

## طراحی کلاسیفایر برگشتی به منظور طبقه‌بندی ابعادی و روش افزایش مقیاس آن

مجید ذوالقدری<sup>۱</sup>؛ محمود عبدالهی<sup>۲</sup>

۱- جهاد دانشگاهی تربیت مدرس، m\_zolghadri@modares.ac.ir

۲- دانشگاه تربیت مدرس، Minmabd@modares.ac.ir

(دریافت ۱۰ مرداد ۱۳۸۶، پذیرش دی ۱۳۸۶)

### چکیده

در اغلب موارد کنترل ابعاد بار ورودی به دستگاه‌ها و تجهیزات مختلف کانه‌آرایی، برای بهینه کردن عملکرد کل مدار ضروری است و این کار معمولاً با هیدروسیکلون‌ها انجام می‌شود. افزایش مقیاس هیدروسیکلون، حد جدایش را افزایش می‌دهد و به همین دلیل استفاده صنعتی از آن در حد جدایش‌های ریزتر از ۴۵ میکرون مشکلاتی را همراه دارد. در کلاسیفایر برگشتی که از ترکیب جداکننده شیب‌دار و کلاسیفایر بستر سیال به دست می‌آید، حد جدایش مستقل از مقیاس است. در تحقیق حاضر به منظور بررسی امکان استفاده از کلاسیفایر برگشتی برای حد جدایش‌های ریزتر از ۴۵ میکرون، چگونگی عملکرد کلاسیفایر برگشتی در طبقه‌بندی ابعادی مورد مطالعه و بررسی قرار گرفت و ظرفیت ویژه (ظرفیت به ازاء واحد سطح دستگاه) و حد جدایش کلاسیفایر برگشتی در جدایش ابعادی به ترتیب بین ۹/۳ تا ۱۵ تن بر ساعت و ۷۴ تا ۱۳۲ میکرون به دست آمد. همچنین مشخص شد که بین دبی آب سرریز و حد جدایش رابطه‌ای خطی به شکل  $Y=aX$  برقرار است و می‌توان از آن برای طراحی و افزایش مقیاس کلاسیفایر برگشتی استفاده کرد. بر همین اساس ظرفیت ویژه کلاسیفایر برگشتی به ازاء حد جدایش ۴۵ میکرون حدود ۵/۱۲ تن بر ساعت برآورد شد.

### کلمات کلیدی

نرمه‌گیری، کلاسیفایر برگشتی، جدایش ابعادی، جداکننده‌های بستر سیال

## ۱- مقدمه

در اغلب موارد دستگاه‌ها و تجهیزات کانه‌آرایی اعم از سنگ‌شکن‌ها، آسیاها، جداکننده‌های ثقلی و مغناطیسی در محدوده خاصی از ابعاد کارایی مطلوب دارند، به‌گونه‌ای که ورود ذرات/ قطعات با ابعاد بیرون از محدوده مطلوب تبعاتی همچون افت کارایی و فرسودگی دستگاه را به دنبال دارد. از این‌رو کنترل ابعاد بار ورودی جهت بهینه شدن عملکرد کل مدار ضروری است.

در بسیاری موارد طبقه‌بندی ابعادی مواد دانه‌ریز با استفاده از هیدروسیکلون‌ها انجام می‌شود. هیدروسیکلون‌ها وسایلی ساده و کوچک و با هزینه نسبتاً کم اولیه (سرمايه‌گذاري) و عملیاتی هستند [۱]. قطر هیدروسیکلون‌ها می‌تواند از ۳ تا ۵۰ سانتی‌متر تغییر کند. با افزایش قطر هیدروسیکلون حد جدایش و همچنین ظرفیت هیدروسیکلون‌ها افزایش می‌یابد و به ترتیب از حدود ۲ میکرون و ۲ متر مکعب بر ساعت (برای قطر ۳ سانتی‌متر) به حدود ۲۰۰ میکرون و ۱۰۰۰ متر مکعب بر ساعت (برای قطر ۵۰ سانتی‌متر) می‌رسد [۲].

با مقایسه بزرگ‌ترین و کوچک‌ترین هیدروسیکلون می‌توان دریافت که با کاهش قطر هیدروسیکلون از ۵۰ سانتی‌متر به نسبت  $0/06$  مقدار اولیه  $(3 \div 50 = 0/06)$ ، حد جدایش به نسبت  $0/01$   $(2 \div 200 = 0/01)$  و ظرفیت به نسبت  $0/002$   $(2 \div 1000 = 0/002)$  کاهش می‌یابد. این ارزیابی نشان می‌دهد اثر کاهش قطر هیدروسیکلون در افت ظرفیت در حدود ۵۰ برابر شدیدتر از کاهش حد جدایش است. این امر موجب افزایش تعداد هیدروسیکلون‌های مورد نیاز می‌شود و از آنجایی که کنترل یک خوشه هیدروسیکلون (تنظیم و تغییر حد جدایش) عملاً امکان‌پذیر نیست، استفاده صنعتی از

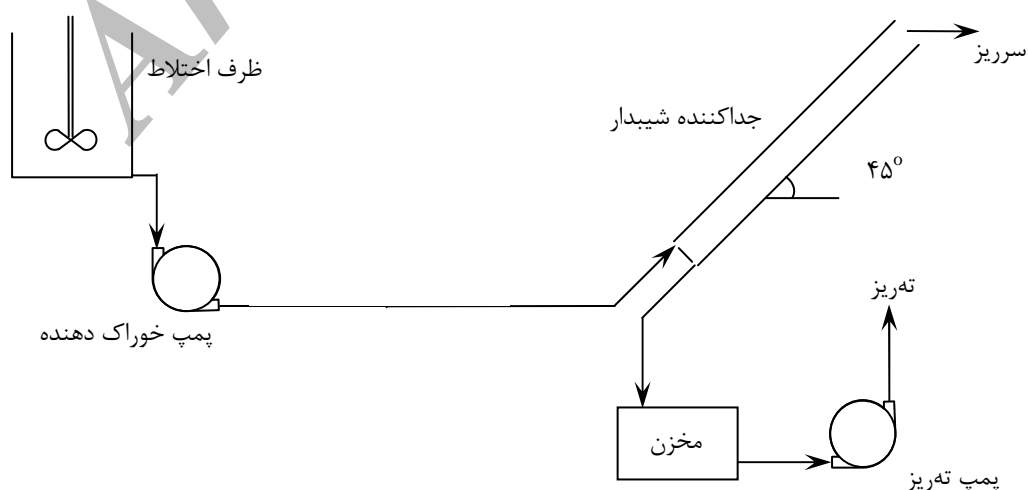
هیدروسیکلون‌ها در حد جدایش‌های کمتر از ۴۵ میکرون همواره مشکلاتی را همراه دارد؛ به‌ویژه اینکه قسمت قابل توجهی از ذرات نرمه همراه با آب بار اولیه به ته‌ریز منتقل می‌شود و کارایی جدایش را کاهش می‌دهد [۳]. به همین جهت برای طبقه‌بندی ابعادی با حد جدایش‌های ریزتر از ۴۵ میکرون نوعی خلاء تجهیزاتی وجود دارد.

در این تحقیق چگونگی عملکرد کلاسیفایر برگشتی در جدایش ابعادی برای حد جدایش‌های زیر ۴۵ میکرون، مورد مطالعه و بررسی قرار گرفته است.

## ۲- پیش‌زمینه

## ۱-۲- جداکننده شیب‌دار

سالهاست که مشخص شده است که نرخ ته‌نشینی مواد ریزدانه در کانال‌های شیب‌دار افزایش می‌یابد و از آن تحت عنوان پدیده بایکوت<sup>۱</sup> یاد می‌شود [۴]. بر همین مبنا جداکننده‌های شیب‌دار (شکل ۱) جهت جدایش ثقلی و ابعادی مورد مطالعه قرار گرفتند [۵]. در جداکننده‌ی شیب‌دار ذرات درشت‌تر که نرخ ته‌نشینی آنها بیشتر است، فرصت کافی برای رسوب دارند و روی سطح شیب‌دار زیرین ته‌نشین شده و سپس به طرف مجرای ته‌ریز سُر می‌خورند. اما ذرات ریز که سرعت سقوط کمتری دارند، فرصت نمی‌یابند که به سطح زیرین برسند بنابراین همراه جریان آب به سرریز منتقل می‌شوند. با وجود کارایی خوب جداکننده شیب‌دار در طبقه‌بندی ابعادی، مشکل توزیع یکنواخت نرخ باردهی در سرتاسر عرض جداکننده مانع استفاده از آن در مقیاس صنعتی شده است [۳].



شکل ۱: نمای ساده جداکننده شیب‌دار [۳]

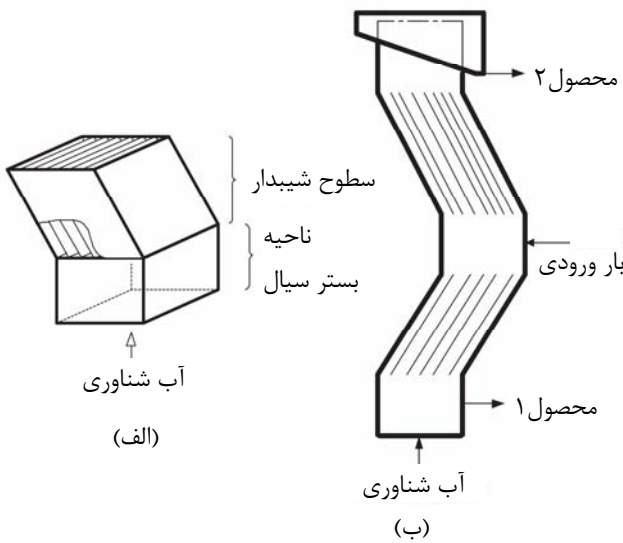
## ۲-۲- کلاسیفایر بستر سیال

شکل ۲ نمای ساده‌ای از عملکرد جداکننده بستر سیال را نشان می‌دهد که در آن ذرات تحت تاثیر سقوط بامانع قرار می‌گیرند و ذرات ریز که سرعت ته‌نشینی آنها کمتر از سرعت جریان روبه بالای آب است به سرریز راه می‌یابند و ذرات درشت به ته‌ریز منتقل شده و پس از آبیگری خارج می‌شوند. به منظور جلوگیری از انتقال آب خوراک به ته‌ریز یک جریان آب رو به بالا در نزدیکی ته‌ریز تعبیه شده است تا آب تازه به جای آب خوراک جایگزین شود.

کلاسیفایر بستر سیال برای حد جدایش‌های بین ۸۰۰ تا ۷۵ میکرون کاربرد دارد اما نقطه ضعف آن مشکل بودن افزایش مقیاس است [۵]. ضمن اینکه ظرفیت آن برای حد جدایش‌های زیر ۱۰۰ میکرون افت زیادی دارد [۶]. حد جدایش کلاسیفایر بستر سیال با استفاده از رابطه ۱ قابل تخمین است [۷].

$$U = (u_t)_{50} (1 - \phi)^n \quad (1)$$

که در آن  $U$  سرعت ظاهری آب شناوری<sup>۲</sup>،  $(u_t)_{50}$  سرعت حد ذرات با ابعاد حد جدایش ( $D$ ) و  $\phi$  کسر حجمی جامد و  $n$  توانی است که فقط به عدد رینولدز ذره وابسته است.



شکل ۳: کلاسیفایر برگشتی متشکل از ناحیه بستر سیال و سطوح شیب‌دار [۸]

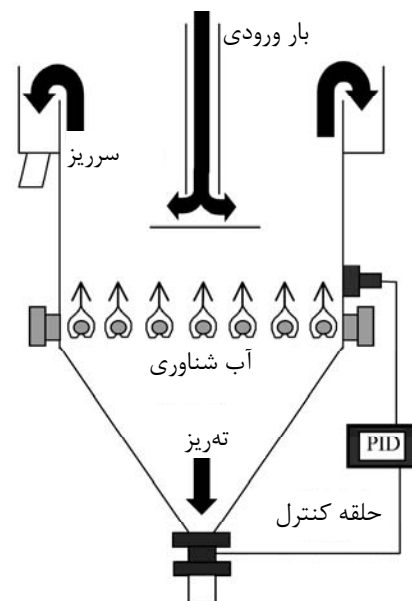
نکته قابل توجه اینکه در کلاسیفایرهای بستر سیال، اگر سرعت آب از سرعت حد ذرات بیشتر شود، ذرات از ظرف خارج می‌شوند در حالی که در کلاسیفایر برگشتی استفاده از سرعت‌های بالای آب (حتی چندین برابر سرعت سقوط ذره) می‌تواند امکان‌پذیر باشد بدون اینکه ذره از کلاسیفایر خارج شود.

حد جدایش کلاسیفایر برگشتی بر اساس مسیر حرکت ذرات در کانال‌های شیب‌دار (شکل ۴) به صورت معادله ۲ تخمین زده شده است [۵].

$$\left( \frac{(\rho_s - \rho) g d_{50}^2}{18\eta} \right) = \frac{U}{(1 - \phi)^n \left[ \frac{L}{H} \cos \theta + \sin \theta \right]} \quad (2)$$

که در آن  $d_{50}$  ابعاد حد جدایش،  $\rho_s$  چگالی مواد جامد،  $\rho$  چگالی سیال،  $g$  شتاب جاذبه،  $\eta$  ویسکوزیته سیال،  $U$  سرعت ظاهری آب شناوری،  $\theta$  زاویه شیب کانال نسبت به افق،  $L$  طول و  $H$  عرض کانال است (شکل ۴)؛ واحدهای همه پارامترهای فوق در سیستم متریک هستند.

وقتی ذرات جامد معلق به کانال‌های موازی شیب‌دار وارد می‌شوند، بعضی از ذرات روی سطح فوقانی تیغه‌ها ته‌نشین می‌شوند. بعضی دیگر هم 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 مجدداً در اثر جریان رو به بالای آب به داخل



شکل ۲: چگونگی عملکرد کلاسیفایر بستر سیال [۶]

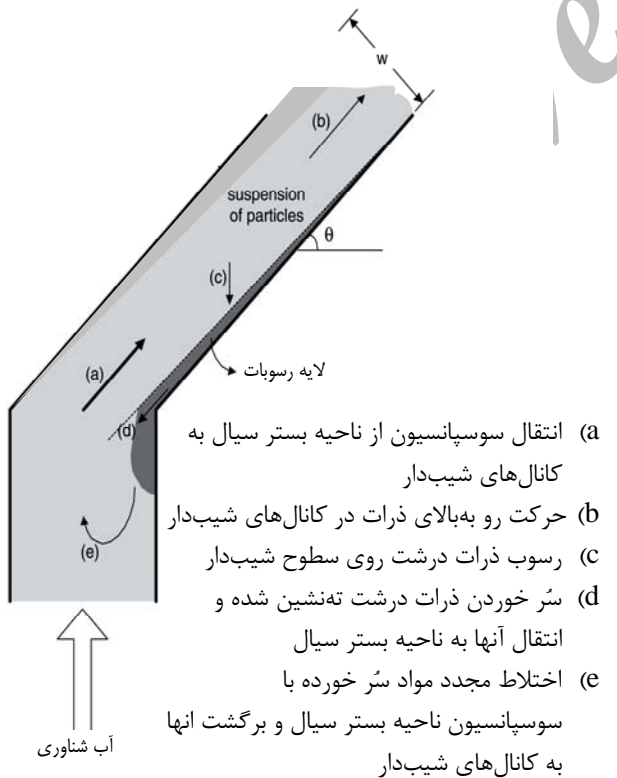
## ۲-۳- کلاسیفایر برگشتی

کلاسیفایر برگشتی از ترکیب کلاسیفایر بستر سیال و جداکننده شیب‌دار بدست آمده است (شکل ۳). وجود تیغه‌های شیب‌دار در کلاسیفایر برگشتی موجب افزایش نرخ ته‌نشینی و افزایش ظرفیت آن نسبت به کلاسیفایر بستر سیال شده است؛ ضمن اینکه افزایش مقیاس را نیز ساده‌تر کرده است.

صفحات شیب‌دار، هیچ نقشی در اختلاط (یا اثر متقابل سطوح شیب‌دار و ناحیه سیال‌گونه) نداشته باشند.

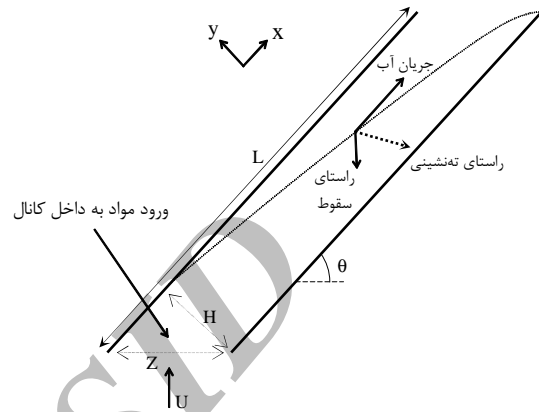
در کلاسیفایر برگشتی ناحیه اختلاط جریانی یکنواخت که برای توزیع همسان بین کانال‌های شیب‌دار مناسب است فراهم می‌کند. کم بودن ضخامت کانال‌ها به علت پدیده بایکوت، موجب افزایش نرخ ته‌نشینی می‌شود و ته‌نشینی ذرات نرمه را امکان‌پذیر می‌سازد؛ ضمن اینکه پدیده خودچرخشی موجب بالا بردن دقت جدایش می‌شود. جدایش ابعادی دقیقی با کلاسیفایر برگشتی برای ذرات کروی بالوتینی (بالوتینی نوعی شیشه است) در محدوده ۲۲۶ تا ۲۵/۵ میکرون گزارش شده است [۵].

اگر تغییرات ناگهانی در غلظت جامد و یا دبی پالپ ورودی ایجاد شود، در جداکننده‌های بستر سیال دبی ته‌ریز باید اصلاح شود تا حد جدایش تغییر نکند. اما در کلاسیفایر برگشتی غلظت جامد ناحیه اختلاط به طور خودکار با تغییرات به‌وجود آمده در باردهی هماهنگ می‌شود و بدون نیاز به تغییر دبی ته‌ریز، شرایط عملکرد کلاسیفایر نسبتاً پایدار می‌ماند. البته تغییرات کوچک غلظت جامد موجب تغییرات ناچیزی در حد جدایش می‌شود [۸].



شکل ۵: جریان مواد و پدیده خود چرخشی در کلاسیفایر برگشتی [۸]

کانال‌های شیب‌دار موازی وارد می‌شوند. عمل برگشت مواد که از آن به اثر خود چرخشی<sup>۴</sup> یاد می‌شود، اثر متقابل بستر سیال و سطوح شیب‌دار می‌باشد [۸] که در شکل ۵ نشان داده شده است.



شکل ۴: مسیر حرکت ذراتی که ابعاد آنها به اندازه حد جدایش است در کانال‌های شیب‌دار [۵]

اگر در بستر سیالی بدون استفاده از سطوح شیب‌دار کسر حجمی جامد  $\Phi_0$  باشد، وجود سطوح شیب‌داری با فواصل نزدیک به هم در ارتفاع خاصی از بستر موجب می‌شود هیچ ذره‌ای نمی‌تواند از بین سطوح عبور کند و به این ترتیب منجر به کاهش ارتفاع بستر سیال و افزایش غلظت جامد در بستر می‌شود. هرچه سطوح شیب‌دار در ارتفاع پایین‌تری باشد، ارتفاع بستر کمتر و غلظت جامد نیز بیشتر است (شکل ۶). اثر متقابل ناحیه اختلاط و سطوح موازی شیب‌دار در کلاسیفایر برگشتی را می‌توان به صورت کلی‌تری نیز بیان کرد: برای یک سرعت جریان روبه بالای آب، تولید دامنه وسیعی از کسر جامدها در ناحیه اختلاط امکان‌پذیر است و این امر با تغییر در ارتفاع نصب سطوح شیب‌دار میسر است و همچنین استفاده از سرعت آب‌های زیاد (چندین برابر سرعت حد ذرات حد جدایش) در حالی که غلظت جامد در ناحیه اختلاط بالاست\* امکان‌پذیر است که این نکته مزایایی را در جدایش ابعادی موجب می‌شود [۸].

برخلاف کلاسیفایرهای بستر سیال، خصوصیت بارز ناحیه سیال‌گونه<sup>۵</sup> در کلاسیفایرهای برگشتی (شکل ۳-الف) «اختلاط» است و به همین جهت می‌توان از آن به ناحیه اختلاط<sup>۶</sup> یاد کرد. البته معقول است که بپذیریم که ذرات بسیار ریزتر از  $d_{50}$  به علت نداشتن فرصت کافی جهت رسوب بر روی

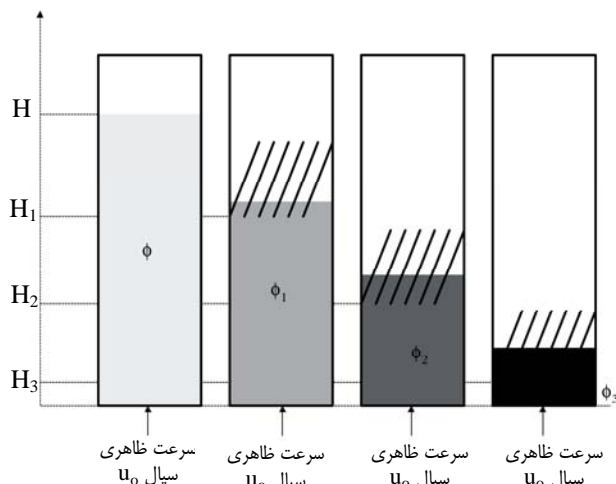
\* در کلاسیفایرهای بستر سیال سرعت زیاد آب موجب خروج مواد و کاهش غلظت مواد جامد در کلاسیفایر می‌شود

طی آزمایش‌های انجام شده باردهی به‌وسیله یک دستگاه پمپ انجام می‌شد که به علت دبی زیاد پمپ مذکور، خروجی پمپ به دو قسمت تقسیم شده و برای هر قسمت یک شیر تعیبه گردید (شکل ۷). بدین ترتیب بخش اعظم مواد وارد شده به پمپ از طریق خروجی شماره ۱ به داخل مخزن برگردانده می‌شد و دبی باردهی با شیر مربوط به خروجی ۲ تنظیم می‌شد. مشخصات دقیق کلاسیفایر برگشتی مورد استفاده، در جدول ۱ و شکل ۸ آورده شده است.

جدول ۱: مشخصات اصلی کلاسیفایر برگشتی

۳۰×۳۰	سطح مقطع دستگاه در ته‌ریز ( $\text{mm}^2$ )
۳۰×۷۵	سطح مقطع دستگاه در ناحیه خوراک‌دهی ( $\text{mm}^2$ )
۱۲۰	طول کانال‌های شیب‌دار (cm)
۹×۷۵	سطح مقطع کانال‌های شیب‌دار ( $\text{mm}^2$ )
۶۰	زاویه شیب کانال‌ها نسبت به افق (درجه)

در تمامی آزمایش‌ها، باطله فلوتاسیون زغال کارخانه زغالشویی شرکت زغالسنگ البرز شرقی به عنوان خوراک مورد استفاده قرار گرفت. جرم مخصوص بار اولیه به‌طور متوسط ۱۷۵۹ گرم بر سانتی‌متر مکعب بود. بار اولیه مورد استفاده ریزتر از ۳۰۰ میکرون بود. حدوداً ۵۰٪ آن را مواد ریزتر از ۲۵ میکرون تشکیل می‌داد (شکل ۹). به منظور ارزیابی طبقه‌بندی ابعادی دو آزمایش با شرایط مندرج در جدول ۲ انجام شد.

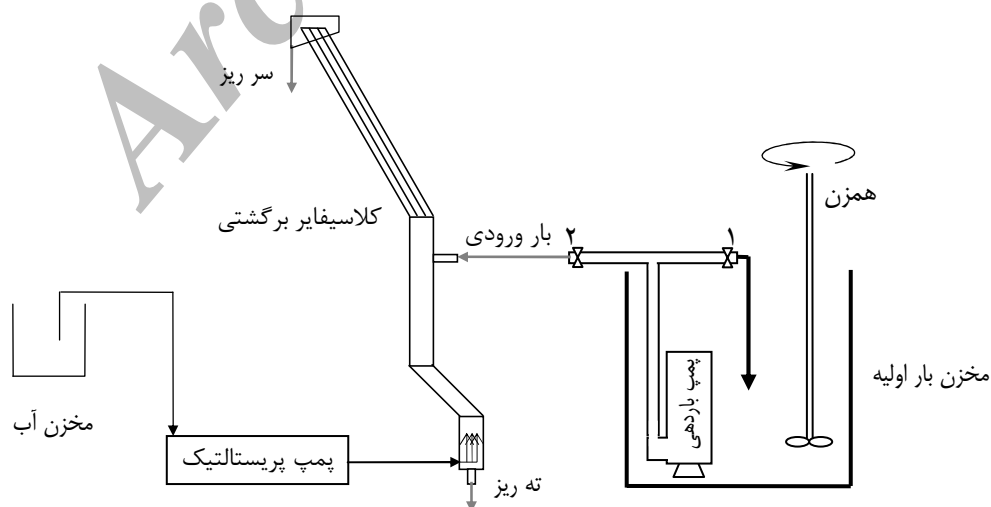


شکل ۶: تاثیر سطوح شیب‌دار بر غلظت جامد بستر سیال؛ با پایین آوردن ارتفاع سطوح، غلظت جامد در بستر افزایش یافته و ارتفاع بستر کاهش می‌یابد [۸]-[۹]

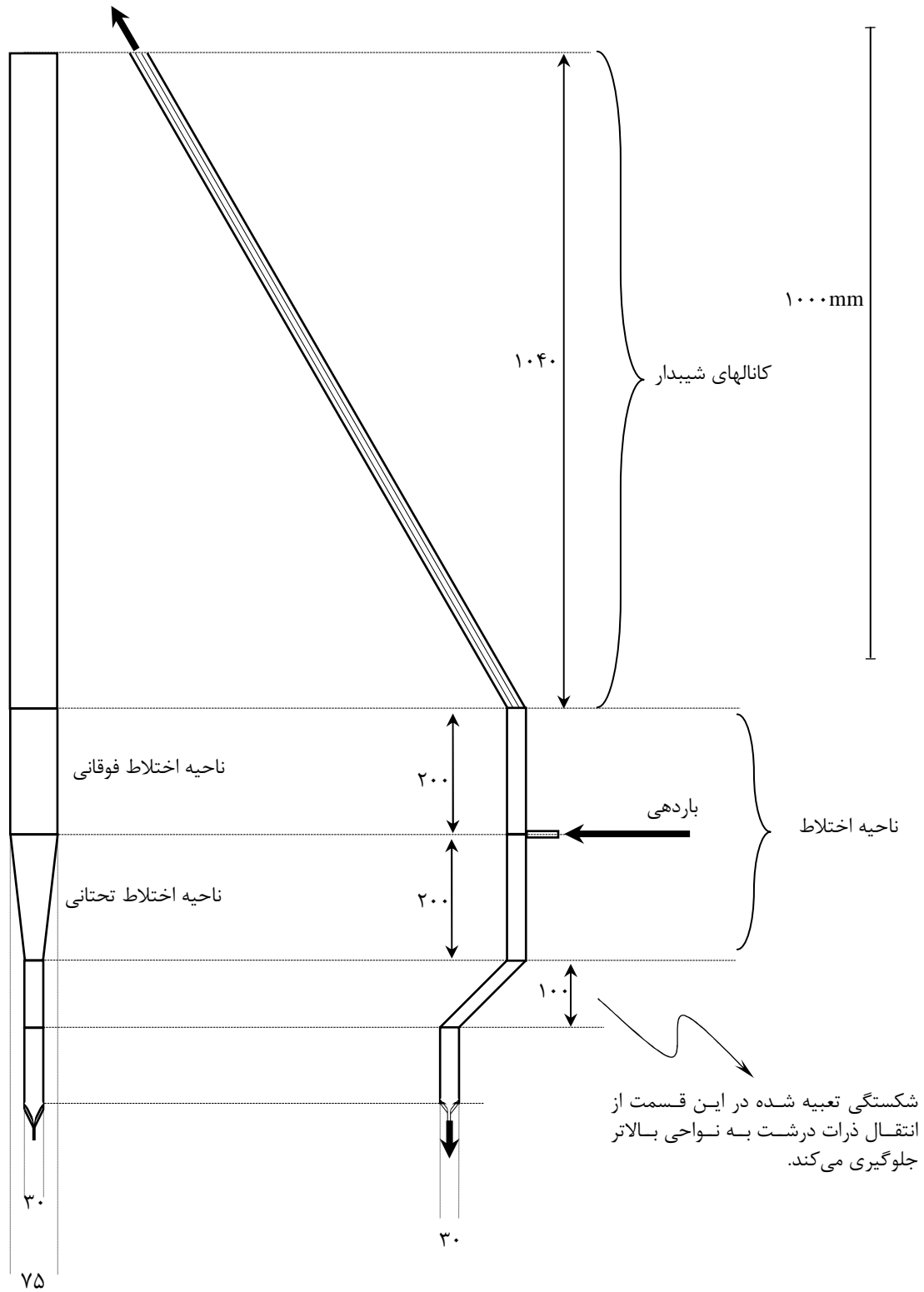
اخیراً آزمایش‌هایی برای بررسی کارایی کلاسیفایر برگشتی در جدایش ابعادی انجام شده است که حاکی از کارایی قابل قبول در ظرفیت‌های نسبتاً بالا ( $5/1 \text{ kg.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ ) خوراک جامد؛ معادل  $18/36 \text{ t.m}^{-2}.\text{h}^{-1}$ ) با حد جدایش حدود ۱۶۰ میکرون است [۱۰]. تمامی این موارد نوید بخش امکان استفاده از کلاسیفایر برگشتی در حد جدایش‌های زیر ۴۵ میکرون است.

### ۳- آزمایش‌های انجام شده

شکل ۷ شمای کلی آزمایش‌های انجام شده را نشان می‌دهد. سیستم به صورت پیوسته کار می‌کرد و در فواصل زمانی معین از سرریز و ته‌ریز کلاسیفایر نمونه‌برداری می‌شد.



شکل ۷: شمای کلی برپایی آزمایشگاه (مورد نیاز)



شکل ۸: مشخصات دقیق دستگاه نرمه گیر؛ تمامی اعداد بر حسب میلی متر می باشند.

نمونه‌های گرفته شده از سرریز و ته‌ریز ابتدا وزن و سپس با آنالیز سرنندی تر به محدوده‌های ابعادی مختلف (جدول ۳) تقسیم شدند. با معلوم بودن وزن پالپ (قبل از آنالیز سرنندی) و وزن مواد جامد در محدوده‌های ابعادی مختلف، علاوه بر مشخص شدن دانه‌بندی سرریز و ته‌ریز، غلظت جامد در جریان‌های مذکور نیز تعیین گردید. همچنین دبی سرریز و ته‌ریز از تقسیم کردن وزن پالپ بر زمان جمع‌آوری، محاسبه شد.

با استفاده از نتایج آنالیز سرنندی نمونه‌های سرریز و ته‌ریز و همچنین معادلات موازنه جرم، می‌توان بازیابی هر دامنه ابعادی به ته‌ریز را محاسبه کرد و نمودار طبقه‌بندی<sup>۷</sup> دستگاه را به صورت شکل‌های ۱۰ و ۱۱ رسم کرد.

جدول ۳: محدوده‌های ابعادی و اندازه معرف آنها بر حسب میکرون؛ فراوانی مواد زیر میکرون ناچیز فرض شده‌است.

محدوده ابعادی $(+ X_i - X_{i+1})$	اندازه معرف $(\sqrt{X_i \cdot X_{i+1}})$
+۲۵۰ - ۳۰۰	۲۷۴
+۱۸۰ - ۲۵۰	۲۱۲
+۱۲۵ - ۱۸۰	۱۵۰
+۹۰ - ۱۲۵	۱۰۶
+۴۵ - ۹۰	۶۴
+۲۵ - ۴۵	۳۴
-۲۵	۵

#### ۴- ارائه نتایج و بحث

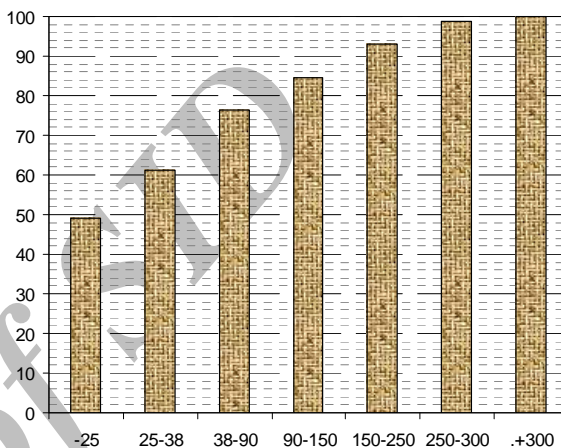
##### ۴-۱- نمودارهای طبقه‌بندی و میزان انتقال نرمه به ته‌ریز

نتایج آزمایش اول انجام شده به صورت نمودارهای طبقه‌بندی در شکل ۱۰ نشان داده شده است.

در آزمایش اول بر اساس ایجاد جریان روبه بالای لازم جهت انتقال ذرات زیر ۱۲۰ میکرون به سرریز دبی آب شناوری ۶۰۰ ml/min در نظر گرفته شده است. برای اینکار باید سرعت آب شناوری در کلاسیفایر در حدود سرعت سقوط ذره‌ای با قطر ۱۲۰ میکرون باشد. رابطه سرعت حد به صورت زیر است [۱۱]:

$$\frac{\rho U_t d}{\eta} = 20.52 \left[ \left( 1 + 0.0921 \sqrt{\frac{d^3 g (\rho_s - \rho) \rho}{0.75 \eta^2}} \right)^{0.5} - 1 \right]^2$$

با اندازه‌گیری دبی باردهی در یک بازه زمانی ۱۵ دقیقه‌ای مشخص شد که به منظور باردهی پایدار، حداقل دبی باید حدوداً ۴۲۰۰ گرم بر دقیقه باشد؛ لذا مقدار دبی باردهی در هر دو آزمایش اغلب بیش از این مقدار در نظر گرفته شد (جدول ۲). دبی ته‌ریز با روش بازکردن متناوب کنترل می‌شد. به این صورت که در طول یک دقیقه، شیر ته‌ریز به مدت ۱۰ ثانیه باز می‌شد تا حجم مشخصی پالپ مطابق آنچه که در جدول ۲ معین شده است از مجرای ته‌ریز خارج شود.



شکل ۹: نمودار دانه‌بندی تجمعی بار ورودی

جدول ۲: شرایط انجام آزمایش‌های اول و دوم

شماره آزمایش	اول	دوم
کسر حجمی جامد در خوراک	۰/۰۶۳	۰/۰۹۵
دبی آب شناوری (ml/min)	۶۰۰	۵۰
تعداد نمونه‌گیری‌ها	۵	۶
دبی حجمی ته‌ریز (ml/min)	۸۵۰	در سه‌تای اول ۷۰۰ و در سه‌تای آخر ۴۰۰

دبی بار ورودی طی نمونه‌گیری‌های مختلف (g/min)		
شماره نمونه‌گیری	آزمایش اول	آزمایش دوم
۱	۴۵۳۰	۵۰۴۵
۲	۴۵۹۵	۵۱۰۱
۳	۴۲۶۶	۴۸۵۲
۴	۴۷۶۰	۴۶۹۶
۵	۳۰۰۲	۴۴۲۸
۶		۳۹۱۰

در هر مرحله، از جریان‌های سرریز و ته‌ریز نمونه‌برداری می‌شد و فاصله زمانی بین دو نمونه‌گیری متوالی ۳ دقیقه بود.

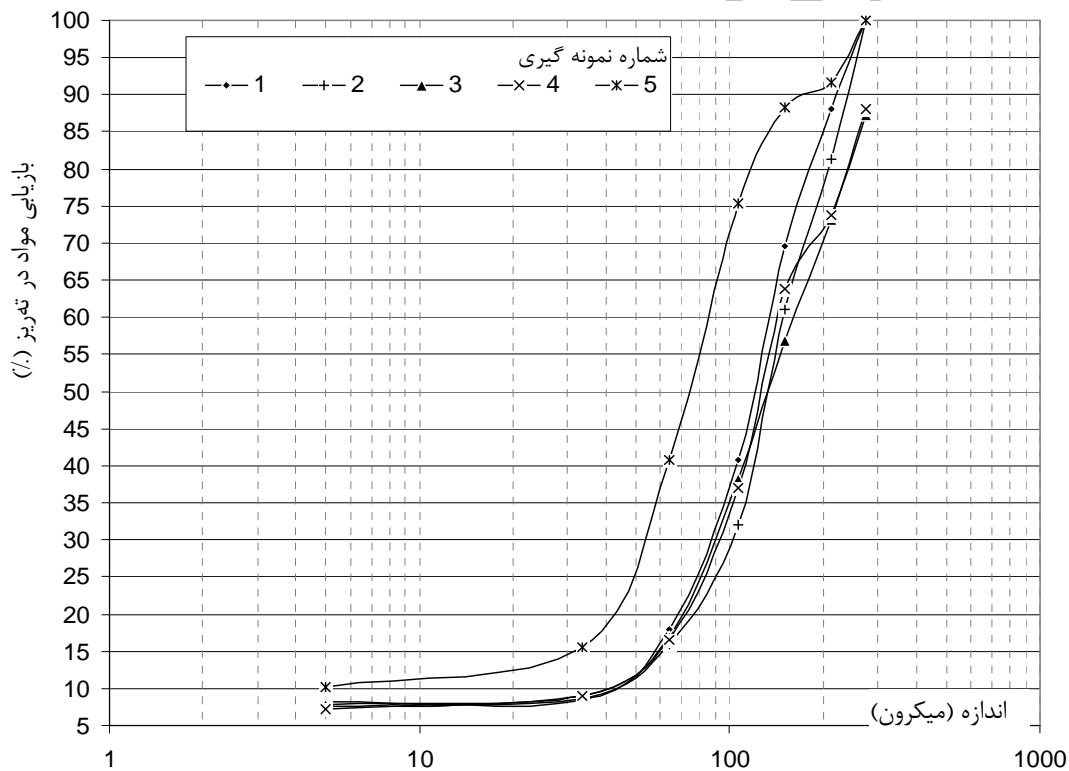
در آزمایش اول به منظور ساده تر کردن ارزیابی عملکرد کلاسیفایر، دبی تهریز بگونه‌ای تنظیم شد که تقریباً تمامی آب شناوری (که دبی آن ۶۰۰ میلی‌لیتر بر دقیقه بود) از آن خارج گردد. مقدار دبی آب خروجی از تهریز و سرریز در آزمایش اول در جدول ۴ آورده شده است. در این آزمایش مشاهده شد که علی‌رغم اختلاف بسیار کم دبی آب شناوری و آب خارج شده از تهریز، بین ۷ تا ۱۰ درصد مواد نرمه (زیر ۲۵ میکرون) به تهریز منتقل شده است و این پدیده نشانگر وجود اختلال در امر ته‌نشینی و به معنای زیاد بودن دبی آب شناوری است.

که در آن چگالی سیال ( $\rho_s = 1000 \frac{Kg}{m^3}$ )، چگالی ذره ( $\rho_d = 1590 \frac{Kg}{m^3}$ )، ویسکوزیته سیال ( $\eta = 0.01 \frac{Kg \cdot s}{m}$ )، شتاب ثقل ( $g = 9.81 \frac{m}{s^2}$ ) و  $d$  اندازه ذره ( $= 10^{-4} m$ ) است. بنابراین سرعت حد ذره ۱۲۰ میکرونی برابر است با:

$$U_{1(120\mu)} = 4.2 \text{ mm/s}$$

و سرعت روبه‌بالای ایجاد شده در اثر دبی آب شناوری ۶۰۰ ml/min برابر است با:

$$\frac{(600/60)}{3 \text{ cm} \times 7.5 \text{ cm}} = 0.4444 \text{ cm/s} = 4.4 \text{ mm/s}$$



شکل ۱۰: نمودارهای طبقه بندی بدست آمده از نتایج آزمایش اول

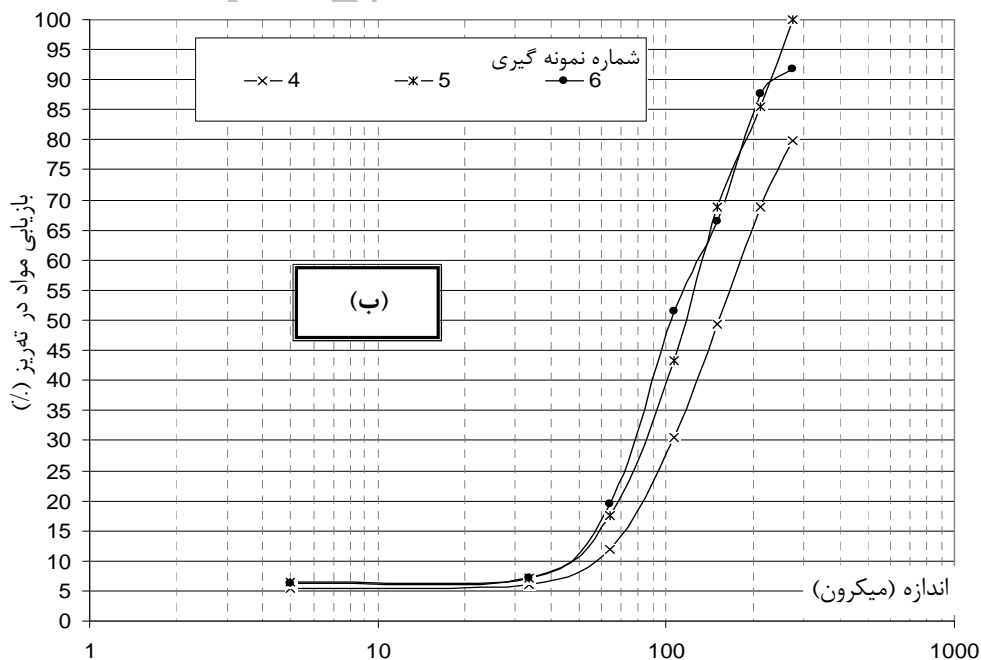
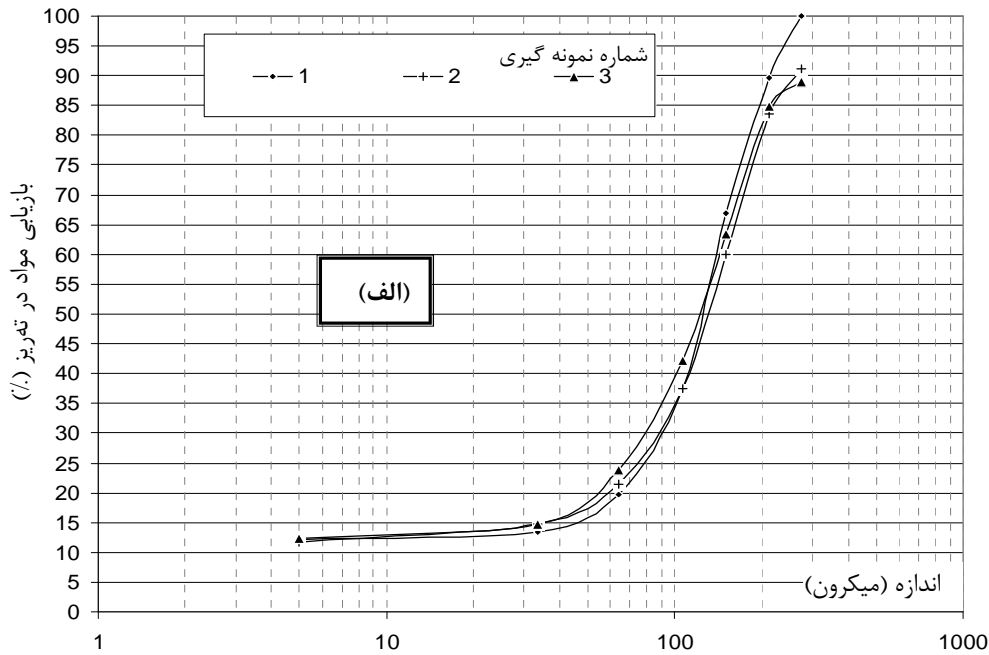
چنین عنوان کرد که اغتشاش ناشی از دبی آب زیاد موجب شده است که ۷ تا ۱۰ درصد خوراک به تهریز منتقل گردد. در آزمایش دوم دبی آب شناوری به یکدهم تقلیل داده شده و از ۶۰۰ به ۵۰ میلی‌لیتر بر دقیقه رسانده شده است. جدول ۲ شرایط آزمایش دوم را نشان می‌دهد. طی آزمایش دوم ۶ سری نمونه برداری صورت گرفت که در ۳ نمونه‌برداری اول

دبی نسبتاً زیاد آب شناوری علاوه بر کاهش نرخ ته‌نشینی ذرات درشت، گردابه‌هایی را در قسمت قائم کلاسیفایر ایجاد می‌کند که منجر به اغتشاش و نهایتاً انتقال بخشی از خوراک ورودی به تهریز می‌گردد. همانند کلاسیفایرهای معمول، بازیابی ذرات نرمه به تهریز نشان‌دهنده کسر خوراک منتقل شده به تهریز است. بنابراین در مورد آزمایش اول می‌توان



حالت دوم (سه نمونه گیری دوم)  $7/3$  درصد بود. این پدیده موجب انتقال نرمه به تهریز شده بود که مقدار آن در حالت های اول و دوم به ترتیب  $12/1$  و  $6/1$  درصد می باشد. مشاهده می شود که بر خلاف آزمایش اول، تناسبی منطقی بین تغییرات بازیابی آب خوراک و بازیابی نرمه به تهریز وجود دارد که نشان دهنده عدم اختلال در امر ته نشینی ذرات است.

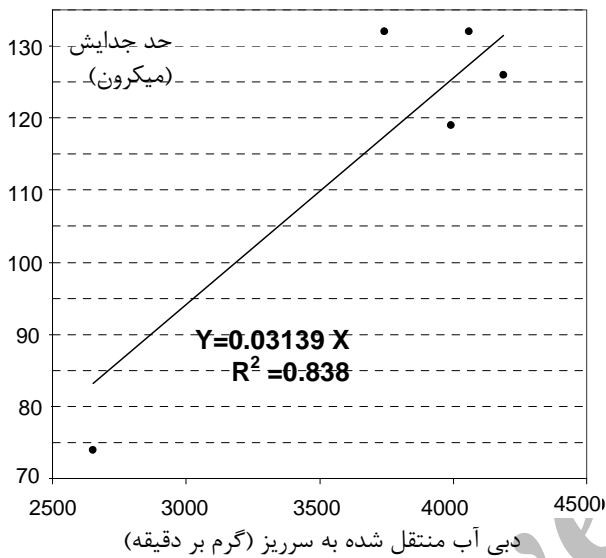
دبی حجمی تهریز  $700$  و در  $3$  نمونه برداری دوم دبی حجمی تهریز  $400$  میلی لیتر در دقیقه بود. شکل های ۱۱ الف و ۱۱ ب نمودار طبقه بندی را برای هر دو حالت نشان می دهد. در آزمایش دوم به علت کم بودن دبی آب شناوری، بخشی از آب خوراک به تهریز منتقل می شد که مقدار آن به طور متوسط در حالت اول (سه نمونه گیری اول)  $12/3$  درصد و در



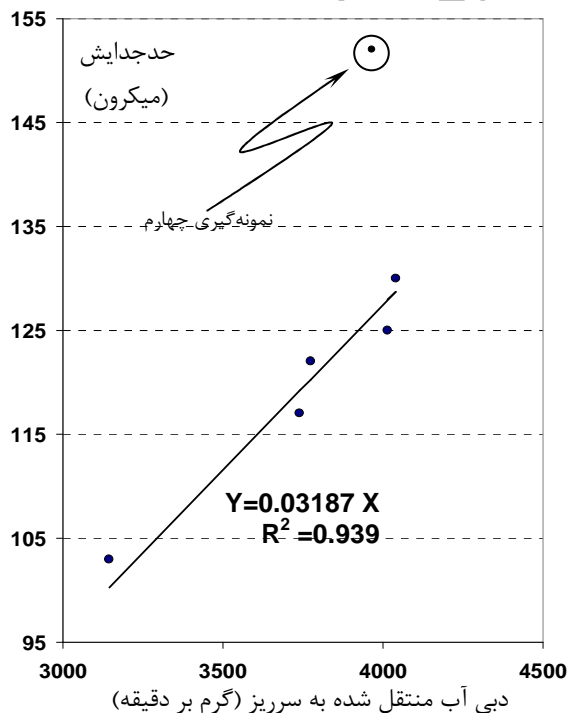
شکل ۱۱: نمودار طبقه بندی در آزمایش دوم؛ الف) دبی حجمی تهریز  $700 \text{ ml/min}$ ، ب) دبی حجمی تهریز  $400 \text{ ml/min}$

جدول ۵: حد جدایش در آزمایش دوم؛ آب شناوری ۵۰ ml/min

شماره نمونه‌گیری	دبی ته‌ریز ۷۰۰ ml/min			دبی ته‌ریز ۴۰۰ ml/min		
	۱	۲	۳	۴	۵	۶
حد جدایش (میکرون)	۱۲۵	۱۳۰	۱۲۲	۱۵۲	۱۱۷	۱۰۳
دبی آب‌ته‌ریز (ml/min)	۶۲۷/۳	۶۰۶/۲	۶۱۷/۲	۳۰۱/۸	۳۱۲/۸	۳۷۷/۲
دبی آب‌سرریز (ml/min)	۴۰۱۵/۹	۴۰۳۹/۸	۴۰۲۶/۱	۳۹۶۶	۳۷۴۰/۸	۳۱۴۴/۸



شکل ۱۲: رابطه حد جدایش با دبی آب سرریز در آزمایش اول



شکل ۱۳: رابطه حد جدایش با دبی آب سرریز در آزمایش دوم

۴-۲- ارتباط حد جدایش با دبی آب سرریز

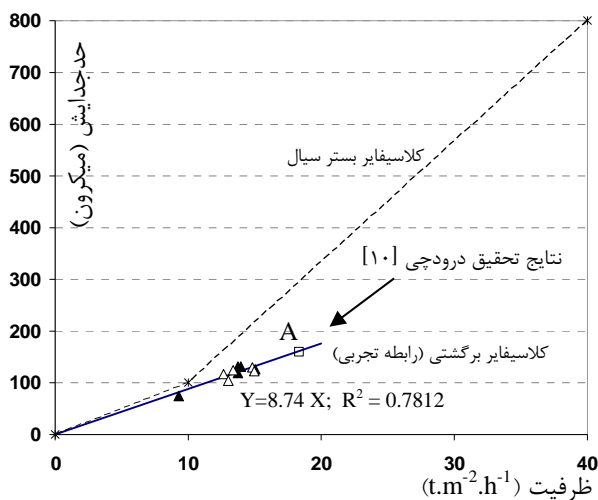
جدول ۴ و ۵ حد جدایش و دبی آب سرریز و ته‌ریز را در دو آزمایش نشان می‌دهد. همانگونه که مشاهده می‌شود، حد جدایش نمونه‌گیری‌ها یکسان نیست. با توجه به رابطه تئوریک ۲ سرعت جریان آب در کانال‌های شیب‌دار عامل عملیاتی موثر بر حد جدایش است و این کمیت مستقیماً با دبی آب سرریز ارتباط دارد. اشکال ۱۲ و ۱۳ تغییرات حد جدایش را نسبت به تغییرات دبی آب سرریز در آزمایش‌های اول و دوم نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود بین این دو کمیت ارتباط خطی به صورت رابطه ۳ برقرار است.

$$Y = a \cdot X \quad (3)$$

که در آن X دبی آب سرریز و Y حد جدایش است. لازم به توضیح است که نتایج اولین نمونه‌گیری بعد از تغییر حالت (نمونه‌گیری چهارم) به علت عدم رسیدن به حالت پایدار احتمالاً نامعتبر است. با وجود اینکه شرایط عملیاتی در آزمایش‌های اول و دوم متفاوت بوده و حتی شرایط عملیاتی در آزمایش دوم دو حالت متفاوت داشته است ولی با این حال مشاهده می‌شود که ضریب زاویه محاسبه شده برای هر دو آزمایش بسیار نزدیک به هم است و فقط ۱/۵٪ باهم اختلاف دارند. این مسئله به معنای حساس نبودن رابطه تجربی ۳ نسبت به تغییرات شرایط عملیاتی است.

جدول ۴: حد جدایش در آزمایش اول؛ دبی آب شناوری ۶۰۰ ml/min

شماره نمونه‌گیری	۱	۲	۳	۴	۵
	حد جدایش (میکرون)	۱۱۹	۱۳۲	۱۳۲	۱۲۵
دبی آب ته‌ریز (ml/min)	۶۲۳	۶۱۳	۶۰۸	۶۰۹	۶۰۲
دبی آب سرریز (ml/min)	۳۹۹۲/۷	۴۰۶۰/۳	۳۷۴۲/۵	۴۱۸۸/۴	۲۶۵۱/۵



شکل ۱۴: مقایسه ظرفیت و حد جدایش کلاسیفایر برگشتی و بستر سیال؛ مثلث‌های توپر نتایج آزمایش اول و مثلث‌های توخالی نتایج آزمایش دوم را نشان می‌دهد.

با توجه به نمودارهای شکل ۱۴ می‌توان به ازاء حد جدایش ۴۵ میکرون، ظرفیت کلاسیفایر برگشتی و بستر سیال به ترتیب  $5/12 \text{ t.m}^{-2}.\text{h}^{-1}$  و  $4/5 \text{ t.m}^{-2}.\text{h}^{-1}$  برآورد کرد. یعنی ظرفیت کلاسیفایر برگشتی حدود ۱۴٪ بیشتر از کلاسیفایر بستر سیال است.

از آنجایی که ضریب قطعیت ارتباط خطی بین سرعت روبه بالای آب و حد جدایش (شکل‌های ۱۲ و ۱۳) بیشتر از ضریب قطعیت رابطه بین ظرفیت و حد جدایش (شکل ۱۴) است، توصیه می‌شود که در افزایش مقیاس از رابطه ۳ استفاده شود. از این رو در طراحی و افزایش مقیاس کلاسیفایر برگشتی باید سرعت روبه بالای آب در کانال‌ها را به عنوان متغیر اصلی و دبی خوراک جامد را متغیری وابسته در نظر گرفت.

#### ۵- طراحی و افزایش مقیاس کردن

در صورتی که انجام یک فرآیند در مقیاس آزمایشگاهی نتیجه مطلوب داشته باشد، پیاده‌سازی آن در مقیاس پایلوت و یا صنعتی (به گونه‌ای که نتیجه‌ای مشابه با مقیاس آزمایشگاهی به دست آید) باید بر اساس فرض‌های معتبر و با قانونمندی خاصی انجام شود که به آن افزایش مقیاس اتلاق می‌شود. رابطه‌ی تجربی بدست آمده (معادله ۳) که نسبت به تغییرات شرایط عملیاتی حساسیت کمی دارد می‌تواند ابزار سودمندی در افزایش مقیاس کلاسیفایر برگشتی برای یک بار ورودی معین باشد.

#### ۴-۳- حد جدایش و ظرفیت کلاسیفایر برگشتی

حد جدایش کلاسیفایر بستر سیال مهم‌ترین عامل تعیین کننده ظرفیت آن است. در طبقه‌بندی ابعادی، هرچه حد جدایش مطلوب کمتر باشد، ظرفیت کلاسیفایر (به ازاء واحد سطح) کاهش می‌یابد. با کاهش حد جدایش کلاسیفایر از ۸۰۰ به ۱۰۰ میکرون، ظرفیت از ۴۰ به ۱۰ تن بر ساعت بر متر مربع کاهش می‌یابد و این روند کاهش در حد جدایش‌های زیر ۱۰۰ میکرون شدیدتر است [۶]. بر همین اساس می‌توان روند تغییرات حد جدایش کلاسیفایر بستر سیال را نسبت به ظرفیت به صورت نمودار خط‌چین نشان داده شده در شکل ۱۴ در نظر گرفت.

نتایج حد جدایش و ظرفیت کلاسیفایر برگشتی در دو آزمایش انجام شده به صورت مثلث‌های توپر و توخالی در شکل ۱۴ آورده شده است؛ مشاهده می‌شود که بین حد جدایش و ظرفیت کلاسیفایر برگشتی رابطه‌ای خطی برقرار است. رابطه خطی بین ظرفیت و حد جدایش را می‌توان براساس رابطه تئوریک ۲ توجیه کرد؛ با فرض کسر حجمی ثابت برای خوراک، افزایش دبی جامد در کلاسیفایرهای بستر سیال (و برگشتی) به معنای افزایش دبی آب ورودی نیز می‌باشد و از آنجایی که بخش اعظم آب خوراک به سرریز منتقل می‌شود\* لذا به صورت افزایش سرعت روبه بالای آب در کانال‌های شیب‌دار بارز می‌شود و منجر به افزایش حد جدایش می‌گردد.

طبق یافته‌های درودچی<sup>۱۰</sup> و همکاران کلاسیفایر برگشتی در ظرفیت‌های نسبتاً بالا و در حدود  $18/36 \text{ t.m}^{-2}.\text{h}^{-1}$  کارایی قابل قبولی دارد و حد جدایش آن حدود ۱۶۰ میکرون است [۱۰]. نکته جالب توجه اینکه یافته‌هایشان (نقطه A در شکل ۱۴) با یافته‌های تحقیق حاضر همخوانی دارد.

با استفاده از شکل ۱۴ می‌توان مقایسه‌ای بین کلاسیفایر بستر سیال و کلاسیفایر برگشتی انجام داد و تاثیر کانال‌های شیب‌دار را در ظرفیت بررسی کرد. شکل ۱۴ نشان می‌دهد که به ازاء حد جدایش ثابت، ظرفیت کلاسیفایر برگشتی از بستر سیال بیشتر است؛ بلاخص در حد جدایش‌های بالای ۱۰۰ میکرون (تا حدود ۸۰۰ میکرون)، افزایش ظرفیت بسیار قابل توجه می‌شود.

\* جهت مقایسه میزان آب خروجی از سرریز با آب خروجی از ته‌ریز به جداول ۵ و ۴ مراجعه شود.

سطوح شیب‌دار با سطح افق است. از آنجایی که زاویه شیب کانال‌ها روی سرعت انتقال مواد ته‌نشین شده به ناحیه اختلاط تاثیر دارد و این امر مستقیماً کارایی کلاسیفایر را دست‌خوش تغییر می‌کند، لذا بهتر است با ثابت در نظر گرفتن آن در هر دو مقیاس، مانع از بروز خطاهای فاحش در افزایش مقیاس شد.

#### ۶- نتیجه‌گیری

(۱) حد جدایش کلاسیفایر برگشتی با دبی آب سرریز (سرعت آب در کانال‌های شیب‌دار) و ظرفیت ارتباط مستقیم دارد و می‌توان از آن برای طراحی و افزایش مقیاس استفاده کرد.

(۲) ظرفیت و حد جدایش کلاسیفایر برگشتی در طبقه‌بندی ابعادی باطله فلوتاسیون کارخانه زغالشویی البرز شرقی به ترتیب بین  $9/3 \text{ t.m}^{-2}.\text{h}^{-1}$  تا  $15 \text{ t.m}^{-2}.\text{h}^{-1}$  و  $74$  تا  $132$  میکرون به‌دست آمد.

(۳) بر اساس رابطه تجربی به‌دست آمده بین ظرفیت و حد جدایش، برای طراحی یک کلاسیفایر برگشتی با حد جدایش  $45$  میکرون، باید ظرفیت آن حدود  $5/12 \text{ t.m}^{-2}.\text{h}^{-1}$  در نظر گرفته شود.

(۴) هر چند اضافه کردن آب شناوری به کلاسیفایر برگشتی به طور معمول موجب کاهش انتقال مواد نرمه به ته‌ریز می‌شود، اما زیاد بودن دبی آب شناوری، می‌تواند اغتشاش در ناحیه سیال‌گونه (یا ناحیه اختلاط) را به دنبال داشته باشد که منجر به ته‌نشینی مواد است و نشانه بارز آن عدم تناسب بین میزان انتقال آب خوراک به ته‌ریز و میزان انتقال مواد نرمه به ته‌ریز است.

#### ۷- تشکر و قدردانی

بدین وسیله از همکاری‌های صمیمانه دوستان جناب آقای سید محمد تقی بنی‌هاشمی (سازنده کلاسیفایر)، آقای طاهری (تهیه کننده پمپ خوراک‌دهی) قدردانی می‌نمایم. همچنین از مسئول آزمایشگاه فرآوری مواد معدنی بخش معدن دانشکده فنی و مهندسی دانشگاه تربیت مدرس جناب آقای مهندس بهزاد شهبازی که در اجرای این تحقیق کمال همکاری را مبذول داشتند، سپاسگزاری می‌کنیم.

در کلاسیفایرها هدف اصلی افزایش مقیاس، رسیدن به حد جدایش (به‌دست آمده در مقیاس آزمایشگاهی) در مقیاس پایلوت یا صنعتی است. مقایسه رابطه تجربی ۳ با رابطه تئوریک ۲ می‌تواند راهگشای چگونگی افزایش مقیاس باشد. البته با مقایسه دو رابطه مذکور شاید تصور شود که ارتباط بین حد جدایش و سرعت جریان آب در کانال‌های شیب‌دار (و یا دبی آب منتقل شده به سرریز) باید به صورت  $Y = a \cdot \sqrt{X}$  باشد. در این خصوص لازم به ذکر است که در رابطه تئوریک ۲ فرض بر ریز بودن ذرات و معتبر بودن قانون استوکس است. معادله استوکس برای محاسبه سرعت حد ذرات با اندازه ریزتر از  $40$  تا  $50$  میکرون معتبر است. برای ابعاد بیش از  $5$  میلی‌متر نیز معادله نیوتن قابل استفاده است [۱۲]. در محدوده اعتبار معادله استوکس، توان  $X$  برابر  $0/5$  است و در محدوده اعتبار معادله نیوتن توان  $X$  برابر  $2$  می‌باشد. در ابعاد مابین این دو مقدار، توان  $X$  بین  $0/5$  و  $2$  است. نتایج آزمایش‌های انجام شده نشان می‌دهد که توان  $X$  در محدوده حد جدایش‌های به‌دست آمده (حدود  $120$  میکرون) تقریباً برابر با  $1$  (و یا شاید اندکی کمتر از  $1$ ) است.

بر اساس مقایسه بین دو رابطه یاد شده می‌توان استنباط کرد که معیار افزایش مقیاس کلاسیفایر برگشتی عبارت است از:

- ثابت بودن سرعت جریان آب در کانال‌های شیب‌دار ( $U$ ),
- ثابت بودن  $\left[ \frac{L}{H} \cos \theta + \sin \theta \right]$  و
- ثابت بودن  $(1 - \phi_v)^n$  و  $(\rho_s - \rho)$

در هر دو مقیاس می‌باشد. در صورتی که برای هر دو مقیاس یک نوع خوراک (ثابت بودن چگالی و دانه‌بندی) مورد استفاده قرار گیرد و کسر حجمی جامد در جریان خوراک در هر دو مورد یکسان باشد، می‌توان شرط آخر را معتبر فرض کرد. برای ارضاء دو شرط مانده باید داشته باشیم:

$$\frac{(Q_v)_{lab.}}{A_{lab.}} = \frac{(Q_v)_{pilot}}{A_{pilot}}$$

$$\left[ \frac{L_{lab.}}{H_{lab.}} \cos \theta_{lab.} + \sin \theta_{lab.} \right] = \left[ \frac{L_{pilot}}{H_{pilot}} \cos \theta_{pilot} + \sin \theta_{pilot} \right]$$

$$\xrightarrow{\text{if } \theta_{lab.} = \theta_{pilot}} \frac{L_{lab.}}{H_{lab.}} = \frac{L_{pilot}}{H_{pilot}}$$

که  $Q_v$  دبی آب سرریز،  $A$  سطح مقطع بخش شیب‌دار و  $\theta$  زاویه

۸- منابع

- [7] Di Felice, R.; 1995; "*Hydrodynamics of liquid fluidization*"; Chemical Engineering Science, Vol.50, No.8, pp. 1213-1245.
- [8] Nguyentranlam, G. and Galvin, K.P.; 2004; "*Applications of the Reflux Classifier in solid-liquid operations*"; International Journal of Mineral Processing, Vol. 73, No.2-4, pp. 83-89.
- [9] Galvin, K.P. and Nguyentranlam, G.; 2002; "*Influence of parallel inclined plates in a liquid fluidized bed system*"; Chemical Engineering Science, Vol. 57, No. 7, pp. 1231 – 1234.
- [10] Doroodchi, E., Zhou, J., Fletcher, D.F. and Galvin, K.P.; 2006; "*Particle size classification in a fluidized bed containing parallel inclined plates*"; Minerals Engineering, Vol. 19, No.2, pp. 162-171.
- [11] Bruce, H.K.; 2003; *Modeling of hindered-settling column separations*, PhD Thesis, Pennsylvania State University.
- [12] نعمت‌اللهی، حسین؛ (۱۳۸۱)؛ "کانه‌آرایی"، انتشارات دانشگاه تهران، تهران، جلد اول، ویرایش سوم.
- [1] Svarovsky, L.; 1984; *Hydrocyclones*, Hold Rinehart and Wilson, New York.
- [2] Hassani, F. and Archibald, J.F.; 1998; *Mine Backfill 1998 (Chapter 4. Slurry Backfill)*, 1<sup>th</sup>, Queens University, Canada
- [3] Thompson, P.D. and Galvin K.P.; 1997; "*An empirical description for the classification in an inclined counter-flow settler*"; Minerals Engineering, Vol.10, No.1, pp. 97-109.
- [4] Boycott, A.E.; 1920; "*Sedimentation of blood corpuscles*"; Nature, Vol. 104, pp.532.
- [5] Nguyentranlam, G. and Galvin, K.P.; 2001; "*Particle classification in the reflux classifier*"; Minerals Engineering, Vol. 14, No. 9, pp.1081-1091.
- [6] Kohmuench, J.N.; 2000; *Improving Efficiencies in Water-Based Separators Using Mathematical Analysis Tools*, Doctor of Philosophy Thesis, Virginia Polytechnic University.

- <sup>1</sup> - Boycott Effect  
<sup>2</sup> - Fluidization water  
<sup>3</sup> - Reflux Classifier  
<sup>4</sup> - self-recycling effect  
<sup>5</sup> - fluidized zone  
<sup>6</sup> - mixed zone  
<sup>7</sup> - Partition Curve  
<sup>8</sup> - Doroodchi