

توسعه اندیسی قابلیت شستشوپذیری زغال - مطالعه موردی بر روی باطله‌های کارخانه زغالشویی البرز شرقی

محمود عبدالمهدی^۱؛ مجید ذوالقدری^۲

۱- دانشگاه تربیت مدرس Minmabd@modares.ac.ir

۲- جهاد دانشگاهی واحد تربیت مدرس، Majidzol2004@yahoo.com

(دریافت ۲۸ آبان ۱۳۸۵، پذیرش ۴ اردیبهشت ۱۳۸۶)

چکیده

برای ارزیابی جدایش ثقلی معمولاً از دو شاخص که به صورت عدد بیان می‌شوند بهره گرفته می‌شود. یکی از آنها مبین درجه آزادی ذرات در بار اولیه است و دیگری دقت جدایش مورد نیاز دستگاه شستشوی ثقلی را مشخص می‌کند. در تحقیق حاضر، به نقد و بررسی دو شاخص اصلی که برای مشخص نمودن درجه آزادی ذرات در بار اولیه بکار می‌رود پرداخته شده است. با مطالعه موردی که بر روی باطله‌های کارخانه زغالشویی البرز شرقی انجام شد، مشخص گردید که اساساً شاخص‌هایی که به صورت یک عدد بیان می‌شوند نمی‌تواند معیار مناسبی باشد. لذا سعی شد ضمن ارتقاء شاخص‌های قبلی، روشی برای خصوصیت‌سنجی دقیق بار اولیه ارائه شود. بررسی‌ها نشان داد که جهت به دست آوردن محصولی قابل عرضه به صنعت فولاد، ابتدا باید یک مرحله شستشوی ثقلی با چگالی جدایش حدود ۱/۷۵ گرم بر سانتی‌متر مکعب بر روی مواد باطله انجام شود و سپس با کاهش ابعاد کنسانتره به دست آمده تا زیر ۲ میلی-متر و شستشوی مجدد، کنسانتره نهایی حاصل گردد. در مرحله اول خاکستر از ۶۶ درصد به ۳۱/۳ درصد کاهش یافت و بررسی‌ها نشان داد که در مرحله دوم کاهش خاکستر تا حدود ۱۴ درصد امکان‌پذیر است.

کلمات کلیدی

خصوصیت‌سنجی، باطله‌های زغال، البرز شرقی، جدایش ثقلی، شاخص قابلیت شستشو

۱- مقدمه

روش جدایش ثقلی قدیمی ترین روش تغلیظ کانسنگ‌ها است که در عین ارزان بودن، یکی از دقیق ترین و پاکترین روشهای فرآوری مواد معدنی است.

معمولترین روش جهت ارزیابی قابلیت تغلیظ ثقلی یک کانسنگ، انجام آزمایشهای غرق و شناورسازی است. آنالیز غرق و شناورسازی در محیطهای مایع با چگالی مابین کانی (ρ_m) و گانگ (ρ_g) انجام می‌شود. در حالت ایده‌آل اگر چگالی مایع (ρ_f) هر مقداری بین ρ_g و ρ_m انتخاب شود کانی و گانگ به طور کامل از هم جدا می‌شوند و این به آن معناست که فراوانی مواد با چگالی بین ρ_g و ρ_m معادل صفر است.

اما در عمل به علت قفل‌شدگی بین کانی و گانگ، همواره مقداری مواد با چگالی بینابین وجود دارد که انتقال آنها چه به بخش شناور شده و چه به بخش غرق شده موجب انتقال اشتباهی گانگ یا کانی می‌شود. بنابراین بررسی قابلیت تغلیظ ثقلی (و یا در مورد زغال قابلیت شستشو) برای هر بار اولیه ضروری است. قابلیت تغلیظ یک ماده معدنی را می‌توان از دو دیدگاه مورد بحث قرار داد که در زیر به آنها پرداخته شده است.

۱-۱- دیدگاه اول: میزان جدایش پذیری گانگ از ماده باارزش (ویا درجه آزادی)

در این دیدگاه - که مورد تاکید تحقیق حاضر است - میزان جدایش پذیری گانگ از ماده باارزش با فرض دقیق بودن جدایش ($E_p \rightarrow 0$) مورد ارزیابی قرار می‌گیرد و نتیجه آن تعیین چگالی جدایش است.

۲-۱- دیدگاه دوم: فراوانی مواد نزدیک به چگالی جدایش

دیدگاه دوم بررسی فراوانی مواد نزدیک به چگالی جدایش (± 0.1 گرم بر سانتیمتر مکعب) است که طی آن دقت جدایش مطلوب برای دستگاه جداکننده ثقلی مشخص می‌شود و در انتخاب جداکننده ثقلی باید به آن توجه جدی شود؛ توضیح اینکه هرچه فراوانی مواد نزدیک به چگالی جدایش بیشتر باشد، E_p جداکننده ثقلی مورد استفاده باید کمتر باشد [۱]. علاوه بر این، دیدگاه دوم به نوعی نشانگر حساسیت کارایی جدایش نسبت به تغییرات چگالی جدایش است [۲]؛ به این معنی که هرچه فراوانی مواد نزدیک به چگالی جدایش بیشتر باشد، حساسیت کارایی جدایش نسبت به تغییرات چگالی جدایش بیشتر است و این امر استفاده از سیستمهای کنترلی پیچیده تر و گرانیقیمت تر را ضروری می‌کند. در همین راستا

Majumder و Barnwal شاخص NGMI [۳] و همچنین کازرانی‌نژاد شاخص WINSA را تعریف کردند [۴].

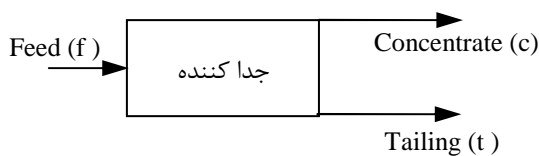
حقیقت این است که برای ارزیابی شستشوی پذیری زغالسنگ ابتدا باید با دیدگاه اول شستشوی پذیری را مورد ارزیابی قرار داد و در صورتی که بار مورد نظر قابل شستشو تشخیص داده شد، باید با دیدگاه دوم E_p مطلوب جداکننده ثقلی را تعیین گردد و در نهایت با در نظر گرفتن ملاحظات دیگر جداکننده ثقلی مناسب را انتخاب نمود. به عبارت دیگر این دو دیدگاه مکمل یکدیگراند و هرگونه قیاس بین آنها جهت ترجیح یکی بر دیگری نامعتبر است.

در تحقیق حاضر ضمن مطالعه موردی بر روی باطله‌های کارخانه زغالشویی البرز شرقی، برخی شاخصهای موجود که بیانگر جدایی پذیری کانی و گانگ هستند مورد بررسی قرار می‌گیرند.

۲- تئوری

۲-۱- نمایش جدایش پذیری گانگ از ماده باارزش (درجه آزادی)

شکل ۱ یک جداکننده را نشان می‌دهد که عیار بار ورودی، کنسانتره و باطله آن به ترتیب f ، c و t است. با توجه به معادلات موازنه جرم، راندمان ($yield$) و بازیابی مواد باارزش و کم‌ارزش در جداکننده از روابط ۱ تا ۳ محاسبه می‌شود. در این روابط Ra ، Re_v و Re_G به ترتیب راندمان، بازیابی مواد باارزش، بازیابی مواد کم‌ارزش هستند.

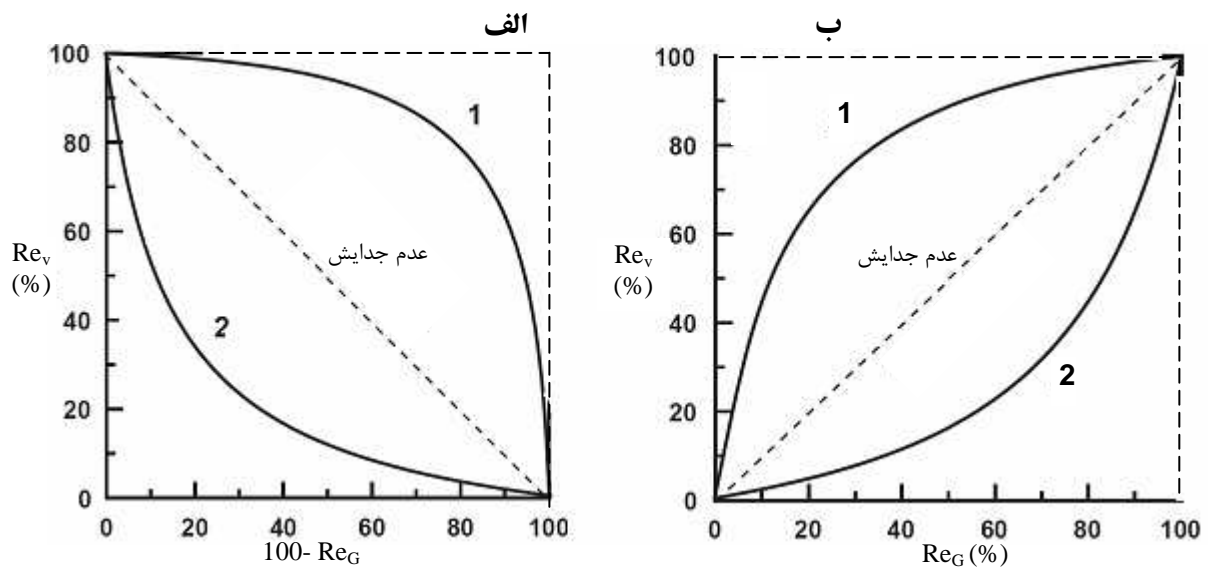


شکل ۱: شمای ساده‌ی یک جداکننده

$$Ra(\%) = \frac{(f - t)}{(c - t)} \cdot 100 \quad (1)$$

$$Re_v = \frac{c}{f} \cdot Ra \quad (2)$$

$$Re_G = \frac{1 - c}{1 - f} \cdot Ra \quad (3)$$



شکل ۲: الف) منحنی‌های ۱ و ۲ نشان‌دهنده میزان انتقال مواد بارز به کنسانتره در مقابل انتقال مواد کم‌ارزش به باطله است؛ نزدیکی منحنی‌ها به قطر نشان‌دهنده کاهش جدایش‌پذیری است. هرچه کارایی جدایش بیشتر باشد، منحنی‌های ۱ و ۲ به پیرامون شکل نزدیکتر می‌شوند

ب) منحنی‌های ۱ و ۲ نشان‌دهنده ارتباط بین بازایی مواد بارز و کم‌ارزش به کنسانتره است. (قابل توجه اینکه منحنی‌های هم‌شماره در دو شکل هم‌ارزش هستند) [۵].

فرآیند جدایش تهیه شده باشد و یا در انتها- آن نمونه دارای دارای عیار ثابت c است و این تعبیر یعنی درجه آزادی صددرد؛ شکل ۳ نمودار یک جدایش ایده‌آل را نشان می‌دهد. به عبارت دیگر اگر شیب نمودار بازایی-راندمان برابر با مقدار ثابت m باشد، آنگاه عیار تمامی $d_p Ra$ ها ثابت و برابر با mf است که نشان‌دهنده عیار عنصر در کانی است (شکل ۳).

حالت ایده‌آل دیگر این است که مواد بارز به هیچ وجه از کم‌ارزش قابل جدا شدن نباشد (درجه آزادی صفر)، در این حالت اگر در حین جدایش به طور متوالی از کنسانتره نمونه‌ای به مقدار $d_p Ra$ تهیه شود- مستقل از اینکه نمونه در ابتدا فرآیند جدایش تهیه شده باشد و یا در انتها- عیار کنسانتره برابر با عیار خوراک است که در این صورت می‌توان نوشت:

$$c = f \Rightarrow dRe_v = \left(\frac{f}{f_{\text{ثابت}}} \right) \cdot dRa \quad (5)$$

$$\Rightarrow dRe_v = 1 \cdot dRa$$

یعنی شیب نمودار راندمان- بازایی برابر با مقدار ثابت واحد خواهد بود و به همین صورت نیز می‌توان شیب نمودار راندمان - بازایی مواد کم‌ارزش را برابر با واحد بدست آورد (شکل ۳).

به عقیده Ahmed و Drzymała استفاده از نمودارهای بازایی مواد بارز (Re_v) به مواد کم‌ارزش (Re_G) و بازایی مواد بارز در کنسانتره (Re_v) نسبت به میزان انتقال مواد کم‌ارزش به باطله $(1-Re_G)$ برای ارزیابی نحوه خاکستردایی و گوگردزایی بسیار کاربرد دارد [۵]. شکل ۲ نمونه‌ای از نمودارهای ذکر شده را نشان می‌دهد. البته از آنجا که راندمان یکی از کمیت‌های مهم مورد بررسی در این تحقیق است، از نمودارهای (Re_v, Ra) و (Re_G, Ra) برای ارزیابی جدایش بهره‌گرفته شده است.

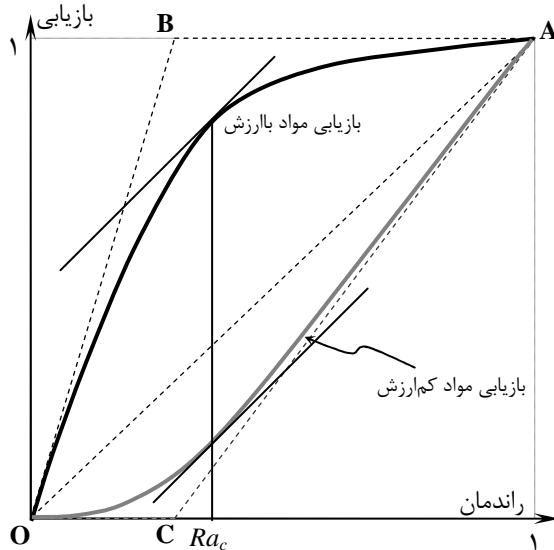
با فرض ثابت بودن نسبت $\frac{c}{f}$ و با توجه به روابط ۱ تا ۳، بازایی (خواه مواد کم‌ارزش یا بارز) تابعی خطی از راندمان است و با گرفتن دیفرانسیل از طرفین رابطه ۲ می‌توان نوشت:

$$Re_v = \frac{c}{f} \cdot Ra \Rightarrow dRe_v = \left(\frac{c}{f_{\text{ثابت}}} \right) \cdot dRa \quad (4)$$

تعبیر معادله دیفرانسیلی ۴ اینگونه است که اگر در حین یک جدایش ایده‌آل به طور متوالی از کنسانتره نمونه‌ای به مقدار $d_p Ra$ تهیه شود* - مستقل از اینکه نمونه در ابتدا

* i شماره‌دهنده نمونه است به گونه‌ای که $i=1$ به معنای اولین نمونه در ابتدای جدایش است

می دهد (به ضمیمه رجوع شود). به عبارت دیگر دو منحنی بازیابی از راندمان 0 تا Ra_c از هم دور می شوند و فاصله آنها در شرایطی که شیب هر دو منحنی برابر واحد گشته است (متناظر با Ra_c) به حداکثر ممکن می رسد و در راندمانهای بیشتر از Ra_c دو منحنی بازیابی مجدداً به هم نزدیک شده و در راندمان 1 به هم می رسند (شکل ۴).



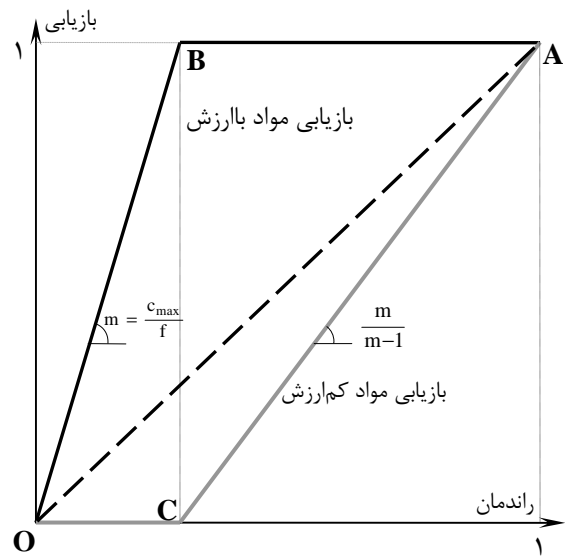
شکل ۴: نمودار جدایش دقیق یک بار واقعی با درجه آزادی 0 تا 100% (جدایش مواد کم ارزش و بارز که نشان دهنده کارایی جدایش است در راندمان Ra_c به بیشترین مقدار خود می رسد).

هرچه قفل شدگی ذرات کمتر باشد، دو منحنی بازیابی به حالت آرمانی درجه آزادی صد درصد (نمودارهای OBA و OCA) نزدیکتراند و تغلیظ پذیری ماده معدنی بیشتر است و هرچه قفل شدگی بیشتر باشد، دو منحنی به حالت آرمانی درجه آزادی صفر (خط OA) نزدیکتر می شوند. در مطالعه شستشوی پذیری زغال عموماً بجای بازیابی مواد بارز و کم ارزش به ترتیب از بازیابی مواد قابل احتراق (Re_{Com}) و بازیابی خاکستر (Re_{Ash}) استفاده می شود.

۲-۲- ارزیابی درجه آزادی بار اولیه

سابقه بررسی جدایش پذیری زغال از کانیهای همراه (و یا به عبارت دیگر شستشو پذیری) به حدود سال ۱۹۵۰ میلادی بر می گردد که Mayer نمودار M را برای اینکار ارائه کرد. در سالهای ۱۹۶۲ الی ۱۹۷۷ میلادی، sarkar شاخصهایی را جهت کمی کردن جدایش پذیری تعریف کرد که در ارزیابی شستشوی پذیری زغال از دقت لازم برخوردار نبودند [۶].

Rao و Govindarajan به منظور تعریف کمی، نسبت سطح محصور بین دو نمودار بازیابی واقعی (شکل ۴) به سطح



شکل ۳: نمودارهای ایده آل برای جدایش کامل مواد کم ارزش و بارز. c_{max} عیار عنصر در کانه (به عنوان مثال عیار مس در کانی کالکوپیریت)؛ در تحقیق حاضر درصد مواد قابل احتراق (درصد خاکستر - ۱۰۰) به عنوان عیار ماده معدنی در نظر گرفته شده است.

نمودارهای شکل ۳ مربوط به دو حالت ایده آل است که تحت جدایش دقیق قرار گرفته اند. OBA و OCA بازیابی مواد بارز و کم ارزش را نسبت به راندمان در حالت آرمانی درجه آزادی 100% نشان می دهد؛ در حالت آرمانی دیگر (درجه آزادی صفر)، نمودار بازیابی مواد بارز و کم ارزش تبدیل خط راست OA می شوند. اکنون حالتی بررسی می شود که باری واقعی (با درجه آزادی بین 0 تا 100%) تحت جدایشی دقیق قرار گرفته باشد. در صورتیکه باری با درجه آزادی بین 0 و 100% تحت یک جدایش دقیق قرار گیرد و در حین جدایش بطور متوالی از کسانتره نمونه های $d_i Ra$ تهیه شود، مشاهده می شود که بر خلاف دو حالت آرمانی قبل عیار نمونه ها ثابت نیست؛ عیار نمونه های ابتدایی بالاست و رفته رفته در نمونه های بعدی عیار کاهش می یابد. به عبارت دیگر:

$$d_i Re_v = \left(\frac{c_i}{f}\right) \cdot d_i Ra \quad (6)$$

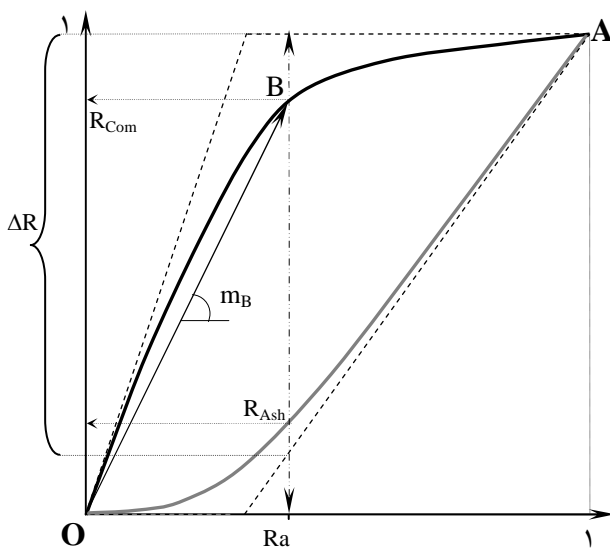
با توجه به تعبیر هندسی این مفهوم؛ نمودار شستشوی پذیری در حالت واقعی به صورت شکل ۴ می باشد که در آن شیب نمودار بازیابی واقعی مواد بارز در ابتدا m است ($m = \frac{c_{max}}{f}$) که رفته رفته کاهش می یابد و شیب خط بازیابی مواد کم ارزش نیز در ابتدا صفر است که رفته رفته افزایش می یابد.

می توان ثابت کرد که در نقطه Ra_c شیب دو نمودار برابر واحد می شود و بیشترین کارایی جدایش در این نقطه رخ

حقیقت این است که نسبت تفاضل بازیابی‌های واقعی $(R_{Com} - R_{Ash})$ به تفاضل بازیابی‌های ایده‌آل (ΔR) که بیانگر قفل‌شدگی زغال و خاکستر می‌باشد (Z) عامل اصلی در قابلیت تغلیظ ثقیلی است. این نکته در شاخص W_1 لحاظ شده است لیکن در شاخص W_2 مورد توجه قرار نگرفته و از نقاط ضعف آن محسوب می‌شود. به منظور ارزیابی قابلیت تغلیظ ثقیلی باید کمیت Z را در نقطه‌ای که متناظر با خاکستر مطلوب است شاخص تلقی کرد.

۲-۳- تعیین شاخص بر اساس درصد خاکستر مطلوب

شکل ۵ منحنی شماتیک شستشوی زغال را نشان می‌دهد. فرض می‌شود که در چگالی جدایش ρ راندمان R_a و بازیابی‌های مواد قابل احتراق و خاکستر R_{Com} و R_{Ash} حاصل شده است.



شکل ۵: انتخاب نقطه تعیین شاخص بر اساس درصد خاکستر مطلوب؛ (توجه شود که ΔR اختلاف بین بازیابی مواد قابل احتراق و خاکستر در حالت آرمانی درجه آزادی ۱۰۰٪ است).

با توجه به معادلات ۱ تا ۳ رابطه راندمان با بازیابی مواد قابل احتراق و خاکستر به صورت معادلات ۷ و ۸ است که در آنها f ، c و t به ترتیب درصد خاکستر بار اولیه، کنسانتره و باطله است.

$$R_a = \frac{f - t}{c - t} \cdot 100 \quad (7)$$

$$R_{Com} = \frac{100 - c}{100 - f} \cdot R_a \quad (8)$$

بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که شیب خط OB (m_B) نشانگر نسبت $\frac{100 - c}{100 - f}$ است. پس می‌توان نوشت:

محصور بین دو نمودار ایده‌آل (شکل ۳) را به عنوان شاخص شستشوی W_1 تعریف کرده‌اند که البته مستلزم برآزش منحنی به نمودارهای بازیابی واقعی است. آنها معادله‌ی چند جمله‌ای درجه سوم با شکل کلی $y = ax^3 + bx^2 + cx$ را برای برآزش استفاده کردند [۷] اما ضریب قطعیت این معادله در مواردی که قابلیت شستشو بالاست (منحنیهای بازیابی به حالت ایده‌آل نزدیکتراند) نسبتاً کم است و این امر موجب کاهش دقت شاخص می‌شود.

برخی محققان فاصله بیشینه‌ی بین دو منحنی بازیابی واقعی (همانگونه که قبلاً نیز اشاره شد، بیشترین اختلاف در بازیابی مواد باارزش و کم‌ارزش در R_{a_c} رخ می‌دهد) را به عنوان شاخص شستشوی W_2 تعریف کردند تا به این ترتیب نیاز به برآزش معادله به منحنیهای بازیابی منتفی گردد [۶]-[۸].

در روش اول سعی شده است تا رفتار شستشوی در تمام چگالی‌هایی که جدایش در آنها امکانپذیر است در قالب یک عدد نشان داده شود لذا ماهیت شاخص اول (W_1) بیشتر، از سنخ میانگین است؛ میانگین شستشوی در یک بازه چگالی جدایش (و یا به عبارت دیگر در کل دامنه راندمان که از ۰ تا ۱ تعریف می‌شود). در حالیکه شاخص دوم (W_2) فقط شستشوی را در یک چگالی جدایش خاص که متناظر با R_{a_c} است ملاک ارزیابی قرار می‌دهد. البته شاید انتخاب میانگین و یا یک نقطه برای ارزیابی شستشوی زغال در دامنه وسیعی از چگالی جدایش چندان مناسب نباشد اما از آنجایی که در اغلب موارد تمایل بر آن است که رفتار شستشوی در یک نقطه خاص تعیین شود، می‌توان استنباط کرد شاخص دوم از این حیث نسبت به شاخص اول برتری داشته باشد و در برخی موارد دقیقتر است.

اما ضعف شاخص دوم در انتخاب نقطه تعیین شاخص است؛ همانگونه که اشاره شد ملاک انتخاب نقطه تعیین شاخص بیشینه بودن اختلاف بازیابی‌های واقعی (که همان R_{a_c} است) قرار داده شده است و این در حالیست که بعضی مواقع ممکن است نقطه تعیین شاخص غیر از R_{a_c} باشد. در عمل، برای شستشوی ثقیلی زغال، چگالی جدایش بر اساس محدودیتهایی که از طرف مشتری وضع می‌شود تعیین می‌گردد نه بر اساس بیشینه بودن بازیابی‌ها. به عنوان مثال اگر مشتری خواهان کنسانتره‌ای با درصد خاکستر ۸ باشد و درصد خاکستر در R_{a_c} برابر با ۹/۵ باشد، باید نقطه تعیین شاخص را بگونه‌ای انتخاب کرد که شرط درصد خاکستر ۸ را برای محصول ارضاء کند و نمی‌توان چگالی جدایش متناظر با خاکستر ۹/۵ درصد را ملاک ارزیابی شستشوی قرار داد.

۳- آزمایشها

به منظور انجام آزمایشهای لازم، مقدار ۹۰۰ کیلوگرم نمونه معرف از سد باطله‌های جیگ کارخانه زغالشوی البرز شرقی تهیه شد. نمونه معرف از سه نمونه جزئی به وزن ۳۰۰ کیلوگرم تشکیل شده بود. هر نمونه‌ی جزئی از ترانسه‌هایی با عمق ۱۰۰ سانتیمتر و طول و عرض به ترتیب ۱۰۰ و ۵۰ سانتیمتر که در دامنه تپه‌های باطله ایجاد شده بود تهیه شد. جهت ارزیابی قابلیت شستشوی باطله‌های جیگ، نمونه تهیه شده به ۶ محدوده ابعادی تقسیم شد (جدول ۱). سپس بر روی بخشهای دانه‌بندی شده آزمایش غرق و شناورسازی صورت گرفت. هرچند ارتباط بین چگالی هر محدوده و خاکستر آن را نوع و فراوانی کانیه‌های موجود در بخش مربوطه تعیین می‌کند [۹]، اما استفاده از داده‌های آنالیزهای غرق و شناورسازی جهت برآورد اولیه درصد خاکستر مفید است.

در همین راستا محیطهائی با چگالی ۱/۷۵، ۱/۶۵، ۱/۵۵، ۱/۴۵ و ۱/۳۵ گرم بر سانتیمتر مکعب برای غرق و شناورسازی انتخاب شد. محیطهائی سنگین با انحلال کلرید روی $(\rho_{ZnCl_2} = 2.91 \frac{gr}{cm^3})$ در آب تهیه شدند و به منظور کنترل چگالی محیطها از یک چگالی‌سنج مایعات با دقت $\pm 0.005 \frac{gr}{cm^3}$ استفاده شد. با توجه به باطله بودن بار اولیه، انتظار می‌رفت که سهم مواد با چگالی بالای ۱/۷۵ بسیار زیاد باشد، لذا ترجیح داده شده که آنالیز غرق و شناورسازی محدوده‌های مختلف ابعادی، ابتدا در محیط با چگالی ۱/۷۵ انجام شود و سپس مواد شناور در محیط با چگالی ۱/۷۵ در محیطهائی با چگالی کمتر غرق و شناور شدند. بخش‌های مختلف بدست آمده از غرق و شناورسازی پس از توزین، پودر و سپس خاکسترسنجی شد.

۴- ارائه یافته‌ها و بحث

به منظور بحث و بررسی ابتدا باید نمودارهای مورد نیاز رسم شوند.

۴-۱- رسم نمودار بازیابی-راندمان

جهت رسم نمودار بازیابی-راندمان، ابتدا با توجه به میزان درصد خاکستر هر دامنه ابعادی، نمودارهای ایده‌آل بازیابی مواد با ارزش و کم‌ارزش رسم می‌شود (محور افقی راندمان جمععی و محور قائم بازیابی). سپس با استفاده از داده‌های جدول ۱ کمیت‌های زیر محاسبه می‌شود:

$$m_B = \frac{100 - c}{100 - f} \quad (9)$$

مقدار f با توجه به شناختی که از بار اولیه وجود دارد معلوم است، بنابراین اگر مقدار c نیز مطابق با خواست مشتری در نظر گرفته شود، شیب خط OB که از مبدا می‌گذرند مشخص می‌شود. با رسم خط OB در نمودار شستشویپذیری و یافتن محل تلاقی آن با منحنی بازیابی مواد قابل احتراق می‌توان راندمان متناظر با خاکستر مطلوب را تعیین کرد (شکل ۵). بدین ترتیب با قطع دادن خط OB با منحنی بازیابی مواد قابل احتراق، نقطه‌ای بدست می‌آید که جهت تعیین شاخص مورد نیاز است. اگر راندمان متناظر با آیین نقطه Ra^0 باشد، حال شاخص شستشویپذیری Z به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$Z = \frac{R_{Com.} - R_{Ash}}{\Delta R} \Big|_{Ra=Ra^0} \quad (10)$$

توضیح اینکه ΔR اختلاف بین بازیابی مواد قابل احتراق و خاکستر در حالت آرمانی درجه آزادی ۱۰۰٪ است و با توجه به توضیحات مربوط به شکل ۳ می‌توان مقدار آن را بر حسب Ra محاسبه کرد.

۲-۴- ارتباط شاخص Z با W_1 و W_2

با توجه به ماهیت شاخص Z و شاخص W_1 می‌توان استنباط کرد که شاخص W_1 میانگین Z در بازه $1 \leq Ra \leq$ است.

$$W_1 = \int_0^1 Z \cdot dRa \quad (11)$$

ارتباط شاخص Z با شاخص W_2 به صورت معادله ۱۲ است.

$$W_2 = Z_{(Ra=Ra_c)} \cdot \Delta Ra_{(Ra=Ra_c)} \quad (12)$$

توضیح اینکه $Z_{(Ra=Ra_c)}$ مقدار شاخص جدید و $\Delta Ra_{(Ra=Ra_c)}$ مقدار اختلاف بازیابی‌ها در حالت ایده‌آل در نقطه متناظر با Ra_c هستند. در تحقیق حاضر، جهت جامع بودن ارزیابی، باید شاخص Z در یک بازه‌ای از چگالیهای جدایش (ویا راندمان متناظر با چگالیهای جدایش) رسم شود.

جدول ۱: توزیع وزنی در چگالی‌های مختلف مربوط به تمامی دامنه‌های ابعادی. (اعداد داخل مربع درصد خاکستر را مشخص می‌کند).

محدوده ابعادی	۱	۲	۳	۴	۵	۶
بخشهای دانه‌بندی (mm)	+۵۰/۸	-۵۰/۸	-۱۲/۷	-۴/۷۶	-۲	-۱
چگالی جدایش (gr/cm ³)	+۱/۷۵	+۱۲/۷	+۴/۷۶	+۲	+۱	+۰/۵
	۴۹/۷۱	۶۹/۱۵	۷۹/۳۶	۸۴/۱۵	۸۶/۱۶	۸۶/۳۱
	۷۱/۵	۷۷	۷۸/۶	۷۸/۱	۷۸/۸	۷۹/۴
	-۱/۷۵ + ۱/۶۵	۸/۵۴	۶/۶۶	۵/۶۹	۴/۷۸	۴
	۴۳/۹	۴۴/۳	۴۲/۵	۴۳/۸	۴۳/۱	۴۴/۲
	-۱/۶۵ + ۱/۵۵	۹/۳۶	۵/۷۳	۳/۶۱	۲/۵۹	۲/۰۵
	۳۷/۱	۳۴/۹	۳۴/۱	۳۳/۸	۳۴/۶	۳۳
	-۱/۵۵ + ۱/۴۵	۷/۷۳	۴/۱۲	۲/۹۲	۲/۴	۳/۵۷
	۲۸/۴	۲۵/۱	۲۶/۵	۲۳/۸	۲۵/۵	۲۳/۵
	-۱/۴۵ + ۱/۳۵	۴/۱۴	۲/۸۴	۱/۸۷	۱/۲۸	۱/۴۸
	۱۸	۱۵/۸	۱۵/۵	۱۵/۲	۱۵/۷	۱۳/۵
	-۱/۳۵	۱/۰۹	۱/۲۸	۱/۷۶	۲/۷۹	۲/۶
	۸/۳	۸/۱	۶/۳	۵/۷	۵/۶	۴/۶

که در آن f درصد خاکستر محدوده ابعادی مورد نظر است. حال مقدار شاخص Z طبق تعریف، طی رابطه ۱۰ قابل محاسبه است. به عنوان نمونه، روند محاسبه شاخص Z مربوط به محدوده ابعادی +۵۰/۸ در جدول ۲ آورده شده است.

جدول ۲: محاسبه شاخص Z برای محدوده ابعادی +۵۰/۸ میلی‌متر؛ درصد خاکستر این محدوده ۵۲/۹٪ است

Z (%)	ΔR	$R_{Com-Ash}$	راندمان تجمعی (%)	چگالی جدایش (gr/cm ³)
۸۴/۳	۱/۲۴	۱/۰۵	۰/۵۸	-۱/۳۵
۶۸/۴	۹/۳۱	۶/۳۷	۴/۳۹	-۱/۴۵ + ۱/۳۵
۵۱/۳	۴۰/۹۶	۲۱/۰۲	۱۹/۳	-۱/۵۵ + ۱/۴۵
۴۰/۹	۷۹/۴۳	۳۲/۵	۳۷/۴۳	-۱/۶۵ + ۱/۵۵
۳۹/۵	۹۴/۰۰	۳۷/۱۴	۵۰/۲۹	-۱/۷۵ + ۱/۶۵

۴-۳- ارزیابی شستشوپذیری:

شکل‌های ۶ (الف، ب، ج، د، ه، و) نمودار بازیابی-راندمان در محدوده‌های ابعادی ۱ تا ۶ (طبق جدول ۱) را نشان می‌دهد. همانگونه که مشخص است در تمامی موارد در چگالی ۱/۷۵ اختلاف بازیابی‌های مواد قابل احتراق و خاکستر به بیشترین مقدار رسیده است، لذا به منظور جدایش مواد کم‌ارزش (که

- راندمان تجمعی هر یک از محدوده‌های ابعادی در چگالی‌های ۱/۳۵ تا ۱/۷۵

- بازیابی تجمعی مواد قابل احتراق در هر یک از محدوده‌های ابعادی در چگالی‌های ۱/۳۵ تا ۱/۷۵

- بازیابی تجمعی خاکستر در هر یک از محدوده‌های ابعادی در چگالی‌های ۱/۳۵ تا ۱/۷۵

حال باید در همان شکلی که نمودارهای ایده‌آل رسم شده است نمودارهای راندمان تجمعی و بازیابی‌های واقعی را نیز رسم کرد. مشاهده می‌شود که شکلی شبیه به شکل ۵ بدست می‌آید. در تحقیق حاضر به منظور مقایسه قابلیت شستشو از نمودار Z بر حسب چگالی جدایش استفاده شده است.

۴-۲- رسم نمودار شاخص Z بر حسب راندمان

جهت رسم نمودار شاخص Z برای هر محدوده ابعادی ابتدا باید مقدار $R_{com} - R_{Ash}$ را با توجه به داده‌های جدول ۱ به ازاء چگالی‌های جدایش پنجانگانه محاسبه کرد. سپس با قراردادن راندمان مربوط به چگالی‌های جدایش در رابطه ۱۳ مقدار ΔR محاسبه می‌شود.

$$\Delta R = \begin{cases} \frac{100 \cdot Ra}{100 - f} & ; Ra \leq 100 - f \\ 100 \left(\frac{100 - Ra}{f} \right) & ; Ra > 100 - f \end{cases} \quad (13)$$

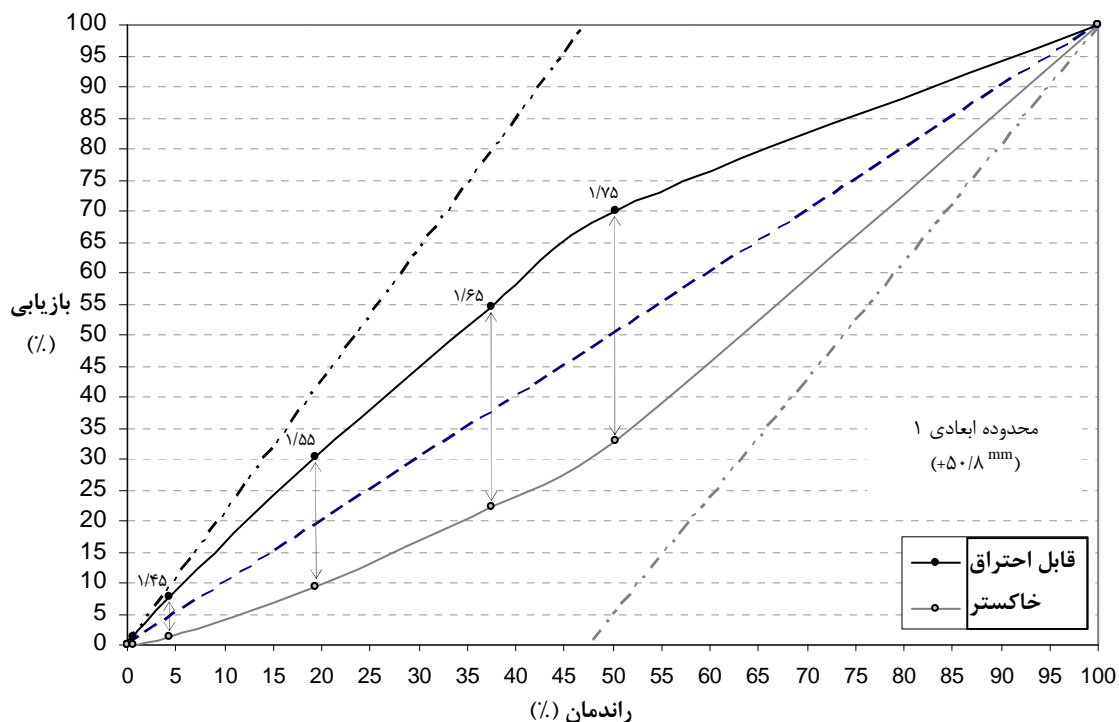
جدایش برای شستشو در مرحله دوم بین ۱/۵۱ تا ۱/۵۷ انتخاب شود، نتیجه شستشو در هر دو دامنه ابعادی مشابه خواهد بود اما اگر چگالی جدایش خارج از این محدوده انتخاب شود، کارآیی جدایش در دامنه ابعادی ۰/۵ تا ۱ بیشتر می شود و این نکته مهم در هیچ یک از دو شاخص قبلی قابل ارزیابی نبود.

با توجه به نتایج فوق می توان عملیات باطله شویی را به دو مرحله تقسیم کرد. مرحله اول حذف مواد کم ارزش است که طبق بررسی های به عمل آمده باید در حد جدایش ۱/۷۵ صورت گیرد و مرحله دوم استحصال محصولی قابل ارائه به صنعت فولاد از کنسانتره بدست آمده از مرحله اول است. آنچه که تا کنون بیان شد مربوط به شستشوپذیری بار ورودی به مرحله اول است. حال شستشوپذیری بار ورودی به مرحله دوم مورد بررسی قرار می گیرد.

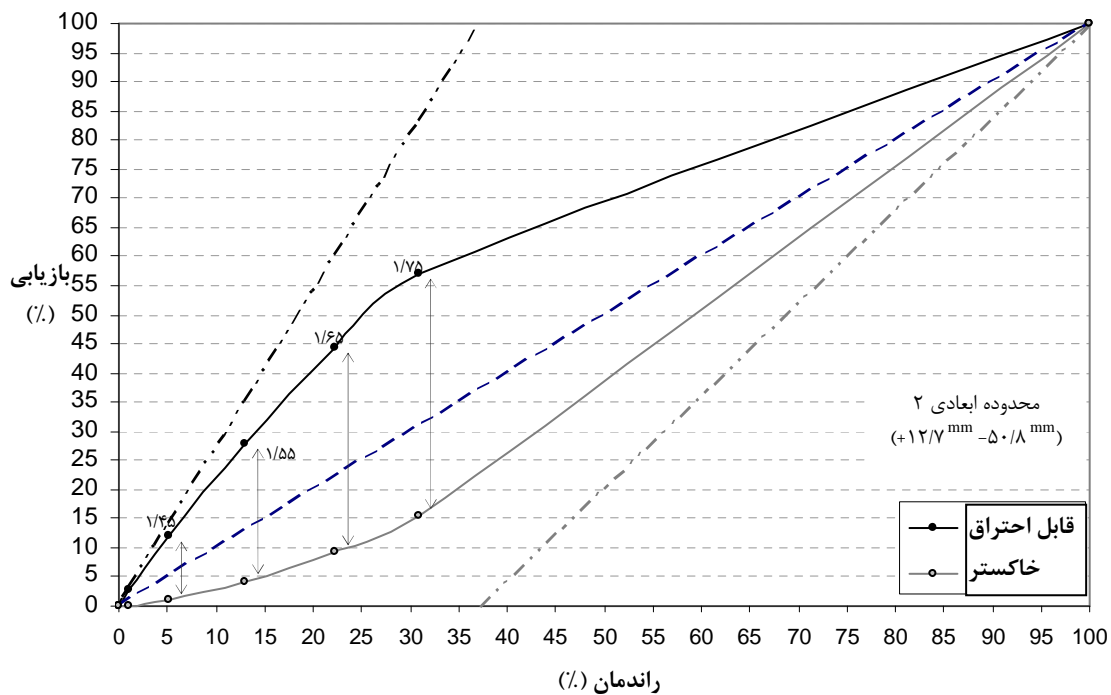
حدود ۷۰ درصد مواد را تشکیل می دهد، حد جدایش ۱/۷۵ مناسب به نظر می رسد.

به منظور مقایسه بهتر شستشو پذیری دامنه های یاد شده، ارتباط بین Z و چگالی جدایش در شکل ۷ نشان داده شده است. بر اساس نمودارهای شکل ۷:

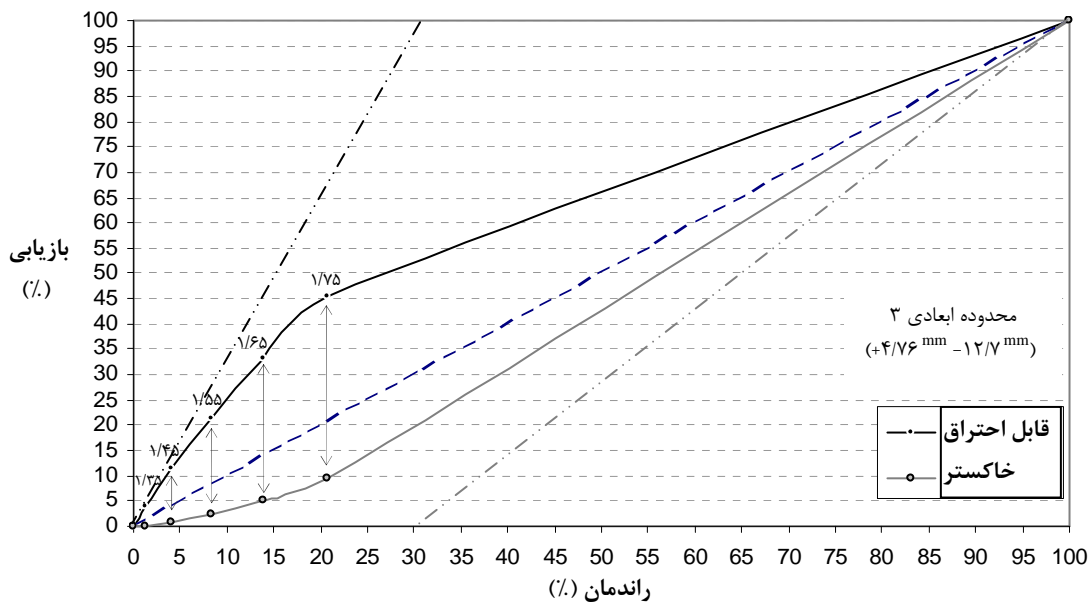
- نمودار Z دامنه های ریزتر در تمامی چگالی های جدایش بالاتر است. این نکته به معنای سطح زیر منحنی بیشتر و در نتیجه درجه آزادی بیشتر در ابعاد ریزتر است.
- نمودار Z دامنه های ۰/۵ تا ۱ و ۱ تا ۲ میلی متر بسیار به هم نزدیک هستند که به معنای اختلاف کم شاخص شستشوپذیری آنهاست.
- در تمامی دامنه های ابعادی با افزایش راندمان (یا چگالی جدایش) کمیت Z کاهش می یابد. علت این پدیده را می توان در انتقال ذرات قفل شده به قسمت شناور شده دانست.
- مقدار شاخص Z برای دو دامنه ریزتر در حوالی چگالی ۱/۵۵ با هم برابر است و این بدان معناست که اگر چگالی



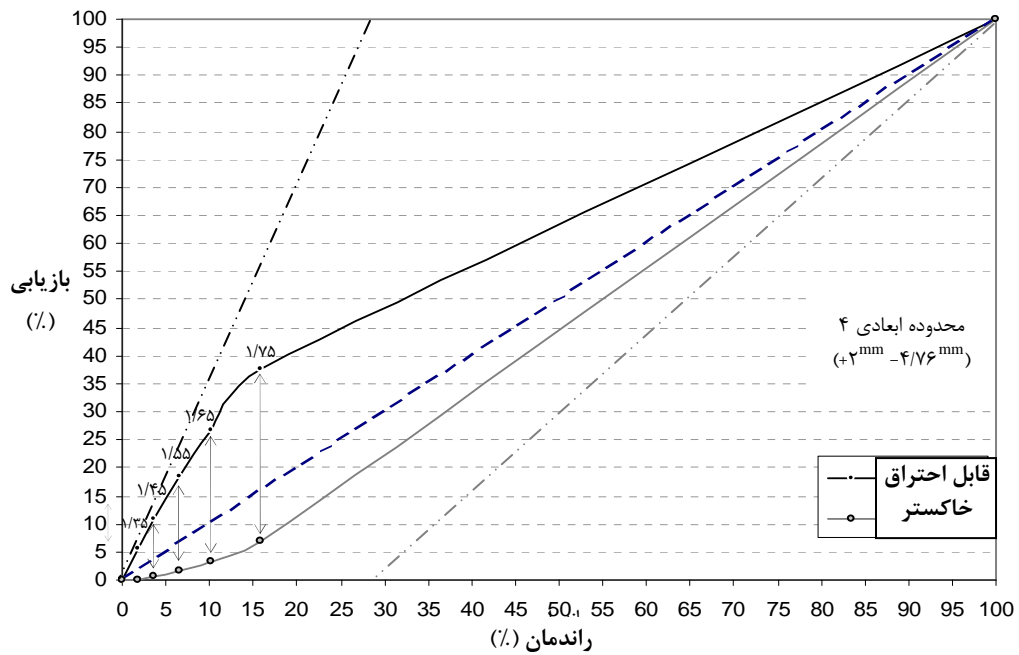
شکل ۶-الف: منحنی های بازیابی مواد قابل احتراق و خاکستر در ابعاد ۰/۸+ میلی متر



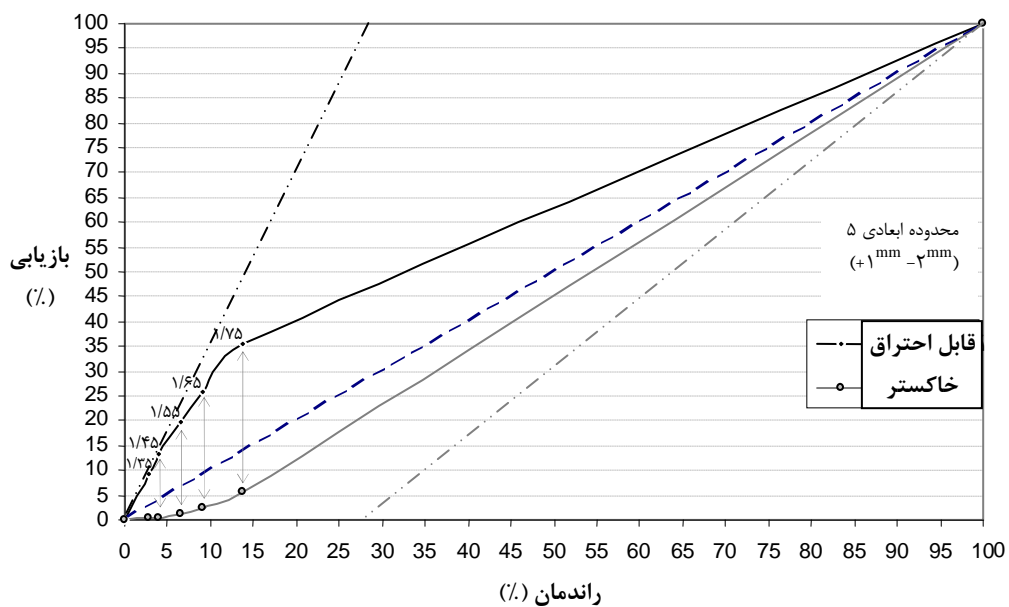
شکل ۶-ب: منحنی های بازیابی مواد قابل احتراق و خاکستر در ابعاد ۱۲/۷ تا ۵۰/۸ میلیمتر



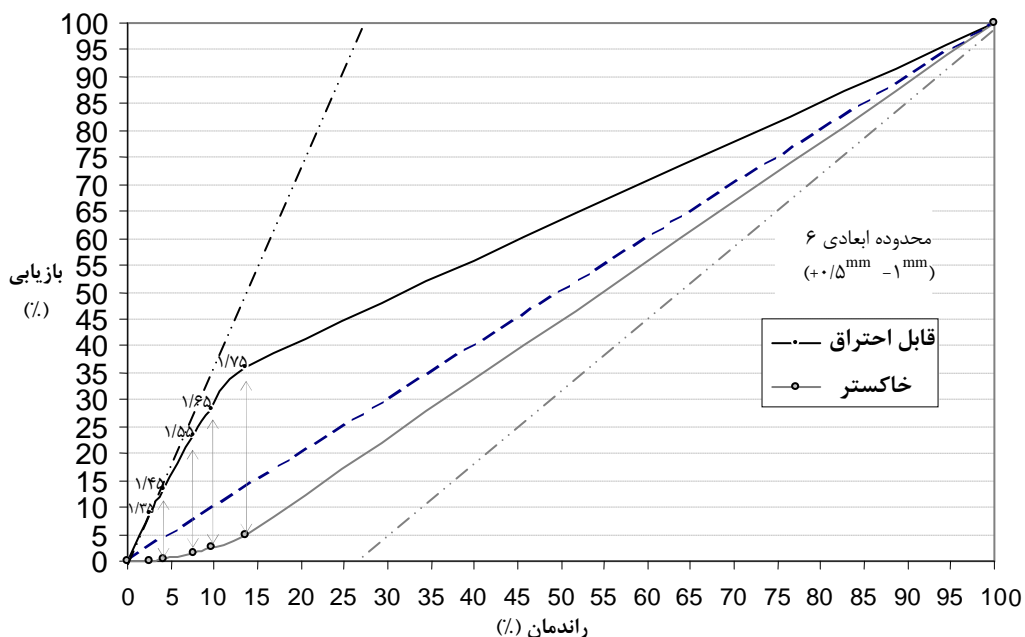
شکل ۶-ج: منحنی های بازیابی مواد قابل احتراق و خاکستر در ابعاد ۴/۷۶ تا ۱۲/۷ میلیمتر



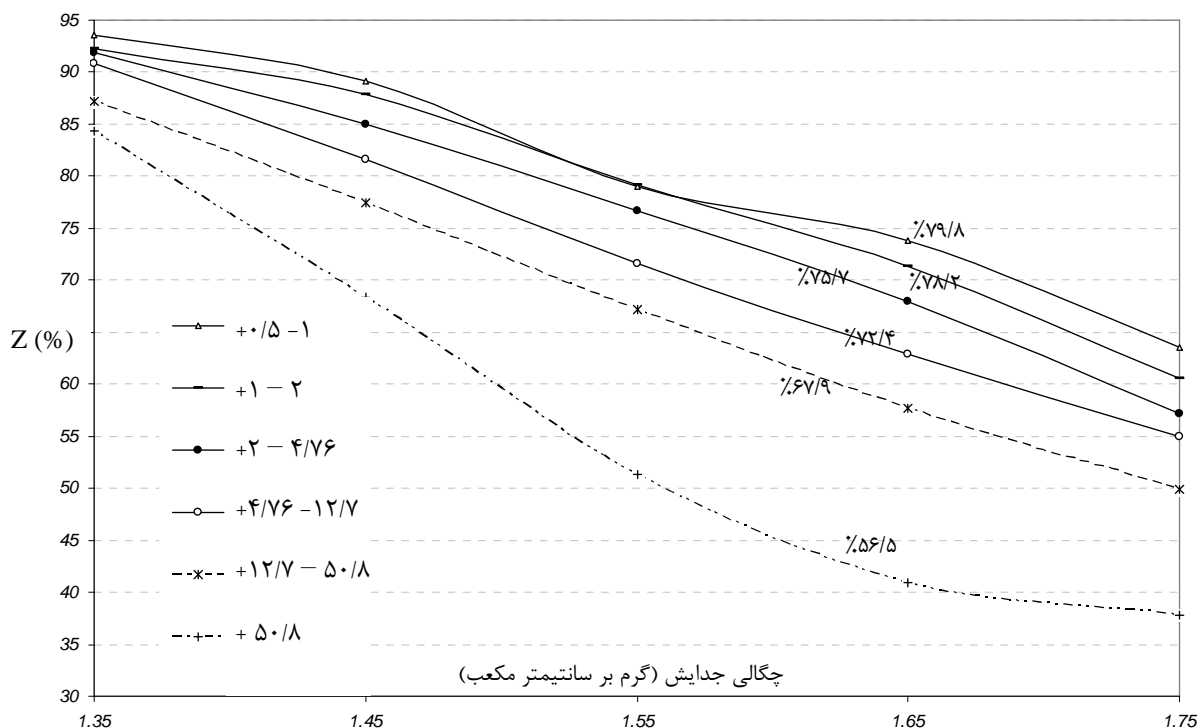
شکل ۶-د: منحنی های بازیابی مواد قابل احتراق و خاکستر در ابعاد ۲ تا ۴/۷۶



شکل ۶-ه: منحنی های بازیابی مواد قابل احتراق و خاکستر در ابعاد ۱ تا ۲ میلیمتر



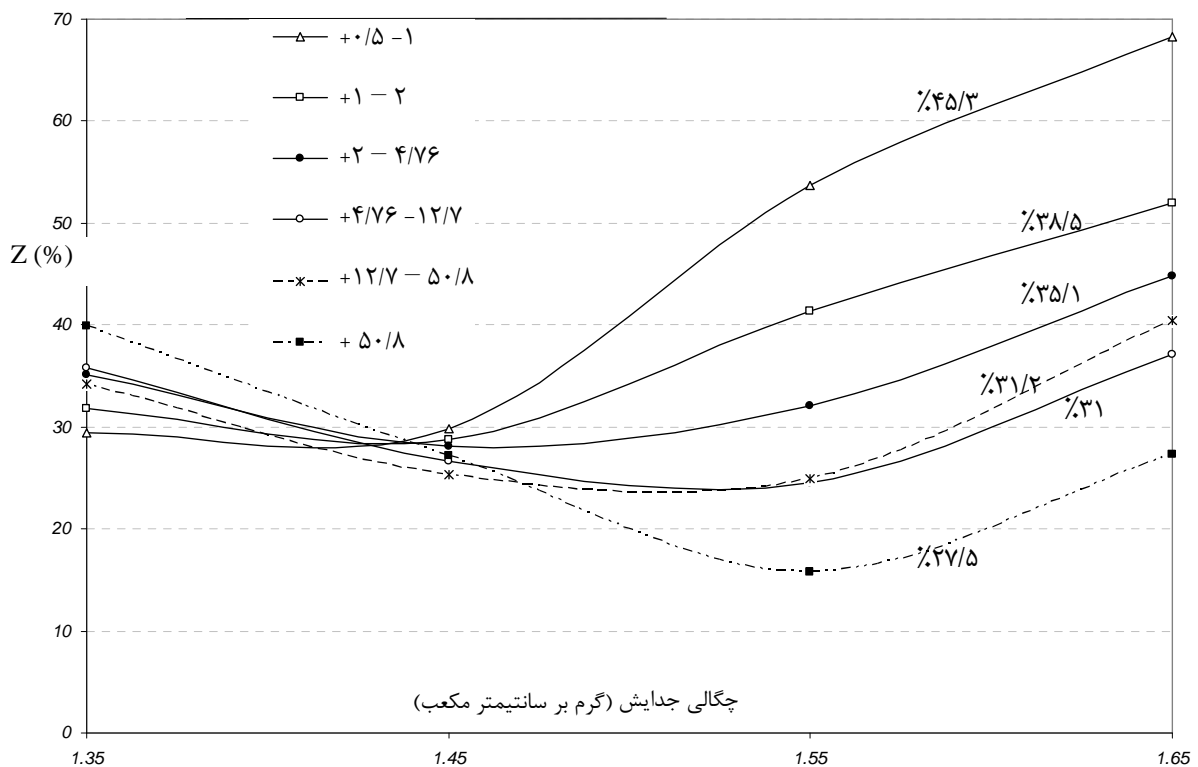
شکل ۶- و : منحنی های بازیابی مواد قابل احتراق و خاکستر در ابعاد ۰/۵ تا ۱ میلی متر



شکل ۷: مقایسه قابلیت شستشو در دامنه‌های ابعادی مختلف؛ اعداد نوشته شده روی نمودارها متوسط کمیت Z است که می توان به عنوان شاخص شستشوی W₁ از آن یاد کرد.

جدول ۳: توزیع وزنی در چگالی‌های مختلف مربوط به تمامی دامنه‌های ابعادی برای ورودی مرحله دوم؛ (اعداد داخل مربع درصد خاکستر را مشخص می‌کند)

محدوه ابعادی						
بخشهای دانه‌بندی (mm)						
چگالی جدایش (gr/cm ³)						
۶	۵	۴	۳	۲	۱	
-۱ +۰/۵	-۲ +۱	-۴/۷۶ +۲	-۱۲/۷ +۴/۷۶	-۵۰/۸ +۱۲/۷	+۵۰/۸	
۱۹/۰ ۴/۶	۲۰/۲ ۵/۶	۱۱/۱ ۵/۷	۶/۲ ۶/۳	۳/۵ ۸/۱	۱/۲ ۸/۳	-۱/۳۵
۱۰/۸ ۱۳/۵	۹/۲ ۱۵/۷	۱۱/۸ ۱۵/۲	۱۳/۸ ۱۵/۵	۱۳/۴ ۱۵/۸	۷/۶ ۱۸	-۱/۴۵ +۱/۳۵
۲۶/۱ ۲۳/۵	۱۷/۳ ۲۵/۵	۱۸/۴ ۲۳/۸	۲۰/۰ ۲۶/۵	۲۵/۱ ۲۵/۱	۲۹/۷ ۲۸/۴	-۱/۵۵ +۱/۴۵
۱۴/۹ ۳۳	۱۸/۷ ۳۴/۶	۲۲/۸ ۳۳/۸	۲۷/۸ ۳۴/۱	۳۰/۳ ۳۴/۹	۳۶/۰ ۳۷/۱	-۱/۶۵ +۱/۵۵
۲۹/۲ ۴۴/۲	۳۴/۵ ۴۳/۱	۳۵/۹ ۴۳/۸	۳۲/۳ ۴۲/۵	۲۷/۷ ۴۴/۳	۲۵/۶ ۴۳/۹	-۱/۷۵ +۱/۶۵



شکل ۸: مقایسه قابلیت شستشوی ورودی مرحله دوم در دامنه‌های ابعادی مختلف؛ (اعداد نوشته شده روی نمودارها متوسط کمیت Z است که می‌توان به عنوان شاخص شستشوی پذیری W₁ از آن یاد کرد).

۴-۳- ارزیابی شستشوپذیری بار ورودی مرحله دوم

با در نظر گرفتن حد جدایش $1/75$ برای مرحله اول، توزیع چگالی در بخشهای ابعادی مختلف بار مرحله دوم به شرح جدول ۳ خواهد بود. به منظور ارزیابی شستشوپذیری در ورودی مرحله دوم، شاخص Z و چگالی جدایش برای بخشهای مختلف ابعادی در شکل ۸ نشان داده شده است. از مقایسه شکل‌های (۸ و ۷) می‌توان نتیجه گرفت که شستشوپذیری بار مرحله دوم افت قابل توجهی نسبت به مرحله اول (حدوداً نصف) پیدا کرده است که این امر مبین ضرورت خردایش ورودی مرحله دوم است همانگونه که در شکل ۸ نشان داده شده است. شستشوپذیری ابعاد $0/5$ تا 1 میلی‌متر اختلاف قابل توجهی با ابعاد درشت‌تر دارد. در نتیجه، می‌توان استنباط کرد برای ورودی مرحله دوم رسیدن به درجه آزادی مطلوب احتمالاً در ابعاد کمتر از 1 (و حتی کمتر از $0/5$) میلی‌متر میسر است.

نکته مهمتر اینکه مشاهده می‌شود در شکل ۸ بر خلاف شکل ۷ نمودارها هم‌رند نیستند یعنی موقعیت آنها نسبت به هم در محدوده‌های مختلف متغیر است. توضیح اینکه ترتیب شاخص Z در محدوده چگالی بالای $1/47$ در مقایسه با محدوده زیر $1/41$ تقریباً بر عکس است؛ به عنوان نمونه، دامنه ابعادی که در محدوده چگالی‌های جدایش بالای $1/47$ بیشترین کارایی جدایش را دارد در محدوده زیر $1/41$ کمترین کارایی جدایش را بدست می‌دهد. شکل ۸ مؤید آن است برای قضاوت در خصوص تغلیظ‌پذیری ثقلی هیچگاه نباید فقط به یک عدد اکتفا کرد. علاوه بر داده‌های غرق و شناورسازی، حداقل اطلاعاتی که برای قضاوت مورد نیاز است چگالی جدایش (یا درصد خاکستر مطلوب برای مشتری) است.

در صورتی که اطلاعات مربوط به چگالی جدایش در دست نباشد، جهت خصوصیت سنجی باید از یک «نمودار» استفاده کرد نه عدد؛ نموداری که محور قائم آن شاخص Z و محور افقی آن چگالی جدایش (و یا راندمان یا درصد خاکستر کنسانتره) است.

۴- نتیجه‌گیری:

- بیش از ۷۰ درصد مواد موجود در باطله‌های جیگ را مواد کم‌ارزش (مواد با چگالی بیش از $1/75$) تشکیل می‌دهد.
- در دامنه‌های ابعادی بالای $0/5$ میلی‌متر، به منظور حذف مواد کم‌ارزش، شستشوی اولیه در حد جدایش $1/75$ بیشترین کارایی جدایش را بدست می‌دهد.
- در مورد بار ورودی مرحله اول، با کاهش ابعاد تا زیر 2 میلی‌متر درجه آزادی افزایش می‌یابد.

- W_1 شاخصی است که نشان‌دهنده شستشوپذیری در یک بازه چگالی جدایش (و یا به عبارت دیگر در بازه راندمان از 0 تا 1) است. بنابراین در بیشتر موارد که تمایل بر قضاوت در نقطه خاص است کارایی کمتری دارد.

- بر خلاف شاخص W_1 ، W_2 شاخصی است که فقط شستشوپذیری را در یک چگالی جدایش خاص که متناظر با Rac است ملاک ارزیابی قرار می‌دهد. ضعف شاخص دوم در انتخاب نقطه تعیین شاخص است؛ چرا که لزوماً جدایش در چگالی متناظر با Rac صورت نمی‌گیرد. ضمن اینکه در آن هیچ توجهی به اختلاف بازیابی‌ها در حالت ایده‌آل نشده است. بنابراین نمی‌تواند نشان‌دهنده میزان قفل‌شدگی در بار اولیه باشد.

- در تحقیق حاضر شاخصی برای ارزیابی شستشوپذیری (Z) تعریف شد که در آن نقاط ضعف شاخص W_2 برطرف گردید

- برای قضاوت در خصوص تغلیظ‌پذیری ثقلی زغال، هیچگاه نباید فقط به یک عدد اکتفا کرد و علاوه بر داده‌های غرق و شناورسازی، چگالی جدایش (یا درصد خاکستر مطلوب برای مشتری) نیز از دیگر اطلاعات ضروری برای قضاوت است. در صورتی که اطلاعات مربوط به چگالی جدایش در دست نباشد، جهت خصوصیت سنجی به جای عدد باید از یک «نمودار» استفاده گردد؛ نموداری که محور قائم آن شاخص Z محور افقی آن چگالی جدایش (و یا راندمان یا درصد خاکستر کنسانتره) است.

۵- تشکر و قدردانی:

مقاله حاضر بر گرفته از نتایج طرح پژوهشی "امکان راه‌اندازی یک واحد باطله‌شویی به منظور فرآوری زغال‌های موجود در باطله‌های کارخانه شرکت زغالسنگ البرز شرقی" است که در جهاددانشگاهی تربیت‌مدرس به انجام رسیده است. لذا بدین وسیله از همیارها و مساعدتهای صمیمانه بخش مهندسی معدن (گروه فرآوری مواد معدنی) دانشکده فنی و مهندسی دانشگاه تربیت مدرس و شرکت زغالسنگ البرز شرقی در انجام این تحقیق سپاسگزاریم.

۶- ضمیمه

کارایی جدایش به صورت زیر تعریف می شود:

$$SE = Re_v - Re_G = \left(\frac{c}{f}\right) \cdot Ra - \left(\frac{1-c}{1-f}\right) \cdot Ra$$

که با دیفرانسیل گیری از آن خواهیم داشت:

$$d_i SE = d_i Re_v - d_i Re_G = \left(\frac{c_i}{f}\right) \cdot d_i Ra - \left(\frac{1-c_i}{1-f}\right) \cdot d_i Ra$$

که در آن $d_i SE$ نشاندهنده کارایی جدایش لحظه‌ای است. با تقسیم طرفین رابطه بر $d_i Ra$ می توان نوشت:

$$\frac{d_i SE}{d_i Ra} = \left(\frac{c_i}{f}\right) - \left(\frac{1-c_i}{1-f}\right)$$

و نهایتاً با اعمال شرط بیشینه بودن کارایی خواهیم داشت:

$$\left. \frac{d_i SE}{d_i Ra} \right|_{Rac} = 0 \Rightarrow \left(\frac{c_i}{f}\right) = \left(\frac{1-c_i}{1-f}\right) \Rightarrow c_i = f$$

$$\Rightarrow \left(\frac{c_i}{f}\right) = 1$$

۷- فهرست منابع

[۱] رضایی، بهرام، (۱۳۸۰): *تکنولوژی زغالشویی*، مرکز نشر دانشگاه امیر کبیر، تهران، چاپ اول.

[۲] کازرانی نژاد، رضا؛ بنیسی، صمد؛ (۱۳۸۳): "معرفی شاخصی جهت تعیین میزان شستشوپذیری زغالسنگ مطالعه موردی: خوراک کارخانه زغالشویی زرنند"، کنفرانس مهندسی معدن ایران، جلد ۲، ص ۱۱۷۱ تا ۱۱۸۰.

[3] Majumder, A.K. and Barnwal, J.P.; 2004; "Development of a new coal washability index"; Minerals Engineering, Vol.17, No.1, pp. 93-96.

[۴] کازرانی نژاد، رضا؛ (۱۳۸۱): تعیین شاخص شستشوپذیری زغالسنگهای کرمان، پایان نامه کارشناسی ارشد، بخش مهندسی معدن دانشگاه شهید باهنر، کرمان.

[5] Drzymala, J. and Ahmed, H.A.M.; 2005; "Mathematical equations for approximation of separation results using the Fuerstenau upgrading curves"; International Journal of Mineral Processing, Vol. 76, No.1-2. pp. 55-65.

[6] Salama, A.I.A.; 1998; "Coal washability characteristics index utilizing the M-curve and the CM-curve"; International Journal of Mineral Processing, Vol. 55, No. 2, pp.139-152.

[7] Govindarajan, B. and Rao, T.C.; 1994; "Indexing the washability characteristics of coal"; International Journal of Mineral Processing, Vol. 42, No.3-4, pp. 285-293.

[8] Salama, A.I.A, Wang, N.; 2001; "A coal processing characteristics index"; CIM Bulletin, Vol. 94, No. 1054, pp. 79-82.

[9] Oki, T., Yotsumoto, H. and Owada, S.; 2004; "Calculation of degree of mineral matter liberation in coal from sink-float separation data"; Minerals Engineering, Vol. 17, No. 1, pp. 39-51.