

تعیین ابعاد و چگالی لخته‌های تشکیل شده در تیکنر باطله کارخانه

فرآوری مگنتیت گل گهر سیرجان

غلامعباس پارساپور^۱، صمد بنیسی^۲

^۱- دانشجوی دکتری فرآوری مواد، دانشگاه شهید باهنر کرمان، Parsapour@kmpe.ir

^۲- استاد فرآوری مواد، دانشگاه شهید باهنر کرمان، Banisi@mail.uk.ac.ir

(دریافت ۱۹ خرداد ۱۳۹۲، پذیرش ۱۱ آذر ۱۳۹۲)

چکیده

اضافه کردن فلوکولانت به مخلوط‌های پایدار باعث اتصال ذرات به یکدیگر و تشکیل لخته می‌شود. تخمین اندازه لخته‌ها در مطالعه فرایندهای جدایش جامد از مایع حائز اهمیت است ولی به دلیل شکل پیچیده و نامنظم لخته‌ها، تخمین اندازه آن‌ها مشکل است. معمولاً یکی از پارامترهای قطر فرت (Ferret)، کوچکترین و میانگین قطر فرت، قطرهای معادل بر اساس مساحت و محیط برای تخمین اندازه لخته استفاده می‌شود. در این تحقیق لخته‌های تشکیل شده در باطله کارخانه فرآوری مگنتیت گل گهر با استفاده از روش‌های فوق اندازه‌گیری شدند. بهترین روش توصیف اندازه معادل، با مقایسه سرعت‌های ته‌نشینی حاصل از آزمایش‌های ته‌نشینی ناپیوسته و محاسباتی (تعیین اندازه و دانسیته با تحلیل تصویر) تعیین گردید. نتایج نشان داد که میانگین قطر فرت و اندازه معادل بر اساس مساحت لخته با خطاهای نسبی ۱۶ و ۱۷ درصد مناسب‌ترین پارامترها برای توصیف اندازه لخته می‌باشند. به‌عنوان مثال برای لخته تشکیل شده در پالپ ۵٪ جامد و ۲۰g/t فلوکولانت، میانگین قطر فرت ۳۳۸ میکرون با سرعت ۶۷cm/min تخمین زده شد. در صورتی که روش پیشنهادی در این تحقیق اندازه لخته را ۳۰۴ میکرون با سرعت ته‌نشینی ۵۴/۵cm/min پیش‌بینی می‌کند که با سرعت واقعی (۵۷cm/min) اختلاف نسبی ۴/۳٪ دارد. بنابراین روش پیشنهادی رفتار لخته‌ها را با دقت بالایی پیش‌بینی می‌کند.

کلمات کلیدی

اندازه لخته، سرعت ته‌نشینی، آزمایش‌های ته‌نشینی، میانگین قطر فرت، قطر معادل.

۱- مقدمه

۱-۱- لخته سازی

سرعت ته‌نشینی ذرات در مخلوط‌های متشکل از ذرات خیلی ریز بسیار پایین است، به همین دلیل فلوکولانت‌ها برای افزایش کارایی جدایش جامد از مایع در تیکنرها مورد استفاده قرار می‌گیرند. فلوکولانت‌ها پلیمرهای با زنجیره بلند می‌باشند که اضافه کردن آن‌ها به یک مخلوط رقیق پایدار، باعث ایجاد پل بین ذرات [۸-۱] و تشکیل لخته‌های متخلخل و نامنظم می‌گردد [۹-۱۰].

لخته‌ها شکل پیچیده، دانسیته پایین و سرعت ته‌نشینی بالایی دارند و همواره مقداری مایع درونشان به تله می‌افتد. میزان این مایع به فرایند شکل‌گیری لخته بستگی دارد [۹، ۱۱-۱۲]. خصوصیات لخته به ویژگی‌های جامد، مایع، مخلوط و فلوکولانت وابسته است [۱۳]. اندازه، دانسیته، ساختار و مقاومت لخته‌ها تأثیر زیادی بر کارایی فرایندهای جدایش جامد از مایع دارند [۱۴-۱۸]. به همین دلیل تعیین خصوصیات لخته‌ها در مطالعه فرآیندهای جدایش جامد از مایع از اهمیت بالایی برخوردار است.

۲- اندازه و دانسیته لخته

روش‌های مختلفی برای تعیین اندازه لخته وجود دارد. این روش‌ها به دو دسته کلی اندازه‌گیری مستقیم و غیر مستقیم تقسیم می‌شوند. روش تحلیل تصویر نمونه‌ای از روش‌های مستقیم است و روش تعیین اندازه لخته‌ها با استفاده از سرعت ته‌نشینی از روش‌های غیر مستقیم به شمار می‌رود.

روش‌های مبتنی بر اندازه‌گیری مستقیم دهه‌های اخیر بسیار مورد استفاده قرار گرفته است. در این روش‌ها ابتدا نمونه‌ای از لخته‌ها از مخلوط جدا می‌شود و پس از رقیق‌سازی تحت مطالعات میکروسکوپی قرار می‌گیرد [۱۹]. برای کم کردن احتمال شکست لخته‌ها در هنگام نمونه‌برداری و حفظ حالت طبیعی آن‌ها، نمونه برداری و انتقال نمونه‌ها به زیر میکروسکپ توسط یک پیپت با حداقل قطر دهانه داخلی ۳ میلی‌متر انجام می‌شود [۲۰، ۲۱-۲۲]. سپس به وسیله یک دوربین تصاویر لخته‌ها ضبط می‌شود و تحلیل تصاویر با استفاده از یک نرم‌افزار تحلیل تصویر انجام می‌شود. بعضی تجهیزات تجاری مانند Malvern Mastersizer و دستگاه اندازه‌گیری دانسیته لخته (Floc Density Analyzer; FDA) نیز به این منظور مورد استفاده قرار می‌گیرند [۲۳، ۱۹].

معمولاً تخمین اندازه لخته با استفاده از روش‌های تحلیل تصویر با اندازه‌گیری فقط یک پارامتر انجام می‌شود. این پارامترها

عبارتند از: قطر فرت (Ferret; d_{Fmax})، کوچکترین قطر فرت (d_{Fmin})، میانگین قطر فرت (d_F)، قطر معادل بر اساس تصویر سطح لخته (d_A) و قطر معادل بر اساس تصویر محیط لخته (d_p). از میان پارامترهای فوق، قطر معادل بر اساس مساحت، میانگین قطر فرت و کمترین قطر فرت به طور وسیعی در مطالعات گذشته مورد استفاده قرار گرفته‌اند [۲۴، ۱۰-۲۸]. همچنین در یک مورد، استفاده از دو پارامتر قطر معادل بر اساس مساحت و میانگین قطر فرت باعث بهبود در تخمین اندازه لخته گردید [۲۹].

قطر فرت (d_{Fmax}) بزرگترین فاصله ممکن بین دو صفحه موازی محاط بر ذره می‌باشد (شکل ۱). کمترین قطر فرت (d_{Fmin}) نیز کمترین فاصله ممکن بین دو صفحه موازی محاط بر ذره می‌باشد (شکل ۱) [۲۸]. متوسط هندسی کوچکترین قطر فرت و قطر فرت نیز به عنوان میانگین قطر فرت شناخته (d_F) می‌شود. قطر معادل بر مبنای تصویر سطح لخته معادل قطر دایره‌ای با مساحتی برابر سطح لخته است [۲۸-۲۹] و قطر معادل بر مبنای محیط نیز معادل قطر دایره‌ای با محیط معادل محیط لخته است.

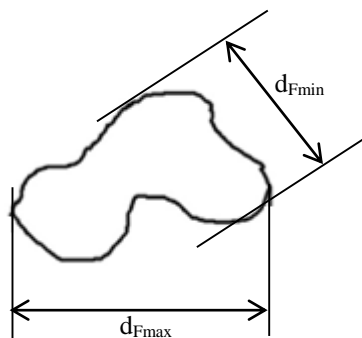
قطرهای معادل بر مبنای تصویر سطح (d_A) و تصویر محیط (d_p) شکل‌های نامنظم از روابط زیر محاسبه می‌شوند.

$$d_A = (4A/\pi)^{1/2} \quad (۱)$$

و

$$d_p = (P/\pi) \quad (۲)$$

که A و P ، به ترتیب مساحت و محیط تصویر لخته می‌باشند.



شکل ۱. قطر فرت و کمترین قطر فرت

یکی دیگر از خصوصیات مهم لخته، دانسیته آن است که از تقسیم مجموع جرم ذرات موجود در لخته و مایع محبوس شده در لخته بر حجم کل لخته حاصل می‌شود [۴۱]. دانسیته لخته (ρ_f) از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$\rho_f = \frac{A_s \times \rho_s + A_l \times \rho_l}{A_f} \quad (۳)$$

که در این رابطه A_s و A_l تصویر سطحی از لخته می‌باشند که

رابطه برای تخمین تاثیر درصد جامد بر سرعت ته‌نشینی ارائه شده است [۳۳]. رابطه‌ی زیر برای ذرات کروی ارائه گردیده است.

$$u_t = u_{t0}(1 - c)^n \quad (9)$$

که u_t سرعت حدی ته‌نشینی، u_{t0} سرعت ته‌نشینی حدی یک ذره منفرد، c کسر حجمی جامد و n تابعی از عدد رینولدز است که مقادیر آن در جدول ۱ آورده شده است [۳۳-۳۵].

جدول ۱. مقادیر n در اعداد رینولدز مختلف

عدد رینولدز	n
$Re_p < 0.1$	۴/۶۵
$0.1 < Re_p < 1.0$	$4/35 Re^{-1/2}$
$1.0 < Re_p < 500$	$1/45 Re^{-1/1}$
$500 < Re_p$	۲/۳۹

در این تحقیق روش‌های مختلف تخمین اندازه لخته با استفاده از مقایسه سرعت‌های ته‌نشینی آزمایشگاهی و تحلیلی مورد ارزیابی قرار گرفتند. اندازه و دانسیته لخته لازم برای تخمین سرعت ته‌نشینی محاسباتی از روش تحلیل تصویر بدست آمد. در نهایت بهترین روش برای توصیف اندازه لخته‌های نامنظم باطله سنگ آهن کارخانه فرآوری مگنتیت گل‌گهر سیرجان ارائه گردید. روشی جدیدی نیز برای تخمین اندازه لخته‌ها پیشنهاد شد.

۲- روش تحقیق

۲-۱- تهیه نمونه

نمونه‌های مورد نیاز برای انجام این تحقیق از ورودی تیکنر کارخانه فرآوری مگنتیت شرکت معدنی و صنعتی گل‌گهر (قبل از اضافه کردن فلوکولانت) در یک دوره زمانی ۶ ماهه تهیه شدند. F80 (اندازه ۸۰ درصد عبوری)، F50 (اندازه ۵۰ درصد عبوری) و F20 (اندازه ۲۰ درصد عبوری) نمونه‌ها به ترتیب برابر ۷۰، ۴۹ و ۳۵ میکرون و همچنین دانسیته خشک آن‌ها برابر ۳/۶ گرم بر سانتی‌متر مکعب بود.

۲-۲- آزمایش‌های ته‌نشینی ناپیوسته

در این تحقیق، آزمایش‌های ته‌نشینی در استوانه‌های مدرج شفاف یک لیتری با قطر ۶/۰۷ و ارتفاع ۳۴/۵ سانتی‌متر انجام شدند. برای انجام آزمایش‌ها ابتدا پالپ مورد نظر برای انجام آزمایش با مخلوط کردن میزان مشخصی از آب و نمونه درون استوانه مدرج آماده می‌شد. در مرحله بعد به میزان مورد نیاز فلوکولانت (پلی‌اکریل آمید با نام تجاری A25 که به طور معمول در کارخانه فرآوری مگنتیت گل‌گهر استفاده می‌شود) به استوانه

به ترتیب توسط جامد و مایع پوشیده شده و A_f نیز مساحت تصویر لخته است. ρ_s و ρ_f به ترتیب دانسیته جامد خشک و آب می‌باشند.

۳-۱- سرعت ته‌نشینی حدی

ذره‌ای که تحت نیروی وزن خود در حال ته‌نشینی در یک سیال است دارای حرکت شتابدار است تا زمانی که بین نیروی وزن و نیروی درگ تعادل به وجود آید که در این حالت شتاب ذره صفر می‌شود و ته‌نشینی با سرعت ثابتی ادامه پیدا می‌کند. به این سرعت ثابت، سرعت حدی (u_t) گفته می‌شود که از رابطه زیر محاسبه می‌شود [۳۰].

$$u_t = \sqrt{\frac{2gm_s(\rho_s - \rho)}{\rho\rho_s A_p C_D}} \quad (4)$$

که در این رابطه g شتاب ثقل، m_s جرم لخته، ρ_s دانسیته ذره، ρ دانسیته سیال، A_p تصویر سطح ذره در جهت حرکت و C_D ضریب درگ می‌باشد.

برای ذرات کروی با قطر d_s رابطه (۴) تبدیل به رابطه (۵) می‌شود [۳۰].

$$u_t = \sqrt{\frac{4gd_s(\rho_s - \rho)}{3\rho C_D}} \quad (5)$$

ضریب درگ برای ذرات کروی تابعی از عدد رینولدز به صورت $Re_p = d_s \rho u / \mu$ است که در آن μ ویسکوزیته سیال است. در اعداد رینولدز کوچک ($Re_p < 0.1$) طبق قانون استوکس ضریب درگ برابر است با [۳۰]:

$$C_D = 24/Re_p \quad (6)$$

و بنابراین سرعت حدی برابر است با:

$$u_t = \frac{gd_p^2(\rho_f - \rho)}{18\mu} \quad (7)$$

در زمانی که عدد رینولدز متوسط است ($0.1 < Re_p < 1000$)، ضریب درگ با رابطه زیر تخمین زده می‌شوند [30].

$$C_D = \left(\frac{24}{Re_p}\right)(1 + 0.14Re_p^{0.70}) \quad (8)$$

با افزایش غلظت جامد، لخته‌ها به یکدیگر نزدیک می‌شوند و فاصله بین آن‌ها برای عبور سایر لخته‌ها کم می‌شود و در نتیجه همه ذرات با سرعت یکسانی ته‌نشین می‌شوند [۳۱]. در درصد جامدهای خیلی بالا ساختار پالپ به قدری محکم می‌شود که یک شبکه پلاستیک به وجود می‌آورد. در نتیجه مقاومت پالپ در مقابل ته‌نشینی افزایش پیدا می‌کند، از این رو سرعت ته‌نشینی هر لایه از ذرات با افزایش درصد جامد به دلیل مقاومت مکانیکی لایه‌های پایین‌تر کاهش می‌یابد [۳۲]. ته‌نشینی با مانع معمولاً در فرایندهای ته‌نشینی و انتقال پالپ روی می‌دهد. چندین

که قابلیت ذخیره عکس و فیلم از اشیاء را دارد و از دیگر امکانات این نرم افزار می‌توان به اندازه‌گیری ابعاد اجسام اشاره کرد. با استفاده از این نرم افزار تصاویر لخته‌ها ذخیره شدند و با توجه به قابلیت‌های آن مقیاس تصاویر نیز روی آن‌ها ثبت گردید.

لخته‌های موجود در تصاویر ثبت شده با نرم افزار تحلیل تصویر ImageJ v. 1.47h پردازش و اندازه‌گیری شدند. به این صورت که ابتدا زمینه تصاویر حذف گردید و سپس تصاویر به دو رنگ سیاه و سفید تبدیل شدند و در نهایت لخته‌ها اندازه‌گیری شدند. شکل ۳ مراحل آماده سازی و پردازش یک لخته را نشان می‌دهد. ضمناً بعضی از محققین در مطالعه ساختار لخته‌ها و همچنین توزیع اندازه ذرات از این نرم افزار استفاده کرده‌اند [۲۸، ۴۰]. محیط، مساحت، قطر فرت و کمترین قطر فرت هر لخته توسط این نرم‌افزار قابل‌تعیین است.



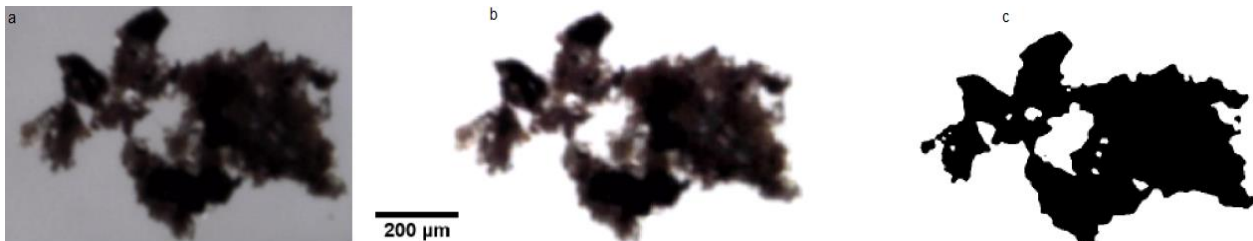
شکل ۲. میکروسکوپ دیجیتال Dino-Lite مدل AD7013MTL

اضافه می‌شد و محتویات استوانه مدرج با پنج بار سر و ته کردن استوانه مدرج مخلوط می‌شدند [۲، ۱۱، ۳۶-۳۸]، و در نهایت ارتفاع خط گل در زمان‌های مختلف ثبت می‌شد.

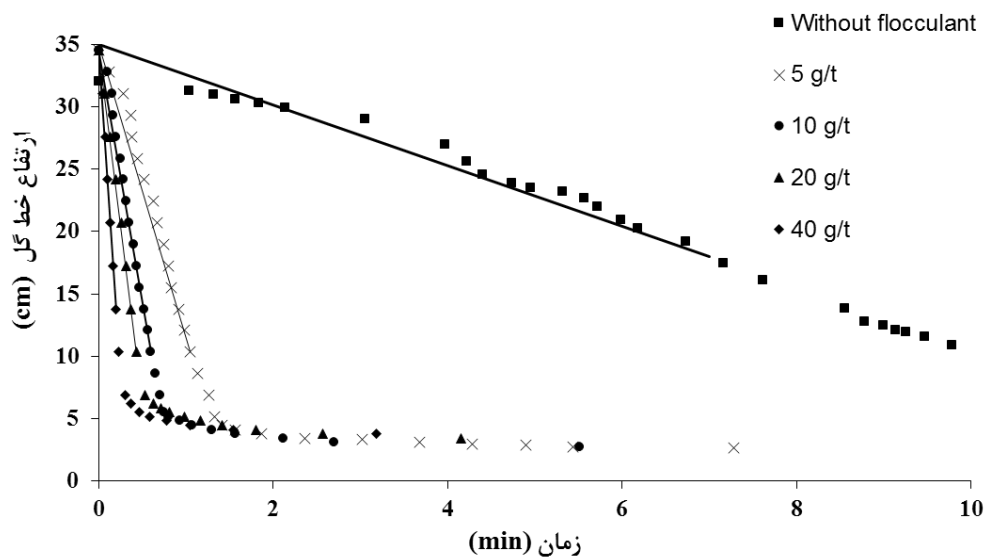
آزمایش‌های تهنشینی در درصد جامد ۵ و با استفاده از ۰، ۵، ۱۰، ۲۰ و ۴۰ گرم بر تن فلوکولانت و درصد جامد ۱۰ با ۱۰ گرم بر تن فلوکولانت و در محیط خنثی انجام شدند. شیب اولیه منحنی‌های تهنشینی (رسم ارتفاع سطح مشترک پالپ و مایع شفاف بر حسب زمان) به‌عنوان سرعت تهنشینی ذرات در نظر گرفته شد [۳۹].

۲-۳- روش تعیین اندازه و دانسیته لخته

در این تحقیق برای اندازه‌گیری توزیع اندازه لخته‌ها، یک قطره (تقریباً ۰/۱ میلی لیتر) از لخته‌ها برداشته می‌شد و با آب رقیق می‌گردید. برای کاهش احتمال شکست لخته‌ها این نمونه به وسیله یک پیت با دهانه سه میلیمتر برداشته شد. عکس دیجیتالی از لخته‌ها توسط یک میکروسکوپ دیجیتال (Dino-Lite مدل AD7013MTL - شکل ۲) با بزرگنمایی نوری حداکثر ۱۰۰ و دیجیتال ۲ گرفته شد. این میکروسکوپ دارای یک حسگر پنج مگاپیکسلی می‌باشد که می‌توان با استفاده از آن از اشیاء با وضوح حداکثر ۲۵۹۲×۱۹۴۴ عکس دیجیتالی تهیه کرد. بزرگنمایی این میکروسکوپ بستگی به فاصله آن از اجسام دارد و حداکثر بزرگنمایی آن ۱۰۰ در فاصله پنج سانتی متری از اشیاء است. همراه با این دستگاه، نرم افزار DinoCapture 2.0 است.



شکل ۳. مراحل آماده سازی و پردازش تصویر یک لخته (a): تصویر ضبط شده توسط میکروسکوپ، (b): حذف زمینه تصویر و (c): آماده سازی تصویر برای اندازه‌گیری با تبدیل به دو رنگ سیاه و سفید



شکل ۴. منحنی‌های ته‌نشینی حاصل از آزمایش‌های ته‌نشینی ناپیوسته با پالپ‌های با غلظت جامد ۵ درصد با تغییر میزان فلوکولانت

۳- ارائه و تحلیل یافته‌ها

۳-۲- تاثیر مقدار فلوکولانت بر اندازه و دانسیته لخته

لخته‌ها شکل‌های نامنظم و مختلفی دارند، یک نمونه از لخته‌های تشکیل شده در پالپ‌های با درصد جامد ۵ و با تغییر میزان فلوکولانت از ۰ تا ۴۰ گرم بر تن در شکل ۵ نمایش داده شده است. مشاهده می‌شود که با افزایش میزان فلوکولانت (شکل ۵) اندازه، شکل و دانسیته لخته‌ها تغییر می‌کند. اندازه لخته‌ها با افزایش میزان فلوکولانت افزایش می‌یابد و برعکس دانسیته آن‌ها کاهش می‌یابد. کاهش دانسیته به افزایش‌های خالی از جامد داخل لخته‌ها با افزایش میزان مصرف فلوکولانت مربوط می‌شود (شکل ۵). با توجه به اینکه در ته‌نشینی لخته‌ها، افزایش اندازه لخته‌ها و کاهش دانسیته آن‌ها نتایجی عکس یکدیگر دارند (افزایش اندازه باعث افزایش سرعت ته‌نشینی می‌شود که عامل مثبتی است و از طرفی کاهش دانسیته علاوه بر کاهش سرعت ته‌نشینی باعث کاهش درصد جامد تریز تیکنر می‌گردد که یک عامل منفی است). بنابراین تعیین اندازه و دانسیته لخته‌ها برای پیش‌بینی رفتار لخته‌ها که در طراحی و بهینه‌سازی عملکرد تیکنرها موثر است، ضروری می‌باشد.

با توجه به شکل‌های نامنظم لخته‌ها، تخمین اندازه آن‌ها برای مقایسه لخته‌های تشکیل شده در مقادیر مختلف فلوکولانت مشکل است. در این تحقیق کلیه پارامترهایی که به‌عنوان اندازه لخته استفاده می‌شوند (اندازه فرت، کوچکترین و میانگین اندازه فرت، قطر معادل بر اساس سطح و قطر معادل بر اساس محیط) با پردازش حداقل ۳۰ تصویر اندازه‌گیری شدند که نتایج آن در جدول ۳ آمده است. تعداد لخته‌های موجود در هر تصویر با توجه به اندازه آن‌ها متفاوت و از میانگین ۵ لخته در هنگام

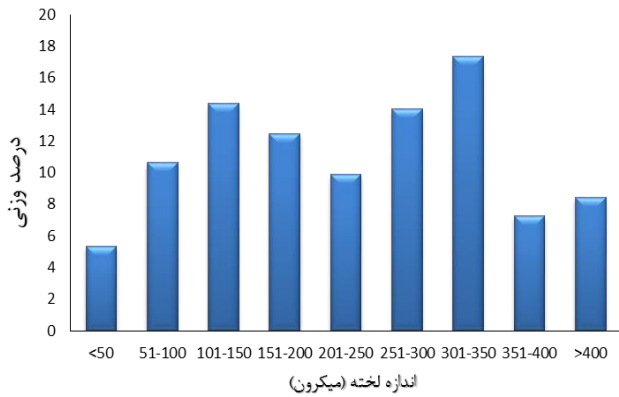
۳-۱- تاثیر مقدار فلوکولانت بر سرعت ته‌نشینی ذرات

اضافه کردن فلوکولانت به مخلوط باعث ایجاد پل بین ذرات و تشکیل لخته و در نتیجه افزایش سرعت ته‌نشینی پالپ می‌گردد. افزایش مقدار فلوکولانت باعث افزایش اندازه لخته‌ها و در نتیجه افزایش سرعت ته‌نشینی مخلوط می‌گردد. جدول ۲ سرعت‌های ته‌نشینی حاصل از آزمایش‌های ته‌نشینی ناپیوسته در مقادیر مختلف فلوکولانت در یک پالپ با درصد جامد ۵ را نشان می‌دهد. سرعت ته‌نشینی با افزایش میزان فلوکولانت شدیداً افزایش یافت. به‌عنوان مثال با افزایش میزان فلوکولانت از ۵ به ۴۰ گرم بر تن، سرعت ته‌نشینی از ۲۱ به ۱۰۸ سانتی‌متر بر دقیقه افزایش یافت. سرعت‌های ته‌نشینی نمایش داده شده در جدول ۲ از شیب اولیه منحنی‌های ته‌نشینی (شکل ۴) محاسبه گردیدند.

جدول ۲. سرعت ته‌نشینی ذرات در آزمایش‌های ته‌نشینی ناپیوسته با پالپ‌های با غلظت جامد ۵ درصد

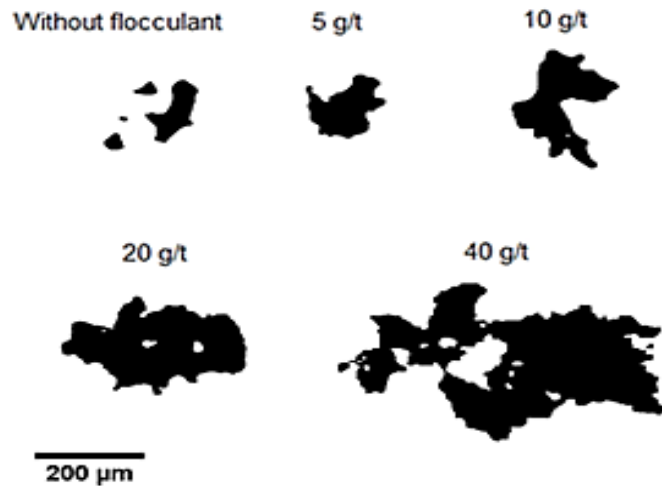
مقدار فلوکولانت (g/t)	سرعت ته‌نشینی (cm/min)
۰	$2/4 \pm 0/3$
۵	$21/1 \pm 2/7$
۱۰	$38/4 \pm 5/0$
۲۰	$57/0 \pm 7/4$
۴۰	$108/2 \pm 14/1$

بدست دهد که با به کارگیری معادلات سرعت ته نشینی (روابط (۷) و (۹)) سرعتی نزدیک به سرعت به دست آمده از آزمایش ته نشینی فراهم نماید، برتر شناخته می شود.



شکل ۶. دانه بندی لخته های تشکیل شده در پالپ با درصد جامد ۵ با استفاده از ۱۰ گرم بر تن فلوکولانت

استفاده از ۴۰ گرم بر تن فلوکولانت تا بیش از ۱۰۰ لخته در هنگام عدم استفاده از فلوکولانت متغیر بود. همچنین لخته های تشکیل شده در هر مقدار مصرف فلوکولانت دامنه دانه بندی وسیعی داشتند شکل ۶ دانه بندی حاصل از لخته های تشکیل شده در پالپ با درصد جامد ۵ هنگام استفاده از ۱۰ گرم بر تن فلوکولانت را نشان می دهد. بررسی اندازه های گزارش شده در جدول ۳ نشان می دهد که روش تخمین اندازه لخته تاثیر بارزی در تعیین اندازه لخته دارد. به عنوان مثال، اندازه لخته های تشکیل شده در پالپ با درصد جامد ۵ و با استفاده از ۱۰ گرم بر تن فلوکولانت بسته به روش اندازه گیری از ۲۲۷ تا ۴۸۳ میکرون در نوسان است. به عبارت دیگر نوع روش تعیین اندازه لخته می تواند نوسان بیش از ۱۰۰ درصدی را به همراه داشته باشد. با توجه به نقش مهم اندازه لخته ها در تحلیل فرایند ته نشینی، انتخاب روش مناسب تخمین اندازه لخته مهم می باشد. به این منظور در این تحقیق از سرعت ته نشینی برای تعیین بهترین روش تخمین اندازه استفاده شد. به بیان دیگر روشی که اندازه ای



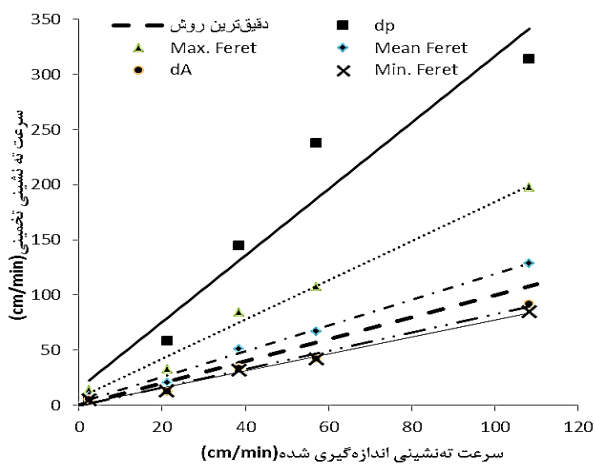
شکل ۵. لخته های تشکیل شده در پالپ های با درصد جامد ۵ و با مقادیر مختلف فلوکولانت

جدول ۳. تخمین اندازه لخته ها با استفاده از پارامترهای مختلف (پالپ های با درصد جامد ۵ و مقدار فلوکولانت ۰ تا ۴۰ گرم بر تن)

پارامتر مورد استفاده برای تخمین اندازه لخته					مقدار فلوکولانت (g/t)
$d_p(\mu m)$	$d_A(\mu m)$	$d_F(\mu m)$	$d_{Fmin}(\mu m)$	$d_{Fmax}(\mu m)$	
152 ± 11	93 ± 7	111 ± 8	87 ± 7	144 ± 11	۰
301 ± 23	140 ± 10	180 ± 14	145 ± 11	226 ± 17	۵
483 ± 26	233 ± 17	288 ± 22	227 ± 17	369 ± 28	۱۰
637 ± 51	270 ± 20	338 ± 25	268 ± 20	430 ± 32	۲۰
746 ± 56	403 ± 30	478 ± 36	388 ± 29	592 ± 44	۴۰

و همچنین خطای تعیین اندازه و دانسیته لخته است.

شکل ۷ نشان می‌دهد که تخمین اندازه لخته بر اساس مساحت نتایج کوچکتر از واقعیت را دارد در حالی که میانگین قطر فرت، اندازه لخته را از اندازه واقعی بزرگتر نشان می‌دهد. بنابراین استفاده از این دو پارامتر می‌تواند تخمین بهتری از اندازه لخته‌ها را ارائه دهد. به همین دلیل از میانگین این دو پارامتر به عنوان یک پارامتر جدید استفاده شد. شکل ۸ نشان می‌دهد که در موقع استفاده از متوسط اندازه تخمینی بر مبنای مساحت و میانگین اندازه فرت (خط مشکی) بیشترین نزدیکی بین مقادیر اندازه‌گیری شده و خط چین وجود دارد که حاکی از مناسب بودن تعیین اندازه لخته با این روش است.



شکل ۷. رابطه بین سرعت ته‌نشینی‌های اندازه‌گیری شده و محاسبه شده (تخمین اندازه با روش‌های مختلف: dp: تصویر محیط معادل، Max. Feret: قطر فرت، Mean Feret: میانگین قطر فرت، dA: تصویر مساحت معادل و Min. Feret: کوچکترین قطر فرت)

با توجه به اینکه لخته‌ها شکل‌های نامنظم و پیچیده‌ای دارند استفاده بیش از یک پارامتر منجر به تخمین دقیق‌تر اندازه لخته می‌شود. میانگین قطر فرت با توجه به استفاده از کوچکترین و بزرگترین قطر فرض کشیده بودن شکل لخته‌ها را دارد در صورتی که قطر معادل بر اساس سطح، فرض کروی بودن ذرات را دارد. بنابراین با توجه به این که لخته‌های نمایش داده شده در شکل ۵ با هر دو نوع شکل اشاره شده تفاوت دارند، بنابراین روش پیشنهادی با توجه به استفاده از خصوصیات دو نوع شکل متفاوت، مناسب تر از دیگر روش‌ها است. به همین دلیل متوسط اندازه تخمینی بر مبنای مساحت و میانگین اندازه فرت که در حقیقت از سه پارامتر (مساحت، قطر فرت و کوچکترین قطر فرت) استفاده می‌کند با دقت بالایی اندازه لخته را تخمین می‌زند.

۳-۳- سرعت ته‌نشینی محاسباتی لخته‌ها

برای محاسبه سرعت ته‌نشینی لخته‌ها با استفاده از روابط تحلیلی ته‌نشینی با مانع (روابط (۷) و (۹)) در اولین گام نیاز به تخمین دانسیته لخته‌ها می‌باشد. دانسیته لخته‌های مختلف نشان داده شده در شکل ۵، با استفاده از روش تحلیل تصویر و با استفاده از معادله (۳) محاسبه شد (جدول ۴). بعد از محاسبه دانسیته لخته‌ها با استفاده از روابط (۷) و (۹) سرعت ته‌نشینی لخته‌ها محاسبه گردید. همچنین ویسکوزیته آب بعد از اضافه کردن فلوکولانت به روش معکوس با اندازه‌گیری سرعت ته‌نشینی یک کره با اندازه و دانسیته مشخص توسط یک دوربین سرعت بالا (FUJI-FINEPIX-HS10- سرعت ۲۴۰ فریم بر ثانیه) اندازه‌گیری شد که برابر 0.01 Pa.s بدست آمد.

جدول ۴. دانسیته لخته‌های تشکیل شده در پالپ‌های با درصد جامد ۵ و میزان فلوکولانت‌های مختلف

میزان فلوکولانت (g/t)	۰	۵	۱۰	۲۰	۴۰
دانسیته لخته (g/cm^3)	۳/۲۵	۳/۱۴	۳/۰۶	۲/۹۵	۲/۸۸

* خطای اندازه‌گیری دانسیته 0.05 g/cm^3 است.

با تعیین سرعت ته‌نشینی محاسباتی برای لخته‌های ذکر شده در جدول ۳، برای لخته‌های تشکیل شده در هر پالپ، پنج سرعت ته‌نشینی با توجه به روش اندازه‌گیری اندازه لخته محاسبه شد. از آنجائیکه در عمل فقط یک سرعت ته‌نشینی برای هر آزمایش ته‌نشینی وجود دارد، مقایسه سرعت ته‌نشینی آزمایشگاهی با سرعت ته‌نشینی‌های محاسباتی می‌توانست بهترین روش تخمین اندازه لخته را مشخص نماید (شکل ۷). در شکل ۷ سرعت ته‌نشینی محاسباتی نسبت به سرعت ته‌نشینی اندازه‌گیری شده (آزمایشگاهی) رسم شده‌اند، خط پررنگ خط‌چین نشان دهنده دقیق‌ترین روش است و نزدیکی به این خط به معنی دقت بیشتر روش است. خطوط مربوط به روش اندازه‌گیری اندازه لخته، بهترین خطی است ($R^2 > 0.95$) که به نقاط آزمایشی هر روش برازش داده شد. در صورتی که ضریب زاویه هر کدام از این معادلات به عدد یک نزدیکتر باشد نشان‌دهنده نزدیک بودن سرعت ته‌نشینی محاسباتی و اندازه‌گیری شده در این روش و در نهایت مناسب بودن روش می‌باشد. با توجه به شکل ۷ مشخص شد که تخمین اندازه لخته با استفاده از دو روش قطر معادل بر مبنای مساحت و میانگین قطر فرت به ترتیب با خطای نسبی ۱۷ و ۱۶ درصد بهترین نتایج را در بردارند. لازم به ذکر است که این خطا مجموع خطاهای حاصل از فرض کروی بودن لخته

جدول ۵. اندازه و سرعت ته‌نشینی ذرات در پالپ با غلظت جامد ۱۰ درصد و با استفاده از ۱۰ گرم بر تن فلوکولانت

پارامتر استفاده شده برای تخمین اندازه لخته	d_{Fmax}	d_{Fmin}	d_F	d_A	d_P	میانگین d_A و d_F
اندازه لخته (μm)	۲۵۱	۱۶۵	۲۰۲	۱۶۴	۳۲۲	۱۸۳
سرعت ته‌نشینی تخمینی* (cm/min)	۳۳/۱	۱۴/۱	۲۱/۰	۱۴/۰	۵۴/۳	۱۷/۶

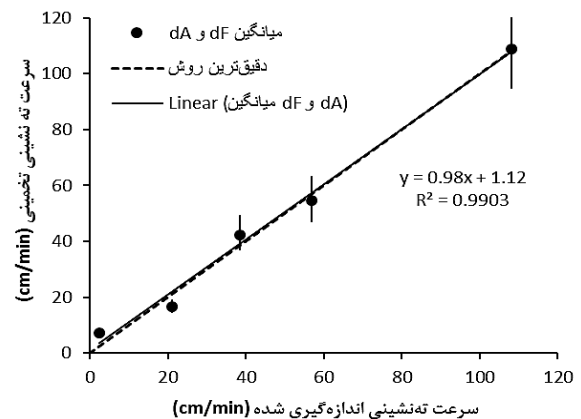
* سرعت ته‌نشینی اندازه‌گیری شده در این آزمایش برابر ۱۶/۹ سانتی متر بر دقیقه است.

حاصل از تخمین اندازه لخته‌های تشکیل شده در این آزمایش با روش‌های مختلف و همچنین سرعت‌های ته‌نشینی محاسباتی و سرعت ته‌نشینی آزمایشگاهی را نشان می‌دهد. با توجه به اطلاعات جدول ۵ مشخص است که سرعت ته‌نشینی حاصل از جایگزینی اندازه لخته با استفاده از روش پیشنهاد شده در این تحقیق نزدیکترین عدد به سرعت ته‌نشینی اندازه‌گیری شده می‌باشد به طوری که اختلاف این دو عدد ۰/۷ سانتی متر بر دقیقه است که معادل خطای نسبی ۴ درصد می‌باشد.

نتیجه‌گیری

- دانسیته لخته‌های تشکیل شده در باطله سنگ آهن گل‌گهر با افزایش میزان فلوکولانت از ۰ تا ۴۰ گرم بر تن از ۳/۲۵ به ۲/۸۸ گرم بر سانتی‌متر مکعب کاهش یافت.
- برای تعیین بهترین روش تخمین اندازه معادل لخته‌های باطله سنگ آهن از مقایسه سرعت ته‌نشینی حاصل از آزمایش‌های ته‌نشینی ناپیوسته و سرعت ته‌نشینی محاسباتی (با استفاده از روابط سقوط با مانع) استفاده شد.
- از میان روش‌های تعیین اندازه لخته (قطر فرت، میانگین و کمترین قطر فرت، قطر بر اساس تصویر سطح معادل و قطر بر اساس تصویر محیط معادل) اندازه تخمینی بر اساس مساحت لخته و میانگین قطر فرت بهترین تخمین اندازه واقعی لخته با خطای نسبی به ترتیب ۱۷ و ۱۶ درصد را فراهم کردند.
- استفاده از متوسط اندازه تخمینی بر اساس سطح لخته و میانگین قطر فرت، خطای نسبی تخمین اندازه لخته‌های نامنظم را به دلیل استفاده از سه پارامتر به جای یک پارامتر به ۴ درصد کاهش داد.
- اندازه لخته‌های تشکیل شده در باطله سنگ آهن گل‌گهر با افزایش میزان فلوکولانت از ۰ تا ۴۰ گرم بر تن از ۱۰۲ تا ۴۴۰ میکرون افزایش یافت.

با توجه به روش پیشنهادی تعیین اندازه معادل لخته‌ها با افزایش فلوکولانت در تیکنر باطله کارخانه فرآوری مگنتیت گل‌گهر سیرجان، اندازه لخته‌ها از ۱۰۲ تا ۴۴۰ میکرون افزایش می‌یابند در حالیکه دانسیته لخته‌ها از ۳/۲۵ تا ۲/۸۸ گرم بر سانتی متر مکعب کاهش یافت. بنابراین با افزایش مقدار فلوکولانت در این تیکنر می‌توان ظرفیت آن را افزایش داد به عنوان مثال افزایش میزان مصرف فلوکولانت از ۱۰ گرم بر تن (مقداری که هم اکنون در کارخانه استفاده می‌شود) به ۲۰ گرم بر تن باعث افزایش سرعت ته‌نشینی از ۳۸/۴ به ۵۷/۰ سانتی متر بر دقیقه می‌شود که این به معنی امکان افزایش ظرفیت تیکنر از ۵۰ تن بر ساعت فعلی به حدود ۷۴ تن بر ساعت می‌باشد در ضمن این تغییر باعث کاهش ۶ درصدی غلظت جامد ته‌ریز می‌گردد که می‌توان با افزایش ارتفاع بستر گل در تیکنر آن را جبران کرد.



شکل ۸. رابطه بین سرعت ته‌نشینی محاسباتی (تخمین اندازه لخته‌ها با متوسط اندازه بر مبنای مساحت و میانگین اندازه فرت) و سرعت ته‌نشینی اندازه‌گیری شده (خطوط تیره عمودی محدوده خطا را نشان می‌دهند)

برای اعتبار سنجی روش ارائه شده یک آزمایش ته‌نشینی با پالپ ۱۰ درصد جامد و با استفاده از ۱۰ گرم بر تن فلوکولانت انجام گرفت. اندازه لخته‌های تشکیل شده در این آزمایش با روش‌های مختلف بین ۱۶۴ تا ۳۲۲ میکرون در نوسان بود. سرعت ته‌نشینی محاسباتی نیز با توجه به اندازه لخته تخمینی از ۱۴ تا ۵۴/۳ سانتی متر بر دقیقه بدست آمد. جدول ۵ نتایج

- [13] Moudgil, Brij M., and Shah, Bharat D.; 1986; "Selection of flocculants for solid-liquid separation processes", In *Advances in Solid-Liquid Separation*. ed. H.S., Muralidihara. Ohio, pp. 191-202.
- [14] Larue, O., and Vorobiev; 2003; "Floc size estimation in iron induced electrocoagulation and coagulation using sedimentation data", *International Journal of Mineral Processing*, 71, 1-15.
- [15] Li, T., Zhu, Z., Wang, D., Yao, C., and Tang, H.; 2007; "The strength and fractal dimension characteristics of alum-kaolin flocs", *International Journal of Mineral Processing*, 82, 23-29.
- [16] Wang, Y., Gao, B.Y., Xu, X.M., Xu, W.Y., and Xu, G.Y.; 2009; "Characterization of floc size, strength and structure in various aluminum coagulants treatment", *Journal of Colloid and Interface Science*, 332, 354-359.
- [17] Zhu, Z. Li, T., Lu, J., Wang, D., and Yao, C.; 2009; "Characterization of kaolin flocs formed by polyacrylamide as flocculation aids", *International Journal of Mineral Processing*, 91, pp. 94-99.
- [18] Nasser, M.S., Twaiq, F.A., and Onaizi, S.A.; 2012; "An experimental study of the relationship between eroded flocs and cohesive beds in flocculated suspensions", *Minerals Engineering*, 30, 67-74.
- [19] Gregory, J.; 2009; "Monitoring particles aggregation processes", *Advances in Colloid and Interface Science*, 147-148, pp.109-123.
- [20] Spicer, P.T., and Pratsinis S. E.; 1996; "Shear-induced flocculation, in the evolution of floc structure and the shape of the size distribution at steady state", *Water Research*, Vol. 30(5), pp. 1049-1056.
- [21] Patrick, T. S., Keller W., and Pratsinis, S. E.; 1996; "The Effect of Impeller Type on Floc Size and Structure during Shear-Induced Flocculation", *Journal of Colloid and Interface Science*, 184, 112-122.
- [22] Liao, B.Q., Droppo, I.G., Leppard, G.G., and Liss, S.N.; 2006; "Effect of solids retention time on structure and characteristics of sludge flocs in sequencing batch reactors", *Water Research*, 40, 2583-2591.
- [23] Owen, A.T., Fawell, P.D., Swift, J.D., and Farrow, J.B.; 2002; "The impact of polyacrylamide flocculant solution age on flocculation performance", *International Journal of Mineral Processing*, 67, pp.123-144.
- [24] Adachi, Y., and Tanaka, Y.; 1997; "Settling velocity of an Aluminium-Kaolinite floc", *Water Research*, 31 (3), 449-454.
- [25] Glover, S. M., Yao-de Y., Jameson, G. J., and Biggs, S.; 2000; "Bridging flocculation studied by light scattering and settling", *Chemical Engineering Journal*, 80, 3-12.
- [26] Rahmani, N. H. G., Dabros, T., and Masliyah, J. H.; 2004; "Evolution of asphaltene floc size distribution in organic solvent under shear", *Chemical Engineering Science*, 59, 685-697.
- [27] Marinoni, N., Pavese, A., Foi, M., Trombino, L.; 2005; "Characterisation of mortar morphology in thin sections by digital image processing", *Cement Concrete Research*, 35, 1613-1619.
- [28] Mazzoli, A., and Favoni, O.; 2012; "Particle size, size distribution and morphological evaluation of airborne dust particles of diverse woods by scanning electron microscopy and image processing program", *Powder Technology*, 255, 65-71.

- افزایش مصرف فلوکولانت در تیکنر باطله کارخانه فرآوری مگنتیت گل گهر از ۱۰ به ۲۰ گرم بر تن، افزایش ظرفیت تیکنر از ۵۰ به ۷۴ تن بر ساعت را ممکن می‌سازد.

تقدیر و تشکر

بدینوسیله از تمامی پرسنل شرکت معدنی و صنعتی گل گهر سیرجان به دلیل همکاری در اجرای این تحقیق و همچنین اجازه انتشار نتایج آن تشکر به عمل می‌آید.

مراجع

- [1] Attia, Y.A.; 1992; "Flocculation", In *Colloid Chemistry in Mineral Processing*, ed. J.S., Laskowski, and J., Ralston. Elsevier Science & Technology Books Publisher, New York, pp. 277-308.
- [2] Farrow, J.B., and Swift, J.D.; 1996; "A new procedure for assessing the performance of flocculants", *International Journal of Mineral Processing*, 46, 263-275.
- [3] Jones, F., Farrow, J.B., and Bronswijk, W.V.; 1998; "Effect of caustic and carbonate on the flocculation of haematite in synthetic Bayer liquors", *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 142, 65-73.
- [4] Hogg, R.; 2000; "Flocculation and dewatering", *International Journal of Mineral Processing*, 58, 223-236.
- [5] Pearse, M.J.; 2003; "Historical use and future development of chemicals for solid-liquid separation in the mineral processing industry", *Minerals Engineering*, 16, 103-108.
- [6] Droppo, I.G., Exall, K., and Stafford, K.; 2008; "Effects of chemical amendments on aquatic floc structure, settling and strength", *Water Research*, 42, 169-179.
- [7] Usher, S.P., Spehar, R., and Scales, P.J.; 2009; "Theoretical analysis of aggregate densification: Impact on thickener performance", *Chemical Engineering Journal*, 151, 202-208.
- [8] Owen, A.T., Nguyen, T.V., and Fawell, P.D.; 2009; "The effect of flocculant solution transport and addition conditions on feedwell performance in gravity thickeners", *International Journal of Mineral Processing*, 93, 115-127.
- [9] Jarvis, P., Jefferson, B., Gregory, J., and Parsons, S.A.; 2005; "A review of floc strength and breakage", *Water Research*, 39, 3121-3137.
- [10] He, W., Nan, J., Li, H., and Li, S.; 2012; "Characteristic analysis on temporal evolution of floc size and structure in low-shear flow", *Water Research*, 46, 509-520.
- [11] Hogg, R., and Bunnaul, P.; 1992; "Sediment compressibility in thickening of flocculated suspensions", In *Minerals and Metallurgical Processing*, AIME Transactions, Vol.292, 184-188.
- [12] Wills, B.A., Napier-Munn T.J.; 2006; "Wills' Introduction to Mineral Processing Technology", 7th Edn., Elsevier Science & Technology Books Publisher.

- [37] Banisi, S., Yahyaei, M.; 2008; "*Feed dilution based design of a thickener for refuse slurry of a coal preparation plant*", International Journal of Coal Preparation and Utilization, 28, 201-223.
- [38] Parsapour, G.H. A. , Hossininasab, M., Yahyaei, M., and Banisi, S.; 2012; "*Effect of mode of flocculation on flocs sedimentation behavior in various regions of thickeners*", XXVI International Mineral Processing Congress (IMPC), NewDelhi, India, 4151-4162.
- [39] Fitch, B.; 2004; "*Batch tests predict thickener performance*", Chemical Engineering, 1971, 83-88.
- [40] Clercq, B. D., Lant, P.A., and Vanrolleghem, P.A., "*Focused beam reflectance technique for in situ particle sizing in wastewater treatment settling tanks*", Journal of Chemical Technology and Biotechnology, 79, 610-618.
- [41] Vaezi, G. F., Sanders, R. S., and Masliyah, J. H.; 2011; "*Flocculation kinetics and aggregate structure of kaolinite mixtures in laminar tube flow*", Journal of Colloid and Interface Science, 335, 96-105
- [29] Al-Thyabat, S., and Miles, N.J.; 2006; "*An improved estimation of size distribution from particles profile measurements*", Powder Technology, 166, 152-160.
- [30] Tilton, J. N.; 2008; "*Fluid and Particle Dynamics: In Perry, ed. R. H., Perry's Chemical Engineers' Handbook*", McGraw-Hill Co., USA.
- [31] Mandersloot, W G B, Scott, K J, and Geyer, C P; 1986; "*Sedimentation in the hindered settling regime*", In ed. H. S. Muralidhara, Advances in Solid-Liquid Separation, pp 63-77.
- [32] Fitch, B.; 1962; "*Sedimentation process fundamentals. Society of Mining Engineers*", Trans, AIME, 223, 129-137.
- [33] Hoerner, S. F.; 1965; "*Fluid Dynamic Drag*", New York.
- [34] Richardson, J.F., and Zaki, W.N.; 1954; "*Sedimentation and fluidization: Part I*". Trans. Instn Chem. Engrs (London), 32, 35-52.
- [35] Bargiel, M., and Tory, E. M.; 2013; "*Extension of the Richardson-Zaki equation to suspensions of multisized irregular particles*", International Journal of Mineral Processing, 120, 22-25.
- [36] Pearse, M.J.; 1980; "*Factors affecting the laboratory sizing of thickeners. In fine particle processing*", ed. P. Somasundaran. AIME, Chapter 81, pp. 1619-1642.