

ارزیابی عملکرد کلاسیفایر برگشتی در طبقه‌بندی ابعادی با حد جداسازی ۴۵ میکرون

مجید ذوالقدری*⁺

تهران، جهاددانشگاهی واحد دانشگاه تربیت مدرس، گروه پژوهشی فراوری مواد معدنی

چکیده: در عملیات واحد، کنترل ابعاد بار ورودی به دستگاه‌ها برای بهینه کردن عملکرد کل فرایند عملیات واحد ضروری است و این کار به طور معمول با کلاسیفایرها انجام می‌شود. اما زیاد بودن انتقال غیرانتخابی ذره‌ها به جریان ته‌ریز در جداسازی ریزتر از ۴۵ میکرون، کارایی فرایند عملیات واحد را کاهش می‌دهد. در پژوهش حاضر عملکرد کلاسیفایر برگشتی در حد جداسازی‌های حدود ۴۵ میکرون مورد ارزیابی قرار گرفت. ضریب نقص در تمامی آزمایش‌ها حدود ۰.۳ و یا کمتر بود؛ همچنین درصد انتقال مواد ریزتر از ۲۵ میکرون به ته‌ریز، بین ۱۳ تا ۱۸ درصد می‌باشد. که این امر نشان‌دهنده کارایی خوب کلاسیفایر برگشتی در طبقه‌بندی ابعادی با حد جداسازی ۴۵ میکرون بود. همچنین مشخص شد که شدت جریان آب شناوری تا مادامی که از حد بحرانی فراتر نرود، تأثیر به‌سزایی بر کاهش انتقال غیرانتخابی ذره‌ها به ته‌ریز دارد. چراکه بیشتر بودن شدت جریان آب از حد بحرانی موجب افزایش اختلاط در بخش قائم کلاسیفایر برگشتی و مختل شدن روند ته‌نشینی مواد در مجاورت مجرای ته‌ریز می‌شود که این امر افزایش غیرانتخابی انتقال ذره‌های ریز به ته‌ریز را به دنبال خواهد داشت. به منظور ارزیابی میزان اختلاط در مجاورت مجرای ته‌ریز، شاخصی با عنوان "شاخص اختلاط" تعریف شد. اگر این شاخص برابر با ۱ باشد در مجاورت ته‌ریز اختلاط رخ نمی‌دهد و روند ته‌نشینی ذره‌های درشت مناسب است و هرچه این شاخص بزرگتر باشد، اختلاط بیشتر در ناحیه نزدیک به ته‌ریز رخ می‌دهد که این امر روند ته‌نشینی ذره‌ها را مختل می‌کند.

واژه‌های کلیدی: جداکننده بستر سیال، کلاسیفایر برگشتی، جداسازی ابعادی، اختلاط، ته‌نشینی.

KEY WORDS: Fluidized bed separator, Reflux classifier, Size separation, Mixing, Sedimentation.

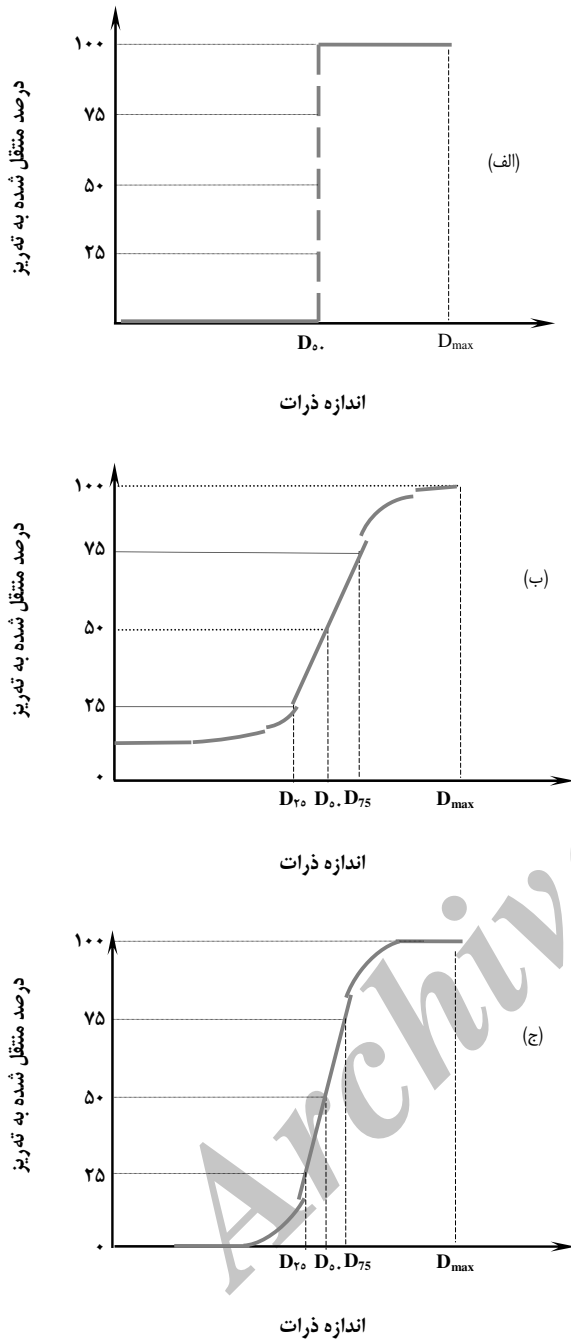
مقدمه

دستگاه را به دنبال دارد. از این رو کنترل اندازه بار ورودی برای بهینه شدن عملکرد کل فرایند عملیات واحد ضروری است. در بسیاری از موارد طبقه‌بندی ابعادی مواد دانه‌ریز با استفاده از کلاسیفایرها انجام می‌شود. در اساس کلاسیفایرها عملکرد ایده‌آل ندارند و همواره مقداری از ذره‌های درشت به بخش ریزدانه و مقداری از ذره‌های ریز به بخش درشت‌دانه منتقل می‌شود.

در اغلب موارد دستگاه‌ها و تجهیزات مورد استفاده در عملیات واحد، شامل سنگ‌شکن‌ها، آسیاها، جداکننده‌های ثقلی و حتی جداکننده‌های مغناطیسی که برای خردکردن و جداسازی ذره‌ها کاربرد دارند اغلب در بازه‌ی اندازه خاصی از ذره‌ها کارایی دلخواه دارند، به گونه‌ای که ورود ذرات / قطعه‌ها با ابعاد بیرون از بازه‌ی دلخواه نتیجه‌هایی همچون افت کارایی و فرسودگی

*E-mail: majidzolghadri@gmail.com

*عهده دار مکاتبات



شکل ۱- نمای کلی نمودار توزیع کلاسیفایر؛ (الف) حالت ایده‌آل، (ب) حالت واقعی، (ج) واقعی اصلاح شده.

شکل ۱ نمودار توزیع ذره‌ها با اندازه D را به تهریز^(۱) در حالت (الف) ایده‌آل، (ب) واقعی و (ج) واقعی اصلاح شده نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که با درشت‌تر شدن اندازه ذره‌ها، میزان انتقال آنها به تهریز افزایش می‌یابد. اندازه‌ای که در آن توزیع ذره‌ها بین بخش درشت‌دانه و ریزدانه برابر ۵۰٪ باشد ملاک اندازه جداسازی در نظر گرفته شده و به آن حد جداسازی^(۲) گفته می‌شود و به طور معمول با D_{50} نشان داده می‌شود [۱]. همچنین اختلاف نسبی بین D_{75} و D_{25} نمایانگر میزان انحراف از حالت ایده‌آل است و بر همین اساس ضریب نقص عملکرد کلاسیفایر^(۳) به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$I = \frac{D_{75} - D_{25}}{2D_{50}} \quad (1)$$

یکی دیگر از نقص‌های کلاسیفایرهای آبی (اعم از هیدروسیکلون، پارویی، ماریچی و ...)، انتقال غیر انتخابی بخشی از خوراک به تهریز است که این مسئله در شکل ۱ - ب نیز نشان داده شده است. به طور معمول میزان انتقال مواد جامد متناسب با میزان آب منتقل شده به تهریز فرض می‌شود [۲]. در حدود ۳۰٪ خوراک همراه با آب خوراک به صورت غیر انتخابی به تهریز منتقل می‌شود [۳] که این امر کاهش کارایی مدار نرم‌کنی^(۴) را به دنبال دارد. مهمتر اینکه با ریزتر شدن خروجی آسیابها و لزوم کاهش حد جداسازی، مقدار انتقال غیر انتخابی به تهریز افزایش می‌یابد [۴]. یک نوع کلاسیفایر که این اواخر مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است کلاسیفایر برگشتی می‌باشد [۵، ۶] که از ترکیب کلاسیفایر بستر سیال و جداکننده شیب‌دار به دست آمده است (شکل ۲). وقتی ذره‌های جامد معلق به کانال‌های موازی شیب‌دار وارد می‌شوند، ذره‌های درشت‌تر روی سطح فوقانی تیغه‌ها ته‌نشین می‌شوند و ذره‌های ریزتر در سوسپانسیون باقیمانده و به سمت بالا حرکت می‌کنند. مواد ته‌نشین شده روی سطوح سر خورده و به ناحیه زیرین برمی‌گردند و با سوسپانسیون موجود در آن مخلوط شده و دوباره در اثر جریان رو به بالای آب به داخل کانال‌های شیب‌دار موازی وارد می‌شوند. عمل برگشت مواد که از آن به اثر خود چرخشی^(۵) یاد می‌شود، اثر متقابل بستر سیال و سطوح شیب‌دار می‌باشد که باعث می‌شود دقت جداسازی افزایش یابد [۶].

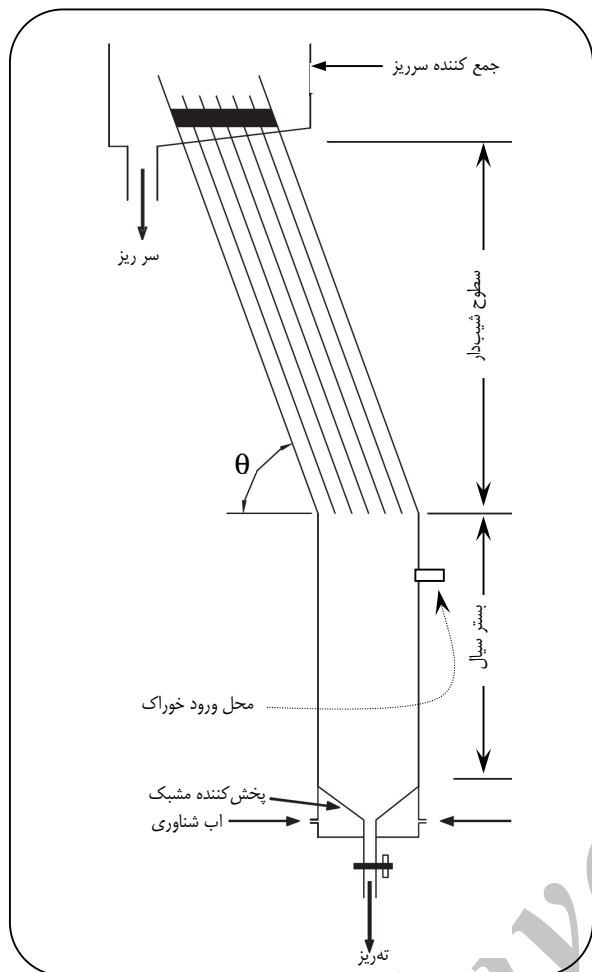
(۱) Partition curve

(۲) Cut size, Cut point

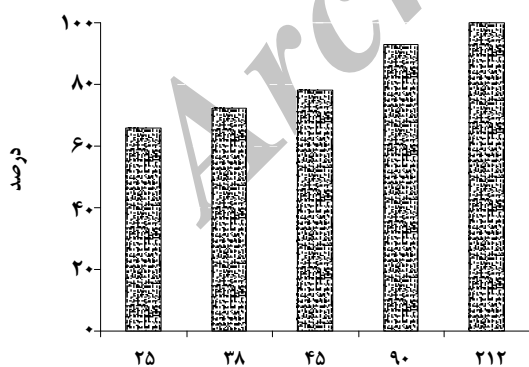
(۳) Imperfection coefficient

(۴) Grinding

(۵) Self-recycling effect



شکل ۲- نمای کلی کلاسیفایر برگشتی.



شکل ۳- دانه‌بندی بار ورودی به کلاسیفایر برگشتی بر اساس درصد عبور کرده از الک.

هرچند وجود تیغه‌های شیب‌دار در کلاسیفایر برگشتی موجب افزایش نرخ ته‌نشینی و افزایش ظرفیت آن شده است اما حد جداسازی کلاسیفایر مذکور به طور معمول بالای ۱۰۰ میکرون گزارش شده است. ذوالقدری و عبدالهی [۷] ضمن ارایه توضیحات کافی در خصوص چگونگی عملکرد کلاسیفایر برگشتی و چگونگی بزرگ‌مقیاس کردن آن، موفق شدند طبقه‌بندی ابعادی به نسبت خوبی با حد جداسازی ۷۴ تا ۱۳۲ میکرون با کلاسیفایر برگشتی انجام دهند. در صورتی که به‌توان حد جداسازی کلاسیفایر برگشتی را کاهش داد به‌گونه‌ای که کارایی کاهش نیابد، می‌توان دامنه کاربرد آن را تا حد زیادی وسیع‌تر کرد. بر همین اساس در پژوهش حاضر عملکرد کلاسیفایر برگشتی در طبقه‌بندی ابعادی با حد جداسازی حدود ۴۵ میکرون ارزیابی شده است.

بخش تجربی

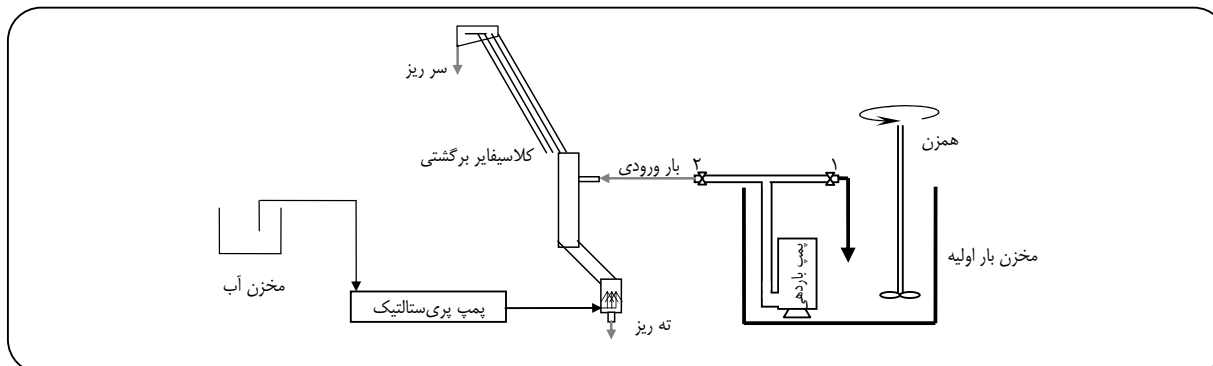
در تمامی آزمایش‌ها، باطله زغال‌سنگ کارخانه زغالشویی شرکت زغال‌سنگ البرز شرقی به عنوان بار اولیه مورد استفاده قرار گرفت. جرم مخصوص بار اولیه ۲ گرم بر سانتی‌متر مکعب بود و قبل از انجام آزمایش، بار اولیه تا زیر ۲۱۲ میکرون خرد شده بود. بار ورودی به کلاسیفایر به صورت تر و با روش غربال با الک، تجزیه ابعادی شد (شکل ۳)، هرچند شکل دانه‌های زغال‌سنگ نظم خاصی نداشت اما به‌گروه نزدیک بود و شکل ذره‌های رسی موجود در نمونه، به تقریب ورقه‌ای بود.

شاید علت اصلی متداول نبودن تجزیه سرنندی در ابعاد کمتر از ۴۰ میکرون، گران و کمیاب بودن سرندهای با چشمه ریزتر بوده است. اخیراً شرکت صنایع الک دماوند موفق به تولید سرندهایی با چشمه‌های بسیار ریزتر (حتی ۱۵ میکرون) شده است که در این پژوهش از آنها استفاده شده است.

همانگونه که در شکل ۳ دیده می‌شود، نزدیک به ۸۰٪ بار ورودی زیر ۴۵ میکرون است و فراوانی مواد ریزتر از ۲۵ میکرون به ۶۵٪ بالغ می‌شود.

شکل ۴ نمای کلی آزمایش‌های انجام شده را نشان می‌دهد. این سیستم به صورت پیوسته کار می‌کند. طی آزمایش‌های انجام شده بار ورودی به صورت دوغاب^(۱) و به‌وسیله یک دستگاه پمپ لجن‌کش به کلاسیفایر برگشتی باردهی می‌شد.

(۱) Slurry



شکل ۴ - نمای کلی برپایی آزمایش‌ها.

ورودی به کلاسیفایر با گذشت زمان اندکی کاهش یافت (جدول ۳). با اندازه‌گیری دبی باردهی در یک بازه زمانی ۱۵ دقیقه‌ای مشخص شد که به منظور باردهی پایدار، کمترین شدت جریان دوغاب باید در حدود ۲۱۰۰ گرم بر دقیقه باشد، بر همین اساس مقدار شدت جریان باردهی دوغاب در طول مدت آزمایش بیش از این مقدار در نظر گرفته شد و بعد از هر نمونه‌گیری با تغییر جزئی در سامانه‌ی باردهی، شدت جریان دوغاب ورودی کاهش داده می‌شد.

نمونه‌های دوغاب گرفته شده از سرریز و ته‌ریز ابتدا وزن و سپس به صورت تر و با روش غربال با الک به محدوده‌های ابعادی $25-38 \mu\text{m}$ و $45-90 \mu\text{m}$ ، $90-212 \mu\text{m}$ تقسیم شدند. با اندازه‌گیری وزن نمونه‌های دوغاب سرریز و ته‌ریز و اندازه‌گیری وزن مواد جامد در بازه‌های ابعادی گوناگون (پس از خشک شدن)، علاوه بر مشخص شدن دانه‌بندی سرریز و ته‌ریز، غلظت جامد در جریان‌های مذکور نیز تعیین شدند. شدت جریان‌های سرریز و ته‌ریز نیز از تقسیم کردن وزن نمونه دوغاب بر زمان جمع‌آوری محاسبه شد.

برای ارزیابی عملکرد کلاسیفایر برگشتی، لازم است که برای هر بازه‌ی ابعادی یک اندازه معرف در نظر گرفته شود. برای این منظور متوسط هندسی حدود بالا و پایین در هر بازه‌ی ابعادی به عنوان اندازه معرف همان بازه در نظر گرفته شد (جدول ۴).

از آنجایی که به هنگام آماده‌سازی نمونه به منظور کاهش ابعاد تا زیر ۲۱۲ میکرون یک مرحله خردکردن بر روی باطله‌های زغال‌سنگ انجام شده بود، انتظار می‌رفت چگالی ذرات، تاحدی طبقه‌بندی ابعادی با کلاسیفایر را تحت تأثیر قرار دهد. به همین منظور چگالی مواد منتقل شده به سرریز و ته‌ریز در هر بازه‌ی ابعادی به طور مجزا اندازه‌گیری شد (جدول ۵).

به منظور جلوگیری از ته‌نشینی ذره‌ها در مخزن بار اولیه، خروجی پمپ به دو قسمت تقسیم شده و بخش اعظم آن از روش خروجی شماره ۱ به داخل مخزن برگردانده می‌شد و باردهی به کلاسیفایر از روش خروجی ۲ صورت می‌گرفت و در فواصل زمانی معین از دوغاب خروجی از سرریز و ته‌ریز کلاسیفایر نمونه‌برداری می‌شد. ویژگی‌های دقیق کلاسیفایر برگشتی مورد استفاده، در جدول ۱ آورده شده است.

قبل از شروع آزمایش‌ها با تنظیم دور پمپ گرم‌واره‌ی^(۱)، دبی آب شناوری بر روی مقدار ۶۰۰ میلی‌لیتر بر دقیقه ثابت شد و در حین انجام آزمایش‌ها خروجی ته‌ریز برای هر دقیقه فقط ۵ ثانیه باز می‌شد تا ۶۵۰ میلی‌لیتر دوغاب، به‌عنوان ته‌ریز از کلاسیفایر برگشتی خارج شود. بر خلاف ته‌ریز، جریان سرریز به‌طور پیوسته خارج می‌شد. منظور اندازه‌گیری شدت جریان سرریز، به‌مدت ۱۰ ثانیه دوغاب خروجی از سرریز در یک ظرف جمع‌آوری می‌شد. شرایط انجام آزمایش‌ها به شرح جدول ۲ می‌باشد.

نمونه‌های دوغاب ته‌ریز و سرریز ابتدا توزین و سپس با الک به صورت تر تجزیه ابعادی شدند و هر محدوده ابعادی وزن شد و بدین ترتیب علاوه بر دانه‌بندی، وزن جامد خشک در سرریز و ته‌ریز نیز اندازه‌گیری شد و بر اساس آن درصد جامد در سرریز و ته‌ریز تعیین شدند. دبی بار ورودی در هر نمونه‌برداری از جمع شدت جریان‌های سرریز و ته‌ریز منهای دبی آب شناوری (که ۶۰۰ میلی‌لیتر بر دقیقه بود) محاسبه شد.

هر چند در حین آزمایش‌ها فقط دبی دوغاب ورودی به کلاسیفایر به عنوان عامل اصلی تغییر داده می‌شد اما به علت ته‌نشینی ذره‌های درشت‌تر در مجاورت دیواره به‌ویژه بین دیواره و پمپ باردهی که اغتشاش کمتر بود، درصد وزنی جامد دوغاب

(۱) Peristaltic pump

بررسی اختلاف چگالی بین سرریز و ته‌ریز برای درشت‌ترین بازه‌ی ابعادی که در هیچ‌یک از آزمایش‌ها به سرریز منتقل نمی‌شد و همچنین ریزترین محدوده ابعادی (۲۵ μ m-) که به طور غیر انتخابی بین دو خروجی تقسیم می‌شد انجام نگرفت. با توجه به جدول ۵ مشخص است که در سرریز و ته‌ریز هر بازه‌ی ابعادی اختلاف چگالی معنی‌داری وجود دارد.

به همین دلیل اندازه معرف هر محدوده ابعادی بر اساس رابطه استوکس (معادله ۲) به اندازه معرف مطابق با چگالی متوسط بار ورودی (۲ گرم بر سانتی‌متر مکعب) تبدیل شد.

$$(\rho_i - \delta_v) \cdot \bar{X}_i^2 = (2 - \delta_v) \cdot d_i^2 \quad (2)$$

در معادله ۲ \bar{X}_i^2 اندازه معرف بازه‌ی ρ_i چگالی ذره‌های ته‌ریز در محدوده نام و δ_v چگالی دوغاب در ناحیه سرریز است. d_i اندازه ذره‌ای با چگالی ۲ گرم بر سانتی‌متر مکعب است که سرعت سقوط آن برابر با ذره‌ی با اندازه \bar{X}_i^2 و با چگالی ρ_i است و به عنوان اندازه معرف تبدیل شده در ستون سمت چپ جدول ۴ آورده شده است.

نتیجه‌ها و بحث

با استفاده از نتیجه‌های تجزیه سرنبدی نمونه‌های سرریز و ته‌ریز و همچنین معادله‌های موازنه جرم، می‌توان درصد انتقال ذره‌های محدوده‌های ابعادی گوناگون به ته‌ریز را مطابق جدول ۶ محاسبه کرد.

تعیین حد جداسازی و ضریب نقص

معادله ۳ تابع طبقه‌بندی کلاسیفایر است که در آن عبارت d_i نشانگر اندازه معرف تبدیل شده برای محدوده ابعادی نام، $D_{\delta,c}$ حد جداسازی اصلاح شده (به شکل ۱ - ج مراجعه شود)، B_y بخشی از خوراک که بدون طبقه‌بندی به ته‌ریز می‌رود، m ضریب ثابت معادله و P_u بخشی از مواد در محدوده ابعادی نام است که به ته‌ریز منتقل شده‌اند [۸].

$$P_u = B_y + (1 - B_y) \left[1 - 2 \left(\frac{d_i}{D_{\delta,c}} \right)^m \right] \quad (3)$$

با برازش معادله ۳ به داده‌های جدول ۶ می‌توان حد جداسازی کلاسیفایر برگشتی و ضریب نقص آن را به شرح جدول ۷ به‌دست آورد.

جدول ۱- ویژگی‌های اصلی کلاسیفایر برگشتی.

۳۰×۳۰	سطح مقطع دستگاه در ته‌ریز (mm ^۲)
۳۰×۷۵	سطح مقطع دستگاه در ناحیه خوراک‌دهی (mm ^۲)
۱۲۰	طول کانال‌های شیب‌دار (cm)
۹×۷۵	سطح مقطع کانال‌های شیب‌دار (mm ^۲)
۶۰	زاویه شیب کانال‌ها نسبت به افق (درجه)

جدول ۲- شرایط انجام آزمایش‌ها.

۶۰۰	دبی آب شناوری (میلی‌لیتر بر دقیقه)
۸	تعداد نمونه‌گیری‌ها:
۶۵۰	دبی حجمی ته‌ریز (میلی‌لیتر بر دقیقه)

جدول ۳- درصد وزنی جامد و دبی دوغاب ورودی در نمونه‌گیری‌های گوناگون.

شماره	دبی (گرم بر دقیقه)	درصد وزنی جامد
۲	۲۷۸۵٫۱	۸٫۷۸
۴	۲۷۵۰٫۸	۹٫۱۷
۳	۲۶۱۳	۸٫۶۹
۷	۲۶۰۳	۸٫۲۶
۱	۲۵۳۴٫۸	۸٫۵۱
۵	۲۵۲۱٫۰	۷٫۵۳
۶	۲۴۵۵٫۸	۷٫۶۵
۸	۲۲۴۸٫۵	۷٫۱۱

جدول ۴ - محدوده‌های ابعادی و اندازه معرف آنها بر حسب میکرون، فراوانی مواد زیر ۱ میکرون ناچیز فرض شده‌است.

شمارنده (i)	محدوده ابعادی (X _i · X _{i+1})	اندازه معرف $\bar{X}_i = \sqrt{X_i \cdot X_{i+1}}$	اندازه معرف تبدیل شده ((d _i))
۱	+۹۰ - ۲۱۲	۱۳۸	۹۸
۲	+۴۵ - ۹۰	۶۴	۵۸
۳	+۳۸ - ۴۵	۴۱	۴۲
۴	+۲۵ - ۳۸	۳۱	۳۳
۵	+۱ - ۲۵	۵	۶

مقدار ضریب قطعیت^(۱) که نشان‌دهنده دقت برازش است (و بیشترین مقدار آن در حالت آرمانی برابر ۱ است) در هر ۸ برازش بالای ۰٫۹۹۸ بود.

همان‌گونه که در جدول ۷ مشاهده می‌شود، حدجدا سازی واقعی کلاسیفایر که با D_{50} نشان داده شده است کمتر از ۵۱ میکرون است (به شکل ۱ - ب مراجعه شود) و با وجود حدجدا سازی پایین، ضریب نقص آن کمتر از ۰٫۳ است. این در حالی است که با توجه به داده‌های خام [۹]، هیدروسیکلون‌هایی با حد جدا سازی ۸۰ تا ۱۰۰ میکرون، ضریب نقصی معادل ۰٫۷ دارند و در حدجدا سازی‌های پایین‌تر، ضریب نقص هیدروسیکلون‌ها به مراتب بیش از این مقدار است.

ارزیابی میزان انتقال غیر انتخابی ذره‌های ریز به ته‌ریز

به‌طور معمول در کلاسیفایرها متناسب با درصد انتقال آب به ته‌ریز، بخشی از خوراک به صورت غیر انتخابی به ته‌ریز منتقل می‌شود. به عبارت دیگر داریم:

$$R_s = R_f = \frac{W_u}{W_u + W_o} \times 100 \quad (۴)$$

که در آن R_s درصد انتقال غیر انتخابی ذره‌ها به جریان ته‌ریز، R_f درصد آب منتقل شده به جریان ته‌ریز، W_u دبی آب ته‌ریز و W_o دبی آب سرریز است.

به علت ماهیت بستر سیال کلاسیفایر برگشتی، علاوه بر آب همراه با دوغاب خوراک، مقداری آب به صورت آب شناوری کلاسیفایر وارد می‌شود که بیشترین بخش آن به جریان ته‌ریز منتقل می‌شود. بررسی ارتباط بین میزان انتقال غیر انتخابی ذره‌های جامد به ته‌ریز و تأثیر آب شناوری بر انتقال آب خوراک به ته‌ریز در شناخت چگونگی عملکرد کلاسیفایر برگشتی بسیار دارای اهمیت است.

در حال حاضر فرض می‌شود که به علت آرام بودن جریان مواد در نزدیکی ته‌ریز، اختلاط بین دوغاب خوراک و آب شناوری ناچیز است. همچنین با توجه به اینکه آب شناوری در مجاورت ته‌ریز قرار داشت (شکل‌های ۲ و ۴)، فرض می‌شود که به تقریب همه آب شناوری به ته‌ریز منتقل شود.

در صورت اعتبار این دو فرض، انتقال غیر انتخابی ذره‌ها به ته‌ریز بسیار کم خواهد بود؛ چراکه در مجاورت ته‌ریز، آب شناوری، جایگزین آب دوغاب خوراک (که دارای ذره‌های ریز است) می‌شود. در این صورت به علت کاهش چشمگیر درصد انتقال آب خوراک به ته‌ریز، باید درصد انتقال ذره‌های ریز به ته‌ریز نیز کاهش یابد.

جدول ۵ - چگالی سرریز و ته‌ریز در بازه‌های ابعادی گوناگون با اطمینان ۹۵ درصد.

جریان	\bar{X}_i (μm)		
	۶۴	۴۱	۳۱
سرریز	$1,38 \pm 0,03$	$1,61 \pm 0,13$	$1,81 \pm 0,04$
ته‌ریز	$1,82 \pm 0,04$	$2,07 \pm 0,03$	$2,11 \pm 0,04$

جدول ۶ - درصد انتقال ذره‌های جامد به ته‌ریز در بازه‌های ابعادی گوناگون.

شمارنده اجرا (j)	d_i (μm)				
	۹۸	۵۸	۴۲	۳۳	۶
۱	۱۰۰	۶۴٫۳	۳۴٫۶	۱۹٫۴	۱۰٫۸
۲	۱۰۰	۷۵٫۵	۳۲٫۴	۲۴٫۲	۱۱٫۱
۳	۱۰۰	۷۵٫۸	۴۸٫۱	۲۰٫۰	۱۰٫۲
۴	۱۰۰	۷۲٫۶	۴۳٫۲	۲۷٫۵	۱۱٫۴
۵	۱۰۰	۷۶٫۰	۴۰٫۷	۲۱٫۴	۷٫۹
۶	۱۰۰	۸۱٫۸	۴۱٫۵	۲۷٫۵	۱۱٫۹
۷	۱۰۰	۷۸٫۴	۴۶٫۰	۲۶٫۳	۱۲٫۴
۸	۱۰۰	۸۷٫۴	۵۷٫۶	۳۴٫۱	۱۲٫۲

جدول ۷ - حدجدا سازی اصلاح شده و واقعی و ضریب نقص کلاسیفایر برگشتی در ۸ مجموعه نمونه گیری

شمارنده اجرا (j)	$D_{50,c}$ (μ)	D_{50} (μ)	$I = \frac{D_{50} - D_{50,c}}{2 \cdot D_{50}}$
۱	۵۳	۵۱	۰٫۲۶۰
۲	۵۰	۴۸	۰٫۲۲۱
۳	۴۷	۴۵	۰٫۲۶۰
۴	۴۹	۴۶	۰٫۳۰۸
۵	۴۸	۴۶	۰٫۲۴۲
۶	۴۷	۴۵	۰٫۲۴۸
۷	۴۷	۴۴	۰٫۲۷۶
۸	۴۲	۳۹	۰٫۲۹۴

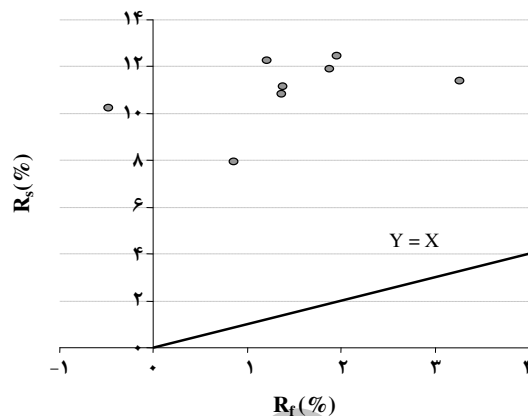
(۱) Coefficient of determination, $R^2 = 1 - (SS_{\text{error}} / SS_{\text{total}})$, SS_{total} = total sum of squares, SS_{error} = sum of squares of residuals

در محاسبه انتقال آب خوراک بر اساس معادله (۵)، فرض بر آن بود که آب شناوری به طور کامل جایگزین آب خوراک موجود در لابلای ذره‌های درشت جمع شده در نزدیکی مجرای ته‌ریز می‌شود اما در عمل جایگزینی به طور کامل صورت نمی‌گیرد و مقداری از آب خوراک به علت اختلاط با آب شناوری به مجرای ته‌ریز منتقل می‌شود. این پدیده باعث می‌شود که همواره مقدار واقعی انتقال آب خوراک به ته‌ریز (و همچنین انتقال غیر انتخابی ذره‌های ریز به ته‌ریز) بسیار بیشتر از مقدار محاسبه شده بر اساس موازنه آب باشد.

ارزیابی میزان اختلاط در مجاورت ته‌ریز

همانگونه که بیان شد، مقدار واقعی انتقال آب خوراک به ته‌ریز بسیار بیشتر از مقدار محاسبه شده بر اساس موازنه جرم آب است. حتی در مواردی که انتقال آب خوراک به ته‌ریز بر اساس معادله (۵) منفی است، به علت اختلاط آب شناوری و آب خوراک، بخشی از ذره‌های ریز به ته‌ریز منتقل می‌شود (شکل ۵). با توجه به نتیجه‌های به دست آمده از تحلیل داده‌های شکل ۶ می‌توان نسبت (R_s/R_f) را به عنوان شاخص اختلاط در ته‌ریز کلاسیفایرهای بستر سیال قلمداد کرد. اگر این شاخص برابر با ۱ باشد به معنای عدم اختلاط در مجاورت ته‌ریز و روند تهنشینی مناسب ذره‌های درشت است و هرچه این شاخص بزرگتر باشد، نشان دهنده اختلاط بیشتر در ناحیه نزدیک به ته‌ریز است که این امر نشانه مختل شدن روند تهنشینی ذره‌ها است. شکل ۶ ارتباط بین نسبت (R_s/R_f) را با R_f نشان می‌دهد. از آنجایی که ممکن است در مواردی مقدار R_f منفی باشد، قدر مطلق نسبت (R_s/R_f) به عنوان شاخص اختلاط^(۱) در ته‌ریز کلاسیفایر برگشتی در نظر گرفته شد.

همانگونه که در شکل ۶ دیده می‌شود با کاهش R_f مقدار شاخص اختلاط به شکل نمایی افزایش می‌یابد، هرچه مقدار R_f کمتر باشد، میزان اختلاط آب خوراک و آب شناوری بیشتر است. R_f تابع شدت جریان آب شناوری و شدت جریان آب خوراک است و با توجه به شکل ۶ می‌توان استنباط کرد در شرایط ثابت باردهی، با وجود اینکه افزایش آب شناوری می‌تواند منجر به افزایش انتقال ذره‌های نرمه به سرریز شود (اثر مطلوب) اما همین افزایش آب شناوری، کاهش R_f و همچنین افزایش اختلاط آب خوراک و آب شناوری را منجر می‌شود و این پدیده افزایش انتقال غیر انتخابی ذره‌های ریز به ته‌ریز را به دنبال دارد (اثر نامطلوب). به عبارت دیگر به‌ازای هر نرخ باردهی خاص، یک شدت جریان



شکل ۵ - رابطه R_s و R_f ؛ بر خلاف هیدروسیکلون‌ها، بین دو کمیت مذکور رابطه خاصی وجود ندارد.

برای اعتبارسنجی، درصد انتقال آب خوراک به ته‌ریز بر اساس موازنه جرم آب و فرض یاد شده به صورت معادله (۵) محاسبه شد:

$$R_f = \frac{W_u - 600}{W_u + W_o - 600} \times 100 \quad (5)$$

که در آن W_u دبی آب ته‌ریز و W_o دبی آب سرریز است و عدد ۶۰۰ در معادله (۵) همان دبی آب شناوری می‌باشد که در جدول ۲ بیان شده است. با مقایسه معادله‌های (۴) و (۵) کاهش سهم آب همراه با دوغاب خوراک در جریان ته‌ریز قابل درک است. درصد انتقال غیر انتخابی ذره‌های جامد به ته‌ریز نیز بر اساس موازنه جرم در محدوده $25 \mu\text{m}$ - با معادله (۶) محاسبه شد.

$$R_s = \frac{M_u \times f_u}{M_u \times f_u + M_o \times f_o} \quad (6)$$

در معادله (۶) M_o و M_u شدت جریان مواد جامد منتقل شده به ته‌ریز و سرریز است و f_o و f_u فراوانی ذره‌های ریزتر از ۲۵ میکرون در مواد جامد منتقل شده به ته‌ریز و سرریز است. خط $Y=X$ در شکل ۵، رابطه بین میزان انتقال آب دوغاب خوراک به ته‌ریز و میزان انتقال ذره‌های ریزتر از ۲۵ میکرون به ته‌ریز را بر اساس اعتبار فرض اختلاط ناچیز آب خوراک با آب شناوری نشان می‌دهد. نقاط نشان داده شده در شکل ۵ رابطه R_f و R_s را بر اساس مقدارهای به دست آمده از معادله‌های (۵) و (۶) را نشان می‌دهد. دیده می‌شود که مقدار واقعی انتقال ذره‌های ریز به ته‌ریز بسیار بیشتر از مقدارهای پیش‌بینی شده بر اساس فرض شود اختلاط آب خوراک و آب شناوری است.

(۱) Mixing index

اختلاف در نزدیکی تهریز بیشتر است. بر همین اساس قدر مطلق نسبت R_s به R_f شاخص مناسبی برای ارزیابی میزان اختلاف است. با توجه به شکل ۶ می‌توان دریافت که با کاهش شدت جریان آب شناوری می‌توان اختلاف را در مجاورت تهریز کنترل کرد. در صورتی که شدت جریان آب شناوری برابر با مقدار بحرانی باشد، مناسب‌ترین شرایط برای ته‌نشینی مواد درشت فراهم می‌شود و میزان انتقال غیر انتخابی به ته ریز کمینه می‌شود.

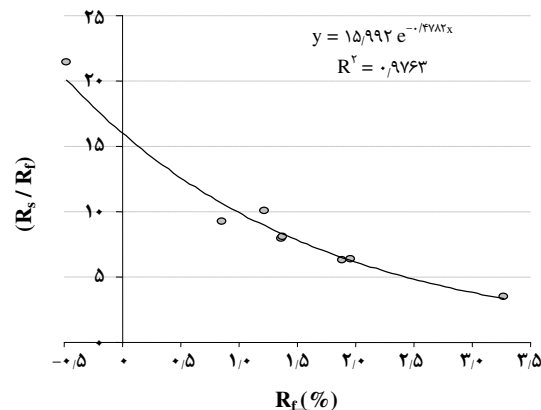
قدردانی

از همکاری‌های صمیمانه آقای سید محمد تقی بنی‌هاشمی (سازنده کلاسیفایر) و آقای طاهری (تهیه کننده پمپ خوراک‌دهی) قدردانی می‌نمایم.

نمادها

D_{v5}, D_{50}, D_{25}	اندازه که در آن احتمال انتقال به تهریز به ترتیب ۲۵، ۵۰ و یا ۷۵ درصد است، به D_{50} اصطلاحاً حد جداسازی گفته می‌شود
I	ضریب نقص
$D_{50,c}$	حد جداسازی اصلاح شده
i	شمارنده محدوده‌های ابعادی
\bar{X}_i	اندازه معرف محدوده ابعادی نام
ρ_i	چگالی ذرات تهریز در محدوده نام
d_i	اندازه ذره‌ای با چگالی ۲ گرم بر سانتی‌متر
	که سرعت سقوط آن برابر با ذره‌ی با اندازه \bar{X}_i و با چگالی ρ_i است
δ_v	چگالی دوغاب در ناحیه سرریز
j	شمارنده اجرا
W_o	شدت جریان آب در سرریز
W_u	شدت جریان آب در ته ریز
f_o	فراوانی ذرات ریزتر از ۲۵ میکرون در سرریز
f_u	فراوانی ذرات ریزتر از ۲۵ میکرون در تهریز
M_o	شدت جریان مواد جامد منتقل شده به سرریز
M_u	شدت جریان مواد جامد منتقل شده به ته ریز
P_u	بخشی از مواد در محدوده ابعادی نام است که به ته ریز منتقل شده‌اند
B_y	بخشی از خوراک که بدون طبقه‌بندی به تهریز می‌رود
R_s	درصد انتقال غیرانتخابی ذرات به جریان تهریز
R_f	درصد آب خوراک منتقل شده به جریان تهریز

تاریخ دریافت: ۱۳۸۸/۸/۳۰ ؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۰/۳/۲



شکل ۶- رابطه شاخص اختلاف با R_f .

آب شناوری بحرانی وجود دارد که در مقدارهای بیشتر از آن، به علت ایجاد اختلاف، جریان مواد در ناحیه زیرین مختل شده و انتقال ذره‌های ریز به تهریز افزایش می‌یابد و در مقدارهای کمتر از آن اثر مطلوب آب شناوری کم‌رنگ می‌شود. در نتیجه می‌توان شدت جریان آب شناوری بحرانی را شدت جریان آب بهینه نیز قلمداد کرد. نتیجه‌های آزمایش‌های ذوالقدری و عبدالهی نیز تأیید کننده این امر است، چرا که وقتی شدت جریان آب شناوری بیشتر از حد معینی باشد، مقدار R_s بیشتر از R_f است که این امر موید اختلاف در ناحیه تحتانی کلاسیفایر است حال آنکه وقتی شدت جریان آب شناوری کاهش یافت، مقدارهای R_s و R_f به تقریب برابر شد [۷]. بنابراین می‌توان با کاهش شدت جریان آب شناوری شرایطی را ایجاد کرد که مقدارهای R_s و R_f به تقریب برابر شوند و اختلاف به حداقل برسد.

نتیجه‌گیری

کلاسیفایر برگشتی دستگاهی نوین است که توانایی طبقه‌بندی ابعادی به نسبت دقیق (ضریب نقص کمتر از ۰/۳) با حد جداسازی ۴۵ میکرون و ظرفیت جامد $5 \text{ t.m}^{-2}.\text{h}^{-1}$ را دارا می‌باشد. میزان انتقال ذره‌های ریز در تهریز هیدروسیکلون‌ها به‌طور معمول حدود ۳۰٪ است در حالی که به علت استفاده از آب شناوری در کلاسیفایر برگشتی، میزان انتقال ذره‌های ریز به تهریز کلاسیفایر برگشتی به طور متوسط حدود ۱۱٪ است. به علت اختلاف در مجاورت ته ریز کلاسیفایر برگشتی، مقدار واقعی انتقال آب خوراک به تهریز (که به تقریب معادل مقدار انتقال مواد ریز به تهریز است) می‌تواند چندین برابر بیشتر از مقدار محاسبه شده بر اساس معادله ۵ باشد. هرچه اختلاف درصد انتقال ذره‌های ریز به تهریز (R_s) با R_f بیشتر باشد نشان‌دهنده آن است که

مراجع

- [1] Nicholas P.C., "Handbook of Chemical Processing Equipment", Ch. 6: Mechanical Separation Equipment, 419-422 (2000).
- [۲] نعمت‌اللهی، ح.؛ کانه‌آرایی، جلد ۱، ۲۵۰-۲۵۴ (۱۳۸۱).
- [3] King, R.P., "Modeling and simulation of Mineral Processing", Butterworth-Heinemann, United Kingdom (2001).
- [4] Kawatra, S.K., Bakshi, A.K., Rusesky, M.T., Effect of Viscosity on the Cut (d_{50}) Size of Hydrocyclone Classifiers, *Minerals Engineering*, **9**(8), p. 881 (1996).
- [5] Laskovski, D., Duncan, P., Stevenson, P., Zhou, J., Galvin, K.P., Segregation of Hydraulically Suspended Particles in Inclined Channels, *Chemical Engineering Science*, **61**(22), p. 7269 (2006).
- [6] Doroodchi, E., Zhou, J., Fletcher, D.F., Galvin, K.P., Particle Size Classification in a Fluidized Bed Containing Parallel Inclined Plates, *Minerals Engineering*, **19**(2), p. 162 (2006).
- [۷] ذوالقدری، م.؛ عبداللهی، م.؛ طراحی کلاسیفایر برگشتی به منظور طبقه‌بندی ابعادی و روش افزایش مقیاس آن، نشریه علمی-پژوهشی مهندسی معدن، **۲**(۱)، ص. ۵۱ (۱۳۸۶).
- [8] Rao V.B., Addressing an Inverse Problem of Classifier Size Distributions, *Powder Technology*, **176**(2-3), p. 123 (2007).
- [۹] اسمعیلی، م.؛ پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه شهیدباهنر کرمان (۱۳۸۷).