

ارزیابی عملکرد جداکننده واسطه سنگین تری فلوی کارخانه فرآوری زغال سنگ طبس بر مبنای مطالعات آزمایشگاهی

رضا دهقان^{۱*}، مسعود نوری^۲

۱- دانشیار، دانشکده مهندسی معدن و متالورژی، دانشگاه یزد، یزد
۲- دکترا، دانشکده مهندسی معدن و متالورژی، دانشگاه یزد، یزد

(دریافت ۱۳۹۸/۰۹/۲۱، پذیرش ۱۳۹۸/۱۱/۱۲)

چکیده

حدود ۴۰ درصد جرم خوراک کارخانه فرآوری زغال سنگ طبس را ذرات درشت با ابعاد ۵۰-۶ میلی متر تشکیل می دهند که توسط یک دستگاه جداکننده واسطه سنگین دو مرحله ای تری فلو به قطر ۷۰۰ میلی متر فرآوری می شوند. با توجه به پیچیدگی فرآیند جدایش درون این جداکننده سه محصولی، درک جامعی از تاثیر عوامل هندسی و عملیاتی بر عملکرد آن وجود ندارد. به منظور بررسی چگونگی عملکرد جداکننده مذکور، تجهیزات آزمایشگاهی کاملی شامل یک دستگاه تری فلوی شفاف به قطر ۷۰ میلی متر، به همراه سایر لوازم جانبی از قبیل مخازن، پمپ ها و دبی سنج ها، نصب و راه اندازی شد. در این مدل کوچک مقیاس، با افزودن ردیاب های پلیمری رنگی، کیفیت جدایش ذرات جامد در قطرهای مختلف هسته هوا بررسی و مشخص شد هرچه اندازه هسته هوا بزرگ تر باشد، خطای جدایش (Ep) کمتر است. بر اساس یافته های آزمایشگاهی، عملکرد تری فلوی صنعتی با تزریق ردیاب های مکعبی در زمان خوراک دهی زغال، نیز ارزیابی شد. مطالعات صنعتی نشان داد با افزایش دبی سیال واسطه سنگین و قطر لوله های رابط، می توان خطای جدایش دستگاه و میزان مواد به اشتباه تقسیم شده (Misplaced Material) را کاهش داد. با افزایش قطر لوله های میانی در جداکننده صنعتی از ۲۰۵ به ۲۳۵ میلی متر، راندمان جرمی محصول دستگاه، ۹ درصد و میزان خاکستر محصول ۰/۵ درصد افزایش یافت. با افزایش دبی سیال واسطه در محدوده مورد مطالعه نیز، ۳ درصد افزایش راندمان و ۱ درصد کاهش خاکستر محصول به دست آمد. تحقیق حاضر، نمونه موفقیتی از کاربرد نتایج آزمایشگاهی برای بهینه سازی عملکرد یک دستگاه صنعتی را ارائه می کند.

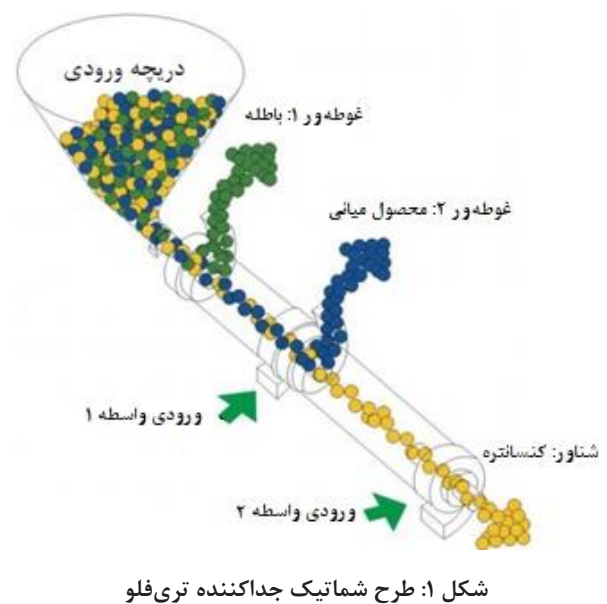
کلمات کلیدی

تری فلوی صنعتی، تری فلوی شفاف، ردیاب، هسته هوا، خطای جدایش.

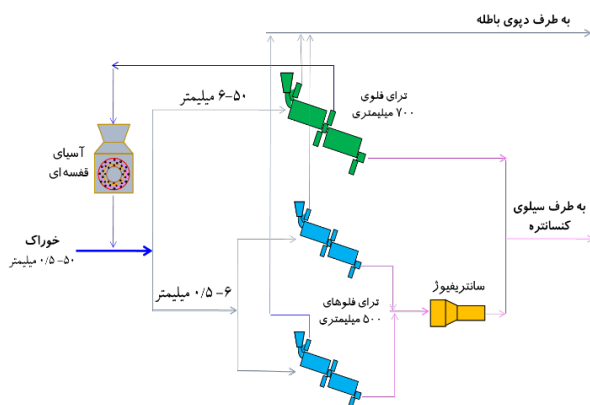
۱- مقدمه

میلی متری نیز توسط دو دستگاه تری فلوی ۵۰۰ میلی متری فرآوری می شود (شکل ۲). در سال ۱۳۹۳ خطای جدایش^۴ (Ep) هر سه دستگاه با انجام آنالیز غرق و شناورسازی روی نمونه های جمع آوری شده از محصولات دستگاه ها اندازه گیری و مشخص شد که خطای جدایش دستگاه ۷۰۰ میلی متری، بیش از مقدار ضمانت اعلام شده از سوی سازنده دستگاه است [۸]. البته در تحقیق مذکور، اطلاعاتی در خصوص شاخص های عملیاتی مدار از قبیل دانسیته و دبی سیال ورودی و تناژ زغال خام ارائه نشده است. در تحقیق دیگری که در سال ۱۳۹۷ انجام شد، با تزریق ردیاب های مکعبی شکل ۳۲ میلی متری، خطای جدایش مراحل اول و دوم تری فلوی ۷۰۰ میلی متری در زمان خوراک دهی انواع مختلف زغال خام ورودی اندازه گیری و مشخص شد که اگر تناژ خوراک ورودی دستگاه از ۱۴۰ تن بر ساعت بیشتر شود، کارایی جدایش دستگاه افت می کند [۹].

جدایش ثقلی، اولین و اصلی ترین روش فرآوری زغال سنگ در جهان محسوب می شود و از بین روش های ثقلی، کارآمدترین روش فرآوری زغال سنگ، روش واسطه سنگین است [۱]. جدیدترین و آخرین نسل از جداکننده های واسطه سنگین دینامیکی، جداکننده تری فلو^۱ (شکل ۱) است که برای نخستین بار در دهه ۱۹۸۰ در ایتالیا مورد بهره برداری قرار گرفت [۲].



شکل ۱: طرح شماتیک جداکننده تری فلو



شکل ۲: مدار واسطه سنگین کارخانه فرآوری زغال سنگ طبس

هدف از تحقیق حاضر، ارائه راهکاری برای بهبود عملکرد تری فلوی ۷۰۰ میلی متری کارخانه فرآوری زغال سنگ پروده طبس، با تغییر شاخص های عملیاتی و یا هندسی دستگاه است. بدین منظور، مطالعات در دو فاز آزمایشگاهی و صنعتی صورت گرفت. در فاز آزمایشگاهی، تاثیر شاخص های مختلف بر قطر هسته هوا در مرکز جداکننده و خطای جدایش دستگاه در قطرهای مختلف هسته هوا بررسی شد. در فاز صنعتی، عوامل هندسی و عملیاتی دستگاه به گونه ای تغییر داده شدند که هسته هوای بزرگ تری در مرکز دستگاه تشکیل شود و خطای جدایش دستگاه کاهش یابد.

امکان تولید هم زمان سه محصول، حساسیت کمتر به نوسانات کیفی و کمی خوراک ورودی، سایش کمتر بدنه دستگاه، ظرفیت حمل باطله بیشتر و کاهش هزینه های سرمایه ای از جمله مزایای است که محققان برای کاربرد تری فلو در مقایسه با سایر جداکننده های گریز از مرکز مانند سیکلون واسطه سنگین، دیناوپرپول^۲ و لارکودمس^۳ بر شمرده اند [۳]. با وجود رشد کاربرد تری فلو در فرآوری زغال سنگ های دارای مقادیر زیاد مواد با دانسیته نزدیک به دانسیته جدایش، متاسفانه تاکنون تحقیقات اندکی در زمینه شناخت عملکرد این جداکننده و تاثیر عوامل طراحی و عملیاتی بر کارایی آن انجام شده است [۴-۷].

در کارخانه فرآوری زغال سنگ پروده طبس، یک دستگاه تری فلوی ۷۰۰ میلی متری، وظیفه فرآوری ذرات زغال سنگ ۰/۵-۶ میلی متری را برعهده دارد. ذرات زغال سنگ ۰/۵-۶ میلی متری را برعهده دارد.

۱-۱- مطالعات آزمایشگاهی

در مطالعات آزمایشگاهی، به منظور بررسی عملکرد دستگاه در جدایش ذرات جامد، مخلوطی از ردیاب‌های رنگی با دانسیته‌های متفاوت (۰٫۹، ۱٫۱۵ و ۱٫۵۲ گرم بر سانتی‌متر مکعب) تهیه و در سه حالت عملیاتی دستگاه که منجر به تشکیل هسته‌های هوای متفاوت در مرکز جداکننده می‌شد، به دریچه ورودی اضافه شد. هم‌چنین به منظور بررسی تاثیر میزان مواد با دانسیته نزدیک به دانسیته جدایش بر عملکرد تری‌فلو، در یکی از آزمایش‌ها، سهم مواد میانی در مخلوط ردیاب‌ها، به میزان ۲۰ درصد افزایش یافت. پس از انجام هر آزمایش، ردیاب‌ها مجدداً تفکیک و توزین شدند و براساس نتایج حاصله، منحنی‌های توزیع^۵ رسم شد. تصویر ردیاب‌های مورد استفاده در شکل ۴ نشان داده شده است. این ردیاب‌ها، از جنس پلیمر و به شکل استوانه‌هایی با ابعاد $۲ \times ۲٫۵$ میلی‌متر هستند. شرایط آزمایش‌های ردیاب آزمایشگاهی در جدول ۱ نشان داده شده است.



شکل ۴: ردیاب‌های مورد استفاده در مطالعات آزمایشگاهی

جدول ۱: شرایط انجام آزمایش‌ها با ردیاب پلیمری

شماره آزمایش	قطر هسته هوا (میلی‌متر)		جرم ردیاب (گرم)	
	مرحله اول	مرحله دوم	متوسط	سبک
۱	۱۱	۸	۴۰۰	۳۰۰
۲	۲۱	۱۸	۴۰۰	۳۰۰
۳	۱۸	۱۳	۶۰۰	۲۰۰

برای انجام مطالعات آزمایشگاهی، یک دستگاه تری‌فلوی شفاف به قطر ۷۰ میلی‌متر ساخته شد (شکل ۳). به این منظور، ابتدا سیلندرهای اصلی و لوله‌های رابط با استفاده از مفتول‌های پلکسی‌گلاس ساخته و سپس با استفاده از تزریق مواد پلیمری، قطعات حلزونی شکل مربوط به ورودی‌های سیال و خروجی‌های باطله و میانی تهیه شدند. برای بررسی تاثیر شیب قرارگیری دستگاه بر عملکرد آن، دستگاه روی یک چارچوب فلزی سبک با قابلیت تغییر شیب، نصب شد. دو مخزن پلی‌اتیلن ۱۰۰۰ لیتری به همراه دو عدد پمپ سانتریفیوژ برای ارسال سیال به مراحل اول و دوم جداکننده نصب و سه مخزن پلی‌اتیلن ۴۰۰ لیتری نیز برای جمع‌آوری محصولات دستگاه در نظر گرفته شد. به منظور مشاهده دقیق سیال و هسته هوا، از آب به عنوان سیال استفاده و برای اندازه‌گیری دبی جریان ورودی، دو عدد دبی‌سنج دیجیتال در مسیر لوله‌های ورودی نصب شد. ثبت تصاویر و اندازه‌گیری قطر هسته هوا نیز توسط یک دوربین دیجیتال ۱۴٫۱ مگاپیکسلی با سرعت تصویربرداری ۱۵ فریم در ثانیه انجام شد.



شکل ۳: سیستم تری‌فلوی آزمایشگاهی

آزمایش‌های اولیه در حضور تنها آب و بدون افزودن مواد جامد انجام شد. در هر آزمایش پس از رسیدن سیستم به حالت پایدار، اقدام به تصویربرداری از مراحل اول و دوم دستگاه شد. قطر هسته هوای تشکیل شده در هر یک از مراحل جداکننده، توسط نرم‌افزار آنالیز تصویر Image J اندازه‌گیری شد و در تحلیل آماری آزمایش‌ها، مورد استفاده قرار گرفت.

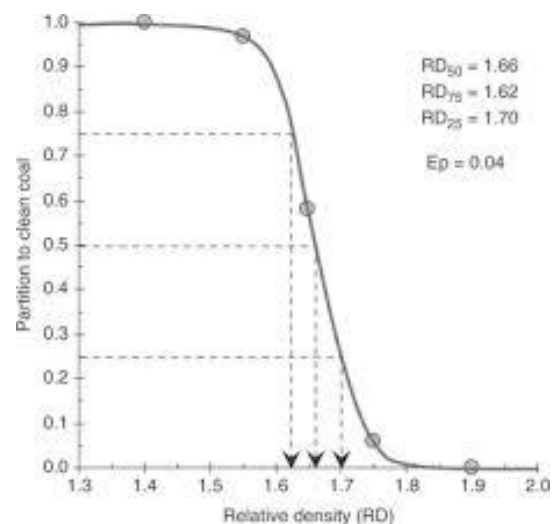
۲-۱- مطالعات صنعتی

پوشیده شده است. در مرحله اول این دستگاه، از سیالی با دانسیته ۱٫۷-۱٫۸ گرم بر سانتی‌متر مکعب و در مرحله دوم، از سیالی با دانسیته ۱٫۶-۱٫۵ گرم بر سانتی‌متر مکعب استفاده می‌شود. در واقع، وظیفه مرحله اول دستگاه، حذف باطله و در مرحله دوم، تولید کنسانتره نهایی است. این تری‌فلو، زغال خام ورودی را به سه محصول کنسانتره، میانی و باطله تفکیک می‌کند.



شکل ۶: تری‌فلوی ۷۰۰ میلی‌متری کارخانه فرآوری زغال سنگ طبس

در کاربردهای صنعتی، کارایی جداکننده‌های واسطه سنگین به کمک منحنی‌های توزیع بیان می‌شود. در فرآوری زغال سنگ برای رسم منحنی توزیع، درصد جرمی خوراک راه‌یافته به کنسانتره برحسب تابعی از جرم مخصوص رسم می‌شود (شکل ۵) و لازم است نمونه‌هایی از خوراک و محصولات دستگاه، مورد آزمایش غرق و شناورسازی قرار گیرند. این آزمایش توسط شناورسازی نمونه زغال سنگ در یک سری مخازن حاوی محلول واسطه سنگین با جرم مخصوص‌های مختلف انجام می‌شود [۱].



شکل ۵: منحنی توزیع در فرآوری زغال سنگ [۱۰]

در این تحقیق از ردیاب‌های مکعبی شرکت Partition Enterprises استرالیا به ابعاد ۳۲×۳۲×۳۲ میلی‌متر استفاده شد (شکل ۷) که به راحتی روی سرندهای شستشوی محصولات تری‌فلو، قابل رویت هستند. در بخش‌های سبک و سنگین، تعداد ۱۵ ردیاب و در دانسیته‌های میانی، تعداد ۲۵ ردیاب استفاده و در مجموع در هر آزمایش، ۶۱۰ ردیاب به جریان خوراک ورودی به تری‌فلو اضافه شد. ردیاب‌ها هر ۳-۴ ثانیه از دریچه ورودی دستگاه تزریق و از انتهای سرندهای شستشوی کنسانتره، میانی و باطله بازیابی و پس از شمارش ردیاب‌های هر جریان، آمار ردیاب‌های بازیافت‌شده در جداول مربوطه ثبت شد.

از آنجا که شیب قرارگیری دستگاه صنعتی، قابل تغییر نیست، در این تحقیق از دبی سیال ورودی (شاخص عملیاتی) و قطر لوله‌های رابط بین دو مرحله دستگاه (شاخص هندسی)، به عنوان متغیرهای مؤثر بر عملکرد تری‌فلوی ۷۰۰ میلی‌متری استفاده شد. چون ارسال سیال واسطه سنگین به مراحل اول و

چون انجام آزمایش غرق و شناورسازی زمان‌بر و پرهزینه است، امروزه در اغلب کارخانه‌های فرآوری زغال سنگ، استفاده از ردیاب‌های دانسیته‌ی جایگزین آن شده است. این ردیاب‌ها دانسیته‌های بسیار دقیق از ۱٫۲۰ تا ۲٫۲۰ گرم بر سانتی‌متر مکعب دارند. ردیاب‌ها به جریان خوراک دستگاه اضافه و سپس از محصولات آن، بازیابی می‌شوند. بعد از بازیابی، ردیاب‌ها به دانسیته‌های مختلف دسته‌بندی و نتایج به دست آمده برای ترسیم منحنی توزیع استفاده می‌شود [۱۱].

تری‌فلوی نصب‌شده در مدار درشت‌دانه کارخانه فرآوری زغال سنگ طبس (شکل ۶) قادر است تا ۲۰۰ تن بر ساعت زغال خام به ابعاد ۶-۵ میلی‌متر را فرآوری کند. به منظور افزایش عمر دستگاه، بدنه داخلی دستگاه با آستر سرامیکی

جدول ۲: شرایط بررسی دبی واسطه در آزمایش‌های صنعتی (قطر لوله‌های رابط: ۲۰۵ میلی‌متر)

شماره آزمایش	دانسیته سیال (گرم بر سانتی‌متر مکعب)		دبی سیال (متر مکعب بر ساعت)	
	مرحله اول	مرحله دوم	مرحله اول	مرحله دوم
۱	۱,۷۷	۱,۵۳	۴۱۰	۴۰۰
۲	۱,۷۹	۱,۵۵	۴۲۰	۴۱۰
۳	۱,۸۰	۱,۵۷	۴۳۰	۴۲۰
۴	۱,۷۸	۱,۵۸	۴۴۰	۴۳۰



شکل ۷: ردیاب‌های مورد استفاده در مطالعات صنعتی

جدول ۳: شرایط بررسی قطر لوله‌های رابط در آزمایش‌های صنعتی (دبی سیال مراحل اول و دوم: ۴۳۰ و ۴۰۰ متر مکعب بر ساعت)

شماره آزمایش	دانسیته سیال (گرم بر سانتی‌متر مکعب)		قطر لوله‌های رابط (میلی‌متر)
	مرحله اول	مرحله دوم	
۵	۱,۷۹	۱,۵۵	۲۰۵
۶	۱,۷۶	۱,۵۴	۲۲۵
۷	۱,۷۸	۱,۵۷	۲۳۵

محاسبه و منحنی مربوطه رسم شد. سپس این منحنی با معادله مدل ارایه شده توسط Scott و Napier munn (رابطه ۱) برازش شد [۱]:

$$P_i = 100 \cdot \left(1 - \frac{1}{1 + \exp \left[\frac{(\rho_{50} - \rho_i) \cdot \ln 3}{E_p} \right]} \right) \quad (1)$$

که در آن:

P_i : ضریب توزیع در دانسیته i

ρ_{50} : دانسیته جدایش (گرم بر سانتی‌متر مکعب)

ρ_i : دانسیته ردیاب (گرم بر سانتی‌متر مکعب)

E_p : خطای احتمالی جدایش است که از رابطه ۲ به دست می‌آید [۱]:

$$E_p = \left(\frac{\rho_{75} - \rho_{25}}{2} \right) \quad (2)$$

که در آن:

ρ_{25} و ρ_{75} : مقادیر دانسیته مربوط به ضرایب توزیع ۷۵ و ۲۵

در منحنی توزیع هستند.

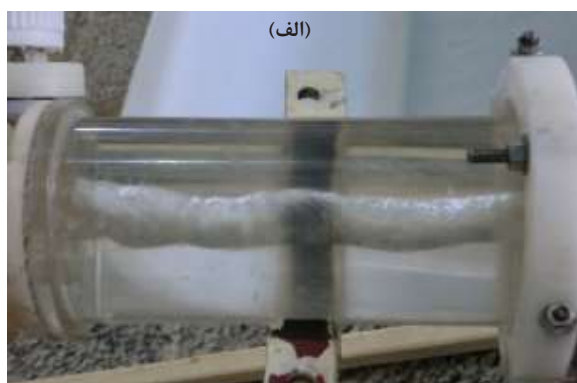
هرچه کیفیت جدایش در یک جداکننده بهتر باشد، مقدار

دوم دستگاه، توسط دو عدد پمپ سانتریفیوژ دور متغیر صورت می‌گرفت، تغییر دبی سیال به راحتی و در زمان خوراک‌دهی زغال خام، با تنظیم دور موتور پمپ‌ها انجام شد. برای بررسی تاثیر دبی سیال، چهار آزمایش صنعتی در شرایط پایداری مدار (از نظر تناژ خوراک و دانسیته سیال ورودی) انجام شد. انجام هر یک از آزمایش‌ها، ۴۰ دقیقه به طول انجامید و تمام آزمایش‌ها در طول یک شیفت هشت ساعته انجام شد. برای بررسی تاثیر لوله‌های رابط بین دو مرحله دستگاه، سه آزمایش انجام شد. پس از هر آزمایش، خوراک‌دهی قطع، مدار متوقف و پس از تعویض و نصب لوله‌های جدید، مجدداً عملیات تزریق، بازیابی و شمارش ردیاب‌ها در شرایط پایداری مدار انجام شد. لازم به ذکر است که برای هر بار تعویض لوله‌های رابط، ۸ ساعت زمان صرف شد. شرایط انجام آزمایش‌های صنعتی در جداول ۲ و ۳ نشان داده شده است. هم‌چنین خوراک ورودی به تری‌فلو در همه آزمایش‌ها، زغال خام کارگاه مکانیزه و تناژ ورودی به دستگاه، در محدوده ۱۴۰ - ۱۲۰ تن بر ساعت بود.

۳-۱- ترسیم منحنی توزیع

برای بررسی عملکرد جداکننده‌های واسطه سنگین، شاخص‌های زیادی معرفی شده‌اند که بیشتر به کمک ترسیم منحنی توزیع، قابل اندازه‌گیری هستند. منحنی توزیع نشان می‌دهد که مواد با دانسیته‌های متفاوت، چگونه و چه قدر به کنسانتره راه پیدا می‌کنند. در محور افقی این منحنی، دانسیته ذرات و در محور عمودی آن، ضریب توزیع^۱ (کسری از مواد راه‌یافته به کنسانتره) نشان داده می‌شود. با کمک این منحنی، دو شاخص اصلی دانسیته جدایش^۲ (ρ_{50}) و خطای جدایش (E_p) اندازه‌گیری می‌شوند. برای رسم منحنی توزیع هر یک از مراحل تری‌فلو، در هر دانسیته، درصد ردیاب راه‌یافته به بخش شناور در آن مرحله، به عنوان ضریب توزیع

هسته هوا در مرحله اول تری فلو، به طور میانگین ۵۰ درصد بزرگتر از مرحله دوم است. هم‌چنین در مرحله اول دستگاه، قطر هسته در مجاورت دریچه ورودی تری فلو، بزرگتر است و به سمت مرحله دوم دستگاه، کاهش می‌یابد و این یعنی در تری فلو، هوا از دریچه ورودی خوراک، وارد و از دریچه خروجی محصول شناور شده، خارج می‌شود (در سیکلون‌های واسطه سنگین، هوا از دریچه ته‌ریز وارد می‌شود). اگر دبی سیال ورودی کمتر از ۲۰ لیتر بر دقیقه باشد، در هیچ یک از مراحل دستگاه، هسته هوا تشکیل نمی‌شود. به عبارت دیگر، سرعت سیال ورودی به تری فلو باید به گونه‌ای باشد که نیروی گریز از مرکز کافی را برای تشکیل هسته هوا فراهم کند. در شکل ۸، هسته هوای داخل تری فلو در شرایط شیب نصب ۲۲٫۵ درجه، دبی آب ۳۸ لیتر بر دقیقه، قطر لوله‌های رابط ۲۲٫۵ میلی‌متر نشان داده شده است.



شکل ۸: هسته هوا در تری فلو (الف: مرحله اول، ب: مرحله دوم)

۲-۲- جدایش ذرات جامد در تری فلو آزمایشگاهی

به منظور بررسی جدایش ذرات جامد در حضور آب درون تری فلو شفاف، سه آزمایش با استفاده از تزریق ردیاب‌های

کوچک‌تر است و لذا در یک جدایش ایده‌آل، مقدار E_p برابر صفر است [۱۱]. با استفاده از روش کمینه‌کردن مربعات خطا، ضرایب توزیع به دست آمده از رابطه ۱ بر نقاط حاصل از شمارش ردیاب‌ها منطبق شد و مقادیر دانسیته جدایش (ρ_{50}) و خطای جدایش (E_p) برای هر مرحله از تری فلو به دست آمد. البته علاوه بر دو شاخص اصلی E_p و ρ_{50} ، شاخص‌های دیگری نیز برای بیان کیفیت و کمیت جدایش در یک جداکننده واسطه سنگین، استفاده می‌شوند که در ادامه به مهم‌ترین آنها اشاره می‌شود.

۱-۳-۱- انحراف دانسیته جدایش

دانسیته جدایش یکی از شاخص‌های عملیاتی است که با تغییر دانسیته سیال واسطه سنگین، می‌توان آن را کنترل و تعیین کرد که چه ذراتی به باطله و یا کنسانتره منتقل شوند. ذره‌ای که دانسیته آن برابر ρ_{50} است، شانس مساوی برای ورود به کنسانتره و یا باطله دارد. در عملیات صنعتی ممکن است دانسیته جدایش، بالاتر و یا پایین‌تر از دانسیته سیال باشد که به اختلاف این دو دانسیته ($\rho_{50} - \rho_m$)، انحراف دانسیته جدایش^{۱۰} می‌گویند. انحراف دانسیته جدایش، با کوچک‌تر شدن اندازه ذرات، افزایش می‌یابد [۱۲]. البته عدم پایداری سیال واسطه سنگین نیز منجر به افزایش انحراف دانسیته جدایش و کاهش کارایی جدایش می‌شود.

۱-۳-۲- مواد به اشتباه تقسیم شده

در یک جدایش ثقلی ایده‌آل زغال سنگ، تمام ذرات سبک‌تر از دانسیته جدایش به کنسانتره و ذرات سنگین‌تر از آن، به باطله می‌روند. در عملیات واقعی و صنعتی، وقوع این پدیده دور از انتظار است. به مجموع مواد سبک‌تر از ρ_{50} موجود در باطله و مواد سنگین‌تر از ρ_{50} موجود در جریان کنسانتره، مواد به اشتباه تقسیم شده^{۱۱} می‌گویند. عوامل زیادی از قبیل ترکیب خوراک (میزان مواد با دانسیته نزدیک به دانسیته جدایش)، تناژ خوراک، خصوصیات ریولوژیکی سیال واسطه سنگین و شاخص‌های هندسی و عملیاتی جداکننده، بر میزان مواد به اشتباه تقسیم شده مؤثر هستند [۱۳].

۲- نتایج و بحث

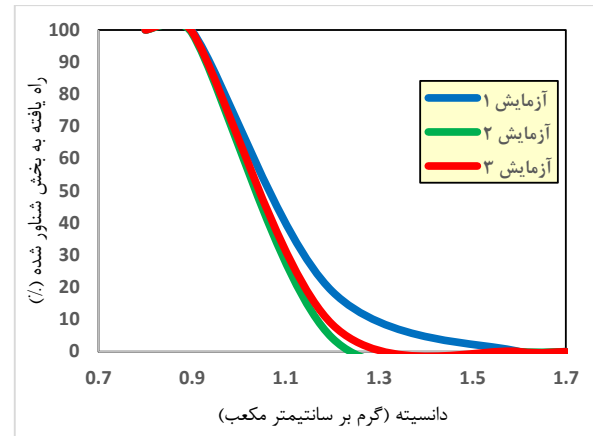
۱-۲- قطر هسته هوا در تری فلو شفاف آزمایشگاهی

نتایج آزمایش‌های تنها با آب، حاکی از آن است که اندازه

۲-۳-۱- تأثیر دبی سیال ورودی

منحنی‌های توزیع مربوط به بررسی نقش دبی سیال ورودی بر عملکرد تری فلو در شکل ۱۰ نشان داده شده است. بررسی منحنی‌ها نشان می‌دهد که به جز آزمایش چهارم، در سایر آزمایش‌ها، خطای جدایش مرحله اول دستگاه بیشتر از مرحله دوم بوده و مرحله دوم تری فلو، عملکرد بهتری داشته است. چون سیلندر مرحله دوم، ۳۵ سانتی‌متر طولانی‌تر از سیلندر مرحله اول دستگاه است و زمان ماند ذرات در این مرحله بیشتر است، نتایج حاصله منطقی به نظر می‌رسد. از طرفی، با افزایش دبی سیال ورودی، خطای جدایش در هر دو مرحله دستگاه، کاهش یافته است. مقادیر شاخص‌های خطای جدایش (Ep)، انحراف دانسیته جدایش ($\rho_{50}-\rho_m$) و مواد به اشتباه تقسیم شده (Misplaced Material)، به ترتیب برای مراحل اول و دوم تری فلو در جداول ۵ و ۶ گزارش شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، ارقام این جداول نیز بر ایجاد جدایش دقیق‌تر در مرحله دوم تری فلو دلالت دارند. ضمناً افزایش دبی سیال، بر کیفیت جدایش مرحله دوم تأثیر کمتری دارد. تأثیر قابل توجه دبی واسطه ورودی بر کاهش مواد به

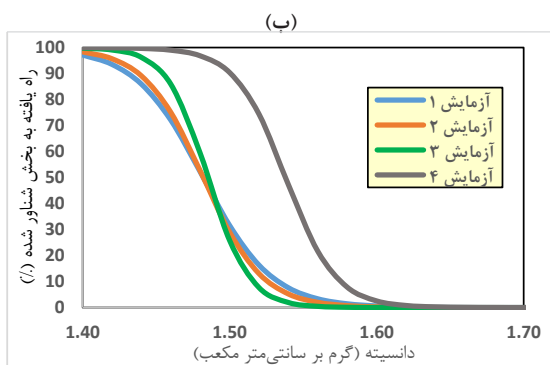
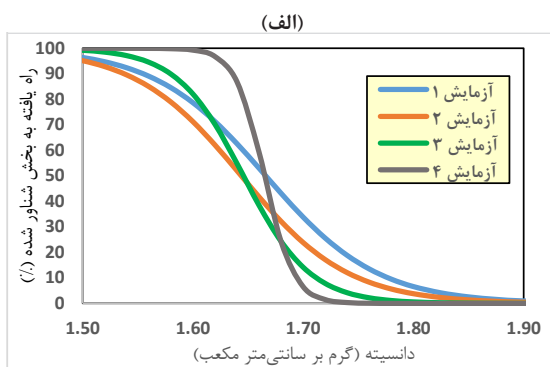
رنگی انجام شد (جدول ۲). در شکل ۹، منحنی‌های توزیع حاصله و در جدول ۴، مقادیر خطای جدایش مربوط به آزمایش‌های مذکور، ارائه شده است.



شکل ۹: منحنی‌های توزیع آزمایش‌های آب و ردیاب

جدول ۴: خطای جدایش تری فلو (Ep) در آزمایش‌های آب و ردیاب

شماره آزمایش	مرحله اول	مرحله دوم	کلی
۱	۰٫۱۳۰	۰٫۱۸۰	۰٫۱۰۰
۲	۰٫۰۸۵	۰٫۰۹۰	۰٫۰۷۵
۳	۰٫۰۹۰	۰٫۰۹۵	۰٫۰۸۰

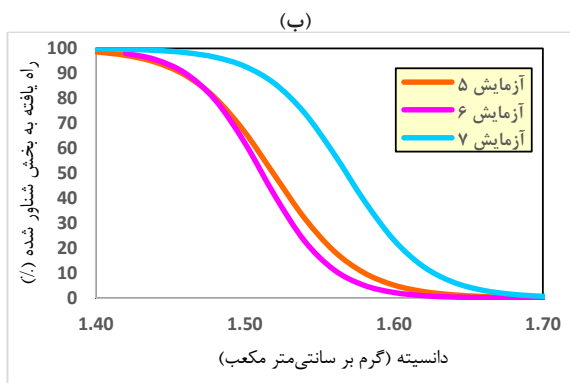
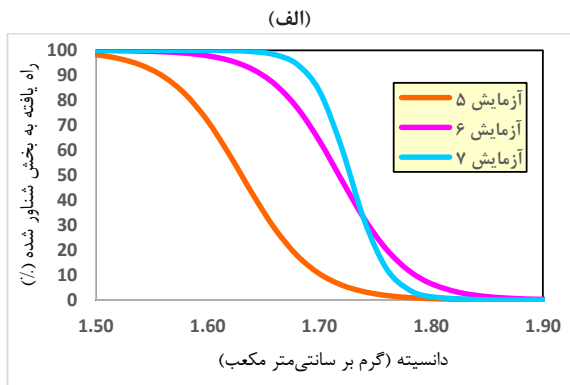


شکل ۱۰: منحنی‌های توزیع در آزمایش‌های بررسی تأثیر دبی سیال (الف: مرحله اول، ب: مرحله دوم)

مقایسه منحنی‌های توزیع نشان می‌دهد وقتی هسته هوا بزرگ‌تر است، کیفیت جدایش بهتر است. از طرفی، بررسی مقادیر خطای جدایش نشان می‌دهد که خطای جدایش کلی تری فلو، کمتر از خطای جدایش مراحل اول و دوم آن است. این رفتار با یافته‌های سایر محققان در این زمینه مطابقت دارد. هم‌چنین مقایسه آزمایش‌های ۲ و ۳ نشان می‌دهد که افزایش ۲۰ درصدی مقادیر مواد با دانسیته نزدیک به دانسیته جدایش، تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر خطای جدایش تری فلو ندارد.

۲-۳- ارزیابی عملکرد تری فلوی صنعتی

در فاز صنعتی این تحقیق، با استفاده از تزریق ردیاب‌های دانسیته، تعداد چهار آزمایش برای بررسی تأثیر دبی سیال (جدول ۳)، و سه آزمایش برای بررسی اثر قطر لوله‌های رابط (جدول ۴) بر عملکرد تری فلو انجام شد.



شکل ۱۱: منحنی‌های توزیع در آزمایش‌های بررسی تأثیر قطر لوله‌های رابط (الف: مرحله اول، ب: مرحله دوم)

و دوم دستگاه مشابه بوده است. آزمایش نمونه‌های زغال گرفته‌شده از خوراک و محصولات دستگاه، نشان داد که با افزایش قطر لوله‌های رابط تری‌فلو از ۲۰۵ تا ۲۳۵ میلی‌متر، راندمان جرمی محصول از ۱۵ به ۲۴ درصد و خاکستر محصول از ۱۳/۳ به ۱۳/۸ درصد افزایش یافته است.

با مطالعه مقادیر انحراف دانسیته جدایش حاصل از آزمایش‌های ۷ گانه تزریق ردیاب در تری‌فلو درمی‌یابیم برخلاف سیکلون‌های واسطه سنگین، انحراف دانسیته جدایش در جداکننده تری‌فلو منفی است. این رفتار نشان می‌دهد که جریان غالب درون جداکننده تری‌فلو، جریان بالارونده به طرف خروجی‌های باطله و میانی دستگاه است و هر ذره سبک (زغال تمیز) برای رسیدن به خروجی کنسانتره دستگاه، باید خلاف این جریان غالب حرکت کند تا بتواند بر نیروی مقاومت سیال واسطه سنگین غلبه کند. به عبارت دیگر، در تری‌فلو، ذراتی که روی بردار تعادل نیروهای گریز از مرکز و مقاومت سیال حرکت می‌کنند، سبک‌تر از سیال واسطه سنگین هستند.

اشتباه تقسیم‌شده در مرحله اول جداکننده از ۱۵ به ۳ درصد، کاملاً در جدول ۵ قابل مشاهده است.

جدول ۵: شاخص‌های جدایش مرحله اول تری‌فلو در آزمایش‌های بررسی دبی سیال

شماره آزمایش	شاخص خطای جدایش	انحراف دانسیته جدایش سانتی‌متر مکعب/گرم	مواد به اشتباه تقسیم‌شده (درصد)
۱	۰٫۰۵۶	-۰٫۱۰۴	۱۵
۲	۰٫۰۵۳	-۰٫۱۴۶	۱۳
۳	۰٫۰۳۳	-۰٫۱۵۴	۱۱
۴	۰٫۰۱۴	-۰٫۱۱۸	۳

جدول ۶: شاخص‌های جدایش مرحله دوم تری‌فلو در آزمایش‌های بررسی دبی سیال

شماره آزمایش	شاخص خطای جدایش	انحراف دانسیته جدایش سانتی‌متر مکعب/گرم	مواد به اشتباه تقسیم‌شده (درصد)
۱	۰٫۰۲۵	-۰٫۰۴۸	۹
۲	۰٫۰۲۲	-۰٫۰۶۸	۸
۳	۰٫۰۱۵	-۰٫۰۸۵	۱۰
۴	۰٫۰۱۹	-۰٫۰۴۲	۶

آنالیز نمونه‌های زغال گرفته‌شده از خوراک و محصولات دستگاه در زمان انجام آزمایش‌های ردیاب، نشان داد که با افزایش دبی سیال ورودی به تری‌فلو از آزمایش‌های ۱ تا ۴، راندمان جرمی محصول از ۲۰ به ۲۳ درصد، افزایش و خاکستر محصول از ۱۴ به ۱۳ درصد کاهش یافته است.

۲-۳-۲- تأثیر قطر لوله‌های رابط

در شکل ۱۱ منحنی‌های توزیع تأثیر قطر لوله‌های رابط بر کارایی تری‌فلو نشان داده شده است. مقادیر شاخص‌های جدایش به دست آمده از آزمایش‌های مربوطه نیز در جداول ۷ و ۸ آمده است. در این آزمایش‌ها با افزایش قطر لوله‌های رابط، کارایی جدایش ارتقا می‌یابد. هم‌چنین مقایسه مقادیر Ep ، حاکی از بهبود قابل ملاحظه کیفیت جدایش در مرحله اول است.

مقادیر شاخص‌های مندرج در جداول ۷ و ۸ نشان می‌دهد که در این سری از آزمایش‌ها، کیفیت جدایش در مرحله اول

جدول ۷: شاخص‌های جدایش مرحله اول تری فلوی در آزمایش‌های بررسی قطر لوله‌های رابط

شماره آزمایش	شاخص خطای جدایش	انحراف دانسیته جدایش سانتی متر مکعب/گرم	مواد به اشتباه تقسیم شده (درصد)
۵	۰٫۰۳۶	-۰٫۱۶۰	۱۲
۶	۰٫۰۳۰	-۰٫۰۴۲	۸
۷	۰٫۰۱۸	-۰٫۰۵۳	۳

جدول ۸: شاخص‌های جدایش مرحله دوم تری فلوی در آزمایش‌های بررسی قطر لوله‌های رابط

شماره آزمایش	شاخص خطای جدایش	انحراف دانسیته جدایش سانتی متر مکعب/گرم	مواد به اشتباه تقسیم شده (درصد)
۵	۰٫۰۳۲	-۰٫۰۳۱	۱۲
۶	۰٫۰۲۹	-۰٫۰۲۸	۱۰
۷	۰٫۰۲۶	-۰٫۰۰۲	۱۰

۳- نتیجه‌گیری

در این تحقیق در فاز آزمایشگاهی، عملکرد یک دستگاه تری فلوی شفاف ۷۰ میلی‌متری، بررسی و نتایج زیر مشخص شد:

۱- در تری فلوی، هوا از دریچه ورودی خوراک وارد می‌شود و قطر هسته هوا در مرحله اول دستگاه، حدود ۵۰ درصد بزرگ‌تر از قطر آن در مرحله دوم است.

۲- وقتی هسته هوا در تری فلوی بزرگ‌تر است، عملکرد دستگاه در جدایش ذرات جامد بهتر است.

۳- مقدار مواد با دانسیته نزدیک به دانسیته جدایش، تاثیر قابل ملاحظه‌ای بر خطای جدایش تری فلوی ندارد.

اما در مطالعات فاز صنعتی، با تزریق ردیاب‌های ۳۲ میلی‌متری، اثر دبی سیال واسطه سنگین و قطر لوله‌های رابط بر شاخص‌های عملکردی تری فلوی ۷۰ میلی‌متری کارخانه فرآوری زغال سنگ طبس بررسی و مشخص شد:

۱- با افزایش متغیرهای ذکر شده، شاخص‌های خطای جدایش، انحراف دانسیته جدایش و مواد به اشتباه تقسیم شده در هر دو مرحله تری فلوی بهبود می‌یابند. بیشترین بهبود در مرحله اول دستگاه و برای مواد به اشتباه تقسیم شده حاصل می‌شود.

۲- برخلاف سیکلون‌های واسطه سنگین، انحراف دانسیته جدایش در جداکننده تری فلوی، منفی است که نشان می‌دهد، جریان بالارونده به طرف خروجی‌های باطله و میانی، جریان غالب درون دستگاه است.

۳- مقایسه منحنی‌های توزیع حاصل از ۷ آزمایش صنعتی نشان داد که دبی سیال ورودی، بیشترین تاثیر را بر عملکرد دستگاه دارد.

۴- با افزایش دبی واسطه ورودی از ۴۱۰ به ۴۴۰ مترمکعب در ساعت در مرحله اول جداکننده و از ۴۰۰ به ۴۳۰ مترمکعب در مرحله دوم جداکننده، مقدار مواد به اشتباه تقسیم شده در مرحله اول از ۱۵ به ۳ درصد و در مرحله دوم دستگاه از ۹ به ۶ درصد کاهش می‌یابد.

۵- با افزایش قطر لوله‌های میانی از ۲۰۵ به ۲۳۵ میلی‌متر، ۹ درصد در راندمان دستگاه و ۰٫۵ درصد در خاکستر زغال کنسانتره، افزایش مشاهده شد. هم‌چنین با افزایش دبی واسطه ورودی در محدوده مجاز، ۳ درصد افزایش راندمان و ۱ درصد کاهش خاکستر در کنسانتره به دست آمد.

برای دستیابی به بهترین عملکرد دستگاه در فاز صنعتی، باید دبی سیال واسطه سنگین، بالغ بر ۴۳۰ متر مکعب بر ساعت و قطر لوله‌های رابط دستگاه، ۲۳۵ میلی‌متر باشد.

یکی دیگر از عوامل عملیاتی تری فلوی که در این تحقیق مورد بررسی قرار نگرفت، فشار معکوس وارد بر جریان‌های باطله و میانی است که با تغییر ارتفاع لوله خروجی، دست کاری و تنظیم می‌شود. تاثیر این عامل بر کارایی جدایش تری فلویها در حال انجام است که نتایج حاصله در مقالات بعدی ارائه خواهد شد.

۴- سپاس‌گزاری

نویسندگان از مدیر عامل محترم شرکت زغال سنگ پرونده طبس جناب آقای مهندس کریتی ثانی بابت حمایت و پشتیبانی این تحقیق، از جناب آقای مهندس سابق مدیریت محترم کارخانه فرآوری زغال سنگ طبس بابت همکاری در انجام آزمایش‌های صنعتی و از آقای دکتر محسن آقایی بابت همکاری در بررسی‌های آزمایشگاهی تقدیر و تشکر می‌کنند.

۵- مراجع

- [1] Wills, B. A., and Finch, J. (2016). "Mineral Processing Technology: An Introduction to the Practical Aspects of ore Treatment and Mineral Recovery". 8th Ed., Butterworth-Heinemann, pp. 512.

- [10] Luttrell, G. H. (2013). "Optimization, Simulation and Control of Coal Preparation Plants". In The Coal Handbook: Towards Cleaner Production, By Dave Osborne, Chapter 17: 560-586.
- [11] De Korte, G. J. (2003). "Comments on the use of tracers to test dense medium plant efficiency". Coal Preparation, 23: 251-266.
- [12] King, R. P. (2012). "Modeling and Simulation of Mineral Processing Systems". Gravity separation. In Schneider, C. L., and King, E. A. (Eds.), 2nd Ed., Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, Inc., 277-314.
- [13] De Korte, G. J. (2008). "The influence of near-dense material on the separation efficiency of dense-medium processes". International Journal of Coal Preparation and Utilization, 28(2): 69-93.
- [2] Ferrara, G., and Ruff, H. J. (1982). "Dynamic dense medium separation processed - further developments with particular reference to the Tri Flo separator". Erzmetall: Journal for Exploration, Mining and Metallurgy, 35(6): 294-299.
- [3] Burton, M. W. A., Ferrara, G., Machiavelli, G., Porter, M. M., and Ruff, H. J. (1991). "The economic impact of modern dense medium systems". Minerals Engineering, 4(3-4): 225-243.
- [4] Ferrara, G., Bozzato, P., and Chine, B. (1999). "Performance of conical and cylindrical separatory vessels in dynamic dense medium separation processes". Minerals & Metallurgical Processing Journal. 16(2): 8-15.
- [5] Ferrara, G., Machiavelli, G., Bevilacqua, P., and Meloy, T. P. (1994). "Tri-Flo: A multistage high-sharpness DMS process with new applications". Mining, Metallurgy & Exploration, 11(2): 63-73
- [6] Bozzato, P., Peng, F. F., and Gu, Z. (2005). "Dense medium Tri-Flo separator: A review and new development". SME Annual Meeting, Littleton, pp. 8.
- [7] Burt, R. O., and Flemming, J. (1988). "Introduction of the Tri-Flo at Tancon". In Preprint - Society of Mining Engineers of AIME. Littleton, CO, USA: Society of Mining Engineers of AIME, pp. 14.
- [8] Dehghan, R., and Aghaei, M. (2014). "Evaluation of the performance of Tri Flo separators in Tabas (Parvadeh) coal washing plant". Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology, 7(3): 510-514.
- [9] Noori, M., and Dehghan, R. (2019). "Use of density tracers in evaluating performance of Tri-Flo circuits. Case study: Tabas (Iran) coal preparation plant". Journal of Mining and Environment, 10(2): 441-450

¹ Tri-Flo

² Dyna-whirlpool

³ Larcodems

⁴ Ecart probable

⁵ Partition curves

⁶ Sink & float analysis

⁷ Density tracers

⁸ Partition coefficient

⁹ Cut point

¹⁰ Cut point shift

¹¹ Misplaced material



Assessment of the Tri-Flo Separator in Tabas Coal Preparation Plant on the Basis of the Laboratory Studies

Dehghan R.^{1*}, Noori M.²

1- Associate Professor, Dept. of Mining and Metallurgical Engineering, Yazd University, Yazd, Iran
rdehghans@yazd.ac.ir

2- Ph.D, Dept. of Mining and Metallurgical Engineering, Yazd University, Yazd, Iran
Noori3045@gmail.com

(Received: 12 Dec. 2019, Accepted: 01 Feb. 2020)

Abstract: About 40 percent of total raw coal feeding to Tabas coal preparation plant, consists of particles in the size range of -50+6 mm. These particles are washed in a 700 mm (diameter) two-stage Tri-Flo dense medium separator. In order to understand the mechanism of separation, a laboratory setup including a transparent 70 mm Tri-Flo separator, tanks, pumps and the required instruments was designed and manufactured. In laboratory studies, some polymeric colorful tracers were added to the separator with different air core sizes, and were captured and counted in products' tanks. The results indicate that probable error of separation (E_p) decreases while air core gets bigger. Relying the findings of laboratory studies, the industrial Tri-Flo was optimized using density tracers in the specific gravity range of 1.20 – 2.20 g/cm³, when the separator was treating raw coal. In this phase, we tried to change dense medium flow rate and internal tube diameter in the meaningful levels to evaluate the separator performance, rapidly. An increase of 9% in the production yield and 0.5% increase in clean coal ash were the results of increasing the internal tube diameter in industrial separator from 205 mm to 235 mm. 3% increase in the production yield and 1% decrease in the clean coal ash was also observed with increasing the medium flow rate. Similar to the results observed in laboratory separator, increasing the flow rate and pipe diameter leads to clearer separation in industrial separator. This research presents a successful use of the laboratory results for optimization of an industrial separator.

Keywords: Industrial Tri-Flo, Transparent Tri-Flo, Tracer, Air core, Probable error (E_p).

INTRODUCTION

Dense medium separation is the most popular process for treating coal in the world [1]. The last generation, among dynamic heavy medium separators, a multistage device called Tri-Flo which was developed in 1980s in Italy [2]. The most important advantages of Tri-Flo compared to the other dense medium dynamic separators like Dense Medium Cyclone, Dynawhirpool and Larcodems include: simpler plant layout, less sensitivity to feed variations, less wear inside the device, cheaper and easier maintenance [3]. Although the use of Tri-Flo in coal treatment is growing up (especially in coals with high amount of near gravity



material), a few researches have investigated parameters affecting the performance of the separator [4-7].

In Tabas coal preparation plant, a 700 mm Tri-Flo is used to wash coarse particles (-50+6 mm) and two 500 mm Tri-Flos treat the small particles (-6+0.5 mm). In 2014, Dehghan and Aghaei evaluated the efficiency of Tri-Flo separators in both coarse and small circuits [8]. They extracted the E_p values by means of float & sink experiments on separators' products and then compared the E_p values with supplier's numbers. They reported that 700 mm Tri-Flo doesn't have the predicted efficiency. In 2019, Noori & Dehghan measured the E_p values for both stages of 700 mm Tri-Flo by means of 32 mm density tracers. They found that the device efficiency decreases when the feed tonnage exceeds 140 ton per hour [9].

The main objective of this study is to find a way to improve the separation efficiency of 700 mm Tri-Flo in Tabas coal preparation plant based on its operating/geometric variables. To this end, surveys were conducted in two different scales. In laboratory, the variation of air core size inside a transparent 70 mm Tri-Flo was investigated and then, the probable error (E_p) was evaluated for separation of colourful plastic tracers in three levels of air core size. In industry, the operating variables of the coarse circuit in Tabas Coal Preparation Plant were changed in a manner to have a bigger air core inside the separator and to decrease the E_p and misplaced material.

METHODS

In order to perform laboratory tests, a 70 mm transparent Tri-Flo was manufactured. The main cylinders were manufactured with Plexiglas rods and the other pieces (volute inlets and outlets) were made of plastic polymers. The whole device was installed on a movable platform (Figure 1, left) and water was used as a medium fluid in order to visit the air core size in both stages of the separator. For evaluating the separation performance of the Tri-Flo, a mixture of colorful plastic tracers (Figure 2, left) with different densities (0.9, 1.15 and 1.52 g/cm³) were added in different tests with different air core sizes inside the separator (Table 1).

Table 1. Conditions of laboratory water - tracer experiments

Test number	Air core diameter		Weight of added tracers		
	Stage 1	Stage 2	Light	Intermediate	Heavy
Test 1	11	8	300	400	300
Test 2	21	18	300	400	300
Test 3	18	13	200	600	200

In the industrial phase, the performance of a 700 mm Tri-Flo (Figure 1, right) was evaluated using 32 mm cubic density tracers (Figure 2, right). The tracers were introduced to the separator feed chute every 3-4 seconds and were collected at discharge end of products screens (reject, middling and clean coal) separately. 610 tracers were added in each test and after retrieval, they were counted based on their densities, and the resulting data were used to plot a partition curve for each chamber of Tri-Flo. The operational conditions of industrial surveys are presented in Table 2.



Figure 1. Tri-Flo separators used in this study (left: laboratory, right: industry)



Figure 2. Density tracers used in this study (left: laboratory, right: industry)

Table 2. Conditions of industrial tracer experiments

Test number	Medium density (g/cm ³)		Medium flow rate (m ³ /h)		Tube diameter (mm)
	Stage 1	Stage 2	Stage 1	Stage 2	
Test 1	1.77	1.53	410	400	205
Test 2	1.79	1.55	420	410	205
Test 3	1.80	1.57	430	420	205
Test 4	1.78	1.58	440	430	205
Test 5	1.79	1.55	430	400	205
Test 6	1.76	1.54	430	400	225
Test 7	1.78	1.57	430	400	235

Partition numbers for each stage of Tri-Flo were calculated as the number of tracers of a density in the float product, divided by the number of all recovered tracers of that density. The partition numbers were then used to plot the partition curve of the separator. This curve is normally interpreted and summarized with two separation characters: separation cut point (ρ_{50}) and separation efficiency (Ep). So the partition data is usually fitted to empirical models with two-parameter expressions (ρ_{50} and Ep). In this study the equation presented by Scott and Napier-Munn was used to predict the cut point and separation efficiency (Equation 1) [1]:

$$P_i = 100 \left(1 - \frac{1}{1 + \exp \left[\frac{(\rho_{50} - \rho_i) \ln 3}{Ep} \right]} \right) \quad (1)$$

where, P_i is the partition number indicating the fraction with density ρ_i in the feed reported to the float after separation; and ρ_{50} is the density of the separation (cut-point). The performance of the separators is typically measured by the Ep (Ecart probable), which is derived from the partition curve, and is calculated from equation 2 [1]:

$$Ep = \frac{\rho_{75} - \rho_{25}}{2} \quad (2)$$

where, ρ_{75} and ρ_{25} are the specific gravity values where the partition numbers are 0.75 and 0.25, respectively.

FINDINGS AND ARGUMENT

The partition curves resulted from water – tracer experiments (Table 1) are shown in Figure 3. Comparing the curves, indicates that sharper separation has been achieved when the air core was bigger. It can be also found (with comparison of Test 2 and Test 3) that the Tri-Flo separation efficiency doesn't suffer so much, when the near gravity material increases.

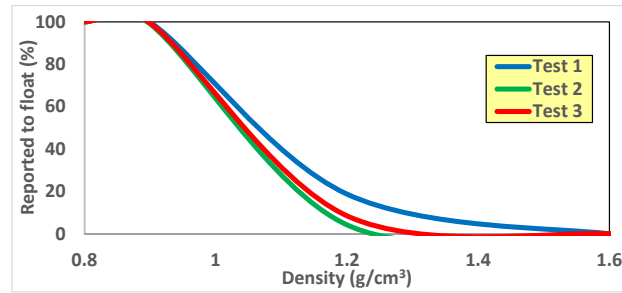


Figure 3. Partition curves resulted from water – tracer experiments

Figure 4 shows the partition curves of the experiments refers to rows 1-4 in Table 2, indicating that the Tri-Flo separation efficiency improves with increasing the medium flow rate (while the internal tube diameter stays constant). The results of ash analysis conducted on the coal samples simultaneously, show that increasing the medium flow rate from Test 1 to Test 4, increases the mass yield from 20% to 23% and decreases the clean coal ash from 14% to 13%.

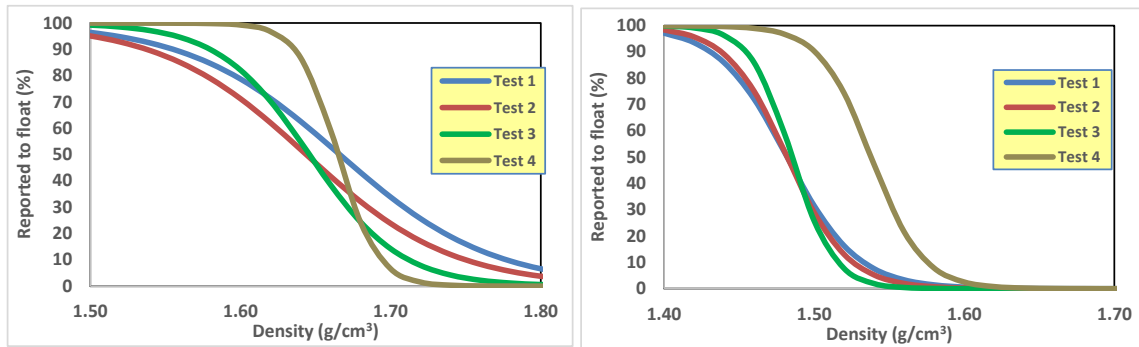


Figure 4. Partition curves resulted from industrial experiments studying the effect of medium flow rate (left: first stage, right: second stage)

The effect of increasing internal tube diameter in constant medium flow rates, is shown in Figure 5 (refers to rows 5-7 in Table 2). Here, again, we can see an improve in E_p values with bigger internal tubes. In these experiments, considering the ash analysis of coal samples, an increase in mass yield from 15% to 24% and an increase in clean coal ash from 13.3% to 13.8% were observed with changing the internal tube diameter from 205mm to 235mm. Another finding of Figures 4 and 5 is that the separation in the first stage is more sensitive to variation of the operating and geometric variables.

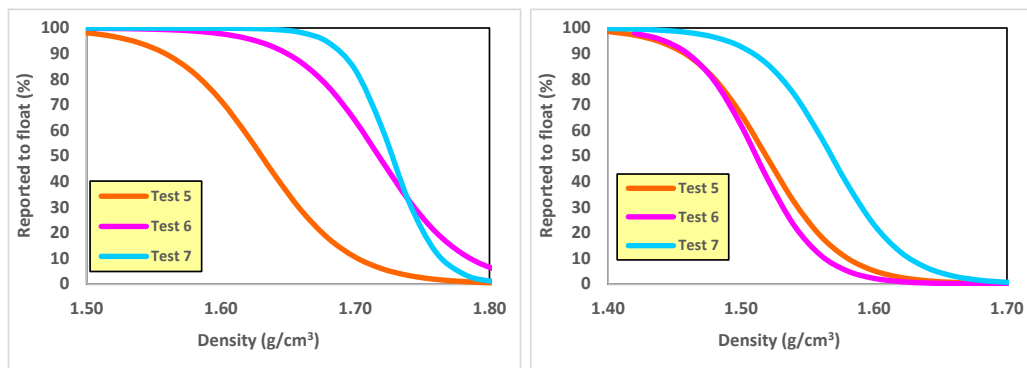


Figure 5. Partition curves resulted from industrial experiments studying the effect of internal tube diameter (left: first stage, right: second stage)

CONCLUSIONS

1. The colourful plastic tracers were added to the feed stream of a 70mm transparent laboratory Tri-Flo, and the results showed that the separation performance improves with larger air core diameters.
2. In the industrial scale, the conducted tracer tests indicate that the separation efficiency of the Tri-Flo could be improved via changing operating variables (medium flow rate) or the geometry of the separator (internal tube diameter).
3. Unlike the dense medium cyclones, the cut point shift (p50-pm) in Tri-Flo separator is negative. This indicates that the prevailing medium flow inside the Tri-Flo is outward to sink discharge heads.
4. The amount of near gravity material doesn't have a significant effect on the Tri-Flo performance.

REFERENCES

- [1] Wills, B. A., and Finch, J. (2016). *Mineral Processing Technology: An Introduction to the Practical Aspects of ore Treatment and Mineral Recovery*. 8th Edition, Butterworth-Heinemann, pp. 512.
- [2] Ferrara, G., and Ruff, H. J. (1982). *Dynamic dense medium separation processed - further developments with particular reference to the Tri Flo separator*. *Erzmetall: Journal for Exploration, Mining and Metallurgy*, 35(6): 294-299.
- [3] Burton, M. W. A., Ferrara, G., Machiavelli, G., Porter, M. M., and Ruff, H. J. (1991). *The economic impact of modern dense medium systems*. *Minerals Engineering*, 4(3-4): 225-243.
- [4] Ferrara, G., Bozzato, P., and Chine, B. (1999). *Performance of conical and cylindrical separatory vessels in dynamic dense medium separation processes*. *Minerals & Metallurgical Processing Journal*, 16(2): 8-15.
- [5] Ferrara, G., Machiavelli, G., Bevilacqua, P., and Meloy, T. P. (1994). *Tri-Flo: A multistage high-sharpness DMS process with new applications*. *Mining, Metallurgy & Exploration*, 11(2): 63-73.
- [6] Bozzato, P., Peng, F. F., and Gu, Z. (2005). *Dense medium Tri-Flo separator: A review and new development*. SME annual meeting, Littleton, pp. 8.
- [7] Burt, R. O., and Flemming, J. (1988). *Introduction of the Tri-Flo at Tancon*. In Preprint - Society of Mining Engineers of AIME, Littleton, CO, USA: Society of Mining Engineers of AIME, pp. 14.
- [8] Dehghan, R., and Aghaei, M. (2014). *Evaluation of the performance of Tri Flo separators in Tabas (Parvadeh) coal washing plant*. *Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology*, 7(3): 510-514.
- [9] Noori, M., and Dehghan, R. (2019). *Use of density tracers in evaluating performance of Tri-Flo circuits. Case study: Tabas (Iran) coal preparation plant*. *Journal of Mining and Environment*, 10(2): 441-450.