



Journal of  
Space Science, Technology  
& Applications (Persian)

Vol. 1, No. 2, pp.: 88-96  
2022

Available in:  
[Journal.isrc.ac.ir/article\\_1465.html](http://Journal.isrc.ac.ir/article_1465.html)

DOI:  
10.22034/jस्ता.2022.319488.1041

### Article Info

Received: 2021-12-13  
Accepted: 2022-1-26

### Keywords

Rheology, Concentrated  
suspension, Molybdenum  
disulfide, Nano particle,  
Viscosity

### How to cite this article

Majid Haghgoo , Ahmad Ramezani , “Investigation of the Use of Modified Molybdenum Disulfide Nanostructures in the Rheological Behavior of Microparticulate Filled Suspensions” ”, *Journal of Space Science, Technology and Applications*, vol 1 (2), p.: 88-96, 2022.

## Investigation of the Use of Modified Molybdenum Disulfide Nanostructures in the Rheological Behavior of Microparticulate Filled Suspensions

Majid Haghgoo <sup>\*1</sup>, Ahmad Ramezani Saadat Abadi<sup>2</sup>

1,\*. Iran space Institute, Tehran, Iran, M.haghgoo@Isrc.ac.ir, Corresponding author  
2. Department of chemical and petroleum Engineering, Sharif university of technology, Tehran, Iran. ramazani@sharif.edu

### Abstract

Achieving a flawless solid composite propellant requires proper processability of its corresponding filled polymer slurry. In other words, a highly filled suspension with optimal rheological properties makes it possible to transfer to the mold and complete filling in complex geometries. In this dynamic study, the rheological properties of the obtained suspensions have been investigated after adding molybdenum disulfide nanoparticles to the model materials.

In order to study the effect of molybdenum disulfide nanosheets on the rheological behavior of the suspensions, polyethylene glycol matrix and glass beads, with particle distribution of 60 to 103 microns were used as a model.

Single- layer and multi- layer molybdenum disulfide nanosheets with thickness of 50 to 100 nm was obtained using acid washing, oxidation and heat shock of raw molybdenum disulfide. Then, after preparation of suspensions containing 10- 40 vol% glass beads, the effect of obtained molybdenum disulfide (less than 0.1 vol% of the matrix) on the rheological properties of the mixture was studied. The results of frequency sweep and temperature sweep tests showed that by increasing the percentage of molybdenum disulfide nanosheets by less than 0.1%, The mixed viscosity has a significant decreasing in all microfiller values while maintaining the storage modulus and increasing the loss modulus. Finally, the dynamic shear flow test demonstrated that the dynamic viscosity also decreased significantly after the addition of nanoparticles.



## بررسی استفاده از نانوساختارهای مولیبدن دی‌سولفید اصلاح شده در رفتار رئولوژیکی سوسپانسیون پر شده با میکروذرات

مجید حقگو<sup>۱\*</sup>، احمد رضانی سعادت آبادی<sup>۲</sup>

۱. پژوهشگاه فضایی ایران، m.haghoo@Isrc.ac.ir (نویسنده مسئول)

۲. دانشکده مهندسی شیمی و نفت، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران، Ramazani@sharif.edu

دو فصلنامه  
علوم، فناوری و  
کاربردهای فضایی

سال اول، شماره ۲، صفحه ۹۶-۸۸  
پاییز و زمستان ۱۴۰۰

دسترسی پذیر در نشانی:  
[Journal.isrc.ac.ir/article\\_1465.html](http://Journal.isrc.ac.ir/article_1465.html)

DOI:

10.22034/jssta.2022.319488.1041

تاریخچه داوری

دریافت: ۱۴۰۰/۰۹/۲۲

پذیرش: ۱۴۰۰/۱۱/۰۶

واژه‌های کلیدی

رئولوژی، سوسپانسیون غلیظ،  
مولیبدن دی‌سولفید، نانو ذره،  
ویسکوزیته

نحوه استناد به این مقاله

مجید حقگو، احمد رضانی سعادت  
آبادی، "بررسی استفاده از  
نانوساختارهای مولیبدن  
دی‌سولفید اصلاح شده در رفتار  
رئولوژیکی سوسپانسیون پر شده با  
میکروذرات"، دو فصلنامه علوم،  
فناوری و کاربردهای فضایی،  
سال اول، شماره دوم، صفحات ۸۸-۹۶،  
۱۴۰۰

### چکیده

فرایندپذیری مطلوب دوغاب پلیمری سوخت جامد کامپوزیت، دستیابی به گرینی بدون نقص را تضمین می‌کند. به عبارت دیگر، سوسپانسیون به شدت پر شده با خواص رئولوژیکی بهینه، باعث می‌شود انتقال به قالب و شکل‌پذیری کامل آن در هندسه‌های پیچیده امکان‌پذیر باشد. در این مطالعه دینامیکی، خواص رئولوژیکی یک سوسپانسیون غلیظ با استفاده از مواد مدل و افزودن نانوذرات به آن، بررسی شده است. به منظور بررسی اثر نانوذره مولیبدن دی‌سولفید در رفتار رئولوژیکی سوسپانسیون‌ها، از زمینه پلی‌اتیلن گلايکول و پرکننده‌های دانه شیشه‌ای با توزیع ذرات ۶۰ الی ۱۰۳ میکرون به عنوان مدل استفاده شد. مولیبدن دی‌سولفید خام با استفاده از روش‌های اسیدشویی، اکسیداسیون و شوک حرارتی به صورت نانوذره مولیبدن دی‌سولفید تک لایه و چند لایه با ضخامت بین ۵۰ تا ۱۰۰ نانومتر به دست آمدند. در ادامه، پس از تهیه سوسپانسیون‌های ۱۰ الی ۴۰ درصد حجمی حاوی دانه‌های شیشه‌ای، اثر افزودن نانوصفحات مولیبدن دی‌سولفید سنتز شده (به میزان کمتر از ۰.۱ درصد نسبت به فاز زمینه) بر خواص رئولوژیکی مخلوط، بررسی شد. نتایج آزمون جاروب فرکانس و جاروب دما نشان داد که با افزایش درصد نانو صفحات مولیبدن دی‌سولفید به میزان کمتر از ۰.۱ درصد، گرانروی مختلط ضمن حفظ مدول ذخیره و افزایش مدول اتلافی در همه مقادیر میکروفیلر تغییر کاهشی محسوسی دارد. در نهایت آزمون جریان برشی دینامیکی نشان داد که گرانروی دینامیکی نیز پس از اضافه کردن نانوذره افت قابل توجهی داشته است.

## ۱- مقدمه

بوریدها، مواد پایه کربنی و پلیمرهای پلی تترافلورو اتیلن (تفلون) و پلی آمیدها می‌شوند [۱۰-۱۲].

محققان اخیراً در مطالعات خود به اهمیت مولیبدن دی‌سولفاید و بهبود عملکرد آن با استفاده از کاهش ضخامت لایه‌ها و با افزایش فاصله بین لایه‌ای پی برده‌اند. نانوذره‌های دوبعدی مولیبدن دی‌سولفاید می‌توانند با استفاده از روش‌های لایه‌برداری مکانیکی و شیمیایی از نمونه‌های توده‌ای-یا به طور مستقیم به روش رسوب شیمیایی بخار تولید شوند [۱۳]. با وجود موفقیت‌های به دست آمده در تولید تک لایه‌های باکیفیت بالا به روش لایه‌برداری مکانیکی، امکان تولید انبوه نانوذره‌ها با استفاده از این روش وجود ندارد. روش‌های لایه‌برداری در فاز مایع می‌توانند برای تولید نانوذره‌های مولیبدن دی‌سولفاید در مقیاس انبوه به کار روند. با استفاده از یون‌های فلزات قلیایی همچون لیتیوم در فواصل بین لایه‌ها، می‌توان نمونه‌های تک یا چندلایه‌ای از مولیبدن دی‌سولفاید تولید کرد. با این حال، به دلیل غیرقابل کنترل بودن میزان لیتیوم وارد شده در بین لایه‌ها و زمان‌بر بودن این روش، شیوه‌های جدیدتری برای لایه‌برداری در فاز مایع مبتنی بر استفاده از حلال‌های آلی همچون متیل پیرولیدون و دی‌متیل فرمامید پیشنهاد شده است [۱۴]. با وجود اینکه با به کار بردن این حلال‌ها، سنتز نانوذره‌ها با بازدهی بالایی انجام می‌پذیرد، اما به دلیل نقطه جوش بالا و نیز کشش سطحی زیاد، اغلب مقداری از حلال، در نمونه باقی می‌ماند که ناپایداری ذاتی این حلال‌ها، موجب می‌شود که فرایند حذف آنها به سختی صورت گیرد، زیرا این حلال‌ها در دماهای بالا تحت امواج فراصوت پلیمریزه می‌شوند. حلال باقی مانده در نمونه‌ها، خواص الکتریکی، حسگری و کاتالیستی نانوذره‌های سنتز شده را تحت تأثیر قرار داده و کاربردهای آنها را محدود خواهد کرد. در یکی از کارهای صورت گرفته، وادیول<sup>۱</sup> و همکارانش در سال ۲۰۰۶ به بررسی لایه‌برداری از مولیبدن دی‌سولفاید به وسیله شکل‌گیری نوارهای نانوی ۳ و ۴-اتیلن دی‌اکسیدیتوفن بین لایه‌های آن پرداختند. آنها موفق شدند که به خوبی عمل لایه‌برداری را انجام دهند و از ماده نهایی حاصل شده به عنوان کاتد در باتری‌های لیتیومی استفاده کردند [۱۵].

سوخت جامد کامپوزیت یکی از پیش‌رانه‌های رایج در سامانه‌های فضایی به‌شمار می‌رود. با اینکه سوخت‌های جامد انواع مختلفی دارند و بر اساس شاخص‌های متفاوت ارزیابی می‌شوند، اجزای ثابت تشکیل دهنده همه آنها شامل ماده اکسیدکننده و اکسیدشونده است که توسط پلیمری به نام بایندر به هم متصل می‌شود [۲۱ و ۲۰]. توان پیش‌برنده پیش‌رانه که با معیارهایی نظیر تراست یا Isp بیان می‌شود، به‌طور مستقیم به میزان مواد جامد اکسیدکننده و اکسیدشونده آن وابسته است. از این‌رو، میزان بارگذاری مواد جامد در رزین پلیمری که پس از پخت به بایندر سوخت تبدیل می‌شود، از اهمیت به‌سزایی برخوردار است [۳ و ۴]. توجه به این نکته ضروری است که درصد حجمی بالای مواد جامد در سوخت همزمان باعث کاهش شدید فرایندپذیری دوغاب پلیمری حاصل می‌شود که این امر موجب عدم شکل‌دهی مناسب به گرین سوخت می‌شود. روش‌های مختلفی برای بهبود فرایندپذیری سوخت جامد پیشنهاد شده که از آن جمله می‌توان به اضافه نمودن پلاستی‌سایزر، دانه‌بندی ذرات جامد و بهبود عامل شکلی ذرات جامد اشاره نمود. [۵ و ۶]. یکی از روش‌های نوین برای کاهش ویسکوزیته سوسپانسیون‌های غلیظ افزودن نانوذره به آنهاست. [۷ و ۸].

وجود نانوذرات می‌تواند خواص مختلف سوسپانسیون از جمله سیلان‌پذیری و خواص فیزیکی مکانیکی نهایی آن را تحت تأثیر قرار دهد. در سیستم‌های پلیمری دیده شده است که مقدار کمی از نانوذرات با دانه‌بندی خاص، میزان انرژی لازم برای فرایندپذیری را به مقدار قابل توجهی کاهش می‌دهد که این امر می‌تواند ناشی از افزایش خاصیت سرخوردگی در سطح باشد. [۹].

تحقیقات انجام شده در زمینه جامدات روان‌کننده نشان داده است که مواد بس‌یاری این نقش را ایفا می‌کنند که احتمالاً هر کدام کاربرد مخصوص به خود را دارند. گروهی از این مواد شامل جامدهای لایه‌ای از قبیل مولیبدن دی‌سولفاید، گرافیت، بوبیک اسید و نیتوید بور است. گروه‌های دیگر نیز شامل اکسیدها، فلزات، سولفاید هالیدها و سلناید‌ها، نیتريد کربید و

## ۲- مواد و روش‌ها

### ۲-۱- آماده‌سازی و تعیین مشخصات نانوذرات

نانوصفحات مولیبدن دی‌سولفید قبل از استفاده، اسیدشویی و سپس اکسید شد. (پیوست ۱). به منظور تعیین خصوصیات و مشخصات نانوذرات ساخته شده از روش‌های مختلف آزمون‌های ساختاری استفاده شد. در این پژوهش از آزمون پراش اشعه ایکس، آزمون میکروسکوپ الکترونی روبشی، آزمون سطح ویژه کاتالیست با استفاده از جذب نیتروژن، آزمون طیف‌سنجی پراش انرژی اشعه ایکس، طیف‌سنجی تبدیل فوریه مادون قرمز، آزمون میکروسکوپ الکترونی عبوری و طیف‌سنجی رامان برای تعیین مشخصات نانوصفحات، استفاده شده است (پیوست ۲).

### ۲-۲- آماده‌سازی و اندازه‌گیری خواص رئولوژیکی سوسپانسیون

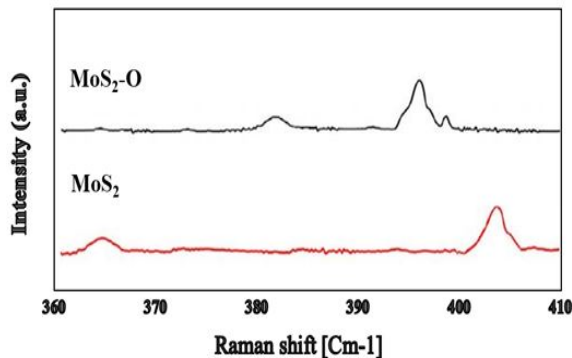
پلی‌اتیلن گلایکول ۴۰۰ به عنوان زمینه و ذرات کروی شیشه‌ای با دانه‌بندی ۶۳ تا ۱۰۱ میکرون با درصدهای حجمی ۱۰، ۲۰، ۳۰ و ۴۰ توسط همزن مکانیکی همزده شدند. سپس از ۰.۰۱ تا ۰.۱ درصد وزنی نانوذره مولیبدن دی‌سولفید نسبت به پلی‌اتیلن گلایکول به مخلوط اضافه شد. برای پراکنش بهتر و باز شدن کلوخه‌ها از امواج فراصوت با شدت ۲۰۰ وات و ۴۰۰ وات به مدت ۲ دقیقه استفاده شد.

اندازه‌گیری‌های رئولوژیکی سامانه‌های سامانه‌های حاضر در قالب جاروب زمان و جاروب فرکانس، همگی با استفاده از رئومتر مدل MCR-۳۰۱ ساخت شرکت آنتون پار انجام شد. برای اندازه‌گیری مشخصه‌های رئولوژیکی از اسپیندل با هندسه صفحات موازی با قطر ۲۵ میلی‌متر و فاصله ۰.۸ میلی‌متر استفاده شد. برای مطالعه خواص ویسکوالاستیک سوسپانسیون‌های ساخته شده از آزمون جاروب فرکانس استفاده شد. این دستگاه اطلاعات مربوط به مدول‌های ذخیره، اتلاف و مختلط، گرانروی حقیقی و موهومی و مختلط و نیز مولفه فاکتور اتلاف را در اختیار قرار می‌دهد.

اخیرا ژانگ یینگ<sup>۱</sup> و همکارانش [۱۶]، روشی را برای تولید نانوصفحات مولیبدن دی‌سولفید با کنترل اکسیداسیون پیشنهاد دادند. در این روش، ابتدا لایه‌برداری شیمیایی بللک مولیبدن دی‌سولفید انجام شده که منجر به تولید تک لایه‌های آن می‌شود. این تک لایه‌ها در محلول آبی از نظر کلئیدی پایدار هستند. زمانی که وارونگی فازی هیدروترمالی در سوسپانسیون قرار گرفته در معرض هوا انجام می‌شود، کسر زیادی از مواد دو بعدی به واسطه اکسیداسیون تخریب شده و نانوصفحات باقی مانده تجمع می‌شوند. شکل ۲-۱۷ روشی را برای به‌دست آوردن تک لایه‌های مولیبدن دی‌سولفید نیمه رس‌لنا با جاذبه بالا در سوسپانسیون آبی غلیظ و پایدار از نظر کلئیدی نشان می‌دهد. به صورت کلی شواهد، حاکی از آن است که با توجه به ساختار لایه‌ای نانوذره مولیبدن دی‌سولفید، استفاده از این نانوذره در رزین پلی‌بوتادین هیدروکسیل شده می‌تواند باعث ایجاد سرخوردگی زنجیره‌های پلیمری رزین شده و این افزایش سرخوردگی بر روی سطوح رزین می‌تواند منجر به کاهش گرانروی کمپلکس شود. همچنین استفاده از این نانوذره خواص مکانیکی را نیز می‌تواند بهبود دهد.

بنابراین در پژوهش انجام شده، ابتدا مولیبدن دی‌سولفید خام با استفاده از روش‌های اسیدشویی، اکسیداسیون و شوک حرارتی به صورت نانوصفحات مولیبدن دی‌سولفید تک لایه و چند لایه درمی‌آید. پس از مشخصه‌یابی با روش‌های مختلف، این نانوذره به سوسپانسیون حاوی زمینه پلی‌اتیلن گلایکول و پرکننده‌های دانه شیشه‌ای با توزیع ذرات ۶۰ الی ۱۰۳ میکرون (به عنوان مدل مشبیه دوغاب سوخت کامپوزیت) در مقادیر مختلف اضافه شده و سپس اثر آن بر رفتار رئولوژیکی مخلوط حاصل، بررسی می‌شود.

منتقل شده است که وجود این تغییر بسیار مهم نشان دهنده تغییر در ساختار لایه‌ای و باز شدن صفحات مولیبدن دی‌سولفاید است. نکته مهمی که در اینجا مطرح می‌شود، نسبت دو پیک مختلف سنترز بیانگر این است که با حفظ ساختار کلی، لایه‌ها تنها باز شده‌اند. در این پژوهش، این نسبت برای تمامی نمونه‌ها حدود ۱.۵ است.



شکل ۱. آزمون Raman نانوصفحات مولیبدن دی‌سولفاید

طیف FT-IR برای نانوذرات در محدوده عدد موج  $cm^{-1}$  ۴۰۰۰-۴۰۰ در شکل ۲ آورده شده است. با توجه به شکل مشاهده می‌شود که نمونه خام  $MoS_2$  فاقد گروه‌های عاملی است و تنها پیک کوچک در عدد موج حدود  $3450\text{ cm}^{-1}$  دارد که مربوط به گروه OH و نمایانگر رطوبت لندک موجود در نمونه است. در این پژوهش، هدف اصلی از اصلاح مولیبدن دی‌سولفاید ایجاد گروه‌های عاملی به‌ویژه S-O بود. با انجام عمل اکسیداسیون و شستشوی مناسب، پیوند مذکور با موفقیت ایجاد شد و وجود پیک در عدد موج حدود  $1110\text{ cm}^{-1}$  در نمونه اکسید شده بیانگر صحت این مدعا است.

به منظور دستیابی به ناحیه خطی درصد کرنش و انجام آزمون‌های جاروب فرکانس در مقداری که در داخل ناحیه خطی نمودار تغییرات مدول اتلافی با درصد کرنش باشد این تست برای ۴ نمونه در درصدهای حجمی مختلف ۱۰، ۲۰، ۳۰ و ۴۰ دانه شیشه‌ای انجام شد.

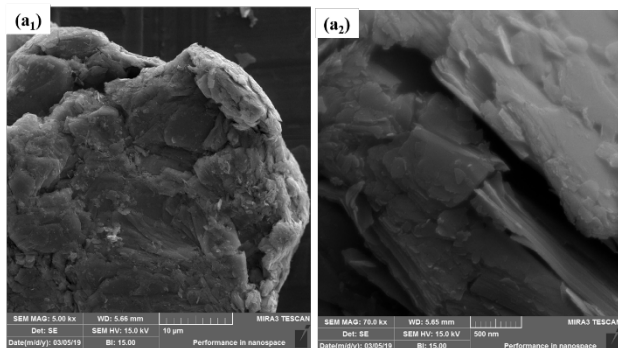
آزمون جاروب فرکانس در حلت نوسانی و با استفاده از صفحات موازی انجام شد، فاصله گپ ۰.۸ میلی‌متر انتخاب شده و تمامی تست‌ها در دمای ۲۷ درجه سانتی‌گراد و فشار اتمسفر انجام شد.

سوسپانسیون‌های تهیه شده بلافاصله بین صفحات موازی قرار گرفته و جاروب فرکانس در بازه ۰.۱ تا ۶۲۵ هرتز در دمای ۲۷ درجه سانتی‌گراد روی آن‌ها انجام و خواص رئولوژیکی (\* $\eta$ ،  $G'$  و  $G''$ ) ثبت شد. آزمون جاروب فرکانس برای نمونه‌های با درصد حجمی ۱۰، ۲۰، ۳۰ و ۴۰ دانه شیشه‌ای و از ۰.۱ با گام ۰.۱ تا ۰.۱ درصد وزنی نسبت به زمینه پلی‌اتیلن گلیکول انجام شد. بدین صورت ۴۵ نمونه تهیه شده و تمامی آزمون‌ها با درصدهای ذکر شده انجام شدند.

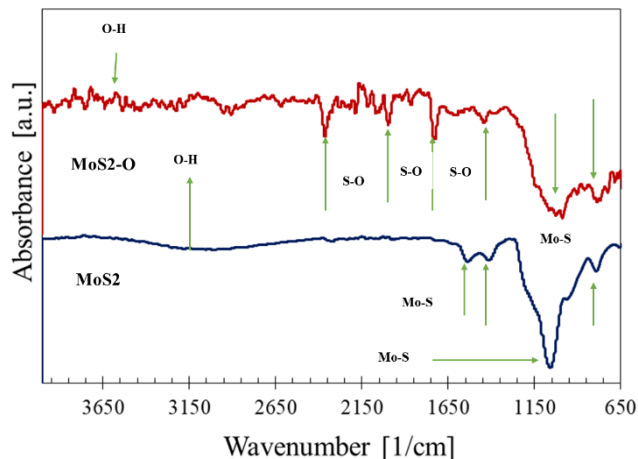
به منظور بررسی تغییرات رفتار رئولوژیکی سوسپانسیون‌های ساخته شده با دما از آزمون جاروب دما استفاده شد. این آزمون تغییرات گرانروی مختلط و مدول‌های ذخیره، اتلافی و مختلط را با تغییرات دما از ۲۷ درجه سانتی‌گراد تا ۶۰ درجه با تغییرات فرکانس از ۰.۱ تا ۱۰۰ هرتز و نرخ کرنش به دست آمده از آزمون جاروب کرنش در نظر گرفته شد.

### ۳- یافته‌ها

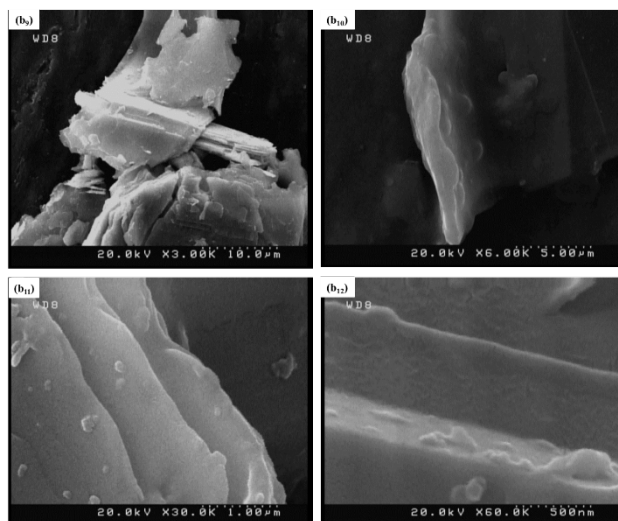
به منظور بررسی میزان باز شدن لایه‌ها و تغییر در ساختار بین لایه‌ای، از آزمون رامان استفاده شد. نتایج حاصل از این آزمون در شکل ۱ نشان داده شده است. دو پیک مهم  $A_1 g$  (بیرون لایه‌ای) و  $E_{12} g$  (مربوط به بانده Mo-S) در عدد موج‌های ۴۰۳ و  $354\text{ cm}^{-1}$  مورد بررسی قرار گرفتند. همان‌طور که در شکل مشخص است، با انجام عملیات لایه‌برداری، این دو پیک به سمت یکدیگر نزدیک شده‌اند. یعنی پیک  $E_{12} g$  به بالاتر از  $380\text{ cm}^{-1}$  و پیک  $A_1 g$  به کمتر از  $400\text{ cm}^{-1}$



شکل ۳. آزمون FE-SEM نمونه خام مولیبدن دی سولفید



شکل ۲. آزمون FT-IR نانوصفات مولیبدن دی سولفید



شکل ۴. آزمون FE-SEM نمونه نانو صفات مولیبدن دی سولفید ورقه‌ای شده

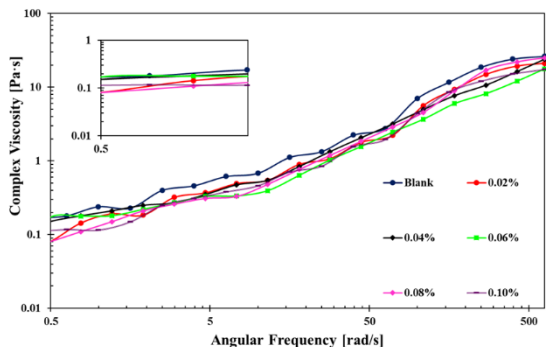
### رئومتری

برای مطالعه رفتار رئولوژیکی سوسپانسیون‌ها از آزمون‌های مختلف با استفاده از رئومتر چرخشی استفاده شد که در زیر به صورت جداگانه هر یک از آزمون‌ها بررسی می‌شوند.

### جاروب کرنش

به منظور تعیین ناحیه ویسکوالاستیک خطی و تعیین نرخ کرنش برای استفاده در سوسپانسیون‌های ۱۰ تا ۴۰ درصد حجمی دانه‌های شیشه، از آزمون جاروب کرنش استفاده شد و مدول ذخیره بر حسب افزایش نرخ کرنش در نمونه‌های ۱۰ تا ۴۰ درصد تعیین شد. همان‌طور که در شکل ۵ مشاهده می‌شود، با افزایش

به منظور بررسی و مطالعه ریخت‌شناسی سطحی نانوذرات تهیه شده، از آزمون میکروسکوپ الکترونی روبشی استفاده شد. شکل‌های ۳ و ۴ نشان دهنده نتایج حاصل از آزمون FESEM برای نمونه‌ها است. به منظور بررسی هرچه بهتر مورفولوژی، چند نوع تصویر با بزرگ‌نمایی متفاوت (مقیاس ۵۰۰ نانومتر و ۱ میکرومتر و ۲ و ۱۰ میکرومتر) از هر نمونه تهیه شد. با انجام فرایند اسیدشویی و اکسیداسیون و شوک حرارتی از تصاویر FESEM مشخص است که به خوبی فاصله بین لایه‌های افزایش یافته و حتی در مواردی وجود تک لایه‌ها دیده می‌شود. همچنین نمونه‌ای که شوک حرارتی دیده است به وضوح فواصل بین لایه‌های آن افزایش یافته است. در طی عملیات اکسیداسیون، شوک حرارتی و فراصوت، ضخامت لایه‌ها به شدت کم شده و به حدود ۱۰۰ نانومتر رسیده است. تصاویر FESEM نمونه‌ها بعد از انجام فرایند اختلاط فراصوت، نشان دهنده یک‌سری تغییرات مورفولوژیکی از جمله اندازه صفات کوچکتر و کاهش ضخامت لایه‌ها است.

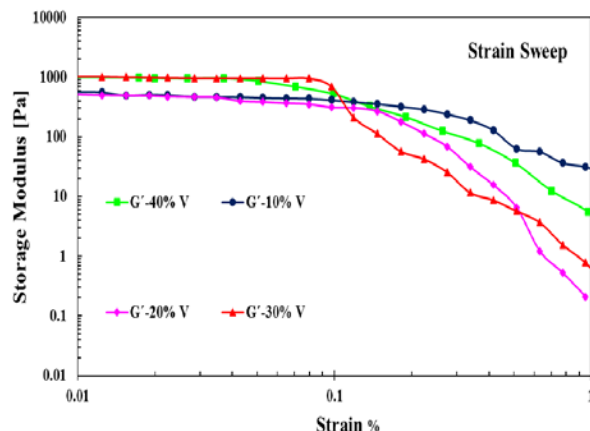


شکل ۶ تغییرات گرانروی پیچیده بر حسب فرکانس زاویه‌ای در سوسپانسیون خام ده درصد حجمی دانه شیشه‌ای فاقه و حاوی نانوصفحات اصلاح شده مولیبدن دی‌سولفاید با مقادیر مختلف

### جاروب دما

با استفاده از آزمون جاروب دما تغییرات گرانروی مختلط، مدول ذخیره و اتلافی بر حسب تغییرات هم‌زمان دما و فرکانس، از دمای ۲۷ درجه تا ۶۰ درجه و فرکانس ۱۰۰ تا ۰.۰۵ هرتز یا ۶۲۸ تا ۰.۵ رادیان بر ثانیه بررسی شد. نتایج نشان داد که با افزایش دما میزان کاهش گرانروی مختلط افزایش یافته است ولی همچنان تغییرات گرانروی با افزایش درصد نانوصفحات مولیبدن دی‌سولفاید ۰.۰۵ و ۰.۱ درصد وزنی نسبت به پلی‌اتیلن گلایکول مشخص است. این امر نشان‌دهنده این است که تغییرات دما حداقل تا ۶۰ درجه سانتی‌گراد اثری بر قابلیت این نانوصفحات در کاهش گرانروی نمی‌گذارد. همچنین مدول ذخیره نیز با این تغییرات بررسی شدند که همان‌طور که انتظار می‌رفت با افزایش دما تفاوت چندانی در نمونه‌های دارای نانوصفحات و خام وجود ندارد اما نرخ کاهش مدول ذخیره با افزایش دما به میزان اندکی کاهش یافته است. در مورد مدول اتلافی نتایج حاکی از این است که با افزایش دما همچنان مدول اتلافی در نمونه‌های دارای نانوصفحات مولیبدن دی‌سولفاید بیشتر شده است. نمونه‌ای از نتایج به دست آمده در مورد سوسپانسیون ۱۰ و ۴۰ درصد حجمی با مقادیر مختلف نانوذره در شکل ۷ و ۸ نشان داده شده است.

درصد حجمی ذرات شیشه ناحیه خطی ثابت کاهش یافته است. بنابراین، به طور میانگین برای نمونه ۱۰٪ نرخ کرنش ۰.۱، نمونه ۲۰٪ نرخ کرنش ۰.۰۸، نمونه ۳۰٪ نرخ کرنش ۰.۰۶ و برای نمونه ۴۰ درصد حجمی دانه‌های شیشه نرخ ۰.۰۵ درصد کرنش برای تست جاروب فرکانس به دست آمد.

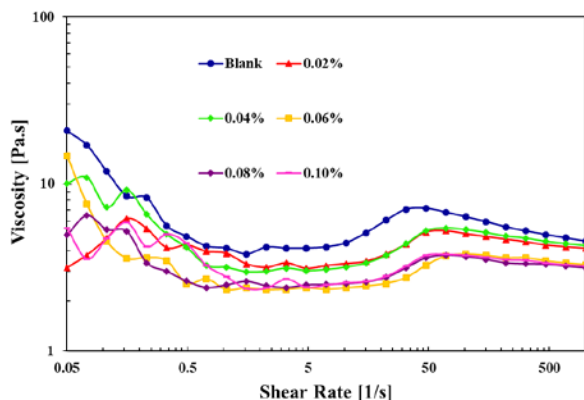


شکل ۵. تغییرات مدول ذخیره بر حسب نرخ کرنش در سوسپانسیون خام ده تا چهل درصد حجمی دانه شیشه‌ای

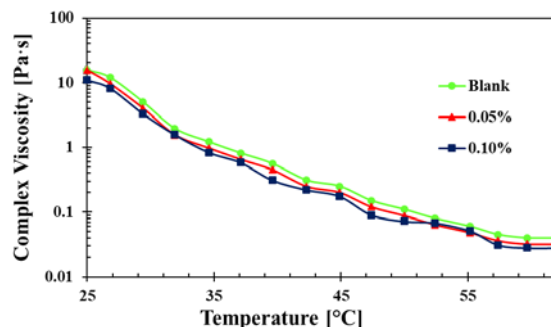
### جاروب فرکانس

به منظور بررسی تغییرات گرانروی مختلط، مدول ذخیره و اتلافی سوسپانسیون‌ها بر حسب تغییرات فرکانس زاویه‌ای با نرخ کرنش ذکر شده برای نمونه‌های ۱۰ تا ۴۰ درصد حجمی دانه‌های شیشه‌ای از فرکانس ۶۲۸ رادیان بر ثانیه یا ۱۰۰ هرتز تا ۰.۵ رادیان بر ثانیه یا تقریباً ۰.۰۵ هرتز آزمون جاروب فرکانس انجام شد (شکل ۶). در نمونه‌های ۱۰ تا ۴۰ درصد حجمی به طور کلی مشاهده شد که با افزایش درصد نانوصفحات مولیبدن دی‌سولفاید از ۰.۰۲ درصد وزنی نسبت به زمینه پلی‌اتیلن گلایکول تا ۰.۱ درصد وزنی، گرانروی مختلط کاهش می‌یابد. همچنین نمودار تغییرات مدول اتلافی بر حسب تغییرات زاویه‌ای حاکی از این است که با کاهش گرانروی در اثر افزودن نانوذرات در دمای محیط مدول اتلافی با اتلاف انرژی بیشتر شده که این امر خود می‌تواند موجب کاهش گرانروی شود.

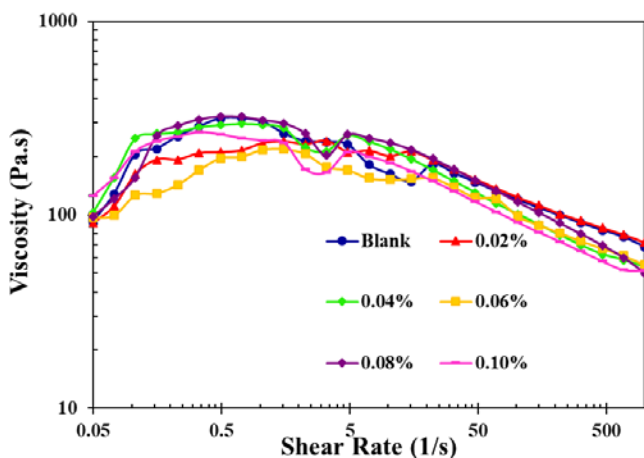
۴۰ درصد دانه شیشه‌ای و مقادیر مختلف نانوذره مشاهده می‌شود.



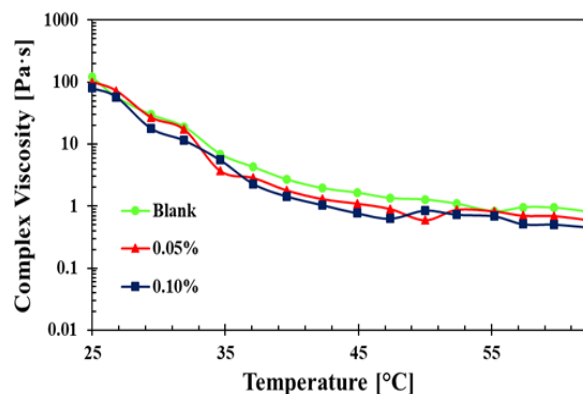
شکل ۷. تغییرات گرانروی پیچیده بر حسب دما در سوسپانسیون خام ده درصد حجمی دانه شیشه‌ای فاقد و حاوی نانوصفحات اصلاح شده مولیبدن دی سولفاید



شکل ۸. تغییرات گرانروی پیچیده بر حسب دما در سوسپانسیون خام چهار درصد حجمی دانه شیشه‌ای فاقد و حاوی نانوصفحات اصلاح شده مولیبدن دی سولفاید



شکل ۹. تغییرات گرانروی بر حسب نرخ برش در سوسپانسیون خام چهار درصد حجمی دانه شیشه‌ای فاقد و حاوی نانوصفحات اصلاح شده مولیبدن دی سولفاید



شکل ۱۰. تغییرات گرانروی پیچیده بر حسب دما در سوسپانسیون خام چهار درصد حجمی دانه شیشه‌ای فاقد و حاوی نانوصفحات اصلاح شده مولیبدن دی سولفاید

#### جریان گرانروی دینامیکی

به منظور بررسی تغییرات گرانروی برشی بر حسب تغییرات نرخ برش آزمون جریان گرانروی دینامیکی گرفته شد. این آزمون در حالت پلیا یعنی پس از ۵ ثانیه از قرارگیری نمونه زیر اسپیندل صفحات موازی انجام شد. نتایج حاکی از آن بود که با افزایش درصد نانوصفحات مولیبدن دی سولفاید تا ۰.۱ درصد در دمای ثابت ۲۷ درجه سانتی گراد، گرانروی دینامیکی کاهش یافته است. این امر با افزایش درصد میکروفیلر یا دانه‌های شیشه‌ای نیز مشاهده می‌شود اما رفتار از سیال نیوتنی به سیال کاهش یابنده گرانروی با افزایش نرخ برش تغییر یافته است. در شکل‌های ۹ و ۱۰، نمودار جریان گرانروی دینامیکی برای نمونه‌های حاوی ۲۰ و

#### ۴- بحث و نتیجه‌گیری

نتایج این پژوهش نشان داد که با مطالعه بر روی سنتز نانوذرات مولیبدن دی سولفاید و استفاده از آن‌ها به عنوان یک جامد روان‌کننده از طریق کاهش اصطکاک میان ذرات جامد می‌توان به صورت بالقوه خواص رئولوژیکی و در نتیجه فرایندپذیری سوسپانسیون‌های غلیظ را بهبود بخشید. استفاده از این نانوذره بر روی سوسپانسیون پلی اتیلن گلاکول/دانه‌های



- [6] H. Keizers, et al. "Modelling of composite propellant properties," 36th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit, Huntsville, AL, USA, 17-19 July, 2000. [7] A. R. Studart, E. Amstad, and L. J. Gauckler, "Colloidal Stabilization of Nanoparticles in Concentrated Suspensions," *Langmuir* 23 (3), pp. 1081-1090, 2007.
- [8] A. R. Studart, E. Amstad, M. Antoni, L. J. Gauckler, "Rheology of Concentrated Suspensions Containing Weakly Attractive Alumina Nanoparticles," *Journal of the American ceramic society*, Vol. 89, 8, pp. 2418-2425, 2006.
- [9] J. E. Aristizábal-Fontal, F. B. Cortés, C. A. Franco, "Viscosity reduction of extra heavy crude oil by magnetite nanoparticle-based ferrofluids, adsorption science and technology," vol 36, 1-2, pp. 23-45, 2018.
- [10] S. Shahnazar, S. Bagheri S. Bee and A. Hamid, "Enhancing lubricant properties by nanoparticle additives," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol 41, 4, pp. 3153-3170, 2016.
- [11] B. S. Ajay Vardhaman, M. Amarnath, J. Ramkumar K. Mondal, "Enhanced tribological performances of zinc oxide/MWCNTs hybrid nanomaterials as the effective lubricant additive in engine oil," *Materials Chemistry and Physics*, vol 253, 123447, 2020.
- [12] A. S. Prashant and C. Mamatha, "A review on tribological performance of lubricants with nanoparticles additives," *materials today proceedings*, vol 25, pp. 586-591, 2020.
- [13] D. A. Voiry, and M. Chhowalla, "Metallic IT phase MoS<sub>2</sub> nanosheets as supercapacitor electrode materials," *Nat. Nanotechnol.*, vol. 10, no. 4, pp. 313-8, 2015.
- [14] Z. H. Khan, A. Kumar, S. Husain, and M. Husain, "Introduction to Nanomaterials," *Advances in Nanomaterials*, New Delhi, Springer India, pp. 1-23, 2016.
- [15] Z. Wang, Y. Zhang, M. Liu, A. Peterson, and R. Hurt, "Oxidation suppression during hydrothermal phase reversion allows synthesis of monolayer semiconducting MoS<sub>2</sub> in stable aqueous suspension", *Nanoscale*, 9, pp. 5398-5403, 2017.

شیشه‌ای در مقیاس کمتر از ۰.۱ درصد وزنی نسبت به فاز زمینه و بررسی رفتار رئولوژیکی این مخلوط تا ۴۰ درصد حجمی میکروفیلر ( $\phi = 0.68$ ) منجر به کاهش گرانیوی مختلط و گرانیوی دینامیکی ضمن حفظ خواص الاستیک سوسپانسیون شد. این روان‌سازی با استفاده از افزایش فاصله بین صفحات مولیبدن می‌تواند از طریق کاهش اصطکاک بین ذره‌ای، کاهش فصل مشترک میان زمینه و میکروفیلر و ایجاد پدیده سرخوردگی نانوصفحات مولیبدن دی‌سولفاید ایجاد شود. یکی دیگر از دلایلی که می‌توان برای این پدیده در نظر گرفت، حبس حلال میان فاصله میان نانو ورقه‌های مولیبدن دی‌سولفاید است. به‌طور کلی، نتایج این تحقیق نشان داد که در صورت افزودن نانوذرات مناسب در درصد حجمی مشخص، به سوسپانسیون‌های پلیمری، می‌توان خواص رئولوژیکی این سوسپانسیون‌ها را در راستای افزایش فرایندپذیری آنها تغییر داد.

### تعارض منافع

هیچ‌گونه تعارض منافع توسط نویسندگان بیان نشده است.

### تشکر و قدردانی

اد

### مراجع

- [1] C. Eriskin et al., "Modeling and rheology of HTPB based composite solid propellants," *Polym. Compos.*, vol. 19, no. 4, pp. 463-472, 1998.
- [2] S. O. A. Gomez, C. Eriskin, L. Yilmazer, F. Pekel, "Mechanical and burning properties of highly loaded composite propellants," *J. Appl. Polym. Sci.*, vol. 67, no. August, pp. 1457-1464, 1998.
- [3] H. Esiyok and M. E. Candarli, "Theoretical and experimental Packing density study of hydroxyl terminated polybutadiene-ammounium percholorate based propellant and its influence on burning rate," *Int. J. Energ. Mater. Chem. Propuls.*, vol. 13, no. 5, pp. 455-469, 2014.
- [4] E. Authority, "ATK Space Propulsion Products Catalog," vol. 4, no. 8, 2008.
- [5] Shusser, M., *Composite rocket propellants*. Wiley Encyclopedia of Composites, 2012.

- [16] R. N. Bolster, I. L. Singer, J. C. Wegand, S. Fayeulle and C. R. Gossett, "Preparation by ionbeam-assisted deposition, analysis and tribological behavior of MoS<sub>2</sub> films," Surf. Coatings Technol., vol. 46, no. 2, pp. 207-216, 1991.



#### COPYRIGHTS

© 2022 by the authors. Licensee Iranian Space Research Center of Iran. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0) (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)