نشریه علوم و مهندسی جداسازی
دوره سوم، شماره دوم، سال ۱۳۹۰، صفحه ۴۳ تا ۵۶

Journal of Separation Science and Engineering
Vol. 3, No. 2, pp. 43-56

بررسی پارامترهای تاثیرگذار بر فرآیند جداسازی جامد-مایع در تیکنر آزمایشگاهی مجتمع مس سرچشمه

علی رضا آقاجانی شهریور[۱]، عطاالله سلطانی گوهرریزی[۱*]، مجید ابراهیم زاده قشلاقی[۱]، علی محبی[۱]، امیر صرافی[۱]، مصطفی حسینی روح الامینی[۲]

۱. دانشگاه شهید باهنر کرمان، بخش مهندسی شیمی (a.soltani@mail.uk.ac.ir)
۲. پژوهشگر فرآوری مواد، مرکز تحقیق و توسعه، مجتمع مس سرچشمه

مشخصات مقاله

تاریخچه مقاله:
دریافت: ۴ مرداد ۹۰
دریافت پس از اصلاح: ۱۶ مهر ۹۰
پذیرش نهایی: ۱۰ آبان ۹۰

کلمات کلیدی:
تیکنر
فلوکولانت
فلوکولاسیون
درصد جامد
ته نشینی
چاهک خوراک

چکیده

آب‌گیری از کنسانتره و تغلیظ، از فرآیندهای فرعی مهم در اکثر عملیات معدنی می باشد. طراحی نامناسب و یا عملیات آب‌گیری نامطلوب می‌تواند ظرفیت عملیاتی واحد را محدود کند. معمولاً هدف اولیه از تیکنر گرفتن حداکثر مایع از یک دوغاب رقیق خوراک، و بنابراین ایجاد یک گل تا حد امکان تغلیظ شده می‌باشد. در این تحقیق یک تیکنر آزمایشگاهی در مجتمع مس سرچشمه پس ازساخت مخزن خوراک دهی و نصب تجهیزات مورد نیاز راه اندازی شد. پارامترهایی از قبیل تاثیر دبی خوراک، مقدار فلوکولانت، درصد جامد ورودی خوراک و ارتفاع چاهک خوراک مورد مطالعه قرار گرفت. در مرحله دوم تحقیق تیکنر آزمایشگاهی توسط روش دینامیک سیالات محاسباتی مدل‌سازی شد و اعتبارسنجی مدل صورت گرفت. تطبیق خوبی بین داده های آزمایشگاهی و مدل سازی مشاهده گردید. سپس تاثیر پارامترهای عملیاتی بر عملکرد تیکنر با استفاده از داده های شبیه سازی مورد بررسی قرار گرفت.

* عهده دار مکاتبات

حقوق ناشر محفوظ است.

۱- مقدمه

ته‌نشینی یا رسوب یک جامد درون سیال بوسیله نیروی ثقلی یکی از پر استفاده‌ترین روش‌های جداسازی جامد از مایع می‌باشد. این روش عمدتاً در صنایع معدنی و شیمیایی کاربرد دارد. یک راه معمول برای جدا کردن جامدات از مایعات در حجم بالا استفاده از ته‌نشینی تحت نیروی جاذبه در ظرف‌هایی که شستشوگرها، کلاریفایرها و تیکنرها نامیده می‌شوند، می باشد[۱]. جداسازی مایع-جامد بوسیله ته‌نشینی ثقلی کاربردهای زیادی دارد. تیکنرهای ثقلی می‌توانند حجم زیادی از یک دوغاب رقیق را غلیظ کنند. این دوغاب وارد یک چاهک خوراک مرکزی می‌شود. چاهک خوراک بدین منظور قرار داده شده است که انرژی جنبشی جریان ورودی را کاهش داده و جریان را به منطقه اصلی تیکنر هدایت کند. جامدهای ته‌نشین شده تشکیل یک بستر می‌دهند و غلظت جامد در این بستر به سمت خروجی افزایش می‌یابد به همین دلیل نام تیکنر برای این دستگاه در نظرگرفته شده است. مایع عاری از جامد در لاندرهای جانبی جمع آوری شده و از آنجا خارج می‌شوند[۲]. استفاده از فلوکولانت‌های پلیمری مصنوعی در تیکنرها باعث می‌شود که بهم چسبندگی زیاد و سریعی در بین جامدات رخ دهد که این باعث ته‌نشینی زیاد و سریع جامدات می‌شود. همچنین اثر فلوکولانت باعث می‌شود که در یک تیکنر مشخص بار ورودی بیشتری داشته باشیم یا برای بار ورودی مشخص از تیکنر کوچکتری استفاده کنیم. بهینه کردن فرآیند فلوکولاسیون موضوع اصلی در بسیاری از تیکنرهای مرسوم خیلی بزرگ نبوده است. برای بهبود عملکرد تیکنرها پروژه‌هایی از سال ۱۹۸۸ با حمایت ۱۴ کمپانی از صنعت معدن شروع شده است، که طراحی تیکنرها در این مدت عمدتاً بواسطه کارهای تجربه صورت گرفته است. گانترت[۳] اثر سرعت پاروها و ارتفاع تیغه آنها را در عملکرد تیکنر مورد بررسی قرار داد. بوسیله نتایج بدست آمده از پنج تیکنر در اندازه واقعی گانترت تعیین کرد که افزایش ارتفاع تیغه و سرعت چرخش پاروها موجب بهبود در جمع‌آوری رسوبات ته تیکنر می‌شود.

وود و همکارانش[۴] مصرف فلوکولانت، دانسیته جریان ته‌ریز و ظرفیت تیکنر که به شدت تلاطم در طول فلوکولاسیون بستگی داشت را در آزمایشات خود اندازه گیری کردند. بورگر و همکارانش[۵] از ارزیابی CFD برای پیش‌بینی عملکرد چاهک خوراک استفاده کردند. در تحقیق آنها اندازه‌گیری سینتیک فلوکولاسیون با راکتور لوله‌ای، اثر درصد جامد، شدت توربالنسی، نوع فلوکولانت و مقدار آن مورد مطالعه قرار گرفت. فارو و همکارانش[۶] از مدلسازی موازنه جمعیتی (PB) برای توصیف ریاضی از سینتیک رشد به هم چسبیدن و شکستن ذرات استفاده کردند. در این مطالعات درک بنیادی از عملکرد پاروها بوسیله ارتباط CFD و عملکرد تیکنر در اندازه پایلوت بدست آمد.

کاهان و همکارانش[۷] و وایت[۸]، فرآیند فولاکولاسیون را با استفاده از یک راکتور لوله‌ای با خوراک های معدنی مختلف بررسی کردند. آنها از موازنه جمعیتی برای توصیف فرآیند فولاکولاسیون در شرایط اختلاط متفاوت استفاده نمودند. ساتلو و همکارانش[۹] با استفاده از تصویر برداری رنگی از یک تیکنر در اندازه کوچک برای بررسی اثر اندازه تیغه‌ها استفاده کردند. مطالعات آنها نشان داد اختلاط قابل توجهی در بستر با استفاده از پاروها بدست آمد. پائولین و همکارانش[۱۰] از دینامیک سیالات محاسباتی برای مدل سازی چاهک خوراک در تیکنر بوکسیت برای نشان دادن اثر دبی جریان بر ذرات استفاده کردند.

در مطالعاتی که از طرف اوون[۱۱] صورت گرفت روش-های مختلف پاشش فلوکولانت و اثر آن بر عملکرد چاهک خوراک بررسی شد و همچنین شرایط مختلف خوراک‌دهی مورد مطالعه قرار گرفت.

در مطالعات آکادمی انجام گرفته رفتار بهم‌چسبندگی برای چگالی پایین و ذرات ریز صورت گرفته است و این تفاوت قابل ملاحظه‌ای با سیستم‌های معدنی که تراکم بالایی دارند و اندازه ذرات آنها نوعاً درشت است، دارد. همچنین بیشتر مطالعات صورت گرفته بصورت جامع کل تیکنر را مورد بررسی قرار نداده است بلکه جزء خاصی از تیکنر در این مطالعات مورد مطالعه و ارزیابی قرار گرفته است. در این تحقیق برای مطالعه کلی رفتار تیکنر باطله در در مجتمع مس سرچشمه، پایلوت آزمایشگاهی از تیکنر برای بررسی پارامترهای تاثیرگذار بر عملکرد تیکنر طراحی و پس از ساخت مخزن خوراک‌دهی و نصب تجهیزات مختلف از قبیل لوله‌ها، پمپ‌ها و شیرالات راه اندازی شد. سپس مدل‌سازی بر روی تیکنر برای مقایسه داده‌ها صورت گرفت. در این تحقیق نتایج آزمایشگاهی با نتایج مدل سازی مقایسه گردید.

۲- طراحی و راه اندازی تیکنر آزمایشگاهی

جداسازی یک سوسپانسیون رقیق بوسیله ته‌نشین ثقلی به دو فاز مایع شفاف و سوسپانسیونی با درصد جامد بالا ته-نشینی نامیده می‌شود. مکانیزم فرآیند ته‌نشینی ثقلی با

مشاهده رسوب یک سوسپانسیون در داخل یک استوانه شیشه-ای قابل مطالعه و بررسی می‌باشد. معادله اصلاح شده استوکس[۲] می‌تواند برای محاسبه تخمین سرعت ته نشینی بکار رود. این معادله بصورت زیر می‌تواند نوشته شود:

$$v = \frac{gd^2(\rho - \rho_f)}{18\mu} R \qquad (۱)$$

که R در این معادله ضریب تصحیحی است که اثرات ویسکوزیته و دانسیته در آن در نظر گرفته شده است. جهت طراحی یک واحد پیوسته ابتدا سرعت‌های ته‌نشینی را با آزمایش‌های غیر پیوسته محاسبه می‌نمایند، و هر آزمایش ته-نشینی غیر پیوسته نقطه مشخصی از تیکنر پیوسته را نشان می‌دهد.

در این مطالعه تیکنری با مخزن استوانه‌ای از جنس ورق آهن به ارتفاع ۰/۷ متر و قطر ۰/۷۵متر طراحی و راه اندازی شد. بررسی تاثیر اثر فلوکولانت و تزریق آن بر سیستم در طراحی مربوطه نقش اساسی را داشته است. در طراحی صورت گرفته سیستم تزریق فلوکولانت طوری در نظر گرفته شد، که امکان تزریق فلوکولانت در نقاط مختلف خط لوله جریان فراهم شود. همچنین ارتفاع چاهک خوراک برای بررسی آن بر عملکرد تیکنر متغیر ساخته شد. در شکل ۱ نمایی از تیکنر باطله آزمایشگاهی نشان داده شده است.

۳- نتایج آزمایشگاهی

نمونه از دوغاب برای آنالیز نوع عناصر موجود در آن توسط آزمایش XRF مورد بررسی گرفت که نتایج این آزمایش در جدول ۱ آورده شده است. بطوری که مشاهده می شود بیشتر این دوغاب را سیلیس تشکیل داده است.

شکل (۱) نمای تیکنر باطله (آزمایشگاهی)

جدول (۱) نتایج آزمایش XRF از دوغاب

Ca	٪۰/۰۹	Co	٪۰/۰۲
Fe	٪۲/۸۵	S	٪۰/۹۳
Mo	٪۰/۰۱۴	SiO_4	٪۶۳/۱۴
As	٪۰/۰۰۰۱	Al_2O_3	٪۱۶/۲۷
Pb	٪۰/۰۰۶۵	Ni	٪۰/۰۱۳۸
Sb	٪۰/۰۰۱۶	Au	٪۰/۰۰۰۰۰۸
Se	٪۰/۰۰۰۱	Ag	٪۰/۰۰۰۰۵

۳-۱- تاثیر دبی خوراک

بررسی اثر دبی خوراک را می‌توان توسط دو پارامتر درصد جامد خروجی و ارتفاع بستر در تیکنر مورد مطالعه قرار داد. تغییر دبی خوراک با دوز فلوکولانت ۲ $\frac{gr}{ton}$ با درصد جامد ورودی ۱۱٪ در شکل ۲ مشاهده می‌شود. چنان چه مشاهده می‌شود با افزایش دبی به دلیل ورود ذرات جامد بیشتر ارتفاع بستر ذرات جامد و همچنین درصد جامد خروجی افزایش یافته است. به ازای هر افزایشی که در دبی ایجاد می‌شود، به جهت حفظ دوز فلوکولانت در یک مقدار ثابت دبی فلوکولانت نیز افزایش داده شده است.

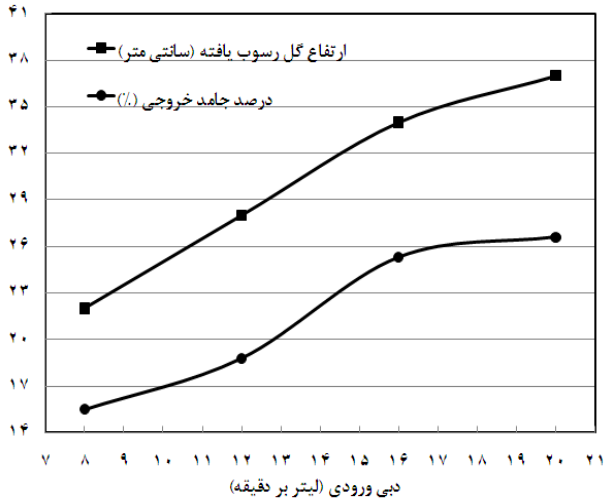
مشاهدات نشان داد افزایش بیش از حد بستر بطوری که چاهک خوراک در داخل بستر قرار گیرد عملیات فلوکولاسیون و اثر آن را تحت تاثیر قرار داده و کاهش می‌دهد.

۳-۲- تاثیر درصد جامد ورودی

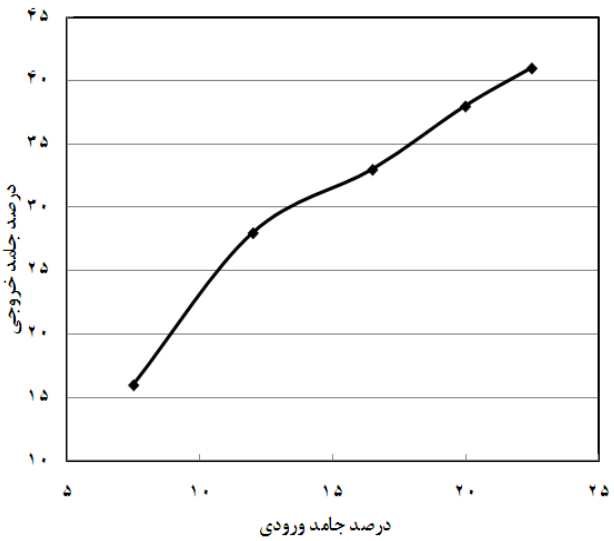
تغییر درصد جامد در خوراک ورودی در دو پارامتر می-تواند اثر خود را نمایان سازد. اول اینکه با کاهش درصد جامد ورودی، مقدار جامد ورودی در یک دبی ثابت خوراک به تیکنر کاهش می‌یابد و برعکس. کاهش مقدار جامد ورودی به تیکنر باعث کاهش ارتفاع بستر رسوب یافته در تیکنر می‌شود. دوم اینکه چون ارتفاع بستر با درصد جامد خروجی در ارتباط می-باشد، از این رو با تغییر ارتفاع بستر درصد جامد خروجی نیز تغییر می‌کند.

همان‌طور که در شکل‌های ۳ و ۴ نشان داده شده است برای یک دبی ثابت خوراک ۱۳/۸ $\frac{lit}{\min}$ و دوز فلوکولانت ثابت با تغییر درصد جامد ورودی، درصد جامد خروجی و ارتفاع بستر تغییر می‌یابد. همان طوری که در شکل ۳ مشاهده می-شود، با افزایش درصد جامد ورودی، درصد جامد خروجی نیز افزایش می‌یابد. با این که در حالت پایا در یک ارتفاع بستر ثابت مقدار جامد ورودی با جامد خروجی برابر می‌باشد. ولی در

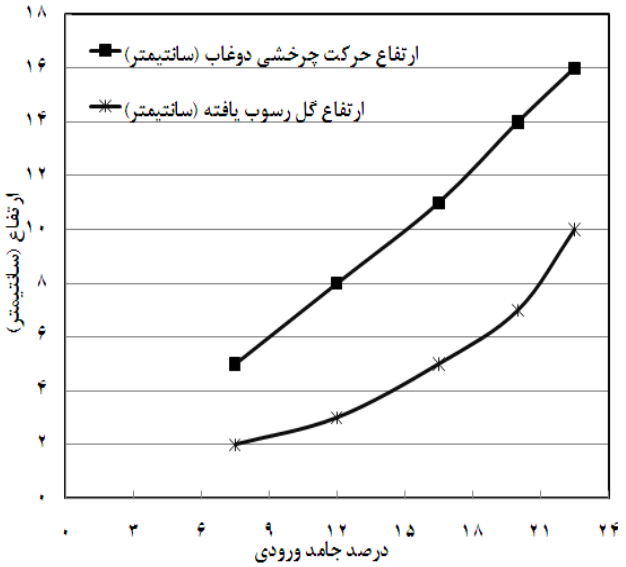
حالتی که دبی فلوکولانت جهت ثابت ماندن میزان مصرفی فلوکولانت به ازای تن جامد ورودی تغییر نکند، عملکرد تیکنر به شدت تغییر خواهد کرد و بنابراین این مسئله قابل تامل می-باشد. زیرا چنان چه دبی خوراک ثابت باشد و فقط درصد جامد تغییر کند و دبی فلوکولانت برای ثابت نگه داشتن دوز فلوکولانت تغییر نکند در این حالت بهم چسبیدگی به شدت افزایش می‌یابد و این ممکن است به شدت عملکرد تیکنر را تحت تاثیر قرار دهد و شرایط کنترل را سخت کند. همچنین در حالتی که کاهش درصد جامد در خوراک ورودی به تیکنر را داریم چون درصد جامد خروجی تەریز کاهش می‌یابد برای بازیابی آب بیشتر باید تغییرات لازم اعمال شود.



شکل (۲) منحنی تغییرات ارتفاع بستر و درصد جامد خروجی با تغییرات دبی



شکل (۳) منحنی تغییرات درصد جامد خروجی با درصد جامد ورودی

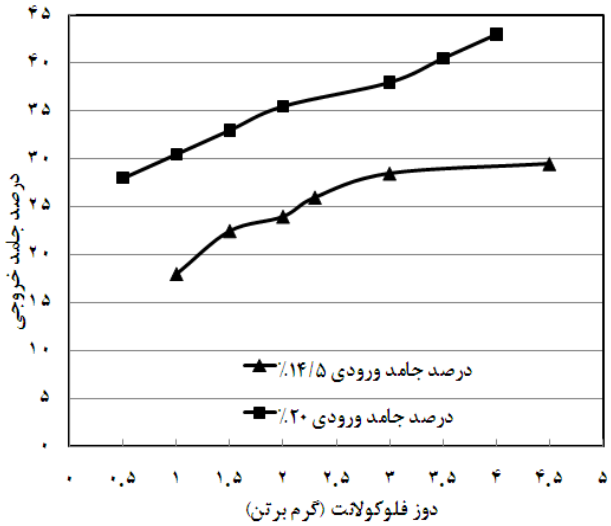


شکل (۴) منحنی تغییرات ارتفاع بستر و ارتفاع حرکت کاتوره ای با درصد جامد ورودی

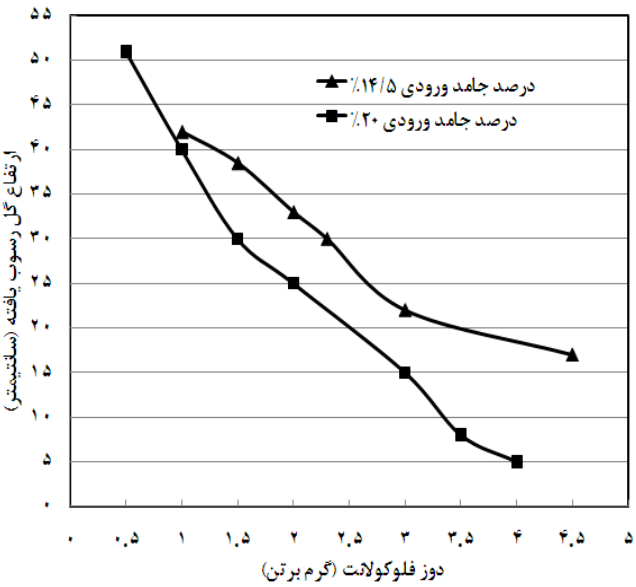
۳-۳- تاثیر دوز فلوکولانت

تغییرات دوز فلوکولانت بصورت بهینه شده برای تیکنرها استفاده می‌شود. بطوری که افزایش بیش از حد فلوکولانت بعد از مقدار بهینه تاثیر چندانی روی عملکرد تیکنر و عملیات فلوکولاسیون نخواهد داشت. از این رو باید تغییرات دوز فلوکولانت بصورت بهینه بررسی شده باشد. در این آزمایش خوراک با یک دبی ($۱۳/۸ \frac{lit}{\min}$) و کسر جامد ثابت وارد تیکنر شده و دبی آب خروجی از بالا و جریان تەریز نیز ثابت نگه داشته شد. تنها پارامتر متغیر، دبی یا به عبارتی دوز فلوکولانت اضافه شده به خوراک جهت بررسی تاثیرات آن در کسر جامد جریان تەریز و همچنین ارتفاع بستر جامد در تیکنر بود. آزمایشات ارتباط شدید دوز فلوکولانت با کسر جامد خروجی از تیکنر و ارتفاع بستر را نشان داد و بطوری که در شکل‌های ۵ و ۶ دیده می‌شود، با افزایش مقدار دوز فلوکولانت در خوراک ورودی به تیکنر ارتفاع بستر جامد موجود در تیکنر کاهش پیدا کرده و برعکس کسر جامد خروجی از تیکنر نیز افزایش پیدا می‌کند. دلیل این امر این است که با افزایش مقدار فلوکولانت ذرات بیشتری از جامد موجود در ورودی به تیکنر تحت اثر فلوکولانت قرار می‌گیرند و در نتیجه به هم پیوستگی ذرات بیشتر شده و طول زنجیره‌ها افزایش پیدا کرده و در نتیجه به لحاظ وزن بالای مواد جامد سرعت تەنشینی آن‌ها بالا رفته و بستری با درصد جامد زیاد و ارتفاع کم در داخل تیکنر ایجاد می‌شود. همان‌طوری که در اشکال دیده می‌شود، افزایش مقدار فلوکولانت پس از یک حدی تاثیر چندانی روی پارامترهای

وابسته ندارد و در واقع افزایش فلوکولانت بیشتر از یک حد تغییر چندانی روی درصد جامد خروجی از تیکنر و هم چنین ارتفاع بستر جامد موجود در آن ندارد. علت این امر این است که جامد موجود در خوراک مقدار محدودی بوده و اضافه کردن فلوکولانت بیش از حد نیاز موجب اشباع شدن محلول شده و با توجه به این که زنجیره‌ها تا یک حد خاصی می‌توانند، رشد کنند و در صورتی که بیش از آن حد رشد کنند شکسته می‌شوند، بنابراین مقدار اضافی فلوکولانت یا به همان صورت به بیرون از تیکنر هدایت، یا باعث ایجاد حالت سوسپانسیونی در محلول موجود در تیکنر خواهد شد که در هر دو حالت موجب اختلال در عملکرد تیکنر خواهد گردید.



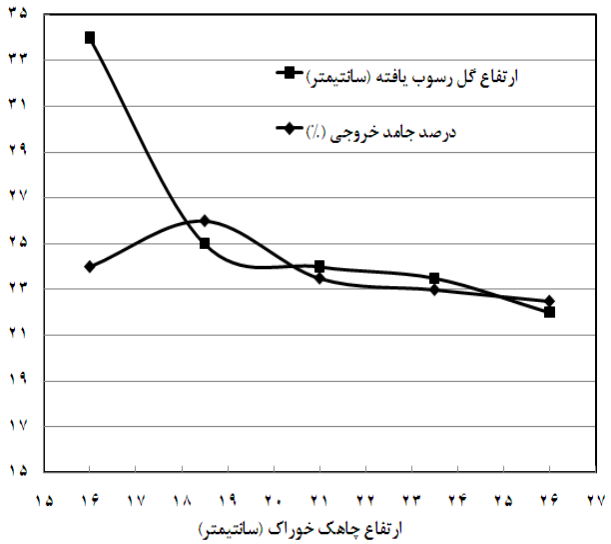
شکل (۵) تاثیر دوز فلوکولانت بر درصد جامد خروجی



شکل (۶) تاثیر دوز فلوکولانت بر ارتفاع بستر رسوب

۳-۴- تغییر ارتفاع چاهک خوراک

بررسی اثر ارتفاع چاهک خوراک بر روی ارتفاع بستر و غلظت خروجی در یک دبی، دوز فلوکولانت و درصد جامد ورودی ثابت صورت گرفت. چنان که در شکل ۷ مشاهده می‌شود، غلظت خروجی با تغییر ارتفاع چاهک خوراک چندان تغییر نمی‌کند. اثر ارتفاع چاهک خوراک بیشتر در اندازه توده ذرات می‌باشد. البته در حالتی هم که تاثیر متقابل سایر متغیرها را روی هم در نظر گرفتیم ارتفاع چاهک خوراک تاثیر زیادی روی غلظت (کسر جامد) خروجی از تیکنر نداشت.



شکل (۷) منحنی تغییر ارتفاع بستر و غلظت خروجی با ارتفاع چاهک خوراک

۴- مدل سازی

۱-۴- معادلات بقا و ممنتوم

استفاده از دیدگاه اولرین- اولرین برای حل معادلات حاکم بر جریان جهت شبیه‌سازی مناسب می‌باشد. این مدل نسبت به مدل لاگرانژین اثر متقابل فازها را بهتر در نظر می‌گیرد و همچنین وقتی درصد حجمی فاز جامد زیاد باشد مدل اولرین- اولرین بسیار مناسب‌تر از مدل لاگرانژی است. معادلات پیوستگی و مومنتوم برای فاز پیوسته (c) و پراکنده (d) نوشته می‌شود. معادلات پیوستگی بیانی برای بقای جرم و معادلات ممنتوم بیانی برای بقای ممنتوم می‌باشند. بدلیل اینکه در تیکنر انتقال حرارتی اتفاق نمی‌افتد معادلات انرژی در نظر گرفته نشده‌اند. بطور کلی در این شبیه‌سازی فرض‌های جریان غیر قابل تراکم، همدما، توربالنت و ویسکوزیته ثابت فازها در نظر گرفته شده است.

معادلات پیوستگی:

$$\rho_C\left[\frac{\partial \alpha_C}{\partial t}+\nabla.(\alpha_C U_C)\right]=0 \quad (۲)$$

$$\rho_d\left[\frac{\partial \alpha_d}{\partial t}+\nabla.(\alpha_d U_d)\right]=0 \quad (۳)$$

ρ دانسیته، α درصد حجمی، t زمان و U بردار سرعت می‌باشد.

معادلات ممنتوم:

$$\rho_C\left[\frac{\partial(\alpha_C U_C)}{\partial t}+\nabla.(\alpha_C U_c U_C)\right]= \quad (۴)$$
$$-\alpha_C\nabla P+\mu_C\nabla^2(\alpha_c U_c)+S_{M.C}$$

$$\rho_d\left[\frac{\partial(\alpha_d U_d)}{\partial t}+\nabla.(\alpha_d U_d U_d)\right]= \quad (۵)$$
$$-\alpha_d\nabla P+\mu_d\nabla^2(\alpha_d U_d)+S_{M.d}$$

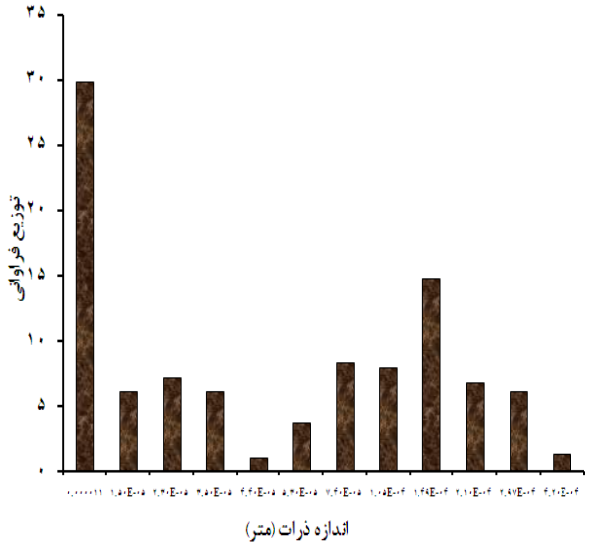
در معادلات بالا μ ویسکوزیته دینامیکی، P فشار و S_M ترم منبع بخاطر نیروهای حجمی می‌باشد.

از مدل k-ε که مهمترین مدل تلاطم در کاربردهای مهندسی می‌باشد، استفاده شد. در مدل k-ε ویسکوزیته μ_t به انرژی جنبشی توربالانسی (k) و نرخ افت توربالانسی (ε) وابسته است. در این تحقیق از مدل موازنه جمعیتی (Population Balance) برای مدلسازی انعقاد و شکست ذرات جامد در فاز پراکنده استفاده شده است. مدل موازنه جمعیتی یک مدل ریاضی است که برای توصیف تغییر در توزیع اندازه ذرات در هر لحظه کاربرد دارد. مدل موازنه جمعیتی در سیستم‌های کوگولاسیون یا فلوکولاسیون، کریستالیزاسیون، کاهش اندازه در اثر سایش، انعقاد قطرات در استخراج حلال یا فلوتاسیون کاربرد دارد[۱۲].

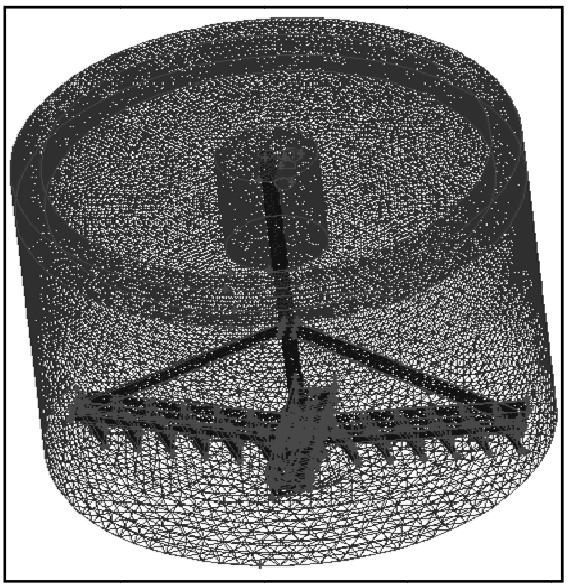
اسمولوچووسکی برای اولین بار مدل موازنه جمعیتی را برای مدل‌سازی سینتیک فلوکولاسیون پیشنهاد کرد و سه مکانیسم ممکن برای برخورد ذرات را نشان داد: ۱) ته نشینی تفاضلی، ۲) حرکت بروانی، ۳) تنش سیال[۱۲].

اساساً مدل موازنه جمعیتی یک توزیع اندازه ذرات را بوسیله تقسیم محدوده از اندازه ذرات به دسته‌های جدا از هم فراهم می‌کند. نتایج حاصل از مدل، در واقع در یک سیستم از معادلات دیفرانسیلی که توصیفی از مقدار انباشتگی یا اتلاف تعداد ذرات یا جرم در هر دسته از اندازه‌ها می‌باشد[۱۳]. مدل موازنه جمعیتی ممکن است شامل ترم بهم چسبیدگی یا ترم شکست یا هردوی آنها باشد. توزیع اندازه ذرات در ورودی خوراک تیکنر در شکل ۸ نشان داده شده است.

در این مطالعه برای کرل بهم چسبیدگی و شکست از مدل لئو و لهر[۱۴] استفاده شد. در نهایت تمامی معادلات حاکم با استفاده از نرم افزار ANSYS Fluent 12 حل شدند. در این شبیه‌سازی از قاعده دیفرانسیلی مرکزی برای فشار، قاعده درجه اول پیشرو برای کسر حجمی و قاعده هیبرید برای دیگر متغیرها و از الگوریتم سیمپل سی برای ارتباط بین سرعت و فشار استفاده شد. شکل ۹ هندسه محاسباتی مورد استفاده را نشان می دهد.



شکل (۸) توزیع اندازه ذرات در ورودی به تیکنر (آنالیز باطله نهایی مجتمع مس سرچشمه)



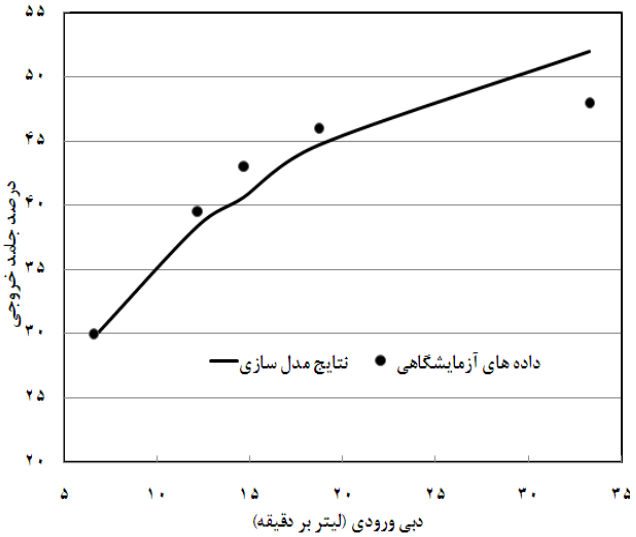
شکل (۹) هندسه تیکنر آزمایشگاهی

۵- اعتبارسنجی مدل

۵-۱- بررسی اثر دبی خوراک

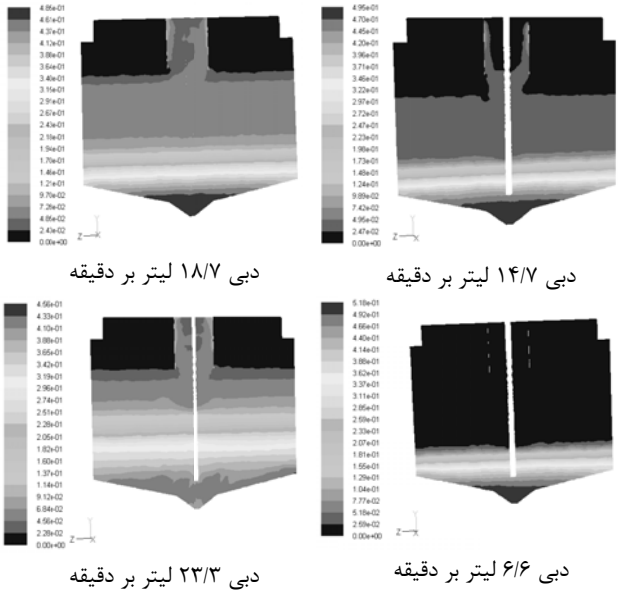
در واقع اعتبارسنجی مدل و بررسی نتایج بدست آمده از مدل در سه حالت مختلف انجام گرفت. در حالت اول دبی

خوراک در درصد جامد ورودی ثابت ۲۲/۵٪ و دوز ثابت فلوکولانت ۳/۵ $\frac{gr}{ton}$ با توزیع اندازه ذرات مطابق با شکل ۸ برای بررسی درصد جامد خروجی و موازنه جرمی صورت گرفته در مدل صورت پذیرفت. اعتبارسنجی مدل برای بررسی تیکنر باطله و حصول اطمینان از داده‌های خروجی الزامی می‌باشد. چنان که در شکل ۱۰ مشاهده می‌شود تغییر دبی خوراک موجب تغییر در درصد جامد خروجی از ته ریز تیکنر می‌شود. مقایسه صورت گرفته با داده‌های آزمایشگاهی تطبیق خوبی از مدل را نشان می دهند. در واقع منحنی شکل ۱۰ در یک دبی ثابت خروجی از ته‌ریز صورت گرفت. هدف از این کار بررسی تغییرات غلظت خروجی از سیستم بود. هرچند افزایش غلظت خروجی با تغییر دبی از پارامترهای مشخصی می‌باشد ولی تاثیر اثر فلوکولاسیون و بازه تغییرات غلظت از عوامل مهم در این بررسی بودند. از طرفی دیگر برای مقایسه نتایج مدل و داده‌های آزمایشگاهی تهیه چنین داده‌هایی ضروری بود. تطابق خوبی بین داده‌های مدل و آزمایشگاهی در دبی‌های کم مشاهده می‌شود. می‌توان علت این موضوع را به داده‌های آزمایشگاهی ارتباط داد. از این رو که در دبی‌های کم کنترل شرایط در محیط آزمایشگاهی آسان بوده و نتایج دقیق حاصل شده است.

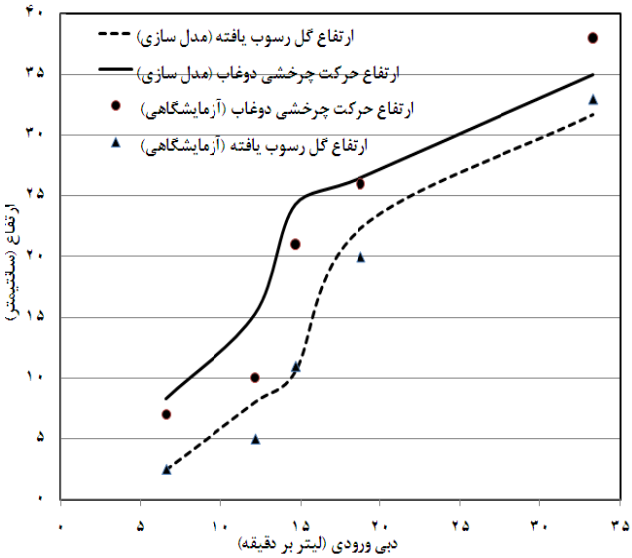


شکل (۱۰) تاثیر تغییرات دبی بر درصد جامد خروجی در درصد جامد ورودی ۲۲/۵٪

نظریه‌های کلاسیک راجع به ناحیه تراکم (ته‌نشینی) براساس الگوی ایده‌آل جریان در این ناحیه پایه‌گذاری شده است. در این نظریه فرض شده ذرات جامد بصورت عمودی به سمت پایین حرکت می‌کنند و مایع جابه‌جا شده با ذرات جامد به سمت بالا بطور عمودی حرکت می‌کند. الگوی جریان ایده‌آل در آزمایش‌های با استوانه یا بشر ته‌نشینی قابل دستیابی است. اما حقیقت در عمل چنین چیزی را در آزمایشات پیوسته نشان نداد. در مشاهدات آزمایشگاهی مشخص شد که جریان در داخل مخروط تک محوری نیست و مسئله توسعه تئوری فشردگی/نفوذپذیری است که بتواند این وضعیت و احتمالاً رفتار ذرات ته نشین شده را توصیف کند. الگوی جریان در ناحیه ته‌نشینی در مشاهدات آزمایشگاهی به این صورت بود که ذرات جامد ابتدا بصورت عمودی و سپس اغلب بصورت افقی مسیر تقریباً مارپیچی را به طرف مرکز خروجی طی می‌کردند. می‌توان این حرکت مارپیچ مانند ذرات را به دبی خوراک، فرآیند فلوکولاسیون، طراحی تیغه پاروها، سرعت چرخش، خواص جریان سیال دوغاب ارتباط داد. مایعی که از جامد در حال تغلیظ جابه جا می‌شود، اساساً در مسیر عمودی به سمت بالا حرکت کرده تا اینکه به فصل مشترک ناحیه شفاف/تراکم برسد و از میان آن گذشته تا به مسیر چرخش سیال در ناحیه شفاف برسد. در کارهای آزمایشگاهی صورت گرفته دو ناحیه برای بررسی ارتفاع در نظر گرفته شد. یکی ارتفاع گل رسوب یافته و دیگری ارتفاع ناحیه حرکت مارپیچی که این ناحیه، منطقه حرکت کاتوره‌ای ذرات نام گذاری شد. این مشاهده ایده‌آل بودن جریان در ناحیه تراکم را رد کرد. در مطالعات مدل‌سازی در نظر گرفتن این ناحیه با خطا همراه بود هرچند ناحیه با کنتور رنگ کم آبی برای این مرز تعریف شد ولی بیان آن بصورت قاطع امکان‌پذیر نمی‌باشد. همان‌طور که در شکل ۱۱ نشان داده شده است کنتورهای کسر حجمی در هر اجرای برنامه رسم گردیده است. چنان مشاهده می‌شود با افزایش دبی خوراک ارتفاع بستر افزایش می یابد، این تغییر در دبی‌های بالا روند صعودی بالایی دارد علت این امر افزایش مقدار جامد ورودی با خوراک است. همچنین با افزایش جامد ورودی در اثر افزایش دبی در خوراک تاثیر فلوکولاسیون در یک دبی ثابت فلوکولانت کاهش می‌یابد. این امر موجب بوجود آمدن سطحی می‌شود که ذرات جامد بصورت معلق در فاز آب می‌باشند. مقایسه داده‌های مدل برای تغییرات ارتفاع رسوب با داده‌های آزمایشگاهی در شکل ۱۲ مشاهده می‌شود. چنان که در این شکل مشاهده می‌شود دو ارتفاع برای رسوب جامد در نظر گرفته شده تغییرات این دو ارتفاع چنان چه اشاره شد بستگی به عوامل مختلفی دارد. بطور کلی در دبی‌های پایین وجود ناحیه حرکت کاتوره‌ای به سختی قابل رویت می‌باشد. ولی با افزایش دبی تغییر ناگهانی در این ناحیه بوجود آمده و رشد سریع منطقه حرکت چرخشی را خواهیم داشت. تغییر ناگهانی در منحنی شکل ۱۲ بیان گر این موضوع است.



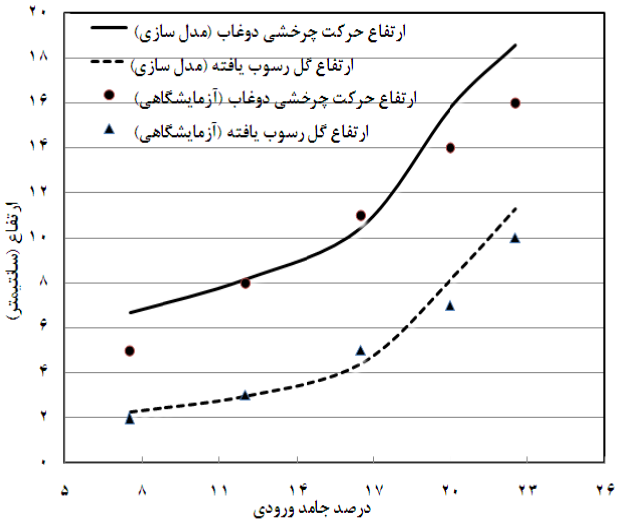
شکل (۱۱) مقایسه ارتفاع بستر رسوب یافته در تیکنر با تغییر دبی



شکل (۱۲) تغییرات ارتفاع بستر با تغییر دبی خوراک

۵-۲- تاثیر درصد جامد ورودی بر ارتفاع رسوب

افزایش درصد جامد نیز در واقع همان نقش افزایش دبی را ایجاد می‌کند. در واقع با افزایش درصد جامد فاز جامد افزایش یافته و بستر ته‌نشینی را تحت تاثیر قرار می‌دهد. برای مقایسه با داده‌های آزمایشگاهی نمودار تغییر درصد جامد با ارتفاع بستر در شکل ۱۳ رسم شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود باز هم دو ناحیه برای مطالعه در نظر گرفته شده که ناحیه گل رسوب یافته و ناحیه حرکت چرخشی ذرات جامد در سیستم. روند رو به بالای ناحیه حرکت چرخشی ذرات در درصد جامدهای بالا زیاد می‌باشد و این را می‌توان یک عامل موثر در ایجاد کدری در آب سرریز لاندر معرفی کرد. در واقع با افزایش ناحیه چرخشی ذرات، ذرات ریز و غیر فلوکوله شده در آب باقی مانده و به سمت ناحیه لاندر هدایت می‌شود. علت کم بودن ناحیه چرخشی را در درصد جامد کم را به دو پارامتر می‌توان ارتباط داد. یکی از این پارامترها فرآیند فلوکولاسیون می‌باشد. در درصد جامد کم امکان تشکیل توده‌های بزرگتر و با استحکام بیشتر فراهم شده و ته‌نشینی مطلوبی حاصل می‌شود. پارامتر دیگر تاثیر گذار در ناحیه چرخشی ذرات، ناحیه تراکم (گل رسوب یافته) می‌باشد. جابجایی مایع در این ناحیه موجب بالا آوردن ذرات و معلق کردن آنها در فاز آب است. نشست مناسب ذرات مانع ایجاد چنین مشکلی در سیستم می‌گردد.



شکل (۱۳) تاثیر درصد جامد ورودی بر ارتفاع بستر ته نشینی

۵-۳- زمان ماند ذرات

در شکل‌های ۱۴ تا ۱۶ مقایسه بین منحنی زمان ماند حاصل از نتایج آزمایشگاهی و مدل‌سازی صورت گرفت. در دبی‌های کم ماکزیمم منحنی در زمان‌های کم اتفاق می‌افتد و منحنی با تغییرات سریع همراه است. با افزایش دبی خوراک منحنی بصورت پهن‌تر و تغییرات تدریجی می گردد. زمان ماند در تیکنر برای تشکیل توده‌های بزرگتر و ته‌نشینی ذرات از اهمیت زیادی برخوردار است. افزایش قطر تیکنرها برای ایجاد سطح بیشتر و زمان ماند بیشتر برای کاهش ذرات در خروجی آب تصفیه شده می باشد. تغییرات سریع منحنی در دبی کم بدلیل کم بودن ارتفاع ته نشینی و خروج سریع ذرات از ته ریز است در حالی که با افزایش دبی بدلیل بالا رفتن ارتفاع گل در تیکنر پیک نمودار پهن‌تر شده و زمان خروج ردیاب افزایش می‌یابد. برای دبی کم پیک نمودار در غلظت ۷ گرم بر لیتر و برای دبی بالا این مقدار به ۳ گرم بر لیتر کاهش یافته است.

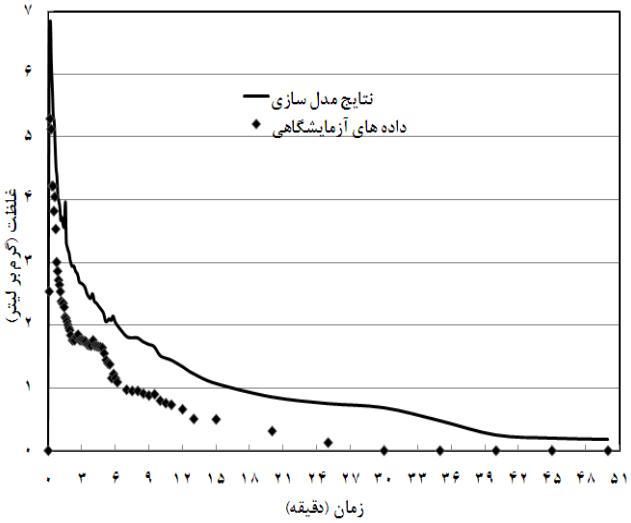
همان طور که مشاهده شد مقایسه نتایج آزمایشگاهی و مدل‌سازی تطبیق خوب نتایج را نشان داد. از این رو بررسی پارمترهای دیگر حاصل از مدل قابل اطمینان می باشد.

۶- تغییر پارامترهای موثر بر عملکرد تیکنر در مدل‌سازی

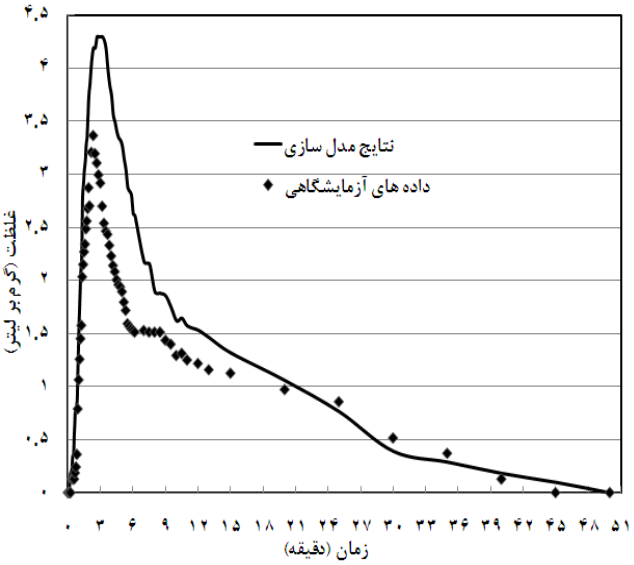
۶-۱- تاثیر اندازه ذرات ورودی به تیکنر

از آنجایی که ته‌نشینی در تیکنرهای باطله بر اثر نیروی ثقل می‌باشد و هرچه ذرات بزرگتر باشند سریع‌تر ته‌نشین می‌شوند. همچنین فرآیند فلوکولاسیون نیز بهتر انجام می‌گیرد. برای بررسی اندازه ذرات یک اندازه متوسط برای قطر ذرات در نظر گرفته شد.

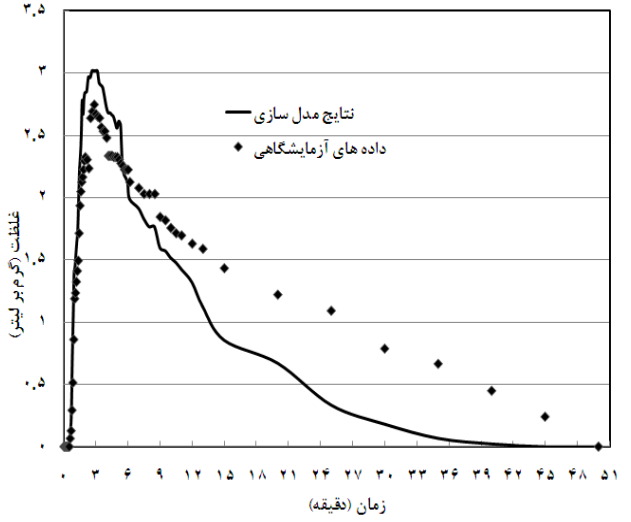
در شکل های ۱۷ و ۱۸ تاثیر اندازه ذرات بر روی درصد جامد خروجی و ارتفاع بستر نشان داده شده است. غلظت ته‌ریز تیکنر با تراکم و غلظت تشکیل شده در کف تیکنر و قسمت مخروطی تیکنر ارتباط مستقیمی دارد. برای دست‌رسی به غلظت بالا در ته‌ریز تشکیل رسوب غلیظ در قسمت پایین تیکنر الزامی است. افزایش اندازه توده ذرات تشکیل شده باعث نشست سریع و تشکیل رسوب سنگینی از ذرات می‌شود که در اثر وزن بالای این رسوب آب موجود بین لایه‌های رسوب خارج شده و تغلیظ خوبی در این ناحیه صورت می‌گیرد. تشکیل توده بزرگتر وابسته به ذرات اولیه، فلوکولانت و نحوه فلوکولاسیون و حتی هندسه چاهک خوراک می‌باشد. بررسی قطر ذرات ته‌نشینی نشان داد بزرگتر شدن اندازه ذرات باعث بهبود سیستم تغلیظ و کاهش ارتفاع گل رسوب یافته می‌شود. در واقع بازیابی مایع در این حالت از روند رو به بالایی برخوردار است.



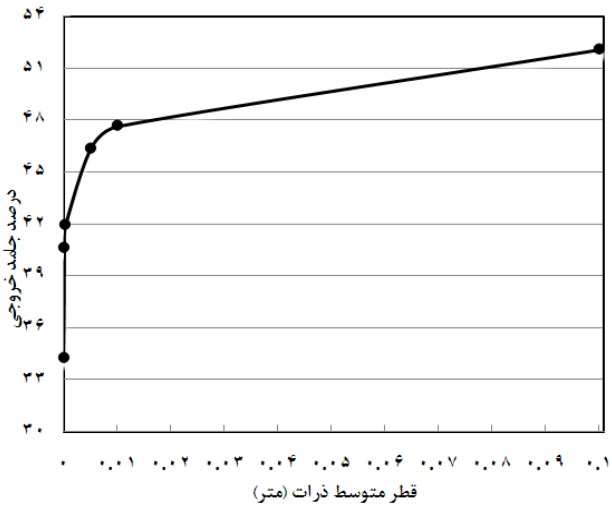
شکل (۱۴) منحنی زمان ماند برای دبی خوراک $۸ \frac{lit}{min}$



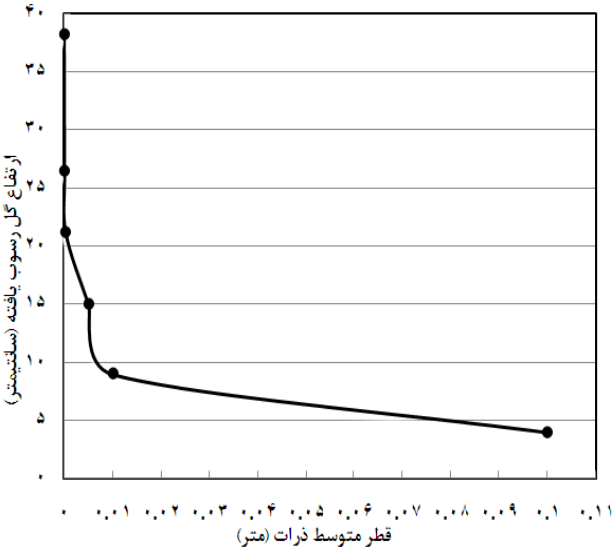
شکل (۱۵) منحنی زمان ماند برای دبی خوراک $۱۶ \frac{lit}{min}$



شکل (۱۶) منحنی زمان ماند برای دبی خوراک $۲۰ \frac{lit}{min}$



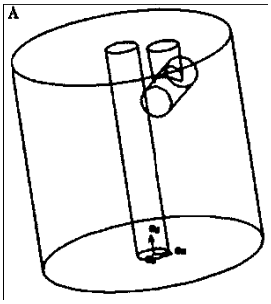
شکل (۱۷) تاثیر اندازه ذرات بر درصد جامد خروجی



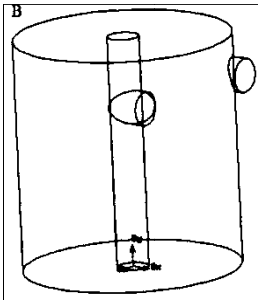
شکل (۱۸) تاثیر اندازه ذرات بر ارتفاع بستر ته نشینی

۶-۲- تغییر در چاهک خوراک تیکنر

برای چاهک خوراک دو حالت برای ورود جریان خوراک در نظر گرفته شد. در حالت اول یک ورودی دو طرفه از یک لوله در داخل چاهک خوراک با قطر ۲/۵۴ سانتی‌متر همانند شکل ۱۹ استفاده شد. در حالت دوم خوراک از دو ناحیه در دیواره چاهک خوراک با زاویه‌ی ۴۵ درجه نسبت مبدا مختصات وارد چاهک خوراک شد (شکل ۲۰).

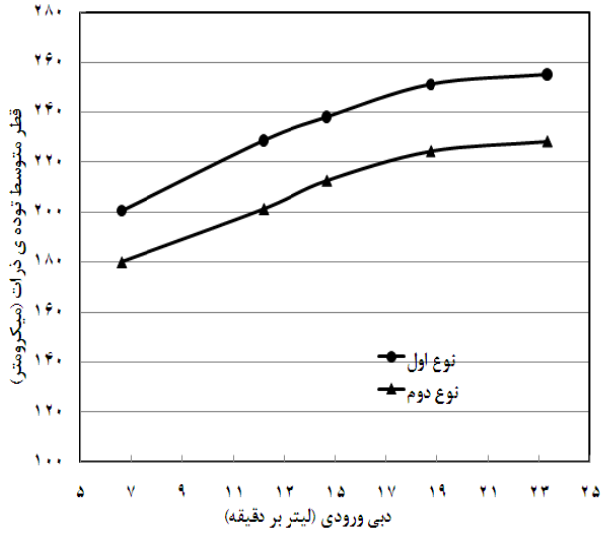


شکل (۱۹) چاهک خوراک نوع اول



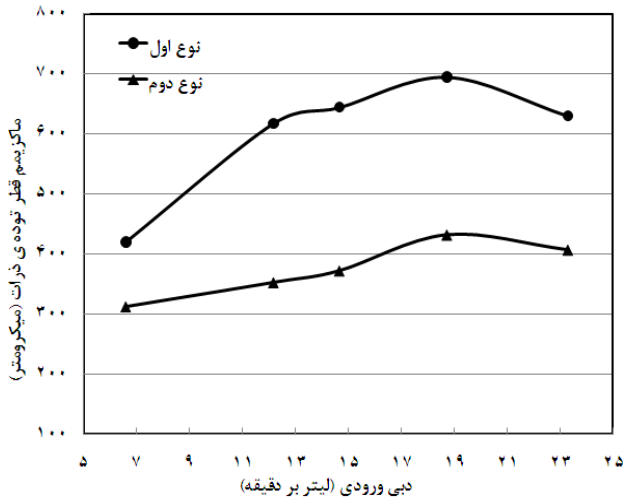
شکل (۲۰) چاهک خوراک نوع دوم

تغییرات اندازه متوسط قطر توده‌ها برای این دو نوع چاهک خوراک مورد مطالعه قرار گرفت. همان طور که در شکل ۲۱ مشاهده می‌شود، اندازه متوسط قطر توده ذرات با افزایش دبی افزایش می‌یابد. این افزایش قطر توده‌ها با افزایش بیش از حد دبی روند کمتری پیدا می‌کند. چنان که مشاهده می‌شود اندازه توده‌ها در حالت اول بزرگتر از چاهک خوراک نوع دوم است.

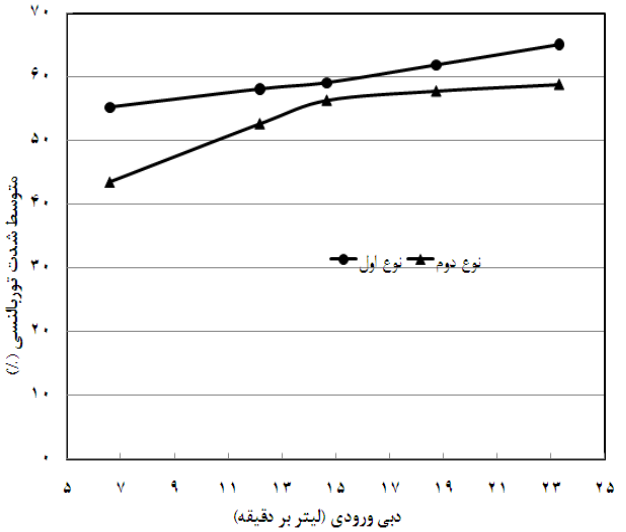


شکل (۲۱) منحنی تغییرات اندازه متوسط توده ها با تغییر دبی در هر دو حالت چاهک

مقایسه اندازه ماکزیمم ذرات تشکیل شده نشان داد که اندازه ماکزیمم ذرات با افزایش بیش از حد دبی خوراک دوباره کاهش می‌یابد. در شکل ۲۲ تغییرات ماکزیمم ذرات با دبی نشان داده شده است. علت این امر افزایش تلاطم و شکست دوباره ذرات می‌باشد. در شکل ۲۳ تغییرات شدت توربالنسی با دبی نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود در چاهک خوراک نوع اول توربالنسی زیاد می‌باشد. علت این امر برخورد جریان با بدنه چاهک خوراک و ایجاد تلاطم زیاد می‌باشد. افزایش توربالنسی موجب افزایش بهم چسبیدگی ذرات می‌شود. همان‌طور که قبلاً اشاره شد برای بررسی بهم چسبیدگی ذرات و شکست آنها از مدل موازنه جمعیتی استفاده شد و ترم تنش سیال در این موازنه دارای اهمیت بود. بدلیل تغییرات دبی و همچنین هندسه ورودی خوراک و چاهک خوراک تنش در این ناحیه تغییر می‌یابد. تغییرات تنش که وابسته به تلاطم سیستم است تا محدودی خاصی منجر به تشکیل توده‌های بزرگتر می‌شود. برای هر دو چاهک خوراک بعد از دبی ۱۹ لیتر بر دقیقه دوباره اندازه توده‌ها کاهش یافته است دلیل این امر افزایش ترم شکست در اثر بالا رفتن تنش در چاهک خوراک است.

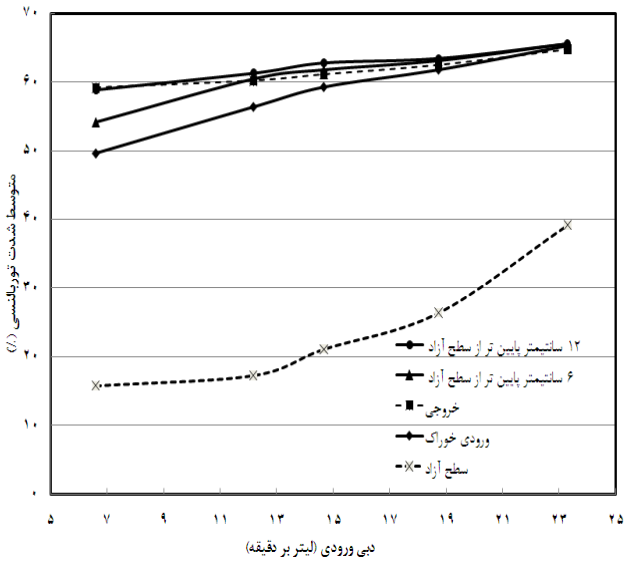


شکل (۲۲) منحنی تغییرات ماکزییم قطر ذرات با دبی در هر دو نوع چاهک خوراک

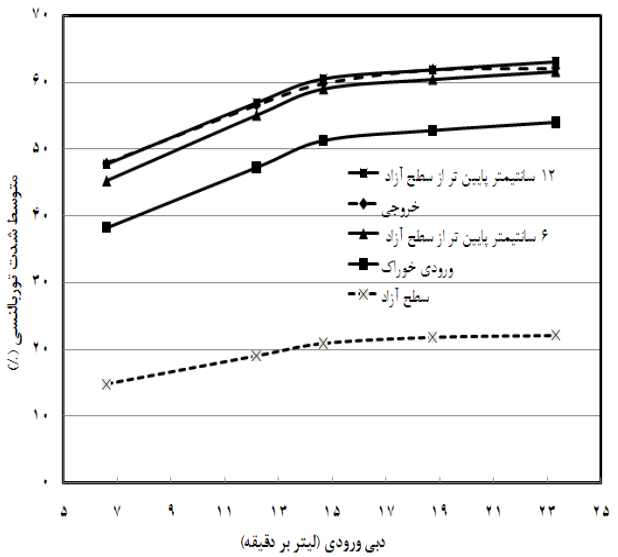


شکل (۲۳) منحنی تغییرات شدت توربالنسی با تغییرات دبی در هر دو نوع چاهک خوراک

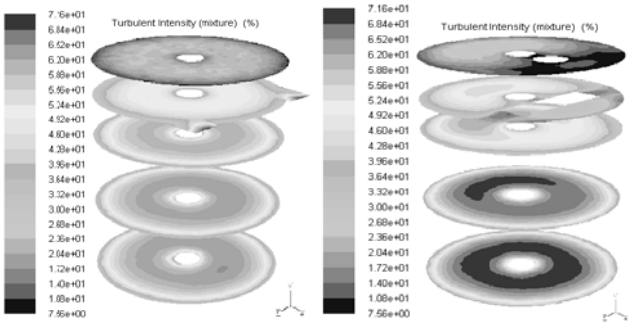
برای بررسی بیشتر، در چاهک خوراک شدت تلاطمدر پنج صفحه افقی بترتیب در سطح آزاد، محل ورود خوراک، ۶ سانتی متر پایین تر از سطح آزاد چاهک خوراک، ۱۲ سانتی متر پایین تر و ناحیه خروجی در نظر گرفته شد. همان طور که در شکل‌های ۲۴ و ۲۵ مشاهده می‌شود، تغییرات توربالنسی در این پنج ناحیه برای هر دو چاهک خوراک نشان داده شده است. در شکل ۲۶ کنتورهای شدت توربالنسی در هر دو نوع چاهک خوراک در نواحی ذکر شده نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل‌ها مشاهده می‌شود تغییرات توربالانسی از سطح چاهک خوراک به طرف پایین افزایش می‌یابد. در سطح آزاد چاهک خوراک شدت توربالنسی به مراتب کمتر می-باشد. نکته دیگری که قابل دریافت است در چاهک خوراک اول شدت توربالنسی به جز سطح آزاد خیلی نزدیک بهم می‌باشد. در حالی که در چاهک خوراک دوم در محل ورودی شدت توربالنسی کمتر بوده و با چرخش جریان حول دیواره به طرف پایین تلاطم افزایش می‌یابد.



شکل (۲۴) منحنی تغییرات متوسط شدت توربالنسی در پنج ناحیه چاهک خوراک (حالت اول)



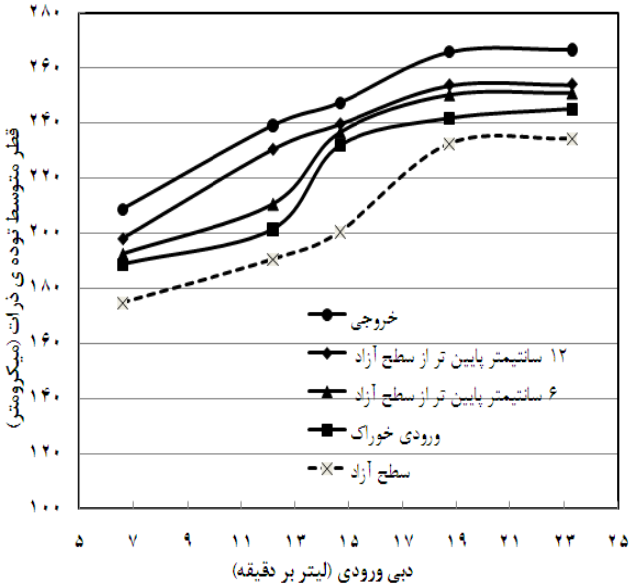
شکل (۲۵) منحنی تغییرات متوسط شدت توربالنسی در پنج ناحیه چاهک خوراک (حالت دوم)



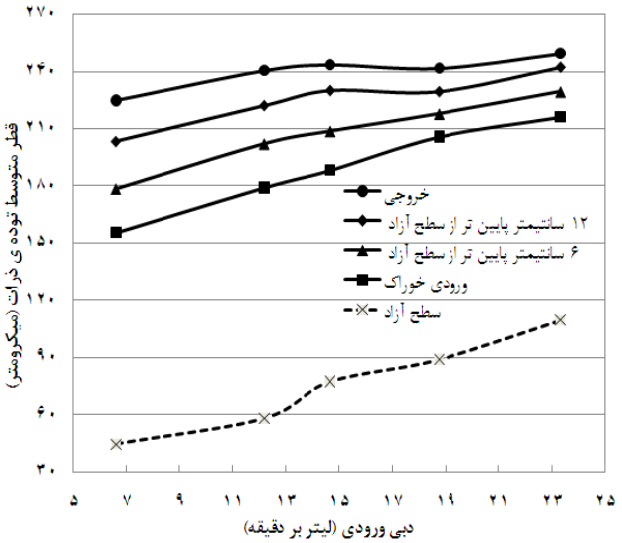
(ب) (الف)

شکل (۲۶) کنتورهای شدت توربالنسی الف) حالت اول ب) حالت دوم

در شکل‌های ۲۷ و ۲۸ تغییرات متوسط قطر ذرات در این پنج ناحیه مشاهده می‌شود. همان‌طورکه نشان داده شده اندازه ذرات با پایین آمدن به پایین بزرگتر می‌شود. همچنین مقایسه دو نوع چاهک خوراک نشان داد که تغییرات اندازه ذرات در حالت اول بیشتر از حالت دوم است.



شکل (۲۷) منحنی تغییرات متوسط قطر ذرات در پنج ناحیه چاهک خوراک (حالت اول)



شکل (۲۸) منحنی تغییرات متوسط قطر ذرات در پنج ناحیه چاهک خوراک (حالت دوم)

۷- نتیجه گیری

داشتن خوراک رقیق به جهت تاثیر بهتر فلوکولانت روی ذرات جامد در عملکرد تیکنر و بالا بردن ظرفیت آن موثر خواهد بود. چرا که می‌توان دبی خوراک ورودی را بیشتر کرد و بالطبع در این صورت مقدار آب بیشتری بازیافت خواهد شد. رقیق سازی خوراک می‌تواند توسط آب بازیافتی از خود تیکنر صورت گیرد. افزایش دبی خوراک موجب افزایش غلظت خروجی و ارتفاع بستر ته‌نشینی می‌شود. زمان ماند با افزایش دبی افزایش یافته در واقع سیستم به حالت اختلاط بیشتر نزدیک می‌شود. با افزایش اندازه ذرات ته نشینی بیشتر و غلظت خروجی بیشتر و آب گیری بیشتر است

یک متغییر کلیدی موثر بر فلوکولاسیون مقدار تنش سیال است. مقدار تنش بالاتر موجب افزایش مقدار اختلاط فلوکولانت، جذب، برخورد ذرات (رشد توده‌ها) و شکست توده ها می‌شود. هنگامی که دبی جریان افزایش می‌یابد، مقدار تنش نیز افزایش می‌یابد. تغییر در هندسه چاهک خوراک نیز برای ایجاد تنش موثر می‌باشد. در این مطالعه تطابق خوب بین نتایج آزمایشگاهی و مدل‌سازی دینامیک سیالات محاسباتی بر اساس مدل موازنه جمعیتی نشان داد که این روش، روش مناسبی برای بررسی عملکرد تیکنر باطله مجتمع مس سرچشمه می-باشد.

۸- مراجع

[1] M. Rudman, D.A. Paterson, and K. Simic (2010) "Efficiency of raking in gravity thickeners", *International Journal of Mineral Processing*, 95, 30–39.

[2] L. Svarovsky (2000) *Gravity clarification and thickening. Solid-Liquid Separation*, 4th Edition, Svarovsky, L. (ed), Oxford, Butterworth-Heinemann, 166-190.

[3] F.W. Günthert (1984) "Thickening zone and sludge removal in circular final settling tanks", *Water Science Technology*, 16, 303–316.

[4] M.G. Wood, P.F. Greenfield, T. Howes, M.R. Johns, and J. Keller (1995) "Computational Fluid Dynamics Modeling of Wastewater ponds to improve design", *Water Science and Technology* 31, 111-118.

[5] R. Burger, M.C. Bustos, and F. Concha (1999) "Settling Velocities of particulate system. Phenomenological theory of sedimentation processes: numerical simulation of the transient behavior of flocculated suspensions in an ideal batch or continuous thickener", *International Journal of Mineral processing*, 55, 267-282.

[6] J.B. Farrow, R.R.M. Johnston, K. Simic, and J.D. Swift (2000) "Consolidation and aggregate densification during gravity thickening", *Chemical Engineering Journal*, 80, 141-148.

[7] R.B. Kahane, M.P. Schwarz, and R.R.M. Johnston (2002) "Residue thickener modelling at Worsley Alumina", *Applied Mathematical Modelling*, 26, 281-296.

[8] R.B., White, I.D. Šutalo, and T. Nguyen (2003) "Fluid flow in thickener feedwell models", *Minerals Engineering Journal*, 16, 145-150.

[9] I.D. Sutalo, D.A. Paterson and M. Rudman (2003) "Flow visualization and computational prediction in thickener rake models", *Minerals Engineering Journal*, 16, 93-102.

[10] G. Peloquin, R.T. Bui, D. Kocaefe, and G. Simard (2005) "Modélisation mathématique de la décantation de la boue rouge", *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 83, 458-465.

[11] A.T. Owen, T.V. Nguyen, P.D. Fawell (2009) "The effect of flocculant solution transport and addition conditions on feedwell performance in gravity thickener", *International Journal of Mineral processing*, 93, 115-127.

[12] A.R. Heath, P.A. Bahri, P.D. Fawell, and J.B. Farrow (2006) "Polymer flocculation of calcite: Population balance model", *AIChE Journal*, 52, 1641-1653.

[13] D. Ramkrishna, and A.W. Mahoney (2002) "Population balance modeling. Promise for the future", *Chemical Engineering Science*, 57, 595-606.

[14] *Population Balance Module Manual*, ANSYS Fluent 12.0, April (2009).

The study of parameters affecting the solid-liquid separation in a laboratory thickener at Sarcheshmeh Copper Complex

A. Aghajani Shahrivar[1], A. Soltani Goharrizi[1*], M. Ebrahimzadeh Gheshlaghi[1], A. Mohebbi[1], A. Sarafi[1], M. H. Roholamini[2]

1. Department of Chemical Engineering, Shahid Bahonar University of Kerman (a.soltani@mail.uk.ac.ir)
2. Materials processing Researcher, R&D Center of Sarcheshmeh Copper Complex

A B S T R A C T

Dewatering of concentrates and thickening are the important sub-processes in the most mining operations. Improper design or undesirable dewatering can create limiting factor in capacity or unit operation. Usually the primary purpose of thickener is to take up the liquid from dilute slurry of feed. In this study, a laboratory thickener at Sarcheshmeh Copper Complex was designed and set up. Effects of parameters such as feed flow rate, flocculent dosage, input feed solid percent, and feedwell height, were studied. In the second stage of the research, the thickener has been modeled by computational fluid dynamics and validated. Good matching was observed between the experimental data and modeling results. Finally the effect of operating parameters on the thickener performance was studied.

All right reserved.

A R T I C L E I N F O

Article history:
Received 26 Jul. 2011
Received in revised form 8 Oct. 2011
Accepted 1 Nov. 2011

Key words:
Thickener
Flocculent
Flocculation
Solid percent
Sediment
Feedwell

* Corresponding author