حرارت در فرآیندهایی شامل، تراشه‌های الکترونیکی، سیستم‌های لیزری و تجهیزات با انرژی بالا برآیند؛ بنابراین یک نیاز فوری به مفاهیم جدید و بدیع جهت افزایش شدت انتقال حرارت وجود دارد. بعضی محققان سعی کرده‌اند تا ذرات نانو را داخل سیالات معلق سازند تا محیط‌های انتقال حرارت موثرتری ایجاد کنند. چوی (Choi) [۱]، اولین کسی است که عبارت نانوسیال را برای سیالات حاوی ذرات معلق نانو به کار برد و به ضریب هدایت حرارتی بالای این سیالات اشاره کرد. گروه جدیدی از سیالات که قادر به انتقال حرارت باشند، نانوسیال نامیده می‌شوند. نانوسیال عبارت است از: سیال حاوی نانوذرات، نانوسیال، دارای دو جزء اصلی است:

الف- سیال پایه: منظور از سیال پایه، سیالی است که نانوذره به آن، افزوده خواهد شد. سیال پایه، یکی از انواع سیالات حامل انرژی خواهد بود. مانند آب، اتیلن‌گلیکول و روغن موتور.

ب- نانوذره: نانو ذرات مورد استفاده می‌توانند انواع نانو ذرات اکسید آلومینیوم یا اکسیدمس بوده، یا نانو ذرات فلزی مانند مس باشند. نانو لوله‌های کربنی نیز از این جمله‌اند.

کشف و یا ساخت یک سیال حامل انرژی با ضریب رسانایی بالا در کنار تغییر هندسه، شرایط مرزی و ... برای بهبود و افزایش میزان انتقال حرارت، همواره یکی از دغدغه‌ها و زمینه‌هایی بوده است که متخصصان و مهندسان را به خود مشغول کرده است. طرح‌ها و روش‌های گوناگونی برای نیل به این منظور پیشنهاد گردیده است که از آن جمله، افزودن ذرات میکرو یا بزرگ‌تر، به سیالات بوده است؛ زیرا ضریب رسانایی جامدات به مراتب از ضریب رسانایی سیالات بیشتر است. مطالعات و پژوهش‌های تجربی و نظری زیادی تقریباً از صد سال پیش به منظور بررسی مخلوط‌های سیال- جامد

صورت گرفته است؛ اما به دلیل بزرگی ذرات جامد این مخلوط‌ها و چگالی بالای آن‌ها، رسوب این ذرات (ناپایداری)، اجتناب ناپذیر بوده است. ناپایدار بودن این ذرات، سبب مقاومت بیشتر در برابر جریان شده، حتی منجر به خوردگی می‌شود؛ بنابراین استفاده از ذرات درشت در جریان از توجیه علمی مناسبی برخوردار نیست. چوی در سال ۱۹۹۳ [۱]، با توجه به پیشرفت تکنولوژی، افزودن مواد فلزی با ابعاد نانو برای پخش سیالات عامل معمولی مانند آب، اتیلن‌گلیکول و روغن صنعتی را پیشنهاد کرد. وی مخلوطی از سیال پایه و ذرات با ابعاد نانو را نانوسیال نامید. در این تحقیق برای تولید نانوسیال، ابتدا پودر نانو ذره نانولوله کربنی (MWCNTs) تهیه شده و با سیال پایه اتیلن‌گلیکول (EG) مخلوط شده، نانوسیال به وجود آمده است. در این روش، چسبندگی ذرات تا حدودی گریزناپذیر است که در بسیاری موارد با استفاده از انرژی کوچکی زنجیره‌ها شکسته شده، از تشکیل خوشه‌ها جلوگیری می‌شود. یکی از روش‌های اعمال انرژی، استفاده از امواج فراصوت است. از نانوسیال می‌توان برای بهبود انتقال حرارت و افزایش راندمان در سیستم‌های مختلف انرژی همانند، خنک‌کاری اتومبیل‌ها و موارد مشابه استفاده کرد.

سینگ و همکاران [۲]، در آزمایشگاه آرگون آمریکا دریافتند که استفاده از نانوسیال با هدایت حرارتی بالا در رادیاتورها می‌تواند سبب کاهش سطح مقطع جلوی اتومبیل به اندازه ۱۰٪ شود. زنگ و همکارانش [۳]، ذرات اکسیدمس و اکسیدآلومینیوم را به روغن سیستم انتقال قدرت یک ماشین اضافه کردند. آن‌ها آزمایش را در سرعت‌های مختلف موتور انجام دادند. نتایج، حاکی از بهبود آشکار انتقال حرارت در این سیستم بود. کیم و همکاران [۴]، در دانشکده علوم و مهندسی اتمی دانشگاه صنعتی ماساچوست (MIT)، به امکان سنجی استفاده از نانوسیال برای بهبود کارایی سیستم‌هایی از نیروگاه اتمی پرداختند که با آب خنک می‌شوند.

نگوین و همکاران [۵]، بهبود خواص انتقال حرارتی و رفتار نانوسیال اکسیدآلومینیوم/آب را در یک سیستم سرمایش مدار بسته برای خنک‌کاری میکروپردازنده‌ها با دیگر ابزار الکترونیکی، مورد ارزیابی قرار دادند.

یکی از زمینه‌های مرتبط با نانوسیال که محققان زیادی را به سمت خود جلب کرده است، تعیین خواص تغییر یافته سیال در اثر حضور نانو ذرات است. با توجه به تغییر غیر-

جدول ۱- مشخصات شیمیایی و فیزیکی اتیلن‌گلیکول

دمای اشتعال	غلظت اشباع	نقطه ذوب	جرم مولی	چگالی	مقدار PH	نقطه جوش	فشار تبخیر
۴۱۰	۰/۱۵	-۱۳	۶۲/۰۷	۱/۱۱	-۶ ۷/۵	۱۹۷/۶	۰/۰۵۳
C°	g/m <sup>3</sup>	C°	g/mol	g/cm <sup>3</sup>		C°	hpa

برای آماده‌سازی نانوسیال و تعلیق پایدار نانو ذرات درون سیال پایه، از دستگاه همزن مخصوص آلتراسونیک استفاده می‌کنیم. همچنین مقدار PH محلول در هر حالت، کنترل می‌شود. پایداری نانوسیال تولیدی فقط با تست PH صورت پذیرفته است. بدون تعلیق مناسب ذرات پس از مدتی ته‌نشین شده، نانوسیال فاقد خواص پایدار می‌شود. نانولوله‌های کربنی با درصد کسر حجمی ۰/۰۲۵، ۰/۰۵، ۰/۰۷۵، ۰/۱، ۰/۲ و ۰/۳ درصد به اتیلن‌گلیکول اضافه می‌شوند. نانولوله‌های کربنی از کمپانی (US Research Nanomaterial, Inc) خریداری شده است. یکی از موارد مهم در مبحث نانوسیال، پایداری آن است. برای به دست آوردن نانوسیالات پایدار، تعدادی روش، از قبیل عملیات فیزیکی یا شیمیایی توصیه شده است که شامل، اضافه کردن مواد فعال سطحی، اصلاح ذرات معلق یا استفاده از نیروهای قدرتمند در نانو ذرات خوشه‌ای هستند.

در جهت دیگر رخ دادن ناخالصی، خوشه‌ای شدن و ته‌نشینی، باعث کاهش کاراکترهای سوسپانسون مانند هدایت حرارتی، لزجت و افزایش گرمای ویژه می‌شود؛ ولی به طور کلی، برای به دست آوردن یک سوسپانسیون با کیفیت بالا، ذرات کوچک باید به این دو اصل پیوندند:

- (۱) اصل پخشش: ذرات در محیط مایع پراکنده شده‌اند.
- (۲) اصل زتاپتانسیل: مقدار مطلق زتاپتانسیل، در میان ذرات باید به مقدار بزرگ باشد.

استانداردی برای به رسمیت شناختن، بالاترین مخلوط ترکیبی، وجود ندارد. بمنظور پایداری نانوسیال و جلوگیری از توده شدن ذرات در سیال محلول حدود ۷ ساعت توسط امواج آلتراسونیک موجهی شده است. بدین ترتیب، محلول پایداری داریم که دچار ته نشینی ذرات نشده PH، نانوسیال بوسیله دستگاه PH سنج (HANNA, HI 83141) خوانده شد. اندازه‌گیری‌ها در هر مرحله در PH مساوی با مرحله قبل خوانده می‌شد.

طبیعی خواص نانوسیال، بخصوص ضریب انتقال حرارت هدایتی و لزجت دینامیکی، تلاش‌های زیادی در جهت شناخت مکانیزم‌هایی که سبب این اختلاف‌ها می‌شوند و دستیابی به رابطه مناسب برای تعیین این خصوصیات صورت گرفته است. لی و ژوان [۶]، بیشتر ذرات فلزی و اکسید فلزی مانند Cu، CuO، Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>، TiO<sub>2</sub>، ... و نانولوله‌های کربنی به همراه سیالاتی مانند آب و اتیلن‌گلیکول را مورد مطالعه قرار داده‌اند. گزارش‌های متفاوتی در رابطه با استقلال لزجت از دما در نانوسیال‌ها وجود دارد. به‌عنوان مثال دانگتونسک [۷]، افزایش دما و افزایش لزجت را گزارش داده، اما لی و همکاران [۸] خلاف آن را گزارش می‌دهد. هیچ مقاله‌ای در رابطه با لزجت دینامیک نانوسیال اتیلن‌گلیکول- نانولوله‌های کربنی وجود نداشته، این مقاله اولین در نوع خود است.

در تحقیق حاضر، از سیال پایه اتیلن‌گلیکول به‌عنوان سیال پایه استفاده شده است و ذرات نانولوله‌های کربنی به‌عنوان درصد‌های متفاوتی از کسر حجمی در نانوسیال موجود است. این آزمایش در ۶ کسر حجمی ۰/۰۲۵، ۰/۰۵، ۰/۰۷۵، ۰/۱، ۰/۲ و ۰/۳ انجام شده است. ظروف محتوی نانوسیال که شامل، پودر نانولوله کربنی چند جداره و اتیلن-گلیکولاست را داخل بشر ۶۰۰ میلی‌لیتر ریخته و روی دستگاه همزن آلتراسونیک به مدت ۷ ساعت گذاشته، تا نانوسیال به صورت پایدار به دست آید. ضمناً قبل از انجام آزمایش نانوسیال موجود به مدت ۱۵ دقیقه موجهی شده است. دمای انجام آزمایش نیز بین ۳۰ تا ۶۰ درجه سانتی‌گراد است. بدین ترتیب با متفاوت بودن دما و درصد کسر حجمی می‌توان فرمول‌هایی با این دو پارامتر بدست آورد که قابل مقایسه با فرمول‌های مدل‌های انیشتین [۹] و بچلر [۱۰] می‌باشند. با بررسی مقالات گوناگون مشاهده شد که لزجت نانوسیالات متفاوتی تاکنون به شکل آزمایشگاهی مورد تحقیق و بررسی قرار گرفته، ولی برای اولین بار است که این نانوسیال مورد بررسی قرار گرفته، فرمولی جهت لزجت دینامیکی نانوسیال در حالت نیوتنی ارائه می‌شود.

## ۲- مشخصات نانو سیال

در مقاله حاضر، رشته‌های نانولوله‌های کربنی در اتیلن‌گلیکول بررسی می‌شود. مشخصات شیمیایی و فیزیکی اتیلن‌گلیکول مرک آلمان در جدول ۱ داده شده است. [۱۱]

معادلات متعددی روی سوسپانسیون ذرات کروی جامد در یک سیال ویسکوز برای غلظت‌های بالاتر برگرفته شده از فرمول انیشتین، توسعه داده شده است. برای مثال، برینکمن [۱۲] رابطه انیشتین را برای سوسپانسیون‌ها با تراکم بیشتر توسعه داده است:

$$\mu_{nf} = \mu_{bf}(1 - \phi_p)^{2.5} \quad (2)$$

تأثیر حرکت براونی بر لزجت موثر در یک سوسپانسیون ذرات کروی توسط بچلر [۱۰]، مورد مطالعه قرار گرفته است. برای سوسپانسیون‌های مشابه لزجت موثر به صورت رابطه (۳) ارائه شده است:

$$\mu_{nf} = (1 + 2.5\phi_p + 6.2\phi_p^2)\mu_{bf} \quad (3)$$

در فرمول‌های بالا  $\mu_{bf}$ ، لزجت سیال پایه،  $\mu_{nf}$ ، لزجت نانوسیال و  $\phi_p$ ، درصد کسر حجمی است. لزجت نانوسیال نانولوله‌های کربنی - اتیلن‌گلیکول بوسیله ویسکومتر بروکفیلد (Ivdv-ip) ساخته شده توسط لابراتوار مهندسی بروکفیلد واقع در آمریکا) اندازه‌گیری شده است.

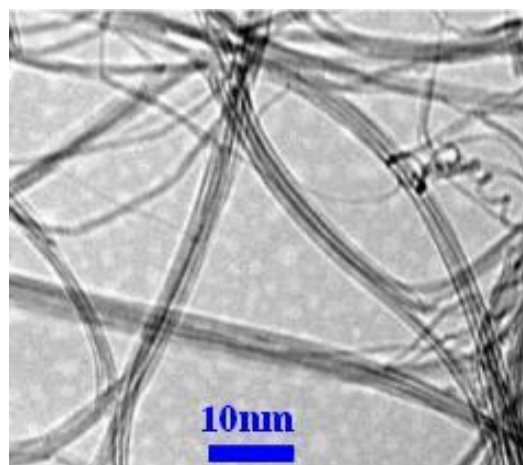
این دستگاه، دارای دقت  $\pm 1\%$  بوده، در دمای اتاق با گلیسرین و اتیلن‌گلیکول تست و صحت سنجی شده است. تست برای هر کسر حجمی دوبار صورت پذیرفته و متوسط نتایج برای بررسی در مقاله ثبت شده است.

مقایسه ویسکوزیته نانوسیال با مدل انیشتین و بچلر، فقط برای این انجام شده است که اختلاف بین این مدل‌ها با نانوسیال موجود نشان داده شود. مدل‌های انیشتین و بچلر برای ذرات کروی آن هم با خطای زیاد، مورد استفاده قرار می‌گیرد. لازم بذکر است که هیچ مقاله‌ای در رابطه با لزجت دینامیک نانوسیال اتیلن‌گلیکول - نانولوله‌های کربنی وجود نداشته، این مقاله اولین در نوع خود است.

مقایسه بین مدل‌های تئوری و اعداد اندازه‌گیری شده در آزمایشگاه در کسرهای حجمی متفاوت و دماهای مختلف، در شکل ۲ نمایش داده شده است.

با توجه به اینکه نانوسیال در کسرهای حجمی بالاتر از ۰/۰۷۵ دارای رفتار غیرنیوتنی بود، در شکل ۲ فقط اعداد رفتار نیوتنی نانوسیال گزارش شده است. همین نمودار نشان می‌دهد که فرمول‌های کلی انیشتین و بچلر، جوابگوی لزجت دینامیک نانوسیال جدید نانولوله‌های کربنی - اتیلن‌گلیکول نمی‌باشد. لازم بذکر است که نانوسیال در کسرهای حجمی

در این مقاله، از تصاویر میکروسکوپ عبوری الکترونی (TEM) برای درک ساختار نانولوله‌های کربنی استفاده می‌شود. شکل ۱، تصویر نانو ذرات نانولوله‌های کربنی را نشان می‌دهد. این تصویر، توسط کارخانه ارایه شده است و مربوط به نانو ذرات مورد استفاده در این مقاله است.



شکل ۱- تصویر TEM نانولوله‌های

همچنین تفسیر XRD ارایه شده از سازنده نانو پودر، بیانگر استفاده از MWCNTs برای انجام این تحقیق است.

### ۳- اندازه‌گیری لزجت دینامیک

فرمول‌های متفاوتی برای مشخص شدن لزجت نانوسیال در کسرهای حجمی متفاوت وجود دارد. فرمول‌هایی مانند، فرمول انیشتین، بچلر و وانگ که در هر کدام از این فرمول‌ها با داشتن لزجت دینامیک سیال پایه و درصد کسر حجمی، می‌توان لزجت نانوسیال را تقریب زد.

این روابط برای محاسبه لزجت نانوسیال با ذرات کروی و کسر حجمی کمتر از ۵٪ استفاده می‌شوند.

برای نانوسیال حاوی نانو لوله‌های کربنی، هنوز هیچ فرمولی در رابطه با لزجت نانوسیال بطور مشخص تعریف نشده است.

انیشتین [۹]، توانست به رابطه‌ای کلی برای محلول ذرات جامد کروی و سیال پایه در کسرهای حجمی کمتر از ۵٪ برسد. این معادله به شرح رابطه (۱) است:

$$\mu_{nf} = (1 + 2.5\phi_p)\mu_{bf} \quad (1)$$

همچنین تنش برشی عبارت است از:

$$\tau = \mu \frac{du}{dy} \quad (5)$$

لزجت سینماتیکی عبارت است از

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (6)$$

لزجت، از اصطکاک داخلی لایه‌های سیال ایجاد می‌شود. این اتفاق زمانی می‌افتد که تعداد فوق‌العاده زیادی برخورد بین مولکول‌ها ایجاد شود.

مطالعات مربوط به لزجت در نانو سیالات علیرغم اهمیت ویژه این موضوع، نسبت به بررسی‌های صورت گرفته روی نانو سیالات به عوامل مختلفی مانند، روش‌های پراکندگی، نحوه تعلیق نانو ذرات و همچنین پایدار کردن سوسپانسیون-های نانوسیال وابسته است. همچنین میزان اثر نانو ذرات بر لزجت سیال پایه، به مقدار و شدت برش وارد بر سیال بستگی دارد، به گونه‌ای که با افزایش میزان برش وارد بر سیال، لزجت نانوسیال به شدت به لزجت سیال پایه متمایل می‌شود. علاوه بر این‌ها، نتایج مطالعات نشان می‌دهد که وابستگی دمایی لزجت نانوسیال نیز، دارای اهمیت است.

#### ۵- شرح آزمایش برای اندازه‌گیری لزجت در این

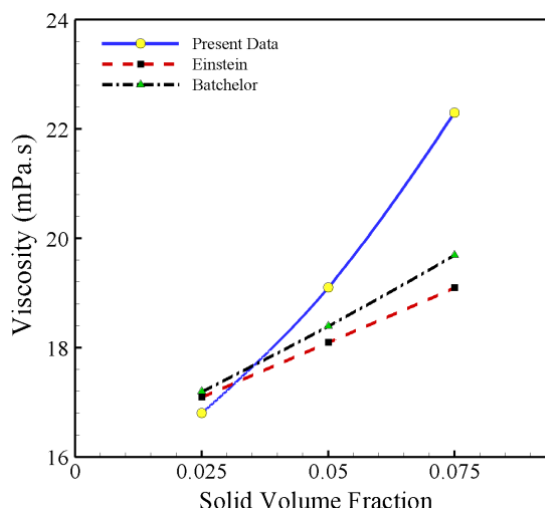
##### مقاله

در این تحقیق، برای اندازه‌گیری لزجت دینامیکی نانوسیال نانولوله‌های کربنی چند جداره/اتیلن‌گلیکول از ویسکومتر نوع دورانی، مدل ویسکومتر بروکفیلد استفاده شده است. در شروع آزمایش، ابتدا مقدار جرم‌های مورد استفاده محاسبه می‌شود.

این آزمایش در ۶ کسر حجمی ۰/۰۲۵، ۰/۰۵، ۰/۰۷۵، ۰/۱، ۰/۲ و ۰/۳ انجام شده است. ظروف محتوی نانوسیال که شامل پودر نانولوله کربنی چند جداره و اتیلن‌گلیکول است را داخل بشر ۶۰۰ میلی‌لیتر ریخته، روی دستگاه هم زن آلتراسونیک به مدت ۷ ساعت گذاشته (شکل ۴)، تا نانوسیال به صورت پایدار به دست آید. ضمناً قبل از انجام آزمایش نانوسیال موجود به مدت ۱۵ دقیقه موج‌دهی شده است.

باید در نظر داشت که برای اندازه‌گیری لزجت با حجم مایعات کم در دستگاه UL Adaptor در دماهای مختلف و تنظیم دما، نیاز به حمام آب است. دماهای مورد استفاده در

بالا رفتار غیرنیوتنی از خود نشان داد و لزجت نانوسیال به طرز شگفت‌آوری افزایش پیدا می‌کرد.



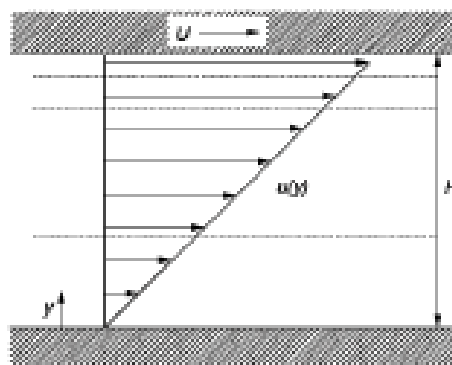
شکل ۲- مقایسه بین مدل‌های تئوری و نتایج آزمایشگاهی

#### ۴- لزجت دینامیکی

پارامتر لزجت را می‌توان، از مقدار تنش برشی روی دیواره در سیال لزج، در یک لایه نازک مابین دیواره‌ها مانند شکل ۳ محاسبه کرد.

با توجه به خطی بودن سرعت و صفر بودن مقدار سرعت روی دیواره پایین و سرعت ماکزیمم  $U$  در عرض  $H$ ، به رابطه کلی رابطه (۴) می‌رسیم:

$$u(y) = \frac{y}{H} U \quad (4)$$



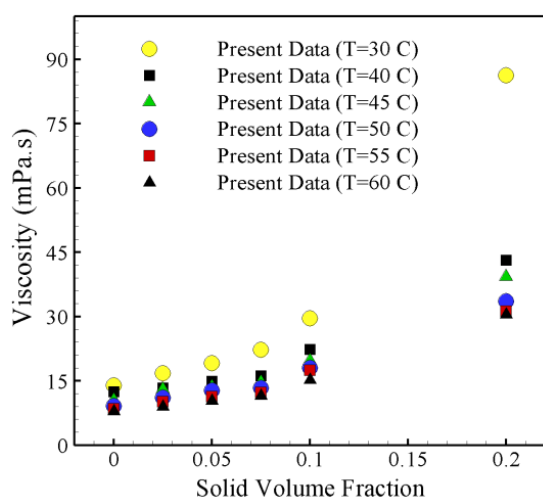
شکل ۳- گرادبان سرعت و همچنین تنش برشی برای یک سیال نیوتنی

گارد: برای محافظت از اسپیندل در بدنه دستگاه تعبیه شده است.

سنسور دما: لزجت به دما بستگی زیادی دارد. اصولاً دمای بالا لزجت را پایین نشان می‌دهد. پس باید به محدوده دما در نمونه‌های آنالیز توجه کرد.

#### ۷- افزایش لزجت در کسر حجمی‌های مختلف

در این تحقیق، اثر کسر حجمی در محدوده ۰/۰۲۵ تا ۰/۳، در دماهای مختلف در محدوده ۳۰ تا ۶۰ درجه سانتی‌گراد روی لزجت در نانوسیال نانولوله‌های کربنی چند جداره/ اتیلن‌گلیکول بررسی شده است.



شکل ۵- افزایش لزجت در کسر حجمی‌های مختلف در دماهای ۳۰ تا ۶۰ درجه سانتی‌گراد

نتایج نشان می‌دهد با افزایش کسر حجمی، لزجت افزایش می‌یابد؛ همانطور که در شکل ۵ مشاهده می‌شود، در دمای ۳۰ درجه سانتی‌گراد در نانوسیال نانولوله‌های کربنی چند جداره/ اتیلن‌گلیکول با افزایش کسر حجمی از ۰/۰۲۵ تا ۰/۳ درصد حجمی لزجت نانوسیال افزایش می‌یابد. لازم بذکر است که در کسر حجمی‌های بالاتر از ۰/۰۷۵، یعنی ۰/۱، ۰/۲، ۰/۳ و ۰/۴ درصد، لزجت نانوسیال از حالت خطی خارج شده، غیرخطی می‌شود. عدد لزجت در کسر حجمی ۰/۳ درصد در دمای ۳۰ درجه سانتی‌گراد توسط دستگاه نشان داده نشد و دستگاه در نمودارهای کنونی، کمترین مقدار لزجت را نشان داده است که همین کمترین مقدار هم نشان می‌دهد که با

این تحقیق، ۳۰، ۳۵، ۴۰، ۴۵، ۵۰، ۵۵ و ۶۰ درجه سانتی-گراد است. آب درون حمام آب را ۶۰°C رسانده، سپس آب را به دستگاه UL Adaptor به صورت رفت و برگشت پمپاژ می-شود. برای دماهای پایین‌تر هم دمای آب داخل حمام آب، به دمای دلخواه رسانده می‌شود. بعد از رسیدن آب به دمای مورد نیاز آزمایش، نانوسیال را داخل دستگاه UL Adaptor ریخته و با استفاده از دستگاه اندازه‌گیری بروکفیلد، آزمایش در دماهای مختلف انجام می‌شود.



شکل ۴- دستگاه همزن آلتراسونیک استفاده شده در این آزمایش

نانو پودر از معتبرترین تولیدکنندگان آمریکایی محصول کارخانجات US NANO RESEARCH تولیدکننده پودر نانوذرات است. اتیلن‌گلیکول هم ساخت کارخانجات MERCK آلمان است.

در ادامه مشخصات اتیلن‌گلیکول استفاده شده در پروژه آمده است.

1 liter=1.11 kg  
Density=1.112 – 1.114 g/cm<sup>3</sup>  
Water= less 0.3 %

#### ۶- مشخصات دستگاه بروکفیلد

ویسکومتر شامل قسمت‌های زیر است:

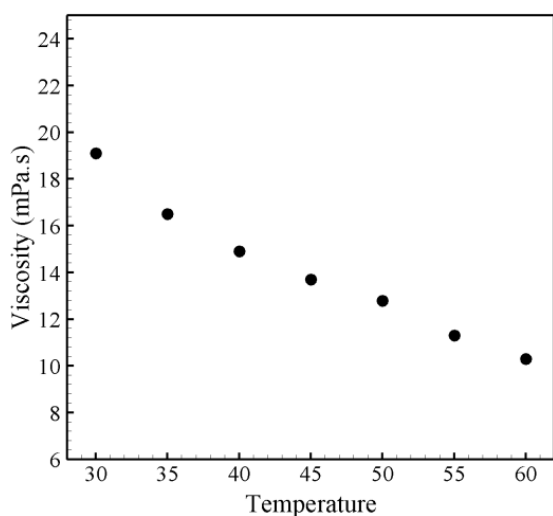
اسپیندل: محورهای چرخشی به نام اسپیندل وجود دارد که هرچند نمونه، لزجت بالاتری داشته باشد، شماره اسپیندل بالاتر می‌رود. چرخش اسپیندل در نمونه به سرعت و سایز آن ظرف حاوی نمونه و به میزان گشتاور بستگی دارد.

لازم بذکر است که در کسرهای حجمی ۰/۱، ۰/۲ و ۰/۳ نانوسیال رفتار غیرخطی از خود نشان داد. چون نانوسیال نانولوله‌های کربنی - اتیلن‌گلیکول در کسرهای حجمی ۰/۱، ۰/۲ و ۰/۳، رفتار غیرخطی از خود نشان داد. به همین دلیل، نمی‌توان با فرمول‌های کلی لزجت مقایسه‌ای انجام داد. در کسرهای حجمی بالاتر از ۰/۰۷۵ درصد مقادیر لزجت چنان اعداد بالایی می‌شود که در نمودار به صورت یکجا نمی‌توان نمایش داد. قبلاً توضیح داده شد که در کسرهای

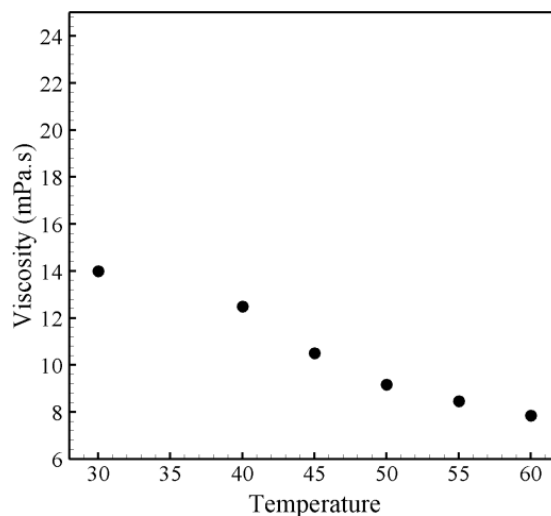
افزایش کسر حجمی، لزجت نانوسیال افزایش می‌یابد. در شکل، به ترتیب با افزایش کسر حجمی لزجت نانوسیال افزایش می‌یابد.

### ۸- تاثیر دما بر روی لزجت نانوسیال

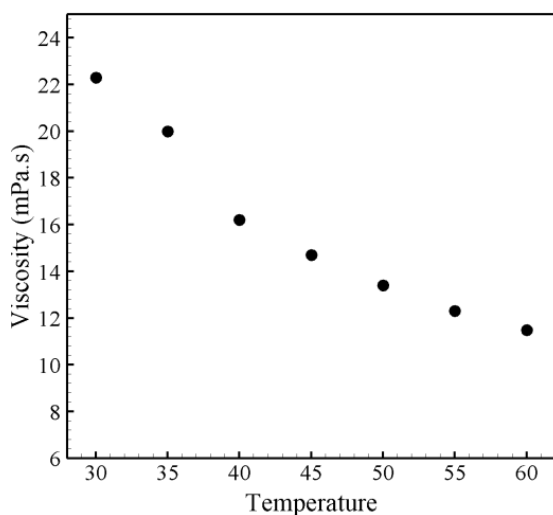
نتایج حاصل از تغییرات دما در بازه ۳۰ تا ۶۰ درجه سانتی-گراد، روی لزجت در شکل‌های ۶ تا ۱۰ آورده شده است. می‌توان دریافت که لزجت نانوسیال با افزایش دما کاهش می‌یابد.



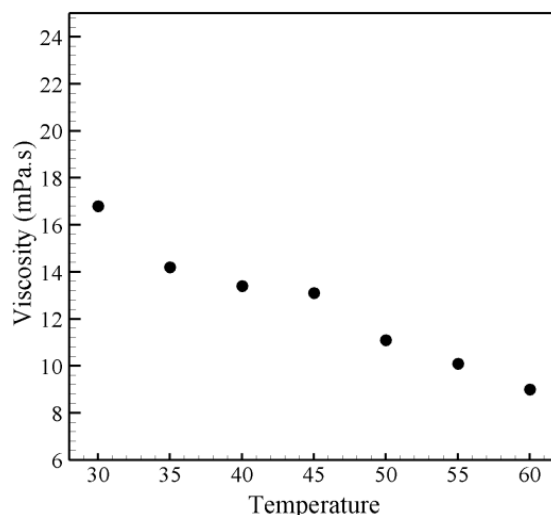
شکل ۸- کاهش لزجت با افزایش دمای مختلف در کسر حجمی ۰/۰۵



شکل ۶- کاهش لزجت با افزایش دمای مختلف در کسر حجمی ۰



شکل ۹- کاهش لزجت با افزایش دمای مختلف در کسر حجمی ۰/۰۷۵



شکل ۷- کاهش لزجت با افزایش دمای مختلف در کسر حجمی ۰/۰۲۵

A	B	C	D	E
-۱/۵۶۲۰	۰/۰۲۲۰	۱/۰۷۶۲	-۰/۲۶۸۲	۰/۰۱۸۲۸
F	G			
۸/۸۸۵۹	-۷/۳۸۱۱			

### ۱۰- مقایسه داده‌های تجربی با مدل ریاضی ارائه شده

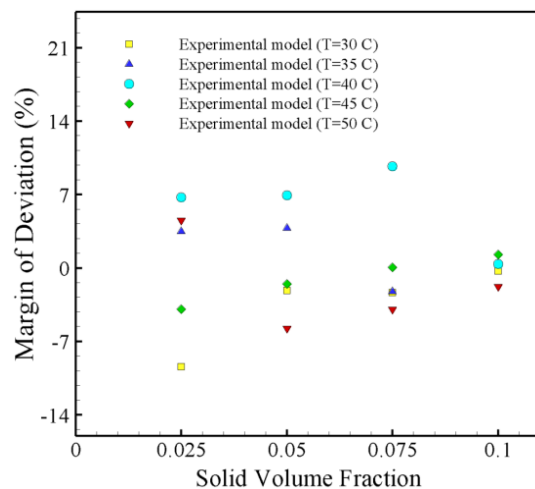
در این قسمت، مقادیر بدست آمده از رابطه بدست آمده با مقادیر نتایج تجربی مقایسه شده، حاشیه انحراف بین آن‌ها برحسب کسر حجمی در دماهای مختلف نشان داده می‌شود.

$$(۸) \quad ۱۰۰ \times (\text{نتایج تجربی} - \text{رابطه بدست آمده})$$

نتایج تجربی

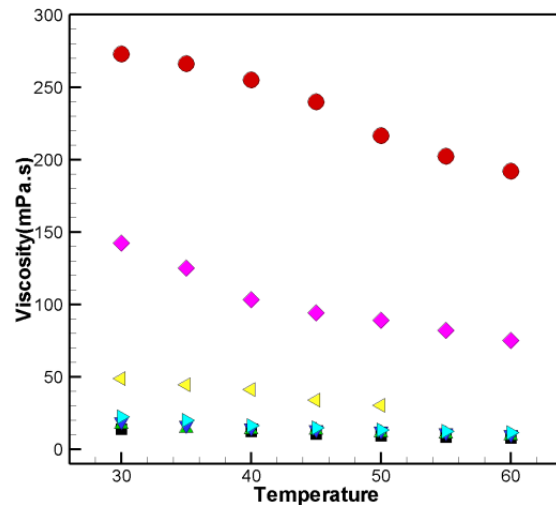
حاشیه انحراف بین رابطه ریاضی و داده‌های تجربی، از رابطه ۸ بدست می‌آید.

از اعداد بدست آمده می‌توان نتیجه گرفت که حداکثر حاشیه انحراف کمتر از ده درصد است که تأکیدی بر صحیح بودن رابطه بدست آمده است.



شکل ۱۰- حاشیه انحراف بر حسب کسر حجمی در دمای ۳۰ تا ۵۰ درجه سانتیگراد

نمودارها نشان می‌دهد که فرمول بخوبی توانایی پیش-بینی لزجت دینامیک را داشته، در دما و کسر حجمی معین نتایج حاصل از آزمایش‌ها به دقت با جواب حاصل از فرمول یکسان در می‌آید. در شکل ۱۲، نتایج مدل با داده‌های تجربی نشان داده شده است.



شکل ۱۱- کاهش لزجت با افزایش دمای مختلف در کسر حجمی های مختلف

حجمی ۰/۱، ۰/۲ و ۰/۳ نانوسیال رفتار غیرخطی از خود نشان داد؛ چون نانوسیال نانولوله‌های کربنی چندجداره-اتیلن‌گلیکول در کسرهای حجمی ۰/۱، ۰/۲ و ۰/۳، رفتار غیرخطی از خود نشان داد. به همین دلیل نمی‌توان با فرمول‌های کلی لزجت مقایسه‌ای انجام داد. با توجه به این موضوع در کسرهای حجمی ۰/۰۲۵، ۰/۰۵ و ۰/۰۷۵، مقایسه‌ای بین نتایج تجربی و فرمول‌های کلی انیشتین [۹] و بچلر [۱۰] صورت پذیرفته است که قبلاً در شکل ۲ توضیح داده شده است. می‌توان نتیجه‌گیری کرد که مدل‌های ریاضی نمی‌توانند به طور مطلوب نتایج تجربی را پیش‌بینی کنند.

### ۹- ارائه مدل ریاضی جهت تخمین لزجت

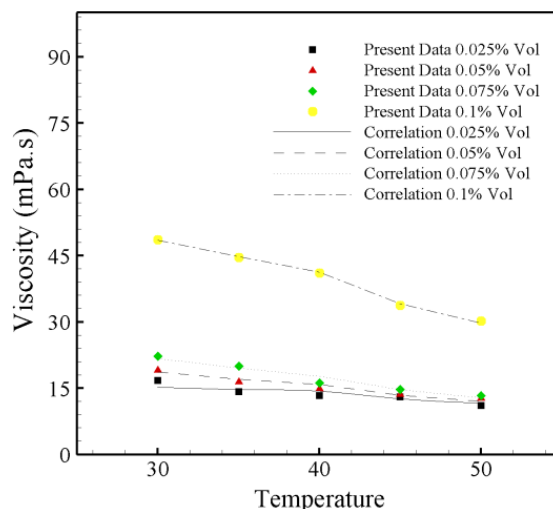
با استفاده از نتایج تجربی، مدلی برای تخمین لزجت برحسب کسر حجمی و دما به دست می‌آید. بوسیله تحلیل معادلات رگرسیون و بررسی این معادلات شامل اثر کسر حجمی و دما در نانوسیال به فرمول بهبود یافته شماره ۷ می‌رسیم. این فرمول، تنها فرمول موجود برای پیش‌بینی لزجت دینامیک نانولوله‌های کربنی چند جداره - اتیلن‌گلیکول در حالت نانوسیال نیوتنی است.

$$\frac{\mu_{nf}}{\mu_{bf}} = A + BT + C(100\varphi) + D(100\varphi)^2 + E(100\varphi)^3 + F\left(\frac{100\varphi}{T}\right) + G\left(\frac{100\varphi}{T}\right)^2 \quad (۷)$$



## ۱۲- فهرست علائم

لزجت نانوسیال	$\mu_{nf}$
درصد کسر حجمی	$\phi_p$
لزجت سیال پایه	$\mu_{bf}$
سرعت ماکزیمم	$U$
راستای محور مختصات	$\gamma$
عرض	$H$
تنش برشی	$\tau$
لزجت دینامیکی	$\mu$
لزجت سینماتیکی	$\nu$
چگالی	$\rho$



شکل ۱۲- مقایسه مدل پیشنهادی با داده‌های تجربی و صحت توانایی پیش‌بینی فرمول

## ۱۳- مراجع

- [1] Choi S (1995) Enhancing thermal conductivity of fluids with nanoparticles. In Developments Applications of Non-Newtonian Flows 66: 99-105.
- [2] Routbort J, Singh D (2008) Effects of nanofluids on heavyvehicle cooling systems. Argonne National LaboratoryArgonne, IL, VT Annual Merit Review MeetingFebruary 28.
- [3] Tzeng SC, Lin CW, Huang KD, Chang Hua (2005) Heat transfer Enhancement of nanofluids in rotary blade coupling of four-wheel-drive vehicales. Acta Mechanica 179: 11-23.
- [4] Kim SJ, Bang IC, Buongiorno J, Hu LW (2007) Surface wettability change during pool boiling of nanofluids and its effect on critical heat flux. Int J Heat Mass Tran 19: 4105-4116.
- [5] Nguyen CT, Roy G, Gauthier C, Galanis N (2007) Heat transfer enhancement using Al2O3-water nanofluid for an electronic liquid cooling system. Appl Therm Eng 27: 1501-1506.
- [6] Li Q, Xuan Y (2002) Convective heat transfer performances of fluids whit nanoparticles. 12th Int Heat transfer Conference France 483-488.
- [7] Duangthongsuk W, Wongwises S (2009) Measurement of temperature-dependent thermal conductivity and viscosity of Tio2-watwe nanofluids. Exp Therm Fluid Sci 33: 706-714.
- [8] Lee SW, Park SD, Kang S, Bang IC, Kim JH (2011) Investigation of viscosity and thermal conductivity of sic nanofluids for heat transfer applications. Int J Heat Mass Transfer 54: 433-438.
- [9] Einstein A (1906) Eine neue bestimmung der molekuldimensionen. Ann Phys Leipzig 289-306.
- [10] Batchelor G (1977) The effect of Brownian motion on the bulk stress in a suspension of spherical particles. J Fluid Mech 83: 97-117.

## ۱۱- نتیجه‌گیری

در این مقاله، به‌صورت آزمایشگاهی برای اولین بار به بررسی لزجت دینامیک نانوسیال حاوی ذرات نانولوله‌های کربنی چند جداره و سیال پایه اتیلن‌گلیکول پرداختیم. همچنین برای اولین بار فرمولی جهت بدست آوردن ویسکوزیته نانوسیال در حالت نیوتنی در دما و کسرهای حجمی متفاوت بدست آوردیم. رشته‌های نانولوله‌های کربنی چند جداره با ضخامتی کمتر از ۱۰ نانومتر تهیه و در اتیلن‌گلیکول خالص، نانوسیالی با کسرهای حجمی متفاوت از ۰/۰۲۵ تا ۰/۰۳ تولید می‌کنیم. برای پایدار سازی محلول حاوی نانوسیال از فرآیند موج‌دهی آلتراسونیک استفاده کرده، لزجت دینامیک نانوسیال توسط ویسکومتر بروکفیلد در دما و کسر حجمی متفاوت اندازه‌گیری می‌شود. نتایج نشان می‌دهد که لزجت دینامیک با افزایش دما کاهش می‌یابد؛ همچنین با افزایش کسر حجمی لزجت افزایش می‌یابد. در کسرهای حجمی بالاتر از ۰/۰۱، نیز، نانوسیال از خود رفتار غیر نیوتنی نشان می‌دهد.

باتوجه به اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی رابطه‌ای جدید برای لزجت نانوسیال در حالت نیوتنی بدست می‌آید و پس از مقایسه و بررسی رابطه و نتایج آزمایشگاهی دقت بالای فرمول، مورد تایید قرار می‌گیرد.

[12] Brinkman HC (1952) The viscosity of concentrated suspensions and solution. J Chem Phys 20: 571.

[11] [www.merckgroup.com](http://www.merckgroup.com)