

بررسی کارایی روش Masliyah در پیش بینی حد جدایش کلاسیفایرهای هیدرولیکی با جریان قائم

حمید خوشدست^۱؛ عباس سام^۲؛ فرانک حسنی^۳؛ فاطمه خوشنام^۳

۱- دانشجوی دکتری دانشگاه شهید باهنر کرمان khoshdast_hamid@yahoo.com

۲- استادیار دانشگاه شهید باهنر کرمان

۳- دانشجوی کارشناسی ارشد فراوری مواد معدنی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد جنوب، تهران

چکیده

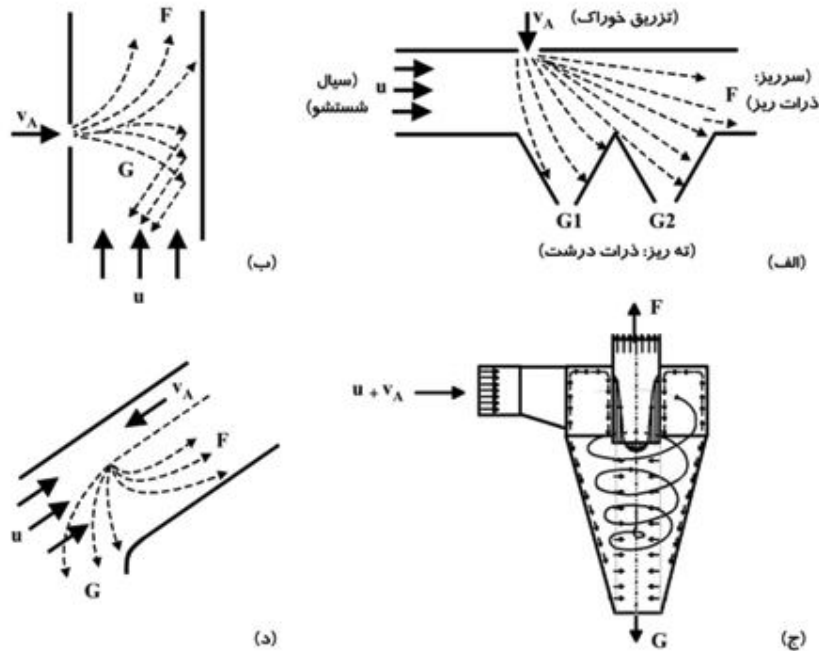
در پژوهش حاضر، میزان کارایی روش تجربی Masliyah، در پیش بینی حد جدایش کلاسیفایرهای هیدرولیکی با جریان قائم بررسی شده است. کلاسیفایر مذکور طراحی و در آزمایشگاه فراوری دانشگاه شهید باهنر نصب شده است. تأثیر دبی هیدرولیکی، توزیع دانه بندی، درصد جامد خوراک، زمان ماند و ابعاد کلاسیفایر بر خطای نسبی روش، در قالب یک طرح فاکتوری کامل دو سطحی، بررسی شده است. نتایج نشان داد که توزیع دانه بندی و تأثیر متقابل آن با دبی خوراک، بیشترین تأثیر را بر خطا دارند؛ به طوری که افزایش ابعاد خوراک در مقایسه با دیگر عوامل، به نحو بارزی خطای مدل را افزایش داد. افزایش تأثیر متقابل دانه بندی و دبی نیز، سبب کاهش خطای مدل شد. دبی، کمترین تأثیر را بر خطای نسبی مدل داشت. قدر مطلق تأثیر درصد جامد و زمان ماند تقریباً یکسان بود، با این تفاوت که برای کلاسیفایر با ابعاد بزرگتر، درصد جامد، تأثیر مستقیم و زمان ماند، تأثیر عکس داشته ولی برای کلاسیفایر کوچک، این تأثیرات برعکس بودند. خطای نسبی تخمین حد جدایش با شیوه مذکور، در سطح اعتماد ۹۵٪ برای کلاسیفایرهای با ابعاد بزرگ و کوچک به ترتیب $\pm 28/02$ و $\pm 27/81$ درصد به دست آمد.

کلمات کلیدی: کلاسیفایر هیدرولیکی، حد جدایش، روش Masliyah، طراحی آزمایش

۱- مقدمه

محدودتر تقسیم می‌شوند. بسته به نوع و جهت حرکت جریانی که ذرات را در داخل کلاسیفایر حمل و جابه‌جا می‌کند، کلاسیفایرها را می‌توان به چهار گروه با جریان قائم، با جریان افقی، با جریان مورب یا پیچشی (U-turn) و با جریان دورانی (گریز از مرکز) تقسیم‌بندی نمود [۱، ۲]. [۳]، [۴]، [۵]. در شکل (۱) الگوی جریان در انواع کلاسیفایرها به صورت شماتیک نشان داده شده است.

طبقه‌بندی مواد در ابعاد کوچک به روش مستقیم (سرند کردن) بازدهی مناسبی ندارد، بنابراین برای طبقه‌بندی این نوع مواد از روش غیرمستقیم استفاده می‌شود. در این روش مخلوطی از دانه‌های جامد با ابعاد مختلف در وسیله‌ای به نام کلاسیفایر بر مبنای سرعت نسبی حرکت دانه‌ها در یک سیال (معمولاً آب)، به بخش‌هایی با ابعاد



شکل ۱: الگوی جریان در کلاسیفایرهای با جریان (الف) افقی، (ب) قائم، (ج) دورانی و (د) مورب (پیچشی) [۳]، [۶]

برای پیش‌بینی حد جدایش (d_{50}) در کلاسیفایرها می‌توان معادلات زیر را از روابط فوق استخراج نمود:

$$\frac{d_{50}}{d_x} = \left[\frac{\sigma_x - \sigma_p}{\sigma_{50} - \sigma_p} \right]^{\frac{1}{2}} \quad \text{بر اساس قانون استوکس} \quad (۲)$$

$$\frac{d_{50}}{d_x} = \frac{\sigma_x - \sigma_p}{\sigma_{50} - \sigma_p} \quad \text{بر اساس قانون نیوتن} \quad (۳)$$

که d_{50} اندازه معیار و σ دانسیته ذره با اندازه معیار (X)، دانسیته ذره با اندازه حد جدایش (σ_{50}) و دانسیته پالپ (P) است. حد فوقانی قوانین استوکس و نیوتن با استفاده از عدد رینولدز (N_R) به ترتیب ۵۰ میکرون و ۵ میلی‌متر به دست می‌آید. این در حالی است که کاربرد بیشتر کلاسیفایرهای آبی در محدوده ۴۰-۸۰۰ میکرون قرار دارد که قوانین مذکور دقت و کارایی خود را از دست می‌دهند [۱، ۲]، [۳]

صرفنظر از ویژگی‌های طراحی و مکانیزم عملکرد، کلیه کلاسیفایرها از قانون حاکم بر حرکت ذره جامد در یک محیط سیال پیروی می‌کنند. بر اساس قانون فوق، دو روش برای حرکت ذرات در کلاسیفایرها پیشنهاد شده است: قانون استوکس و قانون نیوتن. در قانون استوکس فرض می‌شود که نیروی مقاومت سیال روی ذره جامد ناشی از مقاومت ویسکوز است؛ بنابراین:

$$v = \frac{gd^2(\sigma_s - \sigma_f)}{18\mu} \quad (۱)$$

که در آن μ ویسکوزیته سیال و v سرعت حدی ذره است. در قانون نیوتن نیز نیروی مقاومت سیال به مقاومت درهم نسبت داده می‌شود؛ بنابراین:

$$v = \left[\frac{3gd(\sigma_s - \sigma_f)}{\sigma_f} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (۱)$$

که به این منظور طراحی و ساخته شده بود انجام شدند. دستگاه طراحی شده مطابق شکل (۲- الف)، متشکل از یک سلول رافر (۱) با حجم ۲/۲ لیتر و یک سلول کلینر (۲) با حجم ۱/۴ لیتر است. هر سلول از یک قسمت مخروطی در انتها برای شستشوی اولیهٔ خوراک و یک ستون جداکننده به منظور طبقه‌بندی به طریق سقوط آزاد تشکیل شده است. در هر سلول تعدادی دریچهٔ تخلیه با سطح مقطع و فاصله داری یکسان در طول ستون جداکننده تعبیه شده است که امکان کنترل ارتفاع سرریز را فراهم می‌کند. برای پمپاژ آب به سلول‌ها از پمپی (۱۱) با توان ۲۰ وات و بیشترین دبی هیدرولیکی یعنی ۳/۲ lit/min استفاده شده است. پمپ در قسمت پایین دستگاه و در کنار دو مخزن آب (۸ و ۹) قرار دارد. به منظور استفادهٔ بهینه از آب، دو مخزن با لوله‌ای (۱۰) به قطر ۲/۵ سانتیمتر به هم مرتبط شده‌اند. برای ورود آب به هر سلول دو ورودی در نظر گرفته شده است: لولهٔ برنجی به قطر یک سانتیمتر متصل به درپوش (۳) و قسمت زیرین بخش مخروطی شکل. انتخاب هر کدام از مسیرها به نحوهٔ عملکرد و خوراکدهی کلاسیفایر بستگی دارد. در عملیات پیوسته آبدهی از ورودی زیرین و خوراکدهی از دریچه‌های تعبیه شده در سمت راست ستون رافر صورت می‌گیرد. در عملیات ناپیوسته، خوراک به صورت خشک از محل درپوش به درون سلول ریخته می‌شود و آبدهی نیز از طریق لولهٔ برنجی انجام می‌شود. در هر دو حالت، پس از شستشو و جدایش اولیه، سرریز حاصل برای طبقه‌بندی مجدد به سلول کلینر وارد می‌شود. آبدهی در این سلول نیز مشابه با سلول رافر است. دبی هیدرولیکی نیز به وسیلهٔ شیرهای پمپ (۵ برای رافر و ۶ برای کلینر) و شیر کنترلی مدرج (۷) قابل تنظیم است.

Masliyah به منظور بررسی عملکرد کلاسیفایرها

در محدوده فوق، روش نیمه‌تجربی خود را که از قانون استوکس استخراج شده به صورت زیر ارائه نموده است. ا.]:

$$v = \frac{d^2(\sigma_s - \sigma_f)g}{18\mu(0.0015 + 0.0107N_R^{0.252})} \quad (4)$$

بر اساس رابطه فوق، وی روش خود را با هدف پیش‌بینی حد جدایش به صورت زیر پیشنهاد نمود:

$$d_{50c} = \sqrt{\frac{18\mu\mu_0(0.0015 + 0.0107N_R^{0.252})}{980.7(\sigma_s - \sigma_{p_0})}} \quad (5)$$

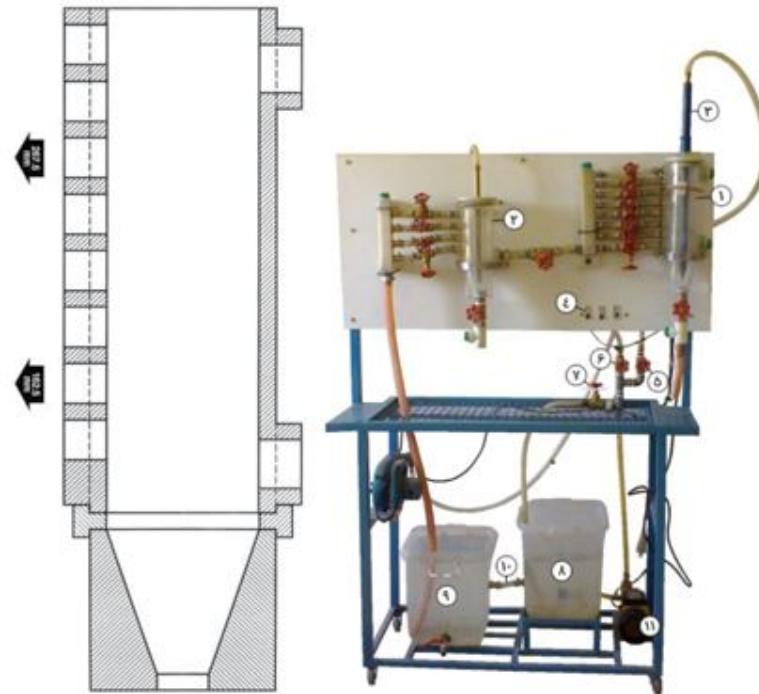
که d_{50c} حد جدایش تصحیح شده (cm)، $\mu_0 = \exp(0.338\phi_0)$ ویسکوزیته ظاهری پالپ سرریز $(gs^{-1}cm^{-1})$ ، $N_R = (d_{50}\mu\sigma_p / \mu_0)$ عدد رینولدز (بی‌بعد)، σ_{p_0} و σ_s به ترتیب دانسیته ذرات و پالپ سرریز (gcm^{-3}) ، $\phi_0 = V_s / (V_s + V_w)$ کسر حجمی جامد در سرریز و $u = (Q_0 / A)$ (نسبت نرخ سرریز به سطح مقطع شبکه آن) (cms^{-1}) است.

روش Masliyah تنها برای کلاسیفایرهای هیدرولیکی

با جریان افقی مورد استفاده قرار گرفته است. بنابراین، در پژوهش حاضر کارایی این روش برای پیش‌بینی حد جدایش در کلاسیفایرهای هیدرولیکی با جریان قائم، که کاربرد وسیعی در صنایع زغالشویی و شستشوی ماسه‌های سیلیسی دارند، بررسی خواهد شد. برای این منظور یک دستگاه کلاسیفایر آزمایشگاهی طراحی و ساخته شد و تأثیر توزیع دانه‌بندی و درصد جامد خوراک، دبی هیدرولیکی، زمان ماند و ابعاد کلاسیفایر بر دقت روش Masliyah مورد بررسی قرار گرفت.

۲ روش تحقیق

آزمایش‌ها در یک کلاسیفایر هیدرولیکی با جریان قائم



شکل (۲): الف) کلاسیفایر طراحی شده و قسمت‌های مختلف آن (شماره ۴ کلید پمپ را نشان می‌دهد) و ب) موقعیت نقاط تخلیه در سلول رافر

میلیمتر و ۱۸/۵۵ و ۹/۴۷ درصد برای ارتفاع سرریز ۲۶۷/۵ میلیمتر (شکل ۲-ب)، دبی هیدرولیکی (۳/۲ و ۲ لیتر بر دقیقه) و زمان ماند (۲۰ و ۱۰ دقیقه) در قالب یک طرح فاکتوریلی کامل دو سطحی مورد مطالعه قرار گرفت. تأثیر ابعاد کلاسیفایر نیز با در نظر گرفتن دو ارتفاع سرریز متفاوت طراحی آزمایش‌های انجام شده و نتایج آن در جدول (۱) ارائه شده اند.

۳- ارائه و تحلیل نتایج

مقادیر خطای نسبی تخمین حد جدایش کلاسیفایر با روش Masliyah در جدول (۱) ارائه شده است. در شکل نمودار آثار اصلی برای خطای نسبی مدل در دو ارتفاع مقایسه شده است. با توجه به شکل مشاهده می‌کنیم که توزیع دانه‌بندی خوراک بیشترین تأثیر را بر خطا دارد. اگر چه این مقدار تأثیر در کلاسیفایر کوچک‌تر (با ارتفاع سرریز ۱۶۲/۵ میلیمتر) به نحو چشمگیری بیشتر از کلاسیفایر بزرگ‌تر (با ارتفاع سرریز ۲۶۷/۵ میلیمتر) است؛ اما در هر دو مورد با

برای حذف آثار ناشی از پیچیدگی‌های کانی شناسی و شیمی فیزیکی ذرات نیز، از شیشه به عنوان خوراک فرایند استفاده شد. نمونه شیشه اولیه با آسیای گلوله‌های نرم و در دو دامنه دانه بندی ۱۰۰۰-۳۷ میکرون (۱۸-۴۰۰ مش) و ۴۲۰-۳۷ میکرون (۴۰-۴۰۰ مش) طبقه بندی شد.

به منظور بررسی کارایی روش Masliyah، تأثیر چهار شاخص دانه بندی (۱۰۰۰-۳۷ و ۴۲۰-۳۷ میکرون)، درصد جامد (۲۶/۴۵ و ۱۳/۸۸ درصد برای ارتفاع سرریز ۱۶۲/۵ تحلیل نتایج به روش آنالیز واریانس در سطح اعتماد ۹۵٪ برای خطای نسبی مدل به عنوان سطح پاسخ و با نرم‌افزار Minitab ۱۱ صورت گرفت. خطای نسبی (E_R) هر آزمایش طبق رابطه زیر محاسبه شد:

$$E_R (\%) = \frac{1}{2} \left(\left| \frac{d_{50,mod} - d_{50,exp}}{d_{50,exp}} \right| + \left| \frac{d_{50,mod} - d_{50,exp}}{d_{50,mod}} \right| \right) \times 100 \quad (7)$$

که $d_{50,exp}$ حد جدایش اندازه‌گیری شده طی آزمایش‌ها و $d_{50,mod}$ حد جدایش محاسبه شده با استفاده از مدل می‌باشند. برای بررسی نتایج تحلیل‌ها از نمودار آثار اصلی و متقابل استفاده شد.

جدول (۱): طراحی آزمایشی و نتایج به دست آمده از آزمایش ها

| شماره آزمایش | دانه بندی (lit/min) A | دانه بندی (μm) B | درصد جامد (%) | زمان (min) D | ارتفاع سرریز ۱۶۲/۵ میلیمتر | | | ارتفاع سرریز ۲۶۷/۵ میلیمتر | | |
|--------------|-----------------------|------------------|---------------|--------------|----------------------------|--------------------------|--------------------------|----------------------------|--------------------------|--------------------------|
| | | | | | خطای نسبی (%) | d _{۵۰,mod} (μm) | d _{۵۰,exp} (μm) | خطای نسبی (%) | d _{۵۰,mod} (μm) | d _{۵۰,exp} (μm) |
| ۱ | - | - | - | - | ۲۴۹ | ۲۴۱ | ۲/۳ | ۲۰۷ | ۲۴۲ | ۱۶/۲ |
| ۲ | + | - | - | - | ۲۳۲ | ۲۷۶ | ۱۸/۶ | ۲۲۰ | ۲۲۷ | ۴۰/۷ |
| ۳ | - | + | - | - | ۲۶۱ | ۲۶۷ | ۲۴/۷ | ۲۸۰ | ۲۶۰ | ۲۸/۹ |
| ۴ | + | + | - | - | ۳۴۹ | ۴۱۳ | ۱۶/۹ | ۳۹۵ | ۳۴۶ | ۱۳/۳ |
| ۵ | - | - | + | - | ۲۴۷ | ۲۲۴ | ۵/۴ | ۲۴۲ | ۲۴۷ | ۱/۶ |
| ۶ | + | - | - | - | ۳۳۹ | ۲۹۱ | ۱۵/۳ | ۲۲۴ | ۳۲۸ | ۳۴/۴ |
| ۷ | - | + | + | - | ۲۵۹ | ۲۸۳ | ۴۰/۱ | ۲۷۲ | ۲۵۹ | ۳۷/۳ |
| ۸ | + | + | + | - | ۳۵۴ | ۴۲۶ | ۱۸/۶ | ۴۰۰ | ۳۵۱ | ۱۳/۲ |
| ۹ | - | - | - | + | ۲۵۰ | ۲۴۹ | ۰/۴ | ۲۲۴ | ۲۴۵ | ۸/۹ |
| ۱۰ | + | - | - | + | ۲۲۹ | ۲۵۱ | ۲۷/۴ | ۲۴۷ | ۲۳۱ | ۲۹/۷ |
| ۱۱ | + | + | - | - | ۲۶۴ | ۳۹۹ | ۴۲/۵ | ۳۸۱ | ۲۶۰ | ۳۹/۱ |
| ۱۲ | + | - | + | + | ۳۵۴ | ۴۷۰ | ۲۸/۷ | ۳۸۸ | ۳۴۵ | ۱۱/۸ |
| ۱۳ | + | + | - | - | ۲۴۸ | ۲۴۲ | ۲/۴ | ۲۳۶ | ۲۴۷ | ۴/۶ |
| ۱۴ | + | + | - | + | ۳۳۹ | ۲۹۵ | ۱۳/۹ | ۲۶۱ | ۳۳۲ | ۲۴/۳ |
| ۱۵ | + | + | + | - | ۲۶۳ | ۲۸۷ | ۳۹/۶ | ۳۸۳ | ۲۶۰ | ۳۹/۷ |
| ۱۶ | + | + | + | + | ۳۵۳ | ۴۲۴ | ۱۸/۴ | ۳۹۸ | ۳۵۰ | ۱۲/۹ |

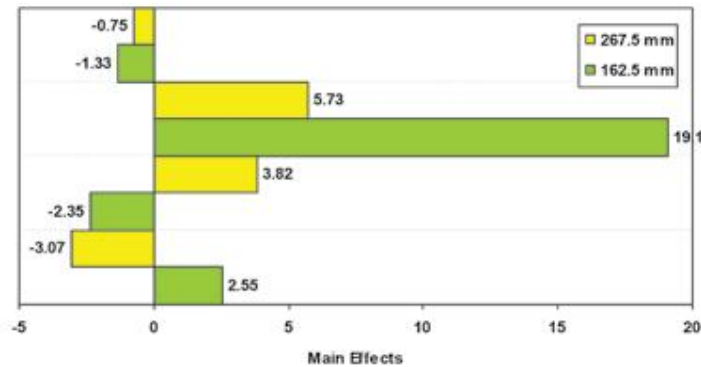
افزایش بازه دانه بندی، خطای نسبی نیز افزایش می یابد. آثار درصد جامد و زمان مانند شرایط دو گانه ای را به وجود می آورد. در کلاسیفایر کوچک تر بر خلاف کلاسیفایر بزرگ تر، تأثیر زمان مانند بیشتر از درصد جامد است. بعلاوه، در کلاسیفایر کوچک تر با افزایش زمان مانند خطا افزایش می یابد در حالیکه در کلاسیفایر بزرگ تر با افزایش زمان مانند صرف نظر از ویژگی های طراحی و مکانیزم عملکرد، کلیه کلاسیفایرها از قانون حاکم بر حرکت ذره جامد در یک

محیط سیال پیروی می کنند. بر اساس قانون فوق، دو روش برای حرکت ذرات در کلاسیفایرها پیشنهاد شده است: قانون استوکس و قانون نیوتن. در قانون استوکس فرض می شود که نیروی مقاومت سیال روی ذره جامد ناشی از مقاومت ویسکوز است؛ بنابراین:

خطا کاهش پیدا می کند. در مقابل، درصد جامد رفتاری عکس زمان مانند از خود نشان می دهد؛ به طوری که با افزایش درصد جامد در کلاسیفایر کوچک تر بر خلاف

افزایش می‌یابد. با افزایش درصد جامد نیز به دلیل غالب شدن شرایط "درهم" بر "سقوط آزاد"، از تأثیر زمان ماند کاسته می‌شود. در هر دو مورد، می‌توان از تأثیر دبی هیدرولیکی صرف نظر نمود.

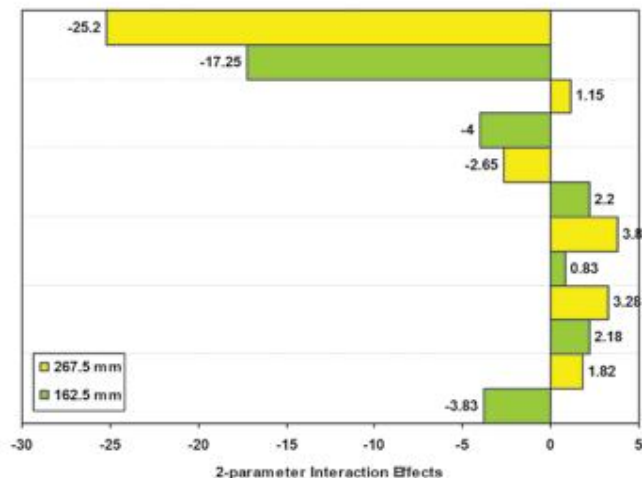
کلاسیفایر بزرگ‌تر، خطا کاهش می‌یابد. در کلاسیفایر کوچک‌تر، به دلیل کوتاه بودن فاصله تخلیه سرریز و در نتیجه زمان فرایند طبقه‌بندی، با افزایش زمان ماند سهم ذرات بزرگ‌تر از حد جدایش در سرریز و در نتیجه خطا



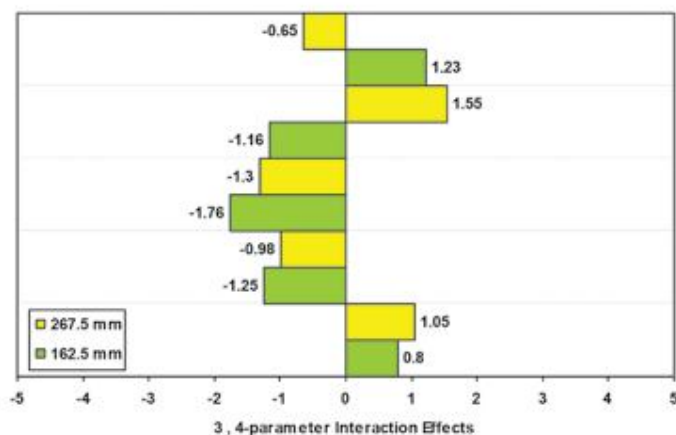
شکل (۳): نمودار آثار اصلی برای خطای نسبی روش

با کاهش توزیع دانه‌بندی و به طور همزمان افزایش دبی هیدرولیکی محسوس‌تر می‌گردد. با توجه به شکل، تأثیر متقابل AB در کلاسیفایر بزرگ‌تر مؤثرتر از کلاسیفایر کوچک‌تر است. در کلاسیفایر بزرگ‌تر به دلیل فاصله بیشتر انتقال جرم، زمان ماند افزایش می‌یابد و بنابراین تأثیر متقابل مذکور نمایان‌تر می‌گردد. از سایر آثار متقابل نیز می‌توان چشم‌پوشی نمود.

در شکل نمودارهای آثار متقابل شاخص‌ها نشان داده شده است. با توجه به مشاهده می‌کنیم که افزایش تأثیر متقابل دبی هیدرولیکی و توزیع دانه‌بندی (AB) به نحو چشمگیری خطا را کاهش می‌دهد. با کوچک شدن ابعاد ذرات، مقدار ذرات کوچک‌تر از حد جدایش مورد انتظار برای یک دبی مشخص، افزایش می‌یابد؛ بنابراین دقت جدایش بیشتر و در نتیجه خطای روش کاهش می‌یابد. این تأثیر



شکل ۴: نمودار آثار متقابل دو شاخصی برای خطای نسبی روش



شکل (۵): نمودار آثار متقابل سه و چهار شاخصی برای خطای نسبی روش

۴- نتیجه

میانگین خطای نسبی مدل در سطح اعتماد ۹۵٪ برای کلاسیفایر با ابعاد بزرگ و کوچک به ترتیب $\pm 28/02$ و $\pm 27/81$ درصد به دست می‌آید که در مقایسه با مقدار به دست آمده برای کلاسیفایرهای هیدرولیکی با جریان افقی ± 24 درصد قابل مقایسه است.

علاوه بر شاخص‌های مورد بررسی، عوامل دیگری همچون ویژگی‌های کانی‌شناختی، خواص سطحی کانه، دانسیته و شکل ذرات و غیره نیز بر عملکرد کلاسیفایرها مؤثرند که برای ارزیابی آنها، مطالعات بیشتری پیشنهاد می‌شود.

۵- قدردانی و تشکر

تحقیق حاضر با حمایت مرکز تحقیقات فرآوری مواد معدنی INVENTIVE (دانشگاه شهید باهنر کرمان) انجام شده است.

در پژوهش حاضر، کارایی روش Masliyah در پیش‌بینی حد جدایش کلاسیفایرهای هیدرولیکی با جریان قائم، با طراحی و ساخت یک نمونه آزمایشگاهی مورد بررسی قرار گرفته است. تأثیر دبی هیدرولیکی، دانه‌بندی و درصد جامد خوراک، زمان ماند و ابعاد کلاسیفایر در قالب طرح فاکتوریلی کامل دوسطحی ارزیابی شدند. نتایج ارزیابی‌ها نشان داد که توزیع دانه‌بندی خوراک و تأثیر متقابل آن با دبی هیدرولیکی بیشترین تأثیر را بر خطای روش دارند؛ چنانچه با افزایش توزیع دانه‌بندی خطا افزایش و با افزایش تأثیر متقابل مذکور، خطا کاهش می‌یابد. با کوچک شدن ابعاد کلاسیفایر تأثیر دانه‌بندی افزایش می‌یابد و از تأثیر متقابل آن با دبی کاسته می‌شود. تأثیر درصد جامد و زمان ماند بسیار کمتر از توزیع دانه‌بندی است و از تأثیر دبی هیدرولیکی می‌توان چشم‌پوشی نمود. سایر تأثیرات متقابل نیز قابل اغماض می‌باشند.

۶ مراجع

- [7] Vijayendra, H.G.;1995. Handbook of Mineral Processing, 1st Edition, New Delhi Publication, India.
- [8] Kelly, E.G., Spottiswood, D.J.;1989. Introduction to Mineral Processing, Pub. John Wiley & Sons
- [9] Taggart, A.F.;1945. Handbook of Mineral Dressing, John Willey & Sons, New York.
- [۱۰] پوزش، رمضان (۱۳۷۸) مدل ریاضی برای کلاسیفایرهای مکانیکی آزمایشگاهی، ارائه شده به عنوان پروژه تخصصی دوره کارشناسی معدن، دانشگاه شهید باهنر کرمان.
- [11] Plitt, L.R.;1991. "A mathematical model of gravity classifier", XVIIIth International Mineral Processing Congress, September 23-28, Germany, pp. 123-137
- [۱] نعمت‌اللهی، حسین (۱۳۸۴)، کانه آرایی، جلد اول، شر: انتشارات دانشگاه تهران، چاپ چهارم.
- [2] Wills, B.A.,2006. Napier-Munn, T.; Mineral Processing Technology, 7th Edition, Pub. Elsevier,.
- [3] Tomas, J.;2011. Particle separation in a fluid flow, Mechanical Process Engineering: Particle Technology Lecture, Otto-Von-Guericke University, Magdeburg,.
- [4] Xia, Y.K.; "CFD simulation of fine particle gravity separation in hindered-settling bed separators", Chemical Product and Process Modeling, Vol. 2, No. 3, pp. 1-24, 2007.
- [۵] شریعت، الهه و همکاران (۱۳۸۹)، تحلیل عملکرد کلاسیفایرهای آزمایشگاهی با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی و مدل‌سازی، دومین همایش ملی تحقیقات نوین در مهندسی شیمی، ۱۰ و ۱۱ آذرماه، ماهشهر.
- [6] Brennan, M., Holtham, P., Narasimha, M.; 2009. "CFD modeling of cyclone separators: validation against plant hydrodynamic performance", 7th International Conference on CFD in the Minerals and Process Industries, December 9-11, Australia.