

مطالعه آزمایشگاهی و ارائه مدلی جدید به منظور پیش بینی ویسکوزیته دینامیکی نانوسیال آب-اکسید آلومینیوم

محمد همت اسفه^{۱*}، سیف اله سعدالدین^۲، شکوفه رضا کاظمی^۳، علی علیرضایی^۲

اطلاعات مقاله	چکیده
دریافت مقاله: ۱۳۹۳/۰۴/۲۳	
پذیرش مقاله: ۱۳۹۳/۱۱/۱۴	
واژگان کلیدی:	
نانوسیال	در این نوشتار، مطالعه ای آزمایشگاهی بر روی ویسکوزیته ی دینامیکی نانوسیال آب-اکسید آلومینیوم گزارش و تحلیل شده است. نتایج آزمایشگاهی حاصله با پرکاربردترین مدل های کلاسیک موجود یعنی مدل های اینشتین و وانگ مقایسه و تحلیل، شده است. نتایج نشان می دهد که ویسکوزیته ی دینامیکی اندازه گیری شده در آزمایش ها با مدل های موجود، فاصله دارند. با توجه به اختلاف یافته های تجربی و نتایج تخمینی معادلات کلاسیک، یک رابطه ی تجربی برای تخمین ویسکوزیته ی دینامیکی موثر نانوسیال آب-اکسید آلومینیوم مبتنی بر نتایج آزمایش ارائه و شرح داده می شود. در این تحقیق، از ویسکومتر بروکفیلد برای اندازه گیری ویسکوزیته ی دینامیکی نانوسیال آب-اکسید آلومینیوم با کسر حجمی های (۵٪)، (۴٪)، (۳٪)، (۲٪)، (۱٪)، (۰/۵٪) و (۰/۲۵٪)، در دمای اتاق، استفاده شده است.

۱- مقدمه

نانوسیالات نسل جدیدی از سیالات عامل انتقال حرارت است که با تعلیق ذرات نانو در یک سیال پایه، حاصل می شود. نخستین کسی که از لفظ نانوسیال به منظور معرفی این نوع از سیالات استفاده کرد، چوی [۱] بود. او نشان داد که تعلیق نانوذرات در سیال های پایه، مانند آب، اتیلن گلیکول و روغن باعث افزایش انتقال حرارت سیال می شود. پس از او تحقیقات متعددی بر روی انتقال حرارت و ویسکوزیته ی نانوسیالات صورت گرفته است. اما به دلیل گستردگی انواع مختلف نانوذرات و سیالات پایه، همچنین مکانیزم های مختلف تبادل حرارت در کسرهای حجمی

مختلف، فقدان اطلاعات کافی در این زمینه هنوز هم در میان متون علمی موجود، قابل مشاهده است. افزایش ضریب هدایت حرارتی نانوسیالات به عنوان وجه مثبت استفاده از این نوع سیالات توجه زیادی را نسبت به سایر خواص ترموفیزیکی به خود جلب نموده است. اکثر محققان در زمینه نانوسیالات، به بررسی این خاصیت پرداخته و نتایج مطلوب آن را گزارش نموده اند. اما باید به این نکته نیز توجه کرد که استفاده از نانوذرات تعلیق شده در یک سیال پایه، می تواند گرانی سیال را افزایش داده و هزینه های مربوط به پمپاژ و انتقال سیال را بالا برد. بی شک کاربردی نمودن نانوسیالات و استفاده صنعتی مقرون به صرفه از آنها، در گرو پرداختن توأمان به خواصی مانند ضریب هدایت حرارتی و ویسکوزیته دینامیکی تحقق می یابد. از سوی دیگر مدلهای ارائه شده تاکنون، قابلیت و ظرفیت لازم به منظور تخمین و پیش بینی صحیح

* پست الکترونیک نویسنده مسئول: m.hemmatesfe@gmail.com

۱. دانشجوی دکترا، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه سمنان

۲. استاد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه سمنان

۳. دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه سمنان، سمنان

استفاده کردند و نهایتاً به نتایجی ارزشمند در خصوص نانوسیالات آلومینا با سیال پایه‌ی آب و اتیلن گلیکول دست یافته‌اند. پوترا و همکاران [۹] نیز برخی داده‌های محدود کننده که تاثیر دما را بر ویسکوزیته‌ی نانوسیالات آلومینا-آب نشان می‌دهد، ارائه نموده‌اند. مروری بر تحقیقات مرتبط در این حیطه را نیز می‌توان در مقاله مروری ونگوویز [۱۰] مشاهده نمود.

پژوهش حاضر در راستای سایر تحقیقات نویسندگان این مقاله، در زمینه خواص ترموفیزیکی [۱۰]-[۱۲] و شناسایی ظرفیت‌ها و کاربردهای نانوسیالات در مبدل‌ها [۱۳] و [۱۴] و کارکردهای صنعتی گوناگون به صورت تجربی و عددی [۱۵]-[۲۰] می‌باشد. در تحقیق حاضر با توجه به ضعف‌های موجود در میان مدل‌های ارائه شده به منظور تخمین ویسکوزیته نانوسیال آب-اکسید آلومینیوم، سعی شده است که علاوه بر گزارش دقیق یافته‌های تجربی و آزمایشگاهی، مدل جدید و قابل اتکایی به منظور تخمین ویسکوزیته این نانوسیال، ارائه شود. همچنین در این تحقیق، اختلاف موجود میان نتایج تجربی و مدل‌های کلاسیک، به روش‌های مختلف آماری ارزیابی گردیده و در مورد اختلافات موجود بحث می‌گردد.

۲- آماده سازی نانوسیالات

آماده سازی نانوسیالات گام کلیدی اول در بررسی‌های آزمایشگاهی بر روی نانوسیالات است. نانوسیالات مخلوط ساده‌ای از مایع-جامد نیست. برخی نیازهای ضروری از قبیل ساختن سوسپانسیون همگن، پایدار و با دوام، انباشتگی بسیار اندک و قابل چشم پوشی ذرات و عدم تغییر در ماهیت شیمیایی سیال باید در نظر گرفته شود. در این تحقیق، نانوسیال آب-اکسید آلومینیوم در کسرهای حجمی مختلف و به صورت پایدار، تعلیق شده است. نانوسیال مورد استفاده برای آزمایش در کسرهای حجمی (۵٪)، (۴٪)، (۳٪)، (۲٪)، (۱٪)، (۰/۵٪) و (۰/۲۵٪) تهیه و تعلیق شده است.

ویسکوزیته دینامیکی نانوسیالات را نداشته و عملاً اختلافات عمیقی میان نتایج آزمایشگاهی و اعداد به دست آمده از این مدل‌ها، گزارش شده است [۲]. به دلایل فوق، مبحث ویسکوزیته در نانوسیالات با توجه به اثرات قابل ملاحظه و فراگیر آن، توجه جدی و فراگیر محققان و پژوهشگران حوزه نانو تکنولوژی را بالاخص در ارزیابی‌های آزمایشگاهی می‌طلبد.

همانگونه که پیشتر گفته شد، تحقیقات مرتبط با ویسکوزیته نانوسیالات نسبت به حجم تحقیقات صورت گرفته در زمینه ضریب هدایت حرارتی و ضریب انتقال حرارت جابجایی اندک می‌باشد. ماسودا و همکاران [۳] نخستین پژوهشگرانی بودند که به صورت آزمایشگاهی ویسکوزیته‌ی برخی نانوسیالات آب پایه را در دمای اتاق تا دمای حدود 67°C به دست آوردند. در تحقیقی دیگر، کانگ و همکاران [۴] ویسکوزیته نانوسیالات الماس فوق تعلیق شده در اتیلن گلیکول، نقره-آب و سیلیکا-آب را اندازه گیری نمودند. آنها دریافتند که افزایش ویسکوزیته برای الماس-اتیلن گلیکول به میزان ۵۰٪، و برای نقره-آب و سیلیکا-آب به ترتیب ۳۰٪ و ۲۰٪ خواهد بود. پراشر و همکاران [۵] نشان دادند که ویسکوزیته‌ی دینامیکی نانوسیالات آلومینا-آب، مستقل از نرخ برش است و رفتار سیال نیوتنی دارد و با افزایش کسر حجمی ذرات جامد، افزایش در ویسکوزیته را از خود نشان می‌دهد. نتایج تحقیق دیگری که توسط چن و همکاران [۶] انجام شد، نشان داد که استفاده از نانوذرات در سیالات، علاوه بر افزایش انتقال حرارت، باعث افزایش ویسکوزیته‌ی دینامیکی سیال می‌شود.

یافته‌های تحقیق جالب دیگری که توسط تیموفیوا و همکاران [۷] انجام شد نشان داد که استفاده از یک نوع نانوسیال، زمانی می‌تواند مفید باشد که افزایش انتقال حرارت آن چهار برابر افزایش ویسکوزیته‌ی آن باشد. استفاده از روش‌های مختلف تعلیق نانوذرات به منظور بررسی تغییرات ویسکوزیته موضوع پژوهش وانگ و همکاران [۸] بود. آنها از سه روش مختلف معلق سازی

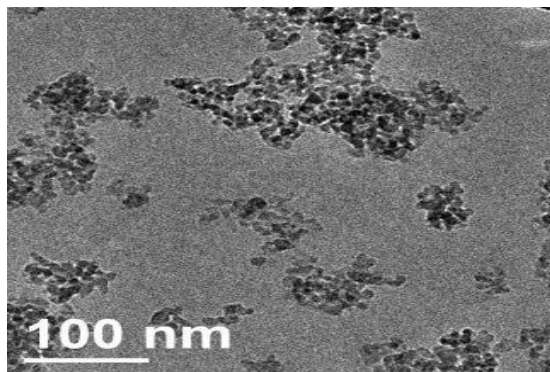
مربوط به نانوذره مورد استفاده به منظور تولید نانوسیال در جدول (۱) آمده است.

۲-۱- آماده سازی نانوسیالات به روش دو مرحله ای

فرآیند آماده سازی دو مرحله ای به طور گسترده در ساخت نانوسیالات به کار می رود. این کار با آمیختن سیال پایه با نانو پودر آماده شده از قبل که از روش های گوناگون مکانیکی، فیزیکی و شیمیایی مانند آسیاب کردن، کوبیدن، سل-ژل و روش های فاز بخار صورت می گیرد. مرتعش کننده آلتراسونیک یا همزن برشی بسیار قوی نیز به منظور تعلیق بهتر نانوذرات در سیال میزبان استفاده می شود. عمل ارتعاش آلتراسونیک برای جلوگیری از کلوخه شدن نانوذرات بسیار حائز اهمیت است.

ایستمن و همکاران [۲۱]، لی و همکاران [۲۲] و وانگ و همکاران [۲۳] از این روش برای تهیه نانوسیالات خود بهره برده اند. مرشد و همکاران [۲۴] نانو سوسپانسیون تیتانیا-آب را با همین روش تولید کرده اند. ژوان و همکاران [۲۵] نیز با روش دو مرحله ای نانوسیال اکسید مس-اتیلن گلیکول را همراه با ارتعاش دهنده آلتراسونیک و بدون استفاده از پایدار کننده مورد تهیه نموده اند.

عکس برداری میکروسکوپ انتقال الکترونی^۱ از نانوذرات آلومینا با اندازه قطر ۵ نانومتر انجام شده است که در شکل ۱ قابل مشاهده است.



شکل ۱ عکس میکروسکوپ انتقال الکترونی از نانوذرات اکسید آلومینیوم

در تحقیق حاضر، نانوسیال آب-اکسید آلومینیوم با روش دو مرحله ای و با استفاده از روش های ترکیبی، در آزمایشگاه نانورئولوژیک پارک علم و فناوری دانشگاه سمنان تولید شده است. در روش های ترکیبی علاوه بر استفاده اختیاری از یک یا چند نوع سورفکتانت مختلف به منظور تغییر خواص سطحی، از سایر روش های شیمیایی و مکانیکی مانند قرار گیری امواج در معرض امواج فراصوت، استفاده از همزن مغناطیسی و تغییر اسیدیته نیز استفاده می شود. در تحقیق حاضر به دلیل امکان اثرگذاری سورفکتانت ها بر روی ویسکوزیته دینامیکی، از آنها به منظور تعلیق نانوذرات استفاده نشده است.

جدول ۱. مشخصات نانوذرات آلومینا با قطر ۵ نانومتر	
خلوص نانوذرات	۹۹.۹۹٪
میانگین اندازه قطر نانوذرات	۵ نانومتر
سطح ویژه	$>150 \text{ m}^2/\text{g}$
شکل نانوذرات	تقریباً کروی
رنگ نانوذرات	سفید
ظرفیت گرمایی ویژه	$880 \text{ J}/(\text{Kg}\cdot\text{K})$
چگالی	$3890 \text{ Kg}/\text{m}^3$

روش های دو مرحله ای مناسب با نانوذراتی است که نانوپودر آنها به صورت تجاری و صنعتی موجود بوده و دانش تعلیق آن نیز به دست آمده باشد. این روش نسبت به روش تک مرحله ای، بسیار مقرون به صرفه بوده و قابلیت کنترل بیشتری بر روی غلظت، کسر حجمی و میزان تولید ایجاد می کند.

در این روش، ابتدا نانوپودر اکسید آلومینیوم، با توجه به کسرهای حجمی مد نظر، درون سیال ریخته می شود. سیال و نانوذرات موجود در آن به صورت متناوب توسط همزن آلتراسونیک و همزن مغناطیسی در بازه های زمانی معین، مخلوط شده و در نهایت با خرد شدن و گسستن کلوخه ها و خوشه های نانوذرات و پخش همگن آن در سیال پایه، نانوسیال مطلوب حاصل می شود. اطلاعات

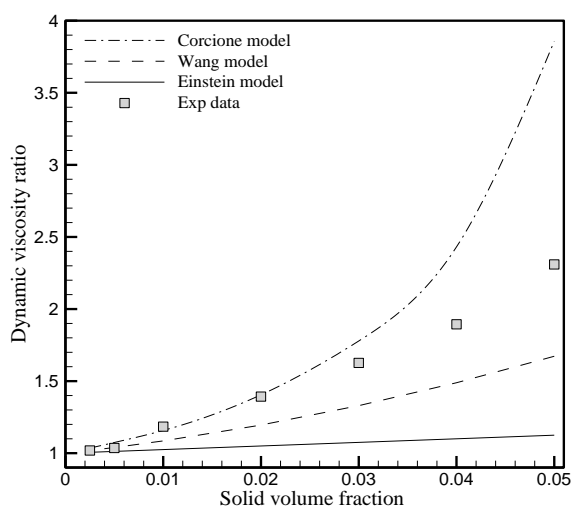
^۱ TEM

مدل دیگری که به منظور تخمین مقادیر ویسکوزیته نانوسیالات کاربرد دارد، مدل کورشیونه است. مدل کورشیونه [۲۷] به صورت زیر تشریح می شود.

$$\frac{\mu_{nf}}{\mu_f} = \frac{1}{1 - 34.87 \left(\frac{d_p}{d_f}\right)^{-0.3} \phi^{1.03}} \quad (3)$$

در این تحقیق، نتایج نتایج آزمایشگاهی برای نانوذرات اکسید آلومینیوم با اندازه قطر ۵ نانومتر با مقادیری که از مدل وانگ [۲۶]، اینشتین [۳] و کورشیونه [۲۷] به دست می آید، مقایسه می شود.

مقایسه‌ی بین نتایج آزمایشگاهی ویسکوزیته‌ی نسبی برای کسر حجمی‌های مختلف و مدل‌های اینشتین، وانگ و کورشیونه در شکل ۲ نشان داده شده است.



شکل ۲ مقایسه‌ی بین داده‌های آزمایش و مقادیر بدست آمده از مدل‌های اینشتین، وانگ و کورشیونه

همانگونه که در شکل (۲) دیده می‌شود، نتایجی که توسط مدل کورشیونه در کسرهای حجمی پایین، تخمین زده می شود، به نتایج آزمایشگاهی نزدیک‌تر است، در حالی که، مدل‌های وانگ و اینشتین مقدار ویسکوزیته‌ی دینامیکی نانوسیال را کمتر از مقدار واقعی تخمین می‌زنند. در کسرهای حجمی بالاتر از ۰.۳، هیچ یک از مدل‌ها توان تخمین مناسب ویسکوزیته دینامیکی این نانوسیال را ندارد. یکی از دلایل تخمین مناسب مدل کورشیونه نسبت

۳- اندازه گیری ویسکوزیته دینامیکی

ویسکوزیته‌ی دینامیکی نانوسیالات به وسیله ی ویسکومتر بروکفیلد که توسط آزمایشگاه‌های مهندسی بروکفیلد آمریکا ساخته شده است، اندازه گیری شده است. سرعت اسپیندلی که در این ویسکومتر در دسترس است، در بازه‌ی صفر تا صد دور بر دقیقه قرار دارد. برای ویسکومتر به وسیله ی آب مقطر، گلیسرین و اتیلن گلیکول در دمای اتاق، ارزیابی مقایسه‌ی صورت گرفت. مقادیر اندازه گیری شده ویسکوزیته برای آب مقطر و اتیلن گلیکول به ترتیب ۸۲ و ۳۶۰/۵ میلی پاسکال ثانیه بوده است؛ مقادیر اندازه گیری شده با مقادیر دقیق بیان شده در منابع که به ترتیب ۷۹ و ۳۵۲ سانتی پوز است.

آزمایش‌های مربوط به ویسکوزیته دینامیکی به صورت متعارف سه بار تکرار شده است. در صورتی که در میان سه داده حاصله، یک داده در محدوده‌ای بسیار متفاوت با سایر داده‌ها به دست آید، آزمایش دو بار دیگر تکرار می‌شود. تکرارپذیری داده‌ها در این آزمایش برابر ۰/۲٪ می‌باشد.

۴- ارائه و مقایسه نتایج

محققان مدل‌های بسیاری زیادی را برای تخمین ویسکوزیته‌ی نانوسیالات به عنوان تابعی از کسر حجمی ذرات جامد ارائه و به کار برده‌اند. در این تحقیق، مدل اینشتین برای محاسبه ی ویسکوزیته استفاده شده است، که برای ذرات کروی قابل کاربرد است. این معادله به صورت زیر بیان می شود [۳]:

$$\mu_{nf,Einstein} = \left(1 + \frac{2}{5}\phi\right)\mu_f \quad (1)$$

به علاوه، وانگ و همکاران نیز مدلی را برای پیش بینی ویسکوزیته ی نانوسیالات ارائه کرده‌اند که به صورت زیر محاسبه می شود [۲۶].

$$\mu_{nf,Wang} = (1 + 7.03\phi + 123\phi^2)\mu_f \quad (2)$$

ارائه شده است.

لازم به ذکر است که این مدل با اصلاح مدل کورشیونه به دست آمده است. مدل ارائه شده در این نوشتار به صورت زیر می باشد.

$$\frac{\mu_{nf}}{\mu_f} = \frac{1}{1 - 13.84 \left(\frac{d_p}{d_f}\right)^{-0.3} \varphi^{0.81}} \quad (5)$$

که قطر معادل مولکول های سیال پایه از معادله ی زیر به دست می آید.

$$d_f = 0.1 \left(\frac{6M}{N\pi\rho_f} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (6)$$

که در دمای ۲۹۳ کلوین محاسبه می شود.

مشاهده می شود، زمانی که سیال پایه معین می شود، ویسکوزیته ی دینامیکی موثر بی بعد نانوسیالات، با کاهش قطر و افزایش کسر حجمی نانوذرات، افزایش پیدا می کند. ویژگی قابل توجه دیگر این است که، تخمین معادله ی ۵، نسبت ویسکوزیته از ترکیب مایع-جامد و دما مستقل است، حداقل برای کسر حجمی های پایین و دماهای نزدیک دمای اتاق (به طور آشکار، بررسی ویسکوزیته ی دینامیکی موثر، نیاز است که ویسکوزیته سیال پایه نیز در همان دما به دست آمده باشد).

شکل ۴ مقایسه ی بین داده های آزمایشگاهی و مدل تجربی پیشنهاد شده را برای آلومینا-آب نشان می دهد. همانطور در شکل دیده می شود موافقت خوبی بین این داده ها دیده می شود.

۷- نتیجه گیری

در این تحقیق، ویسکوزیته ی دینامیکی نانوسیالات آلومینا-آب به وسیله ی ویسکومتر بروکفیلد اندازه گیری شد. نانوسیالات با کسر حجمی های مختلف (۰/۵)، (۰/۴)، (۰/۳)، (۰/۲)، (۰/۱)، (۰/۰/۵) و (۰/۰/۲۵) در دمای اتاق آزمایش شد. نتایج آزمایش نشان می دهد که مقادیر آزمایشگاهی برای ویسکوزیته ی دینامیکی نانوسیالات از مقادیری که از مدل های تئوری موجود مانند اینشتین و وانگ به دست می آید، فاصله ی زیادی دارد. بنابراین مدل جدیدی برای تخمین بهتر ویسکوزیته ی دینامیکی

به سایر مدل های مورد بحث در این تحقیق در کسرهای حجمی پایین را می توان توجه به قطر نانوذرات در مدل کورشیونه دانست. این در حالی است که مدل های اینشتین و وانگ تنها تابعی از کسر حجمی نانوذرات هستند و پارامتر دیگری در تغییرات ویسکوزیته در این مدل ها لحاظ نشده است.

۵- حاشیه انحراف

در این تحقیق، داده های آزمایشگاهی به عنوان مقایسه ای برای ارزیابی نتایج معادلات پیش بینی کننده ویسکوزیته به کار رفت. انحراف بین داده های آزمایشگاهی و نتایج محاسبه شده از مدل های تئوری می تواند از رابطه ی زیر محاسبه گردد.

$$Dev = \left[\frac{Nu_{Pred} - Nu_{Exp}}{Nu_{Exp}} \right] \times 100\% \quad (4)$$

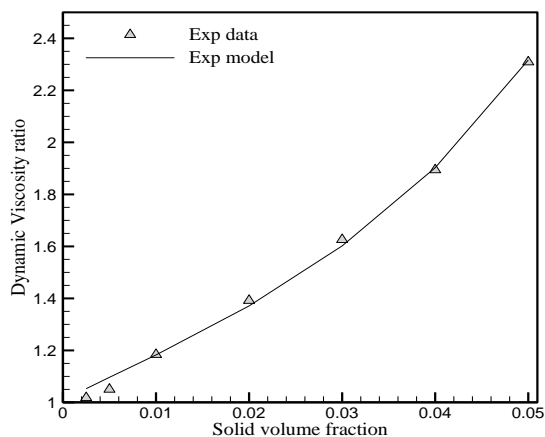
حاشیه ی انحراف کوچک تر دقت بیشتر را در روابط نشان می دهد.

شکل (۳) مقادیر حاشیه انحراف را برای ویسکوزیته دینامیکی نانوسیال آلومینا-آب برای مدل های اینشتین، وانگ و کورشیونه نشان می دهد. همان گونه که مشاهده می شود (شکل ۳-الف) برای مدل اینشتین، حاشیه انحراف به بیش از ۵۰٪ رسیده است. این در حالی است که بیشینه حاشیه انحراف برای مدل وانگ (شکل ۳-ب) در حدود ۳۰٪ و برای مدل کورشیونه بیش از ۶۰٪ (شکل ۳-ج) است. حاشیه انحراف برای مدل کورشیونه نشان می دهد که برای مقادیر کسر حجمی کمتر از ۴٪، حاشیه انحراف کمتر از ۱۰٪ می باشد که مقدار بسیار مطلوبی است.

۶- مدل ارائه شده

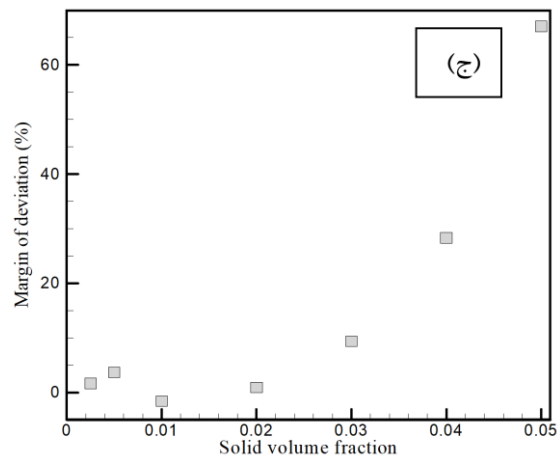
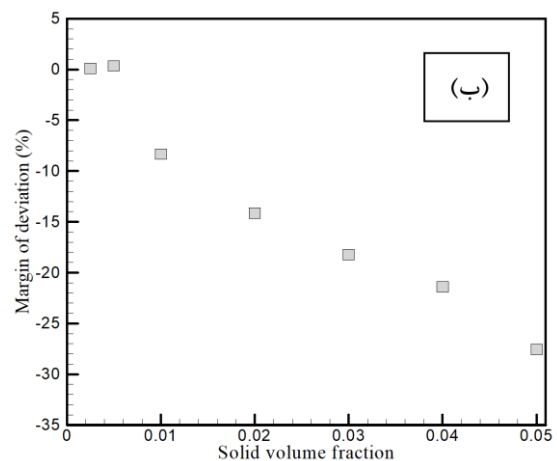
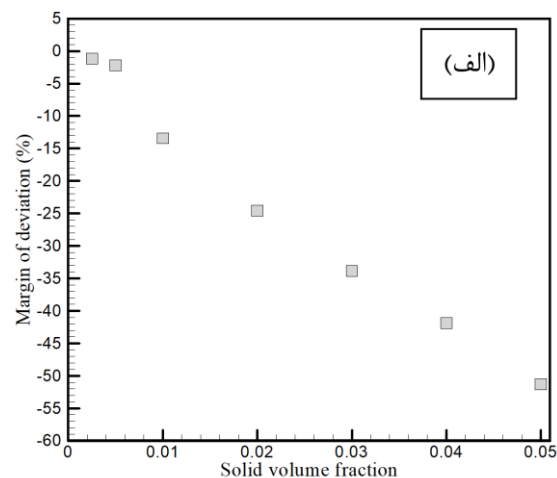
با توجه به نتایج تجربی حاصله در این تحقیق و فاصله قابل توجه آن با روابط کلاسیک مطرح، مدلی تجربی بر مبنای داده های آزمایشگاهی و مکانیزم های موجود برای ویسکوزیته آب-اکسید آلومینیوم با اندازه قطر ۵ نانومتر،

شرائط، دستگاه ها و مواد لازم جهت انجام این آزمایش و فراهم شدن نتایج در زمان مناسب و تعیین شده در آزمایشگاه نانورئولوژیک را فراهم آوردند، تشکر و قدردانی نمایند.



شکل ۴ مقایسه ی داده های آزمایشگاهی و رابطه ی ارائه شده برای ویسکوزیته ی دینامیکی موثر

نانوسیالات آلومینا-آب با ارتقای مدل کورشیونه، ارائه گردید.



شکل ۳ حاشیه ی انحراف ویسکوزیته ی دینامیکی برای الف) مدل اینشتین ب) مدل وانگ ج) مدل کورشیونه

۸- تقدیر و تشکر

بدین وسیله تمامی نویسندگان بر خود لازم می دانند از دست اندرکاران پارک علم و فناوری دانشگاه سمنان که

۹- مراجع

- [1] Choi SUS., "Enhancing thermal conductivity of fluids with nanoparticles," *Dev. Appl. non-Newtonianflows*, vol. 31, no. 66, pp. 99–105, 1995.
- [2] M. Hemmat Esfe, "An experimental investigation and new correlations of viscosity of ZnO-EG nanofluid at various temperatures and different solid volume fractions," *Exp. Therm. FluidSci.*, vol. 55, pp. 1–5, 2014.
- [3] N. H. H. Masuda, A. Ebata, K. Teramae, "Alteration of thermal conductivity and viscosity of liquid bydispersing ultra-fine particles (dispersion of γ - Al₂O₃, SiO₂ and TiO₂ ultra-fine particles)," *Netsu Bussei* 4, vol. 4, no. 4, pp. 227–233, 1993.
- [4] H. U. Kang, S. H. Kim, and J. M. Oh, "Estimation of Thermal Conductivity of Nanofluid Using Experimental Effective Particle Volume," *Exp. Heat Transf.*, vol. 19, no. 3, pp. 181–191, Sep. 2006.
- [5] S. Kumar, S. K. Prasad, and J. Banerjee, "Analysis of flow and thermal field in nanofluid using a single phase thermal dispersion model," *Appl. Math. Model.*, vol. 34, no. 3, pp. 573–592, Mar. 2010.
- [6] R. Chein and G. Huang, "Analysis of microchannel heat sink performance using nanofluids," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 25, no. 17–18, pp. 3104–3114, Dec. 2005.
- [7] E. V. Timofeeva, J. L. Routbort, and D. Singh, "Particle shape effects on thermophysical properties of alumina nanofluids," *J. Appl. Phys.*, vol. 106, no. 1, p. 014304, Jul. 2009.
- [8] J. Wang, R. Prasher, D. Song, and P. Phelan, "Measurements of nanofluid viscosity and its implications for thermal applications," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 89, no. 13, p. 133108, Sep. 2006.
- [9] N. Putra, S. K. Das W. Roetzel, "Natural convection of nanofluidsNo Title," *Heat Mass Transf.*, vol. 39, pp. 775–784, 2003.
- [10] S. W. W. Daungthongsuk, "A critical review of convective heat transfer of nanofluids," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, pp. 1–23, 2005.
- [11] S. W. Mohammad Hemmat Esfe, Seyfolah Saedodin, Mehdi Bahiraei, Davood Toghraie, Omid Mahian, "Thermal conductivity modeling of MgO/ EG nanofluids using experimental data and artificial neural network," *J. Therm. Anal. Calorim.*
- [12] M. Hemmat Esfe, Seyfolah Saedodin, Omid Mahian, "Thermal Conductivity of Al₂O₃/ Water Nanofluids: Measurement, Correlation, Sensitivity Analysis, and Comparisons with Literature Reports," *J. Therm. Anal. Calorimetry(Springer)*, vol. DOI 10.100.
- [13] M. Hemmat Esfe, S. Saedodin, "Experimental studies on the convective heat transfer performance and thermophysical properties of MgO–water nanofluid under turbulent flow Preparation of nanofluid, Experimental Thermal and Fluid Science," *j.expthermflusci.*, vol. 10, 2013.
- [14] M. Hemmat Esfe, Seyfolah Saedodin, Omid Mahian, "Heat transfer characteristics and pressure drop of low concentrations of COOH- Functionalized DWCNTs/water nanofluid in turbulent flow," *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 73, no. 186–194, 2014.
- [15] Fereidoon, A., Saedodin, S., Hemmat Esfe, M. and Noroozi, "Evaluation of mixed convection ininlined square lid driven cavity filled with Al₂O₃/water nanofluid," *Eng. Appl. Comput. Fluid Mech.*, vol. 7, no. 1, pp. 55–65, 2013.
- [16] Hemmat Esfe, M., Saedodin, "Flow behavior and thermal performance of double lid driven cavity subjected to nanofluid with variable properties," *J. Model. Eng.*, vol. 10, no. 30, pp. 43–60, 2012.
- [17] Hemmat Esfe, M., mirtalebi S., ghadak, F., haghiri, A., "Numerical Study of Mixed Convection Flows in a Two-sided Inclined Lid-driven Cavity Utilizing Nano-fluid with Various InclinationAngles and Ununiformed Temperature," *Aerosp. Mech. J.*, vol. 8, no. 2, pp. 69–83, 2012.
- [18] S. Seyfolah Saedodin, Mojtaba Biglari, Mohammad Hemmat Esfe, "Mixed convection heat transfer performance in a ventilated inclined cavity containing heated blocks: Effect of dispersing Al₂O₃ in water and aspect ratio of the block," *J. Comput. Theor. Nanosci.*, vol. 10, pp. 2663–2675, 2013.
- [19] S. Saedodin, S., Hemmat Esfe, M., Noroozi, "Numerical simulation of mixed convection of fluid flow and heat transfer within car radiator with an inside obstacle filled with nanofluid," *E-Modeling*, vol. 9, no. 25, pp. 33–46, 2011.
- [20] M. Hemmat Esfe, Seyfolah Saedodin, "Influence of nanofluid variable properties on combined convection heat transfer in a two sided lid-Driven enclosure with sinusoidal heating," *Aerosp. Mech. Journal.*
- [21] S. U. S. Choi and J. A. Eastman, "Enhancing thermal conductivity of fluids with nanoparticles," Oct. 1995.
- [22] J.-H. Lee, K. S. Hwang, S. P. Jang, B. H. Lee, J. H. Kim, S. U. S. Choi, and C. J. Choi, "Effective viscosities and thermal conductivities of aqueous nanofluids containing low volumeconcentrations of Al₂O₃ nanoparticles," *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 51, no. 11–12, pp. 2651–2656, Jun. 2008.
- [23] M. Liu, M. C. Lin, C. Y. Tsai, and C. Wang, "Enhancement of thermal conductivity with Cu for nanofluids using chemical reduction method," vol. 49, pp. 3028–3033, 2006.

- [24] S. M. S. Murshed, K. A. I. C. Leong, C. Yang, and N.-T. NGUYEN, "Convective Heat Transfer Characteristics Of Aqueous TiO₂ Nanofluid Under Laminar Flow Conditions," *Int. J. Nanosci.*, vol. 07, no. 06, pp. 325–331, Dec. 2008.
- [25] P. Tie, Q. Li, and Y. Xuan, "International Journal of Thermal Sciences Heat transfer performance of Cu water nano fluids in the jet arrays impingement cooling system," *Int. J. Therm. Sci.*, vol. 77, pp. 199–205, 2014.
- [26] Wei Wang, "A Comprehensive Model for the Enhanced Thermal Conductivity of Nanofluids." p. 5, 2012.
- [27] M. Corcione, "Empirical correlating equations for predicting the effective thermal conductivity and dynamic viscosity of nanofluids," *Energy Convers. Manag.*, vol. 52, no. 1, pp. 789–793, 2011.