

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

مجید ذوالقدری\*<sup>+</sup>

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 حد 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.

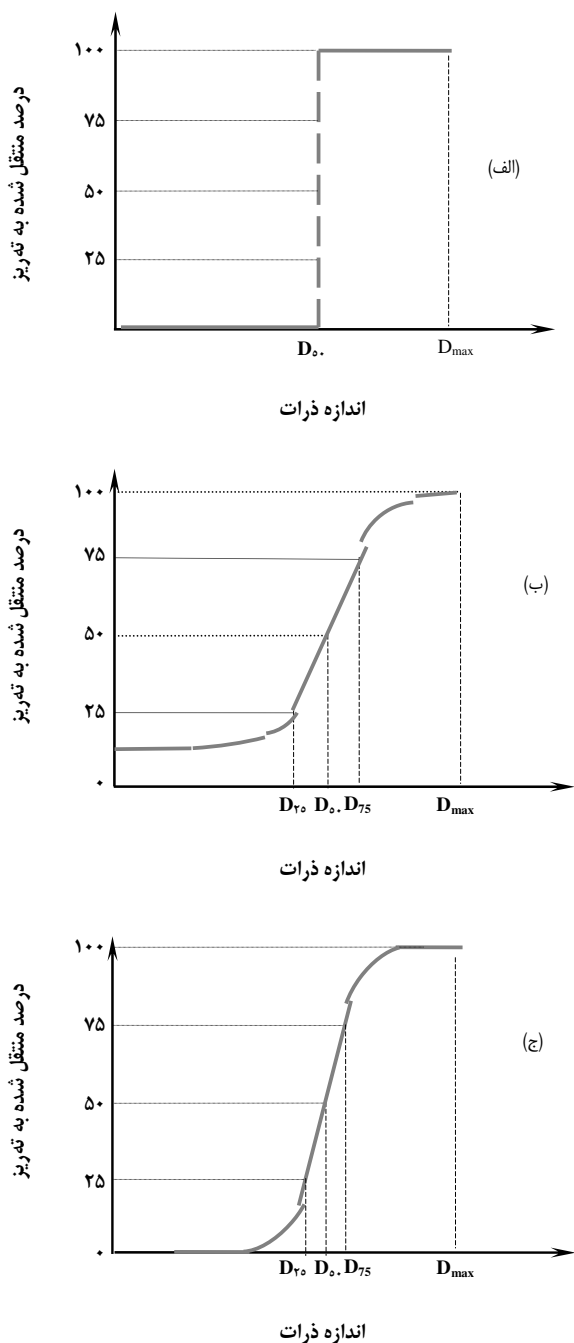
### مقدمه

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

<sup>+</sup>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<sup>(۱)</sup> 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<sup>(۲)</sup> 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<sup>(۳)</sup> 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<sup>(۴)</sup> 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<sup>(۵)</sup> یاد می‌شود، اثر متقابل بستر سیال و سطوح شیب‌دار می‌باشد که باعث می‌شود دقت جداسازی افزایش یابد [۶].

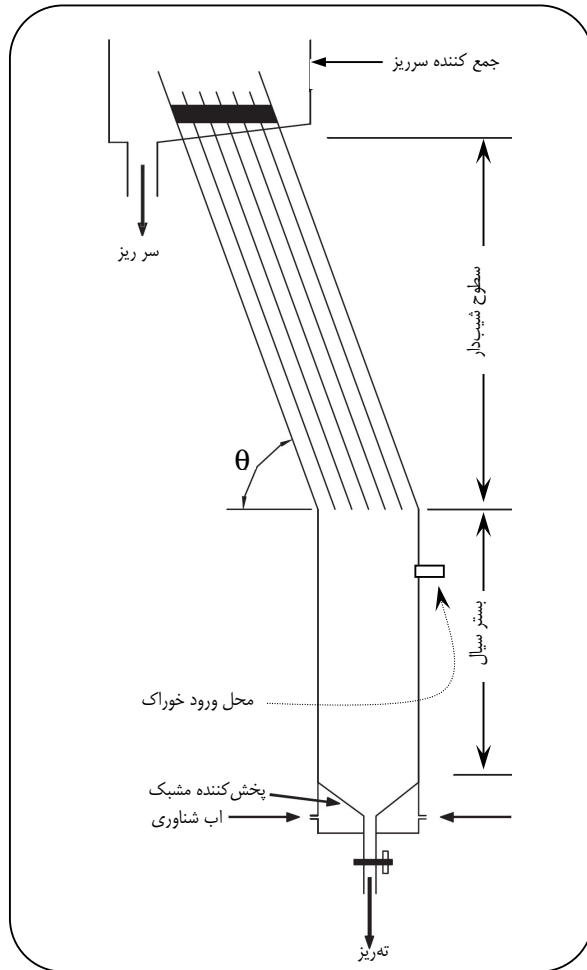
(۱) Partition curve

(۲) Cut size, Cut point

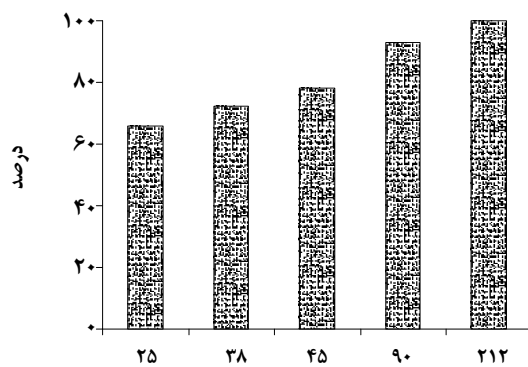
(۳) Imperfection coefficient

(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

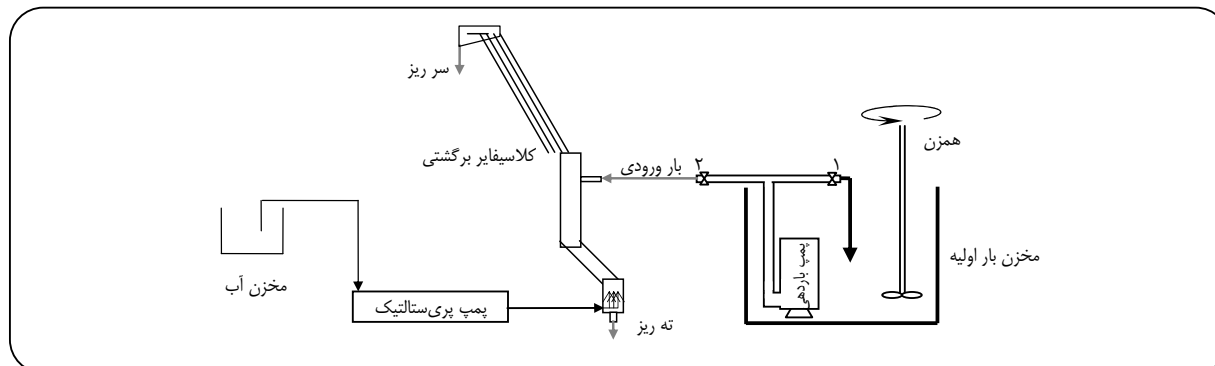
در تمامی آزمایش‌ها، باطله زغال‌سنگ کارخانه زغالشویی شرکت زغال‌سنگ البرز شرقی به عنوان بار اولیه مورد استفاده قرار گرفت. جرم مخصوص بار اولیه ۲ گرم بر سانتی‌متر مکعب بود و قبل از انجام آزمایش، بار اولیه تا زیر ۲۱۲ میکرون خرد شده بود. بار ورودی به کلاسیفایر به صورت تر و با روش غربال با الک، تجزیه ابعادی 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<sup>(۱)</sup> و به‌وسیله یک دستگاه پمپ لجن‌کش به کلاسیفایر برگشتی باردهی می‌شد.

(۱) Slurry



شکل ۴ - نمای کلی برپایی آزمایش‌ها.

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 گرم‌وارهای<sup>(۱)</sup>، 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 الکترونیک 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

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).

(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 (۲۵μm-) 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 نام،  $\rho_i$  چگالی ذره‌های ته‌ریز در محدوده نام و  $\delta_v$  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  $\rho_i$  است و به عنوان اندازه معرف تبدیل شده در ستون سمت چپ جدول ۴ آورده شده است.

### نتیجه‌ها و بحث

با استفاده از نتیجه‌های تجزیه‌سرنندی 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 <sup>۲</sup> )
۳۰×۷۵	سطح مقطع دستگاه در ناحیه خوراک‌دهی (mm <sup>۲</sup> )
۱۲۰	طول کانال‌های شیب‌دار (cm)
۹×۷۵	سطح مقطع کانال‌های شیب‌دار (mm <sup>۲</sup> )
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 <sub>i</sub> · X <sub>i+1</sub> )	اندازه معرف $\bar{X}_i = \sqrt{X_i \cdot X_{i+1}}$	اندازه معرف تبدیل شده ((d <sub>i</sub> ))
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<sup>(۱)</sup> که نشان‌دهنده‌ی دقت برآزش است (و بیشترین مقدار آن در حالت آرمانی برابر ۱ است) در هر ۸ برآزش بالای ۰/۹۹۸ بود.

همان‌گونه که در جدول ۷ مشاهده می‌شود، حدجداسازی واقعی کلاسیفایر که با  $D_{50}$  نشان داده شده است کمتر از ۵۱ میکرون است (به شکل ۱ - ب مراجعه شود) و باوجود حدجداسازی پایین، ضریب نقص آن کمتر از ۰/۳ است. این در حالی است که با توجه به داده‌های خام [۹]، هیدروسیکلون‌هایی با حد جداسازی ۸۰ تا ۱۰۰ میکرون، ضریب نقصی معادل ۰/۷ دارند و در حدجداسازی‌های 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	$\bar{X}_i$ ( $\mu\text{m}$ )		
	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)	$d_i$ ( $\mu\text{m}$ )				
	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 - حدجداسازی اصلاح شده و واقعی و ضریب نقص کلاسیفایر برگشتی در ۸ مجموعه نمونه گیری

شمارنده اجرا (j)	$D_{50,c}$ ( $\mu$ )	$D_{50}$ ( $\mu$ )	$I = \frac{D_{50} - D_{50,c}}{2 \cdot D_{50}}$
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

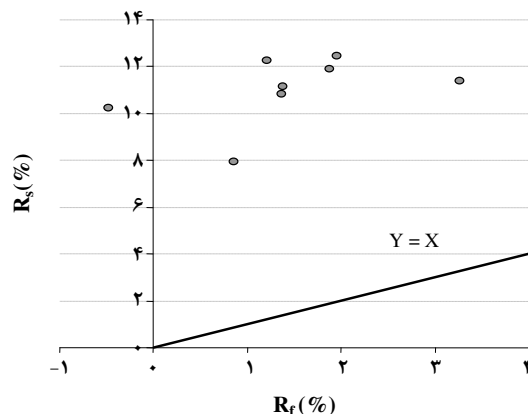
(۱) Coefficient of determination,  $R^2 = 1 - (SS_{\text{error}} / SS_{\text{total}})$ ,  $SS_{\text{total}}$  = total sum of squares,  $SS_{\text{error}}$  = sum of squares of residuals

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<sup>(۱)</sup> 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)  $M_u$  و  $M_o$  شدت جریان مواد جامد منتقل شده به ته‌ریز و سرریز است و  $f_u$  و  $f_o$  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

اختلاط در نزدیکی تهریز بیشتر است. بر همین اساس قدر مطلق نسبت  $R_s$  به  $R_f$  شاخص مناسبی برای ارزیابی میزان اختلاط است. با توجه به شکل ۶ می‌توان دریافت که با کاهش شدت جریان آب شناوری می‌توان اختلاط 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.

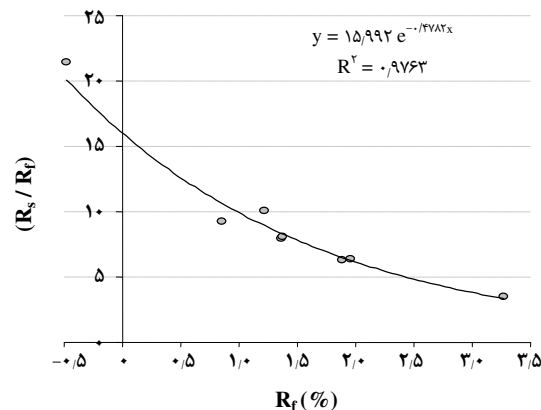
### قدردانی

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
$\rho_i$	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 $\rho_i$ است
$\delta_v$	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 اختلاط با  $R_f$ .

آب شناوری بحرانی وجود دارد که در مقدهای بیشتر از آن، به علت ایجاد اختلاط، جریان مواد در ناحیه زیرین مختل شده و انتقال ذره‌های ریز به تهریز افزایش می‌یابد و در مقدهای 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 اختلاط در ناحیه تحتانی کلاسیفایر است حال آنکه وقتی شدت جریان آب شناوری کاهش یافت، مقدهای  $R_s$  و  $R_f$  به تقریب برابر شد [۷]. بنابراین می‌توان با کاهش شدت جریان آب شناوری شرایطی را ایجاد کرد که مقدهای  $R_s$  و  $R_f$  به تقریب برابر شوند و اختلاط 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 اختلاط 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؛ کانه‌آرائی، 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).