

بررسی رفتار رئولوژی دوغابهای معدنی غلیظ شده و همگن

بهنام پیروز^۱، محمدرضا کاویانپور^{۲*}

۱- دانشجوی دوره دکترای مهندسی آب- هیدرولیک، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی خواجه نصیر الدین طوسی

۲- استادیار دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی خواجه نصیر الدین طوسی

* تهران، صندوق پستی ۴۴۱۶-۱۵۸۷۵

چکیده- در این مقاله، که بخشی از پروژه تحقیقاتی انجام شده در خصوص دوغابها و پسابهای معدنی است، به بررسی رفتار رئولوژی دوغابهای غلیظ شده همگن پرداخته می‌شود. شناخت کامل رفتار رئولوژی سیال، نقش اساسی و کلیدی در بررسی حرکت سیال در جریانهای روباز یا تحت فشار دارد. پارامترهای اساسی جریان، نظیر عدد فرود و عدد رینولدز جریان، بیانگر خصوصیات و ویژگیهای هیدرولیکی جریان سیال می‌باشند که به‌طور مستقیم یا غیرمستقیم تابعی از رئولوژی سیال بوده و بدون در دست داشتن رفتار رئولوژی سیال، محاسبه این پارامترها و تحلیل جریان میسر نیست. به منظور بررسی رفتار رئولوژی این گونه سیالات، نمونه‌های متعددی از دوغابهای حاصل از فرآیند معدنکاری در معادن عمده مس کشور، شامل معدن مس سرچشمه، معدن مس سونگون و معدن مس میدوک و همچنین یک معدن طلا در شهر Peak ایالت NSW کشور استرالیا با غلظتهای مختلف تهیه شده که رفتار رئولوژی آنها با استفاده از رنومتر در آزمایشگاه به‌دست آمده و پارامترهای تأثیرگذار بر رفتار رئولوژی این دوغابها بررسی شده است. غلظتهای در نظر گرفته شده برای دوغابها با توجه به محدوده معمول غلظت دوغاب در معادن، بین ۴۵٪ تا ۷۰٪ (درصد وزنی جامد)، انتخاب شده است. ذرات جامد موجود در این دوغابها بر حسب نوع خردایش (Crushing) به‌کار رفته در خط تولید واحد معدنی دارای قطر متوسط (D_{50}) $11\mu\text{m}$ تا $47\mu\text{m}$ می‌باشند که منحنی دانه‌بندی این ذرات برای هر نمونه توسط دستگاه اندازه‌گیری قطر (Lazer Sizer) به‌دست آمده است. تمامی آزمایشها در آزمایشگاه رئولوژی و فرآوری مواد دانشگاه (RMIT) واقع در شهر ملبورن استرالیا انجام شده است. نتایج حاصل در تمامی موارد مؤید رفتار غیر نیوتنی این دوغابها در برابر اعمال تنش برشی است. مدلهای مختلف ارائه شده از طرف محققان برای رفتار غیرنیوتنی سیالات بررسی شده و منطبق‌ترین مدل با رفتار غیر نیوتنی دوغابهای معدنی تعیین شده است.

کلید واژگان: رئولوژی، دوغاب معدنی، سیال غیر نیوتنی، لزجت پلاستیک، تنش برشی جاری شدن.

۱- مقدمه

(در مهندسی رسوب) است. در مهندسی رسوب نیز بجز در موارد خاص نظیر جریانهای غلیظ رسوبات چسبیده^۱، معمولاً غلظت مواد جامد معلق در آب به قدری کم است که براحتی از تأثیر مواد جامد بر خصوصیات بنیادی رفتار

در مهندسی هیدرولیک معمولاً با سیالات تک‌فاز نیوتنی و در رشته عمران عموماً با آب سروکار داریم و در مواردی که سخن از سیالات دوفاز به میان می‌آید، فاز دوم، هوا (در مباحث هوادهی جریان) یا ذرات جامد معلق در آب

باشند، جریان همگن سیال دو فازی به وقوع می‌پیوندد. دوغاب حاصل از کارخانجات کانه‌آرایی^۳ و تغلیظ سنگ معدن که موضوع این تحقیق است، جزو این نوع دوغابها به حساب می‌آیند. در چنین دوغابهایی ذرات جامد بسیار ریز بوده و درصد وزنی جامد در دوغاب، بالا و حدود ۵۰٪ تا ۶۰٪ است. هنگامی که درصد جامد در دوغاب بالا باشد (معمولاً بالای ۴۰٪) لزجت سیال افزایش یافته و سیال رفتار غیرنیوتنی از خود نشان می‌دهد. محدوده دانه‌بندی ذرات جامد برای به‌وجود آوردن سیال همگن معمولاً بین ۴۰ تا ۷۰ میکرون است که به چگالی ذرات جامد بستگی دارد. چنین سیالاتی اگرچه از دو فاز مجزا تشکیل شده‌اند، اما رفتار سیالات تک‌فاز را نشان می‌دهند. انواع جریان سیالات را می‌توان مطابق نمودار شکل ۱ تقسیم‌بندی کرد. مسیری که بر روی نمودار با پیکانهای پررنگ‌تر مشخص شده، بیانگر نوع رفتار سیالاتی است که در این تحقیق به آنها پرداخته شده است.

Abulnaga و همچنین Sofra and Boger در سال ۲۰۰۲ در جمع‌بندی مجموعه کارهای تحقیقاتی گذشته (Cross 1965, Heywood 1991, Metzner and Whitlock 1958, Wilson 1991) در خصوص رفتار رئولوژی دوغابها، مدل‌های مختلف ارائه شده برای دوغابهای صنعتی (اعم از همگن و ناهمگن) را به دو دسته سیالات غیر نیوتنی مستقل از زمان^۴ و سیالات غیرنیوتنی وابسته به زمان^۵ تقسیم کرده‌اند.

سیالات غیرنیوتنی مستقل از زمان، که بخش عمده‌ای از دوغابهای صنعتی از این دسته‌اند، برای شروع به حرکت و جاری شدن به اعمال مقدار مشخصی تنش نیاز دارند. از میان این دوغابها می‌توان به مخلوط بتن اشاره کرد که تا زاویه شوت تخلیه‌کننده آن از مقدار مشخصی بیشتر نشود، جاری نخواهد شد. این سیالات تنش تسلیم^۶ مشخصی دارند که برای جاری شدن باید بر آن غلبه شود.

سیال صرفنظر می‌شود یا با در نظر گرفتن ضرابی اصلاحی، رفتار رئولوژی آب برای حرکت سیال و انتقال رسوبات تعمیم داده می‌شود (Simons, Senturk 1992). دوغابهای معدنی غلیظ شده، عموماً مخلوط همگنی از فاز مایع (آب) و فاز جامد (سنگدانه‌های بسیار ریز خردایش شده^۱ - عمدتاً ذرات کوچکتر از ۷۵ میکرون) می‌باشند. چنین دوغابهایی که عموماً با هدف صرفه‌جویی در مصرف آب تا حد امکان غلیظ شده‌اند، کاربرد بسیار وسیعی در صنایع معدنی بویژه در کارخانه‌های پرعیارکنی^۲ دارند. از این دوغابها عمدتاً به منظور حمل و انتقال مواد جامد سنگ معدن از معدن به واحد تولیدی، انتقال و گردش مواد جامد در خط تولید کارخانه و همچنین انتقال پسماندهای جامد به محل ذخیره و انباشت توسط کانالهای روباز یا خطوط لوله استفاده می‌شود.

کارخانه‌های پرعیارکنی معمولاً (بسته به ظرفیت معدن) میلیون‌ها تن (متر مکعب) از این دوغابها را به عنوان پساب تولید می‌کنند. انباشت و ذخیره‌سازی، ته‌نشینی و کنترل آثار زیست محیطی این دوغابها همواره از مشکلات و مسائل اساسی معادن و پروژه‌های معدنی است. برای مثال فقط در کشور آفریقای جنوبی در هر سال ۲۵۰ میلیون تن از این باطله‌های معدنی تولید می‌شود، به طوری که تا سال ۱۹۹۲ سطحی معادل ۱۵۰ کیلومتر مربع در این کشور توسط ۵۰۰۰ میلیون تن از باطله‌های معدنی پوشیده شده است. فقط در سال ۱۹۷۵ در کشور آمریکا، صنایع معدنی بیش از ۱۸۰۰ میلیون تن مواد زائد معدنی تولید کرده‌اند (Blight 1994). در ایران تا سال ۲۰۱۰ میلادی، ظرفیت تولید زباله‌های معدنی فقط در معادن مس کشور به بیش از ۵۰ میلیون تن (جامد) در سال خواهد رسید.

در دوغابهای با غلظت بالا، هنگامی که ذرات جامد بسیار ریز بوده و به‌طور یکنواخت در میان فاز مایع پخش شده

3. Mineral Processing

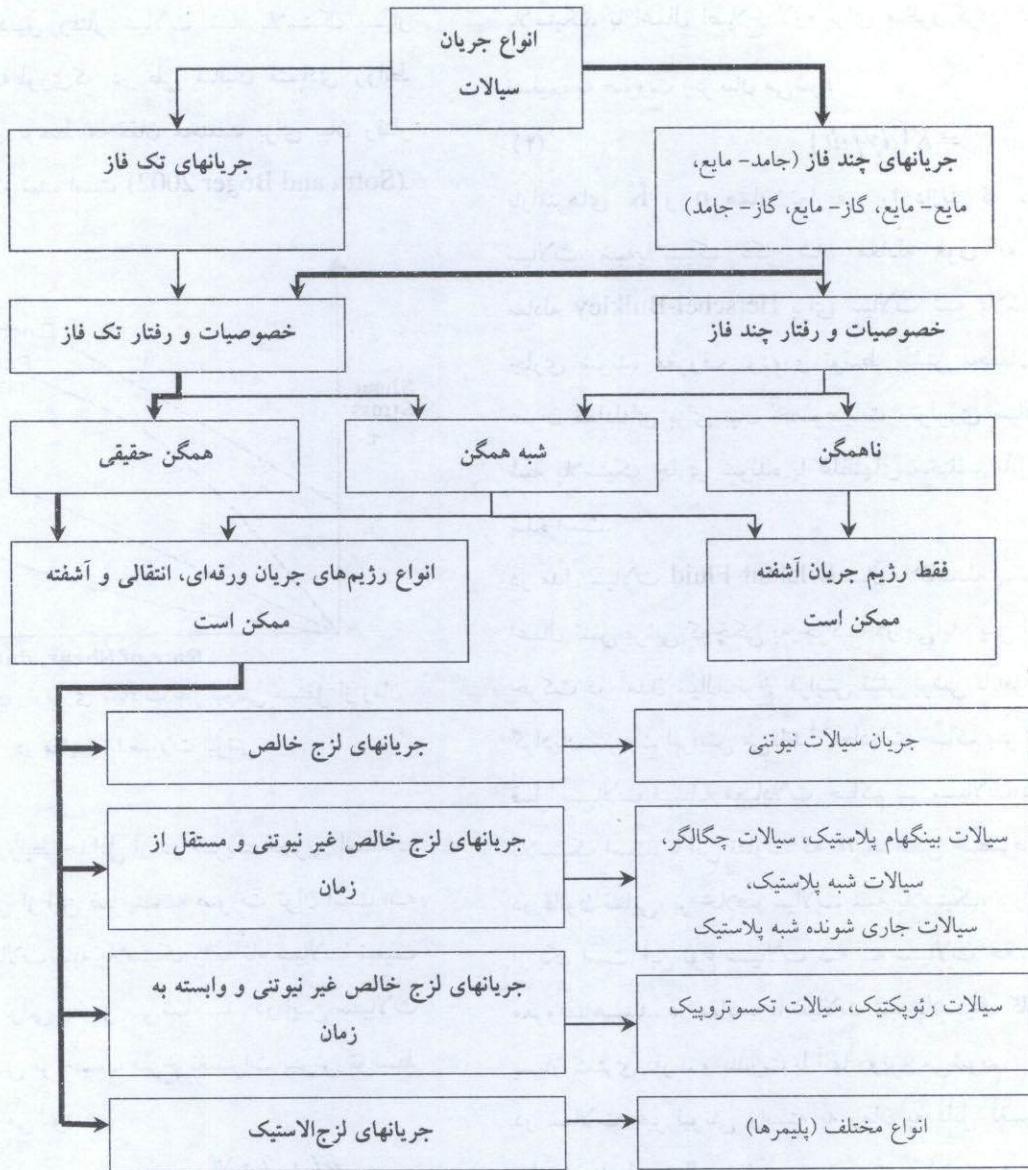
4. Time-Independent Non-Newtonian Mixtures

5. Time-Dependent Non-Newtonian Mixtures

6. Yield Stress

1. Crushed

2. Concentrator



شکل ۱ تقسیم بندی انواع جریان سیالات (Govier and Aziz 1972)

نرخ برش خطی بوده و مطابق رابطه زیر تعریف می‌شود:

$$\tau_w - \tau_0 = \eta \frac{dy}{dt} \quad (2)$$

که در آن τ_w تنش برشی جدار، τ_0 تنش جاری شدن و η لزجت غیر نیوتنی یا ضریب صلبیت است. مدل سیالات شبه پلاستیک با دو مشخصه شناخته می‌شوند: سیال بلافاصله پس از اعمال تنش برشی کوچکی به حرکت در می‌آید و پس از به حرکت در آمدن، نرخ افزایش تنش برشی با افزایش گردیدن سرعت کاهش

این سیالات به انواع مختلفی مانند Bingham Plastics، Dilatant، Yield Pseudoplastics، Pseudoplastics و Fluid تقسیم می‌شوند. رابطه بین تنش برشی جدار^۱ و نرخ برش^۲ برای این سیالات مشابه شکل ۲ است.

در مدل Bingham Plastics پیش از آغاز حرکت لازم است بر تنش برشی اولیه‌ای معادل τ_0 غلبه شود تا سیال به حرکت در آید. از آن پس تغییرات تنش برشی نسبت به

1. Wall Shear Stress
2. Shear Rate

پلاستیک، با اعمال اصلاح لازم برای منظور کردن تنش تسلیم، به صورت زیر بیان می‌شود:

$$\tau_w - \tau_0 = K(d\gamma/dt)^n \quad (4)$$

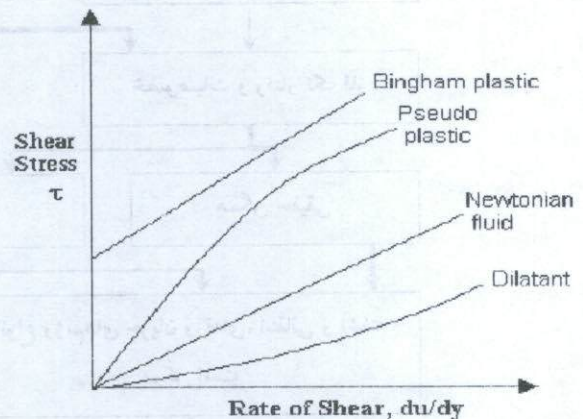
پارامترهای K و n همان تعاریفی را دارند که برای سیالات شبه‌پلاستیک ذکر شد. معادله فوق به نام معادله Herschel-Bulkley برای سیالات شبه‌پلاستیک جاری شونده معروف بوده و توسط بیشتر محققان به عنوان معادله‌ای برای بیان خصوصیات رئولوژی سیالات شبه‌پلاستیک جاری شونده با غلظت‌های مختلف پذیرفته شده است.

در مدل سیالات Dilatant Fluid سیال بلافاصله پس از اعمال تنش برشی کوچکی به حرکت در می‌آید. پس از به حرکت در آمدن سیال، نرخ افزایش تنش برشی با افزایش گرادیان سرعت افزایش می‌یابد.⁴ معادلات حاکم بر این قبیل سیالات مشابه معادلات حاکم بر سیالات شبه‌پلاستیک است، با این تفاوت که n شاخص خصوصیت در قانون نمایی، بر خلاف سیالات شبه‌پلاستیک، بزرگتر از یک است. این نوع سیالات که به سیالات چگالگر معروف هستند، در مقایسه با سیالات شبه‌پلاستیک کاربرد بسیار کمتری دارند و بندرت با آنها روبرو می‌شویم.

در سیالات غیر نیوتنی وابسته به زمان به دلیل تغییر در ساختار داخلی سیال و تغییر جهت‌گیری ذرات در هر نرخ برش معین، مقدار تنش برشی سیال وابسته به زمان است، تا ذرات جامد فرصت بیابند تا با جریان هم‌جهت شوند. به بیان دیگر مدتی طول می‌کشد تا تنش برشی پدید آمده در سیال، خود را با مقدار تغییر تنش برشی تطبیق دهد.

در سال ۱۹۷۶ Hansford و همکاران به بررسی رفتار رئولوژی دوغابهای معادن طلای آفریقای جنوبی و تأثیر غلظت، pH و درجه حرارت بر رفتار این نوع دوغابها پرداختند. آنها اعلام کرده‌اند که بین لزجت دوغاب و درصد جامد آن رابطه‌ای نمایی برقرار است و تمامی

می‌یابد.¹ بیان دقیق رفتار سیالات شبه‌پلاستیک بسیار دشوار است. به طوری که در طی سالیان متمادی روابط تجربی متعددی توسط محققان مختلف برای بیان رفتار این سیالات ارائه شده است (Sofra and Boger 2002).



شکل ۲ نمودار رئولوژی سیالات غیر نیوتنی مستقل از زمان در مقایسه با سیالات نیوتنی

در تمامی این روابط حداقل از دو ضریب تجربی استفاده می‌شود که یکی از این ضرایب به صورت توان است. به همین علت سیالات شبه‌پلاستیک را به نام سیالات تبعیت کننده از قانون توانی^۲ نیز می‌شناسند. در این سیالات رابطه تنش برشی بر حسب نرخ تغییرات برش توسط رابطه ذیل بیان می‌شود:

$$\tau_w = K(d\gamma/dt)^n \quad (3)$$

که در آن K بر حسب $Pa.s^n$ ضریب انطباق^۳ در قانون نمایی و n شاخص خصوصیت در قانون نمایی است.

در مدل Yield Pseudoplastic Fluid برای شروع حرکت لازم است بر مقدار مشخصی از تنش برشی (تنش تسلیم) در شرایطی که نرخ تغییرات کرنش برشی صفر است، غلبه شود و پس از آن نرخ افزایش تنش برشی با افزایش گرادیان سرعت کاهش می‌یابد. رابطه بین تنش برشی و نرخ برش در این سیالات مشابه سیالات شبه

1. Shear Thinning
2. Power-Law Fluid
3. Consistency

4. Shear Thickening

کرنش برشی در این دوغابها خطی نبوده و رفتار رئولوژی آنها بسیار پیچیده تر است. ایشان نتیجه گیری کرده اند که هرچه میزان آب موجود در دوغاب بیشتر شود، مقدار تنش تسلیم و لزجت دوغاب کمتر می شود. ^۱ *Sofra and Boger* در سال ۲۰۰۰ ضمن بررسی رفتار رئولوژی دوغابهای معادن آلومینیوم، دوغاب تیتانیم^۳ و دوغاب لاپونیت^۴ مدل‌های مختلفی را برای رفتار این دوغابها و همچنین عوامل تأثیرگذار بر این رفتار ارائه کردند. آنان رفتار دوغابهای آلومینیوم را منطبق بر مدل شبه پلاستیک جاری شونده و رفتار دوغابهای تیتانیم و لاپونیت را نیز از نوع رقیق شونده با برش گزارش کرده اند. با این تفاوت که رفتار دوغاب تیتانیم مستقل از زمان بوده و رفتار دوغاب لاپونیت به شدت وابسته به زمان است، به طوری که تنش برشی سیال با گذشت زمان و برای نرخ ثابت کرنش برشی کاهش می یابد. در تمامی این دوغابها با افزایش غلظت دوغاب، تنش تسلیم سیال به صورت نمایی افزایش می یابد.

تحقیقات *Abulnaga* و همچنین *Sofra and Boger* در سال ۲۰۰۲ نیز که در مقدمه به آنها اشاره شد، جزو کارهای تحقیقاتی جدیدی است که در سالهای اخیر در خصوص دوغابهای صنعتی انجام شده است.

نکته قابل توجه در خصوص کارهای تحقیقاتی انجام شده در گذشته این است که اگرچه تأثیر عوامل مختلف نظیر غلظت دوغاب و اندازه ذرات بر رفتار رئولوژی دوغابها هر از چند گاهی بررسی شده، اما اولاً بسیاری از این تحقیقات مربوط به دوغابهای رقیق (ناهمگن) بوده و اصولاً دوغابهای غلیظ شده و همگن - به دلیل اینکه غلیظ کننده های دوغاب تا دهه اخیر از فناوری لازم جهت غلیظ نمودن دوغابهای معدنی برخوردار نبوده اند - چندان مورد توجه قرار نگرفته اند. ثانیاً نتایج اعلام شده توسط محققان مختلف در خصوص رفتار این قبیل دوغابها، ضد

دوغابهای مورد آزمایش در محدوده غلظتهای ۱۷٪ تا ۴۳٪ (حجمی) رفتار رقیق شونده با برش^۱ از خود نشان می دهند. نتایج مشابهی نیز در این خصوص توسط *Marsden (1962)* و *Beazley (1972)* به دست آمده است. *Hansford* و همکاران همچنین اعلام کرده اند که اگرچه رابطه مستقیمی بین قطر ذرات جامد موجود در دوغاب و لزجت دوغاب قابل تشخیص است، اما این یک رابطه ساده نبوده و بسیار پیچیده است، به طوری که محققان مختلف، نتایج متفاوت و متضادی را در این زمینه گزارش کرده اند (*Levy 1975*).

Beazley در سال ۱۹۷۲ رفتار غلیظ شونده با برش را برای دوغابهای با غلظت بیش از ۴۶٪ (حجمی) اعلام کرده است. این در حالی است که *Clarke (1967)* رفتار غلیظ شونده با برش را برای تمام غلظتهای مختلف دوغاب قابل تعمیم می داند.

در سال ۱۹۷۸ *Boger* و همکاران به بررسی خواص رئولوژی دوغابهای حاصل از معادن آلومینیوم^۲ و رفتار این دوغابها در حین حرکت پرداخته اند. آنها مدل شبه پلاستیک یا رفتار رقیق شونده با برش را برای این دوغابها تا غلظتهای ۲۶٪ (وزنی) پیشنهاد کرده اند.

Blight and Bentel در سال ۱۹۸۳ و *Blight* در ۱۹۸۸ و ۱۹۹۴ ارتباط بین رفتار رئولوژی دوغابهای حاصل از معادن الماس و پلاتین و مقدار آب موجود در دوغاب را بررسی کردند. ایشان تأکید کرده اند که آگاهی کامل از رفتار رئولوژی دوغابها و عوامل تأثیرگذار بر لزجت دوغاب، نقش اساسی و مهمی در طراحی خطوط لوله و کانالهای روباز برای انتقال دوغابهای معدنی و همچنین پیش بینی و برآورد گنجایش مخازن انباشت باطله های معدنی دارد. ایشان همچنین عنوان کرده اند که اگرچه رفتار رئولوژی دوغابهای مورد آزمایش را می توان با استفاده از مدل خطی بینگهام تقریب زد، اما تغییرات تنش برشی و

3. Titanium Dioxide
4. Laponite

1. Shear Thinning
2. Red Mud

محدوده وسیعی از تغییرات کانی‌شناسی، غلظت و دانه‌بندی را شامل می‌شوند. به‌منظور بررسی تاثیر مینرالوژی کانی بر رفتار رئولوژی دوغاب، دو نمونه مختلف از دو نوع سنگ معدن Hypogene و Supergene از معدن سونگون انتخاب شده است. نمونه Supergene مربوط به بخش فوقانی معدن است که معمولاً هوازده و دارای مواد ریزدانه چسبنده (رس) بیشتری است. تاثیر دانه‌بندی ذرات جامد دوغاب بر رفتار رئولوژی آنها نیز با انتخاب دو نوع دانه‌بندی مختلف برای هر یک از نمونه‌های معدن سونگون، بررسی شده است. تمامی آزمایشهای رئولوژی و دانه‌بندی در مرکز رئولوژی و فراوری مواد انستیتو تکنولوژی سلطنتی ملبورن استرالیا (RMIT) انجام شده است.

برای آزمایشهای رئولوژی دوغابها از دستگاه رئومتر استوانه دوار^۱ مدل Contraves Rhomat 155 استفاده شده و منحنی دانه‌بندی هر نمونه از دوغاب توسط دستگاه اندازه‌گیری قطر تعیین شده است. منحنی دانه‌بندی نمونه‌ها در شکل ۳ ملاحظه می‌شود. رئوگرامهای حاصل از آزمایشهای رئولوژی برای هر یک از نمونه‌ها در شکل‌های ۴ تا ۱۰ آورده شده است.

با استفاده از رئوگرامهای حاصل، تنش برشی تسلیم سیال (تنش برشی که پس از آن اولین تغییر شکل‌های برشی در سیال ظاهر می‌شود) و همچنین لزجت پلاستیک سیال- که در واقع همان شیب بخش خطی رئوگرامها (با فرض رفتار خطی بینگهام در تغییر شکل‌های بزرگ) است- به‌دست آمده و در جدول ۱ درج شده است.

همانطور که در شکل‌های ۵ تا ۱۰ ملاحظه می‌شود، شکل کلی تمامی رئوگرامها (حتی در غلظتهای بالای دوغاب) به‌صورت یک تنش برشی اولیه برای جاری شدن سیال و سپس ادامه یافتن رئوگرام به صورت سهمی است که بیانگر تبعیت رفتار این دوغابها از مدل Herschel-Buckley برای سیالات شبه پلاستیک جاری

و نقیض و گاهی کاملاً متضاد است، به‌طوری‌که برای مثال (1972) Beazley و (1967) Clarke رفتار غلیظ‌شونده با برش را برای این دوغابها اعلام کرده‌اند در حالی که Hansford و همکاران در سال ۱۹۷۶ و (1983) Blight and Bentel رفتار رقیق‌شونده با برش را برای تمام غلظتهای مختلف دوغاب قابل‌تعمیم می‌دانند. بنابر دلایل ذکر شده، رفتار رئولوژی دوغابهای غلیظ شده و نقش عوامل تأثیرگذار بر رفتار این دوغابها، بحث نسبتاً جدیدی محسوب می‌شود و تحقیقات در این زمینه در سراسر دنیا ادامه دارد. در این تحقیق با توجه به کمبود اطلاعات در باره رفتار دوغابهای غلیظ شده و همچنین با در نظر داشتن اختلاف نظرهای موجود بین نتایج حاصل از کارهای انجام شده تا کنون، به بررسی جامع رفتار دوغابهای غلیظ شده حاصل از فراوری مس پرداخته شده است، به‌طوری‌که محدوده وسیعی از غلظت، دانه‌بندی و نوع کانی و تأثیر آنها بر رفتار رئولوژی دوغابها مد نظر قرار گرفته است. تحقیقی از این دست در نوع خود کم‌نظیر بوده و نتایج حاصل می‌تواند اطلاعات بسیار مفیدی را در اختیار طراحان سیستمهای انتقال دوغابهای صنعتی قرار دهد.

۲- آزمایشهای انجام شده و نتایج

به‌منظور بررسی رفتار رئولوژی دوغابهای معدنی، ۳۴ نمونه مختلف از دوغابهای حاصل از سه معدن عمده مس (معدن سرچشمه، معدن میدوک و معدن سونگون) و همچنین یک معدن طلا در ایالت NSW استرالیا به شرح جدول ۱ تهیه شد. معادن مس و طلا از نظر کانی‌شناسی بسیار شبیه هستند، به‌طوری‌که تقریباً در تمامی معادن طلا، مس نیز استحصال می‌شود و در بسیاری از معادن مس (نظیر معدن مس سرچشمه) طلا نیز به عنوان یک محصول فرعی استحصال می‌شود. انتخاب نمونه دوغاب معدن طلای کشور استرالیا نیز به همین علت انجام شده است. همانطور که ملاحظه می‌شود، نمونه‌های تهیه شده،

1. Bob and Cup Rheometer

شونده، البته در تغییر شکلهای (نرخ کرنشهای) بزرگ (بالای $100s^{-1}$) رفتار این دوغابها (در تمام غلظتهای دوغاب) بخوبی با مدل خطی پلاستیک بینگهام قابل تخمین است. این رویه حتی در غلظتهای بالای دوغاب (بالای 1.65) نیز مشاهده می شود به طوری که تا نرخ برش حدود $100s^{-1}$ تغییرات تنش برشی در تمامی دوغابهای مورد آزمایش به شکل سهمی بوده و رفتار دوغاب بر مدل پلاستیک بینگهام منطبق نیست. این موضوع در شکل ۱۱ که تصویر بزرگنمایی شده بخش ابتدایی شکل ۵ است، بخوبی مشخص است. همانطور که

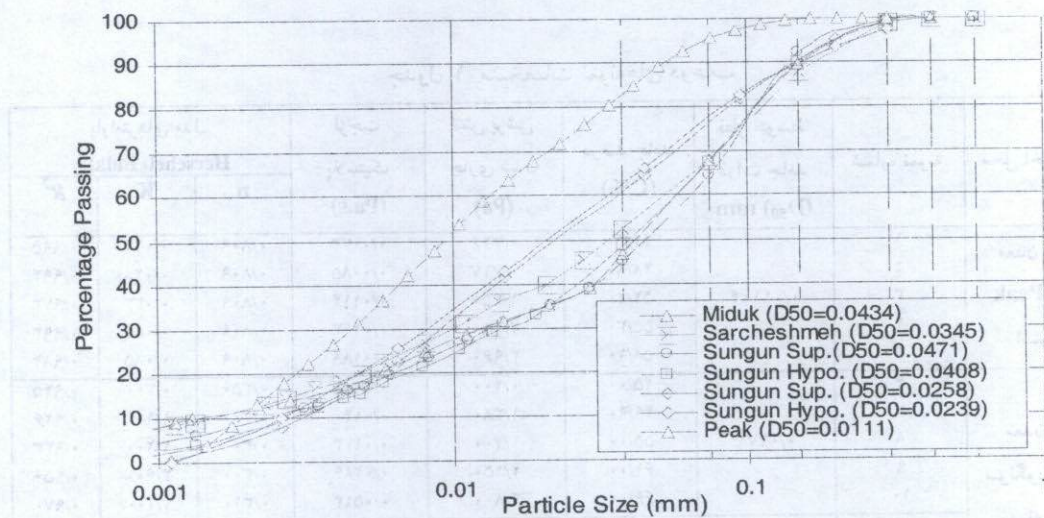
ملاحظه می شود رفتار دوغابها حتی در غلظتهای بالای 1.65 به شکل سهمی است. همچنین، همانطور که ملاحظه می شود بر خلاف آنچه Beazley (1978) و Clarke (1967) عنوان کرده اند رفتار غلیظ شونده با برش برای هیچ یک از دوغابهای مورد آزمایش ملاحظه نمی شود. به عنوان نمونه برآزش مدل Herschel-Buckley برای رئوگرامهای مربوط به دوغاب معدن طلای Peak در شکل ۴ مشاهده می شود. پارامترهای این مدل برای غلظتهای مختلف دوغابها در جدول ۱ آورده شده است.

جدول ۱ مشخصات نمونه های دوغاب

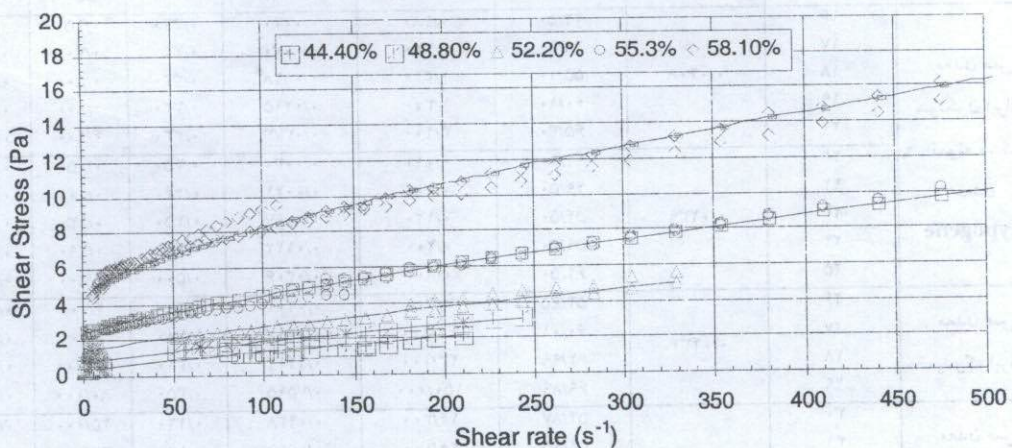
محل اخذ نمونه	شماره نمونه	قطر متوسط ذرات جامد (D_{50}) mm	درصد جامد (C%)	تنش برشی جاری شدن (Pa)	لزجت پلاستیک (Pa.s)	پارامترهای مدل Herschel- Bulkley		
						n	K	R^2
معدن طلای Peak کشور استرالیا	۱	۰/۰۱۱۰۴	۴۴/۴۰	۰/۳۲۶	۰/۰۰۷۲	۰/۸۰۹	۰/۰۲۴	۰/۹۹۵
	۲		۴۸/۸۰	۰/۷۲۷	۰/۰۰۸۵	۰/۸۰۹	۰/۰۲۸	۰/۹۹۴
	۳		۵۲/۲۰	۱/۳۵۰	۰/۰۱۱۴	۰/۸۰۹	۰/۰۳۳	۰/۹۷۳
	۴		۵۵/۳۰	۲/۳۸۰	۰/۰۱۶۳	۰/۸۰۹	۰/۰۵۰	۰/۹۹۳
	۵		۵۸/۱۰	۳/۹۶۰	۰/۰۱۸۸	۰/۸۰۹	۰/۰۸۵	۰/۹۸۴
معدن مس سونگون ایران- نمونه سنگ معدن Supergene	۶	۰/۰۴۷۱	۴۵/۰۰	۰/۴۰۰	۰/۰۱۰۵	۰/۳۵۰	۰/۳۰۰	۰/۹۴۵
	۷		۴۹/۹۰	۱/۳۸۰	۰/۰۱۴۰	۰/۳۰۰	۱/۱۰۰	۰/۹۲۶
	۸		۵۵/۰۰	۱/۴۰۰	۰/۰۱۷۳	۰/۳۰۰	۲/۲۰۰	۰/۹۳۳
	۹		۶۱/۰۰	۲/۱۵۰	۰/۰۲۸۶	۰/۳۰۰	۳/۶۰۰	۰/۹۵۶
	۱۰		۶۶/۰۰	۴/۸۰۰	۰/۰۵۱۳	۰/۳۱۰	۷/۰۰۰	۰/۹۷۰
معدن مس سونگون ایران- نمونه سنگ معدن Hypogene	۱۱	۰/۰۲۵۸	۴۵/۰۰	۰/۰۵۰	۰/۰۰۵۲	۰/۲۰۰	۰/۳۰۰	۰/۹۶۵
	۱۲		۵۰/۱۰	۰/۱۲۰	۰/۰۰۷۸	۰/۳۰۰	۰/۶۰۰	۰/۹۵۶
	۱۳		۵۵/۱۰	۰/۳۸۰	۰/۰۱۴۱	۰/۳۲۰	۱/۱۰۰	۰/۹۳۴
	۱۴		۶۰/۲۰	۰/۳۸۰	۰/۰۱۷۶	۰/۳۰۰	۱/۸۰۰	۰/۹۳۷
	۱۵		۶۴/۸۰	۴/۶۰۰	۰/۰۴۹۴	۰/۳۱۰	۵/۵۰۰	۰/۹۶۲
معدن مس سونگون ایران- نمونه سنگ معدن Hypogene	۱۶	۰/۰۴۰۸	۴۴/۵۰	۰/۱۸۰	۰/۰۰۴۰	۰/۳۴۰	۰/۱۵۰	۰/۹۸۲
	۱۷		۴۹/۹۰	۰/۳۸۰	۰/۰۰۷۰	۰/۳۵۰	۰/۳۰۰	۰/۹۶۹
	۱۸		۵۵/۱۰	۱/۳۴۰	۰/۰۱۲۸	۰/۳۳۰	۰/۸۰۰	۰/۹۷۲
	۱۹		۶۰/۱۰	۱/۳۷۰	۰/۰۲۱۵	۰/۳۳۰	۱/۸۰۰	۰/۹۵۸
	۲۰		۶۵/۳۰	۳/۱۰۰	۰/۰۳۷۳	۰/۳۳۰	۴/۱۰۰	۰/۹۷۰
معدن مس میدوک ایران	۲۱	۰/۰۲۳۹	۴۴/۲۰	۰/۰۱۰	۰/۰۰۳۰	۰/۴۵۰	۰/۰۵۰	۰/۹۲۳
	۲۲		۴۹/۵۰	۰/۱۰۰	۰/۰۰۴۱	۰/۴۴۰	۰/۱۰۰	۰/۹۱۷
	۲۳		۵۴/۵۰	۰/۱۲۰	۰/۰۰۶۷	۰/۴۵۰	۰/۱۳۰	۰/۹۷۶
	۲۴		۵۹/۶۰	۰/۲۰۰	۰/۰۱۲۲	۰/۴۸۰	۰/۲۹۰	۰/۹۷۱
	۲۵		۶۴/۵۰	۰/۸۰۰	۰/۰۳۰۶	۰/۵۰۰	۰/۸۰۰	۰/۹۷۴
معدن مس میدوک ایران	۲۶	۰/۰۴۳۴	۵۴/۹۵	۳/۷۰۰	۰/۰۲۰۲	۰/۲۰۰	۴/۰۰۰	۰/۹۱۳
	۲۷		۶۰/۰۱	۱۱/۲۰۰	۰/۰۴۱۲	۰/۲۸۰	۶/۰۰۰	۰/۹۱۱
	۲۸		۶۴/۹۹	۲۳/۰۰۰	۰/۱۴۱۲	۰/۳۱۰	۲۲/۰۰۰	۰/۹۶۷
معدن مس سرچشمه ایران	۲۹	۰/۰۳۴۵	۶۹/۸۹	۱۵۰/۰۰۰	۰/۷۵۹۵	۰/۳۵۰	۸۰/۰۰۰	۰/۹۵۴
	۳۰		۵۴/۸۷	۱۴/۳۰۰	۰/۰۴۳۸	۰/۱۲۰	۲۵/۰۰۰	۰/۹۰۲
	۳۱		۵۸/۰۵	۲۸/۰۰۰	۰/۰۶۵۶	۰/۱۵۰	۳۲/۰۰۰	۰/۹۳۶
معدن مس سرچشمه ایران	۳۲	۰/۰۳۴۵	۶۰/۹۱	۴۲/۰۰۰	۰/۱۱۲۸	۰/۲۰۰	۴۳/۰۰۰	۰/۹۶۳
	۳۳		۶۳/۹۲	۵۱/۵۰۰	۰/۲۱۱۱	۰/۲۲۰	۷۰/۰۰۰	۰/۹۴۷

مطالعات مهندسی رسوب، از لزجت فاز مایع (آب) در تحلیل جریان دوغابها استفاده شود، ممکن است به نتایج کاملاً گمراه‌کننده‌ای منجر شود (Pirouz et al., 2005). شکل ۱۲ تغییرات تنش تسلیم و لزجت پلاستیک دوغاب را با غلظت نشان می‌دهد. همانطور که ملاحظه می‌شود، برای تمامی دوغابهای مورد مطالعه، با افزایش غلظت دوغاب، تنش تسلیم و لزجت پلاستیک دوغاب به طور چشمگیری افزایش می‌یابد.

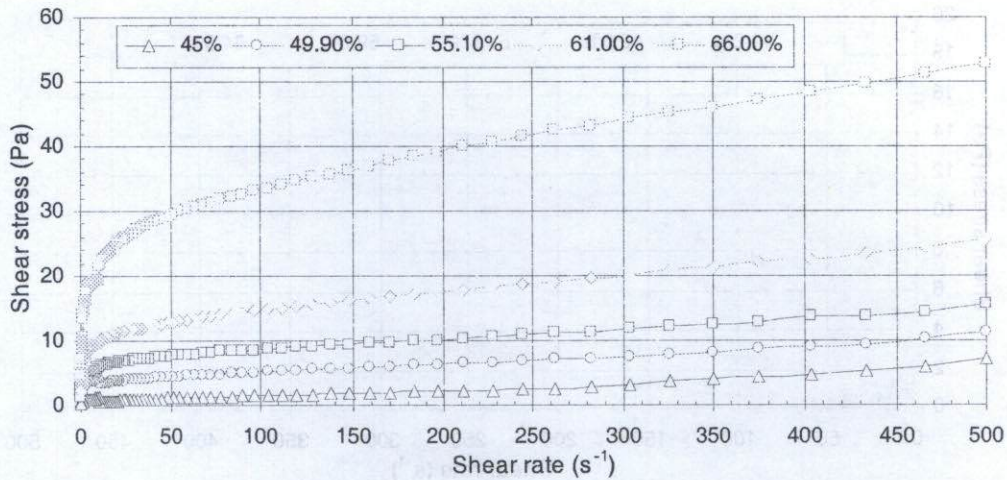
مقادیر به‌دست آمده برای لزجت پلاستیک دوغابها (شیب بخش خطی)- که در واقع لزجت سیال در حال حرکت است- مقدار لزجت این سیالات را بسته به غلظت دوغاب از ۳ تا ۷۵۰ برابر لزجت دینامیک آب در دمای ۲۰ درجه سانتیگراد (۰/۰۰۱ Pa.s) برآورد می‌کند. توجه به این نکته در تحلیل جریان دوغابها (جریان روباز یا تحت فشار) و محاسبه پارامترهای جریان مانند عدد رینولدز جریان، بسیار حائز اهمیت است، به‌طوری‌که اگر بدون توجه به این موضوع و مطابق روش معمول در



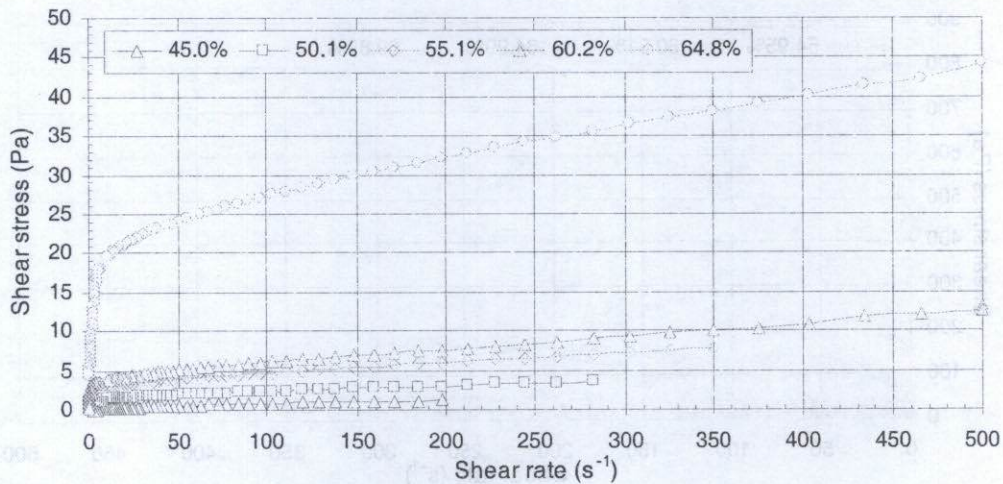
شکل ۳ منحنی دانه‌بندی نمونه‌های دوغاب



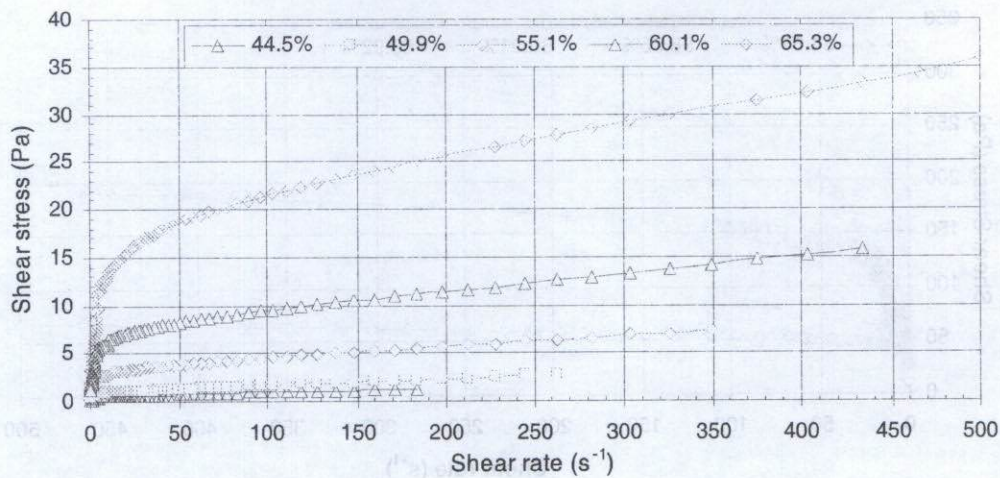
شکل ۴ رئوگرام نمونه‌های دوغاب معدن طلای Peak



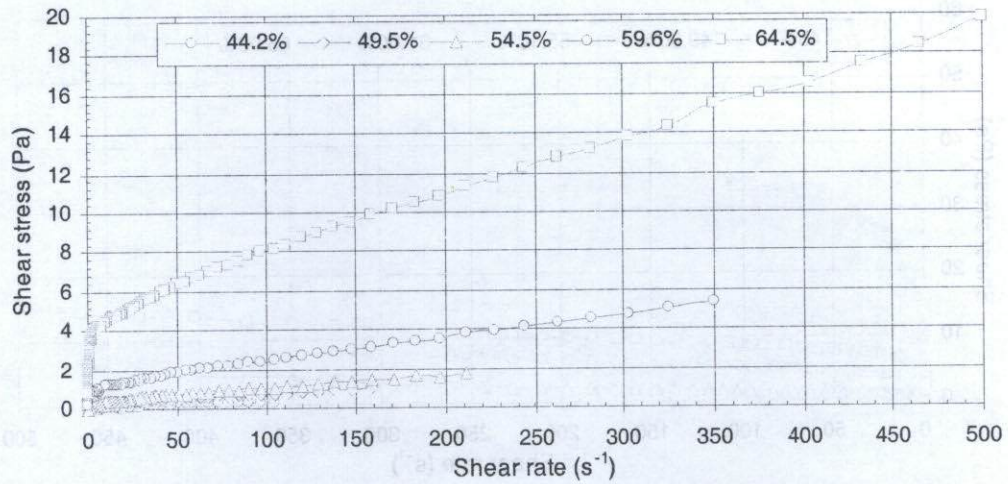
شکل ۵ رئوگرام نمونه‌های دوغاب معدن مس سونگون (نمونه Supergene, $D_{50} = 0.0471mm$)



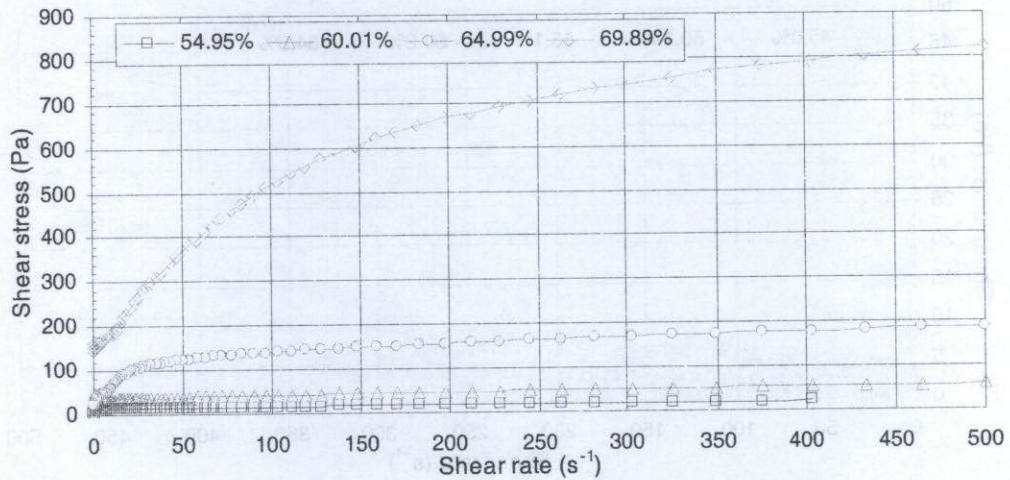
شکل ۶ رئوگرام نمونه‌های دوغاب معدن مس سونگون (نمونه Supergene, $D_{50} = 0.0258mm$)



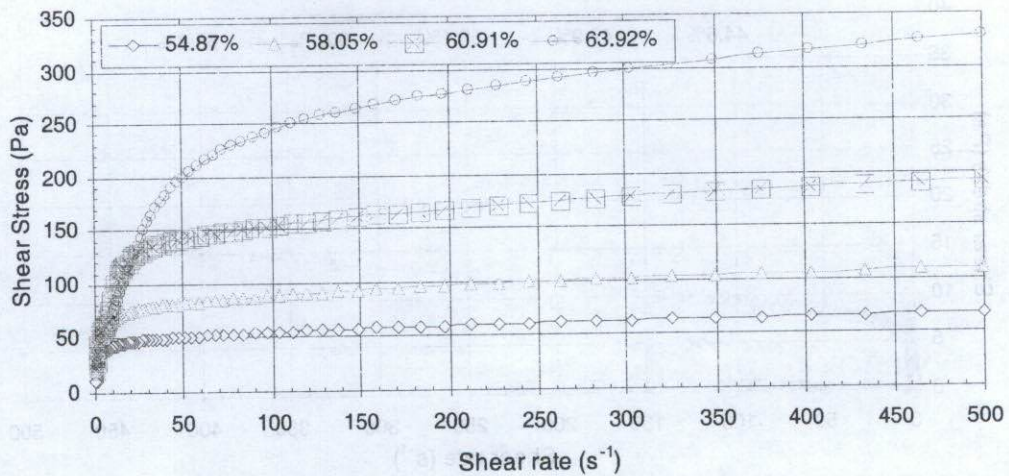
شکل ۷ رئوگرام نمونه‌های دوغاب معدن مس سونگون (نمونه Hypogene, $D_{50} = 0.0408mm$)



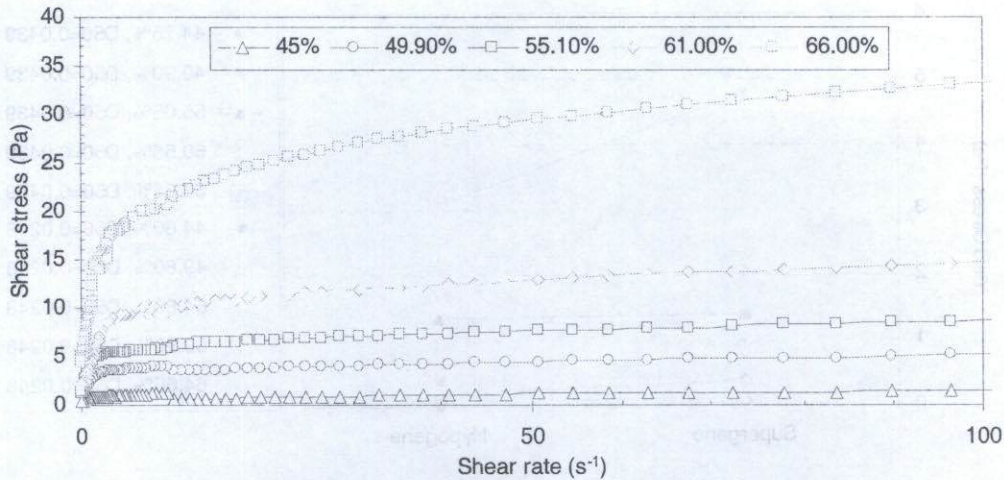
شکل ۸ رئوگرام نمونه‌های دوغاب معدن مس سونگون (نمونه Hypogene, $D_{50} = 0.0239mm$)



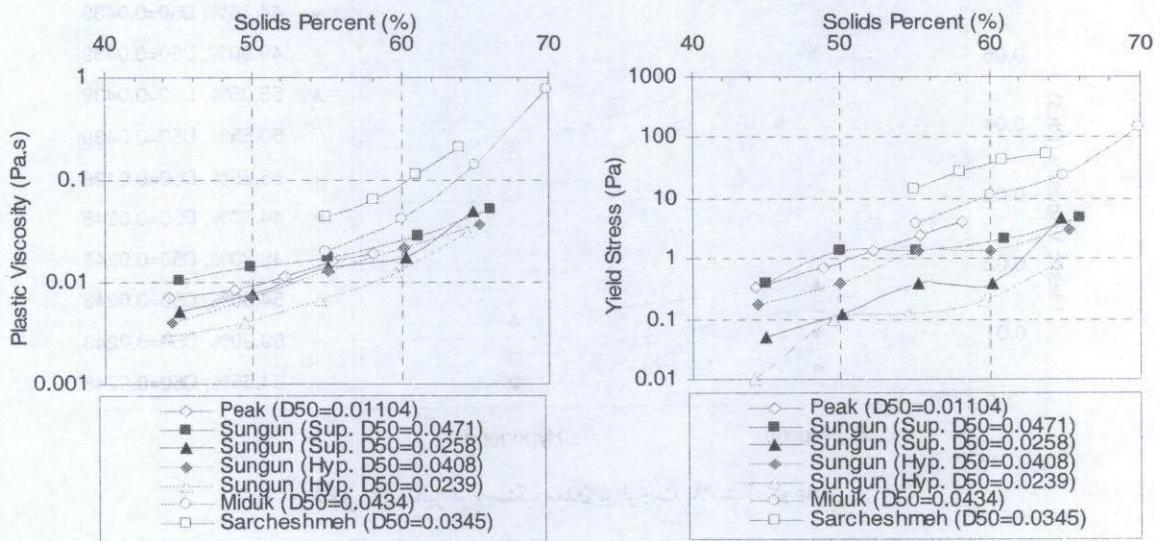
شکل ۹ رئوگرام نمونه‌های دوغاب معدن مس میدوک



شکل ۱۰ رئوگرام نمونه‌های دوغاب معدن مس سرچشمه



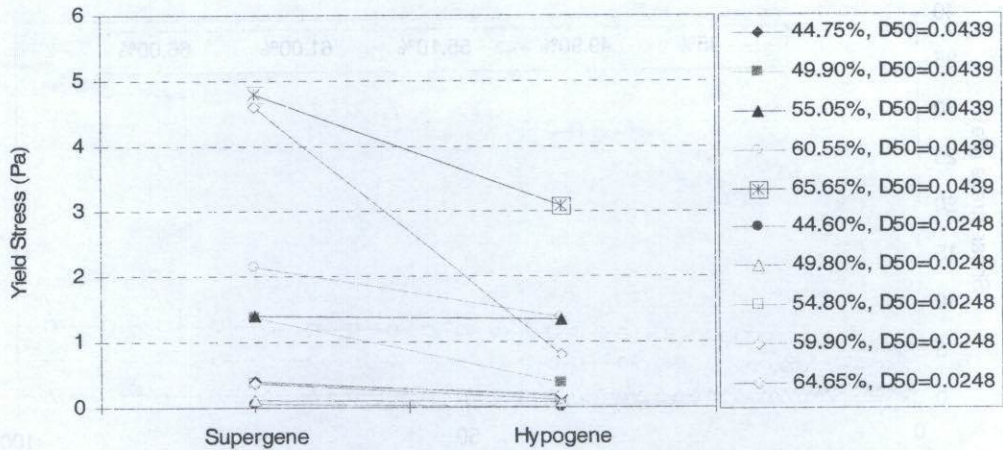
شکل ۱۱ تصویر بزرگنمایی شده بخش ابتدایی رئوگرامهای شکل (۵)



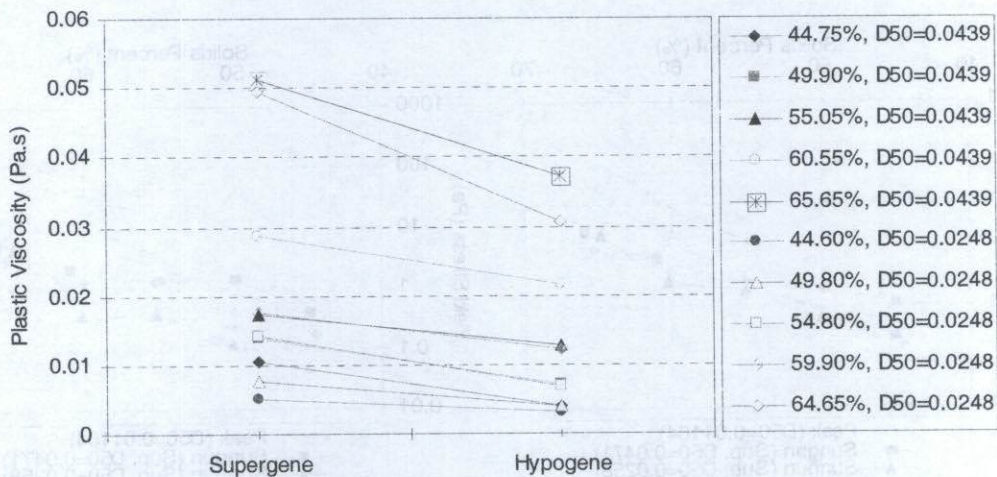
شکل ۱۲ تغییرات تنش تسلیم و ویسکوزیته پلاستیک دوغاب با غلظت

نتیجه‌گیری می‌شود که رفتار رئولوژی دوغابها وابستگی شدیدی به نوع کانی و مینرالوژی سنگ معدن به‌کار رفته در تولید دوغاب دارد. به‌طوری‌که تنش برشی تسلیم و لزجت دو نوع دوغاب کاملاً مشابه از نظر دانه‌بندی و غلظت، بسته به نوع سنگ معدن (وجود ذرات ریز چسبنده)، می‌تواند بسیار متفاوت بوده و در مواردی حتی تا چند ده برابر اختلاف داشته باشد.

شکل‌های ۱۳ و ۱۴ مقایسه نمونه‌های Hypogene و Supergene معدن مس سونگون را نشان می‌دهد. همانطور که ملاحظه می‌شود در یک دانه‌بندی بخصوص، وجود مواد ریزدانه چسبنده- نظیر رس در دوغاب (نمونه Supergene)- موجب افزایش نسبتاً چشمگیری در تنش برشی تسلیم سیال و لزجت آن می‌شود. علت این پدیده وجود ذرات ریزدانه چسبنده رس در نمونه سنگ معدن Supergene است (دوغابهای رس حتی در غلظتهای پایین شدت لزج هستند). از شکل‌های ۱۳ و ۱۴ چنین



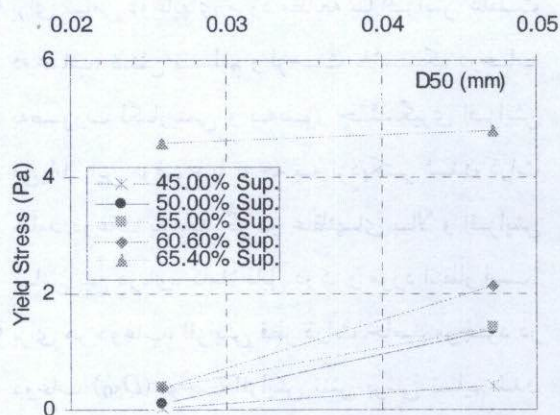
شکل ۱۳ تأثیر نوع سنگ معدن بر تنش تسلیم دوغاب



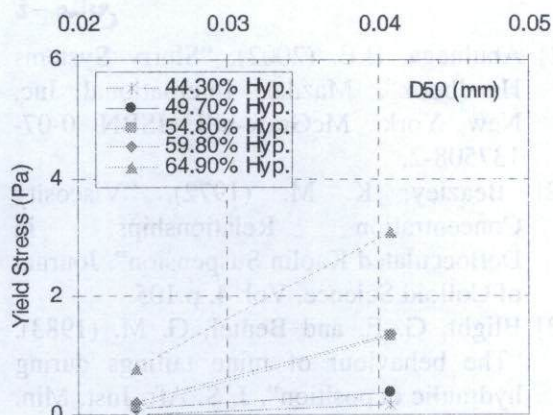
شکل ۱۴ تأثیر نوع سنگ معدن بر لزجت پلاستیک دوغاب

۴۴/۳٪ در شکلهای ۱۵- الف و ۱۶- الف و همچنین شیب خطهای مربوط به غلظت ۶۵/۴٪ و ۴۵٪ در شکلهای ۱۵- ب و ۱۶- ب می‌توان نتیجه گرفت که میزان تأثیر افزایش D_{50} بر افزایش تنش تسلیم و لزجت سیال با افزایش غلظت دوغاب، از روند خاصی پیروی نمی‌کند، به طوری که در نمونه‌های Supergene افزایش غلظت دوغاب، در ابتدا موجب تشدید اثر D_{50} شده و سپس اثر کاهشی داشته است، در حالی که در نمونه‌های Hypogene با افزایش غلظت دوغاب، اثر D_{50} همواره تشدید شده است.

همانطور که پیشتر نیز ذکر شد به منظور بررسی تأثیر قطر متوسط ذرات جامد دوغاب بر رفتار رئولوژی آنها، نمونه‌های مختلفی از دوغاب معدن مس سونگون (Supergene و Hypogene) با D_{50} های مختلف تهیه شد. شکلهای ۱۵ و ۱۶ تأثیر قطر متوسط ذرات جامد موجود در دوغاب را بر مقدار تنش تسلیم دوغاب و همچنین لزجت پلاستیک آن نشان می‌دهند. ملاحظه می‌شود که افزایش قطر ذرات جامد موجود در دوغاب (D_{50}) در غلظتهای مختلف دوغاب، موجب افزایش تنش برشی جاری شدن سیال و لزجت سیال می‌شود. همچنین از مقایسه شیب خط مربوط به غلظت ۶۴/۹٪ و غلظت

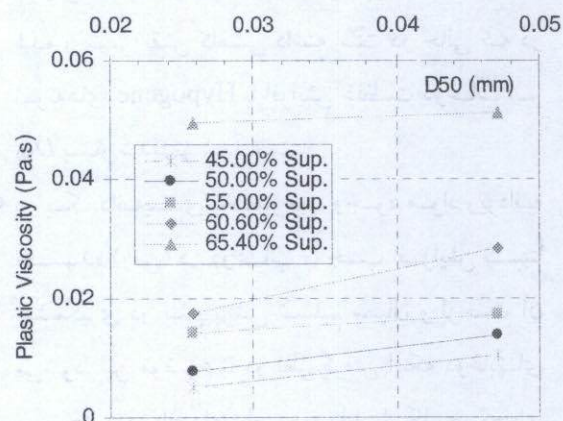


(ب)

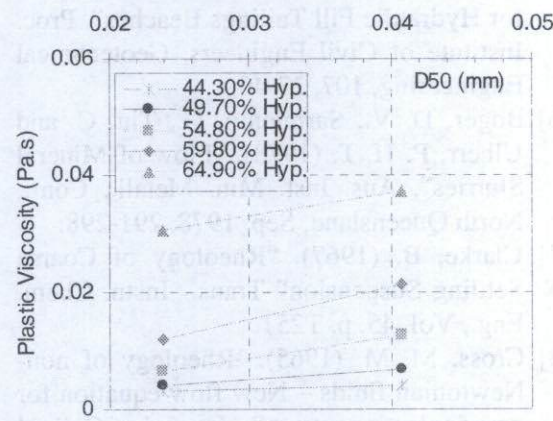


(الف)

شکل ۱۵ تأثیر قطر متوسط ذرات جامد بر تنش تسلیم دوغاب



(ب)



(الف)

شکل ۱۶ تأثیر قطر متوسط ذرات جامد بر لزجت پلاستیک دوغاب

سیالات شبه پلاستیک جاری شونده است. اگرچه در تغییر شکل‌های بزرگ (نرخ کرنش‌های بزرگتر از $1000 s^{-1}$) رفتار این دوغابها بخوبی با مدل خطی پلاستیک بینگهام قابل تخمین است ولیکن در نرخ تنش‌های کوچکتر از $1000 s^{-1}$ رفتار تمامی غلظت‌های دوغاب‌های مورد آزمایش به شکل سهمی بوده و با مدل خطی بینگهام قابل تخمین نیست. به طوری که بهترین مدل قابل انطباق بر رفتار رئولوژی دوغاب‌های مس (که بتواند رفتار دوغاب را در نرخ برش‌های کم و زیاد تخمین بزند) مدل Herschel-Buckley است.

۳- نتیجه گیری

با بررسی نتایج حاصل از آزمایش‌های انجام شده بر روی نمونه‌های مختلف دوغابها و مقادیر به دست آمده برای لزجت و تنش تسلیم این دوغابها، نتایج ذیل استخراج می‌شود:

- رفتار رئولوژی تمامی دوغاب‌های مورد آزمایش (در محدوده غلظت‌های ۴۵٪ تا ۷۰٪) به صورت یک تنش برشی اولیه برای تسلیم سیال و سپس ادامه یافتن رئوگرام به صورت سهمی است که بیانگر تبعیت رفتار این دوغابها از مدل Herschel-Buckley برای

۴- منابع

- [1] Abulnaga, B.E. (2002). "Slurry Systems Handbook". Mazdak International Inc. New York: McGraw-hill. ISBN 0-07-137508-2.
- [2] Beazley, K. M. (1972). "Viscosity Concentration Relationships in Deflocculated Kaolin Suspension". Journal of Colloid Science, Vol. 4. p.105.
- [3] Blight, G. E. and Bentel, G. M. (1983). "The behaviour of mine tailings during hydraulic deposition". J. S. Afr. Inst. Min. Metall., 83, 73-86.
- [4] Blight, G. E. (1988). "Some Less Familiar Aspects of Hydraulic Fill Construction". Proc. ASCE Spec. Conf. on Hydraul. Fill Structures, Denver, Colorado, 1000-1027.
- [5] Blight, G. E. (1994). "The Master Profile for Hydraulic Fill Tailings Beaches". Proc. Institute of Civil Engineers, Geotechnical Engineering, 107, 27-40.
- [6] Boger, D. V., Sarmiento, G., Tiu, C. and Ulherr, P. H. T. (1978). "Flow of Mineral Slurries". Aus. Inst. Min. Metall., Conf., North Queensland, Sep. 1978, 291-298.
- [7] Clarke, B. (1967). "Rheology of Coarse Settling Suspension" Trans. Instn. Chem. Eng., Vol. 45. p. T251.
- [8] Cross, M. M. (1965). 'Rheology of non-Newtonian fluids - New flow equation for pseudoplastic systems". Journal of Colloid Science, 20, 417.
- [9] Govier, G. W., and K. Aziz. (1972). "The Flow of Complex Mixtures in Pipe". New York: Van Nostrand Reinhold.
- [10] Hansford, G. S., Levy, C. D. and De Kock, J. W. (1976). Rheological Measurement on Pulps From South African Gold Mines. J. S. Afr. Inst. Min. Metall., 76, 8, 363-369.
- [11] Heywood, N. I. (1991). "Rheological Characteristics of Non-Settling Slurries". In Slurry Handling, Edited by N. P. Brown and N. I. Heywood. New York: Elsevier Applied Sciences.
- [12] Levy, C. D. A. (1975). "A Rheological Investigation of Three South African Gold Mine Pulps". MSc. (Eng) thesis. University of Cape Town, South Africa.
- [13] Marsden, D. D. (1962). "The Effect of Ph, Temperature and Density on The Kinematic Viscosity of Some South

- برای تمامی دوغابهای مورد مطالعه با افزایش غلظت دوغاب، تنش تسلیم و لزجت پلاستیک دوغاب به صورت لگاریتمی و به طور چشمگیری افزایش می یابد. این موضوع با توجه به نزدیکتر شدن ذرات جامد دوغاب به یکدیگر در غلظتهای بالا و افزایش تماس بین ذره‌ای، کاملاً قابل درک و مورد انتظار است.
- برای هر دوغاب، افزایش قطر ذرات جامد موجود در دوغاب (D_{50}) موجب افزایش تنش برشی تسلیم شدن سیال و لزجت پلاستیک آن می شود. تأثیر افزایش غلظت دوغاب بر میزان اثرگذاری D_{50} ، از روند خاصی پیروی نمی کند، به طوری که در نمونه‌های Supergene افزایش غلظت دوغاب در ابتدا موجب تشدید اثر D_{50} شده و سپس نقش کاهشی داشته است در حالی که در نمونه‌های Hypogene با افزایش غلظت دوغاب اثر D_{50} بسیار شدیدتر شده است.
- در یک دانه بندی بخصوص، وجود مواد ریزدانه چسبنده (رس) در دوغاب موجب افزایش نسبتاً چشمگیری در تنش برشی تسلیم سیال و لزجت آن می شود. این موضوع با در نظر گرفتن اینکه دوغابهای رس حتی در غلظتهای پایین (به دلیل شکل صفحه‌ای ذرات و نیروی جاذبه الکتریکی بین ذره‌ای) بسیار لزج هستند، قابل درک و توجیه است.
- برای به حرکت در آوردن و انتقال دوغابهای معدنی غلیظ و همگن، لازم است بر تنش برشی جاری شدن سیال غلبه شود. بنابراین در طراحی کانالهای باز برای انتقال و حمل دوغابها ضروری است مقدار این حداقل تنش برشی (حداقل شیب کانال) مورد توجه دقیق و کافی قرار گیرد، زیرا بر خلاف سیالات نیوتنی مانند آب، در سیالات غیر نیوتنی برای مقادیر کمتر از این شیب، هیچگونه جریانی ایجاد نخواهد شد.

[17] Sofra F., Boger D. V., (2000). "Slope Prediction for Thickened Tailings and Pastes". Proceeding of 7th International Conference on Tailings and Mine Waste, Fort Collins, Colorado.

[18] Sofra F., Boger D. V., (2002). "Planning Design and Implementation Strategy for Thickened Tailings Pastes". Proceeding of 9th International Conference on Tailings and Mine Waste, Fort Collins, Colorado.

[19] Wilson, K. C. 1991. "Slurry Transport in Flumes". I Hydrotransport: In slurry handling and pipeline transport. Edited by N. P. Brown and N. I. Heywood. New York: Elsevier Applied Sciences.

[14] Metzner, A. B. and Whitlock, M. (1958). "Flow Behavior of Concentrated (Dilatant) Suspensions". Trans. Soc. Rheology, 2, P. 239-254.

[15] Pirouz B., Kavianpour M.R., Williams P., (2005). "Thickened Tailings Beach Deposition. Field Observations and Full-Scale Flume Testing". Paste 2005, International Seminar on Paste and Thickened Tailings, Santiago, Chile.

[16] Simons D. B. and Senturk F., (1992). "Sediment Transport Technology", ISBN 0918334667, Water Resources Publications, Colorado USA.