نشریه علوم و مهندسی جداسازی
دوره چهارم، شماره اول، سال ۱۳۹۱، صفحه۱۳تا ۲٤

Journal of Separation Science and Engineering
Vol. 4, No. 1, pp. 13-24

شبیه سازی عملکرد فرآیند جداسازی در تیکنر باطله مجتمع مس سرچشمه به کمک دینامیک سیالات محاسباتی

مجید ابراهیم زاده قشلاقی[۱]، عطاالله سلطانی گوهرریزی[۱*]، علی رضا آقاجانی شهریور[۱]

۱. دانشگاه شهید باهنر کرمان، بخش مهندسی شیمی (a.soltani@mail.uk.ac.ir)

مشخصات مقاله

تاریخچه مقاله:
دریافت: ۲۵ مهر ۹۰
دریافت پس از اصلاح: ۲۲ خرداد ۹۱
پذیرش نهایی: ۲۷ خرداد ۹۱

کلمات کلیدی:
تیکنر
چاهک خوراک
مدل سازی
رسوب
موازنه جمعیتی

چکیده

تیکنرها از واحدهای کلیدی در فرآیندهای عملیاتی هیدرومتالوژی هستند و برای جداسازی جامد از مایع استفاده می‌شوند. در این تحقیق تیکنر باطله مجتمع مس سرچشمه توسط مدل ترکیبی دینامیک سیالات محاسباتی و موزانه جمعیتی، مدل-سازی شد. از مدل دوفازی اولرین- اولرین به همراه مدل تلاطم k-ε در حالت پایدار استفاده شد. در مدل موازنه جمعیتی ۱۵ دسته از اندازه ذرات در نظر گرفته شد. از کرل لئو برای بهم چسبیدگی/شکست ذرات استفاده شد. با استفاده از نتایج شبیه سازی میانگین اندازه ذرات در دبی ۶۱۲ لیتر بر ثانیه (دبی عملکرد تیکنر در کارخانه)، ۶۲۵ میکرون در تیکنر بدست آمد. برای جریان ورودی به تیکنر دو نوع چاهک خوراک در نظر گرفته شد و با استفاده از شبیه سازی قطر متوسط ذرات در داخل تیکنر برای این دو نوع چاهک خوراک بدست آمد. سپس با استفاده از نتایج شبیه سازی مشخص شد که استفاده از یک تیغه حلقوی در داخل چاهک خوراک موجب بهبود فرآیند فلوکولاسیون و افزایش سرعت ته‌نشینی می‌گردد. در نهایت با استفاده از شبیه سازی نیرو و گشتاور وارد بر ریک‌های بزرگ و کوچک تیکنر بدست آمد و اثر افزایش غلظت خروجی بر آنها بررسی شد.

* عهده دار مکاتبات

حقوق ناشر محفوظ است.

۱- مقدمه

تیکنرها از واحدهای کلیدی در فرآیندهای عملیاتی هیدرومتالوژی هستند و برای جداسازی جامد از مایع استفاده می‌شوند. فلوکولانت‌ها اغلب برای تشکیل زنجیره‌ای از ذرات جامد و به وجود آوردن توده‌های بزرگتر برای تسریع ته‌نشینی در تیکنرها استفاده می‌شوند. در تیکنر دوغاب ورودی بعد از جداسازی بصورت دو جریان بالاسری که حاوی آب زلال می-باشد و جریان پایینی که ته‌ریزی از پالپ با غلظت بالا است تقسیم می‌شود. جریان بالاسری از تجمع مایع بالای تیکنر در لاندر حاصل می‌شود[۱]. بطور طبیعی جریان در چاهک خوراک اهمیت زیادی در عملکرد تیکنرهای صنعتی دارد و این بدلیل تشکیل توده ذرات در این ناحیه است. جریان سیال در چاهک خوراک متلاطم می‌باشد. جریان متلاطم تاثیر زیادی در اختلاط فلوکولانت با خوراک و فرآیند بهم چسبیدگی ذرات دارد. در واقع بوجود آمدن توده‌های بزرگتر که چگالی بالایی دارند به جریان متلاطم در چاهک خوراک بستگی دارد.

در تحقیقی که توسط وایت[۱] انجام شد جریان خوراک بصورت مماسی به چاهک خوراک وارد شد و مدل‌سازی انجام شده با داده‌های تجربی گرفته شده از یک تیکنر پایلوت مقایسه شد. آنها از نتایج بررسی تصویری جریان با استفاده از ردیاب رنگی در داخل چاهک خوراک استفاده نمودند. ورودی مماسی به چاهک خوراک بدون تیغه نشان داد خوراک با چرخشی بطرف پایین از درون دیواره چاهک خوراک حرکت می‌کند. همچنین مدل تک فازی و سه بعدی برای بررسی این سیستم بکار برده شد. میدان سرعت با استفاده از مدل تلاطم k-ε و مدل تلاطم رینولدز بدست آمد که تطبیق خوبی با نتایج آزمایشگاهی داشت.

پائولین و همکارانش[۲] از دینامیک سیالات محاسباتی برای شبیه‌سازی چاهک خوراک در تیکنر بوکسیت استفاده نمودند. آنها اثر دبی جریان بر اندازه ذرات و قطر چاهک روی الگوی جریان را بررسی نمودند. نیگون و همکارانش[۳] یک مدل پایدار اولرین- اولرین دو فازی با مدل تلاطم k-ε برای فاز پیوسته مد نظر قرار دادند. طراحی چاهک خوراک در تیکنرها تاثیر بسزایی در ته‌نشینی رسوبات و عملکرد جدایی فازها دارد. مقدار جریان خوراک اثر زیادی بر رفتار و توزیع اندازه جامدات در داخل چاهک خوراک دارد. در مطالعه نیگون اثر دبی خوراک بر سرعت، درصد جامد و اندازه ذرات در چاهک خوراک مورد مطالعه قرار گرفت. در مطالعاتی که توسط اوون[۴] انجام شد، روش‌های مختلف پاشش فلوکولانت و اثر آن بر عملکرد چاهک خوراک و همچنین شرایط مختلف خوراک‌دهی مورد مطالعه قرار گرفت. آنها از روش دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) برای پیش‌گویی رابطه سرعت پاشش و جهت آن بر توزیع فلوکولانت و جذب آن داخل چاهک خوراک استفاده نمودند. آنها نتیجه گرفتند که بهترین جهت برای تزریق فلوکولانت به طرف بالا و به طرف دیواره چاهک خوراک است.

یک جزء کلیدی در عملیات تیکنر حرکت ذرات ته‌نشین شده، در ته تیکنر به طرف خروجی که در مرکز قرار دارد، می-باشد. در بیشتر تیکنرهای متداول و در بیشتر تیکنرهای با سرعت بالا انتقال بوسیله دو یا چهار ریک صورت می‌گیرد. هر بازوی ریک با توجه به اندازه تیکنر و نوع فعالیت تیکنر می‌تواند شامل نگه‌دارنده و چندین پارو[۵] باشد. در حالی که مشکلات عملیاتی بسیار زیادی در ارتباط با پاروهای تیکنرها وجود دارد اما اطلاعات بسیار کمی در مورد چگونگی طراحی و عملکرد پاروها در دست است[۵].

البرتسون و اکی[۶] مدل‌های ریاضی تک معادله‌ای برای پاروهای ریک[۶] و چرخش آنها ارائه دادند. در مطالعه صورت گرفته انتقال رسوب در یک تیکنر تصفیه آب بررسی شد و اثر پاروها توسط مقایسه ریاضی در یک جریان چرخشی پیوسته تقریب زده شد. واردن و همکارانش[۷] یک مدل ریاضی از سرعت تخلیه رسوب به صورت تابعی از سرعت ریک و مشخصاتی از پاروها شامل زاویه، طول و ارتفاع آنها را ارائه نمودند. مطالعات آنها نشان داد که حرکت سریع پاروهای بیرونی توانایی بالایی در حرکت مواد نسبت به پاروهای درونی دارند. فروست و همکارانش[۸] مدلی ریاضی در جریان سه بعدی برای تیکنر ته پهن مدوری با دو بازوی ریک‌دار با پاروهای مسطح را توسعه دادند. در شبیه سازی آنها متغیرهایی از قبیل ارتفاع، طول و زاویه پاروها نسبت بهم مورد مطالعه قرار گرفت. آنها راندمان ریک پارو را بصورت نسبت جریان افقی ناشی از حرکت پاروها به جریان کلی خروجی تعریف کردند. طبق بررسی‌های آنها زاویه بهینه برای پاروها بین ۲۰ تا ۳۰ درجه بدست آمد و راندمان پاروها با افزایش ارتفاع و طول پاروها افزایش یافت.

ساتلو و همکارانش[۹] برای بررسی اثر اندازه پاروها نتایجی با استفاده از تصویر برداری رنگی از یک تیکنر در اندازه کوچک را مورد استفاده قرار دادند. مطالعات آنها نشان داد اختلاط قابل توجهی در بستر مواد برای رسیدن سریع مواد به

۵- Blade

۶- Rake

خروجی با استفاده از پاروها بدست می آید. آنها مدل CFD را در مطالعات بعدی خود توسعه دادند و نتایج آن را با کارهای آزمایشگاهی رودمن و همکارنش[۱۰] مقایسه کردند. تطابق خوبی بین اندازه و گشتاور بدست آمده از مدل و نتایج آزمایشگاهی بدست آمد.

در این تحقیق استفاده از مدل شبیه‌سازی دینامیک سیالات محاسباتی که در تحقیق قبلی[۱۱] صحت آن مورد ارزیابی قرار گرفته بود، برای مدل‌سازی و بهینه‌سازی تیکنرهای اصلی مجتمع مس سرچشمه استفاده شده است. در مطالعه قبلی[۱۱] ساخت تیکنر آزمایشگاهی و مقایسه داده‌های آزمایشگاهی و مدل‌سازی، برای اطمینان از نتایج مدل‌سازی صورت گرفت. در واقع تحقیق قبلی در بردارنده نتایج آزمایشگاهی و سپس ارزیابی شبیه‌سازی انجام شده است. تفاوت عمده این مطالعه با مطالعه قبلی مدل‌سازی و بهینه سازی در شرایط صنعتی می‌باشد و همچنین در این تحقیق نیرو و گشتاور وارد بر پاروها نیز محاسبه شده است.

۲- توصیف مدل

مدل پایدار اولرین – اولرین دو فازی با استفاده از مدل تلاطم k-ε استاندارد برای فاز پیوسته در نظر گرفته شد. معادلات مومنتوم به همراه معادلات میدان فشاری و نیروی دراگ بین فازها حل شدند. مدل موازنه جمعیتی از توزیع اندازه ذرات اولیه بدست آمده از آزمایش با دسته بندی ۱۵تایی برای توزیع درصد اندازه ذرات بکار برده شد. برای کرل بهم چسبیدگی از کرل لئو[۱۲] و برای کرل شکست مدل‌های لئو و لهر استفاده گردید. برای مدل سازی از نرم افزار ANSYS Fluent 12 استفاده شد.

۲-۱- نیروی دراگ ریک

نیروی دراگ در تک تک پاروها و بازوهای ریک توسط نتایج خروجی از CFD قابل پیش‌گویی می باشد. این نیروی دراگ در جهت خلاف حرکت ریک عمل کرده و عموماً تابعی از شعاع، سرعت پاروها، و رئولوژی رسوب است. با این که دراگ به تنهایی یک مقدار قابل اندازه‌گیری نیست ولی کمیتی مهم برای عملیات ریکینگ می‌باشد و این بدین علت است که قابل انتگرال‌گیری جهت تخمین کل گشتاور در هر بازوی ریک می-باشد (رودمن و همکارانش[۱۰]). مدل‌های محاسبه نیروی دراگ برای حالت دوفازی عبارتند از:

مدل سیچلر و نیومن[۱۳]:

$$f = \frac{C_D \,\mathrm{Re}}{24} \qquad (۱)$$

$$C_D = 24(1+0.15\mathrm{Re}^{0.687})/\mathrm{Re} \qquad \mathrm{Re} \le 1000 \qquad (۲)$$

$$C_D = 0.44 \qquad \mathrm{Re} \ge 1000$$

Re رابطه عدد رینولدز است. نسبت عدد رینولدز برای فاز p و r عبارت است از:

$$\mathrm{Re} = \frac{\rho_{rp}\left|\bar{v}_r - \bar{v}_p\right| d_{rp}}{\mu_{rp}} \qquad (۳)$$

$\mu_{rp} = \alpha_p\mu_p + \alpha_r\mu_r$ ترکیب ویسکوزیته دو فاز p و r می-باشد. مدل سیچلر و نیومن برای استفاده کلی برای جفت فازهای سیال- سیال می‌باشد.

مدل مورسی و الکساندر[۱۳و۱۴]:

$$f = \frac{C_D \,\mathrm{Re}}{24} \qquad (۴)$$

$$C_D = a_1 + \frac{a_2}{\mathrm{Re}} + \frac{a_3}{\mathrm{Re}^2} \qquad (۵)$$

Re توسط معادله (۳) تعریف می‌شود. مقدار a بصورت زیر تعریف می‌گردد:

$$\mathbf{a_1, a_2, a_3} = \begin{cases} \mathbf{0, 24, 0} & \mathbf{0} < Re < 0.1 \\ \mathbf{3.690, 22.73, 0.0903} & \mathbf{0.1} < Re < 1 \\ \mathbf{1.222, 29.1667, -3.8889} & \mathbf{1} < Re < 10 \\ \mathbf{0.6167, 46.50, -116.67} & \mathbf{10} < Re < 100 \\ \mathbf{0.3644, 98.33, -2778} & \mathbf{100} < Re < 1000 \\ \mathbf{0.357, 148.62, -47500} & \mathbf{1000} < Re < 5000 \\ \mathbf{0.46, -490.546, 578700} & \mathbf{5000} < Re < 10000 \\ \mathbf{0.5191, -1662.5, 5416700} & \mathbf{Re} > 10000 \end{cases} \qquad (۶)$$

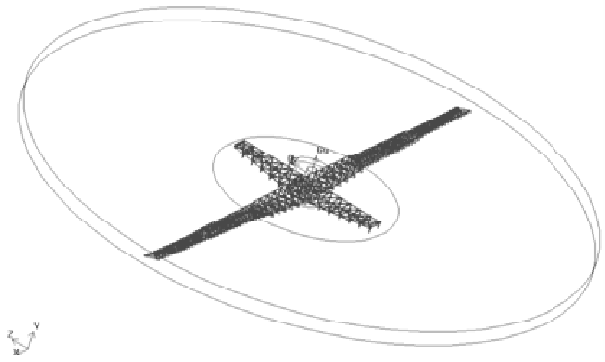
مدل مورسی و الکساندر کامل‌تر می‌باشد و برای محدوده بزرگتری از اعداد رینولدز قابل کاربرد می‌باشد. در این مطالعه از این مدل برای محاسبه نیروی دراگ استفاده شد.

۳- نتایج

تیکنر مورد مطالعه (تیکنر باطله مجتمع مس سرچشمه) به قطر ۱۲۰ متر و ارتفاع ۶ متر با چاهک خوراک به قطر ۹ متر و ارتفاع ۱/۵ متر برای مدل‌سازی استفاده شد. لوله خوراکی به قطر ۰/۷۵ متر برای ورود خوراک با دانسیته $۱۱۶۸\frac{\mathrm{kg}}{\mathrm{m}^3}$ و درصد جامد ۲۲/۵ استفاده شد. شکل ۱ هندسه تیکنر مورد استفاده را نشان می‌دهد. در جدول ۱ توزیع اندازه ذرات استفاده شده در مدل موازنه جمعیتی در ورودی تیکنر آورده شده است.

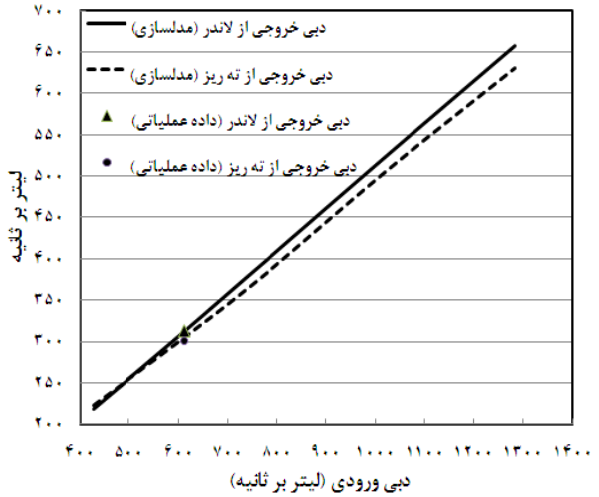
جدول (۱) توزیع اندازه ذرات در ورودی تیکنر

کسر اندازه‌ای (%)	اندازه گروه اندازه‌ای (µm)	شماره گروه اندازه‌ای	کسر اندازه ای (%)	اندازه گروه اندازه‌ای (µm)	شماره گروه اندازه‌ای
۸	۷۹/۹	۸	۰	۱۲۸۰	۰
۴	۵۶/۵	۹	۰	۹۰۵/۱	۱
۸	۳۹/۹	۱۰	۰	۶۳۹/۹	۲
۷	۲۸/۲	۱۱	۲/۵	۴۵۲/۵	۳
۲	۱۹/۹	۱۲	۴	۳۱۹/۹	۴
۶	۱۴/۱	۱۳	۷/۵	۲۲۶/۳	۵
۲۹	۹/۹۹	۱۴	۱۵	۱۶۰	۶
-	-	-	۷	۱۱۳/۱	۷

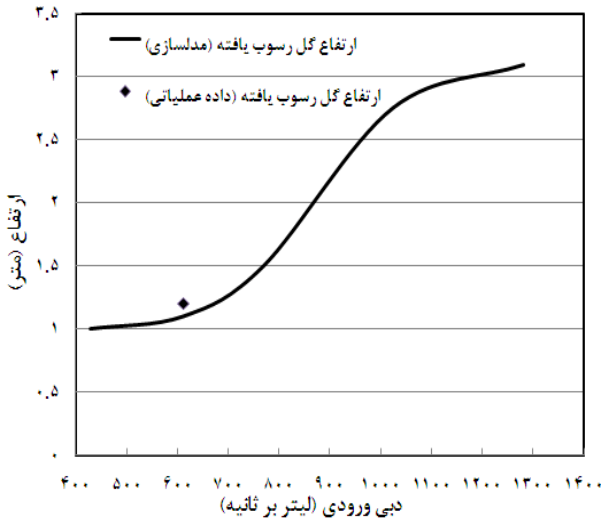


شکل (۱) هندسه تیکنر

تغییر در دبی خوراک برای دست یابی به ۴۰ درصد فاز جامد در ته‌ریز تیکنر صورت گرفت. تطابق خوبی بین داده‌های عملیاتی در دبی ۶۱۲ لیتر بر ثانیه (دبی عملیاتی در کارخانه) با داده‌های مدل‌سازی مشاهده شد. هر چند اعتبارسنجی مدل توسط تیکنر آزمایشگاهی در تحقیق قبلی[۱۱] صورت گرفته بود ولی با این حال نتایج با داده‌های عملیاتی نیز مقایسه شدند. چنان که در شکل‌های ۲ و ۳ مشاهده می‌شود با افزایش دبی مقدار خروجی ته‌ریز و لاندر افزایش می‌یابد. ولی توجه به این نکته ضروری است که افزایش بیش از اندازه دبی موجب بالا رفتن سطح بستر حتی تا نزدیک خروجی لاندر می‌شود. می‌توان در شکل ۳ مشاهده کرد که در دبی بالاتر از ۱۲۸۰لیتر بر ثانیه سطح بستر تا مرز لاندر می‌رسد. چون درصد ورودی جامد در خوراک ۲۲/۵ درصد می‌باشد از این رو با افزایش مقدار جریان ورودی مقدار جامد ورودی افزایش یافته و از طرف دیگر چون خروجی برای دست‌یابی به درصد جامد ۴۰٪ ثابت نگه داشته شده است، از این رو تجمع ذرات جامد در تیکنر بیشتر می‌گردد و این موجب بالا رفتن سطح بستر می‌شود. افزایش ارتفاع بستر مطلوب نمی‌باشد چون ارتفاع بستر ته‌نشین شده تا مرز چاهک خوراک می‌رسد و چاهک خوراک در بستر رسوب یافته قرار می‌گیرد و این فرآیند فلوکولاسیون را تحت تاثیر قرار می‌دهد و موجب عدم تشکیل توده‌های بزرگتر می‌شود. قرارگیری چاهک خوراک در بستر رسوب یافته همواره غیر مطلوب نیست. این بستگی به عوامل مختلفی از جمله نوع خوراک و فلوکولانت دارد. ولی مطالعه مدل‌سازی و مشاهدات آزمایشگاهی و صنعتی مشخص کرد که برای دوغاب کارخانه مس سرچشمه قرارگیری چاهک خوراک در رسوب ته‌نشین یافته مناسب نمی‌باشد و این امر موجب افزایش روند حرکت ذرات جامد به سمت بالا شده و زنجیره توده‌های تشکیل شده را از بین برده و سبب کاهش شفافیت آب خروجی از لاندر می‌شود. چنان که در شکل ۳ مشاهده می‌شود محدوده دبی ورودی بین ۶۰۰ تا ۷۵۰ لیتر بر ثانیه مناسب برای عملکرد تیکنر می‌باشد. برای دست‌رسی به ارتفاع رسوب عملیاتی، عمل کردن در دبی خوراک ورودی، ۶۵۰ لیتر بر ثانیه با درصد جامد ۲۲/۵ درصد مناسب می‌باشد.



شکل (۲) تغییر دبی لاندر و دبی ته ریز تیکنر با تغییرات دبی در درصد جامد ورودی ۲۲/۵٪

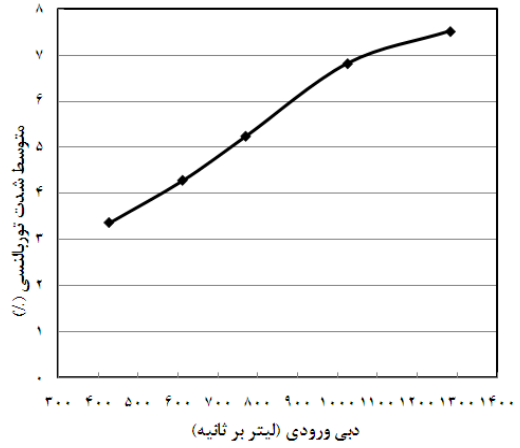


شکل (۳) تغییر ارتفاع رسوب جامد با تغییر دبی خوراک با درصد جامد ورودی ۲۲/۵٪

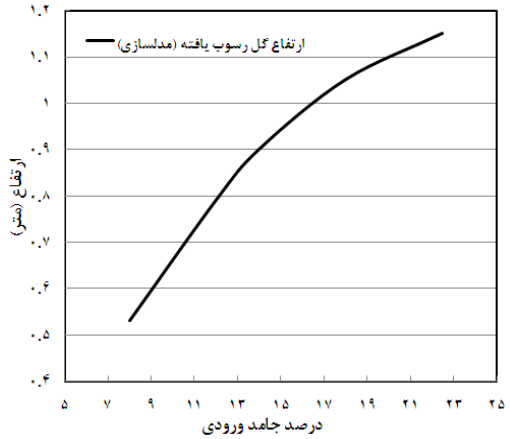
هر چند با افزایش دبی شدت تلاطم افزایش می‌یابد ولی همان‌طور که در شکل ۴ مشاهده می‌شود درصد تلاطم در تیکنر خیلی پایین بوده و جریان آرام می‌باشد.

در یک درصد جامد ورودی ثابت امکان تغییر زیاد دبی وجود ندارد و افزایش بیش از اندازه دبی موجب اختلال در فرآیند فلوکولاسیون و بالا رفتن ارتفاع رسوب ته‌نشینی می‌شود. یک راه حل برای افزایش دبی و بالا بردن ظرفیت ورودی تیکنر کاهش غلظت جامد در ورودی است. چنان که مطالعه قبلی[۱۱] نشان داده شد، تغییر درصد جامد ورودی در یک دبی ثابت موجب تغییر در غلظت خروجی و ارتفاع رسوب ته‌نشینی می‌شود. کاهش در درصد جامد ورودی چنان که در شکل ۵ مشاهده می‌شود ارتفاع بستر ته‌نشینی را کاهش داده و غلظت خروجی نیز کاهش می‌یابد. برای دست‌رسی به درصد جامد مورد نظر در ته‌ریز تیکنر می‌توان دبی ورودی را تغییر داد و با بالا بردن دبی می‌توان ظرفیت جداسازی را افزایش داد. با کاهش درصد جامد ورودی فرآیند فلوکولاسیون بهتر صورت گرفته و ارتفاع رسوب کاهش می‌یابد. این امر منجر به کاهش نیروی وارده به پاروها شده و کنترل شرایط را آسان‌تر می‌کند. همچنین بدلیل کاهش گشتاور اصطکاک کاهش یافته و شرایط مطلوب‌تری ایجاد می‌شود. در این حالت نوسانات موجود در تزریق فلوکولانت شرایط سیستم را زیاد دست خوش تغییر نمی‌دهد.

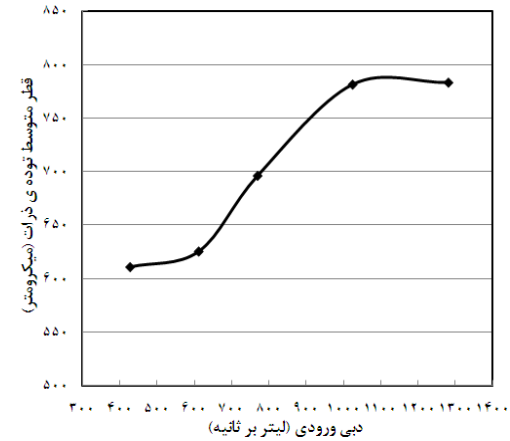
با افزایش نرخ جریان ورودی تنش افزایش یافته و برخورد ذرات افزایش می‌یابد و توده‌های تشکیل شده بزرگتر می‌شوند. ولی این افزایش نرخ اندازه توده‌ها با تنش حاصل از جریان خوراک تا محدوده‌ای موثر می‌باشد. همان‌طور که در شکل ۶ مشاهده می‌شود در دبی‌های بالا دوباره اندازه توده ذرات کاهش می‌یابد. میانگین اندازه توده ذرات در دبی ۶۱۲ لیتر بر ثانیه (دبی عملکرد تیکنر در کارخانه) ، ۶۲۵ میکرون در تیکنر می‌باشد.



شکل (۴) منحنی تغییرات شدت تلاطم با دبی خوراک در تیکنر



شکل (۵) تغییرات ارتفاع بستر ته نشینی در دبی $612\frac{lit}{sec}$



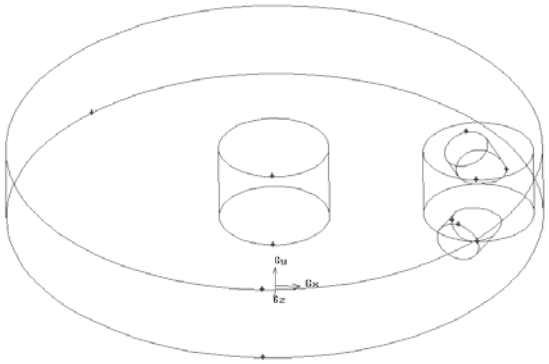
شکل (۶) منحنی تغییرات قطر متوسط توده ذرات با دبی خوراک در تیکنر با درصد جامد ورودی ۲۲/۵٪ و دوز فلوکولانت $1/47\frac{gr}{ton}$

۴-۱- تغییر در هندسه چاهک خوراک

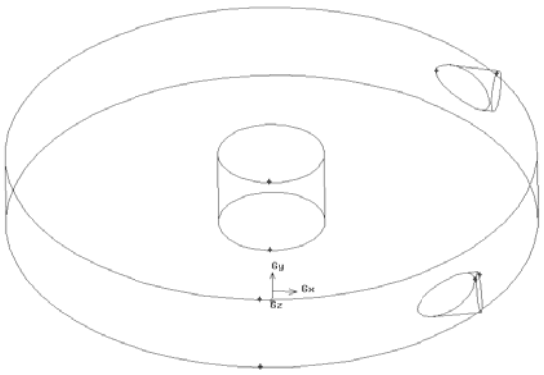
برای بررسی تغییرات در چاهک خوراک دو نوع ورودی در چاهک خوراک در نظر گرفته شد:

نوع اول) همانند شکل (۷الف) ورودی از یک محل بصورت یک مخزن تقسیم‌کننده که در داخل چاهک خوراک به دو ورودی با قطرهای ۰/۷۵ متر و ارتفاع ۱/۳۷ متر زیر سطح آزاد چاهک خوراک در نظر گرفته شد (سیستم تیکنرهای باطله مجتمع مس سرچشمه).

نوع دوم) مانند شکل (۷ب) از دو ورودی در بدنه چاهک خوراک با قطر ورودی ۰/۷۵ متر و با زاویه ۴۵ درجه در دو طرف پوسته چاهک خوراک در نظر گرفته شد (سیستم تیکنرهای E-DUC مجتمع مس سرچشمه).



(الف)

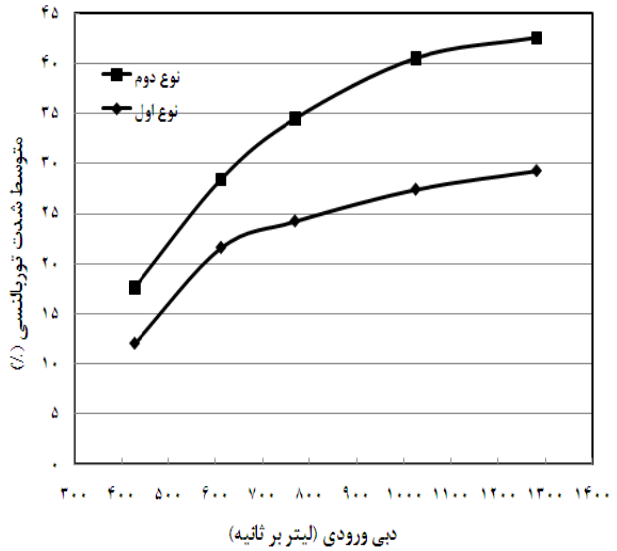


(ب)

شکل (۷) نمایی از چاهک خوراک الف) نوع اول ب) نوع دوم

یک عامل مهم در فرآیند فلوکولاسیون در تیکنرها شدت تلاطم در چاهک خوراک می‌باشد. برای ترکیب فلوکولانت با ذرات جامد و برخورد ذرات نیاز به جریان متلاطم در سیستم است در جریان آرام پدیده تشکیل توده ذرات به شدت ضعیف بوده و مطالعات نشان داد فرآیند فلوکولاسیون در جریان تلاطم موثر می‌باشد.

چنان که در شکل ۸ مشاهده می‌شود شدت تلاطم در چاهک خوراک نوع دوم بیشتر می‌باشد و در دبی‌های بالاتر شدت تلاطم در مقایسه با حالت نوع اول بیشتر می‌باشد. در داخل چاهک خوراک تلاطم نزدیک محل ورودی خوراک و محل خروج جریان از چاهک نسبت به نواحی دیگر بیشتر می‌باشد.



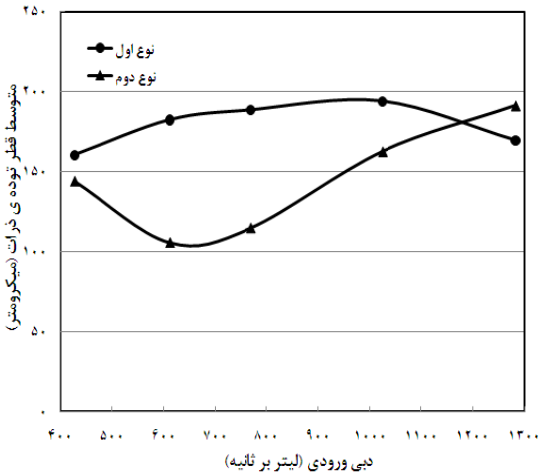
شکل (۸) منحنی تغییرات متوسط شدت تلاطم با تغییر دبی خوراک در چاهک خوراک در هر دو حالت با درصد جامد ورودی ۲۲/۵٪

تشکیل توده‌ها ی ذرات در چاهک خوراک در ته‌نشینی سریع ذرات در تیکنر نقش بسزایی دارد. طراحی و بهینه‌سازی چاهک خوراک باید طوری صورت گیرد که حداکثر سطح لازم برای اختلاط فلوکولانت و ذرات بدست آید تا تعداد ذرات توده نشده کاهش یابد. تلاطم چنان که ذکر شد تاثیر بسزایی در تشکیل اولیه توده‌ها دارد ولی تلاطم بیش اندازه در یک مقدار فلوکولانت ثابت موجب شکست دوباره ذرات می‌گردد. در یک مقدار فلوکولانت ثابت ($۱/۴۷\frac{gr}{ton}$) اندازه توده‌ی ذرات با افزایش مقدار جریان افزایش یافته ولی برای دبی‌های بالا بدلیل افزایش کسر جامد و شدت تلاطم زیاد قطر توده‌ی ذرات دوباره کاهش می‌یابد. در محل ورودی خوراک و بدلیل بالا بودن تلاطم قطر توده بزرگتر می‌باشد. برای چاهک خوراک نوع دوم تشکیل توده های بزرگتر در نزدیکی دیواره اتفاق می‌افتد.

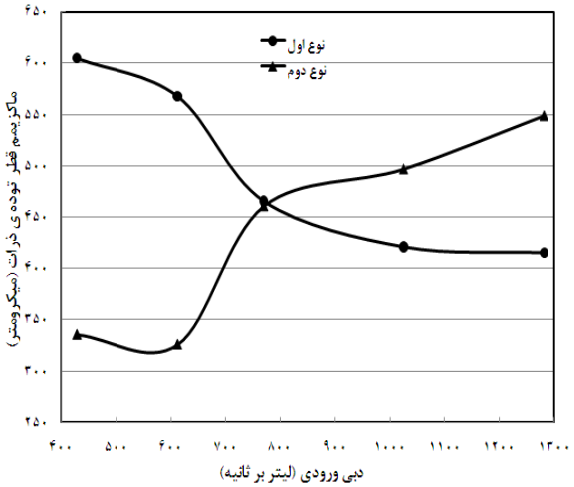
برای مقایسه بیشتر، قطر متوسط ذرات در چاهک خوراک برای هریک از دبی‌ها محاسبه شد. چنان که در شکل ۹ مشاهده می‌شود برای چاهک خوراک نوع اول با افزایش دبی جریان ورودی قطر متوسط ذرات افزایش می‌یابد ولی با افزایش خیلی زیاد دبی خوراک بدلیل شدت تلاطم و همچنین افزایش

ذرات جامد ورودی شکست توده‌ی ذرات افزایش یافته و قطر متوسط توده‌ی ذرات دوباره کاهش می‌یابد. برای چاهک خوراک نوع دوم با افزایش دبی ورودی خوراک ابتدا اندازه قطر متوسط ذرات کاهش می‌یابد ولی بعد ازنرخ جریان بالای $۸۰۰\frac{\text{lit}}{\text{sec}}$ دوباره قطر متوسط ذرات افزایش می‌یابد. برای مقایسه بیشتر این دو نوع چاهک خوراک ماکزیمم قطر ذرات تشکیل شده در چاهک خوراک در شکل ۱۰ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود برای جریان‌هایی با دبی پایین چاهک خوراک نوع اول بهتر می‌باشد. توده‌ی ذرات تشکیل شده در جریان‌های دبی پایین برای این نوع چاهک خوراک بزرگتر می‌باشد. برای چاهک خوراک نوع دوم افزایش نرخ جریان ورودی موجب تشکیل توده‌های بزرگتر ذرات می‌شود. برای نرخ جریان $۶۱۲\frac{\text{lit}}{\text{sec}}$ (دبی عملکرد تیکنرهای باطله در مجتمع مس سرچشمه) در چاهک خوراک نوع اول قطر متوسط ۱۸۲/۳۹μm و ماکزیمم قطر توده تشکیل شده ۵۶۸/۱۲μm می‌باشد در حالی که برای چاهک خوراک نوع دوم قطر متوسط ۱۰۵/۵۵μm و قطر ماکزیمم ذرات ۳۲۶/۱μm می‌باشد.

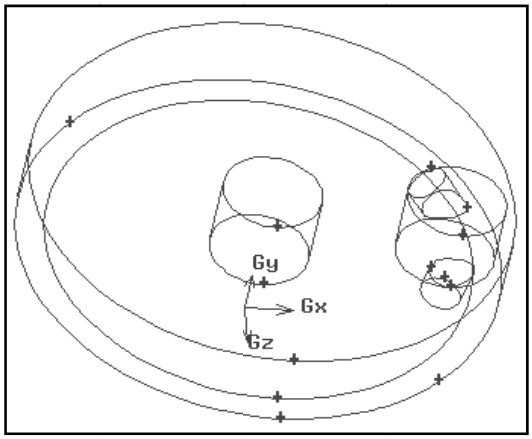
در شکل ۱۱ استفاده از یک تیغه حلقوی در داخل چاهک خوراک با پهنای ۰/۵متر، ۱۵سانتی‌متر زیر محل ورودی خوراک نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل ۱۲ مشاهده می‌شود، استفاده از این تیغه موجب افزایش اندازه متوسط توده ذرات می‌شود. همچنین ماکزیمم اندازه ذرات در این حالت نیز افزایش می‌یابد. در شکل ۱۳ تغییرات ماکزیمم اندازه ذرات با دبی خوراک برای این تغییر در چاهک خوراک نشان داده شده است. علت افزایش اندازه ذرات در حالتی که از تیغه استفاده می‌شود، افزایش شدت تلاطم و همچنین زمان اقامت می‌باشد. در شکل ۱۴ تغییرات شدت تلاطم نشان داده شده است. تفاوت شدت تلاطم و اندازه ذرات در دو حالت در دبی‌های پایین، کم می‌باشد. با افزایش دبی تغییرات افزایش یافته و نتایج استفاده از تیغه در چاهک خوراک واضح‌تر است.



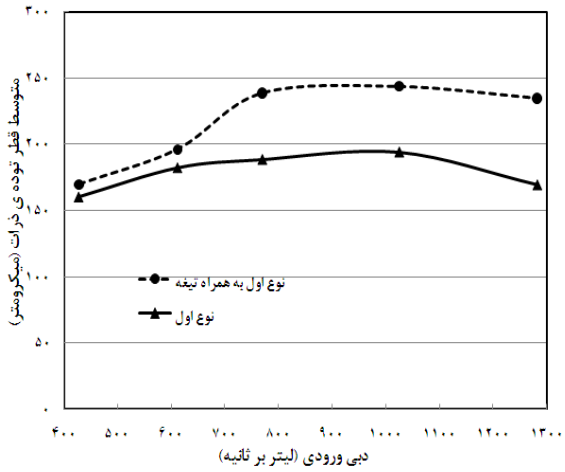
شکل (۹) منحنی تغییرات قطر متوسط توده ذرات با تغییر دبی ورودی خوراک در درصد جامد ورودی ۲۲/۵٪



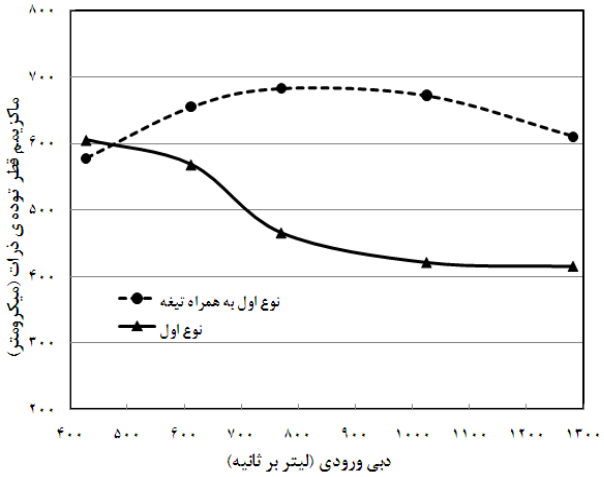
شکل (۱۰) منحنی تغییرات ماکزیمم قطر توده ذرات با تغییر دبی خوراک ورودی در درصد جامد ورودی ۲۲/۵٪



شکل (۱۱) استفاده از یک تیغه حلقوی در داخل چاهک خوراک

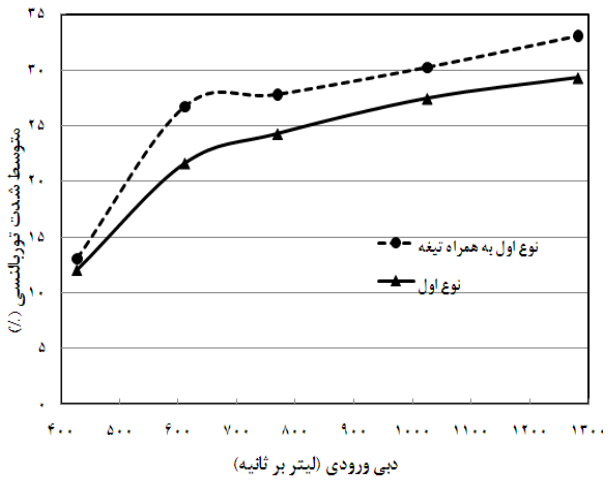


شکل (۱۲) منحنی تغییرات متوسط قطر ذرات با تغییر دبی در حالتی که از تیغه داخل چاهک خوراک استفاده شده است.

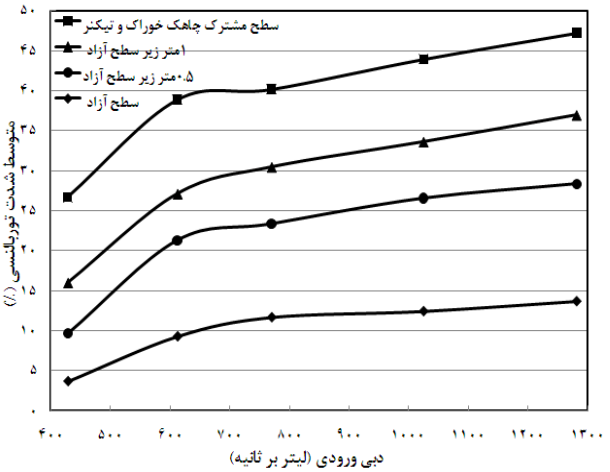


شکل (۱۳) منحنی تغییرات ماکزیمم قطر ذرات با تغییر دبی در حالتی که از تیغه داخل چاهک خوراک استفاده شده است

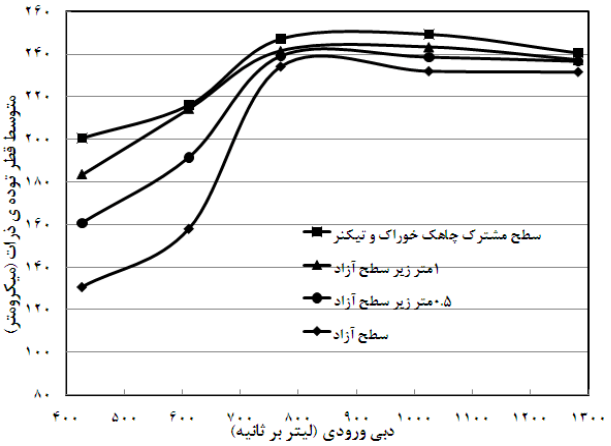
در شکل‌های ۱۵ و ۱۶ برای سطوح مختلف در چاهک خوراک نوع اول به همراه تیغه منحنی‌های متوسط شدت تلاطم و قطر ذرات نشان داده شده است. چنان که مشاهده می‌شود با افزایش عمق، شدت تلاطم افزایش می‌یابد.



شکل (۱۴) منحنی تغییرات متوسط شدت تلاطم با تغییر دبی در حالتی که از تیغه داخل چاهک خوراک استفاده شده است



شکل (۱۵) منحنی تغییرات متوسط شدت تلاطم با تغییر دبی در حالتی که از تیغه داخل چاهک خوراک قرار داده شده است



شکل (۱۶) منحنی تغییرات متوسط قطر ذرات با تغییر دبی در حالتی که از تیغه داخل چاهک خوراک استفاده شده است

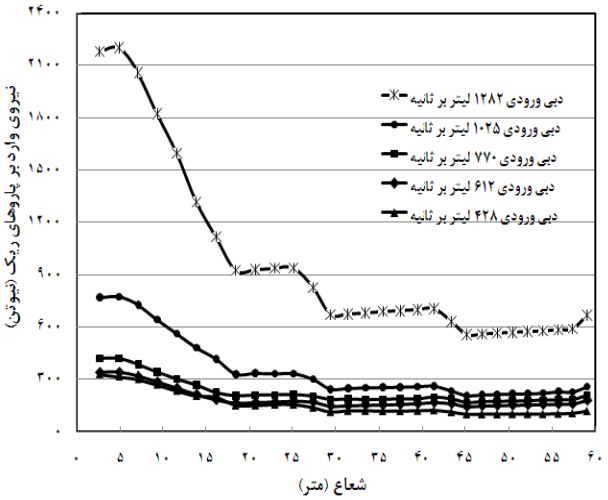
۴-۲- نیروی وارده بر پاروهای ریک‌ها

در تیکنرهای باطله دو ریک بلند و کوتاه مطابق شکل ۱۷ وجود دارد. برای بررسی نیروی وارد بر هر پاروی ریک نیروی دراگ و ویسکوز وارد به هر پارو مورد محاسبه قرار گرفت.

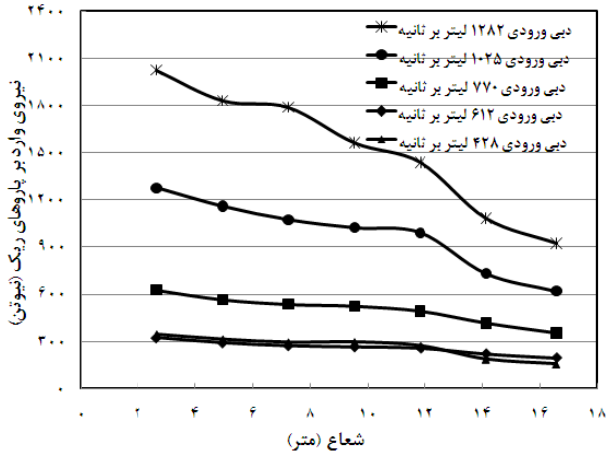
شکل(۱۷) نمایی از ریک‌های تیکنر باطله مجتمع مس سرچشمه

در شکل ۱۸ نیروی وارده بر هریک از پاروها با فاصله از مرکز تیکنر رسم گردیده است. در این شکل نیروهای وارد بر پاروهای یک طرف ریک نشان داده شده است که بدلیل تقارن نیروهای سمت دیگر نیز مشابه خواهد بود. چنان که مشاهده می‌شود با افزایش دبی خوراک بدلیل افزایش بستر ته‌نشینی جامد نیروی وارد بر پاروها افزایش می‌یابد. همچنین در یک دبی خاص با افزایش در شکل ۱۹ نیروی وارد بر پاروهای ریک کوتاه نشان داده شده است. همانطور که دیده می‌شود در ریک کوتاه نیز با افزایش فاصله از مرکز نیرو وارده کمتر می‌شود.

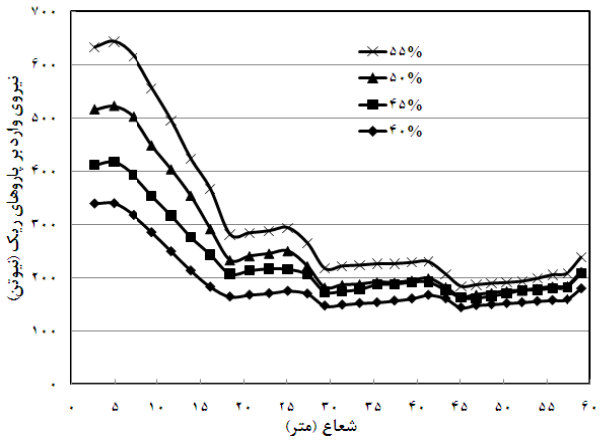
برای بررسی اثر غلظت خروجی ته‌ریز بر روی نیروی وارده بر پاروها چهار غلظت مختلف در نظر گرفته شد. شکل‌های ۲۰ و ۲۱ برای غلظت‌های خروجی ۴۰، ۴۵، ۵۰ و ۵۵ درصد، نیروی وارد بر روی پاروها را نشان می‌دهند. با توجه به این اشکال مشاهده می‌شود با افزایش غلظت خروجی بستر ته-نشینی نیروی وارد بر پاروها افزایش می‌یابد. این تغییر نیرو برای پاروهای ابتدایی بدلیل نزدیک بودن به محل خروجی بیشتر می‌باشد، در حالی که برای پاروهای انتهایی تغییرات کمتر است. برای ریک کوتاه نیز چنان چه در شکل ۲۱ نشان داده شده تغییرات نیروی وارده به پاروها بیشتر می‌باشد و با افزایش غلظت خروجی نیروی بیشتری بر پاروها وارد می‌شود. افت‌های ناگهانی در بعضی نقاط منحنی‌ها بدلیل کاهش ناگهانی سطح مقطع پارو و در نتیجه نیروی وارده بر آن است.



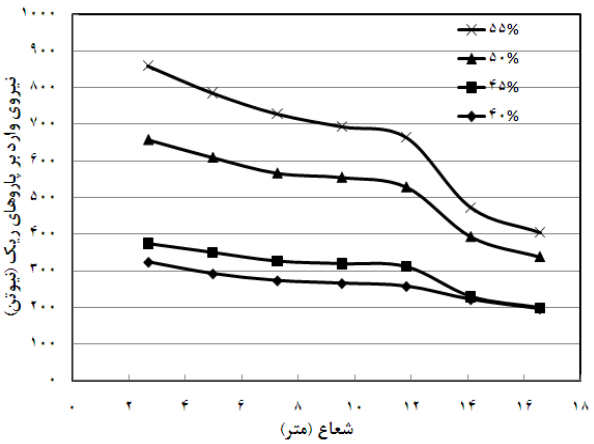
شکل (۱۸) منحنی تغییرات نیروی وارد بر پاروهای ریک بلند با شعاع در دبی‌های مختلف



شکل (۱۹) منحنی تغییرات نیروی وارد بر پاروهای ریک کوتاه با شعاع در دبی‌های مختلف



شکل (۲۰) منحنی تغییرات نیروی وارد بر پاروهای ریک بلند با شعاع در غلظت های مختلف خروجی تیکنر



شکل (۲۱) منحنی تغییرات نیروی وارد بر پاروهای ریک کوتاه با شعاع در غلظت‌های مختلف خروجی تیکنر

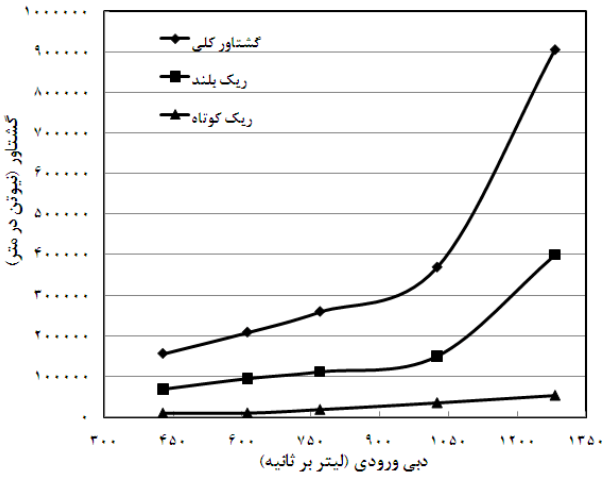
۴-۳- گشتاور

در این بخش از تحقیق، نیروهای وارد بر پاروهای ریک-های تیکنر که با استفاده از شبیه سازی CFD بدست آمده است، بر ریک‌ها اعمال شده است تا نیروهای داخلی اعضای ریک و همچنین گشتاور مورد نیاز برای چرخش ریک‌ها بدست آید. بدین منظور ابتدا ریک کوتاه و سپس ریک بلند به صورت جداگانه در نرم‌افزار تحلیل سازه SAP2000 مدل شد. سپس نیروی وارد بر پاروها که از آنالیز CFD بدست آمده بودند به آن‌ها اختصاص داده شد و در نهایت نیروی داخلی اعضا و همچنین گشتاور وارد بر ریک توسط نرم افزار محاسبه گردید.

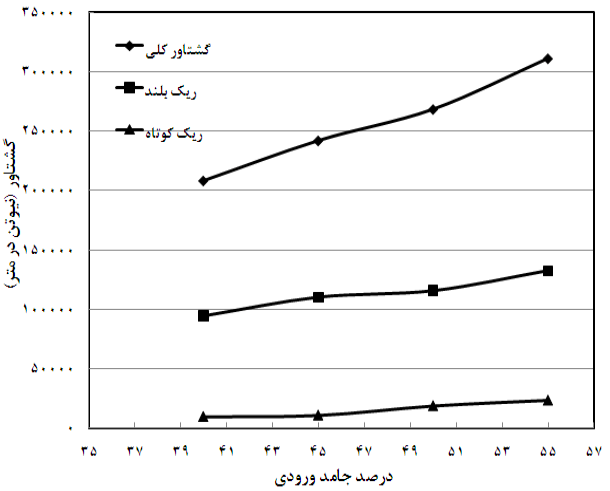
همان‌طوری که ذکر شد، تیکنر مورد مطالعه، دارای دو ریک کوتاه و دو ریک بلند می‌باشد. طول ریک کوتاه ۱۸متر ریک بلند ۵۹ متر از مرکز تیکنر می‌باشد. هر چهار ریک به شفتی که در مرکز تیکنر قرار دارد متصل می‌باشند. با توجه به سختی زیاد شفت در مقایسه با سختی ریک ها، می‌توان شفت را به عنوان تکیه گاه صلب برای ریک‌ها در نظر گرفت. سیستم سازه‌ای مورد استفاده برای انتقال بارهای وارد بر ریک به شفت، سیستم خرپای سه بعدی می‌باشد.

بر ریک‌ها دو نوع بار وارد می‌شود. یکی بار ثقلی که ناشی از وزن غوطه‌ور شده ریک و همچنین ستون مایعی که بالای اعضای ریک قرار دارند، می‌باشد. بار دیگری که به تیکنر وارد می‌شود بار وارد بر پاروها می‌باشد که عمدتاً ناشی از لزجت دوغاب کف تیکنر می‌باشد.

در شکل‌های ۲۲ و ۲۳ تغییرات گشتاور نشان داده شده است. همان‌طوری که مشاهده می‌شود با افزایش دبی گشتاور افزایش می‌یابد. برای دبی‌های بالا روند تغییرات گشتاور زیاد می‌باشد. چنان که مشاهده می‌شود روند افزایش گشتاور بعد از دبی ۷۵۰ لیتر بر ثانیه به شدت زیاد می‌باشد و روندی صعودی در مقدار گشتاور خواهیم داشت این اثر بدلیل تراکم زیاد گل ته‌نشینی و افزایش ارتفاع رسوب ته‌نشین شده این می‌باشد. گشتاور وارده بر ریک بلند بیشتر از ریک کوتاه بوده و تغییرات سریع گشتاور نیز در ریک بلند زیاد می‌باشد.



شکل (۲۲) تغییرات گشتاور ریک با دبی خوراک



شکل (۲۳) تغییرات گشتاور با تغییر غلظت خروجی ته‌ریز

بر اثر نیروی وزنی و همچنین نیرویی که در اثر تشکیل رسوب جامد بر ریک‌ها وارد می‌شود، امکان تغییر شکل ریک‌ها وجود دارد. بررسی تغییر شکل ریک‌ها نشان داد برای ساخت ریک تیکنر باید یک پیش خیز اولیه برای بازوی ریک‌ها در طراحی و ساخت در نظر گرفت. نتایج نشان داد در اثر نیروی وزن ریک بلند به مقدار ۳۰ سانتی‌متر تغییر ارتفاع می‌دهد. بررسی نیروی افقی وارد بر ریک نشان داد تا محدوده‌ی ۲۰-۳۰ سانتی‌متر در راستای افق ریک‌ها قابلیت تغییر شکل را دارا هستند.

۵- نتیجه گیری

می‌توان نتایج حاصل از این تحقیق را بصورت زیر بیان نمود:

تغییر در محل ورودی خوراک می‌تواند نقش بسزایی بر فرآیند فلوکولاسیون داشته باشد.

افزایش بیش از حد تلاطم باعث شکست توده ذرات می‌شود.

قرارگیری چاهک خوراک در داخل بستر ته‌نشینی فرآیند فلوکولاسیون را به شدت دست خوش تغییر قرار داده و موجب کاهش اندازه توده‌ها می‌شود و ذرات بصورت معلق در دوغاب باقی می‌مانند.

کاهش غلظت ورودی موجب بهبود فرآیند فلوکولاسیون و افزایش سرعت ته‌نشینی می‌شود.

اندازه توده ذرات تا محدوده خاصی از دبی رشد می‌کنند با افزایش بیش از حد دبی خوراک شکست دوباره توده ذرات حاصل می‌شود.

افزایش بارگیری تیکنر نیازمند تغییر در چاهک خوراک و محل تزریق فلوکولانت می‌باشد.

چاهک خوراک تیکنرهای باطله برای دبی‌های کم طراحی شده است. برای دبی‌های بالا چاهک خوراک حالت سیستم با دو ورودی در بدنه چاهک خوراک مناسب می‌باشد.

استفاده از یک تیغه حلقوی با پهنای نیم متری در داخل چاهک خوراک موجب بهبود فرآیند فلوکولاسیون و افزایش سرعت ته‌نشینی می‌شود.

کاهش غلظت ورودی موجب افزایش رشد توده، ته‌نشینی سریع، کاهش ارتفاع بستر رسوب، کاهش نیروی وارد بر ریک‌ها، کاهش نوسانات حاصل از تزریق بیش از حد فلوکولانت و آسان‌تر شدن کنترل شرایط عملیاتی.

افزایش دبی خوراک باعث افزایش نیروی وارد بر پاروها و موجب افزایش گشتاور می‌شود. نیروی وارد بر پاروها در طی افزایش شعاع از مرکز تیکنر کاهش می‌یابد.

با افزایش غلظت خروجی نیروی وارد بر پاروهای نزدیک مرکز تیکنر افزایش می‌یابد. افزایش غلظت خروجی تا ۴۵ درصد تغییر زیادی بر مقدار گشتاور نداشته و بعد از این مقدار افزایش زیادی برای گشتاور حاصل می‌شود.

مراجع

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

[2] 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.

[3] T. Nguyen, A.R. Heath and P. Witt (2006) "Population Balance – CFD modelling of fluid flow, solids distribution and flocculation in thickener feedwells", *Fifth International Conference on CFD in the Process Industries*, Melbourne, Australia.

[4] 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.

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

[6] O.E. Albertson, and R.W. Okey (1992) "Evaluating scraper designs", *Water Environ. Technology*, 4, 52–58.

[7] J.H. Warden (1981) "The design of rakes for continuous thickeners especially for waterworks coagulant sludges", *Filtr*, 18, 113–116

[8] R.C. Frost, J. Halliday, A.S. Dee (1993) "Continuous consolidation of sludge in large scale gravity thickeners", *Water Science and Technology*, 28, 77–86.

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

[10] M. Rudman, K. Simic, D.A. Paterson, P. Strode, A. Brent, I.D. Šutalo (2008) "Raking in gravity thickeners", *International Journal of Minerals Processing*, 86, 114–130.

[11] علی‌رضا آقاجانی شهریور، عطاالله سلطانی گوهرریزی، مجید ابراهیم‌زاده قشلاقی، علی محبی، امیر صرافی، مصطفی حسینی روح‌الامینی (۱۳۹۰) "بررسی عملکرد فرآیند جداسازی در تیکنر باطله مجتمع مس سرچشمه به کمک دینامیک سیالات محاسباتی"، نشریه علوم و مهندسی جداسازی،۳، ۲، ۴۳-۵۶.

[12] *Population Balance Module Manual*, Ansys Fluent 12.0, April (2009).

[13] *Ansys Fluent Manual*, Ansys Fluent 12.0, April (2009).

[14] S.A. Morsi and A.J. Alexander (1972) "An Investigation of particle trajectories in Two phase flow systems", *Journal Fluid Mechanic*, 55, 193-208.

Modeling of Separation Performance of Tailing Thickener at Sarcheshmeh Copper Complex by Computational Fluid Dynamics

M. Ebrahimzadeh Gheshlaghi[1], A. Soltani Goharrizi[1*], A. Aghajani Shahrivar[1]

1. Department of Chemical Engineering, Shahid Bahonar University of Kerman
(a.soltani@mail.uk.ac.ir)

A B S T R A C T

Thickeners are the key units in the hydrometallurgical processing operations and used to separate solids from liquids. In this study tailing thickeners at Sarcheshmeh Copper Complex modeled by combined computational fluid dynamics and population balance model. Turbulent two-phase Eulerian/Eulerian approach with k-ε turbulence model was used at steady state. The population balance consists of 15 particle size ranges, and the kernel of Leo was used for particles aggregation / breakage. Based on the simulation results, the mean particle size at 612 liters per second of feed flow rate (thickener performance at the factory), was 625 microns in thickener. Two geometry types for inlet flow into the feedwell were considered. The mean and maximum diameter of particles in the thickener was obtained for these two feedwell geometry based on the simulation results. It was observed that using a circular blade inside the feedwell improved flocculation process and increased sedimentation rate. Finally the force and torque that exerted on the rakes of the thickener were calculated.

All right reserved.

A R T I C L E I N F O

Article history:
Received: 15 Jul. 2011
Received in revised form: 11 June 2012
Accepted: 16 June 2012

Key words:
Thickener
Feedwell
Modeling
Sedimentation
Population Balance

* Corresponding author