

تأثیر خصوصیات سوسپانسیون باطله فراوری مس بر تنش تسلیم برشی و اهمیت آن در فرایند جدایش جامد از مایع

محمد رضا گرمسیری^۱، حسن حاجی امین شیرازی^{۲*}

۱. گروه مهندسی معدن، انجمن پژوهشگران جوان، دانشگاه شهید باهنر کرمان (m.r.garmsiri@gmail.com)

۲. گروه مهندسی معدن، پژوهشکده صنایع معدنی، دانشگاه شهید باهنر کرمان (hshirazi@uk.ac.ir)

مشخصات مقاله	چکیده
تاریخچه مقاله دریافت: ۲۳ تیر ۹۲ دریافت پس از اصلاح: ۶ مهر ۹۲ پذیرش نهایی: ۱۸ آبان ۹۲	تنش تسلیم برشی از خواص رئولوژی سوسپانسیون‌ها می‌باشد که در کارایی برخی از فرایندهای فراوری مواد از جمله جدایش جامد از مایع، آسیا کنی، طبقه بندی و انباشت باطله‌ها موثر است. در این پژوهش تأثیر غلظت جامد، میزان نرمه، pH محیط، دما، نرخ فلوکولانت و متفرق‌کننده بر تنش تسلیم برشی سوسپانسیون باطله نهایی کارخانه تغلیظ شماره ۱ مجتمع مس سرچشمه بررسی شد و نهایتاً تأثیر این عوامل بر فرایند جدایش جامد از مایع تحلیل گردید. تنش تسلیم برشی با استفاده از آزمایش اسلامپ و به کمک مدل تحلیلی پاشیاس محاسبه شد. نتایج نشان داد، افزایش سهم نرمه موجب افزایش قابل توجهی در تنش تسلیم برشی می‌شود. با افزایش نرخ مصرف فلوکولانت تا ۱۰ گرم بر تن، تنش تسلیم برشی بطور قابل توجهی افزایش یافت. در حالی که در بازه بیش از ۲۰ گرم بر تن افزایش تنش تسلیم برشی ناچیز بود. با توجه به اینکه افزایش تنش تسلیم برشی موجب افزایش مقاومت سوسپانسیون در مقابل فشردن و کاهش کارایی جدایش جامد از مایع می‌گردد این نتایج می‌تواند در بهبود کارایی تیکنرها و فیلترها مورد استفاده قرار گیرد.
کلمات کلیدی: شیمی سطح رئولوژی تنش تسلیم برشی نیروهای بین ذرات خصوصیات سوسپانسیون	حقوق ناشر محفوظ است.
* عهده دار مکاتبات	

۱- مقدمه

نیروی آبرانی بین دو ذره که سطح آنها آبران است مشاهده می‌شود و اغلب از نوع جاذبه است. نیروی هیدراسیون بین دو سطح آبدوست مشاهده می‌شود و از نوع دافعه است. هنگامی که ذرات با سطوح پوشیده شده از پلیمری محلول به فاصله‌ای کمتر از دو برابر ضخامت لایه آن پلیمر برسند، بین آنها نیروی دافعه‌ای اعمال می‌شود که به آن استریک می‌گویند. نیروی پل زدن زمانی که یک نوع پلیمر مانند فلوکولانت به محیط اضافه شود، موجب افزایش نیروی جاذبه بین ذرات خواهد شد.

تنش تسلیم برشی، حداقل تنش برشی مورد نیاز برای جاری شدن سوسپانسیون است [۴،۵]. این خصوصیت در فراوری مواد در جدایش جامد از مایع [۶-۸]، آسیاکنی [۹،۱۰]، فلوتاسیون [۱۱]، هیدروسیکلون [۱۲] و انباشت پسماندهای فراوری [۱۳-۱۵] موثر است. در هر یک از این مراحل بزرگی تنش تسلیم منجر به تغییر کارایی فرایند می‌شود. برای مثال در روش‌های جدایش جامد از مایع مانند غلیظ کردن در تیکتر و فیلتر، افزایش تنش تسلیم برشی موجب افزایش مقاومت سوسپانسیون در مقابل فشردن شدن و کاهش کارایی آگیری می‌شود. در روش‌های انباشت پسماندهای فراوری، افزایش تنش تسلیم برشی منجر به افزایش زاویه قرارگیری سوسپانسیون و کاهش قابل توجه هزینه‌های انباشت باطله می‌گردد. در آسیاکنی حد بهینه‌ای از تنش تسلیم برشی وجود دارد که موجب کارایی بیشینه می‌شود. در تنش تسلیم برشی کمتر از حد بهینه، انرژی تنها صرف برخورد گلوله‌ها می‌شود. در تنش تسلیم بالاتر از حد بهینه انرژی گلوله توسط سوسپانسیون جذب شده و کارایی خردایش کاهش می‌یابد.

پژوهش‌هایی با موضوع بررسی تاثیر خواص سوسپانسیون کانی‌های مختلف بر رفتار رئولوژی آنها انجام شده است. کلایتون و همکاران [۱۶] اظهار کردند که با افزایش غلظت جامد، تنش تسلیم برشی بصورت نمایی افزایش می‌یابد. لذا در فرایند جداسازی جامد از مایع افزایش غلظت جامد موجب می‌شود بازیابی بیشینه محدود گردد. بوگر [۱۷] نشان داد در دو سوسپانسیون با تنش تسلیم برشی برابر، غلظت جامد سوسپانسیونی که دانسیته ذرات جامد آن بالاتر باشد، بیشتر خواهد بود.

جانسون و همکاران [۱] اظهار کردند تنش تسلیم برشی به میانگین ابعاد ذرات وابسته است و با کاهش ابعاد ذرات، تنش تسلیم برشی افزایش می‌یابد. گرین و بوگر [۸] نتیجه گرفتند که افزایش پلیمرهای با وزن مولکولی بالا موجب

فراوری مواد معدنی اغلب در شرایطی انجام می‌شود که ماده معدنی بصورت ذرات معلق در محیط آبی است. در این شرایط قابلیت جریان یافتن و واکنش سوسپانسیون با محیط فرایند از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. رئولوژی یا دانش جریان یافتن سیالات به بررسی رفتار سیال در مقابل تنش برشی اعمال شده می‌پردازد. دو خاصیت مهم رئولوژی سیالات عبارتند از: تنش تسلیم برشی^۱ و ویسکوزیته^۲.

خواص رئولوژی سوسپانسیون‌ها به فرایند نیروهای بین ذرات وابسته است. زمانی که ذرات ماده معدنی در شرایط سوسپانسیون قرار می‌گیرند، شش نوع نیرو به یکدیگر وارد می‌کنند که فرایند آنها رفتار رئولوژی سوسپانسیون را تعیین می‌کند. این نیروها عبارتند از: واندروالس^۳، دولاپه الکتریکی^۴، هیدراسیون^۵، آبرانی^۶، استریک^۷ و پل زدن^۸ [۱،۲].

نیروی واندروالس از برهم‌کنش دوقطبی‌های ذاتی درون اتم بوجود می‌آید. این پدیده به جاذبه بین ذرات در فواصل کم منجر می‌شود. برای دو ذره کروی یکسان با شعاع a و فاصله H ($a \gg H$) نیروی واندروالس توسط رابطه (۱) محاسبه می‌شود.

$$F = -\frac{aA}{12H^2} \quad (1)$$

در رابطه (۱)، A ثابت هاماکر^۹ است که به خصوصیات ماده بستگی دارد.

در محیط آب سطح ذرات با مکانیزم‌های مختلف می‌توانند باردار شوند. لذا توزیع یون‌ها در فواصل کوتاهی از سطح ذرات درون سوسپانسیون تغییر می‌کند. زمانی که ذرات در سوسپانسیون در فاصله کمی نسبت به هم قرار می‌گیرند، همپوشانی دو لایه الکتریکی آنها منجر به نیروی دو لایه الکتریکی بین ذرات می‌شود. نیروی دو لایه الکتریکی با تغییر پتانسیل زتا که عمدتاً به pH محیط وابسته است و قدرت یونی تغییر می‌کند. بیشترین تنش تسلیم برشی سوسپانسیون در نقطه بار صفر اتفاق می‌افتد [۲]. علاوه بر مقدار pH، واکنش‌های سطحی بین عامل تنظیم pH و سطح ذره می‌تواند بر تنش تسلیم برشی موثر باشد [۳].

1-Shear yield stress

2-Viscosity

3- Van der Waals

4- Electric double layer

5- Hydration

6- Hydrophobic

7- Steric

8- Bridging

9-Hamaker

۲-۲- آزمایش اسلامپ

برای تعیین تنش تسلیم برشی از آزمایش اسلامپ که توسط پاشیاس و همکاران معرفی شده است، استفاده شد. این آزمایش در مقایسه با سایر روش‌ها بسیار سریع و ارزان است و امکان انجام آزمایش در محل وجود دارد [۲۲ و ۱۶]. در این آزمایش یک استوانه (مانند بخشی از یک لوله)، دو خط کش مدرج و یک سطح صاف برای قرارگیری استوانه روی آن مورد نیاز است. ابتدا استوانه مورد نظر روی سطح صاف قرار داده شده و سوسپانسیون درون آن ریخته می‌شود. سپس به کمک قاشقک آزمایشگاهی و با زدن چند ضربه حباب‌های هوای به تله افتاده در سوسپانسیون خارج می‌شود. آنگاه به آرامی استوانه بطور عمودی بالا کشیده می‌شود. با شروع بالا کشیدن استوانه، سوسپانسیون جاری شده و تغییر شکل می‌دهد. در نهایت ارتفاع نهایی سوسپانسیون تغییر شکل یافته به کمک دو خط کش عمود بر هم اندازه‌گیری شده و با توجه به ابعاد اولیه استوانه، مقدار کاهش ارتفاع سوسپانسیون محاسبه می‌شود.

پاشیاس و همکاران قابلیت استفاده از آزمایش اسلامپ در شرایط مختلف را بررسی کرده و ابراز نمودند که نتایج این آزمایش به نوع ماده معدنی وابسته نیست. علاوه بر آن اظهار نمودند که نسبت ابعاد استوانه، سرعت بالا کشیدن استوانه و جنس سطح زیرین آن تأثیری در نتایج ندارد [۲۲].

در صورتی که ارتفاع اولیه سوسپانسیون H و مقدار کاهش ارتفاع سوسپانسیون معادل با S باشد، بنابراین:

$$S' = \frac{S}{H} \quad (2)$$

$$\tau'_y = 0.5 - 0.5\sqrt{S'} \quad (3)$$

$$\tau'_y = \frac{1 - S'}{2(1 - \ln(2\tau'_y))} \quad (4)$$

$$\tau_y = \tau'_y \times \rho_{\text{susp}} g H \quad (5)$$

که در آن τ_y تنش تسلیم برشی (Pa)، τ'_y تنش تسلیم برشی بدون بعد، ρ_{susp} دانسیته سوسپانسیون (kg/m^3) و g شتاب گرانش زمین (9.81 m/s^2) است. ذکر این نکته ضروری است که در رابطه (۴)، تنش تسلیم برشی بدون بعد در بخش سمت چپ رابطه و مخرج سمت راست وجود دارد. در این شرایط می‌بایست تنش تسلیم بدون بعد بدست آمده از رابطه (۳)، در مخرج رابطه (۴) قرار گیرد و به کمک این رابطه مقدار جدید تنش تسلیم بدون بعد محاسبه شود. آنگاه مقدار بدست آمده مجدداً در مخرج رابطه (۴) قرار گیرد و مقدار جدید تنش

افزایش تنش تسلیم و کاهش قابلیت جریان یافتن مواد می‌شود. یانگ و همکاران [۱۸] مشاهده کردند که در سوسپانسیون دی اکسید تیتانیوم، در pH حدود ۵ (نقطه بار صفر) بیشترین تنش تسلیم برشی مشاهده می‌شود. نتایج جانسون و همکاران نیز موید آن است که همواره بیشترین تنش تسلیم برشی در نقطه بار صفر رخ می‌دهد [۱].

یانگ و همکاران [۱۸] با بررسی تنش تسلیم برشی سوسپانسیون دی اکسید تیتانیوم، یک کمینه در تنش تسلیم برشی در ۵۰ درجه سانتی‌گراد مشاهده کردند. هی و همکاران [۱۹] نشان دادند که با افزایش دما تنش تسلیم ماسه سنگ کاهش می‌یابد. آشر [۲۰] نیز نتیجه گرفت که با افزایش دما، تنش تسلیم سوسپانسیون خاک سرخ افزایش می‌یابد. همچنین هالستون و همکاران [۲۱] گفتند که با افزایش دما، تنش تسلیم سوسپانسیون هماتیت افزایش می‌یابد.

بطور کلی می‌توان گفت میزان تنش تسلیم برشی سوسپانسیون تابعی از خصوصیات ماده معدنی (نوع کانی‌های موجود) و شرایط عملیاتی فرایند (شامل مواد شیمیایی موجود و pH محیط) است. این امر حاکی از تنوع رفتار رئولوژی سوسپانسیون در اثر تغییر خواص آن است. فراوری کانی‌های مس‌دار منجر به تولید بیشترین حجم باطله در مقایسه با فراوری سایر کانی‌ها می‌باشد، لیکن تا کنون تأثیر خواص سوسپانسیون باطله مس بر تنش تسلیم برشی آن مورد مطالعه قرار نگرفته است. به منظور بهبود کارایی جداسازی جامد از مایع باطله‌های فراوری مس، در این پژوهش تأثیر خواص سوسپانسیون باطله مس بر تنش تسلیم برشی آن با نگاهی مختصر به آسیاکنی کانه مس بررسی شده است.

۲- مواد و روش کار

۲-۱- نمونه برداری

نمونه‌های لازم از باطله نهایی کارخانه تغلیظ شماره ۱ مجتمع مس سرچشمه تهیه شدند. نمونه‌های مختلف با هم مخلوط و سپس تقسیم شدند. جدول ۱ ترکیب شیمیایی نمونه مورد نظر را نشان می‌دهد. نتایج آنالیز سرنندی به کمک سری سرنندی و سیکلوسایزر نشان داد d_{80} نمونه مورد نظر حدود ۱۲۷ میکرون است.

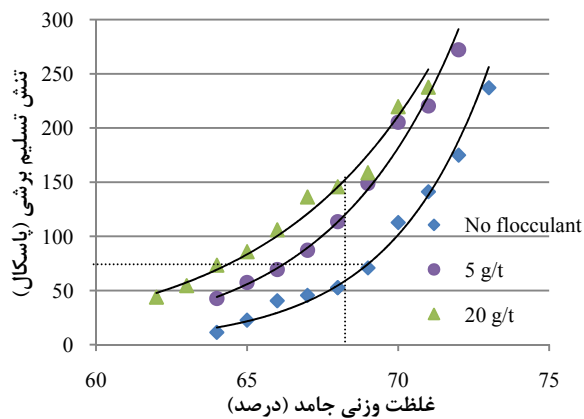
جدول (۱) آنالیز شیمیایی نمونه باطله مجتمع مس سرچشمه

Cu (%)	Fe (%)	Mo (%)	SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	S (%)	CuO (%)
۰٫۱	۲٫۹۵	۰٫۰۰۸	۵۷٫۱۴	۱۴٫۳۱	۲٫۱۳	۰٫۰۳۵

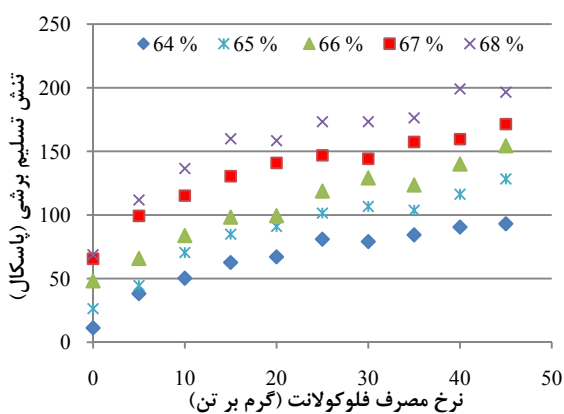
۱، با افزایش غلظت جامد، مقاومت مواد تحت فرایند فشردگی در تیکنرها و فیلترها افزایش یافته و کارایی جداسازی جامد از مایع به شدت کاهش می‌یابد و دستیابی به تنها یک درصد جامد بیشتر، بسیار دشوار است.

۳-۲- تاثیر نرخ مصرف فلوکولانت

فلوکولانت‌ها زنجیرهای پلیمری هستند که بطور گسترده با هدف تشکیل مجموعه ذرات^۱ در جداسازی جامد از مایع در تیکنر و فیلتر و بعضا در فلوتاسیون مورد استفاده قرار می‌گیرند. شکل‌های ۲ و ۳ تاثیر نرخ مصرف فلوکولانت بر تنش تسلیم برشی در غلظت جامدهای متفاوت سوسپانسیون باطله فراوری مس را نشان می‌دهد.



شکل (۲) تاثیر غلظت جامد بر تنش تسلیم برشی در نرخ فلوکولانت متفاوت



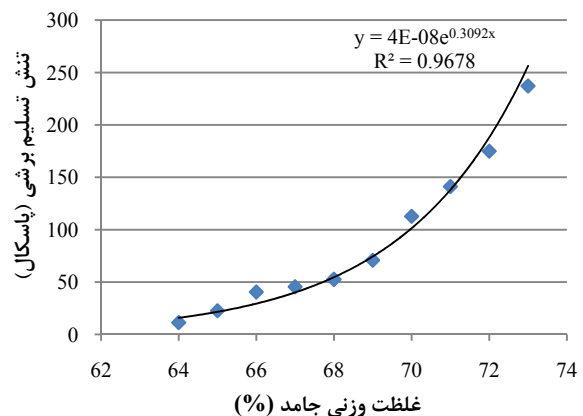
شکل (۳) تاثیر نرخ مصرف فلوکولانت بر تنش تسلیم برشی در غلظت جامدهای مختلف

تسلیم بدون بعد محاسبه شود. این روند تا جایی تکرار شود که مقدار تنش تسلیم بدون بعد محاسبه شده ثابت شود. آنگاه به کمک رابطه (۵) اندازه تنش تسلیم برشی محاسبه شود. در این پژوهش از یک استوانه از جنس PVC برای انجام آزمایش‌های اسلامپ استفاده شد و همه آزمایش‌ها در دمای محیط آزمایشگاه انجام گرفت.

۳-۱- ارائه یافته‌ها و تحلیل نتایج

۱-۳- تاثیر غلظت جامد

یکی از عوامل موثر بر رفتار رئولوژی سوسپانسیون غلظت جامد است. با افزایش غلظت جامد، ذرات در فاصله کمتری نسبت به یکدیگر قرار می‌گیرند و برهم‌کنش و نیروهای بین ذرات افزایش می‌یابد. شکل ۱ تاثیر غلظت جامد وزنی بر تنش تسلیم برشی را نشان می‌دهد.



شکل (۱) تاثیر غلظت جامد وزنی سوسپانسیون باطله مس بر تنش تسلیم برشی

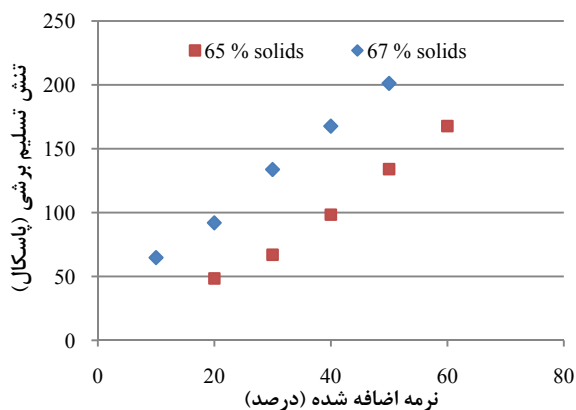
ملاحظه می‌شود افزایش غلظت جامد موجب افزایش قابل ملاحظه تنش تسلیم برشی بطور غیرخطی می‌گردد. این مساله می‌تواند موجب تغییرات قابل ملاحظه در کارایی آسیاکنی شود زیرا بیشترین کارایی آسیاکنی در محدوده خاصی از تنش تسلیم برشی بدست می‌آید.

در جداسازی جامد از مایع، با توجه به شکل ۱ در صورتی که غلظت جامد در محدوده ۶۴-۷۳ درصد باشد، تنش تسلیم برشی از حدود ۱۰ به ۲۴۰ پاسکال افزایش می‌یابد. بدین ترتیب برای دستیابی به یک درصد غلظت جامد بیشتر و غلبه بر مقاومت مواد، اختلاف تنش تسلیم برشی قابل توجه بوده و باید فشار و برش بمراتب بیشتری وارد شود که در شرایط معمول تحقق نمی‌یابد. به عبارت دیگر با توجه به شکل

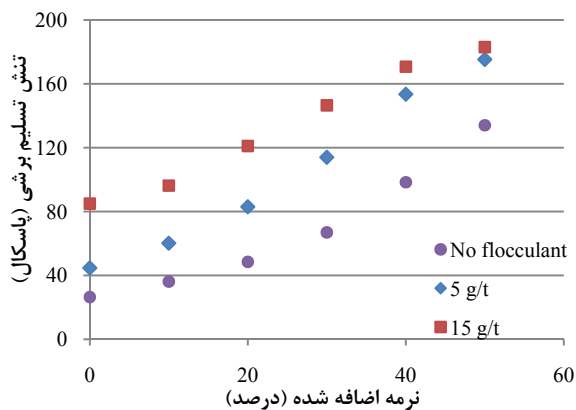
صنعتی نیز موید آن است که در نرخ فلوکولانت بیش از ۲۰ گرم بر تن، تأثیر نرخ مصرف فلوکولانت بر تنش تسلیم برشی ناچیز است [۲۳].

۳-۳- تأثیر نرمة

یکی از عوامل بسیار مهم در کارایی اغلب فرایندهای فراوری مواد معدنی و رفتار رئولوژی سوسپانسیون‌ها میزان نرمة است. در این پژوهش برای بررسی تأثیر نرمة بر تنش تسلیم برشی، بخش کوچکتر از ۴۵ میکرون از نمونه باطله کارخانه شماره ۱ جدا شده و به عنوان نمونه نرمة در نظر گرفته شد. سپس ۱۰ تا ۴۰ درصد نرمة به نمونه اصلی اضافه شد و آزمایش‌های مورد نظر انجام شد. شکل ۴ تأثیر بخش نرمة اضافه شده و شکل ۵ تأثیر درصد نرمة اضافه شده در نرخ فلوکولانت متفاوت بر تنش تسلیم برشی سوسپانسیون را نشان می‌دهد.



شکل (۴) تأثیر درصد نرمة اضافه شده به سوسپانسیون در غلظت جامد ۶۷ و ۶۵ درصد



شکل (۵) تأثیر درصد نرمة اضافه شده بر تنش تسلیم برشی در نرخ فلوکولانت متفاوت

ملاحظه می‌شود که در یک غلظت جامد مشخص، با افزایش نرخ مصرف فلوکولانت تنش تسلیم برشی و مقاومت سوسپانسیون در مقابل فشرده شدن افزایش یافت (خط چین عمودی شکل ۲). این مساله موجب کاهش کارایی فرایند فشرده‌گی و جداسازی جامد از مایع در تیکنر می‌شود. از سوی دیگر با فرض اینکه در منطقه فشرده‌گی درون تیکنر فشار مشخصی اعمال شود، با افزایش مصرف فلوکولانت بیشترین غلظت جامد قابل دستیابی و بازیابی آب کاهش می‌یابد (خط چین افقی شکل ۲).

جدول ۲ نتایج اعمال مدل نمایی بر داده‌های تنش تسلیم برشی بر حسب غلظت جامد وزنی در نرخ مصرف متفاوت فلوکولانت را نشان می‌دهد.

جدول (۲) نتایج اعمال مدل رگرسیونی بر داده‌های تنش تسلیم برشی در نرخ‌های متفاوت فلوکولانت

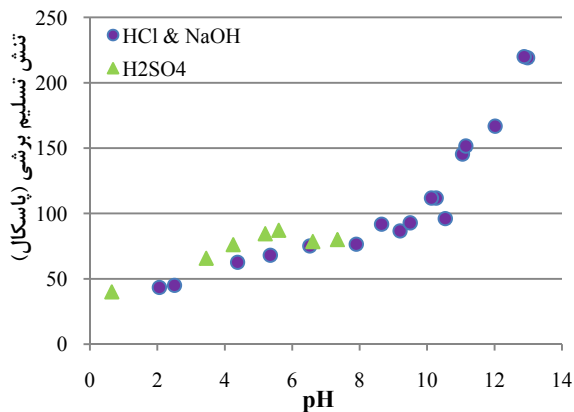
R^2	مدل رگرسیونی	نرخ فلوکولانت
0.94	$SYS = 4E - 8e^{0.309x}$	-
0.992	$SYS = 1E - 5e^{0.236x}$	۵ گرم بر تن
0.983	$SYS = 0.000e^{0.185x}$	۲۰ گرم بر تن

* x غلظت جامد وزنی (%) و SYS تنش تسلیم برشی (Pa)

با توجه به مقادیر R^2 در جدول ۲ نتیجه می‌شود که مدل نمایی توصیف کننده مناسبی برای داده‌های تنش تسلیم برشی در نرخ‌های مختلف فلوکولانت است.

شکل ۳ نشان می‌دهد که با افزایش نرخ مصرف فلوکولانت در بازه صفر تا ۱۰ گرم بر تن، تنش تسلیم برشی در غلظت جامد ۶۴ تا ۶۸ درصد، بطور قابل ملاحظه‌ای افزایش یافت. این امر ناشی از جذب فلوکولانت روی سطح ذرات جامد و در نتیجه آن اتصال ذرات می‌باشد. بدین ترتیب مقاومت شبکه ذرات در سوسپانسیون و در نتیجه تنش تسلیم برشی افزایش می‌یابد. بنابراین می‌توان گفت در نرخ مصرف فلوکولانت کم، افزایش میزان مصرف موجب افزایش قابل ملاحظه تنش تسلیم برشی و کاهش کارایی جدایش جامد از مایع در تیکنر می‌شود. در نرخ مصرف فلوکولانت بیش از ۲۰ گرم بر تن، با افزایش نرخ مصرف فلوکولانت تنش تسلیم برشی با نرخ کمی افزایش می‌یابد که می‌تواند بعلت اشباع شدن سطح ذرات توسط زنجیرهای فلوکولانت باشد. تجربیات

دارد (مانند باطله فراوری مس حاوی ترکیبات سیلیکاتها و کربناته)، از آنجا که نقطه بار صفر این مواد در pH های متفاوتی اتفاق می افتد، بنابراین در یک pH مشخص برخی ذرات دارای بار مثبت و برخی دارای بار منفی هستند. این امر مطالعه رفتار این سیستمها را مشکل می کند. شکل ۶ تاثیر pH بر تنش تسلیم برشی سوسپانسیون باطله فراوری مس در غلظت جامد ۶۹ درصد را نشان می دهند. در این مرحله با هدف بررسی تاثیر عامل تنظیم کننده pH از دو نوع اسید استفاده شد.



شکل (۶) تاثیر pH بر تنش تسلیم برشی سوسپانسیون باغلظت جامد ۶۹ درصد

شکل ۶ نشان می دهد که با افزایش pH در بازه ۰٫۷ تا ۱۳، تنش تسلیم برشی از ۴۰ تا ۲۲۰ پاسکال افزایش یافت. بدین ترتیب می توان گفت با افزایش pH بار سطحی ذرات مختلف به نحوی تغییر کرده که نیروی جاذبه بین ذرات و در نتیجه تنش تسلیم برشی افزایش یافته است. بدین ترتیب می توان گفت، با افزایش pH کارایی جداسازی جامد از مایع کاهش می یابد. چنین رفتاری در کالکوپریت نیز مشاهده شده است بطوریکه با افزایش اسیدهای کلریدریک، سولفوریک و نیتریک تنش تسلیم سوسپانسیون کالکوپریت کاهش یافته اما میزان کاهش در حضور مواد شیمیایی مختلف یکسان نبوده است [۳]. در این پژوهش برای اطمینان از صحت آزمایشها به جای اسید کلریدریک از اسید سولفوریک استفاده شد. بررسی نتایج نشان داد با استفاده از اسید سولفوریک نیز نتایج مشابهی بدست آمد. تفاوت جزئی در نتایج بدست آمده از اسید سولفوریک و کلریدریک می تواند به ساختار و ترکیبات سطحی که در اثر استفاده از این دو اسید در سطح ذرات جامد بوجود می آید، مربوط شود [۳].

همانطور که ملاحظه می شود، با افزایش بخش نرمه از ۱۰ تا ۴۰ درصد در غلظت های ۶۷ و ۶۹ درصد، تنش تسلیم برشی از حدود ۵۰ تا ۲۰۰ پاسکال افزایش یافت. این امر می تواند ناشی از تغییر میزان نیروی واندروالس و پیوند هیدروژنی بین مولکول های آب و سطح جامد باشد. رابطه (۱) نشان می دهد که با کاهش ابعاد ذرات، نیروی واندروالس بین دو ذره کاهش می یابد. این در حالیست که در غلظت جامد مشخص با کاهش ابعاد ذرات، تعداد آنها در واحد حجم افزایش می یابد. افزایش تعداد ذرات موجب افزایش برهم کنش های بین ذرات شده و با وجود کاهش بزرگی نیروی واندروالس مقاومت شبکه افزایش می یابد. از سوی دیگر با کاهش ابعاد ذرات سطح کلی آنها در واحد وزن ذرات افزایش یافته و پیوند هیدروژنی بین مولکول های آب و سطح ذرات و در نهایت تنش تسلیم برشی افزایش می یابد.

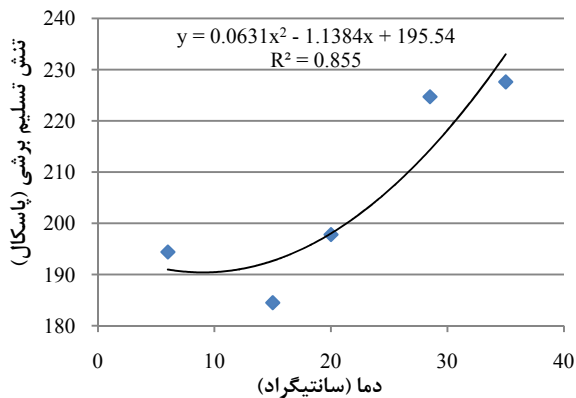
شکل ۵ نشان می دهد که در نرخ های مختلف فلوکولانت افزایش نرمه موجب افزایش تنش تسلیم برشی شد. بدین ترتیب می توان نتیجه گرفت که مصرف فلوکولانت و افزایش سهم نرمه دو عامل اصلی افزایش تنش تسلیم برشی هستند. در آسیابکنی با افزایش نرمه محتوای خوراک آسیاب، تنش تسلیم برشی افزایش یافته و سوسپانسیون انرژی ضربه گلوله ها را جذب می کند و کارایی خردایش کاهش می یابد. در این شرایط غلظت جامد می بایست کاهش یابد تا تاثیر افزایش نرمه در افزایش تنش تسلیم برشی سوسپانسیون خنثی شود.

در جداسازی جامد از مایع، افزایش نرمه موجب افزایش مقاومت سوسپانسیون در مقابل فشرده شدن می گردد. با توجه به اینکه کارایی جداسازی به قابلیت فشرده شدن سوسپانسیون و نرخ عبور آب از میان آن وابسته است، ضرورت دارد تاثیر نرمه بر نرخ جداسازی بررسی شود. بطور کلی با افزایش سهم نرمه غالباً کارایی جداسازی جامد از مایع در تیکنرها و فیلترها کاهش می یابد.

۴-۳- تاثیر pH

یکی از عوامل موثر در رفتار رئولوژیکی سوسپانسیونها pH محیط است. تغییرات pH موجب تغییر بار سطحی ذرات و وضعیت دو لایه الکتریکی می شود. با باردار شدن سطح ذرات، نیروی دافعه بین آنها ایجاد می شود و در نتیجه تنش تسلیم برشی کاهش می یابد. بنابراین در سوسپانسیون های متشکل از یک نوع ماده معدنی بیشترین تنش تسلیم برشی در نقطه بار صفر اتفاق می افتد که معادل با کمترین کارایی جدایش جامد از مایع می باشد. در شرایطی که چند نوع ماده معدنی وجود

مس، کارایی فرایندهای جداسازی جامد از مایع کاهش می‌یابد.



شکل (۸) تأثیر دما بر تنش تسلیم برشی سوسپانسیون باطله فراوری مس

۴- نتیجه‌گیری

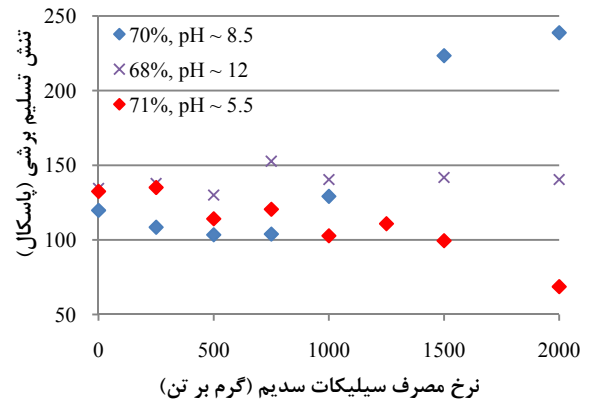
در این پژوهش تأثیر غلظت جامد، نرمه، pH، دما، نرخ فلوکولانت و متفرق‌کننده بر تنش تسلیم برشی سوسپانسیون باطله فراوری مس بررسی شد و تأثیر آن بر کارایی عملیات جداسازی جامد-مایع در تیکنرها و فیلترها تحلیل گردید. نتایج نشان داد که با افزایش غلظت جامد، تنش تسلیم برشی در نرخ‌های مختلف فلوکولانت بطور نمایی افزایش یافت. افزایش سهم نرمه در حضور و یا عدم حضور فلوکولانت موجب افزایش قابل توجه در تنش تسلیم برشی شد. با افزایش نرخ مصرف فلوکولانت تا ۱۰ گرم بر تن، تنش تسلیم برشی بطور قابل توجهی افزایش یافت در حالیکه در بازه بیش از ۲۰ گرم بر تن افزایش تنش تسلیم برشی ناچیز بود. علاوه بر آن نشان داده شد که با افزایش pH در بازه ۱ تا ۱۳ در غلظت جامد ۶۹ درصد، تنش تسلیم برشی از ۴۰ تا ۲۲۰ پاسکال افزایش یافت. علاوه بر آن با افزایش دما تنش تسلیم برشی افزایش یافت. نتایج نشان داد تأثیر سیلیکات سدیم به عنوان متفرق‌کننده در شرایطی که pH سوسپانسیون حدود ۵ باشد، بارز است. بدین ترتیب می‌توان گفت که افزایش بخش نرمه، pH، نرخ مصرف فلوکولانت و دما، موجب افزایش تنش تسلیم برشی و کاهش کارایی جداسازی جامد از مایع می‌گردد.

تشکر و قدردانی

نویسندگان مقاله از حمایت‌های مالی و معنوی شرکت ملی صنایع مس ایران تشکر و قدردانی می‌نمایند.

۳-۵- تأثیر سیلیکات سدیم

سیلیکات سدیم بعنوان متفرق‌کننده در فلوتاسیون کاربرد زیادی دارد [۲۴-۲۵]. شکل ۷ تأثیر سیلیکات سدیم در pH و غلظت جامدهای مختلف بر تنش تسلیم برشی را نشان می‌دهد.



شکل (۷) تأثیر نرخ مصرف سیلیکات سدیم بر تنش تسلیم برشی در pH های مختلف

همانطور که مشاهده می‌شود در pH حدود ۱۲، افزایش نرخ مصرف سیلیکات سدیم منجر به تغییر مشخصی در تنش تسلیم برشی نمی‌گردد. در pH حدود ۸/۵، افزایش نرخ مصرف سیلیکات سدیم تا ۷۵۰ گرم بر تن موجب کاهش جزئی تنش تسلیم برشی شده، لیکن از ۷۵۰ تا ۲۰۰۰ گرم بر تن افزایش قابل ملاحظه‌ای در تنش تسلیم برشی را نتیجه داده است. در شرایط اسیدی و pH حدود ۵/۵ افزایش نرخ مصرف سیلیکات سدیم موجب کاهش تنش تسلیم برشی شد. بدین ترتیب می‌توان گفت در صورتی که فرایند در شرایط اسیدی انجام می‌شد، استفاده از سیلیکات سدیم موجب کاهش تنش تسلیم برشی و افزایش کارایی جدایش جامد از مایع می‌گردد.

۳-۶- تأثیر دما

دما از عوامل مهم در رفتار رئولوژی سوسپانسیون‌های معدنی است. هرچند رفتار سوسپانسیون کانی‌های مختلف در برابر تغییرات دما متفاوت است. شکل ۸ تأثیر دما بر تنش تسلیم برشی سوسپانسیون باطله فراوری مس را نشان می‌دهد. شکل ۸ نشان می‌دهد که با افزایش دما، تنش تسلیم برشی سوسپانسیون باطله مس با غلظت جامد ۷۲ درصد، از حدود ۱۹۰ پاسکال تا ۲۳۰ پاسکال افزایش یافت. بنابراین می‌توان گفت با افزایش دمای سوسپانسیون باطله فراوری

مراجع

- [13] C.A.O. Hernandez, A.C. De Araujo, G.E.S. Valadao and S.C. Amarante (2005) "Pasting characteristics of hematite/quartz system", *Minerals Engineering*, 18, 935-939.
- [14] J. Henriquez and P. Simms (2009) "Dynamic imaging and modelling of multilayer deposition of gold paste tailings", *Minerals Engineering*, 22, 128-139.
- [15] S. Yin, A. Wu, K. Hu, Y. Wang and Y. Zhang (2012) "The effect of solid components on the rheological and mechanical properties of cemented paste backfill", *Minerals Engineering*, 35, 61-66.
- [16] S. Clayton, T.G. Grice and D.V. Boger (2003) "Analysis of the slump test for on-site yield stress measurement of mineral suspensions", *International Journal of Mineral Processing*, 70, 3-21.
- [17] D.V. Boger (2009) "Rheology and resources industries", *Chemical Engineering Science*, 64, 4525-4536.
- [18] H.G. Yang, C.Z. Li, H.C. Gu and T.N. Fang (2001) "Rheological behavior of titanium dioxide suspensions", *Journal of Colloid and Interface Science*, 236, 96-103.
- [19] M. He, Y. Wang and E. Forssberg (2006) "Parameter studies on the rheology of limestone slurries", *International Journal of Mineral Processing*, 78, 63-77.
- [20] S.P. Usher (2002) "Suspension dewatering: Characterization and optimization", Ph.D. Thesis, Department of Chemical Engineering, *The University of Melbourne*, Melbourne, Australia, 326.
- [21] J. Hulston, R.G. de Kretser and P.J. Scales (2004) "Effect of temperature on dewaterability of hematite suspensions", *International Journal of Mineral Processing*, 73, 269-279.
- [22] N. Pashias, D.V. Boger, J. Summers and D.J. Glenister (1996) "A Fifty cent rheometer for yield stress measurement", *Journal of Rheology*, 40, 1179-1189.
- [23] M.R. Garmsiri, H. Haji Amin Shirazi, K. Jookar and A. Arabpour (2012) "Effectiveness of variable factors affecting the efficiency of deep cone thickener", *Proceedings of 26th International Mineral Processing Congress*, India, Delhi, 1517-1530.
- [24] X. Ma (2011), "Effect of a low-molecular-weight polyacrylic acid on the coagulation of kaolinite particles", *International Journal of Mineral Processing*, 99, 17-20.
- [25] M.O. Silvestre, C.A. Pereira, R. Galery and A.E.C. Peres (2009) "Dispersion effect on a lead-zinc sulfide ore flotation", *Minerals Engineering*, 22, 752-758.
- [1] B. J. Johnson, G.V. Franks, P.J. Scales, D.V. Boger and T.W. Healy (2000) "Surface chemistry-rheology relationships in concentrated mineral suspensions", *International Journal of Mineral Processing*, 58, 267-304.
- [2] J. Addai-Mensah and C.A. Prestidge (2005) "Structure formation in dispersed systems", in *Coagulation and Flocculation*, Eds: H Stechemesser, B Dobias, Taylor and Francis.
- [3] L. Huynh, P. Jenkins and J. Ralston (2000) "Modification of the rheological properties of concentrated slurries by control of mineral solution interface chemistry", *International Journal of Mineral Processing*, 59, 305-325.
- [4] R. de Kretser and P.J. Scales (2008) "The effect of temperature on the yield stress of mineral suspensions", *Journal of Colloid and Interface Science*, 328, 187-193.
- [5] P.J. Scales, S.B. Johnson and T.W. Healy (1998) "Shear yield stress of partially flocculated colloidal suspensions", *AIChE Journal*, 44, 538-544.
- [6] B. Gladman, R.G. de Kretser, M. Rudman and P.J. Scales (2005) "Effect of shear on particulate suspension dewatering", *Chemical Engineering Research and Design*, 83, 933-936.
- [7] B.R. Gladman (2005) "The effect of shear on dewatering of flocculated suspensions", Ph.D. Thesis, *The University of Melbourne*, Melbourne, Australia, 319.
- [8] M.D. Green and D.V. Boger (1997) "Yielding of suspension in compression", *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 36, 4984-4992.
- [9] M. He, Y. Wang and E. Forssberg (2004) "Slurry rheology in wet ultrafine grinding of industrial minerals: a review", *Powder Technology*, 147, 94-112.
- [10] F.N. Shi and T.J. Napier-Munn (2002) "Effect of slurry rheology on industrial grinding performance", *International Journal of Mineral Processing*, 65, 125-140.
- [11] C.W. Bakker, C.J. Meyer and D.A. Deglon (2010) "The development of a cavern model for mechanical flotation cells", *Minerals Engineering*, 23, 968-972.
- [12] F. Boylu, K. Çinkü, F. Esenli and M. SabriÇelik (2010) "The separation efficiency of Na-bentonite by hydrocyclone and characterization of hydrocyclone products", *International Journal of Mineral Processing*, 94, 196-202.

The effect of properties of the suspension of copper processing tailings on shear yield stress and its significance to solids liquid separation

Mohammad Reza Garmsiri¹, Hassan Haji Amin Shirazi^{2*}

1. Mining Engineering Group, Young Research Society, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran, (Email: m.r.garmsiri@gmail.com).
2. Mining Engineering Group, Mineral Industries Research Centre, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran, (Email:hshirazi@uk.ac.ir).

ABSTRACT

Shear yield stress as a rheological property of suspensions affects the efficiency of some of the mineral processing methods such as solids liquid separation, grinding, classification, and tailings disposal. In this work, effect of solids concentration, fines extent, pH and temperature on the shear yield stress of the final tailings suspension of concentration plant 1 at Sarcheshmeh Copper Complex was investigated and eventually their impact on solids liquid separation was analyzed. The shear yield stress was calculated using the slump test results and the analytical model presented by Pashias. Results indicated that, with the extent of fines the shear yield stress increased considerably. An increase in flocculant dosage up to 10 g/t resulted in a significant increase in the shear yield stress. While, with the flocculant dosages higher than 20 g/t, increasing the flocculant dosage led to a slight increase in the shear yield stress. An increase in shear yield stress leads to a decrease in compressibility of suspension and as a result the efficiency of solids liquid separation decreases. These achievements can be beneficial to the efficiency of thickening and filtering.

ARTICLE INFO

Article history:

Received: July 14, 2013

Revised: Sept. 28, 2013

Accepted: Nov. 9, 2013

Key words:

Surface chemistry

Rheology

Shear yield stress

Inter particle forces

Suspension properties

All right reserved.

* Corresponding author