

اثر نانوذره‌های منیزیم اکسید در ویژگی‌های حجمی و رئولوژیکی محلول‌های دارای پلی اتیلن گلیکول

مهسا غضنفر اقدم، رقیه مجدان سقین سرا*+

گروه شیمی، واحد تبریز، دانشگاه آزاد اسلامی، تبریز، ایران

چکیده: محلول‌های همگنی از انحلال پلیمر پلی اتیلن گلیکول (PEG) با جرم مولکولی (g/mol) ۲۰۰۰ و ۶۰۰۰ (PEG2000 و PEG6000) در PEG با جرم مولکولی (g/mol) ۴۰۰ (PEG400) تهیه شد؛ ویژگی‌های رئولوژیکی و دانسیته این محلول‌ها اندازه‌گیری شد. نانوذره‌های منیزیم اکسید (MgO) با اعمال موج فراصوت درون محلول‌های پلیمری تهیه شده پخش شد. با استفاده از طیف سنجی مرئی - فرابنفش و اندازه‌گیری پتانسیل زتا، پایداری این نانوسیال‌ها یا محلول‌های کلئیدی بررسی شد. دستگاه تفرق نور پویا (DLS) برای اندازه‌گیری توزیع اندازه ذره‌های موجود در نانوسیال‌ها مورد استفاده قرار گرفت. دانسیته محلول‌های کلئیدی مدنظر در دماهای گوناگون اندازه‌گیری شد و کمیت حجم مولی مازاد به منظور مشخص نمودن برهمکنش‌های درون نانوسیال محاسبه شد. داده‌های حجم مولی مازاد برای سامانه‌های دوجزئی توسط یک چندجمله‌ای و برای سامانه‌های سه جزئی توسط معادله سینگ و همکاران مورد برآزش قرار گرفت. با اندازه‌گیری ویژگی‌های رئولوژیکی، رفتار جاری شدن محلول‌ها و ساختارهای تشکیل یافته درون محلول‌های کلئیدی در دمای ۲۹۸٫۱۵ کلوین مورد مطالعه قرار گرفت. معادله‌های پلاستیک بینگهام و هرشل بالکلی برای مدل‌سازی بستگی تنش برشی به سرعت برشی مورد استفاده قرار گرفت؛ معادله کارویاسودای تصحیح شده در این کار پژوهشی برای مدل‌سازی بستگی گرانروی به سرعت برشی استفاده شد.

واژه‌های کلیدی: نانوسیال؛ نانوذره‌های منیزیم اکسید؛ پلی اتیلن گلیکول؛ ویژگی‌های رئولوژیکی؛ ویژگی‌های حجمی.

KEYWORDS: Nanofluids; Magnesium oxide nanoparticles; Polyethylene glycol; Rheological properties; Volumetric properties.

مقدمه

از مواد پلیمری می‌توان به عنوان سورفکتانت و همچنین سیال پایه در تهیه نانوسیال‌ها استفاده نمود. پلیمرهایی مانند پلی اتیلن گلیکول (PEG) به علت سمیت پایین و انحلال پذیری بالا در آب کاربردهای صنعتی ویژه‌ای دارند. PEG و مشتق‌های آن می‌توانند به‌عنوان سورفکتانت، نرم‌کننده، سیال رسانای گرما در تجهیزات الکترونیکی،

نانوسیال یک محلول کلئیدی دارای نانوذره‌ها و سیال پایه با رسانایی گرمایی بالا می‌باشد. نانوسیال‌ها به علت دارا بودن خواص ویژه‌ای می‌توانند در توسعه زمینه‌های پزشکی، الکترونیکی، کاربرد کاتالیست‌ها، فرآورده‌های پتروشیمی، معرف‌های ضد باکتری، صنایع رنگ و مواد غذایی و غیره مورد استفاده قرار گیرند [۱-۴].

*عقد دار مکاتبات

+E-mail: majdan944@gmail.com ; majdan@iaut.ac.ir

پایداری و ویژگی‌های رئولوژیکی نانوسیال دارای نانوذره‌های TiO_2 و PEG و همچنین هدایت گرمایی نانوسیال‌های دارای PEG و نانوذره‌های فلزی پوشش‌دهی شده با کربن مطالعه شده است [۱۶، ۱۵]. ویژگی‌های حجمی و رئولوژیکی تحت اعمال میدان مغناطیسی و بدون اعمال میدان مغناطیسی برای نانوسیال‌های ZnO-PEG و Fe_3O_4 -PEG نیز در کارهای پیشین ما مطالعه شده است [۱۹-۱۷]. در این کار پژوهشی محلول‌های همگنی از PEG با جرم مولکولی (g/mol) ۴۰۰ و ۲۰۰۰ (PEG400-PEG2000) و همچنین PEG با جرم مولکولی (g/mol) ۴۰۰ و ۶۰۰۰ (PEG400-PEG6000) تهیه شد. ویژگی‌های رئولوژیکی و دانسیته این محلول‌ها اندازه‌گیری شد، سپس نانوذره‌های MgO درون محلول‌های تهیه شده با اعمال امواج فراصوت در حمام پخش شد. پایداری نانوسیال‌های تهیه شده توسط طیف سنجی مرئی - فرابنفش^(۵) و اندازه‌گیری پتانسیل زتا مطالعه شد. توزیع اندازه ذره‌ها توسط دستگاه تفرق نور پویا (DLS) اندازه‌گیری شد. داده‌های دانسیته محلول‌های کلئیدی در دماهای K (۳۱۸، ۱۵) و برای مشخص نمودن برهمکنش‌های درون نانوسیال محاسبه شد. معادله چند جمله‌ای و مدل سینگ و همکاران^(۶) [۲۰] برای برازش داده‌های حجم مولی مازاد مورد استفاده قرار گرفت. ویژگی‌های رئولوژیکی نانوسیال‌ها در کسر حجمی نانوذره‌های (ϕ_1) برابر ۱،۵٪ و ۵٪ در سرعت‌های برشی $\gamma = 1000 - 1001 \text{ s}^{-1}$ در دمای ۲۹۸،۱۵ کلون اندازه‌گیری شد. مدل‌های پلاستیک بینگهام^(۷) و هرشل بالکلی^(۸) [۲۱] و معادله کاریویاسودای تصحیح شده^(۹) در این کار پژوهشی برای مدل‌سازی ویژگی‌های رئولوژیکی نانوسیال‌ها مورد استفاده قرار گرفت.

بخش تجربی

مواد

در این کار پژوهشی ذره‌های منیزیم اکسید (Bulk-MgO) با درصد خلوص ۹۹٪ از شرکت مرک (Merck) آلمان خریداری شده است. نانوذره‌های منیزیم اکسید با اندازه متوسط ۲۰ نانومتر با درصد خلوص ۹۹٪

ژن درمانی، مواد اولیه داروسازی و غیره مورد استفاده قرار گیرند [۵]. مطالعه ویژگی‌های گرمایی، رئولوژیکی، حجمی و ترمودینامیکی نانوسیال‌ها از نقطه نظر کاربردهای صنعتی مهم می‌باشد. ویژگی‌های رئولوژیکی برای توصیف رفتار جاری شدن سیال‌ها و همچنین تغییر ساختار مولکول‌ها درون سیال‌ها به دلیل وجود برهمکنش‌های بین مولکولی و درون مولکولی دارای اهمیت می‌باشند. اندازه‌گیری ویژگی‌های رئولوژیکی اطلاعات مفیدی نیز در مورد کاربرد محلول‌های کلئیدی در صنایع غذایی، صنایع رنگ و سیال‌های رسانای گرما می‌دهند [۶]. نانوذره‌های مورد توجه در این کار پژوهشی برای تهیه نانوسیال‌ها، منیزیم اکسید (MgO) می‌باشد. به علت مشکل‌های موجود در استفاده از سیال‌های سنتی و حتی میکروسیال‌ها، از جمله رسوب و ته نشینی ذره‌ها، سائیدگی و مسدود شدن لوله‌ها و افزایش افت فشار در مجاری سیال، پژوهشگران به مطالعه و استفاده از سیال‌های دارای نانوذره‌ها روی آورده‌اند. کاربردهای صنعتی نانوذره‌های MgO دلیل اصلی توجه پژوهشگران به مطالعه ویژگی‌های گرمایی و گرانیروی محلول‌های کلئیدی و نانوسیال‌های دارای این نانوذره‌ها و پلیمرها می‌باشد. در مورد کارهای پژوهشی انجام گرفته در این زمینه می‌توان به موارد زیر اشاره نمود:

هدایت گرمایی نانوذره‌های MgO در آب و مخلوط آب - اتیلن گلیکول (EG) توسط اسفه و همکاران^(۱) در دماهای و کسرهای حجمی گوناگون از نانو ذره اندازه‌گیری شده است [۹-۷]. اثر نانوذره‌ها در افزایش هدایت گرمایی و گرانیروی نانوسیال دارای نانوذره‌های هیبریدی Ag-MgO و آب نیز توسط این گروه پژوهشی مطالعه شده است [۱۰]. زای و همکاران^(۲) افزایش انتقال گرمای نانوسیال MgO-EG-H₂O درون تیوپ‌های مسی دوار را دیده‌اند [۱۱]. منلیک و همکاران^(۳) افزایش انتقال گرما توسط نانوسیال MgAl₂O₄-EG را مطالعه نموده‌اند [۱۲]. اثر افزایش فشار در ویسکوزیته و ویژگی‌های الکترورئولوژیکی نانوسیال MgAl₂O₄-EG نیز توسط زیلا و همکاران^(۴) مطالعه شده است [۱۳]. رفتارهای جاری شدن و گرمایی نانوسیال‌ها نیز توسط محاسبه‌های دینامیک سیال‌ها مورد بررسی قرار گرفته است [۱۴].

(۱) Esfe et al.

(۲) Xie et al.

(۳) Menlik et al.

(۴) Zyla et al.

(۵) UV-Vis

(۶) Singh et al.

(۷) Bingham plastic

(۸) Herschel-Bulkley

(۹) Modified-Carreau-Yasuda

هم مرکز^(۱) (CC27) با قطر ۲۶۶۶۵ میلی متر و طول ۳۹۹۹۳ میلی متر و دقت چرخش ± 4 میکرومتر اندازه گیری شده است. ویژگی‌های رئولوژیکی ۵-۲ ثانیه پس از این که ویسکومتر به سرعت برشی مورد نظر رسید اندازه گیری شد. دقت کنترل دما در این رئومتر K ۰/۰۱ می‌باشد.

نتیجه‌ها و بحث

پایداری نانوسیال‌ها و توزیع اندازه ذره‌ها

ذره‌های اکسید منیزیم (Bulk-MgO) با کسر مولی ۰/۰۰۰۶ و نانوذره‌های این اکسید با کسر مولی (x_1) ۰/۰۰۰۸ در سیال پایه PEG400 پخش شده است تا محلول‌های کلوئیدی همگنی تهیه شود. به منظور مطالعه پایداری نانوسیال تهیه شده طیف‌های مرئی - فرابنفش با گذر زمان ثبت شده است. بدین منظور در طول مدت ثبت طیف‌ها، مواد درون سل‌های کوارتز بدون هیچ‌گونه حرکتی نگهداری شده اند. طیف‌های به‌دست آمده در شکل ۱-الف نشان داده شده است. در این شکل طیف مرئی - فرابنفش به دست آمده از ذره‌های Bulk-MgO در PEG400 و عکس TEM ثبت شده توسط تولیدکننده برای نانوذره‌های MgO نیز آورده شده است.

با توجه به طول موج بیشینه نشان داده شده در شکل ۱-الف برای سامانه MgO-PEG400 می‌توان دید که نسبت به سامانه Bulk-MgO-PEG400 طول موج بیشینه نانوسیال در حدود ۴۴ نانومتر جابه‌جا شده و جابه‌جایی آبی نشان می‌دهد. این می‌تواند بیانگر کوچک شدن اندازه توده‌های نانوذره‌های MgO درون سیال پایه PEG400 باشد. اثرهای کوانتومی شبیه بزرگ شدن فاصله مابین ترازها در نتیجه کوچک شدن اندازه توده‌های نانو ذره عامل اصلی جابه‌جایی آبی در طیف‌های UV-Vis است و این پدیده به طور معمول برای ذره‌های کوچک‌تر از ۸۰ انگسترم دیده می‌شود [۲۲، ۲۳]. پایداری نانوسیال‌های MgO-PEG400-PEG2000 (با $x_1 = 0.0009$) و MgO-PEG400-PEG6000 (با $x_1 = 0.0010$) نیز با ثبت طیف مرئی - فرابنفش با گذر زمان مطالعه شده است؛ نتیجه‌های به دست آمده در شکل‌های ۱-ب و ۱-ج نشان داده شده است.

همچنان که از این شکل‌ها دیده می‌شود با افزودن PEG2000 و PEG6000 به نانوسیال MgO-PEG400 دو پیک مربوط به MgO همپوشانی می‌کنند، در ضمن پایداری نانوسیال با افزودن

از شرکت (US Research Nanomaterials, Inc. USA) خریداری شده است. به منظور حذف رطوبت جذب شده در سطح نانوذره‌ها، این مواد در محیط خلا به مدت دو ساعت قرار گرفت و سپس در دسیکاتور تحت آرگون نگهداری شد. PEG با جرم مولکولی (g/mol) ۴۰۰ از شرکت Sinochem و با جرم‌های مولکولی (g/mol) ۲۰۰۰ و ۶۰۰۰ از شرکت مرک آلمان خریداری شده است و بدون خالص سازی مورد استفاده قرار گرفته است.

تهیه نانوسیال‌ها

PEG400 و PEG2000 به نسبت ۱:۲۷۵ در دمای K ۳۲۸/۱۵ ترکیب شد تا محلول همگنی تهیه شود، سپس این محلول سرد شد و نانوذره‌های MgO در این محلول با اعمال موج فراصوت به مدت چهار ساعت در حمام فراصوت (Ultrasonic bath, Grant, Grant instruments (Cambridge) Ltd, England) پخش شدند. نانوسیال MgO-PEG400-PEG6000 نیز شبیه نانوسیال MgO-PEG400-PEG2000 تهیه شد. نانوذره‌های MgO در سیال پایه PEG400 به کمک اعمال موج فراصوت به مدت چهار ساعت در حمام (Ultrasonic bath, Grant, Grant instruments (Cambridge) Ltd, England) پخش شد تا نانوسیال MgO-PEG400 نیز تهیه شود.

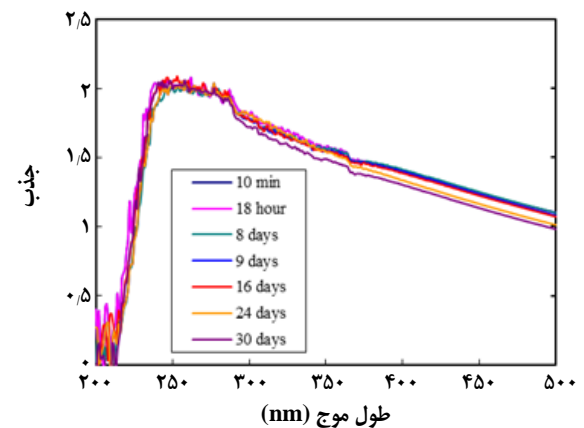
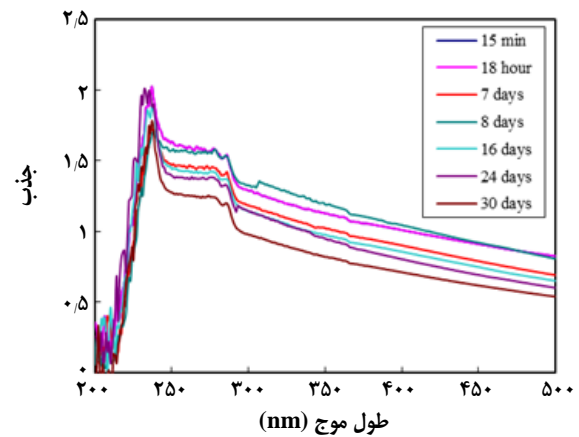
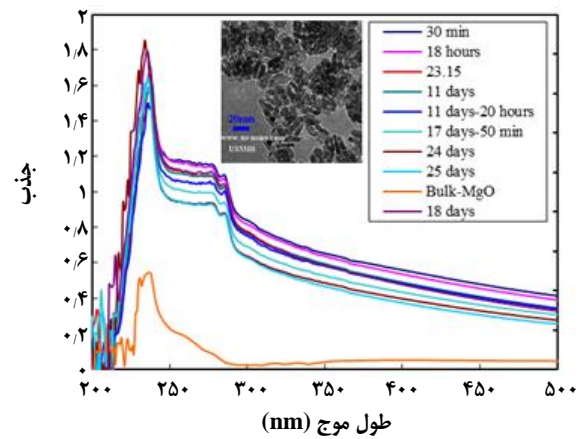
دستگاه‌ها

در این کار پژوهشی برای تهیه نانوسیال‌ها از ترازوی دیجیتالی (A&D HR-200, A&D company, limited, Japan) با دقت mg ۰/۱ استفاده شده است. طیف سنج مرئی - فرابنفش (Shimadzu UV-1700-Pharma spectrophotometer) مورد استفاده قرار گرفته است. توزیع اندازه ذره‌های MgO پخش شده در سیال پایه و مقدارهای پتانسیل زتا توسط دستگاه تفرق نور پویا (DLS, Malvern, Nano ZS, ZEN 3600, England) به دست آمده است. برای اندازه‌گیری دانسیته، پیکنومتر Isolab کالیبره شده به حجم 5cm^3 و دارای درپوش منفذ دار با لوله موئینی به قطر $0.1 \pm$ میلی متر استفاده شده است. دما توسط ترموستات دمایی (Julabo, MD-18v, Germany) با دقت K ۰/۱ ثابت نگه داشته شده است. ویژگی‌های رئولوژیکی نانوسیال‌ها با استفاده از رئومتر (Anton Paar-Physica MCR 300) با ویسکومتر استوانه‌ای

(۱) Concentric-cylinders viscometer

به مقدار چشمگیری کاهش می‌یابد و افت سطح زیر پیک افزایش می‌یابد ولی با افزودن PEG6000 به نانو سیال MgO-PEG400 افت سطح زیر پیک بسیار جزئی می‌باشد، در نتیجه پایداری نانوسیال بهبود می‌یابد و تا سی روز پایدار می‌ماند. به منظور اطمینان کامل از پایداری نانوسیال‌های MgO-PEG400 و MgO-PEG400-PEG6000 پتانسیل زتا را توسط دستگاه تفرق نور پویا اندازه گیری نمودیم. پتانسیل زتا یک پارامتر برای ثبات بالقوه سامانه کلئیدی می‌باشد. سامانه‌های کلئیدی که زتاسایزر می‌تواند پتانسیل زتای آن‌ها را محاسبه کند، سوسپانسیون و امولسیون می‌باشند. به‌طور کلی مرز پایداری و ناپایداری سوسپانسیون را می‌توان برحسب پتانسیل زتا تعیین کرد. سوسپانسیون‌هایی که پتانسیل زتای آن‌ها از ۳۰ میلی ولت بیش‌تر و یا از ۳۰- میلی ولت کمتر باشد، پایدار می‌باشند [۲۴]. پتانسیل زتای اندازه گیری شده برای هر دو نمونه نانوسیال‌های تهیه شده میلی ولت می‌باشد؛ این نتیجه بیانگر این است که سامانه نانوسیال مورد مطالعه یک سوسپانسیون پایدار همگن می‌باشد. پس از اطمینان از پایداری سامانه‌های نانوسیال مطالعه شده، توزیع اندازه ذره‌ها برای نانوسیال‌های MgO- و MgO-PEG400 توسط دستگاه تفرق نور پویا، اندازه گیری شده است. توزیع اندازه ذره‌ها برای سامانه‌های MgO-PEG400 و MgO-PEG400-PEG6000 در شکل ۲ بر اساس شدت نور متفرق شده توسط ذره‌ها نشان داده شده است. اندازه متوسط نانوذره‌های MgO ۵۷۰ و ۶۹۹ نانومتر به ترتیب برای سامانه‌های MgO-PEG400 و MgO-PEG400-PEG6000 به‌دست آمده است.

شکل ۲ نشان می‌دهد که اندازه متوسط ذره‌ها در نانوسیال MgO-PEG400 کوچک‌تر از نانوسیال MgO-PEG400-PEG6000 می‌باشد. در مطالعه یو^(۱) و همکاران افزایش اندازه ذره‌ها در سامانه نانوسیال MgO+ ethylene glycol به توده ای شدن نانوذره‌ها نسبت داده شده است [۲۵]. در این کار پژوهشی اندازه بزرگ و توزیع وسیع اندازه نانوذره‌های MgO می‌تواند از دوره شدن ذره‌ها توسط زنجیر پلیمر و همچنین قرارگرفتن ذره‌ها در فضاهای به‌وجود آمده توسط پلیمر (اثر فشردگی^(۲)) ناشی شود. بنابراین اندازه بزرگ و توزیع وسیع اندازه نانوذره‌ها شاید به علت حضور پلیمر در اطراف نانوذره‌ها و همچنین ساختار برهم انباشته نانوذره‌ها می‌باشد.



شکل ۱ - الف) طیف جذب UV-Vis نانوسیال MgO-PEG 400 با کسر مولی MgO برابر ۰/۰۰۰۸ و Bulk-MgO با کسر مولی برابر ۰/۰۰۰۶ و عکس TEM ثبت شده توسط تولیدکننده برای نانوذره‌های MgO (ب) طیف جذب UV-Vis نانوسیال-MgO-PEG400 با کسر مولی MgO برابر ۰/۰۰۰۹ با گذر زمان. ج) طیف جذب UV-Vis نانوسیال-MgO-PEG400-PEG6000 با کسر مولی MgO برابر ۰/۰۰۱۰ با گذر زمان.

(۱) Yu

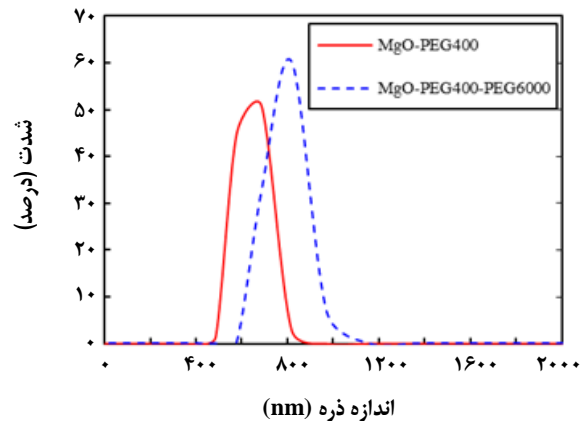
(۲) Packing effect

از شکل‌های ۳ تا ۵ و جدول‌های ۱ و ۲ می‌توان نتیجه گرفت که مقادیرهای V_m^E برای هر سه سامانه مثبت است و با افزایش دما کاهش می‌یابد. مقادیرهای مثبت حجم مولی مازاد مشخصه‌ای از برهمکنش‌های واندروالس بین مولکول‌ها می‌باشد؛ کاهش حجم مولی مازاد با افزایش دما به دلیل اثر فشردگی و کاهش برهمکنش‌ها رخ می‌دهد [۲۷، ۲۸]. بنابراین می‌توان نتیجه‌گیری نمود که در سامانه‌های نانوسیال MgO-PEG400، MgO-PEG400-PEG2000 و MgO-PEG400-PEG6000 برهمکنش غالب واندروالس می‌باشد. همچنان که از شکل ۳ دیده می‌شود افزایش غلظت نانوذره‌های MgO باعث کاهش ملایم حجم مولی مازاد می‌شود ولی پس از یک غلظت کمینه به تقریب $x_1 = 0.05$ حجم مولی مازاد افزایش می‌یابد؛ شکل‌های ۴ و ۵ نشان می‌دهند که در حضور PEG2000 و PEG6000 کمینه کسر مولی نانوذره در حدود ۰.۰۱ کاهش می‌یابد. این وقایع می‌تواند بدین علت باشد که در نانوسیال MgO-PEG400 تا کسر مولی ۰.۰۵ برهمکنش واندروالس مابین مولکول‌های MgO و PEG400 شاید به دلیل توده‌ای شدن نانوذره‌های MgO و قوی بودن برهمکنش بین نانوذره‌ها کاهش می‌یابد، ولی پس از یک غلظت کمینه دوباره برهمکنش بین مولکول‌های MgO و PEG400 افزایش می‌یابد؛ افزودن پلیمرهای PEG2000 و PEG6000 به نانوسیال MgO-PEG400 از توده‌ای شدن اولیه نانوذره‌های MgO جلوگیری می‌کند و می‌نیمم غلظت در مقادیر کمی دیده می‌شود.

برای برازش داده‌های حجم مولی مازاد سامانه‌های دوتایی می‌توان از معادله‌های ردلیش - کیستر^(۱) [۲۹] و همکاران^(۲) [۳۰] استفاده نمود و برای برازش داده‌های v_m^E سامانه‌های سه تایی از معادله سینگ و همکاران [۲۰] استفاده نمود. در این کار پژوهشی داده‌های حجم مولی مازاد نانوسیال MgO-PEG400 توسط معادله‌های ردلیش - کیستر [۲۹] و همکاران [۳۰] مورد برازش قرار گرفت ولی نتیجه‌های رضایت بخشی به دست نیامد. بنابراین برای برازش داده‌های v_m^E نانوسیال MgO-PEG400 از یک چند جمله‌ای به صورت معادله زیر استفاده شد:

$$V_m^E = \sum_{i=0}^n A_i x_i^i \quad (2)$$

در این معادله A پارامترهای تنظیم شونده معادله می‌باشد و از برازش داده‌های حجم مولی مازاد با این معادله تعیین می‌شوند؛



شکل ۲ - توزیع اندازه نانو ذرات در نانو سیال های MgO-PEG400 و MgO-PEG400-PEG6000

ویژگی‌های حجمی نانوسیال‌ها

دانشیته نانوسیال‌های MgO-PEG400، MgO-PEG400-PEG2000 و MgO-PEG400-PEG6000 در غلظت‌های گوناگونی از MgO و در دماهای K (۳۱۸/۱۵ و ۳۰۸/۱۵، ۲۹۸/۱۵) اندازه‌گیری شد. نتیجه‌های به دست آمده در جدول‌های ۱ و ۲ آورده شده است.

به منظور شناخت برهمکنش‌های درون نانوسیال، حجم مولی مازاد (v_m^E) با استفاده از داده‌های تجربی دانشیته توسط معادله (۱) محاسبه شدند:

$$V_m^E = \sum_{i=1}^r x_i M_i \left[\frac{1}{d} - \frac{1}{d_i} \right] \quad (1)$$

در این معادله x_i ، M_i و d_i به ترتیب بیانگر کسر مولی، جرم مولکولی و دانشیته جزء i می‌باشند. مقدار عددی دانشیته برای نانوذره MgO $3580 \text{ (kg/m}^3\text{)}$ [۲۶] استفاده شده است؛ به دلیل این‌که غلظت مخلوط‌های بررسی شده رقیق می‌باشد، بنابراین مقادیرهای حجم مولی مازاد محاسبه شده به مقدار عددی دانشیته نانوذره زیاد حساس نمی‌باشد پس می‌توان برای هر سه دمای مورد نظر این عدد را در محاسبه v_m^E به کار برد. مقادیرهای محاسبه شده حجم مولی مازاد نیز در جداول ۱ و ۲ گزارش شده است. تغییر v_m^E با دما و غلظت MgO برای سامانه‌های MgO-PEG400، MgO-PEG400-PEG2000 و MgO-PEG400-PEG6000 در شکل‌های ۳ تا ۵ نشان داده شده است.

(۱) Redlich-Kister

(۲) Ott et al.

جدول ۱- دانسیته (d)، حجم مولی مازاد (V_m^E)، برای نانوسیال MgO-PEG400 در دماهای گوناگون.

$100 \cdot X_1$	$100 \cdot \phi_1$	d (kg/m^3)	$10^6 \cdot V_m^E$ (m^3/mol)
$T = 298,15 \text{ K}$			
۰	۰	۱۱۲۲,۶	
۰,۰۷	۰,۰۰۲	۱۱۱۵,۳	۲,۳۴۲
۰,۱۴	۰,۰۰۴	۱۱۱۶,۰	۲,۱۳۳
۰,۳۳	۰,۰۱	۱۱۱۶,۳	۲,۰۸۰
۰,۵۰	۰,۰۲	۱۱۱۶,۹	۱,۹۲۹
۰,۷۸	۰,۰۲	۱۱۱۷,۳	۱,۸۶۵
۱,۵۱	۰,۰۵	۱۱۱۸,۳	۱,۷۱۸
۲,۳۱	۰,۰۷	۱۱۱۹,۲	۱,۶۲۵
۳,۰۱	۰,۱	۱۱۲۰,۳	۱,۴۴۹
۴,۳۷	۰,۱۴	۱۱۲۳,۰	۰,۹۴۹
۷,۹۹	۰,۲۷	۱۱۲۵,۲	۱,۱۹۹
۱۰,۴۱	۰,۳۷	۱۱۲۶,۲	۱,۵۲۸
۱۲,۹۵	۰,۴۷	۱۱۲۷,۵	۱,۸۱۹
$T = 308,15 \text{ K}$			
۰	۰	۱۱۱۴,۴	
۰,۰۷	۰,۰۰۲	۱۱۰۹,۶	۱,۵۶۵
۰,۱۴	۰,۰۰۴	۱۱۰۹,۹	۱,۴۸۴
۰,۳۳	۰,۰۱	۱۱۱۰,۲	۱,۴۳۱
۰,۵۰	۰,۰۲	۱۱۱۰,۵	۱,۳۷۶
۰,۷۸	۰,۰۲	۱۱۱۰,۷	۱,۳۷۷
۱,۵۱	۰,۰۵	۱۱۱۲,۴	۱,۰۰۸
۲,۳۱	۰,۰۷	۱۱۱۳,۲	۰,۹۵۱
۳,۰۱	۰,۱۰	۱۱۱۴,۸	۰,۶۲۱
۴,۳۷	۰,۱۴	۱۱۱۵,۹	۰,۶۲۰
۷,۹۹	۰,۲۷	۱۱۱۸,۳	۰,۸۲۳
۱۰,۴۱	۰,۳۶	۱۱۱۹,۱	۱,۲۲۲
۱۲,۹۵	۰,۴۶	۱۱۲۰,۳	۱,۵۵۲

جدول ۱- (ادامه)

x_1	ϕ_1	d (kg/m^3)	V_m^E (m^3/mol)
$T=318.15 \text{ K}$			
۰	۰	۱۱۰۶۲	
۰.۰۷	۰.۰۰۲	۱۱۰۲۷	۱.۱۶۹
۰.۱۴	۰.۰۰۴	۱۱۰۳۶	۰.۸۹۱
۰.۳۳	۰.۰۱	۱۱۰۴۰	۰.۸۰۶
۰.۵۰	۰.۰۲	۱۱۰۴۴	۰.۷۱۸
۰.۷۸	۰.۰۲	۱۱۰۴۸	۰.۶۵۶
۱.۵۱	۰.۰۵	۱۱۰۵۵	۰.۶۱۰
۲.۳۱	۰.۰۷	۱۱۰۶۷	۰.۴۲۷
۳.۰۱	۰.۱۰	۱۱۰۷۵	۰.۳۵۰
۴.۳۷	۰.۱۴	۱۱۰۸۸	۰.۲۹۰
۷.۹۹	۰.۲۷	۱۱۱۱.۸	۰.۳۲۵
۱۰.۴۱	۰.۳۶	۱۱۱۳.۰	۰.۶۲۲
۱۲.۹۵	۰.۴۶	۱۱۱۴.۳	۰.۹۴۳

ϕ_1 کسر حجمی نانو ذرات MgO می باشد.

جدول ۲- دانسیته (d)، حجم مولی مازاد (V_m^E)، برای نانوسیال های MgO-PEG400-PEG2000 و MgO-PEG400-PEG6000 در دماهای گوناگون.

x_1	ϕ_1	x_2	d (kg/m^3)	V_m^E (m^3/mol)	x_1	ϕ_1	x_2	d (kg/m^3)	V_m^E (m^3/mol)
MgO-PEG400-PEG2000					MgO-PEG400-PEG6000				
$T=298.15 \text{ K}$									
۰	۰	۰.۹۹۹۳	۱۱۱۶.۴		۰	۰	۰.۹۹۹۸	۱۱۱۶.۸	
۰.۰۷	۰.۰۰۲	۰.۹۹۹۱	۱۱۰۶.۶	۵.۱۷۷	۰.۰۷	۰.۰۰۲	۰.۹۹۹۱	۱۱۰۳.۲	۶.۲۹۴
۰.۱۴	۰.۰۰۴	۰.۹۹۸۴	۱۱۰۶.۹	۵.۰۹۳	۰.۱۴	۰.۰۰۴	۰.۹۹۸۴	۱۱۰۳.۶	۶.۱۷۵
۰.۳۳	۰.۰۱	۰.۹۹۶۵	۱۱۰۷.۵	۴.۹۳۵	۰.۳۳	۰.۰۱	۰.۹۹۶۵	۱۱۰۴.۲	۶.۰۱۴
۰.۵۱	۰.۰۲	۰.۹۹۴۷	۱۱۰۷.۸	۴.۸۷۳	۰.۵۱	۰.۰۲	۰.۹۹۴۷	۱۱۰۵.۲	۵.۷۲۱
۰.۷۸	۰.۰۲	۰.۹۹۲۰	۱۱۰۸.۳	۴.۷۶۷	۰.۷۸	۰.۰۲	۰.۹۹۲۰	۱۱۰۶.۰	۵.۵۱۴
۱.۵۱	۰.۰۵	۰.۹۸۴۷	۱۱۰۹.۲	۴.۶۲۷	۱.۵۱	۰.۰۵	۰.۹۸۴۷	۱۱۰۶.۸	۵.۴۰۱
۲.۳۲	۰.۰۷	۰.۹۷۶۶	۱۱۱۰.۵	۴.۳۸۰	۲.۳۲	۰.۰۷	۰.۹۷۶۶	۱۱۰۷.۸	۵.۲۴۲
۳.۰۲	۰.۱۰	۰.۹۶۹۶	۱۱۱۲.۰	۴.۰۵۴	۳.۰۲	۰.۱۰	۰.۹۶۹۶	۱۱۰۸.۳	۵.۲۲۶
۴.۳۹	۰.۱۴	۰.۹۵۵۹	۱۱۱۳.۴	۳.۹۱۴	۴.۳۸	۰.۱۴	۰.۹۵۵۹	۱۱۰۹.۱	۵.۲۵۴
۸.۰۱	۰.۲۷	۰.۹۱۹۷	۱۱۱۴.۰	۴.۵۳۰	۸.۰۱	۰.۲۷	۰.۹۱۹۷	۱۱۰۹.۹	۵.۷۶۴

جدول ۲- (ادامه)

$100 \cdot x_1$	$100 \cdot \phi_1$	X_2	d (kg/m ³)	$10^6 \cdot V_m^E$ (m ³ /mol)	$100 \cdot x_1$	$100 \cdot \phi_1$	X_2	d (kg/m ³)	$10^6 \cdot V_m^E$ (m ³ /mol)
MgO-PEG400-PEG2000					MgO-PEG400-PEG6000				
۱۰٫۴۴	۰٫۳۷	۰٫۸۹۵۴	۱۱۱۴٫۸	۴٫۸۳۴	۱۰٫۴۴	۰٫۳۷	۰٫۸۹۵۴	۱۱۱۰٫۹	۵٫۹۷۹
۱۲٫۹۹	۰٫۴۷	۰٫۸۶۹۹	۱۱۱۵٫۲	۵٫۲۹۱	۱۲٫۹۹	۰٫۴۷	۰٫۸۶۹۹	۱۱۱۲٫۰	۶٫۲۰۵
T=۳۰٫۸٫۱۵ K									
۰	۰	۰٫۹۹۹۳	۱۱۰٫۹۶		۰	۰	۰٫۹۹۹۸	۱۱۰٫۹۱	
۰٫۰۷	۰٫۰۰۲	۰٫۹۹۹۱	۱۱۰٫۵۹	۲٫۷۷۹	۰٫۰۷	۰٫۰۰۲	۰٫۹۹۹۱	۱۱۰٫۲۰	۴٫۰۶۲
۰٫۱۴	۰٫۰۰۴	۰٫۹۹۸۴	۱۱۰٫۶۳	۲٫۶۶۳	۰٫۱۴	۰٫۰۰۴	۰٫۹۹۸۴	۱۱۰٫۲۵	۳٫۹۱۲
۰٫۳۳	۰٫۰۱	۰٫۹۹۶۵	۱۱۰٫۷۰	۲٫۴۷۷	۰٫۳۳	۰٫۰۱	۰٫۹۹۶۵	۱۱۰٫۲۸	۳٫۸۵۴
۰٫۵۱	۰٫۰۲	۰٫۹۹۴۷	۱۱۰٫۷۲	۲٫۴۵۲	۰٫۵۱	۰٫۰۲	۰٫۹۹۴۷	۱۱۰٫۳۷	۳٫۵۹۶
۰٫۷۸	۰٫۰۲	۰٫۹۹۲۰	۱۱۰٫۷۹	۲٫۲۸۸	۰٫۷۸	۰٫۰۲	۰٫۹۹۲۰	۱۱۰٫۴۶	۳٫۳۶۲
۱٫۵۱	۰٫۰۵	۰٫۹۸۴۷	۱۱۰٫۸۵	۲٫۲۶۳	۱٫۵۱	۰٫۰۵	۰٫۹۸۴۷	۱۱۰٫۵۱	۳٫۳۶۱
۲٫۳۲	۰٫۰۷	۰٫۹۷۶۶	۱۱۰٫۹۷	۲٫۰۶۷	۲٫۳۲	۰٫۰۷	۰٫۹۷۶۶	۱۱۰٫۶۷	۳٫۰۲۷
۳٫۰۲	۰٫۱۰	۰٫۹۶۹۶	۱۱۱۰٫۲	۲٫۰۷۴	۳٫۰۲	۰٫۱۰	۰٫۹۶۹۶	۱۱۰٫۷۵	۲٫۹۳۱
۴٫۳۹	۰٫۱۴	۰٫۹۵۵۹	۱۱۱۱٫۴	۲٫۰۲۳	۴٫۳۸	۰٫۱۴	۰٫۹۵۶۰	۱۱۰٫۸۶	۲٫۸۹۶
۸٫۰۱	۰٫۲۷	۰٫۹۱۹۷	۱۱۱۲٫۹	۲٫۴۴۱	۸٫۰۱	۰٫۲۷	۰٫۹۱۹۷	۱۱۰٫۹۴	۳٫۴۹۷
۱۰٫۴۴	۰٫۳۶	۰٫۸۹۵۴	۱۱۱۳٫۸	۲٫۷۷۲	۱۰٫۴۴	۰٫۳۶	۰٫۸۹۵۴	۱۱۱۰٫۲	۳٫۸۳۰
۱۲٫۹۹	۰٫۴۶	۰٫۸۶۹۹	۱۱۱۴٫۵	۳٫۲۰۲	۱۲٫۹۹	۰٫۴۶	۰٫۸۶۹۹	۱۱۱۱٫۱	۴٫۱۷۶
T=۳۱٫۸٫۱۵ K									
۰	۰	۰٫۹۹۹۳	۱۱۰٫۱۷		۰	۰	۰٫۹۹۹۸	۱۱۰٫۱۲	
۰٫۰۷	۰٫۰۰۲	۰٫۹۹۹۱	۱۱۰٫۳۰	۱٫۰۷۴	۰٫۰۷	۰٫۰۰۲	۰٫۹۹۹۱	۱۰۹۹٫۸	۲٫۱۳۲
۰٫۱۴	۰٫۰۰۴	۰٫۹۹۸۴	۱۱۰٫۳۳	۰٫۹۹۲	۰٫۱۴	۰٫۰۰۴	۰٫۹۹۸۴	۱۱۰۰٫۸	۱٫۸۱۷
۰٫۳۳	۰٫۰۱	۰٫۹۹۶۵	۱۱۰٫۳۹	۰٫۸۴۱	۰٫۳۳	۰٫۰۱	۰٫۹۹۶۵	۱۱۰٫۱۶	۱٫۵۹۸
۰٫۵۱	۰٫۰۲	۰٫۹۹۴۷	۱۱۰٫۴۲	۰٫۷۸۶	۰٫۵۱	۰٫۰۲	۰٫۹۹۴۷	۱۱۰٫۲۱	۱٫۴۷۶
۰٫۷۸	۰٫۰۲	۰٫۹۹۲۰	۱۱۰٫۵۰	۰٫۵۹۳	۰٫۷۸	۰٫۰۲	۰٫۹۹۲۰	۱۱۰٫۲۴	۱٫۴۴۳
۱٫۵۱	۰٫۰۵	۰٫۹۸۴۷	۱۱۰٫۵۵	۰٫۶۱۲	۱٫۵۱	۰٫۰۵	۰٫۹۸۴۷	۱۱۰٫۲۹	۱٫۴۵۶
۲٫۳۲	۰٫۰۷	۰٫۹۷۶۶	۱۱۰٫۶۵	۰٫۴۹۳	۲٫۳۲	۰٫۰۷	۰٫۹۷۶۶	۱۱۰٫۳۳	۱٫۵۲۳
۳٫۰۲	۰٫۱۰	۰٫۹۶۹۶	۱۱۰٫۶۹	۰٫۵۴۲	۳٫۰۲	۰٫۱۰	۰٫۹۶۹۶	۱۱۰٫۳۸	۱٫۵۲۳
۴٫۳۹	۰٫۱۴	۰٫۹۵۵۹	۱۱۰٫۷۶	۰٫۶۶۹	۴٫۳۸	۰٫۱۴	۰٫۹۵۶۰	۱۱۰٫۴۳	۱٫۷۰۷
۸٫۰۱	۰٫۲۷	۰٫۹۱۹۷	۱۱۰٫۸۴	۱٫۳۵۳	۸٫۰۱	۰٫۲۷	۰٫۹۱۹۷	۱۱۰٫۴۸	۲٫۴۴۸
۱۰٫۴۴	۰٫۳۶	۰٫۸۹۵۴	۱۱۰٫۹۶	۱٫۶۲۵	۱۰٫۴۴	۰٫۳۶	۰٫۸۹۵۴	۱۱۰٫۵۳	۲٫۹۰۰
۱۲٫۹۹	۰٫۴۶	۰٫۸۶۹۹	۱۱۱۰٫۵	۲٫۰۳۴	۱۲٫۹۹	۰٫۴۶	۰٫۸۶۹۹	۱۱۰٫۵۹	۳٫۳۶۱

x₂ کسر مولی PEG400 می باشد.

نتیجه‌های به دست آمده در جدول ۳ آورده شده است خط‌های ممتد در شکل ۳ مطابق این معادله است. در برازش داده‌های حجم مولی مازاد نانوسیال‌های MgO-PEG400-PEG2000 و MgO-PEG400-PEG6000، کارایی خوبی از مدل سینگ و همکاران [۲۰] (معادله (۳)) دیده شد.

$$V_{m,123}^E = V_m^E + V_{m,12}^E + V_{m,13}^E + V_{m,23}^E \quad (3)$$

$$x_1 x_2 x_3 \left[\frac{A}{123} + \frac{B}{123} x_1 - (x_1 + \frac{x_2}{123})^2 \frac{C}{123} - x_1^2 \right]$$

در این معادله زیرنویس ۱، ۲ و ۳ به ترتیب بیانگر نانوذره‌های PEG400، PEG2000 و PEG6000 می‌باشند. $V_{m,123}^E$ حجم مولی مازاد محلول سه تایی (دارای اجزا ۱، ۲ و ۳) می‌باشد؛ $V_{m,12}^E$ ، $V_{m,13}^E$ و $V_{m,23}^E$ حجم مولی مازاد محلول‌های دوتایی مربوطه می‌باشند؛ B و C پارامترهای این معادله می‌باشند. پارامترهای به دست آمده از این معادله به همراه مقادیر انحراف استاندارد در جدول ۳ برای نانوسیال‌های MgO-PEG400-PEG2000 و MgO-PEG400-PEG6000 گزارش شده است. خط‌های ممتد در شکل‌های ۴ و ۵ مطابق با این مدل می‌باشد.

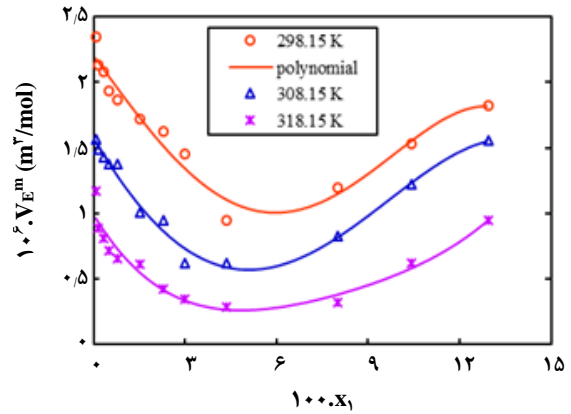
همچنان که از جدول‌های ۳ و ۴ و همچنین شکل‌های ۳ تا ۵ دیده می‌شود، کارایی معادله چندجمله‌ای و مدل سینگ و همکاران در برازش داده‌های حجم مولی مازاد نانوسیال‌های MgO-PEG400، MgO-PEG400-PEG2000 و MgO-PEG400-PEG6000 خوب می‌باشد.

ویژگی‌های رئولوژیکی

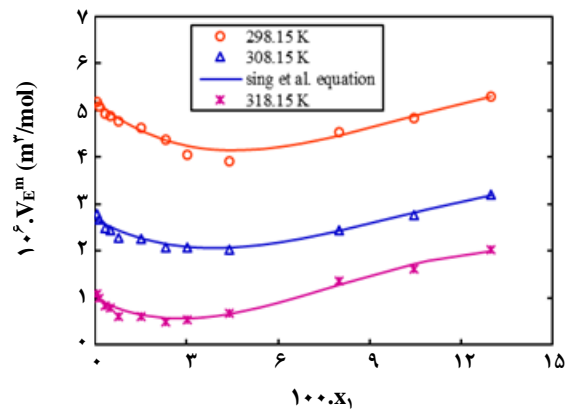
ویژگی‌های رئولوژیکی سیال‌های پایه

ویژگی‌های رئولوژیکی (تغییرهای رفتار تنش برشی (τ) و گرانبروی (η) با سرعت برشی) برای سیال‌های پایه PEG400، PEG400-PEG2000 و PEG400-PEG6000 در دمای ۲۹۸٫۱۵ کلوین مطالعه شد نتیجه‌های به دست آمده در شکل ۶ نشان داده شده است.

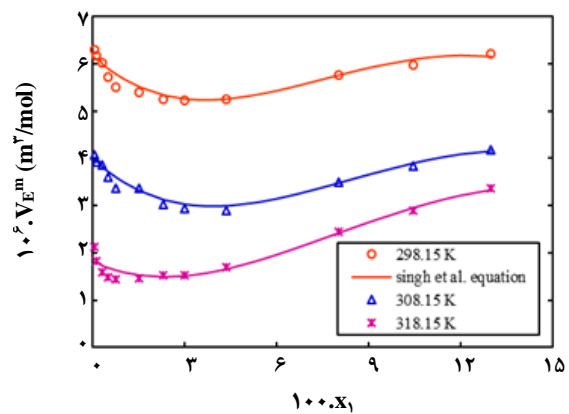
شکل ۶ نشان می‌دهد که PEG400 دارای رفتار نیوتنی می‌باشد و یک سیال نیوتنی است و سیال‌های پایه PEG400-PEG2000 و PEG400-PEG6000 در سرعت‌های برشی خیلی کم رفتار غلیظ شدگی برشی جزئی نشان می‌دهند که می‌تواند به علت تشکیل ساختار خاص و وجود برهمکنش خاص در محلول با اعمال سرعت برشی باشد. در شکل‌های ۷-۹ ویژگی‌های رئولوژیکی نانو سیال‌های مطالعه شده در این کار پژوهشی آورده شده است.



شکل ۳ - حجم مولی مازاد بر حسب کسر مولی نانوذره MgO برای سامانه MgO-PEG400 در دماهای گوناگون



شکل ۴ - حجم مولی مازاد بر حسب کسر مولی نانوذره MgO برای سامانه MgO-PEG400-PEG2000 در دماهای گوناگون.



شکل ۵ - حجم مولی مازاد بر حسب کسر مولی نانوذره MgO برای سامانه MgO-PEG400-PEG6000 در دماهای گوناگون.

جدول ۳- پارامترهای چند جمله ای (معادله (۲)) به همراه انحراف استاندارد برای نانو سیال MgO-PEG400 در ماههای گوناگون.

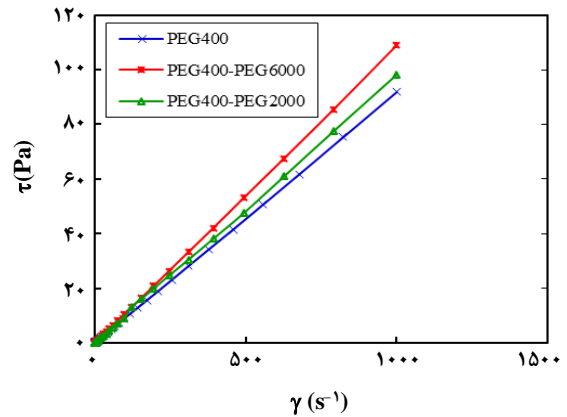
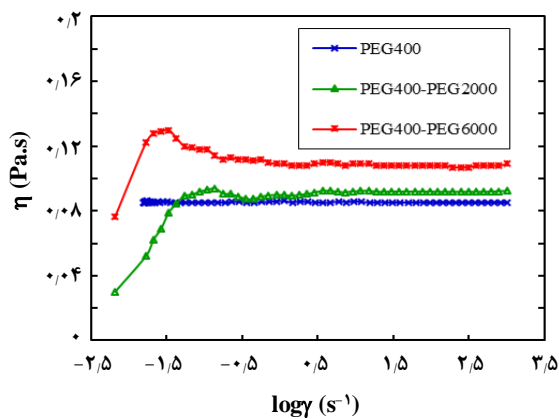
A ₀	A ₁	A ₂	A ₃	A ₄	σ ^x
T=۲۹۸٫۱۵ K					
۲٫۲۰۳	-۳۱٫۶۵۶	-۵۰٫۹۸۲	۵۸۲۲٫۱۶۷	-۲۸۷۲۱٫۱۸۹	σ(۱۰ ^۶ .V ^{E_m}) = ۰٫۰۹۲
					σ(d/kg.m ⁻³) = ۰٫۲۹۰
T=۳۰۸٫۱۵ K					
۱٫۵۷۸	-۴۰٫۳۹۱	۳۹۱٫۳۹۴	۸۳۵٫۹۷۱	-۱۱۲۹۵٫۴۳۵	σ(۱۰ ^۶ .V ^{E_m}) = ۰٫۰۵۳
					σ(d/kg.m ⁻³) = ۰٫۱۶۸
T=۳۱۸٫۱۵ K					
۰٫۹۹۲	-۳۸٫۵۹۹	۶۹۸٫۵۶۸	-۵۱۵۹٫۳۳۲	۱۵۸۰۹٫۴۴۳	σ(۱۰ ^۶ .V ^{E_m}) = ۰٫۱۱۰
					σ(d/kg.m ⁻³) = ۰٫۲۳۹

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (V_m^{E,exp} - V_m^{E,cal})^2}{N}}$$

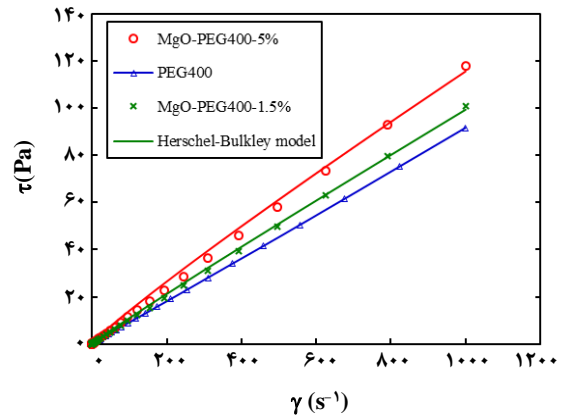
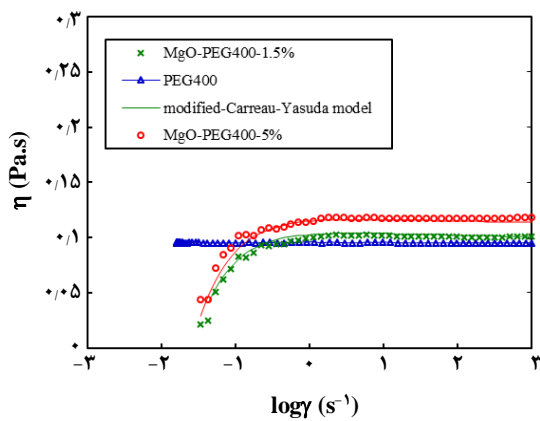
× تعداد داده های تجربی است.

جدول ۴- پارامترهای مدل سینگ و همکاران (معادله (۳)) به همراه انحراف استاندارد (σ) برای نانوسیال های MgO-PEG400-PEG2000 و MgO-PEG400-PEG6000 در ماههای گوناگون.

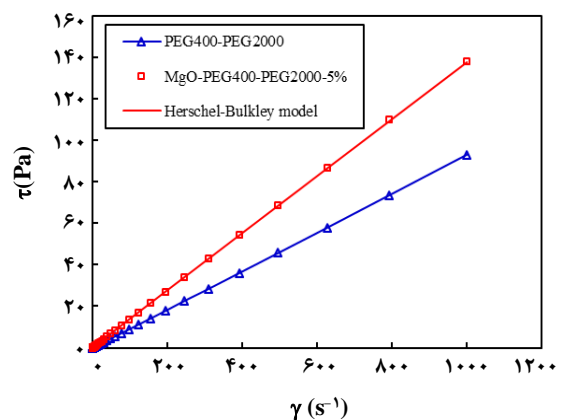
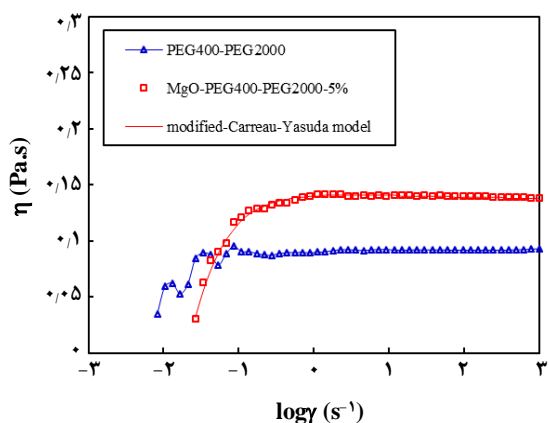
V ^E _{m۱۲}	V ^E _{m۱۲}	V ^E _{m۲۲}	۱۰ ^{-۵} .A _{۱۲۲}	۱۰ ^{-۷} .B _{۱۲۲}	۱۰ ^{-۸} .C _{۱۲۲}	σ
MgO-PEG400-PEG2000						
T=۲۹۸٫۱۵ K						
۰٫۶۸۲	۰٫۷۷۹	۰٫۸۷۰	-۳٫۴۴۹	۲٫۴۵۱	۰٫۲۴۵۱	σ(۱۰ ^۶ .V ^{E_m}) = ۰٫۰۹
						σ(d/kg/m ^۳) = ۰٫۲۸۳
T=۳۰۸٫۱۵ K						
۰٫۴۸۲۸	۰٫۵۲۶۹	۰٫۵۶۳۹	-۲٫۰۸۵	۱٫۸۲۵	۰٫۱۸۲۵	σ(۱۰ ^۶ .V ^{E_m}) = ۰٫۰۷۳
						σ(d/kg/m ^۳) = ۰٫۲۳
T=۳۱۸٫۱۵ K						
۰٫۲۶۲۱	۰٫۹۴۱۷	۰٫۳۲۲۱	-۲٫۴۹	۱٫۹۶۴	۰٫۱۹۶۴	σ(۱۰ ^۶ .V ^{E_m}) = ۰٫۰۵۶
						σ(d/kg/m ^۳) = ۰٫۱۷۳
MgO-PEG400-PEG6000						
T=۲۹۸٫۱۵ K						
۰٫۵۸۹۲	۰٫۶۶۲۲	۰٫۷۲۸۵	-۹٫۲۹۱	۶٫۹۲۵	۰٫۶۹۲۵	σ(۱۰ ^۶ .V ^{E_m}) = ۰٫۰۶۵
						σ(d/kg/m ^۳) = ۰٫۲۰۴
T=۳۰۸٫۱۵ K						
۰٫۴۷۳	۰٫۵۱۵۴	۰٫۵۵۰۷	-۷٫۲۴۲	۵٫۹۵	۰٫۵۹۵	σ(۱۰ ^۶ .V ^{E_m}) = ۰٫۰۴۹
						σ(d/kg/m ^۳) = ۰٫۱۵۲
T=۳۱۸٫۱۵ K						
۰٫۴۳۲۹	۰٫۴۶۵۶	۰٫۴۹۱۶	-۵٫۹۴۹	۴٫۷۷۹	۰٫۴۷۷۹	σ(۱۰ ^۶ .V ^{E_m}) = ۰٫۰۵۷
						σ(d/kg/m ^۳) = ۰٫۱۷۵



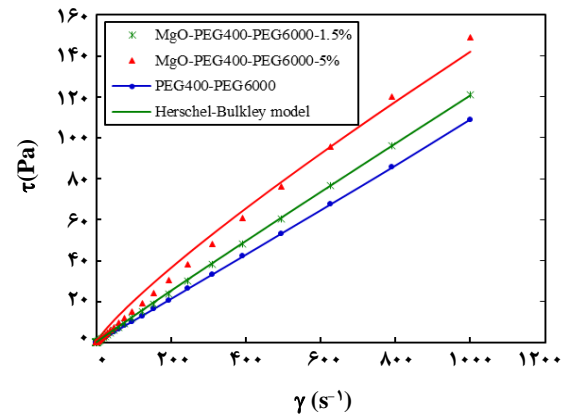
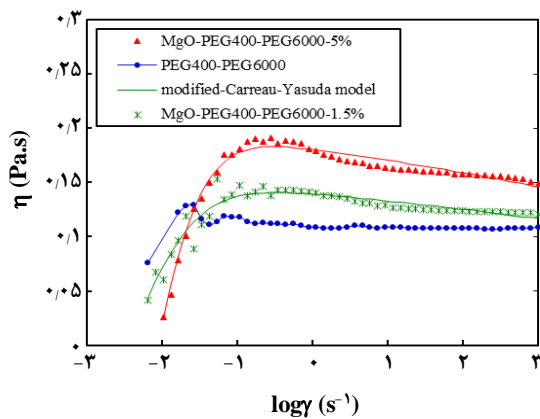
شکل ۶- الف) تغییرهای تنش برشی (τ) با سرعت برشی ($\dot{\gamma}$) ب) تغییر گرانیوی (η) با لگاریتم سرعت برشی ($\dot{\gamma}$) برای سیال‌های پایه در دمای ۲۹۸/۱۵ کلوین.



شکل ۷- الف) تغییرهای تنش برشی (τ) با سرعت برشی ($\dot{\gamma}$) ب) تغییر گرانیوی (η) با لگاریتم سرعت برشی ($\dot{\gamma}$) برای نانوسیال MgO-PEG400 در غلظت‌های گوناگون و دمای ۲۹۸/۱۵ کلوین.



شکل ۸- الف) تغییرهای تنش برشی (τ) با سرعت برشی ($\dot{\gamma}$) ب) تغییر گرانیوی (η) با لگاریتم سرعت برشی ($\dot{\gamma}$) برای نانوسیال MgO-PEG400-PEG2000 در دمای ۲۹۸/۱۵ کلوین.



شکل ۹ - الف) تغییرهای تنش برشی (τ) با سرعت برشی (γ) ب) تغییر گرانی (η) با لگاریتم سرعت برشی (γ) برای نانوسیال $\text{MgO-PEG400-PEG6000}$ در غلظت‌های گوناگون و دمای $298/15$ کلوین.

این می‌تواند به دلیل وابستگی خطی $\tau - \phi_1$ در $\tau > \tau_y$ در مدل پلاستیک بینگهام باشد. در نانوسیال‌های مطالعه شده، ارتباط بین τ و γ به دلیل رفتار غلیظ شدگی برشی جزئی در سرعت‌های برشی کم، به طور کامل خطی نیست بنابراین مقادیر تنش حد جاری شدن تخمین زده شده توسط مدل هرشل - بالکی نسبت به مدل پلاستیک بینگهام از صحت زیادی برخوردار است.

تغییرهای گرانی نانوسیال‌های MgO-PEG400 ، $\text{MgO-PEG400-PEG6000}$ و $\text{MgO-PEG400-PEG2000}$ با سرعت برشی توسط مدل‌های گوناگون مورد برآزش قرار گرفت ولی نتیجه‌های رضایت بخشی به دست نیامد؛ تنها نتیجه‌های به دست آمده از معادله کاریواسودا [۳۱] به نسبت قابل قبول بود؛ بنابراین در این کار پژوهشی ما معادله کاریواسودا را با مد نظر قرار دادن داده‌های تجربی به صورت زیر تصحیح نمودیم:

$$\frac{\eta - \eta_{\infty}}{\eta_0 - \eta_{\infty}} = \left[1 + (\lambda \gamma)^a + (\lambda \gamma)^{rb} \right] \left(\frac{n-1}{a} \right) + b \exp \left(\frac{n-1}{a} \right) \quad (6)$$

در این معادله، η_0 ویسکوزیته در سرعت برشی صفر، a ، λ و n و b پارامترهای تنظیم پذیر می‌باشند. معادله کاریواسودا [۳۱]

به صورت $\left(\frac{\eta - \eta_{\infty}}{\eta_0 - \eta_{\infty}} = \left[1 + (\lambda \gamma)^a \right] \left(\frac{n-1}{a} \right) \right)$ می‌باشد. در این کار

پژوهشی براساس داده‌های تجربی به دست آمده، تغییرهایی در این معادله مطابق معادله (۶) با افزودن یک پارامتر اعمال شد. نتیجه‌های به دست آمده از برآزش داده‌های گرانی سامانه‌های مطالعه شده بر اساس سرعت برشی در هر غلظت توسط

شکل‌های ۷ تا ۹ رفتار غلیظ شدگی برشی جزئی با افزایش اندک سرعت برشی برای تمام غلظت‌های نیمه غلیظ بررسی شده را نشان می‌دهد این رخداد می‌تواند بیانگر این باشد که در سرعت‌های برشی کم نانوذره‌های MgO توده‌ای می‌شوند و یا ساختارهای خاصی بین MgO و PEG تشکیل می‌شوند و گرانی در سرعت‌های برشی کم افزایش می‌یابد ولی این افزایش به علت ناپایدار بودن توده‌ها یا ساختارها به طور جزئی رخ می‌دهد. برای اینکه حرکت سوسپانسیون آغاز شود مقدار تنش باید به یک مقدار حدی برسد این حد بحرانی تنش به تنش حد جاری شدن^(۱) (τ_y) مشهور است. مدل‌های پلاستیک بینگهام (معادله (۴)) و هرشل - بالکی (معادله (۵)) می‌توانند برای تخمین مقدار تنش حد جاری شدن مورد استفاده قرار گیرند.

$$\tau = \tau_y + \eta \gamma \quad (4)$$

$$\tau = \tau_y + K_{HB} (\gamma)^n \quad (5)$$

در معادله (۵) K_{HB} و n پارامترهای وابسته به ساختار این مدل می‌باشند. بستگی تنش برشی به سرعت برشی نانوسیال‌های MgO-PEG400 ، $\text{MgO-PEG400-PEG2000}$ و $\text{MgO-PEG400-PEG6000}$ توسط این معادله‌ها مورد برآزش قرار گرفته‌اند نتیجه‌های به دست آمده در جدول ۵ گزارش شده است.

همچنان که از این جدول دیده می‌شود تنش حد جاری شدن به دست آمده از مدل هرشل - بالکی با افزایش غلظت افزایش می‌یابد و تنش حد محاسبه شده توسط مدل پلاستیک بینگهام کمتر از مقدار محاسبه شده توسط مدل هرشل - بالکی می‌باشد

(۱) Yield stress

جدول ۵ - پارامترهای مدل پلاستیک بینگهام (معادله (۴)) و مدل هرشل-بالکی (معادله (۵)) همراه با گرانروی در سرعت برشی بینهایت (η_{∞}) برای سیستم‌های نانوسیال $MgO-PEG400$ ، $MgO-PEG400-PEG2000$ و $MgO-PEG400-PEG6000$

$\phi_1\%$	τ_y (Pa)	η	R^2	η_{∞} (Pa.s)	τ_y (Pa)	K_{HB}	n	R^2
Bingham plastic model				Herschel-Bulkley model				
MgO-PEG400								
۱٫۵	-۰٫۰۱۶۲۶	۰٫۱۰۰۸۴	۰٫۹۹۹۹	۰٫۲۳۴۶۸	۰٫۲۳۴۶۷	۰٫۱۲۶۴۸	۰٫۹۶۴۸۸	۰٫۹۹۹۷
۵	-۰٫۰۲۵۵۰	۰٫۱۱۷۷۸	۰٫۹۹۹۹	۰٫۲۴۳۷۹	۰٫۲۴۳۸۰	۰٫۲۰۰۸	۰٫۹۲۰۱۶	۰٫۹۹۸۴
MgO-PEG400-PEG2000								
۵	۰٫۱۳۸۵۷	۰٫۰۴۵۶۲	۰٫۹۹۹۹	۰٫۲۴۴۶۵	۰٫۲۴۴۶۵	۰٫۱۴۱۳۷	۰٫۹۹۶۰۳	۰٫۹۹۹۹
MgO-PEG400-PEG6000								
۱٫۵	۰٫۱۲۱۶۳	۰٫۰۶۴۸۴	۰٫۹۹۹۹	۰٫۲۳۷۳۶	۰٫۲۳۷۳۶	۰٫۱۴۶۵۹	۰٫۹۷۱۶۷	۰٫۹۹۹۸
۵	۰٫۱۵۱۳۸	۰٫۲۱۷۷۶	۰٫۹۹۹۷	۰٫۲۵۷۱۳	۰٫۲۵۷۱۲	۰٫۴۱۱۷۶	۰٫۸۴۵۷۱	۰٫۹۹۳۴

جدول ۶ - پارامترهای معادله کاربویاسودای تصحیح شده (معادله (۶)) همراه با انحراف استاندارد (σ) برای نانوسیال‌های $MgO-PEG400$ ، $MgO-PEG400-PEG2000$ و $MgO-PEG400-PEG6000$

$\phi_1\%$	λ	a	n	b	σ (Pa.s)
MgO-PEG400					
۱٫۵	۲۶٫۶۹۰	۰٫۰۰۷۷۶۱	۱٫۰۰۴	-۰٫۵۱۵۷	۰٫۰۰۳
۵	۲۴٫۷۶۰	۰٫۰۰۷۳۹۹	۱٫۰۰۴	-۰٫۵۰۹۹	۰٫۰۰۴
MgO-PEG400-PEG2000					
۵	۱۸٫۶۸۰	۰٫۰۰۹۵۶۸	۱٫۰۰۴	-۰٫۵۸۵۸	۰٫۰۰۲
MgO-PEG400-PEG6000					
۱٫۵	۲۱٫۴۰۰	۰٫۰۹۹۰۱	۱٫۰۲۰	-۰٫۵۸۷۵	۰٫۰۰۶
۵	۲۰٫۲۰۰	۰٫۰۹۲۷۴	۱٫۰۲۴	-۰٫۷۲۱۲	۰٫۰۰۵

نتیجه گیری

نانو ذره‌های MgO با اندازه متوسط ۲۰ نانومتر در سیال پایه PEG400، PEG400-PEG2000 و PEG400-PEG6000 با اعمال موج فراصوت به مدت چهار ساعت در حمام فراصوت پخش شدند. پایداری این نانوسیال‌ها توسط طیف سنجی مرئی - فرابنفش و اندازه‌گیری پتانسیل زتا مورد بررسی قرار گرفت، نتیجه‌های به دست آمده نشان داد که این نانوسیال‌ها از پایداری مطلوبی حداقل در بیست و پنج روز برخوردارند و پایداری نانوسیال

این معادله در جدول ۶ ارایه شده است و در شکل‌های ۷ تا ۹ نشان داده شده است.

همچنان که از این جدول مشهود است کارایی این مدل در برازش داده‌های گرانروی در هر سرعت برشی بسیار خوب می‌باشد. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که تغییرهای اعمال شده در معادله کاربویاسودا در برازش گرانروی نانوسیال‌های $MgO-PEG400$ ، $MgO-PEG400-PEG2000$ و $MgO-PEG400-PEG6000$ بر اساس سرعت برشی صحیح می‌باشد.

مطالعه شده در کسرهای حجمی نانوذره برابر ۵٪ و ۱/۵٪، سرعت‌های برشی $1000 - 10000 \text{ s}^{-1}$ و در دمای ۲۹۸/۱۵ کلونین اندازه گیری شد. نتیجه‌های به دست آمده مشخص نمود که رفتار نیوتنی PEG400 و غلیظ شدگی برشی PEG400-PEG2000 و PEG400-PEG6000 در نانوسیال‌ها به صورت غلیظ شدگی برشی دیده می‌شود. این رویداد می‌تواند بیانگر این باشد که توده های نانوذره‌های MgO و یا شاید لخته‌های شبکه‌ای در سرعت‌های برشی کم ما بین نانوذره‌ها و PEG ایجاد می‌شود ولی دارای پایداری کافی نمی‌باشد. معادله‌های پلاستیک بینگهام و هرشل بالکلی با موفقیت برای مدل‌سازی بستگی تنش برشی به سرعت برشی مورد استفاده قرار گرفت؛ معادله کاربویاسودای تصحیح شده در این کار نیز با موفقیت برای مدل‌سازی بستگی گرانروی به سرعت برشی استفاده شد.

تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۱۲/۲۳؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۷/۲۴

MgO-PEG400-PEG6000 بهتر از نانوسیال‌های دیگر است. ذره‌های Bulk-MgO نیز در PEG400 در همان شرایط نانوسیال پخش شد طیف UV-Vis به دست آمده از این سیال مشخص نمود که طول موج بیشینه ثبت شده از نانوسیال‌ها در مقایسه با سیال Bulk-MgO-PEG400 جابه‌جایی آبی نشان می‌دهد این می‌تواند به علت کاهش اندازه ذره‌ها و توده‌ها در نانوسیال نسبت به سیال دارای ذره‌های منیزیم اکسید باشد این پدیده در سامانه‌هایی با اندازه کوچک تر از ۸۰ نانگستروم دیده می‌شود. توزیع اندازه ذره‌ها توسط دستگاه تفرق نور پویا برای نانوسیال MgO-PEG400 و MgO-PEG400-PEG6000 اندازه‌گیری شد و متوسط اندازه ذره‌ها به ترتیب ۵۷۰ و ۶۹۹ به دست آمد. دانسیته نانوسیال‌ها در غلظت‌های متنوع و دماهای گوناگون اندازه‌گیری شد و حجم مولی مازاد از داده‌های دانسیته محاسبه شد، نتیجه‌های به دست آمده مشخص نمود که برهمکنش غالب در نانوسیال‌ها از نوع واندروالس می‌باشد. ویژگی‌های رئولوژیکی سه نانوسیال

مراجع

- [1] Tony J., Yiping H., [Antibacterial Activities of Magnesium Oxide \(MgO\) Nanoparticles Against Foodborne Pathogens](#), *J. Nanopart Res.*, **13**: 6877–6885 (2011).
- [2] Mageshwari K., Mali S.S., Sathyamoorthy R., Patil P.S., [Template-Free Synthesis of MgO Nanoparticles for Effective Photocatalytic Applications](#), *Powder Technol.*, **249**: 456–462 (2013).
- [3] Mastuli M., Rusdi R., Maha, A.M., Saat N., Kamarulzaman N., [Sol-Gel Synthesis of Highly Stable Nano Sized MgO from Magnesium Oxalate Dihydrate](#), *Adv. Mat. Res.*, **545**: 137-142 (2012).
- [4] Tang Zh. X., Lv B.F., [MgO Nanoparticles as Antibacterial Agent: Preparation and Activity](#), *Brazilian, J. Chem. Eng.*, **31**: 591 – 601(2014).
- [5] Nalam P.C., Clasohm J.N., Mashaghi A., Spencer N.D., [Macrotribological Studies of Poly \(L-lysine\)-graft-Poly \(Ethylene Glycol\) in Aqueous Glycerol Mixtures](#), *Tribol. Lett.*, **37**: 541–552 (2009).
- [6] Hosseini M., Ghader S., [A Model for Temperature and Particle Volume Fraction Effect on Nanofluid Viscosity](#), *J. Mol. Liq.*, **153**: 139-145 (2010).
- [7] Esfe M.H., Saedodin S., [Turbulent Forced Convection Heat Transfer and Thermophysical Properties of Mgo–Water Nanofluid with Consideration of Different Nanoparticles Diameter, an Empirical Study](#), *J. Therm. Anal. Calorim.* **119**: 1205–1213 (2015).

- [8] Esfe M. H., Afrand M., Karimipour A., Yan W.M., Sina N., [An Experimental Study on Thermal Conductivity of MgO Nanoparticles Suspended in a Binary Mixture of Water and Ethylene Glycol](#), *Int. Commun. Heat Mass. Trans.*, **67**: 173–175 (2015).
- [9] Esfe M. H., Saedodin S., Mahmoodi M., [Experimental Studies on the Convective Heat Transfer Performance and Thermophysical Properties of MgO–Water Nanofluid under Trbulent Flow](#), *Exp. Therm. Fluid Sci.*, **52**: 68-78 (2014).
- [10] Esfe M. H., Abbasian-Arani A. A., Rezaie M., Yan W. M., Karimipour A., [Experimental Determination of Thermal Conductivity and Dynamic Viscosity of Ag–MgO/Water Hybrid Nanofluid](#), *Int. Commun. Heat Mass. Trans.*, **66**: 189–195 (2015).
- [11] Xie H., Li Y., Yu W., [Intriguingly High Convective Heat Transfer Enhancement of Nanofluid Coolants in Laminar Flows](#), *Phys. Lett. A*, **374**: 2566–2568 (2010).
- [12] Menlik T., Sözen A., Gürü M., Öztaş S., [Heat Transfer Enhancement Using MgO/Water Nanofluid in Heat Pipe](#), *J. Energy Inst.* **88**: 247-257 (2015).
- [13] Zyla G., Grzywa J., Witek A., Cholewa M., [Influence of Anisotropic Pressure on Viscosity and Electrorheology of Diethylene Glycol-Based MgAl₂O₄ Nanofluids](#), *Nanoscale Res. Lett.* **9**: 170-183 (2014).
- [14] Jafari A., Shahmohammadi A., Mousavi S. M., [CFD Investigation of Gravitational Sedimentation Effect on Heat Transfer of a Nano-Ferofluid](#), *Iran. J. Chem. Chem. Eng. (IJCCE)*, **34**: 87-96 (2015).
- [15] Alphonse P., Bleta R., Soules R., [Effect of PEG on Rheology and Stability of Nanocrystallinetitania Hydrosols](#), *J. Colloid Interface Sci.*, **337**: 81-87 (2009).
- [16] Zhang H., Wu Q., Lin J., Chen J., Xu Z., [Thermal Conductivity of Polyethylene Glycol Nanofluids Containing Carbon Coated Metal Nanoparticles](#), *J. Appl. Phys.*, **108**: 124304 (2010).
- [17] Zafarani-Moattar M.T., Majdan-Cegincara R., [Effect of Temperature on Volumetric and Transport Properties of Nanofluids Containing ZnO Nanoparticles Poly \(ethylene glycol\) and Water](#), *J. Chem. Thermodyn.*, **54**: 55–67 (2012).
- [18] Zafarani-Moattar M.T., Majdan-Cegincara R., [Investigation on Stability and Rheological Poperties of Nanofluid of ZnO Nanoparticles Dispersed in Poly \(ethylene glycol\)](#), *Fluid Phase Equilib.*, **354**: 102–108 (2013).
- [19] Zafarani-Moattar M.T., Majdan-Cegincara R., [Stability, Rheological, Magnetorheological and Volumetric Characterizations of Polymer Based Magnetic Nanofluids](#), *Colloid. Polym. Sci.*, **291**: 1977–1987(2013).
- [20] Singh P.P., Nikam R.K., Sharma S.P., Aggarwal S., [Molar Excess Volumes of Ternary Mixtures of Nonelectrolytes](#), *Fluid Phase Equilib.*, **18**: 333–334 (1984).
- [21] Reed J.S., “[Principles of Ceramics Processing](#)”, John Wiley & Sons, Inc., New York, USA (1995).

- [22] Hu Z., Oskam G., Penn R. L., Pesika N., Searson P. C., [The Influence of Anion on the Coarsening Kinetics of ZnO Nanoparticles](#), *J. Phys. Chem. B*, **107**: 3124-3130 (2003).
- [23] Wong E. M., Hoertz P.G., Liang C.J., Shi B.M., Meyer G.J., Searson P.C., [Influence of Organic Capping Ligands on the Growth Kinetics of ZnO Nanoparticles](#), *Langmuir*, **17**: 8362-8367 (2001).
- [24] Wu S., Zhu D., Li X., Li H., Lei J., [Thermal Energy Storage behavior of Al₂O₃-H₂O Nanofluids](#), *Thermochim. Acta*, **483**:73-77 (2009).
- [25] Yu W., Xie H., Chen L., Li Y., [Investigation of Thermal Conductivity and Viscosity of Ethylene Glycol Based ZnO Nanofluid](#), *Thermochim. Acta*, **491**: 92-96 (2009).
- [26] Stephens R.E., Malitson Ir.H., [Index of Refraction of Magnesium Oxide](#), *J. Res. National Bureau Stand.*, **49**: 249-252 (1952).
- [27] Mutalik V., Manjeshwar L.S., Sairam M., Aminabhavi T.M., [Thermodynamic Interactions in Binary Mixtures of Anisole with Ethanol, Propan-1-ol, Propan-2-ol, Butan-1-ol, Pentan-1-ol, and 3-methylbutan-1-ol at T = \(298.15, 303.15, and 308.15\) K](#), *J. Chem. Thermodyn.*, **38**: 1620-1628 (2006).
- [28] Valtz A., Teodorescu M., Wichterle I., Richon D., [Liquid Densities and Excess Molar Volumes for Water + Diethyleneglycolamine, and Water, Methanol, Ethanol, 1-propanol + triethylene glycol Binary Systems at Atmospheric Pressure and Temperatures in the Range of 283.15-363.15 K](#), *Fluid Phase Equilib*, **215**: 129-142 (2004).
- [29] Redlich O., Kister A.T., [Algebraic Representation of Thermodynamic Properties and the Classification of Solutions](#), *Ind. Eng. Chem.*, **40**: 345-348 (1948).
- [30] Ott J. B., Stouffer C. E., Cornett G. V., Woodfield B. F., Wirthlin R. C., Christensen J. J., Dieters J. A., [Excess Enthalpies for \(ethanol+ water\) at 298.15 K and Pressures of 0.4, 5, 10, and 15 MPa](#), *J. Chem. Thermodyn.*, **18**:1-12 (1986).
- [31] Bird R.B., Armstrong R.C., Hassager O., ["Dynamics of Polymeric Liquids"](#), Vol 1, 2nd ed., John Wiley & Sons, Inc., New York (1987).