

## بررسی رفتار برش وشکسانی در سیال تعلیقی کلوییدی سیلیکا

حوریه پرناک<sup>۱</sup>، اکرم بیگدلی<sup>۱</sup>، ناهید ملکی جیرسرائی<sup>۱</sup>، شاهین روحانی<sup>۲</sup>

۱. آزمایشگاه سیستم‌های پیچیده، گروه فیزیک، دانشکده علوم پایه، دانشگاه الزهراء، تهران

۲. دانشکده فیزیک، دانشگاه صنعتی شریف، تهران

پست الکترونیکی: maleki@alzahra.ac.ir

(دریافت مقاله: ۱۳۹۲/۹/۲۰؛ دریافت نسخه نهایی: ۱۳۹۳/۴/۲۳)

### چکیده

رفتار برش وشکسانی در نانوسیال تعلیقی سیلیکا (نانو ذرات سیلیکا به قطر ۱۲ نانومتر در اتیلن گلیکول) تحت برش پایا مورد بررسی قرار گرفت. آهنگ برش بحرانی برای گذار به برش وشکسانی را در دماها و غلظت‌های مختلف بدست آمد. همچنین تأثیرات دما و غلظت بر رفتار برش وشکسان را نیز بررسی شد. گذار به پهن‌شوندگی در برش، آشکارا برای همه نمونه‌ها قابل مشاهده است و همچنین مشاهده شد که با افزایش دما، آهنگ برش بحرانی افزایش و وشکسانی کاهش می‌یابد. مشاهدات ما نشان می‌دهند که دما و حرکت براونی ذرات در سوسپانسیون سیلیکا، گذار به برش وشکسانی را به تعویق می‌اندازد. اما افزایش غلظت منجر به افزایش وشکسانی و کاهش آهنگ برش بحرانی می‌شود. افزایش دما باعث افزایش نیروهای براونی و افزایش غلظت منجر به افزایش نیروی هیدرودینامیک روانکاری می‌گردد و مشاهدات ما تقابل این دو نیرو را در گذار به برش وشکسانی، برای سیالات تعلیقی حاوی نانو ذرات تایید می‌کند، که این در شرایط آزمایش‌های ما بیشتر به نفع مدل هیدروکلاستر در مقابل مدل نظم-بی‌نظمی است.

واژه‌های کلیدی: برش وشکسان، برش روان، محلول تعلیقی، آهنگ برش بحرانی

### ۱. مقدمه

سیال نیوتنی تشکیل یک سوسپانسیون را می‌دهد. اگر فاز جامد از ذرات زیر میکرون تشکیل شده باشد، سوسپانسیون کلوییدی نامیده می‌شود که در غلظت‌های پایین این سیالات معمولاً رفتار نیوتنی از خود نشان می‌دهند. اما وقتی غلظت افزایش می‌یابد، رفتار رئولوژیکی آنها پیچیده شده و رفتار غیرنیوتنی در آنها بروز می‌کند و وشکسانی به آهنگ برش وابسته می‌شود.

رفتار برش وشکسان معمولاً در آهنگ‌های برش بالا رخ

بسیاری از سیالات پیچیده که با آنها سروکار داریم برش روان<sup>۱</sup> هستند، بدین معنی که با افزایش آهنگ برش، وشکسانی آنها کاهش می‌یابد، اما تعداد کمی از سیالات هستند که رفتار برش وشکسان<sup>۲</sup> دارند. اضافه و پخش کردن یک فاز جامد در یک

۱. Shear thinning

۲. Shear thickening

در برش، نقطه‌ای است که نیروهای کلوییدی (نیروهای دافعه ذرات و نیروهای براونی) با نیروهای هیدرودینامیکی روان‌کاری<sup>۴</sup> کوتاه‌برد تراز شوند [۱۱-۱۳].

ما در این کار ضمن بررسی ناحیه‌ای که در آن رفتار برش وشکسان رخ می‌دهد و پیدا کردن نقطه گذار به برش وشکسانی، به بررسی عوامل مختلف تأثیرگذار مخصوصاً تأثیر دما و نقش نیروهای براونی بر رفتار برش وشکسان پرداختیم. در مورد تأثیر غلظت تحقیقات فراوانی صورت گرفته است و ما بیشتر قصد داریم به ارتباط تغییر دما و برهم‌کنش نیروی براونی و نیروهای هیدرودینامیک بپردازیم. از آنجا که طبق مدل هیدروکلاستر نیروی براونی یکی از عوامل موثر در گذار به پهن‌شوندگی معرفی شده است ما با انجام آزمایش‌ها در دماهای مختلف تأثیر نیروی براونی را آزمودیم، آزمایش‌های ما تأثیر این نیرو را در محل نقطه‌ی گذار تایید کردند.

## ۲. نظریه‌ها و مدل‌ها

چندین نوع هم‌زیستی نیروها با درجه‌های مختلفی در جریان سیال‌های تعلیقی وجود دارد. اولین نیرو منشأ کلوییدی دارد که ناشی از برهم‌کنش‌های بین ذرات است که با ویژگی‌هایی از سیال مانند قطبش‌پذیری<sup>۵</sup> تنظیم می‌شوند.

نیروی برهم‌کنش دافعه بین ذرات عبارت است از

$$F_{rep} = \frac{2\pi a_r \epsilon_r \psi_0^2 k a}{\epsilon_0} \quad (1)$$

که در آن  $\epsilon_r$  ثابت دی‌الکتریک نسبی سیال حامل و  $\epsilon_0$  گذردهی خلأ و  $\psi_0$  پتانسیل سطح و  $a$  شعاع ذرات و  $k$  معکوس ضخامت لایه دبابی می‌باشد.

دوم نیروی براونی است، البته این نیرو شدیداً به اندازه ذره‌ها وابسته است و برای ذره‌های زیر میکرون بسیار بزرگ است. سوم نیروهای هیدرودینامیک روی ذره را نیز باید نظر گرفت. نیروهای هیدرودینامیک با اختلاف سرعت موضعی بین ذره‌ها و سیالی که آن‌ها را احاطه کرده است متناسب است. نیروی هیدرودینامیک بین ذرات عبارت است از

می‌دهد. این تغییر رفتار معمولاً ناپیوسته است و رفتار برش وشکسانی طی یک تغییر فاز ایجاد می‌شود. بیش از دو دهه است که این مسئله مورد توجه محققین بسیاری قرار گرفته است، چرا که افزون بر تمایل برای شناخت پدیده که هنوز به درستی حاصل نشده است این گونه سیالات کاربردهای فراوانی در صنایع مختلف دارند، این سیالات به دلیل ویژگی خاصشان به عنوان جاذب شوک و تعدیل‌کننده در صنعت به کار می‌روند [۶-۱].

در صنعت نفت، هنگام حفاری، ممکن است مشکلاتی از قبیل انفجار در چاه‌های نفتی، در اثر نشت گاز و یا در اثر فشار زمین رخ دهد. یکی از روش‌هایی که برای مهار کردن این حوادث به کار گرفته می‌شود، استفاده از سیالات برش وشکسان است. به این ترتیب که سیال برش وشکسان به درون چاه تزریق می‌شود و در اثر تنش برشی عظیم اعمال شده به سیال هنگام وقوع انفجار و بروز رفتار پهن‌شوندگی در برش در سیال، وشکسانی سیال به شدت افزایش یافته، و به این ترتیب فشار عظیم ناشی از انفجار خنثی می‌گردد [۷].

همچنین این سیالات کاربردهای گسترده‌ای در صنعت تجهیزات ورزشی دارند. کلاه ایمنی، کفش، دستکش، لباس‌های ایمنی و لباس‌های نظامی، تعدادی از محصولات هستند که در آنها، از سیالات برش وشکسان به عنوان ضربه‌گیر استفاده می‌شود [۷].

برای توضیح علت رخداد گذار به برش وشکسانی دو نظریه که بیش از همه مطرح می‌شوند، عبارت‌اند از: (الف) مدل نظم-بی‌نظمی<sup>۱</sup> و (ب) مدل هیدروکلاستر<sup>۲</sup> که در بخش بعد به توضیح بیشتر آنها خواهیم پرداخت. مطابق مدل نظم-بی‌نظمی در آهنگ‌های پایین برش، ذرات در لایه‌هایی مرتب می‌شوند و وقتی آهنگ برش اعمال شده افزایش می‌یابد، این لایه‌ها به آرایش بی‌نظم شکسته می‌شوند [۸ و ۹]، (ب) مطابق مدل هیدروکلاستر که بر اساس شبیه‌سازی دینامیک استوکس، توسط بریدی<sup>۳</sup> و همکارانش [۱۰] ارائه شد، آغاز گذار به پهن‌شوندگی

۱. Order-disorder

۲. Hydrocluster

۳. Brady

۴. Lubrication

۵. Polarisability

بین ذرات، ذرات را در ساختارهای لایه‌ای مرتب می‌کند. اما وقتی آهنگ برش به یک مقدار بالا و مشخصی می‌رسد، نیروهای برشی که ذرات را به سمت هم هل می‌دهند، از نظر بزرگی، از نیروهای بین ذرات بزرگتر می‌شوند. در نتیجه این امر، ذرات از حالت تعادلی‌شان جابه‌جا می‌شوند و این منجر به گذاری از یک ساختار لایه‌ای به یک ساختار نامنظم می‌شود، که این امر باعث افزایش وشکسانی می‌شود [۸-۱۴].

## ۲.۲. مدل هیدروکلاستر<sup>۳</sup>

مدل هیدروکلاستر رفتار برش وشکسانی را در سیال‌های تعلیقی غلیظ توضیح می‌دهد. این مدل برای اولین بار بر اساس شبیه‌سازی دینامیک استوکس پیشنهاد شد [۱۰] و آزمایش‌های رئوآپتیکی<sup>۴</sup> که توسط بندر<sup>۵</sup> و همکارانش انجام شد، تأیید آنها را گزارش کرد [۱۵]. اساس این مدل بر تعادل بین نیروهای هیدرودینامیکی ناشی از جریان برشی و نیروهای ناشی از برهم‌کنش‌های بین ذرات است. شبیه‌سازی‌هایی که بر اساس دینامیک استوکس انجام شده‌اند نشان می‌دهند که آغاز گذار به برش وشکسانی نقطه‌ای است که نیروهای کلوییدی با نیروهای هیدرودینامیکی روان‌کاری<sup>۵</sup> کوتاه‌برد تراز شوند. در این نقطه ذرات توده‌های دینامیکی را تشکیل می‌دهند که به عنوان هیدروکلاسترها شناخته شده‌اند، که تراوش<sup>۶</sup> و تراکم<sup>۷</sup> هیدروکلاسترها منجر به افزایش ناگهانی وشکسانی می‌شود [۱۱ و ۱۲].

این کلاسترها از گروهی از ذرات شکل گرفته به صورت فشرده، تشکیل شده‌اند. در اثر اعمال تنش برشی ذرات به هم نزدیک می‌شوند و تحت این شرایط با افزایش آهنگ برش، نیروهای کوتاه‌برد روانکاری، افزایش یافته، و باعث می‌شود که خوشه‌ها تشکیل شوند و در نتیجه وشکسانی به طور ناگهانی افزایش یابد [۱۶-۲۱]. هنگامی که فاصله بین سطح ذرات، از قطر ذرات کوچک‌تر باشد، نیروهای هیدرودینامیک روانکاری<sup>۸</sup>

$$F_{\text{hydrodyn}} = \frac{\epsilon \pi \eta_s a^3 \dot{\gamma} a}{h} \quad (2)$$

که در آن  $\eta_s$  وشکسانی سیال حامل و  $h$  نیز فاصله بین دو ذره و  $\dot{\gamma}$  آهنگ برش سیال می‌باشد.

اخیراً نیروی اصطکاک نیز مطرح شده است و همچنین عواملی مانند انبساط نیز دخیل دانسته شده‌اند؛ لذا برای واریسی داده‌های تجربی باید آنها را با مدلی متشکل از نیروهای ذکر شده مقایسه کرد. این کار به دلیل پیچیده بودن نیروی حاصل تنها از طریق شبیه‌سازی امکان‌پذیر است و به همین دلیل تا کنون برای توضیح علت رخداد گذار به برش وشکسانی مدل‌های مختلفی ارائه شده‌اند که مطرح‌ترین دو مدل از آنها به شرح زیرند.

## ۱.۲. مدل نظم-بی‌نظمی

نظریه نظم-بی‌نظمی اولین بار توسط هافمن در سال ۱۹۷۲ بیان شد. او گذار به برش وشکسانی را در سیال تعلیقی رزین‌های پلیمری یکنواخت<sup>۱</sup>، که ذرات پراکنده‌ای که دارای شکل و اندازه یکسانی هستند، مشاهده نمود. با استفاده از پراکندگی نور و نوترون نشان داد که علت این پدیده ناپایداری جریان در لایه‌هایی از ذرات است. وی نشان داد که در آهنگ‌های پایین برش، ذرات در لایه‌هایی مرتب می‌شوند، و وقتی آهنگ برش اعمال شده افزایش می‌یابد، این لایه‌ها به آرایش بی‌نظم شکسته می‌شوند. این نتایج هافمن را وادار کرد که ناپایداری شارشی را پیشنهاد کند که باعث می‌شود ذرات در یک سری مقادیر بحرانی آهنگ برش، گذاری را از حالت لایه‌های منظم به حالت دیگری که دچار بی‌نظمی شده، و باعث افزایش وشکسانی می‌شود، داشته باشد.

او همچنین معیار دیگری را برای وقوع این رفتار ذکر می‌کند. این معیار از این فرض دنبال می‌شود که وقتی رفتار برش وشکسان رخ می‌دهد که نیروهای برشی بر نیروهای بین‌ذره‌ای غلبه کنند. در حقیقت این‌گونه فرض شده است که وقتی یک پخش کلوییدی یکنواخت پایدار غلیظ، در آهنگ برش‌های نسبتاً پایین تحت برش قرار می‌گیرد، نیروهای دافعه<sup>۹</sup>

۳.Hydrocluster

۴.Rheo-Optical

۵.Bender

۶.Lubrication

۷.Percolate

۸.Jam

۹.Lubrication hydrodynamics forces

۲.Monodisperse

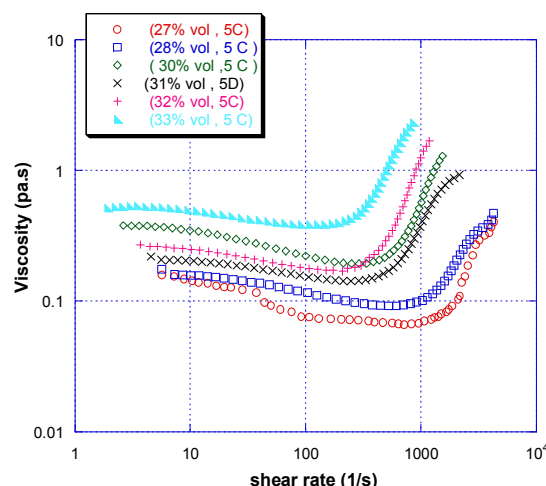
اتیلن گلیکول پخش شوند و در طی این مدت آن را در حمام آب سرد قرار می‌دهیم. اخیراً روش پرتودهی حمام فراصوت به عنوان یک روش موثر و کارآمد برای پخش نانو ذرات درون سیال حامل مورد استفاده قرار می‌گیرد. استفاده از حمام فراصوت باعث می‌شود، ذرات سیلیکا درون سیال حامل کاملاً پخش شوند و سیال تعلیقی همگنی به دست آید [۲۶، ۲۷، ۲۸، ۲۹ و ۳۰].

در این تحقیق ما نیز از روش حمام فراصوت برای سنتز نانوسیال سیلیکا استفاده کردیم. با این روش ۶ نمونه در غلظت‌های حجمی ۰/۲۷، ۰/۲۸، ۰/۳۰، ۰/۳۱ و ۰/۳۲ و ۰/۳۳ آماده شدند. از رنومتر MCR301 (Anton Paar) برای بررسی رفتار رئولوژیکی سیال‌های تعلیقی استفاده کردیم. برای مطالعه رفتار برش و شکسانی سیال تعلیقی سیلیکا، و همچنین برای بررسی تأثیرات دما و غلظت، رفتار رئولوژیکی سیال‌های تعلیقی سیلیکا را تحت شرایط برشی پایا مورد بررسی قرار دادیم. در این روش تنش برشی را افزایش داده و شکسانی<sup>۳</sup> و آهنگ برش<sup>۴</sup> برش<sup>۴</sup> را اندازه می‌گیریم. سپس نمودار و شکسانی بر حسب آهنگ برش را رسم می‌کنیم. رفتار شارشی همه نمونه‌ها در غلظت‌های مختلف در سه دمای ۵ و ۲۵ و ۵۰ درجه سانتی‌گراد، تحت شرایط برشی پایا مورد بررسی قرار گرفت.

#### ۴. نتایج آزمایش

برای تمامی نمونه‌ها تنش برشی را از ۱ تا ۲۰۰۰ پاسکال افزایش داده و شکسانی و آهنگ برش بحرانی را اندازه می‌گیریم.

در ابتدا نمودار و شکسانی بر حسب آهنگ برش را برای تمامی غلظت‌ها در دمای ۵ درجه سانتی‌گراد رسم کردیم (شکل ۱). همان طور که از شکل مشاهده می‌شود برای تمامی نمونه‌ها گذار به پهن شونده‌گی در برش مشاهده گردید. مشاهده می‌شود که در بازه تنش برشی کم، رفتار سیال برش روان است و در یک آهنگ برش بحرانی، رفتار پهن شونده‌گی در برش آغاز می‌شود و در ادامه با افزایش بیشتر آهنگ برش همچنان رفتار



شکل ۱. (رنگی در نسخه الکترونیکی) نمودار و شکسانی بر حسب آهنگ برش در غلظت‌های مختلف در دمای ۵ درجه سانتی‌گراد.

تأثیرگذار می‌شوند. به صورت کلی می‌توان گفت که نیروی هیدرودینامیک روانکاری، به صورت معکوس با کاهش فاصله بین ذرات، افزایش می‌یابد و وقتی ذرات در تماس با هم قرار می‌گیرند، واگرا می‌شود. در آهنگ برش‌های بالا، ذرات به هم نزدیک شده، و در نتیجه به شدت به هم وابسته می‌شوند. افزایش نیروهای هیدرودینامیک، باعث شکل‌گیری خوشه‌ها و در نتیجه افزایش و شکسانی می‌شود [۷، ۱۷-۱۹ و ۲۲-۲۴].

#### ۳. شرح آزمایش

برای ساخت این سیال‌های تعلیقی<sup>۱</sup> نانیوتنی<sup>۲</sup>، از ذرات سیلیکای سیلیکای کروی (تهیه شده از شرکت MERK) به قطر ۱۲ نانومتر، به عنوان فاز جامد و همچنین اتیلن گلیکول به عنوان سیال حامل و اتانول، که در اتیلن گلیکول حل‌پذیر است، به عنوان رقیق‌کننده استفاده شد. استفاده از اتیلن گلیکول به جای سیال حامل آب، به دلیل پایداری بیشتر اتیلن گلیکول نسبت به آب است [۲۵].

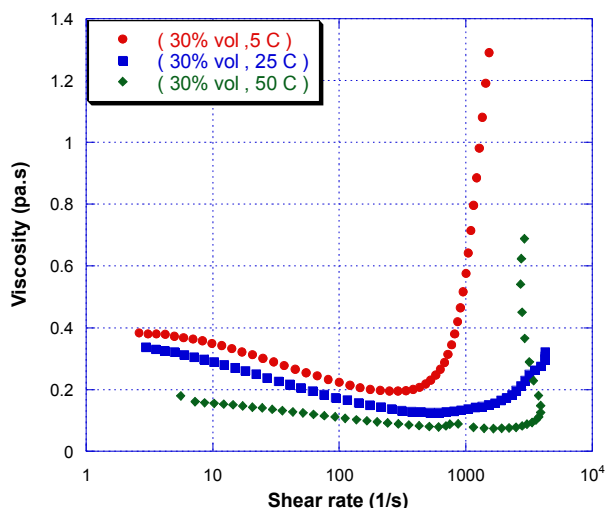
در ابتدا پودر سیلیکا را به اتیلن گلیکول و اتانول اضافه کرده و توسط یک همزن مکانیکی، مخلوط می‌کنیم. سپس اجازه می‌دهیم مدتی توسط حمام فراصوت، ذرات سیلیکا در

۳. Viscosity

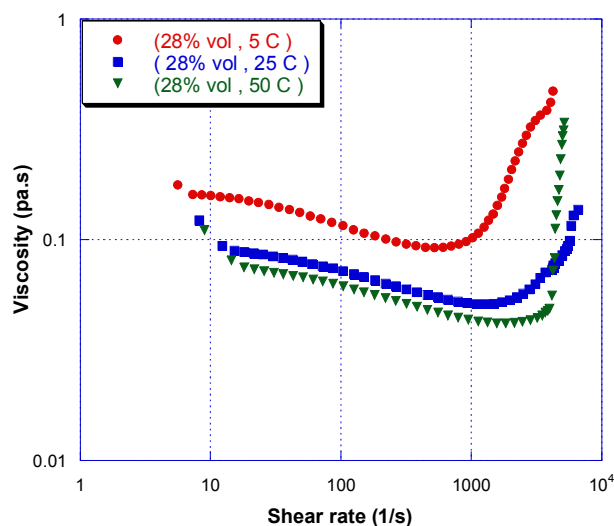
۴. Shear rate

۱. Colloidal suspension

۲. Non-Newtonian



شکل ۳. (رنگی در نسخه الکترونیکی) نمودار وشکسانی بر حسب آهنگ برش در غلظت ۳۰٪ حجمی.



شکل ۲. (رنگی در نسخه الکترونیکی) نمودار وشکسانی بر حسب آهنگ برش در غلظت ۲۸٪ حجمی.

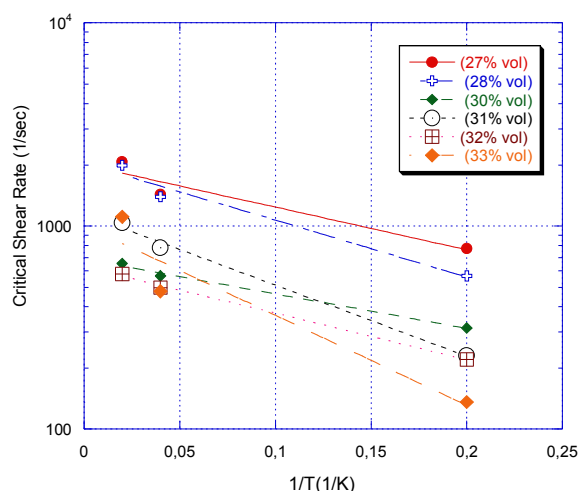
اندازه ذرات حدود ۲۰۰ نانومتر در دو غلظت بالا، ۵۰٪ و ۵۵٪ برای دماهای پایین دمای اتاق نیز وابستگی آهنگ برش بحرانی را به دما را گزارش کردند اما آنها این وابستگی را، به رغم اختلاف اندکی که بین منحنی‌های آن دو مشاهده کردند، با منحنی آبنوس،  $\ln(k) = \ln(A) - \frac{E_a}{R} \left( \frac{1}{T} \right)$  منطبق و اختلاف را قابل چشم‌پوشی دانستند، اما داده‌های ما که برای ذرات کوچکتر، در بازه دمایی بیشتر و برای بازه بیشترین غلظت‌ها شامل غلظت‌های پایین‌تر، از آن گرفته شد، این گونه نیست (شکل ۵) و وابستگی آهنگ برش بحرانی به دما از منحنی آبنوس تبعیت نمی‌کند، این نشان می‌دهد که اختلافی را که جی دانگ لی و همکارانش چشم‌پوشیدنی پنداشتند اختلافی واقعی بوده که در بازه‌های بزرگتر عیان‌تر می‌شود.

تأثیرات دمایی بر رفتار نانوسیال سیلیکا را می‌توان به ساین ذرات سیلیکا نسبت داد. نانو ذرات سیلیکا در سیال تعلیقی دارای حرکت براونی هستند. مشاهده نمودیم که دما بر روی آهنگ برش بحرانی موثر است، چون در سیال‌های تعلیقی نیروهای براونی از نظر بزرگی قابل مقایسه با نیروهای هیدرودینامیک هستند. طبق نظریه تشکیل هیدروکلاسترها، هنگامی که نیروی برشی افزایش می‌یابد، ذرات معلق درون سیال حامل به هم نزدیک شده و با کاهش فاصله بین ذرات

برش وشکسان قابل مشاهده است.

در ادامه تأثیر دما بر رفتار برش وشکسان را مورد بررسی قرار دادیم. از این رو رفتار رئولوژیکی نمونه‌های آماده شده در غلظت‌های ۲۷٪، ۲۸٪، ۳۰٪، ۳۱٪، ۳۲٪، ۳۳٪ حجمی، در سه دمای ۵، ۲۵ و ۵۰ درجه سانتی‌گراد مورد بررسی قرار گرفت. همان طور که در نمودارهای بالا (شکل‌های ۲ و ۳) قابل مشاهده است، هنگامی که دما افزایش می‌یابد، آهنگ برش بحرانی افزایش می‌یابد. در مورد سایر غلظت‌ها نیز این روند مشاهده گردید.

در شکل ۴ روند تغییرات آهنگ برش بحرانی در دماهای مختلف قابل مشاهده است. گذار به برش وشکسانی را در هر سه دما برای سیال تعلیقی سیلیکا مشاهده نمودیم. با انجام رئولوژی در دماهای متفاوت مشاهده کردیم که آهنگ برش بحرانی کاملاً به دما وابسته است. آهنگ برش بحرانی، با افزایش دما برای همه غلظت‌ها افزایش می‌یابد ولی این افزایش در غلظت‌های مختلف با روند یکسانی صورت نمی‌گیرد، در واقع می‌توان این گونه بیان کرد که با افزایش دما، شروع رفتار پهن شونده‌گی در برش به تأخیر می‌افتد. در دماهای پایین‌تر وشکسانی افزایش یافته و شدت رفتار برش وشکسانی افزایش می‌یابد. جی دانگ لی و همکاران [۶] برای سوسپانسیون با



شکل ۵. (رنگی در نسخه الکترونیکی) آهنگ برش بحرانی بر حسب عکس دما که هم خوانی آنها با تابع آبنوس آزموده شده، مشاهده می‌شود که نه تنها داده‌های مربوط به یک غلظت هم‌خوانی خوبی با نمودار ندارد، بلکه روند یکسانی در غلظت‌های مختلف نیز وجود ندارد.

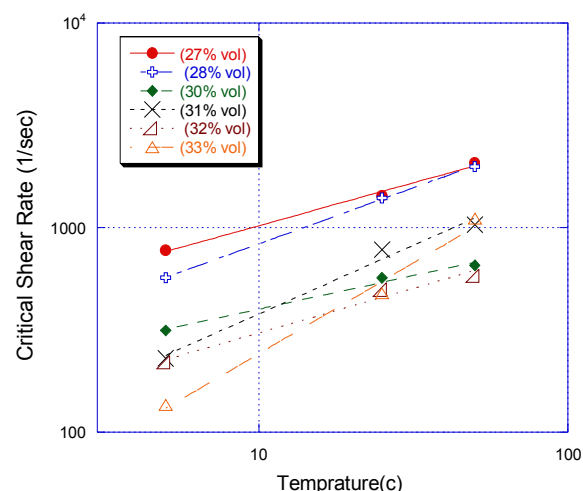
دماهای ۲۵ و ۵۰ درجه به هیچ‌وجه چنین رفتاری دیده نمی‌شود و در غلظت ۳۰٪ آهنگ برش بحرانی کمترین مقدار را داراست، و در غلظت‌های بالاتر و پایین‌تر مقدار بیشتری دارد. نکته قابل توجه این است که این پدیده در دو آزمایش مجزا، یعنی اندازه‌گیری در دمای ۲۵ و نیز ۵۰ درجه سانتی‌گراد تکرار شده است. این مسئله به اعتبار این داده‌ها می‌افزاید ولی برای توجیه و تفسیر آن نیاز به بررسی‌های بیشتری است.

برای بررسی این که آیا تغییر رفتار سیال یعنی گذار از برش روان به برش وشکسان یک رفتار جهانی است یا نه، نمودار وشکسانی بدون بعد بر حسب آهنگ برش بحرانی بدون بعد

$$\frac{\eta}{\eta_c} = \left( \frac{\dot{\gamma}}{\dot{\gamma}_c} \right)^n$$

در ۲۵ درجه سانتی‌گراد برای غلظت‌های مختلف رسم شد، همان طور که از شکل ۱۰ پیداست، نمای یکسانی برای همه غلظت‌ها بدست نیامد و لذا به نظر نمی‌رسد که با یک رفتار جهانی روبرو باشیم.

در حالت کلی وقتی غلظت ذرات جامد افزایش می‌یابد، در حقیقت تعداد ذرات معلق در سیال حامل افزایش یافته و در نتیجه فاصله بین ذرات درون سیال حامل کاهش یافته و ذرات



شکل ۴. (رنگی در نسخه الکترونیکی) نمودار آهنگ برش بحرانی بر حسب دما در غلظت‌های ۲۷٪، ۲۸٪، ۳۰٪، ۳۱٪، ۳۲٪ و ۳۳٪ حجمی، همان طور که مشاهده می‌شود آهنگ برش بحرانی با ازدیاد دما افزایش می‌یابد، اما این افزایش در غلظت‌های مختلف با روند یکسانی صورت نمی‌گیرد.

نیروی هیدرودینامیک روانکاری<sup>۱</sup> افزایش می‌یابد و بر نیروی براونی غلبه می‌کند و باعث شکل‌گیری هیدروکلاسترها<sup>۲</sup> و آغاز رفتار برش وشکسانی می‌شود [۷، ۲۲، ۲۹ و ۳۰]. می‌دانیم که در دماهای بالا نیروی براونی افزایش می‌یابد. بنابراین هنگامی که دما افزایش می‌یابد، نیروی براونی افزایش یافته و به رقابت با نیروی هیدرودینامیک می‌پردازد و در مقابل شکل‌گیری هیدروکلاسترها مقاومت می‌کند و در بازه بزرگتری بر نیروی هیدرودینامیکی غلبه می‌کند و در نتیجه سبب تأخیر در شروع ناحیه برش وشکسان شده و باعث افزایش آهنگ برش بحرانی می‌شود.

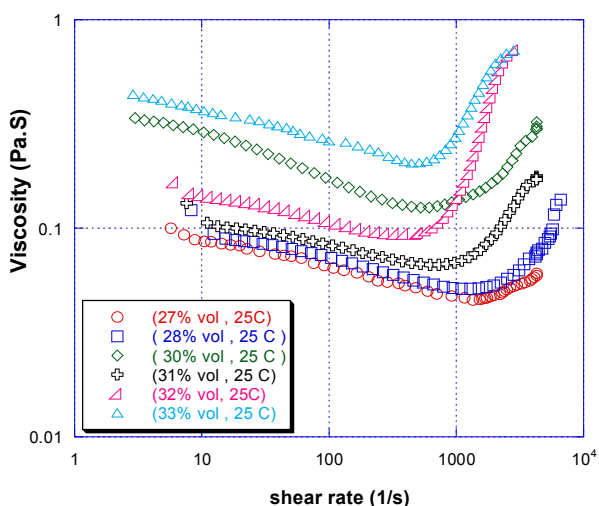
تأثیر غلظت بر رفتار برش وشکسانی را می‌توان در شکل‌های ۶ تا ۸ مشاهده کرد.

با توجه به نمودارهای در شکل ۹، روند تغییر رفتار برش وشکسانی با تغییر غلظت در سه دمای ۵، ۲۵ و ۵۰ درجه سانتی‌گراد قابل مشاهده است.

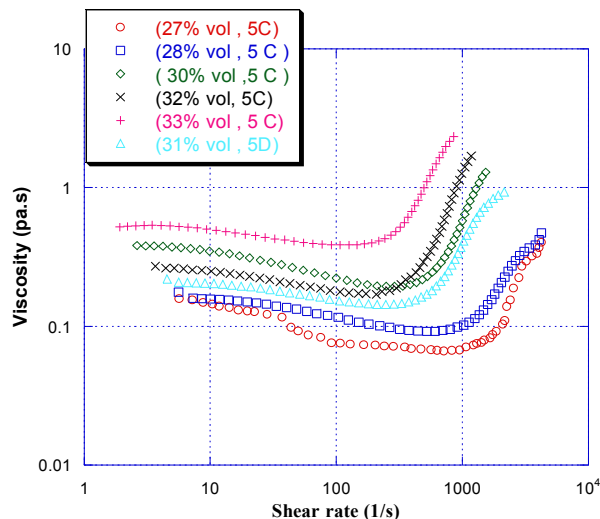
همان طور که در شکل ۸ می‌توان دید تنها در دمای ۵ درجه می‌توان روندی را برای آهنگ برش بحرانی در غلظت‌های مختلف قابل شد، که با تابع توانی هم‌خوانی دارد. ولی در

۱. Lubrication Hydrodynamic

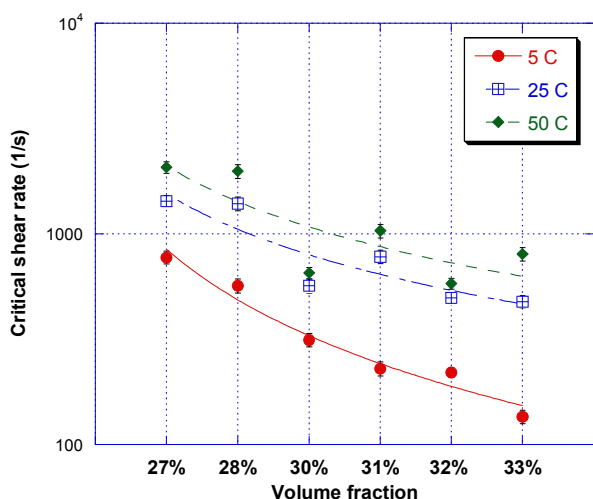
۲. Hydrocluster



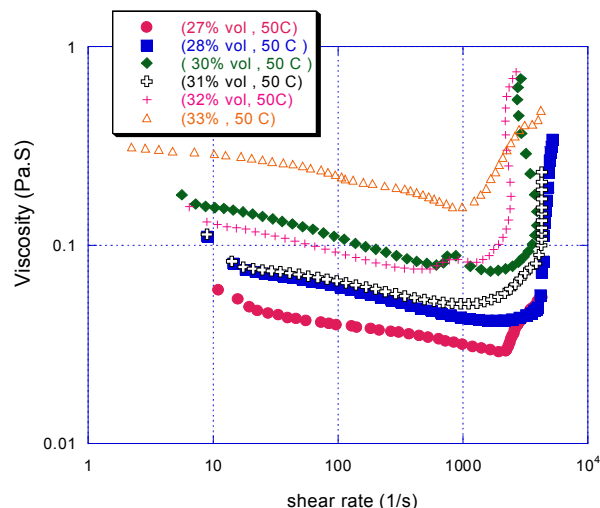
شکل ۷. (رنگی در نسخه الکترونیکی) نمودار شکسانی بر حسب آهنگ برش در غلظت ۰.۲۷، ۰.۲۸، ۰.۳۰، ۰.۳۱، ۰.۳۲ و ۰.۳۳ حجمی در دمای ۲۵ درجه سانتی گراد.



شکل ۸. (رنگی در نسخه الکترونیکی) نمودار شکسانی بر حسب آهنگ برش در غلظت ۰.۲۷، ۰.۲۸، ۰.۳۰، ۰.۳۱، ۰.۳۲ و ۰.۳۳ حجمی در دمای ۵ درجه سانتی گراد.



شکل ۹. (رنگی در نسخه الکترونیکی) نمودار آهنگ برش بحرانی بر حسب غلظت در دمای ۵، ۲۵ و ۵۰ درجه سانتی گراد، همان طور که مشاهده می شود تنها در دمای ۵ درجه می توان روندی را برای آهنگ برش بحرانی در غلظت های مختلف قابل شد و در دماهای ۲۵ و ۵۰ درجه این چنین نیست.



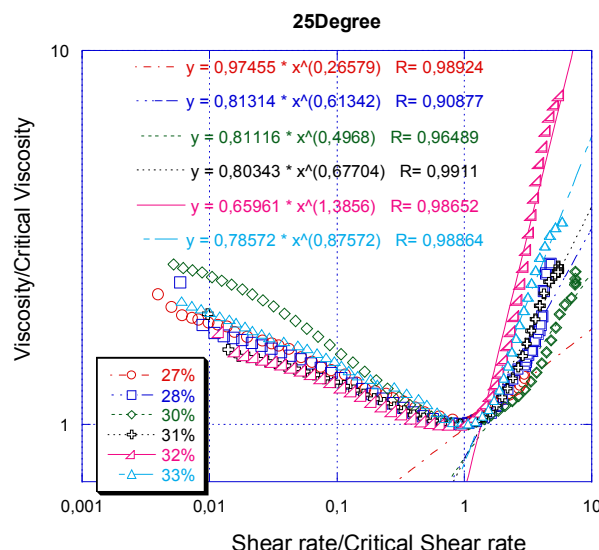
شکل ۱۰. (رنگی در نسخه الکترونیکی) نمودار شکسانی بر حسب آهنگ برش در غلظت ۰.۲۷، ۰.۲۸، ۰.۳۰، ۰.۳۱، ۰.۳۲ و ۰.۳۳ حجمی در دمای ۵۰ درجه سانتی گراد.

سریع تر رخ دهد و شدت آن نیز افزایش یابد؛ و ما انتظار داریم که با افزایش غلظت سیال تعلیقی، آهنگ برش بحرانی کاهش یابد اما در شکل های بالا مشاهده می شود که در غلظت بین ۳۰ و ۳۱ درصد این روند حفظ نمی شود برای اطمینان از نتایج به دست آمده دو آزمایش دیگر با غلظت ۰.۳۲ و ۰.۳۳ حجمی انجام شد که همان روند ابتدایی مشاهده گردید. ممکن

درون سیال تعلیقی به یکدیگر نزدیک تر می شوند و همان طور که می دانیم نیروهای هیدرودینامیک با فاصله بین ذرات رابطه عکس دارد [۷ و ۲۳]، در نتیجه با اعمال یک تنش برشی کوچک به سیال تعلیقی، نیروی هیدرودینامیک با شدت بیشتری افزایش یافته و بر نیروهای بین ذرات غلبه می کند و هیدروکلاسترها تشکیل می شوند، که باعث می شود که رفتار پهن شونده در برش

هیدروکلاسترها، هنگامی که نیروی هیدرودینامیک بر نیروی براونی غلبه کند، گذار به برش وشکسانی رخ می‌دهد. بنابراین با افزایش دما و افزایش نیروهای براونی، این گذار به تأخیر می‌افتد و در حالت کلی شدت رفتار برش وشکسانی کاهش می‌یابد؛ به عبارت دیگر تأثیر نیروی براونی در نقطه گذار به برش وشکسانی برای سیالات تعلیقی که حاوی نانو ذرات هستند، با آزمایش‌های ما تأیید می‌شود. در حالی که مطابق مدل نظم-بی‌نظمی به نظر می‌رسد، دما اگر تأثیری داشته باشد باید به نفع گذار عمل کرده و آن را تسریع کند، چرا که هم نیروهای براونی و هم آهنگ برش باید به خروج ذرات از لایه‌های منظم کمک کنند در نتیجه به نظر می‌رسد پیش بینی مدل نظم-بی‌نظمی، کاهش آهنگ برش بحرانی با افزایش دما باشد، که مشاهدات ما عکس آن را نشان داد. بنابراین مشاهدات ما بر اساس تغییرات دما برای سیالات حاوی نانو ذرات مدل هیدرو کلاستر را پاسخگوتر یافت.

از سوی دیگر مشاهدات ما نشان می‌دهند که با افزایش غلظت، گذار به برش وشکسانی در آهنگ برش سریع‌تر رخ می‌دهد و شدت رفتار برش وشکسانی نیز افزایش می‌یابد، در توجیه می‌توان گفت با افزایش غلظت، ذرات سیلیکا در سیال حامل در فاصله‌های نزدیک‌تری نسبت به یکدیگر قرار می‌گیرند و در نتیجه با افزایش تنش برشی، نیروی هیدرودینامیک با سرعت بیشتری افزایش می‌یابد و به شکل‌گیری سریع‌تر هیدروکلاسترها کمک می‌کند که باعث می‌شود این گذار سریع‌تر رخ دهد. در مجموع آزمایش‌های ما، به ویژه با بررسی اثر دما بر نقطه گذار، که برای اولین بار انجام شد نشان می‌دهد که مدل هیدروکلاستر برای گذار به برش وشکسانی را که تقابل نیروی براونی و نیروهای هیدرودینامیک روانکاری را مسئول رخ داد گذار می‌شمرد، دست کم برای سیالات تعلیقی، که حاوی نانو ذرات هستند، در غلظت‌هایی دور از منطقه تراکم، بهتر توجیه می‌کند.



شکل ۱۰. (رنگی در نسخه الکترونیکی) نمودار وشکسانی بدون بعد بر حسب آهنگ برش بحرانی بدون بعد  $\frac{\dot{\eta}}{\eta_c} = \left(\frac{\dot{\gamma}}{\dot{\gamma}_c}\right)^n$  در ۲۵ درجه سانتی‌گراد برای غلظت‌های مختلف.

است علت آن این باشد که برای غلظت در این محدوده، هنگام انجام آزمایش رئولوژی، یک جدایی فاز جامد از مایع رخ داده باشد که باعث بروز این روند معکوس شده است اما دست‌یابی به اطمینان و درک کامل علت رخداد پدیده نیاز به بررسی‌های بیشتر دارد.

## ۵. نتیجه‌گیری

ما رفتار برش وشکسانی را برای سیال تعلیقی سیلیکا بررسی کردیم. برای تمامی غلظت‌ها، گذار به پهن شونده‌گی در برش در دماهای مختلف مشاهده گردید. به بررسی تأثیرات تغییر دما و غلظت پرداختیم. با توجه به نتایج آزمایش‌های مربوط به اثرات دمایی مشاهده کردیم که با افزایش دما و در نتیجه افزایش نیروهای براونی، این گذار به تأخیر می‌افتد و توجیه آن می‌تواند این چنین باشد که چون سیال تعلیقی سیلیکا حاوی نانو ذرات سیلیکا می‌باشد، بنابراین نیروهای براونی قابل چشم‌پوشی نیستند. وجود نیروهای براونی باعث می‌شود که گذار به برش وشکسانی به دما وابسته باشد. مطابق نظریه شکل‌گیری



## مراجع

18. G Bossis and J F Brady, *J. Chem. Phys.* **80** (1984) 5141.
19. D P Kalman and N J Wagner, *J. Rheol. Acta.* **48** (2009) 897.
20. A J Shah, "Rheology of Shear Thickening Mineral Slurries", MSc. Thesis, School of Civil, Environmental and Chemical Engineering Science, University (2007); Zupancic, R Lapasin, and M Zumer, *J. Progress in Organic Coatings* **30** (1997) 67.
21. J R Melrose, J H Vliet, and R C Ball, *J. Phys. Rev. Lett.* **77** (1996) 4660.
22. S R Raghavan and S Khan, *Journal of Colloid and Interface Sci.* **185** (1997) 57.
23. J G Ramirez, "Characterization of Shear-Thickening Fluid-Filled Foam Systems", Massachusetts Institute of Technology (2004).
۲۴. س غ اعتماد، م نصیری، و م حجت، «نانوسیال محیط جدید انتقال حرارت»، انتشارات ارکان دانش (۱۳۸۶).
25. S Zhang, Y Zhao, X Cheng, G Chen, and Q Dai, *J. Alloys and Compounds* **470** (2009) 168.
26. C Sauter, M A Emin, H P Schuchmann and S Tavman, *J. Ultrason Sonochem.* **15** (2008) 517-523.
27. T A Hassan, V K Rangari, and S Jeelani, *J. Ultrason Sonochem.* **17** (2010) 947.
28. T A Hassan, V K Rangari, and S Jeelani; *J. Mat. Sci. Engin. A* **527** (2010) 2892.
1. S S Shenoy, N J Wagner, and J W Bender, *J. Rheol. Acta* **42** (2003) 282.
2. M R Jolly, and J W Bender, *US patent application* (2006) 0231357.
3. J Persello, A Magnin, J Chang, J M Piau, and B Cabane, *Journal of Rheology* **38** (1994) 1845.
4. J C van der Werff and C G de Kruif, *Journal of Rheology* **33** (1989) 421.
5. Y S Lee and N J Wagner, *Rheol Acta* **42** (2003) 199.
6. J D Lee, J H So, and S M Yang, *Journal of Rheology* **43** (1999) 1117. -
7. R L Hoffman, *Advances in Colloid and Interface Sci.* **17** (1982) 161.
8. R L Hoffman, *J Colloid Interface Sci.* **46** (1974) 491.
9. J Brady and G Bossis, *J. Fluid Mech.* **155** (1985) 105.
10. B J Maranzano and N J Wagner, *J. Chem. Phys.* **114**, 23 (2001) 10514.
11. B J Maranzano and N J Wagner, *J. Rheol.* **45**, 5 (2001) 1205.
12. Y S Lee and N J Wagner; *J. Rheol. Acta* **42**, 199 (2003).
13. R L Hoffman, *Trans. Soc. J. Rheology* **16** (1972) 155.
14. J Bender and N Wagner, *J. Rheology* **40** (1996) 899.
15. W H Boersma; J Laven, H N Stein; *J. American Institute of Chemical Engineers* **36** (1990), 321.
16. G Bossis and J F Brady, *J. Chem. Phys.* **87** (1987) 5437.
17. D R Foss and J F Brady, *J. Fluid Mech.* **407** (2000) 167.