تاثیر شکل ذرات میکرومتری بر رفتار رئولوژیکی سوسپانسیونهای غلیظ آنها

استادیار، پژوهشگاه فضایی ایران، تهران، ایران، m.haghgoo@isrc.ac.ir	مجيد حقگو*
استادیار، پژوهشگاه فضایی ایران، تهران، ایران، h.eshaghi@isrc.ac.ir	هاجر اسحاقى

چکیدہ

شکل ذرات یکی از فاکتورهای مهم و اساسی بر رفتار رئولوژیکی سوسپانسیونهای پرشده محسوب میشود. در این تحقیق برای اولین بار اثر سه شکل متفاوت از ذرات بر رفتار رئولوژیکی سوسپانسیونهای غلیظ در سه شکل کروی، سهمی گون بیضوی و قایقی بر پایه رزین آکریلاتی مورد مطالعه قرار گرفت. ذرات کروی به روش فتوپلیمریزاسیون تعلیقی و ذرات غیرکروی به روش چاپ سه بعدی (DLP) تولید شده و سپس در بستر روغن سیلیکون پراکنده شدند. منحنیهای جریان در غلظتهای مختلف برای هر سه شکل اندازه گیری و در تمام نمونهها رفتار غلیظ شوندگی برشی با افزایش نرخ برش مشاهده شد. کسر حجمی بیشینه تراکم برای هر سیستم به کمک مدل کریگر-دورتی به روش حداقل مربعات برازش شد. این مقدار برای شکل کروی ماکزیمم بوده و در شکلهای غیر کروی نیز با افزایش نسبت منظر، کاهش می یابد. حلقه پسماند مشاهده شده در منحنیهای جریان با افزایش کسر حجمی، روند افزایشی و سپس در نزدیکی کسر حجمی بیشینه تراکم، با شیب زیاد کاهش شدیدی را نشان می دهد.

واژه های کلیدی: رفتار رئولوژیکی، سوسپانسیون غلیظ شده، غلیظ شوندگی برشی، فاکتور شکلی، حلقه پسماند، مدل کریگر-دورتی.

The effect of the shape of micron-sized particles on the rheological behavior of their concentrated suspensions

M. Haghgoo	Iran Space Research center, Tehran, Iran
H. Eshaghi	Iran Space Research center, Tehran, Iran

Abstract:

Particle shape is one of the most important and fundamental factors on the rheological behavior of filled suspensions. In this study, for the first time, the effect of three different shapes of particles on the rheological behavior of concentrated suspensions in three forms of spherical, elliptical paraboloid and boat-like (based on acrylic resin) was studied. Spherical particles were prepared by suspension photo polymerization and non-spherical particles were fabricated by three-dimensional printing (DLP), followed by being dispersed in a silicon oil substrate. Flow curves of the obtained suspensions at different concentrations for all three shapes confirm that the samples show a shear thickening behavior with increasing shear rate. The maximum packing volume fraction for each suspension was fitted using the Krieger-Dorty model with the least squares method. This value is the maximum for the spherical shape and decreases in non-spherical shapes with increasing aspect ratio. The hysteresis loops in the flow curves increase with increasing volume fraction, and then collapse near the maximum packing fraction.

Keyword: Rheological behavior, Filled suspension, Shear thickening, Shape factor, Hysteresis loop, Krieger-Dorty model.

۱– مقدمه

تعلیق ذرات جامد در مایعات، بهطور وسیع در طبیعت و صنایع مختلف مشاهده میشود. صنایع غذایی، آرایشی، پلاستیک، دارویی، نفت و جداسازی مواد معدنی شامل مجموعهای از مواد چند فاز است که بسیاری از آنها بدون توجه به نحوهی ارائه به مصرف کننده، بهعنوان تعلیق ذرات محسوب میشوند. مخاطرات طبیعی اغلب با جریانی از سیالات همراه هستند و تقریبا همه آنها بخش قابل توجهی از ذرات جامد معلق را در خود جای میدهند (مثل جریانات مذاب، گل و لای و…). توانایی ما برای کنترل دقیق جریانهای صنعتی و پیشبینی عوامل طبیعی به دانش ما در مورد سوسپانسیونها بستگی دارد [1].

رئولوژی سوسپانسیون ۵ های ذرهای، متاثر از مجموع خواص فیزیکی و فرآیندهایی است که در مقیاس ذرات تعلیق شده اتفاق میافتد. مهم ترین عوامل تاثیر گذار بر رئولوژی سوسپانسیونها عبارتاند از کسر حجمی ذرات، شکل ذرات، برهمکنش بین ذرات، آرایش یافتگی و ماهیت میدان جریان [۱].

مطالعات بنیادی سوسپانسیونهای غیر کلوئیدی (غیر برآونی) که اندازه ذرات آن به اندازه کافی بزرگ (بهعنوان مثال کرههایی با شعاع بزرگتر از یک میکرومتر) باشد، دارای سابقه طولانی است. در اوایل دهه ۱۹۰۰ انیشتین افزایش لزجت حاصل از اضافه کردن چند ذره به یک سیال نیوتنی را اندازه گیری کرد که این شروعی بر مطالعات گسترده در مورد رئولوژی سوسپانسیونها بود. [۲].

بر اساس مطالعات در طی ۲۰ سال گذشته، سوسپانسیونهای غلیظ، با توسعه ابزارهای جدید آزمایش، روشهای عددی و رویکردهای نظری، بسیار موردتوجه قرارگرفتهاند. با افزایش کسر حجمی لزجت بهصورت محسوس افزایش مییابد و هنگامیکه کسر حجمی به بیشترین مقدار خود میرسد لزجت بهصورت واگرا به سمت بینهایت میل میکند. این کسر حجمی جایی است که سوسپانسیون سیالیت خود را از دست میدهد؛ در این رژیم، تماس بین ذرات بر برهمکنشهای هیدرودینامیکی غلبه میکند [۲].

برخی تحقیقات تاکید دارند که ریزساختار، کلید فهم مکانیک سیالات و رئولوژی سوسپانسیونهای غلیظ است. ریزساختار به موقعیت نسبی و

[®] نویسنده مکاتبه کننده، آدرس پست الکترونیکی: m.haghgoo@isrc.ac.ir تاریخ دریافت: ۰۱/۰۴/۰۹ تاریخ پذیرش: ۱/۰۹/۲۱

جهت گیری وجود فیزیکی در ماده اشاره دارد. بررسی ریزساختار، نهتنها وسیلهای برای توضیح لزجت نسبی سوسپانسیونها فراهم میکند بلکه برای درک اختلاف تنشهای نرمال و تکامل معادلات متشکله ضروری است [۳].

بیشتر پژوهشها تاکنون، در مورد سوسپانسیونهای حاوی ذرات کروی انجامشدهاند؛ اما در حقیقت ذرات در طیفهای گستردهای از شکل ها یافت میشوند. بهطور مثال، الیاف و صفحات دو شکل نسبتاً متداول انحراف از کروی بودن را نشان میدهند. هنگامی که ذرات غیر کروی در معرض جریان برشی قرار می گیرند، در جهت طول کشیده شده و دچار چرخش میشوند اما در این سوسپانسیونها، تنشهای هیدرودینامیکی، به آرایش یافتگی ذرات نسبت به جهت جریان بستگی دارد. ازاینرو تنشها در طول چرخش متفاوت خواهد بود و باعث میشود که ذرات حرکت وابسته به زمان را در جریان برشی پایا تجربه کنند. درنتیجه رئولوژی یک سوسپانسیون حاوی ذرات غیر کروی را به آرایش یافتگی ذرات نسبت میدهند. ازآنجاکه چرخش و جهت گیری ذرات تابع شکل آنهاست، حرکت و رئولوژی رابطه قدرتمندی با یکدیگر دارند [۲].

شکل ذرات با تغییر ماهیت برهمکنشهای ذره-سیال و ذره-ذره رئولوژی را با در نظر گرفتن دو عامل تحت تأثیر خود قرار می دهد: ۱-ذرات ناهمسانگرد دارای قابلیت جهتگیری هستند، بنابراین تاثیر آنها بر رئولوژی به جهتگیری آنها نسبت به جریان بستگی دارد. ۲-ناهمسانگردی موجب افزایش برهمکنشهای ذره-ذره می شود، زیرا مدار یک ذره غیر کروی در حال چرخش، حجم بیشتری را برای برهمکنشهای پتانسیلی نسبت به یک ذره کروی اشغال می کند [۴] و [۵].

در سال ۲۰۱۹، جیمز و همکارانش اقدام به سنتز ذرات سیلیکا در نسبت منظرهای مختلف نموده (نسبت منظر یک پارامتر بدون بعد بوده و از نسبت طول به عرض تعریف میشود) و سپس رئولوژی آنها را $\Gamma=1$ و $\Gamma=1$. در این کار ذرات در سه نسبت منظر متفاوت $\Gamma=1$ کره، 8=7 و $\Gamma=1$ به شکل میله ساخته شدند. سپس اندازه گیریهای رئولوژیکی به روش stress-controlled بر روی سوسپانسیون این ذرات انجام شد. در سال ۲۰۱۶، کوالینا و همکارانش نیز رئولوژی سوسپانسیون ذرات زئولیت آلومینیوم سیلیکات، با هندسه مکعبی را بررسی و با سوسپانسیون کرات سخت مقایسه کردند [۶].

مولر و همکارانش چندین آزمایش تجربی را برای تعیین رئولوژی سوسپانسیونهای تک توزیعی از ذرات در طیف وسیعی از نسبت منظرهای بسیار کشیده شده تا بسیار پهن شده انجام دادند [۲]. آنها میدانستند که تأثیر شکل ذرات بر رئولوژی را میتوان از طریق تاثیر آن به کسر بیشینه تراکم اندازهگیری کرد. ازاینرو کسر بیشینه تراکم ذراتی که یک سوسپانسیون میتواند اختیار کند، پیش از رسیدن به حالت جامد برای ذرات همسانگرد بیشترین مقدار است و با افزایش ناهمسانگردی کاهش مییابد. درنتیجه، یک سوسپانسیون حاوی ذرات همسانگرد دارای لزجت کمتری نسبت به سوسپانسیون ذرات ناهمسانگردی در کسر حجمی یکسان است.

آن و همکارانش [۸] توسط ویسکومتری که خودشان طراحی نموده و ساختند، لزجت ظاهری ذرات گرافیت آهن را در حالت مذاب با تغییرات نرخ برش بدست آوردند. آنها لزجت ذرات بی شکل را با فاکتور

کرویت ۰/۱۷۶، ۰/۱۸ و ۰/۱۸۲ در کسرهای حجمی ۲۰ تا ۰/۱۳۵ بدست آوردند و نشان دادند که هر چه میزان کرویت ذرات کمتر باشد، لزجت بیشتر خواهد شد. همچنین در مطالعه آنها برای ذره با کرویت ۱/۷۶ (فاصله بیشتر از حالت کروی) با زیاد شدن کسر حجم، لزجت بهصورت نمایی افزایش نشان داد.

همچنین اخیرا مارات و همکارانش [۹] خواص رئولوژیکی ذرات کربنات کلسیم را با اشکال کروی، سوزنی، صفحهای و چندوجهی در مخلوطی از آب و پارافین بررسی کردند. با وجودیکه این مطالعه در دو ترکیب ۷ و ۱۰ درصد حجمی از ذرات جامد انجام گرفت، تنش تسلیم در همه سوسپانسیونهای ذکرشده مشاهده شد.

بااینکه تاکنون مطالعاتی در زمینه تاثیر شکل ذرات سوسپانسیون بر رفتار رئولوژیکی آن انجام گرفته است، اما معمولا این پژوهشها در مورد اشکال خاصی از ذرات و نیز در رژیم رقیق و نیمه غلیظ (کمتر از ۲۰ درصد حجمی) صورت گرفته است و به درصدهای حجمی بالا توجه خاصی نشده است. لذا در این کار پژوهشی برای اولین بار رفتار رئولوژیکی سوسپانسیون غلیظ دو ذره سهمی گون بیضوی و قایقی که از طرق مختلف ساخته شده، با رفتار رئولوژیکی سوسپانسیون غلیظ ذرات کروی مقایسه شده است.

۲- بخش تجربی ۲-۱- مواد اولیه

رزین پایه آکریلاتی با نام تجاری Maancure2500 از شرکت مان-بسپار، سدیم دودسیل سولفات از شرکت مرک (CAS No: 151-21-3)) و ایزوپروپیل الکل از شرکت مرک (CAS No:67-63-0) و روغن سیلیکون از شرکت Brugarolas ایتالیا تهیه شدند.

ذرات کروی با استفاده از روش فتوپلیمریزاسیون سنتز شدند. بدین منظور از یک بشر ۲۵۰mL، بهعنوان راکتور استفاده شد. سیستم شامل ۱۰۰ mL آب مقطر و gr ۵ رزین بوده که تحت تنش با سرعت ۱۰۸۰ rpm به مدت ۲۰ دقیقه قرار گرفت. مجددا ۳۰ محلول آبی حاوی ۲۰٪ حجمی سدیم دودسیل سولفات به آن اضافه شده و حدودا ۳۰ دقیقه بهمنظور پایدار نسبی سیستم از نظر ادغام و جداسازی قطرات به آن زمان داده شد. نهایتا از یک لامپ UV با قدرت ۱۰۰۰

ذرات غیر کروی (قایقی و سهمی گون بیضوی) با استفاده از روش پرینت سه بعدی بهوسیله دستگاه چاپگر سه بعدی از نوع Digital ابتدا نقشه سه بعدی بهوسیله دستگاه چاپگر سه بعدی از نوع Digital و ساخت شرکت Parsa 3D تهیه شدند. در این روش ابتدا نقشه سه بعدی اشکال مختلف، با رعایت ابعاد دقیق توسط نرمافزار Materialaise Magics رسم میشود. سپس الگوی هر لایه توسط نرمافزار Parsa 3D Slicer، از نقشهی اصلی قطعه موردنظر برش داده شده و به نقشه ی بایتی قابل نمایش برای پروژکتور تبدیل میشود. پروژکتور نقشه هر لایه را بر حسب زمان تعیین شده ۸ ثانیه، به سطح رزین میتاباند تا فتوپلیمریزاسیون صورت گیرد. سپس لایههای بعدی نیز به همین ترتیب تشکیل میشوند تا در نهایت ساختار اصلی ذره حاصل شود. بهمنظور تکمیل فرایند پخت و افزایش استحکام ذرات، لازم است که فرآیند پساپخت ذرات به مدت یک ساعت تحت تابش فرابنغش انجام شود.

در مرحله تهیه سوسپانسیون، در ابتدا ذرات در آون خلا تحت دمای ^C ۵۰ به مدت ۲ ساعت بهمنظور رطوبت گیری قرار می گیرند. سپس سه نوع ذره کروی، قایقی و سهمی گون بیضوی در کسر حجمیهای ۲/۲ تا ۵/۵ توزین شده و بعد از افزوده شدن به سیال پایه سیلیکونی با همزن مغناطیسی به مدت یک ساعت هـم زده مـیشـود. بهمنظور پخش کامل ذرات، نمونه قبل از آزمون، توسط همزن گردابی به مدت ۱ دقیقه تحت تنش قرار می گیرد. به منظور مشاهده هندسه و ابعاد ذرات و همچنین بررسی ویژگیهای سطح مانند زبری، از آزمون میکروسـکوپ الکترونــی روبشــی (SEM) ســاخت شـرکت TESCAN استفاده شد. آزمون آنالیز اندازه گیری ذره (PSA) توسط دستگاه Mastersizer2000 ساخت شرکت Malvern انگلستان انجام شد. در این آزمون سوسپانسیون رقیقی از ذرات در ایزوپروپیل الکل مورد استفاده قرار گرفت. آزمون رفتار رئولوژیکی و خواص ویسکوالاستیک نمونهها با استفاده از دستگاه رئومتر دینامیکی، RMS مدل MCR302 ساخت شرکت Anton Paar مطالعه شد. کلیه ای اندازه اگیری ها توسط این دستگاه در دمای ℃ ۲۵ و با استفاده از هندسه¬ی صفحات موازی با قطر دیسک ۲۵ میلیمتر انجام شد. برای بررسی تابعیت لزجت با تنش، آزمون منحنی جریان به صورت چند حلقه رفت و برگشتی در بازه ۳/۵ مرتبه ده دهی انجام گرفت. بدین صورت که ابتدا نمونه تحت روند افزایشی شدت برش سپس تحت روند نزولی شدت برش قرار گرفته و این رفت و برگشت دوباره تکرار شد. آزمون Start up بهمنظور بررسی میکروساختار در منحنیهای رفت و برگشت انجام شد. ایـن آزمـون در میانهی منحنی جریان که نرخ برش به ^۱-۵.05S می سد، با یک افزایش ناگهانی به ¹-γ=0. 5S بتغییرات لزجت را با زمان نشان میدهد.

۳- نتايج

در شکل ۱ تصاویر SEM ذرات تهیه شده نشان داده شده است. همان گونه که مشخص است ذرات دارای شکل تقریبا منظم و توزیع اندازه باریکی هستند. این موضوع، نشان میدهد که روشهای تهیه این ذرات بهمنظور دستیابی به شکل از پیش تعیین شده (کروی، قایقی و بیضوی)، مناسب بودند. همچنین و مشخصات ابعادی این ذرات توسط آزمون PSA نیز در جدول ۱ آمده است.





شکل ۱= (الف) ریزنگارهای SEM از ذرات با هندسه کروی به روش فتوپلیمریزاسیون تعلیقی، (ب) ذرات قایقی ساخته شده به روش چاپ سه بعدی، (ج) ذرات سهمی گون بیضوی ساخته شده به روش چاپ سه بعدی

جدول ۱- مشخصات ابعادی ذرات ساخته شده

ابعاد [°]	نسبت منظر	هندسه	نام ذره
$\overline{D} = 80 \pm 2 \ \mu m$	1	کروی	S1
$\overline{L} = 290 \pm 5 \mu m$ $\overline{H} = 120 \pm 6 \mu m$ $\overline{D} = 123 \pm 7 \mu m$	3	قايقى	В3
$ \overline{H} = 122 \pm 2 \ \mu m \\ \overline{a} = 150 \pm 5 \ \mu m \\ \overline{b} = 60 \pm 2 \ \mu m $	1	سهمی گون بیضوی	E1

^{*} D: قطر متوسط ذرات، H: شعاع ذرات، L: طول ذرات، a شعاع متوسط. بزرگ، b شعاع متوسط کوچک "

به منظور بررسی و مقایسه منطقی بین شکلهای مختلف از ذرات، لازم است کسرهای حجمی بیشینه تراکم در محدوده برشهای اصطکاکی (کمترین کسر حجمی که در آن در اثر افزایش درصد حجمی ذرات انتقال شروع میشود) ϕ_0 و کسر حجمی بیشینه تراکم در محدوده برشهای غیر اصطکاکی ϕ_m (کمترین کسر حجمی که در آن به دلیل اعمال برش، انتقال به صورت بازگشت پذیر اتفاق می افتد) محاسبه شود. برای این کار از رابطه کریگر - دورتی به شکل زیر استفاده شد [10]

$$\eta_{\rm r} = (1 - \frac{\varphi}{\varphi_{\rm m}})^{-\beta} \tag{1}$$

 Φ در این رابطه η نسبت لزجت سوسپانسیون به لزجت سیال، Φ کسر حجمی، ϕ_m کسر حجمی بیشینه تراکم و β پارامتر برازش است. پارامتر ϕ_m [n] ϕ_m ، بهصورت حاصل ضرب لزجت ذاتی در کسر حجمی بیشینه تراکم، تعریف می شود که پارامتری وابسته به شکل ذرات است. مقدار ϕ_0 از میانگین لزجت حالت افزایشی و کاهشی در برشهای پایین نزدیک به π_{in} و مقدار ϕ_m نیز از میانگین لزجت حالت افزایشی و کاهشی در برشهای بالا از منحنیهای جریان، نزدیک به افزایشی و کاهشی در برشهای بالا از منحنیهای جریان، نزدیک به تراکم را تایید کردند [11]. به همین علت، در این تحقیقات به منظور تراکم را تایید کردند [11]. به همین علت، در این تحقیقات به منظور جبران خطای پیش بینی با توجه به خصوصیات سیستم، $\beta = \alpha$ در نظر ϕ_m با γ /۱/ β انجام شد که نمودارهای آنها در شکل ۲ و ϕ_m

قابل مشاهده است. بر اساس شکل ۲، مقدار ϕ_0 برای نمونههای مختلف برابر با $\% \wedge (\Phi_0(S1) = (F7)^{\phi} \circ (\Phi_0(B3) = F7)^{\phi} \circ (\Phi_0(B3) = \Phi^{-1})^{\phi}$ به دست آمد. همچنین مقادیر ϕ_m نیز برای سیستمهای مختلف از شکل ۳، برابر با $\% \wedge (\Phi_m(S1) = \Phi^{-1})^{\phi} \circ (\Phi^{-1})^{-1} = (B3)^{-1} \phi^{-1}$ شکل ۳، برابر با $\% \wedge (\Phi_m(S1) = \Phi^{-1})^{\phi} \circ (\Phi^{-1})^{-1} = (B3)^{-1} \phi^{-1}$ مقادیر ϕ_m استخراج شده و $\Phi_m(E1) = \Phi_m$ استخراج شد. با جایگزینی مقادیر ϕ_m استخراج شده و $\Phi_m(E1) = \Phi_m$ ($\Phi_m(B3) = \Phi^{-1})^{-1} = (B3)^{-1} \phi^{-1}$ محاسبه شد. ذرات کروی $\Phi^{-1} = (F^{-1})^{-1} = (F^{-1})^{-1} + (F^{-1})^{-1} + (F^{-1})^{-1} = (F^{-1})^{-1} + (F^{-1})^{-1} = (F^{-1})^{-1} + (F^{-1$

نهایتا براساس اطلاعات بدست آمده کسر حجمی بیشینه تراکم صطکاکی و غیر اصطکاکی نمونهها محاسبه و در جدول ۲ أورده شده



شکل ۲- برازش رابطه کریگر-دور تی با β=1.7، بر دادههای لزجت بهصورت خطی برای سیستمهای E1 ،B3 و S1 تقاطع نمودارها با محور φ-۷. φ(ا نشان میدهد.

R-Square	ϕ_0	ϕ_m	β	Name
•/٩٩٨	./011	•/٥	۱ / ۲	S ₁
•/٩٩۶	•/499	•/480	۱ / Y	E ₁
•/٩٩•	•/447	·/۴١٨	۲ / ۷	Ba

جدول ۲- مشخصات ابعادی ذرات ساخته شده



شکل ۳- برازش رابطه کریگر-دور تی با β=1.7، بر دادههای لزجت بهصورت خطی برای سیستمهای E1 ،B3 و S1 قاطع نمودارها با محور y=0، φm ،y=0 را نشان میدهد

همان طور که از نتایج پیداست، کسر حجمی بیشینه تراکم اصطکاکی و غیر اصطکاکی، برای سیستم ذرات کروی بیشتر از سایر شکلهاست. در مورد شکلهای غیرکروی نیـز ایـن مقـادیر بـا افـزایش نسبت منظر كاهش مى يابد. اين نتيجه، توسط تحقيقات پيشين نيز به خوبی تایید می شود که به دلیل بر همکنش های اصطکاکی و حرکات چرخشی متفاوت در شکلهای مختلف، ϕ_0 و ϕ_m برای آنها متفاوت است [۱۳۱۱] و [۱۴]. با توجه به مقادیر بهدستآمده ϕ_0 و ϕ_m برای شکلهای مختلف ذرات، منطقی است که ذرات قایقی به دلیل فاصله زياد بالاترين غلظت (٠/٣٧٣)، با كسر حجمي بيشينه فشردگي اصطکاکی (۰/۴۴۳)، رفتار غلیظ شوندگی برشی غیر پیوسته (DST) داشته باشد. در مورد سهمی گون های بیضوی نیز به دلیل نزدیکی بالاترین کسر حجمی (۰/۴۳۰)، به کسر حجمی بیشینه تراکم اصطکاکی آن (۰/۴۶۶)، مشاهده رفتار DST به دلیل برهمکنشهای اصطكاكي كافى بين ذرات و تشكيل زنجيرهاى انتقال دهنده نيرو كاملا قبل انتظار است. اما در سیستم حاوی ذرات کروی، با توجه به نزدیکی كسر حجمي غليظترين نمونه (٠/۴٩٩)، به كسر حجمي بيشينه تـراكم اصطکاکی آن (۰/۵۸۱)، رفتار DST مشاهده نمے شود. عـدم مشـاهده DST در ذرات کـروی را مــیتـوان ناشــی از قــدرت بــالای روغــن در ترکنندگی سطح ذرات و هندسه جریان دانست که میتواند مانع از گیر افتادن ذرات شود. به عبارت دیگر، روغن بر روی سطح تشکیل یک فيلم نازک میدهد که موجب لغزش ذرات میشود. همچنين روغن می تواند تماس های اصطکاکی بین ذرات را، تا حد قابل توجهی کاهش دهد [۱۵]

در ادامه، تغییرات لزجت بر حسب نرخ برشی، برای ذرات با شکلهای مختلف در درصدهای حجمی متفاوت، اندازه گیری شد. قابـل ذکر است در این تحقیق از سیال پایه سیلیکون با لزجت Pa.s استفاده شد که رفتار نیوتنی نشان میدهد که برای ارزیابی اثر شکل ذرات بر رفتار جریان و رئولوژی سوسپانسیونهای غلیظ ضروری است.

¹ Discontinuous Shear Thickening

از نکات قابل توجه که در مورد منحنی های جریان به چشم می خورد، حلقه بین منحنیها در حالت افزایشی و کاهشی است. همانطور که در شکل ۴ مشاهده میشود، مقدار مساحت حلقه پسماند برای دستگاههای مختلف، به روش انتگرال گیری به دست آمد. اختلاف مساحت زیـر نمودارهـای رفـت و برگشـت در بـازه تـنش ۰/۱ تـا ۱۰ پاسکال، بر اساس کسر حجمی نرمال شده برای هر سیستم بهعنوان مساحت حلقه پسماند محاسبه و گزارش شد (شکل ۴). مشاهده می شود که مقدار مساحت حلقه پسماند در تمام سیستمها با افزایش کسر حجمی ذرات، افزایش مییابد و در نزدیکی کسر حجمی بیشینه تراکم با شیب زیاد، سقوط می کند. همچنین مساحت این حلقه در سیستم سهمی گون های بیضوی بیشینه است و برای ذرات قایقی شکل به کمترین مقدار خود می سد. وجود حلقه پسماند در منحنیهای جریان، توسط بسیاری از تحقیقات به وابستگی سیستم به زمان اندازه گیری مربوط میشود. این پدیده که بهعنوان تیکسوتروپی شناخته میشود به وجود یک فاصله زمانی بین نـرخ بـرش و فروپاشـی ساختار ذرات اشاره می کند. در این پدیده در طول افزایش نرخ برش، فروپاشی ساختار از نظر زمانی از نرخ برش عقب میافتد که موجب افزایش لزجتهای گذرا نسبت به مقدار پایدار آنها می شود. در قسمت برگشت، بازسازی ساختار با کاهش نرخ برش به صورت پیوسته انجام می شود. بااین حال، ساختار دوباره از تنش جا می ماند و چون تنش در حال کاهش است لزجتها از آنچه در حالت پایا به دست خواهد آمد، کمتر می شود [۱۶] و [۱۷].



انتگرال گیری بر حسب کسر حجمی نرمال برای سیستمهای B3، E1 و S1.

مساحت حلق ب پسماند حاصل از تیکسوتروپی، با افزایش زمان اندازه گیری کاهش می یابد و با دادن زمان کافی به سیستم، می توان از بین رفتن حلق به پسماند و بازگشت پذیری منحنی های جریان را مشاهده نمود. در این کار، با افزایش زمان اندازه گیری از ۱۲۰ تا ۱۲۰۰ ثانیه به ازای هر دهه تنش، هیچ تغییر محسوسی در مساحت حلقه پسماند ملاحظه نشد؛ بنابراین، این فرضیه مطرح شد که سیستم به تاریخچه برش وابستگی داشته باشد.

بهمنظور بررسی بیشتر میکروساختار در حلقههای پسماند، نمونه با کسر حجمی نرمال ۹۰/۸۴ از شکلهای مختلف تهیه شد. نمونهها با

اعمال شرایط یکسان تحت آزمون چرخشی قـرار گرفتنـد کـه منحنـی جریان این نمونهها در شکل ۵ مشـاهده مـیشـود. بـرای هـر منحنـی جریان، در حالت افزایشی و کاهشی در نرخ بـرش ^{1-γ} وارمـون استارت آپ تعریف شد. نقطهای کـه در آن آزمـون اسـتارت آپ انجـام شده با خط چین در شکل مشخص شده است. ایـن نقطـه در ناحیـهای انتخاب شد که تمام نمودارهـا دارای حلقـه پسـماند باشـند. در آزمـون استارت آپ، پاسخ تنش به انرژی الاستیک مورد نیاز، برای تغییر شـکل ساختار نسبت داده مـیشود کـه دلیـل افـزایش تـنش قبـل از قلـه و معچنین یک مکانیسم رهایش انرژی اتلافی به خاطر فروپاشی سـاختار بعد از قله است که منجر به جریان یافتن ناشی از برش و ناهمسانگردی ساختار میشود [۱۸].



شکل ۵ -منحنیهای لزجت-نرخ برش برای هر سه سیستم E1 ،B3 و . S1کسر حجمی نرمال برای تمام نمونهها 0.84 \ است. خط چین، محل انجام آزمون استارت آپ برای تمام نمونهها را نشان میدهد.

نتایج آزمونهای استارت آپ در شکل ۶ قابل مشاهده است. قابل ذکر است نمودارهای آزمون استارت آپ با لزجت پایا هر سیستم نرمال شده است بدین معنا که تغییرات ویسکوزیته هر سیستم بر ویسکوزیته انتهایی که ثابت است تقسیم شده و بعنوان ویسکوزیته نرمال معرفی می شود.

نکته قابل توجه در این نمودارها هم پوشانی کامل قلههاست که شباهت بالای ساختار اولیه در منحنیهای رفت و برگشت در همه سیستمها را نشان میدهد. این موضوع بیانگر آن است که ایجاد حلقه پسماند و تفاوت بین منحنیهای افزایشی و کاهشی به دلیل وجود ساختارهای اولیه متفاوت نمیباشد. همچنین غیرتیکسوتروپیک بودن سیستم را بار دیگر تایید میکند. در شکل ۶ پس از شکست ساختار اولیه، دو رفتار متفاوت از نمودارهای افزایشی و کاهشی دیده میشود. ساختار ثانویه تشکیل شده که شامل خوشههایی از ذرات است، در حالت کاهشی برش (نمادهای باز) بهسرعت تشکیل میشوند؛ اما در خواهد بود و حدود ۱۰۰ ثانیه به طول میانجامد. دلیل سرعت بالای ایجاد ساختار ثانویه و رسیدن به حالت پایا در زمانهای کم برای حالت کاهشی برش، این است که هنگامیکه سیستم از نرخ برشهای بالای ناحیه غلیظ شوندگی برشی به سرعتهای پایینتر منتقل میشود، خوشههای ذرات تشکیل شدهاند و سیستم در ساختار ثانویه خور قرار ۵- مراجع

- Mueller S., Llewellin E. W., and Mader H. M., The rheology of suspensions of solid particles, Proc. R. Soc. A., Vol 466, pp 1201–1228, 2010.
- [2] Guazzelli E. and Pouliquen O., Rheology of dense granular suspensions, Fluid Mech anics, Vol. 852, pp. 1– 73, 2018.
- [3] Stickel J. J. and Powell R. L., Fluid mechanics and rheology of dense suspensions, Annu. Rev. Fluid Mech., Vol. 37, pp. 129–149, 2005.
- [4] jan Mewis N. J. W., Colloidal Suspension Rheology, First. Cambridge University, 2012.
- [5] Bergström L., Rheology of concentrated suspensions, Surf. Colloid Chem. Adv. Ceram. Process., Vol. 15, No. 1971, pp. 193–244, 2017.
- [6] Dbouk T., Rheology of concentrated suspensions and shear-induced migration. Université Nice Sophia Antipolis, 2011.
- [7] Chang C. and Powell R. L., Hydrodynamic transport properties of concentrated suspensions, AIChE J., Vol. 48, No. 11, pp. 2475–2480, 2002.
- [8] An Zh., Zhang Y., Li Q., Wang H., Guo Zh., Zhu J., Effect of Particle Shape on the Apparent Viscosity of Liquid-solid Suspensions, Powder Technology Vol. 328, No 1, pp 199-206, 2018.
- [9] Maurath J., Bitsch B., Schwegler Y., Willenbacher N., Influence of particle shape on the rheological behavior of three-phase non-brownian suspensions, Colloids and Surfaces A: Physicochem. Eng. Aspects Vol.497, pp 316–326, 2016.
- [10] Krieger I. M. and Dougherty T. J., A Mechanism for NonNewtonian Flow in Suspensions of Rigid Spheres, Transactions Of The Society of Rheology, Vol.3, pp 137-152, 2013.
- [11] Pal R., New Generalized Viscosity Model for Non-Colloidal Suspensions and Emulsions, Fluids, Vol 5, No3, pp 150-149, 2020.
- [12] Crassous J. J., Casal-Dujat L., Medebach M., Obiols-Rabasa M., Vincent R., Structure and Dynamics of Soft Repulsive Colloidal Suspensions in the Vicinity of the Glass Transition, Langmuir, Vol 29, No 33, pp 10346– 10359, 2013.
- [13] James N. M., Xue H., Goyal M., and Jaeger H. M., Controlling Shear Jamming in Dense Suspensions via the Particle Aspect Ratio, Soft Matter, Vol 15 No 18, pp 3649-3654. 2019
- [14] Brown E. and Jaeger H. M., The role of dilation and confining stresses in shear thickening of dense suspensions, J. Rheology vol. 56, pp 875-890, 2012.
- [15] Chu C. E., Groman J. A., Sieber H. L. and Miller J. G., Hysteresis and Lubrication in Shear Thickening of Cornstarch Suspensions, Soft Condensed Matter, Vol. 1, pp. 1–13, 2018.
- [16] Srinivasan S., Van Den Akker H. E. A., and Shardt O., Shear thickening and history-dependent rheology of monodisperse suspensions with finite inertia via an immersed boundary lattice Boltzmann method, International Journal of Multiphase Flow, Vol. 125, pp 1-12, 2020.
- [17] Farhadi S. and Behringer R. P., Dynamics of sheared ellipses and circular disks: Effects of particle shape, Phys. Rev. Lett., Vol. 112, No. 14, pp. 1–5, 2014.
- [18] Moghimi E. and Petekidis G., Mechanisms of two-step yielding in attractive colloidal glasses, J. Rheol., Vol. 64, No. 5, pp. 1209–1225, 2020.

دارد، اما هنگامی که سیستم از نرخ برشی کم به زیاد در حال حرکت است و به خاطر نرخ برش پایین و کم بودن نیروهای هیدرودینامیک در سیستم، تشکیل خوشهها زمان بر خواهد بود و حدود ۱۰۰ ثانیه طول می کشد تا ساختار به حالت پایا برسد. همان طور که مشاهده می شود، قله منحنی های مربوط به ذرات کروی و سهمی گون های بیضوی ارتفاع برابری دارند که نشان دهنده ساختارهای استاتیکی یکسان برای شکلهای دارای نسبت منظر مشابه است. از طرف دیگر سیستم ذرات قایقی ارتفاع قله بالاتری را نشان می دهد که بیانگر قدرت بالاتر ساختار تشکیل شده توسط این ذرات است [۱۸].



شکل ۶- منحنیهای لزجت-زمان آزمون استارت آپ برای سیستمهای 81 و E1

۴- نتیجهگیری

در این تحقیق، مقایسهای بین رفتار رئولوژیکی سوسیانسیونهای ذرات با شکل آهای کروی، سهمی گون بیضوی و قایقی انجام گرفت کسر حجمی ذرات نیز از رژیم نیمه غلیظ (۰/۲۷) تا غلیظ (۰/۵۰) بصورت متغیر در نظر گرفته شد. علاوه بر آنکه رفتار غلیظ شوندگی برشی در تمام نمونهها مشاهده شد، در بین ذرات، سهمی گون های بیضوی به دلیل قابلیت چرخش کمتر و برهمکنشهای اصطکاکی قوىتر، رفتار DST از خود نشان دادند. كسر حجمى بيشينه تراكم اصطکاکی و غیر اصطکاکی برای ذرات با هر سه شکل به دست آمد که این مقادیر برای ذرات کروی ۰/۵۱۸ بوده و با افزایش نسبت منظر در شكلهاى غير كروى كاهش مىيابد. مساحت حلقه پسماند مشاهده شده در منحنیهای جریان به روش انتگرال گیری برای تمام غلظتها به دست آمد که برای سهمی گون بیضوی به دلیل قابلیت چرخش کم، بیشترین (حدودا ۸/۰) و برای ذرات قایقی به دلیل چرخش بالای ذرات، کمترین (۰/۰۵) مقدار است. همچنین اثر زمان بر حلقه پسماند بررسی شد که با افزایش زمان اندازه گیری تغییری در مساحت حلقه یسماند مشاهده نشد.

نتایج نشان داد بطورکلی تفاوت در شکل ذرات میتواند منجر به تفاوت در قابلیت چرخش و برهمکنشهای اصطکاکی بین آنها شود. این دو عامل مهم، موجب اختلاف در قدرت رفتار غلیظ شوندگی برشی، کسر حجمی بیشینه تراکم، مساحت حلقه پسماند و همچنین ساختارهای استاتیک و دینامیک موجود میشود.