

بررسی کارآیی جدایش روش‌های ثقلی و فلوتاسیون در فرآوری زغال سنگ دانه‌متوسط و پرسولفور کارخانه فرآوری زغالسنگ پروده طبس

شاهین عاشوری بیرگانی، علی احمدی*، احمد دودکانلوی میلان

دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران

مشخصات مقاله	چکیده
تاریخچه مقاله: دریافت: ۲۲ بهمن ۱۴۰۱ دریافت پس از اصلاح: ۱۲ خرداد ۱۴۰۲ پذیرش نهایی: ۱۹ تیر ۱۴۰۲	در این پژوهش کارآیی جدایش تجهیزات فلوتاسیون و سیکلون واسطه سنگین (HMC) کارخانه زغالشویی طبس بر روی سه نمونه زغالسنگ مختلف بررسی شد. پایش عملکرد بخش فلوتاسیون نشان داد که کارآیی شستشوی ذرات با محدوده ۰/۳ تا ۰/۵mm بسیار پایین تر از مواد ریزتر از ۰/۳mm است. نتایج بررسی های آزمایشگاهی نشان داد که کارآیی شستشوی بخش ۰/۳ تا ۰/۵mm برای هر سه نمونه زغالسنگ در روش ثقلی (غرق و شناوری) بسیار بالاتر از فلوتاسیون می‌باشد. پایش عملکرد بخش HMC نیز نشان داد که خطای جدایش و نقطه برش برای ذرات ریزتر از ۱/۴mm نسبت به ذرات درشت‌تر (۱/۴ تا ۲۲/۵mm) بیشتر است و فرآوری آنها در سیستم موجود کارآیی مناسبی ندارد. نهایتاً نتایج نشان داد برای افزایش کارآیی شستشوی ذرات دانه متوسط با محدوده ابعادی ۰/۳ تا ۱/۴mm لازم است از یک سیستم ثقلی دیگر نظیر TBS، اسپیرال و یا تجهیزات نظیر آنها استفاده شود.
کلمات کلیدی: زغالسنگ؛ فلوتاسیون؛ سیکلون واسطه سنگین؛ دانه‌متوسط؛ سولفور	

حقوق ناشر محفوظ است.

* عهده دار مکاتبات

a.ahmadi@iut.ac.ir

کارخانه فرآوری زغال‌سنگ پروده طبس در ۸۰ کیلومتری جنوب غربی شهرستان طبس، در منطقه پروده و در نزدیکی معادن پروده مرکزی، نگین، معدنچو و یال شمالی قرار دارد. این کارخانه در اوایل دهه ۱۳۸۰، به منظور فرآوری سالانه ۵۰۰ هزار تن زغال‌سنگ خام و تولید ۲۵۰ هزار تن کنسانتره زغال‌سنگ با خاکستر ۱۱ درصد طراحی و تأسیس گردید. خوراک اصلی ورودی به این کارخانه، از معادن منطقه شامل نگین، معدنچو، تخت زیتون و برخی معادن متفرقه تامین می‌گردد. مواد ورودی کارخانه بعد از چند مرحله خردایش و دانه‌بندی تا ابعاد ریزتر از ۲۲/۵ میلی‌متر خرد شده و سپس توسط سرنده با ابعاد چشمه ۰/۵ mm با محدوده ابعادی ۰/۵ تا ۲۲/۵ و ریزتر از ۰/۵ میلی‌متر تفکیک می‌شوند. ذرات ۰/۵ تا ۲۲/۵ میلی‌متر، خوراک سیکلون واسطه سنگین را تشکیل می‌دهند و ذرات زیر ۰/۵ mm نیز وارد بخش فلوتاسیون ستونی به ارتفاع شش متر می‌شوند. در بخش سیکلون واسطه سنگین، از پودر مگنتیت به عنوان واسطه و در بخش فلوتاسیون از گازوئیل به عنوان کلکتور و از MIBC به عنوان کف‌ساز استفاده می‌شود.

انتخاب تجهیزات جدایش و فرآوری در کارخانه‌های زغالشویی براساس محدوده دانه بندی انجام می‌شود [۱، ۲]. در فرآیند زغالشویی، معمولاً از فلوتاسیون برای فرآوری بخش ریزدانه و از تجهیزات ثقلی نظیر سیکلون واسطه سنگین، اسپیرال و ... برای فرآوری بخش درشت دانه استفاده می‌شود. [۱، ۳]. در کارخانه فرآوری زغال‌سنگ پروده طبس از دو تجهیز فلوتاسیون ستونی و سیکلون واسطه سنگین به ترتیب برای جدایش ذرات با ابعاد ریزتر از ۰/۵ و ۰/۵ تا ۲۲/۵ میلی‌متر استفاده می‌شود. از جمله مشکلات کارخانه‌های زغالشویی، بازیابی کم ذرات دانه متوسط است. زغال ورودی در بخش فلوتاسیون شامل ذرات درشت (خارج از محدوده بهینه فلوتاسیون)، ذرات تیغه‌ای و اکسیدی می‌باشند. ذرات درشت بخش فلوتاسیون به دلیل وزن و ابعاد درشتی که دارند پس از اتصال به حباب هوا پایدار نمی‌مانند و از آن جدا شده و به بخش باطله غیر شناور منتقل می‌گردند [۴]. ذرات تیغه‌ای نیز به علت اینکه نسبت طول به عرض بیشتری دارند با عبور از سرنده، به بخش فلوتاسیون منتقل می‌شوند و به درستی فرآوری نمی‌شوند. درخصوص ذرات اکسیدی نیز اگرچه زغال‌سنگ به طور طبیعی آبران می‌باشد ولی ممکن است باتوجه به شرایط محیطی مختلف درجه‌ای از اکسیداسیون سطحی بر روی آن انجام شود و منجر به تشکیل پیوندهای اکسیدی در سطح شود که در محیط آبی به علت

تشکیل پیوند هیدروژنی، آبدوست شده و به بخش باطله غیر شناور منتقل می‌شوند [۵-۷]. در سیکلون واسطه سنگین جدایش ذرات براساس دانسیته نسبی آنها و با ترکیب نیروهای ثقلی، گریز از مرکز و مقاومت سیال است [۸]. در این روش، ذرات ریز به دلیل وزن و ابعاد کم، کمتر تحت تأثیر نیروی گریز از مرکز قرار می‌گیرند و معمولاً تحت تأثیر عواملی دیگر مانند دنباله روی با آب به اشتباه تقسیم می‌شوند و بازیابی آن‌ها نسبت به ذرات درشت‌تر کمتر است [۸، ۹]. با توجه به اینکه این پژوهش به منظور بررسی کارایی جدایش زغالسنگ دانه متوسط می‌باشد. در ادامه مروری از تحقیقات، پیشرفت‌ها و تجهیزات توسعه یافته در این زمینه ارائه شده‌اند.

اسپیرال، TBS، سیکلون با آب، سیکلون واسطه سنگین قطر کم، جداکننده ثقلی ارتقا یافته مانند فالكونها، جداکننده های چند دانسیته ای تجهیزاتی هستند که عمدتاً برای فرآوری ذرات دانه متوسط (محدوده ۰/۲ تا ۲ میلی‌متر) استفاده میشوند. [۴، ۱۰]. برخی از این تجهیزات در مقیاس صنعتی در حال استفاده هستند و برخی جدید و در حال توسعه می‌باشند.

اسپیرال یک جدا کننده گریز از مرکز است که حساسیت بالایی در برابر نرمة‌ها دارند و نرمة‌ها بیشتر با دنباله روی همراه آب به بخش جداره (کنسانتره زغالسنگ) منتقل می‌شوند [۱۱]. [۱۲]. هوناگر و همکارانش در سال ۲۰۰۷ به بهینه‌سازی پارامترهای جداکننده اسپیرال برای زغالسنگ‌های با اندازه ذرات ۰/۱۵۰ تا ۱ میلی‌متر در مقیاس نیمه صنعتی پرداختند [۱۳]. در سال ۲۰۱۹ شکری و زارع [۳] پتانسیل استفاده از اسپیرال برای زغالسنگ‌های نسبتاً ریز دانه را در زغال‌سنگ البرزشرقی مورد بررسی قرار دادند. در سال ۲۰۱۲ هاسی فضل‌اقلو [۱۴] با طراحی یک جداکننده سیکلون با آب به بررسی جدایش ذرات زغال‌سنگ با اندازه ذرات درشت‌تر از ۰/۲ mm و مقایسه آن با اسپیرال و فلوتاسیون پرداخت. در نهایت نتایج آن نشان داد، سیکلون با آب توانایی شستشوی این ذرات زغال‌سنگ را دارد و می‌تواند جایگزین فلوتاسیون و اسپیرال گردد. گوانخی و همکارانش [۱۵] در سال ۲۰۲۱ به مقایسه دو روش اسپیرال و سیکلون واسطه سنگین برای یک نمونه زغالسنگ با محدوده ابعادی ۰/۱۲۵ تا ۱ میلی‌متر پرداختند. در این پژوهش مشخص شد که سیکلون واسطه سنگین راندمان بالاتری نسبت به اسپیرال دارد و خطای جدایش آن نیز کم‌تر است.

چلیک و ارسلان در سال ۲۰۲۲ [۱۶] به مدلسازی فرآوری یک سیکلون فقط با آب جهت فرآوری زغالسنگ با محدوده

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- نمونه‌گیری

نمونه‌های مورد استفاده در این پژوهش از سه معدن با قابلیت شستشوی پذیری مختلف شامل معادن معدنچو، نگین و تخت زیتون بود که وارد مدار کارخانه شده و در حالت پایا از بخش‌های فلوتاسیون ستونی (خوراک، محصول شناور و باطله غیر شناور) و سیکلون واسطه سنگین کارخانه (خوراک، محصول سرریز و باطله ته ریز) گرفته شدند. عملیات نمونه‌گیری برای هر قسمت در طول یک شیفت کاری ۱۲ ساعته و به فواصل زمانی هر سه ساعت یکبار انجام شد و پس از پایدار شدن مدار، برای هر قسمت چهار نمونه گرفته شد و مخلوط گردید. در هر شیفت کاری حدود ۱۵۰۰ تن زغال‌سنگ معرف از هر معدن شارژ شد. در بخش فلوتاسیون وزن هر نمونه حدود ۵ کیلوگرم (مجموعاً ۲۰ کیلوگرم) و در بخش سیکلون وزن نمونه‌ها حدود ۱۰۰ کیلوگرم (مجموعاً ۴۰۰ کیلوگرم) بود. در نهایت نمونه‌ها پس از چند مرحله مخلوط و همگن‌سازی تقسیم شدند و برای انجام آنالیزهای مختلف دانه‌بندی، خاکستر سنجی، گوگرد سنجی، خطای جدایش، غرق و شناورسازی و فلوتاسیون مورد استفاده قرار گرفتند.

۲-۲- آنالیز دانه‌بندی

نمونه‌های بخش فلوتاسیون توسط سرندهای آزمایشگاهی ۵۰۰، ۳۰۰، ۱۵۰ و ۷۵ میکرون و به روش تر تحت آنالیز دانه بندی قرار گرفتند. نمونه‌های حاصل از هر فراکسیون خشک و سپس محتوای خاکستر آنها [۲۰] اندازه گیری شد. نمونه‌های بخش سیکلون واسطه سنگین (خوراک، سرریز و ته ریز) توسط سرندهای ۱۲/۷، ۴/۷۵، ۲، ۱/۴، ۱ و ۰/۵ میلی‌متر سرندها شدند. سپس خاکستر سنجی نمونه‌های حاصل از هر بخش انجام شد.

۲-۳- آزمایش غرق و شناورسازی

برای انجام آزمایشهای غرق و شناورسازی، از محلول‌های سنگین کلرید روی با دانسیته‌های متفاوت استفاده شد. برای تهیه این محلول‌ها، از ترکیب پودر کلرید روی و آب، محلول‌های با دانسیته‌های ۱/۳، ۱/۴، ۱/۵، ۱/۶، ۱/۷ و ۱/۸ گرم بر سانتی متر مکعب در سطوح مختلف تهیه گردید. سپس آزمایشهای غرق و شناورسازی در این دانسیته‌ها انجام شد. به این صورت که ابتدا نمونه در محلول با دانسیته ۱/۳ گرم بر متر مکعب ریخته

ابعادی ریزتر از ۱ میلی‌متر پرداختند. آنها دریافتند که در حالت بهینه امکان کاهش خاکستر از ۴۲/۲٪ به ۱۸/۹ درصد وجود دارد. زیانگینگ و همکارانش [۱۲] در سال ۲۰۱۷ به بررسی جدایش ذرات زغال‌سنگ ۰/۱۲۵ الی ۱ میلی‌متر به وسیله جداکننده تیتربد پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد جداکننده تیتربد قابلیت جداسازی این محدوده از اندازه ذرات زغال‌سنگ را دارد. بهرامی و گولجان [۱۷] در سال ۲۰۱۹، به بررسی پارامترهای موثر در فراوری یک نمونه زغال‌سنگ لیگنیت خاکستر بالا به وسیله جداکننده تیتربد پرداختند. آنها نشان دادند که نرخ جریان آب و فشار تاثیر قابل توجهی بر حد جدایش، دانسیته جدایش و خطای جدایش دارند. لای هانگ فنگ و همکارانش [۱۸] در سال ۲۰۱۹ با استفاده از یک طرح در مقیاس آزمایشگاهی به مقایسه جداکننده تیتربد در شرایط با هوادهی و بدون هوادهی پرداختند. در این پژوهش، یک نمونه زغال در محدوده ابعادی ۰/۱۲۵ تا ۱ میلی‌متر مورد آزمایش قرار گرفت. مشاهده شد در شرایط بهینه در حالت با هوادهی، کارایی جدایش بالاتر، تولید باطله کمتر و در محدوده ابعادی ۰/۷۱ تا ۱ میلی‌متر راندمان وزنی ۲۹ درصد نسبت به حالت بدون هوادهی افزایش پیدا کرد.

بررسی‌های انجام شده در زمینه حذف ثقیلی سولفور و خاکستر نشان داده اند که محیط‌های واسطه سنگین (مانند استفاده از پودر مگنتیت و کلرید روی) تاثیر بیشتری بر حذف خاکستر و سولفور نسبت به محیط فقط آبی دارند [۱۹].

در این پژوهش به منظور پایش و بهینه سازی مدار کارخانه زغالشویی طبس ابتدا مدار دو بخش فلوتاسیون و سیکلون واسطه سنگین در محدوده ابعادی و دانسیته ای مختلف با بررسی سه نمونه زغال‌سنگ با ترکیب شیمیایی و فیزیکی متفاوت بررسی شد تا نقاط ضعف مدار فعلی مشخص گردد. سپس کارایی جدایش آنها در مقیاس آزمایشگاهی با دو روش ثقیلی (غرق و شناوری در محیط $ZnCl_2$) و فلوتاسیون بررسی شد و نتایج حاصله با مدار فراوری کارخانه مقایسه گردید. یکی از جنبه‌های متمایز این پژوهش بررسی نمونه‌های زغال‌سنگ با ساختار شیمی و فیزیکی متفاوت به منظور ارتقای کارایی جدایش و بهینه سازی مدار فراوری می باشد. یکی دیگر از جنبه‌های متمایز این پژوهش بررسی امکان حذف سولفور از ساختار زغال‌سنگ دانه متوسط با روش‌های ثقیلی می باشد که با توجه به ریز و پراکنده بودن گوگرد در زغال‌سنگ‌های منطقه طبس و ضرورت حذف سولفور از ساختار زغال‌سنگ و وجود جریمه‌های ناشی از وجود گوگرد این جنبه بررسی پژوهش نیز دارای اهمیت بالایی است.

۲-۵- تست‌های قابلیت زغالشویی سیکلون واسطه سنگین برای بررسی قابلیت جدایش زغالشویی، آزمایشهای غرق و شناورسازی برای به دست آوردن منحنی جدایش (ترومپ) انجام شد. برای این منظور، از خوراک، سرریز و ته ریز سیکلون به صورت مجزا، نمونه‌گیری شد. سپس از هر بخش، یک نمونه معرف پودر و خاکستر سنجی شد تا راندمان وزنی سیکلون مطابق رابطه ۱ تعیین گردد.

$$R_M = \frac{t-f}{t-c} \quad (1)$$

در رابطه (۱)، R_M راندمان وزنی و t ، c و f به ترتیب خاکستر باطله، محصول و خوراک را نشان می‌دهند.

در ادامه، به کمک مایعات سنگین، از بخش سرریز و ته ریز سیکلون، به صورت جداگانه در دانسیته‌های متفاوت، آزمایشهای غرق و شناورسازی انجام شد و نمونه‌های هر فراکسیون توزین شد. سپس منحنی ترومپ رسم گردید و از روی منحنی ترومپ، مقادیر d_{75} و d_{25} بدست آمد و خطای جدایش محاسبه گردید که خطای جدایش معادل نصف اختلاف این دو عدد می باشد. لازم به ذکر است که منظور از d_{75} مقدار دانسیته ای است که در آن ۷۵ درصد مواد به بخش ته ریز یا سرریز (بسته به منحنی جدایش رسم شده) منتقل شده است و d_{25} دانسیته ای است که در آن ۲۵ درصد مواد به سرریز یا ته ریز منتقل شده است [۲۰].

۲-۶- آنالیز خاکستر

برای تعیین محتوای خاکستر طبق یک روش روسی، حدود یک گرم نمونه زغال‌سنگ تا زیر ۷۲ مش پودر شد و داخل بوته چینی ریخته شد. سپس این نمونه به مدت ۱/۵ ساعت در داخل کوره با دما $850^\circ C$ قرار داده شد و بعد از اتمام این زمان، نمونه خارج و داخل دسیکاتور قرار داده شد تا سرد و سپس توزین شوند. میزان جامد باقیمانده درصد خاکستر را تعیین می‌کند.

۲-۷- آنالیز سولفور

برای اندازه گیری میزان سولفور نمونه زغال‌سنگ، مطابق استاندارد ASTM D-4239 [۲۲] مقدار حدود 0.2 گرم نمونه پودر شده زیر ۷۲ مش داخل دستگاه LECO-SC-144-DR با دما $1400 \pm 50^\circ C$ قرار داده شد. دستگاه با اندازه‌گیری میزان گاز SO_2 نشر شده، درصد سولفور نمونه را اندازه‌گیری می‌کند. این میزان محتوی گوگرد کلی نمونه را نشان می‌دهد.

شد و به آن زمان داده شد تا غرق و شناورسازی به صورت کامل انجام شود. سپس بخش شناور و غوطه‌ور به صورت مجزا جدا و توسط آب شستشو گردیدند. بخش غوطه‌ور بعد از جدا شدن مجدداً در سطل با دانسیته $1/4$ گرم بر متر مکعب ریخته شد. و بخش شناور جهت آنالیز خشک گردید. این کار تا دانسیته $1/8$ گرم بر متر مکعب تکرار گردید تا محصولات متفاوتی در محدوده‌های دانسیته مختلف حاصل شود. سپس نمونه‌های بدست آمده خشک، پودر و آنالیز خاکستر شدند. برای بعضی از نمونه‌ها که در ادامه به آن‌ها اشاره می‌شود، علاوه بر خاکستر سنجی، آنالیز گوگرد نیز انجام شد.

۲-۴- آزمایش فلوتاسیون

آزمایشهای فلوتاسیون در یک سلول آزمایشگاهی دو لیتری دنور مدل D12 انجام شد. در این آزمایش‌ها از گازوییل و MIBC به ترتیب به‌عنوان کلکتور و کف‌ساز استفاده گردید. برای انجام هر آزمایش، مقدار 165 g نمونه زغال‌سنگ همراه با 1860 ml آب را درون سلول ریخته تا پالپ با درصد جامد ۸ درصد ایجاد شود. سپس همزنی روشن و دور موتور آن روی 1200 دور بر دقیقه تنظیم گردید و اجازه داده شد پالپ به مدت سه دقیقه هم زده شود. پس از اتمام همزنی، گازوئیل اضافه شد و ۵ دقیقه زمان جهت آماده سازی با کلکتور داده شد، سپس کف‌ساز اضافه شد و ۵/۵ دقیقه زمان آماده سازی با کف ساز و نهایتاً ۳ دقیقه زمان کف‌گیری در نظر گرفته شد. بخش سرریز و ته‌ریز به صورت جداگانه خشک، خاکستر سنجی و آنالیز گوگرد شدند. لازم به ذکر است که در یک طرح پژوهشی [۲۱] تاثیر پارامترهای مختلف بر کارایی فرآیند فلوتاسیون بررسی شده بود و شرایط مناسب فلوتاسیون زغالسنگ به صورت جدول ۱ حاصل شده بود. در این پژوهش به علت بررسی کارایی جدایش ذرات دانه متوسط، آزمایش‌های فلوتاسیون بر اساس شرایط مناسب قبلی انجام شد و طراحی آزمایش و شرایط بهینه ارائه نشده است.

جدول ۱) شرایط انجام آزمایش‌های فلوتاسیون

درصد جامد	۸ %	دور همزنی	۱۲۰۰ rpm
مقدار جامد	۱۶۵ gr	حجم سلول	۲ L
مقدار آب	۱۸۶۰ ml	زمان کلی آزمایش	۱۱/۵ min
غلظت کلکتور	۲ kg/t	زمان همزنی پالپ	۳ min
غلظت کف‌ساز	۱۰۰ kg/t	زمان همزنی کلکتور	۵ min
مقدار کلکتور	۰/۱۶۵ g	زمان همزنی کف‌ساز	۰/۵ min
مقدار کف‌ساز	۰/۱۶۵ g	زمان کف‌گیری	۳ min

۳- نتایج و بحث

۳-۱- بررسی راندمان عملیاتی فلو تاسیون

محدوده ابعادی مواد زغالسنگ ورودی فلو تاسیون، صفر تا ۵۰۰ میکرون می باشد، ولی به علت عدم کارایی مناسب سرندها، پارگی توری ها و وجود ذرات تیغه ای، این محدوده معمولا تا حدود ۱ میلیمتر نیز می رسد (جدول ۲). در این بخش به منظور بررسی کارایی فلو تاسیون ستونی در مدار کارخانه زغالشویی، از بخش های خوراک، محصول شناور و باطله غیر شناور فلو تاسیون نمونه های معرف گرفته شد و آنالیز دانه بندی و خاکستر سنجی بر روی آنها انجام شد. در جدول ۲ تا جدول ۴، به ترتیب این آنالیزها ارائه شده است. مطابق جدول ۲، بررسی دانه بندی خوراک ورودی فلو تاسیون نشان می دهد که حدود ۲۰ الی ۳۰ درصد مواد ورودی در محدوده بالای ۳۰۰ میکرون است. مقایسه نتایج خاکستر سنجی نشان می دهد که محتوی خاکستر محدوده بالای ۳۰۰ میکرون در خوراک ورودی برای هر سه نمونه زغالسنگ پایینتر از محدوده زیر ۳۰۰ میکرون است. همچنین محتوی خاکستر ذرات ریزتر از ۷۵ میکرون به طرز قابل توجهی بالاتر از مقدار آن برای ذرات درشت تر است. نتایج حاکی از آن است که مواد غیر قابل احتراق، که عمدتا رسها را شامل می شود در بخش ریزدانه بیشتر است. بررسی آنالیز دانه بندی و خاکستر کنسانتره فلو تاسیون (جدول ۳) نشان می دهد که در محدوده ابعادی بالای ۳۰۰ میکرون، درصد خاکستر در تمامی معادن کمتر از ۹ درصد است، حتی برای نمونه معدن تخت زیتون، محتوای خاکستر به حدود ۵/۵ درصد رسید. ولی در فراکسیونهای ابعادی ریزتر، محتوای خاکستر افزایش می یابد. بررسی آنالیز دانه بندی باطله فلو تاسیون (جدول ۴) نیز نشان می دهد محتوی خاکستر ابعاد بالای ۳۰۰ میکرون در محدوده ۴۰ تا ۴۵٪ می باشد در حالی که در بخش های ریزتر از ۳۰۰

میکرون، بالاتر از ۵۰ درصد است. همچنین همانطور که مشاهده می شود در محدوده ابعادی ریزتر از ۷۵ میکرون، احتمالاً به دلیل دنباله روی ذرات باطله همراه حباب هوا، محتوی خاکستر این بخش در کنسانتره بالاتر از سایر فراکسیون ها است با اضافه کردن آب شستشو به بالای ستون فلو تاسیون می توان تا حدودی ذرات باطله که با دنباله روی منتقل شده اند را حذف نمود ولی اضافه کردن آب شستشو تا حدودی منجر به جدایش ذرات درشت موجود در منطقه کف از حباب می شود.

به منظور بررسی دقیق تر کارایی فلو تاسیون برای ابعاد ریز و درشت در یک بررسی جداگانه با تقسیم نمونه به دو فراکسیون زیر ۳۰۰ میکرون و بالای ۳۰۰ میکرون، کارایی فلو تاسیون براساس راندمان وزنی بدست آمد نتیجه این بررسی در جدول ۵ ارائه شده است. همانطور که مشاهده می گردد، به غیر از زغال سنگ معدن جو که راندمان وزنی فلو تاسیون بخش ۳۰۰+ بالاتر از ۳۰۰- است برای زغالسنگ های نگین و تخت زیتون این مقادیر بسیار کمتر است. پایین بودن راندمان وزنی ذرات درشت دانه (بالای ۳۰۰ میکرون) با وجودیکه خاکستر مواد ورودی این بخش پایین است می تواند علت های مختلفی مانند عدم رسیدن به درجه آزادی لازم، عدم کارایی فلو تاسیون، وجود ذرات خارج از محدوده فلو تاسیون و یا وجود ذرات تیغه ای و اکسیده باشد. به همین علت به منظور بررسی دقیق موضوع و ارائه تحلیل مناسب در ادامه آزمایش هایی در مقیاس آزمایشگاهی بوسیله دو روش غرق و شناوری (ثقلی) و فلو تاسیون آزمایشگاهی انجام گردید و نتایج آنها جهت دستیابی به تحلیل مناسب بررسی شدند. البته این نکته نیز حائز اهمیت است که رفتار شستشوی پذیری زغالسنگ برای تعیین محدوده ابعادی مناسب تا حدودی به ماهیت زغالسنگ بستگی دارد و زغالسنگ های مختلف می توانند پاسخدهی متفاوتی به یک فرآیند داشته باشند.

جدول ۲- آنالیز دانه بندی و خاکستر نمونه های زغال سنگ خوراک ورودی به فلو تاسیون ستونی

نمونه تخت زیتون		نمونه نگین		نمونه معدن جو		اندازه ذرات (μm)
خاکستر (درصد)	درصد وزنی	خاکستر (درصد)	درصد وزنی	خاکستر (درصد)	درصد وزنی	
۳۳/۸۷	۷/۳۹	۳۲/۵۴	۱۱/۷۰	۲۷/۳۰	۱۶/۹۶	+۵۰۰
۳۵/۶۸	۱۰/۳۷	۳۳/۶۱	۱۰/۳۰	۲۶/۳۷	۱۶/۴۷	۳۰۰-۵۰۰
۳۵/۷۴	۲۳/۹۶	۳۵/۲۴	۲۶/۰۰	۳۳/۸۰	۳۲/۷۵	۱۵۰-۳۰۰
۳۵/۴۸	۲۱/۴۸	۳۵/۳۰	۱۴/۲۰	۳۵/۳۰	۱۵/۶۹	۷۵-۱۵۰
۴۳/۶۱	۳۶/۸۱	۴۳/۵۳	۳۷/۸۰	۴۰/۳۵	۱۸/۱۳	-۷۵
۳۹/۵۸	۱۰۰	۳۷/۹۰	۱۰۰	۳۲/۹۰	۱۰۰	جمع

زغالسنگ پروده طبس

جدول ۳- آنالیز دانه‌بندی و خاکستر نمونه‌های کنسانتره فلوتاسیون ستونی

نمونه تخت زیتون		نمونه نگین		نمونه معدنچو		اندازه ذرات (µm)
خاکستر (درصد)	درصد وزنی	خاکستر (درصد)	درصد وزنی	خاکستر (درصد)	درصد وزنی	
۵/۴۹	۴/۱۱	۵/۵۶	۸/۳۳	۸/۲۶	۱۳/۳۳	+۵۰۰
۵/۹۹	۸/۱۲	۶/۲۱	۱۱/۹۵	۸/۰۱	۱۴/۴۳	۳۰۰-۵۰۰
۶/۷۵	۲۴/۸۳	۷/۶۲	۳۱/۴۶	۹/۲۴	۳۲/۸۴	۱۵۰-۳۰۰
۷/۶۴	۱۷/۸۳	۹/۱۳	۱۸/۵۱	۱۱/۱۷	۱۷/۰۱	۷۵-۱۵۰
۲۰/۱۴	۴۵/۱۱	۱۳/۸۰	۲۹/۷۵	۱۳/۷۳	۲۲/۳۹	-۷۵
۱۴/۰۹	۱۰۰	۸/۹۴	۱۰۰	۱۰/۲۷	۱۰۰	جمع

جدول ۴- آنالیز دانه‌بندی و خاکستر نمونه‌های باطله فلوتاسیون ستونی

نمونه تخت زیتون		نمونه نگین		نمونه معدنچو		اندازه ذرات (µm)
خاکستر (درصد)	درصد وزنی	خاکستر (درصد)	درصد وزنی	خاکستر (درصد)	درصد وزنی	
۴۱/۶۳	۱۰/۴۷	۴۰/۹۰	۱۵/۳۰	۴۰/۵۴	۱۲/۰۷	+۵۰۰
۴۴/۰۳	۹/۱۳	۳۷/۹۰	۱۱/۴۰	۴۵/۷۳	۹/۶۶	۳۰۰-۵۰۰
۴۷/۱۶	۱۸/۰۰	۴۶/۲۱	۲۱/۷۰	۵۳/۳۱	۱۹/۴۳	۱۵۰-۳۰۰
۴۸/۱۴	۱۴/۹۳	۵۲/۰۹	۱۳/۱۰	۵۸/۸۳	۱۱/۷۱	۷۵-۱۵۰
۵۱/۱۵	۴۷/۴۶	۶۱/۸۰	۳۸/۵۰	۵۶/۰۵	۴۷/۱۳	-۷۵
۴۸/۶۳	۱۰۰	۵۱/۲۲	۱۰۰	۵۲/۹۸	۱۰۰	جمع

جدول ۵- راندمان عملیاتی فلوتاسیون ذرات ریز و درشت زغالسنگ‌های معدنچو، نگین و تخت زیتون

راندمان وزنی تخت زیتون (درصد)	راندمان وزنی نگین (درصد)	راندمان وزنی معدنچو (درصد)	محدوده اندازه ذرات (میکرون)
۱۸/۲۱	۱۹/۵۲	۴۶/۱۰	+۳۰۰
۴۱/۷۲	۳۵/۸۲	۴۴/۴۱	-۳۰۰

جدایش ذرات از ۱/۳ تا $1/7 \text{ g/cm}^3$ تنظیم شده است و بخش های شناور شده و غرق شده در محدوده های مختلف به صورت جداگانه جمع آوری و محتوی خاکستر و گوگرد آنها اندازه گیری شده است. همچنین میزان راندمان وزنی و بازیابی قابل اشتعال هر فراکسیون نیز اندازه گیری شده است. در جدول ۹ نیز نتایج تست‌های فلوتاسیون آزمایشگاهی بخش +۳۰۰ میکرون خوراک فلوتاسیون زغال‌سنگ‌های معدنچو، نگین و تخت زیتون در شرایط بهینه آورده شده است. در شکل ۱ مجموع نتایج حاصل از این دو آزمایش به صورت نمودار ستونی جهت مقایسه ارائه شده است.

۳-۲- مقایسه عملکرد روش‌های ثقلی و فلوتاسیون در فرآوری ذرات دانه متوسط

برای بررسی علت پایین بودن کارایی فلوتاسیون ستونی در محدوده ابعادی بالای ۳۰۰ میکرون آزمایش‌های ثقلی (غرق و شناورسازی) و فلوتاسیون آزمایشگاهی بر روی این محدوده انجام گردید و نتایج بدست آمده از دو فرآیند ثقلی و فلوتاسیون با هم مقایسه شدند. در جدول ۶ تا جدول ۸ به ترتیب نتایج آزمایش‌های غرق و شناورسازی بخش +۳۰۰ میکرون خوراک فلوتاسیون ستونی زغال‌سنگ‌های معدنچو، نگین و تخت زیتون آورده شده است. همانطور که در جداول مشخص است دانسیته

جدول ۶- نتایج تست غرق و شناورسازی ذرات ۳۰۰+ میکرون خوراک فلوتاسیون زغال سنگ معدنچو

گوگرد تجمعی (درصد)	بازیابی بخش قابل احتراق (درصد)	راندمان وزنی تجمعی (درصد)	خاکستر تجمعی غوطه‌ور (درصد)	خاکستر تجمعی شناور (درصد)	دانسیته جدایش (g/cm ³)
۰/۴۹	۴۲/۳۰	۳۲/۲۷	۳۶/۳۱	۳/۱۶	۱/۳
۱/۰۲	۷۳/۷۹	۵۷/۹۸	۵۲/۷۱	۵/۹۷	۱/۴
۱/۱۸	۸۳/۴۵	۶۷/۰۹	۶۱/۳۱	۸/۱۱	۱/۵
۱/۲۳	۸۷/۵۴	۷۱/۵۰	۶۵/۹۲	۹/۵۵	۱/۶
۱/۲۵	۹۱/۶۳	۷۶/۶۸	۷۱/۳۰	۱۱/۷۲	۱/۷
۱/۱۲	-	-	-	۷۱/۳۰	غوطه‌ور ۱/۷
۱/۲۲	-	-	-	۲۵/۶۱	نمونه خوراک

جدول ۷- نتایج تست غرق و شناورسازی ذرات ۳۰۰+ میکرون خوراک فلوتاسیون زغال سنگ نگیں

گوگرد تجمعی (درصد)	بازیابی بخش قابل احتراق (درصد)	راندمان وزنی تجمعی (درصد)	خاکستر تجمعی غوطه‌ور (درصد)	خاکستر تجمعی شناور (درصد)	دانسیته جدایش (g/cm ³)
۱/۰۵	۵۴/۰۲	۴۰/۴۶	۴۴/۳۹	۳/۵۶	۱/۳
۱/۳۹	۷۲/۹۱	۵۵/۸۸	۵۵/۹۰	۵/۷۴	۱/۴
۱/۵۷	۸۲/۴۴	۶۴/۶۹	۶۴/۳۹	۷/۹۳	۱/۵
۱/۶۴	۸۶/۴۸	۶۸/۹۶	۶۸/۸۹	۹/۴۱	۱/۶
۱/۶۸	۹۰/۱۹	۷۳/۵۵	۷۳/۶۲	۱۱/۴۲	۱/۷
۱/۴۵	-	-	-	۷۳/۶۲	غوطه‌ور ۱/۷
۱/۶۲	-	-	-	۲۷/۸۷	نمونه خوراک

جدول ۸- نتایج تست غرق و شناورسازی ذرات ۳۰۰+ میکرون خوراک فلوتاسیون زغال سنگ تخت زیتون

گوگرد تجمعی (درصد)	بازیابی بخش قابل احتراق (درصد)	راندمان وزنی تجمعی (درصد)	خاکستر تجمعی غوطه‌ور (درصد)	خاکستر تجمعی شناور (درصد)	دانسیته جدایش (g/cm ³)
۱/۴۲	۵۰/۹۲	۳۷/۰۰	۴۴/۳۷	۳/۰۴	۱/۳
۱/۹۵	۷۹/۲۱	۵۸/۹۱	۶۳/۲۳	۵/۲۶	۱/۴
۲/۰۸	۸۶/۴۷	۶۵/۳۴	۷۱/۱۷	۶/۷۵	۱/۵
۲/۱۲	۸۹/۱۳	۶۸/۰۳	۷۴/۶۱	۷/۶۸	۱/۶
۲/۱۳	۹۱/۸۰	۷۱/۳۷	۷۸/۲۲	۹/۳۶	۱/۷
۲/۶۰	-	-	-	۷۸/۲۲	غوطه‌ور ۱/۷
۲/۲۷	-	-	-	۲۹/۰۸	نمونه خوراک

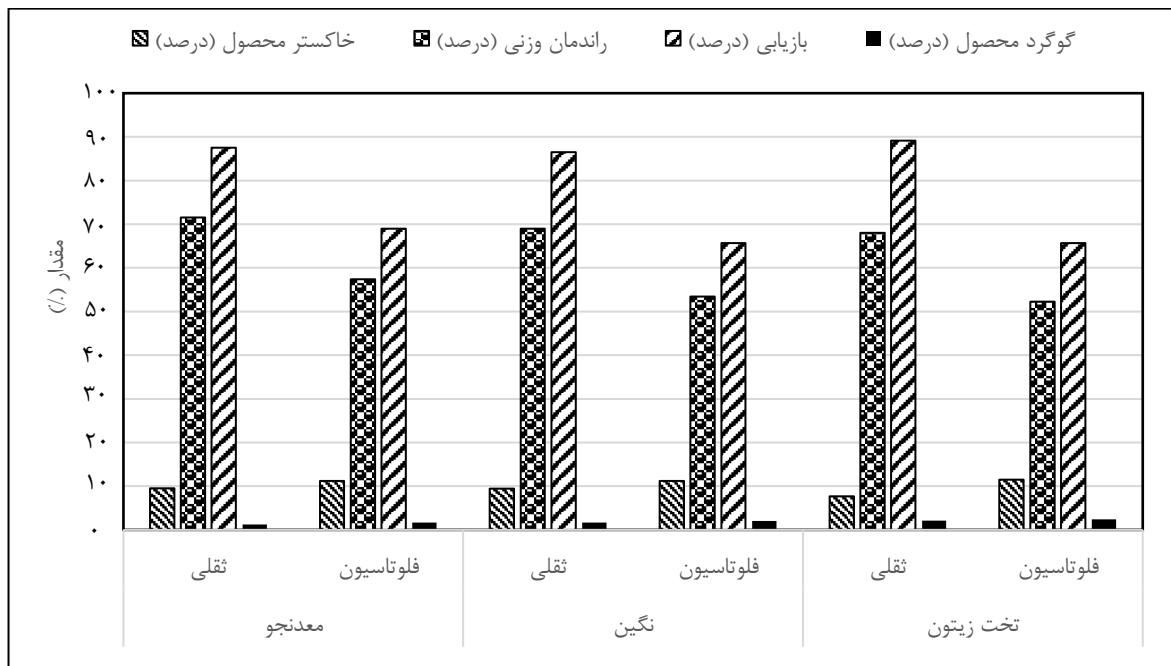
جدول ۹- نتایج تست‌های فلوتاسیون بخش ۳۰۰+ میکرون خوراک فلوتاسیون زغال سنگ‌های معدنچو، نگیں و تخت زیتون

نوع زغال سنگ	نوع محصول	خاکستر (درصد)	وزن (گرم)	گوگرد (درصد)	راندمان وزنی (درصد)	بازیابی قابل احتراق (درصد)
معدنچو	خوراک	۲۶/۱۲	۱۶۵	۱/۴۹	۵۷/۳۶	۶۸/۹۵
	کنسانتره	۱۱/۱۸	۹۴/۶	۱/۶۶		
	باطله	۴۶/۲۱	۷۰/۴	۱/۲۶		
نگیں	خوراک	۲۷/۷۶	۱۶۵	۱/۵۹	۵۳/۴۵	۶۵/۶۹
	کنسانتره	۱۱/۲۳	۸۸/۲	۲/۰۵		
	باطله	۴۶/۷۴	۷۶/۸	۱/۰۶		
تخت زیتون	خوراک	۲۹/۵۴	۱۶۵	۲/۵۸	۵۲/۲۴	۶۵/۶۴
	کنسانتره	۱۱/۴۷	۲/۸۶	۲/۴۰		
	باطله	۴۹/۳۱	۷۸/۸	۲/۷۸		

زغال‌سنگ پروده طبس

در خصوص گوگرد موجود در ساختار زغال‌سنگ لازم به ذکر است که عمده گوگرد موجود در ساختار این زغال‌سنگ‌ها از دو نوع آلی و پیریتی می‌باشد که حذف گوگرد آلی به دلیل وجود پیوند کوالانسی بین اتم‌های کربن و سولفور با روش‌های معمول امکانپذیر نمی‌باشد. ولی گوگرد پیریتی در ساختار زغال‌سنگ به صورت آزاد می‌باشد و هیچگونه پیوندی با کربنها ندارد، همچنین به خاطر اختلاف دانسیته بالایی که پیریت با زغال‌سنگ دارد بخشی از آن به روش ثقیلی حذف می‌شود (دانسیته پیریت ۵/۰۲ و دانسیته زغال‌سنگ حدود ۱/۳ است) [۲۳، ۲۴]. در حالی که در روش فلوتاسیون باتوجه به خاصیت آبرانی طبیعی پیریت (مشابه زغال‌سنگ)، معمولاً همراه زغال‌سنگ شناور می‌شود و تحقیقات انجام شده در خصوص حذف پیریت بوسیله فلوتاسیون موفقیت‌چندانی نداشته‌اند. بخش عمده تحقیقات انجام‌شده در زمینه حذف پیریت از زغال معطوف به استفاده از مواد شیمیایی مختلف جهت بازداشت پیریت است. ولی تحقیقات نشان داده است که استفاده از این بازدارنده‌ها نیز برای حذف پیریت زغالی کارایی مناسبی نداشته‌اند. دلیل اصلی این امر تفاوت‌های موجود بین پیریت زغالی با پیریت معدنی می‌باشد، گرچه این دو نوع پیریت ساختار کریستالی و شیمیایی یکسانی دارند اما رفتارهای فرآیندی متفاوتی بهم دارند [۲۵].

در شکل ۱ نتایج بهینه حاصل از دو روش ثقیلی و فلوتاسیون ارائه شده است. همانطور که مشاهده می‌گردد، در روش ثقیلی با دانسیته جدایش $1/6 \text{ g/cm}^3$ مقادیر راندمان وزنی، بازیابی مواد قابل احتراق، محتوی خاکستر و گوگرد محصول برای زغال‌سنگ معدنچو به ترتیب ۷۱/۵۰، ۸۷/۵۴، ۹/۵۵ و ۱/۲۳٪ بوده است. در حالی که این مقادیر در روش فلوتاسیون به ترتیب ۵۷/۳۶، ۶۸/۹۵، ۱۱/۱۸ و ۱/۶۶٪ بوده است. همانطور که مشاهده می‌شود در روش ثقیلی محتوی خاکستر و گوگرد محصول تولیدی پایینتر از فلوتاسیون بوده است. میزان کاهش گوگرد دو معدن معدنچو و نگین ۰/۵٪ و برای تخت زیتون ۰/۳٪ بوده است، که عدد قابل توجهی است. همچنین راندمان وزنی در روش فلوتاسیون برای هر سه معدن در محدوده ۵۲٪ الی ۵۷٪ بوده است که با روش ثقیلی این میزان به حدود ۶۸٪ الی ۷۲٪ رسیده است که نشان می‌دهد افزایش راندمان برای زغال معدنچو ۱/۱۴٪ و برای نگین ۱۵/۵٪ و برای تخت زیتون ۱۵/۸٪ بوده است. این بررسی نشان داد علاوه بر دو معدن نگین و تخت زیتون که راندمان عملیاتی پایینتری در فلوتاسیون ستونی برای ذرات بالای ۰/۳ میلی‌متر داشتند، بوسیله روش ثقیلی امکان افزایش راندمان زغال معدنچو که راندمان عملیاتی بالاتری داشت نیز وجود دارد. همچنین مشخص شد که روش‌های ثقیلی کارایی بسیار بالاتری در فرآوری ذرات دانه متوسط را دارند که علاوه بر قابلیت ارائه محصول با محتوی خاکستر و گوگرد پایین تر میزان راندمان آن نیز به مراتب بالاتر است.



شکل ۱ نتایج مقایسه‌ای تست‌های ثقیلی در دانسیته جدایش $1/6 \text{ g/cm}^3$ و فلوتاسیون بخش ۳۰۰+ میکرون خوراک فلوتاسیون

۳-۳- بررسی کارآیی سیکلون واسطه سنگین

در این بخش کارآیی مواد ورودی به سیکلون واسطه سنگین کارخانه زغالشویی بررسی شد. محدوده ابعادی مواد ورودی سیکلون واسطه سنگین بین ۰/۵ تا ۲۲/۵ میلیمتر است ولی گاهی مواد ریزتر از ۰/۵ میلیمتر به علت کارآیی نامناسب سرند یا خردایش در مسیر انتقال (لوله و پمپ ورودی سیکلون) در ورودی سیکلون مشاهده می‌شود (جدول ۱۰). برای بررسی کارایی سیکلون واسطه سنگین در محدوده ابعادی مختلف سه پارامتر منحنی جدایش یا ترامپ (Tromp)، خطای جدایش و نقطه برش سیکلون بررسی شد. این موارد با استفاده از نمونه‌های خوراک ورودی، سرریز و ته‌ریز سیکلون واسطه سنگین کارخانه در شرایط ایده‌آل مطابق شرح آزمایش بخش (۵-۲-) محاسبه و نمودارهای مربوطه رسم شدند. منحنی جدایش یا ترامپ برای بررسی دقت جدایش یا پیش بینی عملکرد تجهیزات شستشو استفاده می‌شود [۲۶]. این منحنی به صورت رابطه بین بخشی از مواد خوراک که ته نشین شده و دانسیته جدایش اسمی مواد رسم می‌شود. در شکل ۲ تا شکل ۴ به ترتیب منحنی جدایش سیکلون واسطه سنگین را برای زغالسنگ‌های معدنچو، نگین و تخت زیتون در محدوده‌های ابعادی مختلف نشان می‌دهد. در منحنی جدایش هر چه شیب بخش میانی نمودار تند باشد جدایش مواد به حالت ایده آل نزدیک تر است [۲۶]. نتایج نشان دادند شیب منحنی جدایش برای ذرات با محدوده ۰/۵ تا ۱ و ۱ تا ۱/۴ میلیمتر پایین است و نسبت به محدوده‌های بالاتر شیب کمتری دارند درحالی که هر چه ذرات درشت‌تر شده اند شیب منحنی ها نیز تندتر شده است این الگو تقریباً در هر سه نمونه زغال سنگ تکرار شده است. بنابراین این نمودارها نشان می‌دهند که سیکلون واسطه سنگین ذرات درشت‌تر را نسبت به ذرات ریزتر بهتر فرآوری می‌کند.

در شکل ۵ خطای جدایش سیکلون واسطه سنگین برای هر سه نمونه زغالسنگ در محدوده ابعادی مختلف آورده شده است. خطای جدایش یکی از پارامترهای مهم دیگر است که نشان دهنده میزان کارایی دستگاه های شستشو است و با نماد E_p نشان داده می‌شود. خطای جدایش میزان انحراف از معیار منحنی جدایش را نشان می‌دهد و از میانگین اختلاف d_{75} از d_{25} بدست می‌آید [۲۶، ۲۰]. همانطور که مشاهده می‌گردد، خطای جدایش در محدوده ابعادی ریز دانه بالا است. به‌عنوان مثال برای زغال سنگ معدنچو برای محدوده‌های ۰/۵-۱ و ۱-۱/۴ به ترتیب ۰/۱۲۸ و ۰/۰۵۶ می‌باشد و برای محدوده‌های ۱/۴-۲، ۲-۴/۷۵، ۰/۳۱ و ۰/۰۳۷، ۰/۰۴۷، ۰/۰۴۷ و ۰/۰۳۱+۱۲ به ترتیب ۱۲/۴-۷/۷۵

است این موضوع نشان می‌دهد که خطای جدایش دستگاه در محدوده‌های ابعادی ریزتر (۰/۵-۱ و ۱-۱/۴) بیشتر است. همچنین همانگونه که در شکل ۵ مشاهده می‌شود برای دو معدن نگین و تخت زیتون علاوه بر محدوده های ۰/۵ تا ۱ و ۱ تا ۱/۴ برای محدوده ۱/۴-۲ نیز خطای جدایش بالا است و به ترتیب برای معدن نگین و تخت زیتون ۰/۰۹۱ و ۰/۰۷۱ است. این نتایج نشان داد که خطای جدایش سیکلون واسطه سنگین برای محدوده دانه بندی ریزتر از ۲ میلیمتر بالاتر از سایر محدوده های درشت تر است.

علاوه بر منحنی ترامپ و خطای جدایش یک پارامتر مهم دیگر برای بررسی عملکرد جدایش ذرات داخل سیکلون نقطه برش است [۲۶، ۲۰]. نقطه برش برای هر محدوده ابعادی یک نقطه بهینه است که در آن نقطه بیشترین جدایش بین زغال و باطله همراه آن انجام می‌شود [۲۶]. در شکل ۶ نقطه برش ذرات با اندازه‌های مختلف در سیکلون واسطه سنگین آورده شده است. مشاهده می‌شود با تغییر اندازه ذرات نقطه برش تغییر می‌کند و این نشان دهنده این است که هر محدوده ابعادی دارای یک نقطه برش خاصی است و در صورتی که هدف دستیابی به حداکثر بازیابی باشد بایستی هر محدوده را به صورت جدا گانه و در نقطه برش خاص آن فرآوری کرد. در عمل این امر میسر نمی‌باشد و نمیتوان در کارخانه هر محدوده را جداگانه فرآوری کرد بخاطر اینکه با تعداد زیادی از تجهیزات روبرو خواهیم بود. با این حال همانگونه که مشاهده می‌شود تعدادی از محدوده های ابعادی نقطه های برش مشابهی دارند. به‌عنوان مثال برای زغال سنگ معدنچو برای محدوده ۰/۵-۱ میلیمتر نقطه برش $1/68 \text{g/cm}^3$ برای محدوده ۱-۲ میلیمتر $1/58 \text{g/cm}^3$ ، برای محدوده ۲-۴/۷۵ میلیمتر $1/57 \text{g/cm}^3$ ، برای محدوده ۴/۷۵-۱۲/۷ میلیمتر $1/53 \text{g/cm}^3$ و برای محدوده بالای ۱۲/۷ این مقدار $1/51 \text{g/cm}^3$ می‌باشد همانگونه که مشاهده می‌شود برای زغالسنگ معدنچو نقطه برش محدوده ۰/۵-۱ با سایر محدوده ها تفاوت فاحشی دارد ولی نقطه برش سایر محدوده ها اختلاف کمی با هم دارند. در شکل ۶ نقطه برش محدوده ابعادی دو نمونه زغالسنگ دیگر نیز آورده شده است. برای زغالسنگ تخت زیتون نقطه برش محدوده ۰/۵-۱ و ۱-۱/۴ برابر $1/46 \text{g/cm}^3$ و محدوده ۱/۴-۲ برابر $1/43 \text{g/cm}^3$ و بالاتر از سایر محدوده ها می‌باشد. همچنین برای زغالسنگ نگین محدوده ۰/۵-۱ نقطه برش ۱/۶ و بالاتر از سایر محدوده ها است. بنابراین به نظر می‌رسد، دانسیته جدایش ذرات ریز و درشت با همدیگر متفاوت است. لذا در صورت فرآوری جداگانه ذرات ریز بازیابی آنها بالا خواهد بود. با بررسی انجام

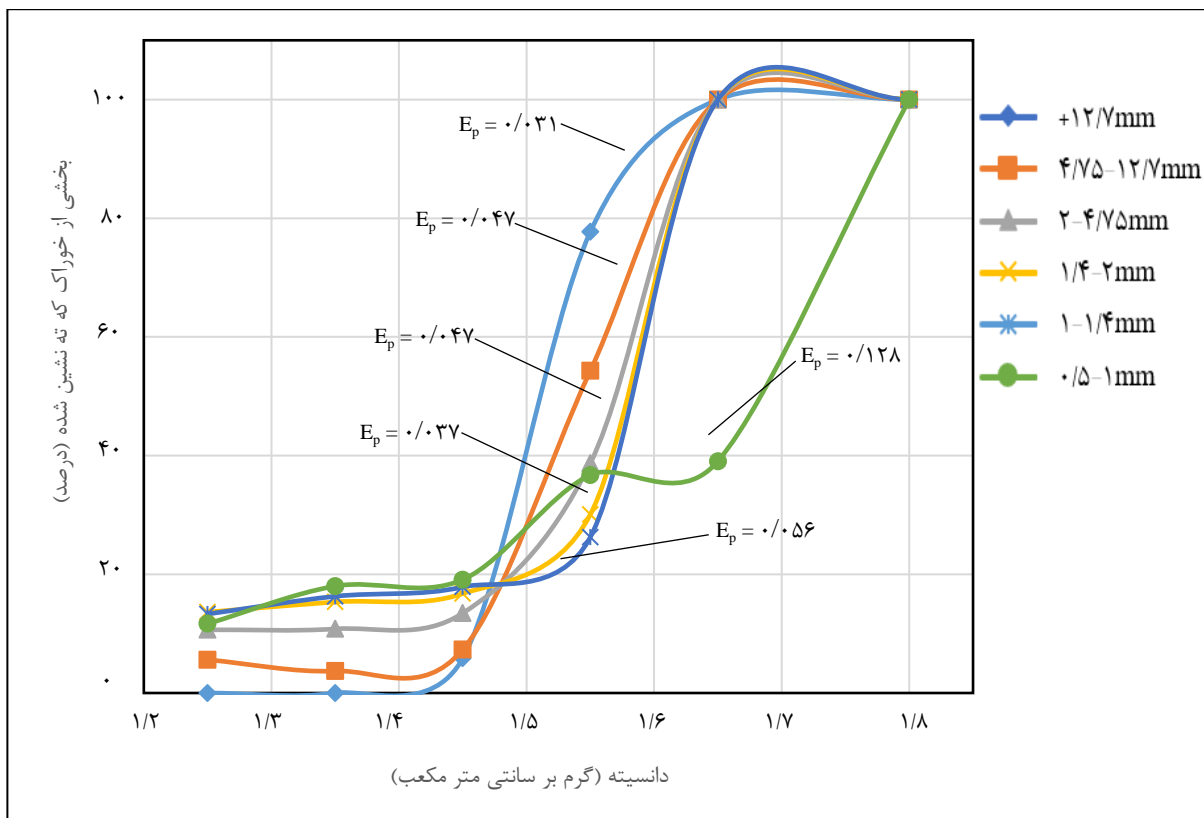
زغال‌سنگ پروده طبس

به نظر می‌رسد در صورت فرآوری ثقیلی این ذرات به صورت جداگانه با یکی از تجهیزات مخصوص فرآوری ذرات دانه متوسط مانند اسپیرال یا TBS بازیابی این ذرات نیز در محدوده بهینه قرار گیرد.

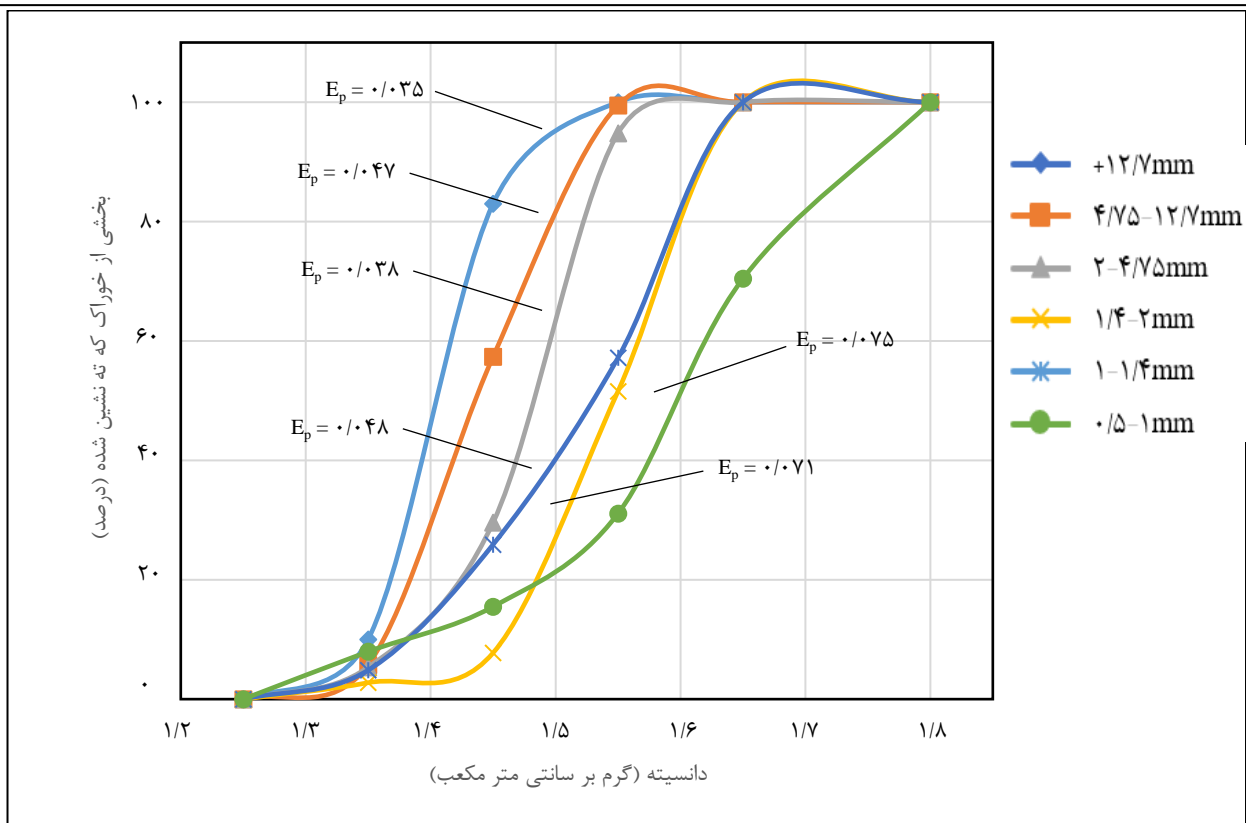
شده در این تحقیق (منحنی ترومپ، خطای جدایش و نقطه برش) مشخص شد برای معدن تخت زیتون ذرات با محدوده زیر ۲ میلی‌متر و برای معدن معدنچو و نگین ذرات با محدوده زیر ۱/۴ میلی‌متر رفتاری متفاوت با سایر محدوده ها دارند. بنابراین

جدول ۱۰) آنالیز دانه‌بندی و خاکستر نمونه‌های زغال‌سنگ ورودی به سیکلون واسطه سنگین

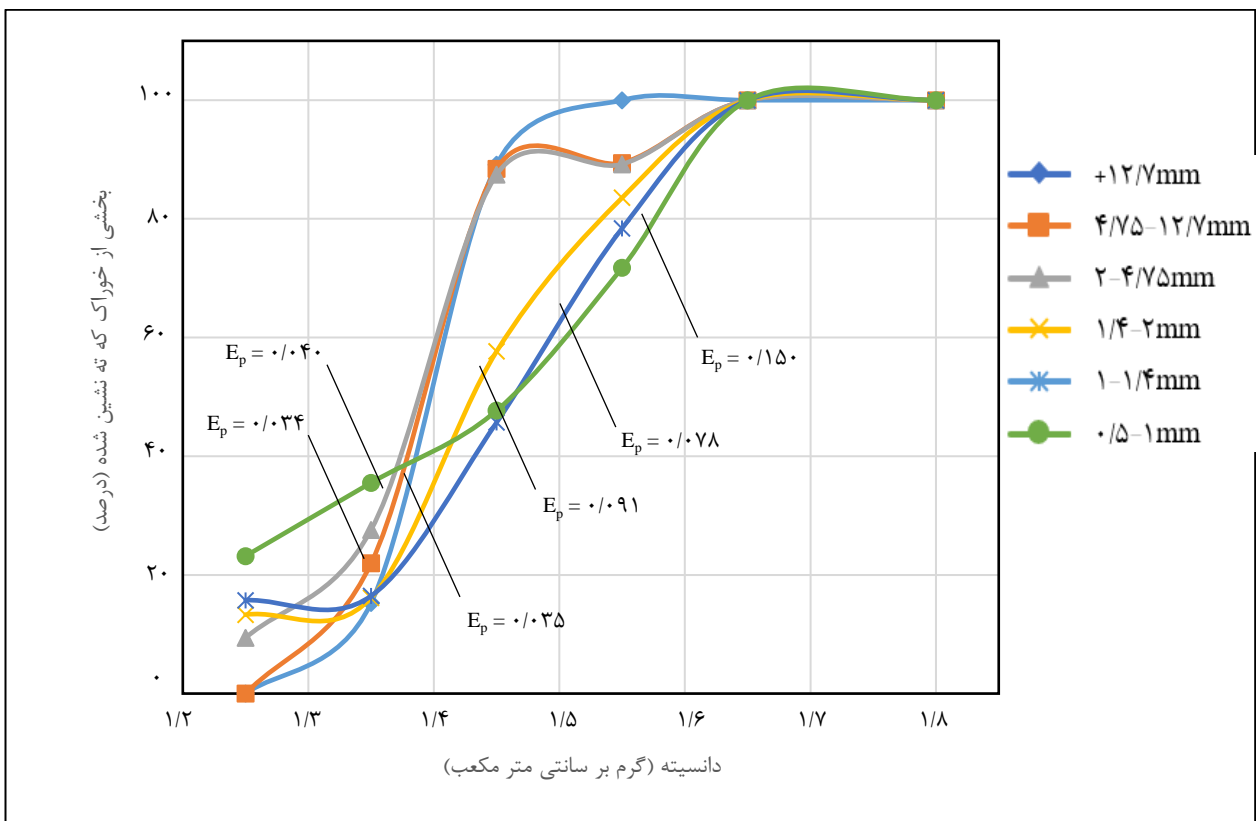
تخت زیتون		نگین		معدنچو		اندازه ذرات (mm)
خاکستر (درصد)	درصد وزنی	خاکستر (درصد)	درصد وزنی	خاکستر (درصد)	درصد وزنی	
۵۲/۲۸	۲۱/۵۰	۵۳/۸۹	۳۰/۸۳	۴۹/۰۳	۲۳/۶۷	+۱۲/۷
۵۶/۰۲	۲۵/۰۰	۴۳/۶۱	۲۴/۲۰	۳۴/۹۴	۲۶/۰۳	۴/۷۵-۱۲/۷
۵۳/۴۰	۱۹/۵۱	۳۹/۳۲	۲۰/۱۸	۳۲/۱۷	۲۰/۸۴	۲-۴/۷۵
۴۷/۵۴	۸/۳۲	۳۳/۴۵	۱۱/۲۶	۲۸/۲۲	۵/۴۵	۱/۴-۲
۴۴/۹۲	۵/۷۵	۳۴/۱۷	۱۱/۱۹	۲۷/۵۵	۵/۹۹	۱-۱/۴
۴۵/۶۸	۱۲/۹۴	۳۳/۵۲	۱/۳۷	۲۸/۰۲	۱۲/۴۴	۰/۵-۱
۴۳/۴۸	۶/۹۹	۳۲/۹۲	۰/۹۷	۲۷/۰۱	۵/۵۸	-۰/۵
۴۷/۴۰	۱۰۰	۴۳/۴۷	۱۰۰	۳۵/۵۹	۱۰۰	جمع



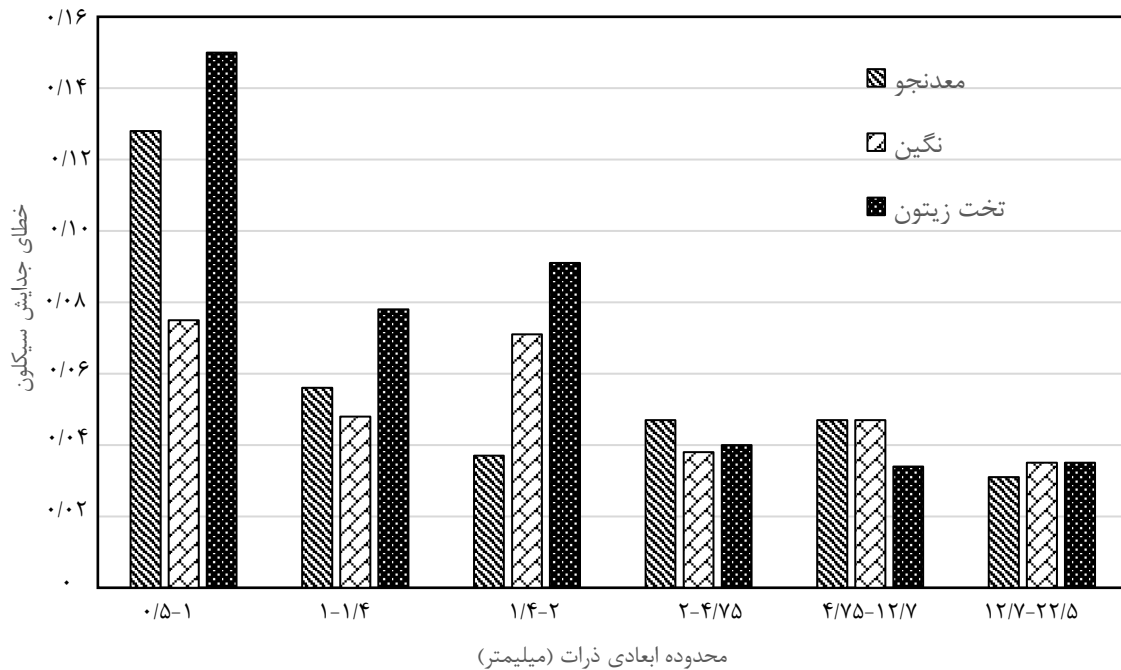
شکل ۲) منحنی جدایش سیکلون واسطه سنگین برای زغال‌سنگ معدنچو



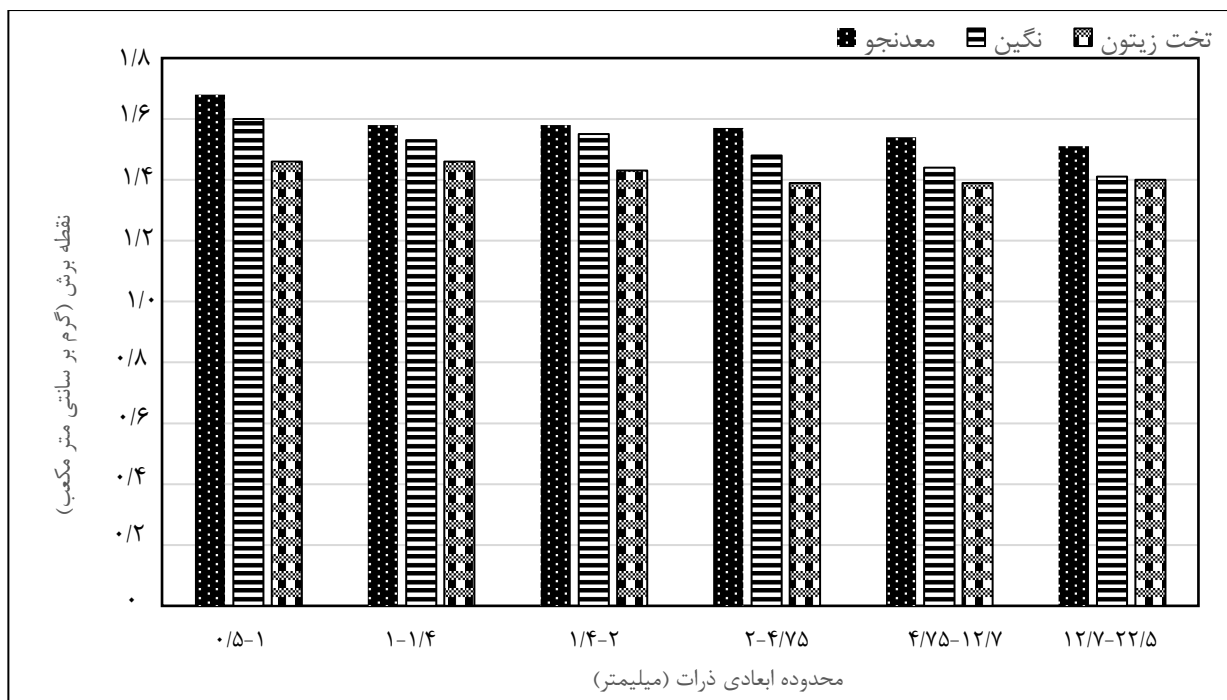
شکل ۳) منحنی جدایش سیکلون واسطه سنگین برای زغال سنگ نگین



شکل ۴) منحنی جدایش سیکلون واسطه سنگین برای زغال سنگ تخت زیتون



شکل ۵ خطای جدایش سیکلون واسطه سنگین برای زغالسنگ معدنچو، نگین و تخت زیتون در اندازه ذرات مختلف.



شکل ۶ نقطه برش ذرات مختلف در سیکلون واسطه سنگین برای زغالسنگ های معدنچو، نگین و تخت زیتون.

دانه بندی صفر تا ۰/۵ میلیمتر) و سیکلون واسطه سنگین (برای محدوده ۰/۵ تا ۲۲/۵ میلیمتر) تشکیل شده است. در این بررسی، نتایج عمده زیر بدست آمد:

- نتایج نشان داد فلوتاسیون کارایی جدایش مناسبی در محدوده ابعادی بالاتر از ۰/۳ میلیمتر را ندارد اما روش ثقیلی کارایی بالاتری دارد به طوری که محتوای گوگرد

۴- نتیجه گیری

این تحقیق به منظور بهینه سازی مدار فرآوری کارخانه زغالشویی زغالسنگ پروده طبس و مقایسه عملکرد روشهای ثقیلی و فلوتاسیون برای فرآوری ذرات دانه متوسط انجام شد. مدار فرآوری این کارخانه از دو بخش فلوتاسیون (برای محدوده

منابع

1. Laskowski, J., *Coal flotation and fine coal utilization*. 2001: Elsevier.
2. Drummond, R., Nicol, S. and A. Swanson, *Teetered bed separators-the Australian experience*. Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy, 2002. **102(7)**: p. 385-391.
3. Shokri, B.J. and M.Z. Naghadehi, *A case study of the modification potential of using spiral separators in the circuit of the Alborz-Sharghi coal processing plant (Iran)*. International Journal of Oil, Gas and Coal Technology, 2018. **18(1-2)**: p. 85-105.
4. VAN HINSBERG, V.J., *Wills' mineral processing technology: an introduction to the practical aspects of ore treatment and mineral recovery*. (2008) 2008, Mineralogical Society of America.
5. Cai, Y., et al., *Flotation characteristics of oxidized coal slimes within low-rank metamorphic*. Powder Technology, 2018. **340**: p. 34-38.
6. Sarikaya, M. and G. Özbayoğlu, *Flotation characteristics of oxidized coal*. Fuel, 1995. **74(2)**: p. 291-294.
7. Nayak, A., M. Jena, and N. Mandre, *Application of enhanced gravity separators for fine particle processing: An overview*. Journal of Sustainable Metallurgy, 2021. **7**: p. 315-339.
8. Napier-Munn, T., *The dense medium cyclone—past, present and future*. Minerals Engineering, 2018. **116**: p. 107-113.
9. Chu, K., et al., *Modelling the multiphase flow in dense medium cyclones*. The Journal of Computational Multiphase Flows, 2010. **2(4)**: p. 249-272.
10. Glass, H., N. Minekus, and W. Dalmijn, *Mechanics of coal spirals*. Minerals engineering, 1999. **12(3)**: p. 271-280.
11. Zhang, L., W. Liu, and Y. Zhang, *Calculation of teeter bed height of teetered*

و خاکستر محصول کمتر و راندمان وزنی بالاتری نسبت به روش فلوتاسیون دارد.

- بررسی منحنی جدایش، خطای جدایش و نقطه برش ذرات بالای ۰/۵ میلیمتر در سیکلون واسطه سنگین نیز نشان داد که این تجهیز کارایی مناسبی جهت فرآوری ذرات با محدوده ریزتر از ۱/۴ میلیمتر (برای معدن تخت زیتون زیر ۲ میلیمتر) را ندارد و خطای جدایش بالاتری نسبت به محدوده‌های ابعادی درشت تر دارد.

- نتایج این تحقیق نشان داد که سیستم زغالشویی فعلی کارخانه، کارایی مناسبی برای فرآوری ذرات با محدوده ابعادی ۰/۳ تا ۱/۴ میلیمتر ندارد و با توجه به عملکرد مناسبتر روش ثقلی در فرآوری این محدوده ابعادی، به نظر می‌رسد در صورت فرآوری ثقلی این ذرات به‌صورت جداگانه با یکی از تجهیزات مخصوص ذرات دانه‌متوسط مانند اسپیرال یا TBS بازیابی آنها در محدوده مناسبتری قرار می‌گیرد؛ بنابراین پیشنهاد می‌شود با ایجاد تغییراتی در مدار فعلی کارخانه، محدوده ۰/۳ تا ۱/۴ میلیمتر به‌صورت جداگانه و به‌وسیله اسپیرال یا TBS و یا به‌صورت ترکیبی از این دو روش فرآوری شود. به طوری که مواد ورودی بعد از خردایش و دانه‌بندی به محدوده زیر و بالای ۱/۴ میلیمتر تقسیم می‌شوند و محدوده بالای ۱/۴ میلیمتر توسط سیکلون واسطه سنگین و محدوده زیر ۱/۴ میلیمتر ابتدا توسط هیدروسیکلون به زیر و بالای ۰/۳ میلیمتر تقسیم شود. محدوده زیر ۰/۳ میلیمتر به فلوتاسیون ستونی و محدوده ۰/۳ تا ۱/۴ میلیمتر نیز جهت جدایش ثقلی به روش اسپیرال یا TBS منتقل شود.

تشکر و قدردانی:

نویسندگان بر خود لازم می‌دانند از حمایت و همکاری مدیریت و پرسنل محترم شرکت فرآوری زغالسنگ پروده طبس بویژه آقایان مهندس ناصر هاشمی و مهندس حسین عابدین پور که نهایت همکاری را در زمینه انجام این تحقیق داشته‌اند تشکر و قدردانی نمایند.

18. Feng, L., et al., *Study on key factors affecting separation performance of aerated fluidized bed*. International Journal of Coal Preparation and Utilization, 2019. *bed separator based on jet theory*. Powder Technology, 2016. **295**: p. 225-233.
19. Zhang, X., Y. Tao, and F. Ma, *Study on deashing and desulphurization of coal with heavy medium in enhanced gravity field*. International Journal of Coal Preparation and Utilization, 2023. **43**(3): p. 502-519.
20. Rao, D.S., *Minerals and coal process calculations*. 2016: CRC Press.
21. طرح پژوهشی "بررسی راهکارهای عملیاتی افزایش راندمان و ظرفیت در کارخانه فرآوری زغالسنگ پروده طبس"، کارفرما: شرکت فرآوری زغالسنگ پروده طبس؛ مجری: دانشگاه صنعتی اصفهان (دکتر علی احمدی).. ۱۳۹۸.
22. ASTM D-4239, in *Test Method for Sulfur in the Analysis Sample of Coal and Coke Using High-Temperature Tube Furnace Combustion*.
23. Rossi, G., *The microbial desulfurization of coal*. Geobiotechnology II, 2013: p. 147-167.
24. Chou, C.-L., *Sulfur in coals: A review of geochemistry and origins*. International journal of coal geology, 2012. **100**: p. 1-13.
25. Briceno, A. and S. Chander, *An electrochemical characterization of pyrites from coal and ore sources*. International Journal of Mineral Processing, 1988. **24**(1-2): p. 73-80.
26. Rao, D.S. and T. Gouricharan, *Coal processing and utilization*. 2016: CRC Press/Taylor & Francis Group.
12. Bu, X., et al., *Preliminary study on foreign slime for the gravity separation of coarse coal particles in a teeter bed separator*. International Journal of Mineral Processing, 2017. **160**: p. 76-80.
13. Honaker, R., et al., *Ultrafine coal cleaning using spiral concentrators*. Minerals Engineering, 2007. **20**(14): p. 1315-1319.
14. Hacifazlioglu, H., *Application of the modified water-only cyclone for cleaning fine coals in a Turkish washery, and comparison of its performance results with those of spiral and flotation*. Fuel Processing Technology, 2012. **102**: p. 11-17.
15. Ma, G., et al., *Comparative study of separation performance of a spiral and dense-medium cyclone on cleaning coal*. International Journal of Coal Preparation and Utilization, 2021. **41**(2): p. 108-116.
16. Çerik, Ç. and V. Arslan, *The modelling of fine coal beneficiation with a water-only cyclone*. Gospodarka Surowcami Mineralnymi, 2022. **38**.
17. Bahrami, A. and E. Gülcan, *Investigating the high ash lignite processing with teetered bed separator*. International Journal of Coal Preparation and Utilization, 2019. **39**(4): p. 169-182.

Investigating the efficiency of gravity and flotation methods in the processing of medium-grain and high-sulfur coals of Parvadeh Coal Processing Plant in Tabas

Shahin Ashoori, Ali ahmadi*, Ahmad Doodkanlou milan

Department of Mining Engineering, Isfahan Technology of University, Esfahan, Iran

ABSTRACT

In this research, the separation efficiency of flotation and heavy medium cyclone (HMC) was carried out on three different coal samples at Tabas coal washing plant. The performance of the flotation showed that the washing efficiency of particles with the size range of 0.3 to 0.5mm is much lower than the particles smaller than 0.3mm. The results of laboratory studies showed that the washing efficiency of the particles with the size range of 0.3 to 0.5mm for all three coals in the gravity method (sinking and floating) is much higher than flotation. Also, performance of the HMC section showed that the separation error and cut-point for particles smaller than 1.4mm is higher than the larger particles (1.4 to 22.5 mm) and their processing in the existing criteria is not efficient. Finally, the results showed that in order to increase the washing efficiency of medium grain particles with the size range of 0.3 to 1.4mm, it is necessary to use another gravity system such as TBS, spiral or similar equipments.

ARTICLE INFO

Article history:

Received: February 11, 2023

Received in revised form: June 2, 2023

Accepted: July 10, 2023

Key words:

Coal;

Flotation;

Heavy media cyclone;

Medium grain size;

Sulfur.

All right reserved.

* Corresponding author
a.ahmadi@iut.ac.ir