



معرفی شاخصی جهت تعیین میزان شستشوپذیری زغالسنگ مطالعه موردی: خوراک کارخانه زغالشویی زرند

رضا کازرانی نژاد^۱، صمد بنی‌سی^۲

۱- کارشناس ارشد فرآوری مواد معدنی، گروه تحقیقات و خدمات مهندسی همت

۲- دانشیار فرآوری مواد معدنی، بخش مهندسی معدن دانشگاه شهید باهنر کرمان

kazerani@hemmat.ir

banisi@mail.uk.ac.ir

چکیده

یکی از عوامل دخیل در مقدار راندمان کارخانه‌های زغالشویی، میزان شستشوپذیری خوراک آن است. در گذشته شاخص‌های متعددی از جمله SWI، GWI و WINSA برای کمی کردن شستشوپذیری زغالسنگ‌ها تعریف شده است اما همه این شاخص‌ها تمام نیازهای کارخانه زغالشویی را برآورده نمی‌کنند. یکی از علل این امر این است که این شاخص‌ها برای کل دامنه منحنی شستشوپذیری تعریف شده‌اند در حالیکه با توجه به نیاز مشتری، دامنه خاصی از منحنی برای فرآیند تغليظ اهمیت دارد و روند منحنی در خارج از این بازه تاثیری در کارکرد کارخانه ندارد. از این‌رو یک شاخص شستشوپذیری جدید به نام Majumder Washability Index (MWI) معرفی شده است که اساس آن بر مبنای وجود مقدار مواد با چگالی نزدیک به چگالی جدایش در روش‌های ثقلی است. با استفاده از این شاخص می‌توان خاکستر مطلوب کنسانتره و چگالی جدایش بهینه برای شستشوی یک زغالسنگ خاص را تعیین نمود. با استفاده از داده‌های غرق و شناورسازی آزمایشگاهی، مقایسه خواص شستشوپذیری چندین زغال از معادن مختلف تامین کننده خوراک کارخانه زغالشویی زرند در دامنه ابعادی (۱۰+۱) میلی‌متر، نشان داده شده است.

واژه‌های کلیدی: زغالسنگ، شاخص شستشوپذیری، مدلسازی، جدایش ثقلی، غرق و شناورسازی

مقدمه

پرعيارسازی ثقلی یکی از مهمترین روش‌های جدایش در مدارهای زغالشویی است. معمولاً آزمایش‌های غرق و شناورسازی نمونه زغالسنگ نماینده برای پیشگویی راندمان و خاکستر زغالسنگ شسته شده، در یک پرعيارساز ثقلی ایده‌آل در چگالی‌های مختلف انجام می‌شود. رسم منحنی‌های شستشوپذیری از داده‌های غرق و شناورسازی نمونه زغالسنگ، برای بدست آوردن اطلاعات سودمند مربوط به سهولت تولید کنسانتره



با کیفیت مطلوب، روش معمولی است. عموماً سهولت شستشوی یک زغال‌سنگ خاص بصورت کیفی از شیب منحنی شستشوپذیری تعیین می‌شود. تعدادی شاخص عددی مثل شاخص شستشوپذیری [۱]، عدد شستشوپذیری [۲]، شاخص شستشوپذیری (Govindarajan Washability Index GWI) [۳]، شاخص (Washability in the Neighbourhood of SWI) [۴] و شاخص (Salama Washability Index) [۵] برای آنالیزهای مقایسه‌ای خواص شستشوپذیری زغال‌سنگ‌های مختلف با استفاده از یک پارامتر مفرد ایجاد شده‌اند. نکته مهم این است که درجه سختی در شستشوی یک نوع زغال در وزن مخصوصی معادل با چگالی جدایش، بستگی به مقدار موادی از آن زغال دارد که در دامنه 1 ± 0 چگالی جدایش قرار می‌گیرند. این مواد به NGM (Near Gravity Material) یا مواد نزدیک به چگالی جدایش معروف هستند. با درنظر گرفتن این همسایگی حول چگالی جدایش در واقع نوعی انعطاف‌پذیری در عملیات قائل شده‌ایم. این ایده شاخص شستشوپذیری را از حالت تئوری خارج کرده، کاربرد آن را عملی می‌سازد چراکه در عمل نیز هیچ مداری در یک چگالی کاملاً ثابت و مشخص کار نمی‌کند بلکه در حین کار، چگالی محیط دچار نوساناتی می‌شود. شاخص‌های GWI و SWI این پارامتر مهم را در نظر نگرفته‌اند و مقایسه خواص شستشوپذیری زغال‌های مختلف با هر یک از این شاخص‌ها به دلایل زیر ممکن است گمراه‌کننده باشد:

- چگالی جدایش لازم برای تولید کنسانترهای با خاکستر مطلوب برای زغال‌سنگ‌های مختلف و نیز مقدار NGM برای هر زغال فرق می‌کند.
- دو زغال می‌توانند مقادیر شاخص مشابه داشته باشند، اما محتوى NGM مخصوص آنها ممکن است متفاوت باشد، لذا سختی شستشوپذیری این دو زغال با یکدیگر متفاوت است.
- دو زغال با NGM یکسان ممکن است توزیع‌های خاکستر متفاوتی داشته باشند.
- درجه سختی شستشوپذیری نسبت به توزیع NGM در چگالی‌های مختلف، متفاوت است. هیچیک از دو شاخص قادر به تعیین مشکل‌ترین دامنه چگالی برای شستشو نیستند.

با توجه به موارد فوق آقایان Majumder و Barnwal (۲۰۰۴)، برای تولید اطلاعات سودمندتر از داده‌های غرق و شناورسازی، شاخصی را ارایه داده‌اند [۶] که اگرچه بر مبنای GWI است ولی بر خلاف GWI در دامنه خاصی از منحنی شستشوپذیری که مربوط به محدوده عملیاتی کارخانه می‌باشد، تعریف شده است. ضمن اینکه با آن می‌توان وضعیت شستشوپذیری زغال را در چگالی‌های جدایش مختلف و نیز در کنسانترهایی با خاکستر متفاوت بررسی کرد. از این به بعد برای سهولت، این شاخص جدید به پاس تلاش آقای Majumder Washability Index (MWI) نامگذاری می‌شود. در این مقاله مبانی MWI و مقادیر آن برای دامنه ابعادی (۱۰-۱۰+) میلیمتر زغال‌سنگ پنج معدن از معادن تامین کننده خوارک کارخانه زغالشویی زرند با نام‌های هشونی، پابدانا جنوی، پابدانا اصلی، اسدآباد زیرزمینی و گلتوت رویاز محاسبه شده



است. این دامنه ابعادی در واحد جیگ کارخانه شسته می‌شود. لذا می‌توان از نتایج این تحقیق در کنترل موثر مدار جیگ استفاده نمود.

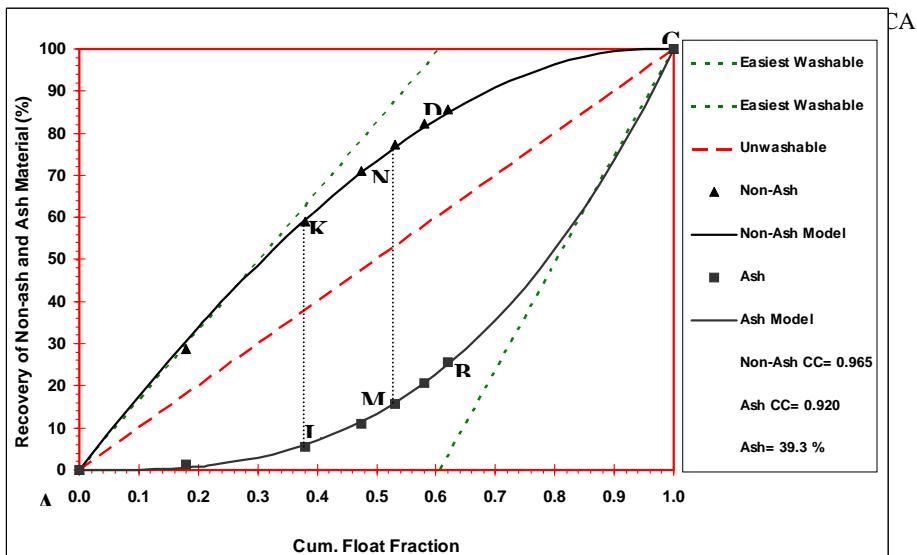
معرفی شاخص MWI

Rao و Govindarajan (۱۹۹۴) نشان داده‌اند که از آنالیز غرق و شناورسازی یک زغالسنگ، می‌توان منحنی‌های بازیابی مواد غیرخاکستر (R_N) و مواد خاکستر (R_A) را به عنوان تابعی از وزن تجمعی کسری زغالسنگ شناورشده رسم کرد [۳]. بنابراین منحنی‌های بازیابی (نشان داده شده در شکل ۱) با استفاده از دو معادله زیر رسم می‌شود:

$$R_N = \frac{100 * X * (100 - CA)}{100 - HA}$$

$$R_A = \frac{100 * X * CA}{HA}$$

که X وزن کسر تجمعی از خوراک است که شناور شده است. در واقع X همان راندمان بصورت کسری است.



شکل ۱- منحنی‌های بازیابی برای دامنه ابعادی (۰-۱۰+) میلیمتر زغالسنگ معدن پابدانا اصلی

جدول ۱- داده‌های آزمایش غرق و شناورسازی برای دامنه ابعادی (۰-۱۰+) میلیمتر زغالسنگ معدن پابدانا اصلی



بخش‌های چگالی (g/cm³)	چگالی جدایش (g/cm³)	وزن جدایش (%)	خاکستر (%)	وزن تجمعی (%)	خاکستر تجمعی (%)
- ۱/۳	۱/۳	۱۷/۹	۳/۰	۱۷/۹	۳/۰
۱/۳-۱/۴	۱/۴	۳۸/۰	۸/۲	۲۰/۱	۵/۸
۱/۴-۱/۵	۱/۵	۴۷/۴	۲۲/۳	۹/۴	۹/۰
۱/۵-۱/۶	۱/۶	۵۳/۱	۳۲/۵	۵/۷	۱۱/۶
۱/۶-۱/۷	۱/۷	۵۸/۰	۴۱/۱	۴/۹	۱۴/۱
۱/۷-۱/۸	۱/۸	۶۱/۹	۴۷/۸	۳/۹	۱۶/۲
+ ۱/۸	۲/۲	۳۸/۱	۷۶/۹	۱۰۰/۰	۳۹/۳

در شکل ۱، منحنی‌های ABC و ADC به ترتیب نشانگر منحنی‌های بازیابی مواد غیرخاکستر و مواد خاکستر هستند. مقدار مواد نزدیک به چگالی جدایش (NGM) در یک چگالی جدایش خاص (مثلاً چگالی جدایش ۱/۵ گرم بر سانتیمتر مکعب) به عنوان اختلاف در وزن کسری تجمعی شناور شده در همسایگی $1/1 \pm 0.05$ آن نقطه از چگالی تعریف می‌شود. با این تعریف و با استفاده از داده‌های جدول ۱:

$$\text{کسر وزن تجمعی شناور شده در چگالی } 1/4 = \frac{\text{وزن تجمعی شناور شده در } NGM}{\text{وزن تجمعی شناور شده در چگالی } 1/5} = \frac{0.151}{0.151 + 0.0531 - 0.0380} = 0.151$$

با توجه به منحنی‌های بازیابی مواد تشکیل دهنده خاکستر و غیرخاکستر، توزیع NGM در چگالی ۱/۵ بصورت هندسی با مساحت ناحیه KLMN در شکل ۱ بیان می‌شود. این ناحیه در چگالی‌های جدایش مختلف برای یک زغال خاص متفاوت خواهد بود. لذا شاخص ارایه شده MWI بصورت زیر تعریف می‌شود:

$$MWI = ((KLMN / (ABC + ADC)) - 1) * 100 \quad (۳)$$

همچنین از شکل ۱ می‌توان استنباط کرد که مقدار MWI از صفر تا صد به ترتیب برای شستشوی آسان تا شستشوی مشکل تغییر می‌کند.

از معادله (۳) معلوم می‌شود که MWI برای یک زغال خاص با توجه به تغییر چگالی جدایش، تغییر می‌کند. از اینرو آسانی نسبی شستشو در یک چگالی جدایش می‌تواند بر مبنای مقدار MWI در آن چگالی جدایش تعیین شود. بر همین اساس میتوان مقادیر MWI را برای زغال‌های مختلف تعیین کرد. این مقادیر رامی‌توان بصورت نمودار بر حسب چگالی جدایش یا خاکستر مطلوب کنسانتره رسم کرد. مقادیر MWI از داده‌های غرق و شناورسازی یک زغال خاص طبق روش توضیح داده شده زیر بدست می‌آید.



MWI محاسبه

Rao و Govindarajan (۱۹۹۴) نشان داده‌اند که منحنی‌های بازیابی برای مواد خاکستر (R_A) و مواد غیرخاکستر (R_N) می‌تواند با معادلات درجه سوم مطابق زیر توصیف شود:

$$R_N = ax + bx^r + cx^r \quad (4)$$

$$R_A = px + qx^r + rx^r \quad (5)$$

که x وزن کسری تجمعی و a, b, c, p, q و r مقادیر ثابت هستند. مقادیر این ثابت‌ها از منحنی‌های بازیابی با استفاده از روش حداقل مربعات تخمین زده می‌شود.

در شکل ۱ ABC و ADC مساحت بین منحنی‌های $= \text{مساحت زیر منحنی } ABC - \text{مساحت زیر منحنی } ADC$

$$\begin{aligned} &= \int_0^1 (ax + bx^2 + cx^3) dx - \int_0^1 (px + qx^2 + rx^3) dx \\ &= \frac{[6(a-p) + 4(b-q) + 3(c-r)]}{12} \end{aligned}$$

با توجه به جدول ۱ می‌توان نشان داد که خطوط عمودی LK و MN رسم شده در شکل ۱ بیانگر بازیابی‌های مربوط به مواد تشکیل دهنده خاکستر و غیرخاکستر در همسایگی $1/5 \pm 0/0$ چگالی جدایش هستند. لذا با توجه به شکل ۱:

مساحت ناحیه KLMN

$$\begin{aligned} &= \int_{0.380}^{0.531} (ax + bx^2 + cx^3) dx - \int_{0.380}^{0.531} (px + qx^2 + rx^3) dx \\ &= \left[\frac{[6(a-p)X^2 + 4(b-q)X^3 + 3(c-r)X^4]}{12} \right]_{X=0.380}^{X=0.531} - \\ &\quad \left[\frac{[6(a-p)X^2 + 4(b-q)X^3 + 3(c-r)X^4]}{12} \right]_{X=0.380}^{X=0.531} \quad (7) \end{aligned}$$

با استفاده از معادلات (۷)، (۶) و (۳) و با دانستن مقادیر ثابت‌ها با روش کمینه کردن مجموع مربعات خطأ، MWI در چگالی جدایش $1/5$ برای داده‌های غرق و شناورسازی جدول ۱ بدست می‌آید.



مقادیر MWI برای زغالسنگ معادن

عموماً زغالسنگ‌های خوراک کارخانه زغالشویی زرند به خاطر NGM زیاد، از لحاظ شستشوپذیری مشکل هستند. برای محاسبه MWI در چگالی‌های جدایش مختلف از داده‌های غرق و شناورسازی موجود در جدول ۲ استفاده شده است [۵]. شاخص شستشوپذیری GWI پیشنهاد شده توسط Govindarajan و Rao نیز به منظور مقایسه برای این زغالسنگ‌ها محاسبه شده است. مقادیر ثابت‌های محاسبه شده از منحنی‌های بازیابی برای تمام زغالسنگ‌های مذکور با مقادیر GWI وابسته در جدول ۳ نشان داده شده است. داده‌های این جدول بر حسب مقادیر GWI بصورت نزولی ردیف شده است.

جدول ۲- داده‌های غرق و شناورسازی مربوط به دامنه ابعادی (۱۰+۱۰) میلیمتر زغالسنگ معادن مختلف

پابداها اصلی		پابداها جنبی		اسدآباد زیرزمینی		گلتوت روباز		هشونی		چگالی جدایش (g/cm³)	چگالی چگالی (g/cm³)	بخش‌های
وزن خاکستر	وزن خاکستر	وزن خاکستر	وزن خاکستر	وزن خاکستر	وزن خاکستر	وزن خاکستر	وزن خاکستر	وزن خاکستر	وزن خاکستر			
تجمعی (%)	تجمعی (%)	تجمعی (%)	تجمعی (%)	تجمعی (%)	تجمعی (%)	تجمعی (%)	تجمعی (%)	تجمعی (%)	تجمعی (%)			
۳/۰	۱۷/۹	۳/۰	۱۲/۵	۵/۷	۲۷/۰	۳/۷	۲۲/۲	۴/۳	۲۶/۱	۱/۳	-۱/۳	
۸/۲	۲۰/۱	۸/۲	۳۱/۷	۸/۷	۱۷/۳	۶/۵	۱۷/۱	۸/۴	۲۹/۶	۱/۴	۱/۳-۱/۴	
۲۲/۳	۹/۴	۲۰/۰	۹/۴	۲۶/۱	۵/۴	۱۶/۶	۴/۹	۲۱/۶	۷/۳	۱/۵	۱/۴-۱/۵	
۳۲/۵	۵/۷	۲۸/۶	۴/۳	۳۵/۹	۲/۵	۲۶/۹	۲/۲	۳۰/۹	۴/۰	۱/۶	۱/۵-۱/۶	
۴۱/۱	۴/۹	۴۰/۲	۷/۷	۳۶/۵	۶/۳	۳۴/۰	۱/۵	۳۹/۳	۲/۹	۱/۷	۱/۶-۱/۷	
۴۷/۸	۳/۹	۵۲/۵	۶/۱	۳۹/۴	۴/۸	۴۱/۵	۱/۱	۴۵/۷	۳/۲	۱/۸	۱/۷-۱/۸	
۷۶/۹	۳۸/۱	۷۴/۷	۲۸/۳	۷۷/۵	۳۶/۷	۸۶/۹	۵۱/۰	۷۶/۵	۲۷/۰	۲/۲	+۱/۸	

با استفاده از این ثابت‌ها و روش توصیف شده، مقادیر MWI برای دامنه ابعادی (۱۰+۱۰) میلیمتر هر یک از این زغال‌ها در چگالی‌های جدایش مختلف محاسبه شده است (جدول ۲). مقادیر MWI به عنوان تابعی از چگالی جدایش مطابق شکل ۲ رسم شد.

با توجه به منحنی‌های شستشوپذیری رسم شده، خاکستر کنسانتره تثویریکی در این چگالی‌ها محاسبه شده، سپس مقادیر MWI به عنوان تابعی از خاکستر کنسانتره تولیدی مطابق شکل ۳ رسم شد.



جدول ۳- مقادیر ثابت‌ها، MWI و GWI برای زغالسنگ دامنه ابعادی (۱۰+۱) میلیمتر معدن مختلف

MWI(S.G.=1,5)	GWİ	r	q	p	c	b	a	زغالسنگ
۲۱/۸	۶۳/۸	۸۷/۸	۱۴/۶	-۲/۳	-۲۵/۱	-۵۶/۴	۱۸۱/۴	پابدانا اصلی
۱۱/۸	۶۳/۱	۱۱۷/۰	-۲۵/۸	۸/۹	-۳۳/۹	-۳۹/۱	۱۷۳/۱	اسدآباد زیرزمینی
۱۷/۸	۶۳/۱	۱۸۲/۵	-۱۰۶/۱	۲۳/۶	-۷۶/۹	۴۴/۷	۱۳۲/۲	هشوئی
۱۰/۳	۵۹/۰	۹۳/۶	۸/۱	-۱/۷	-۵/۵	-۹۴/۵	۲۰۰/۰	گلتوت روباز
۲۰/۶	۵۷/۴	۱۱۵/۲	-۲۱/۷	۶/۵	-۵۸/۰	۱۰/۹	۱۴۷/۱	پابدانا جنوبی

شکل‌های ۲ و ۳ نشان می‌دهند که آسانی نسبی شستشوی یک زغال خاص بطور محسوسی نسبت به تغییرات چگالی جدایش یا تغییرات خاکستر کنسانتره تولیدی، تغییر می‌کند. همچنین مشاهده می‌شود که آسانی نسبی شستشوی زغالسنگ‌های مختلف نیز بطور محسوسی نسبت به چگالی جدایش و نیز خاکستر کنسانتره تولیدی متغیر است.

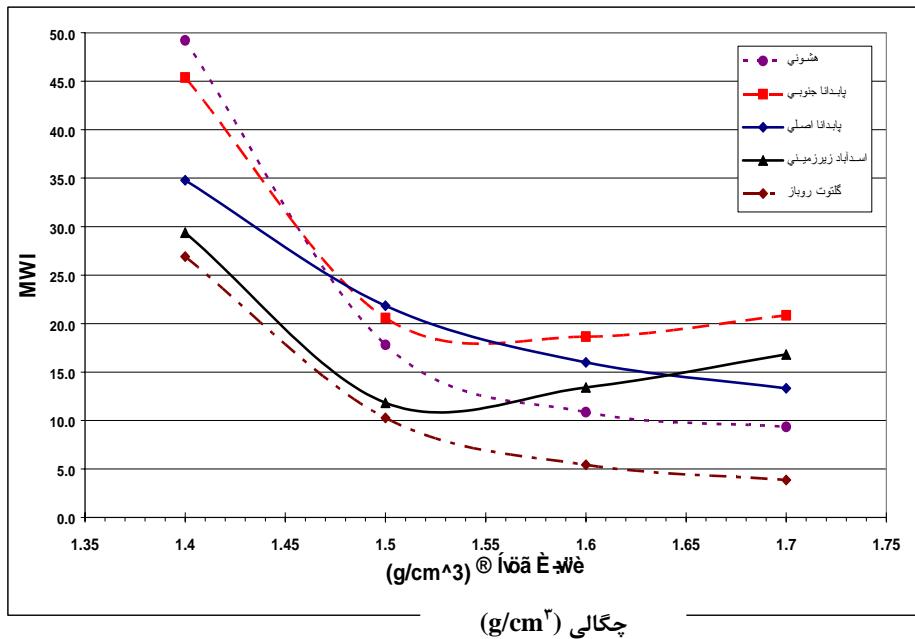
با استفاده از منحنی‌های MWI (شکل‌های ۲ و ۳) می‌توان شستشوپذیری زغال‌های مختلف را برای بدست آوردن کنسانترهای با خاکستر مطلوب مورد ارزیابی قرار داد در حالیکه بر مبنای مقادیر GWI قادر به انجام چنین ارزیابی نیستیم. از طرف دیگر ارزیابی شستشوپذیری بر اساس GWI ممکن است موجب قضاوت‌های نادرستی شود. برای مثال با توجه به جدول ۳، زغالسنگ معدن پابدانا اصلی دارای بالاترین GWI است در حالیکه همزمان دارای همین مقدار MWI در چگالی جدایش ۱/۵ گرم بر سانتیمترمکعب می‌باشد. به عبارت دیگر این زغال از لحاظ GWI دارای بهترین شستشوپذیری و از لحاظ MWI دارای بدترین شستشوپذیری در میان زغال‌های مذکور در جدول ۳ است. نمونه دیگر اینکه زغال‌های معدن اسدآباد زیرزمینی و هشوئی دارای GWI یکسان ۶۳/۱ هستند در حالیکه مقادیر MWI برای آنها به ترتیب ۱۱/۸ و ۱۷/۸ است که این مقدار نسبتاً اختلاف فاحشی است.

همانطور که از جدول ۳ و شکل‌های ۲ و ۳ پیداست، از دیدگاه MWI زغال معدن گلتوت روباز دارای بهترین شستشوپذیری در بین سایر زغال‌های است اما از دیدگاه GWI این زغال از لحاظ شستشوپذیری در بین پنج معدن در رتبه چهارم قرار دارد.

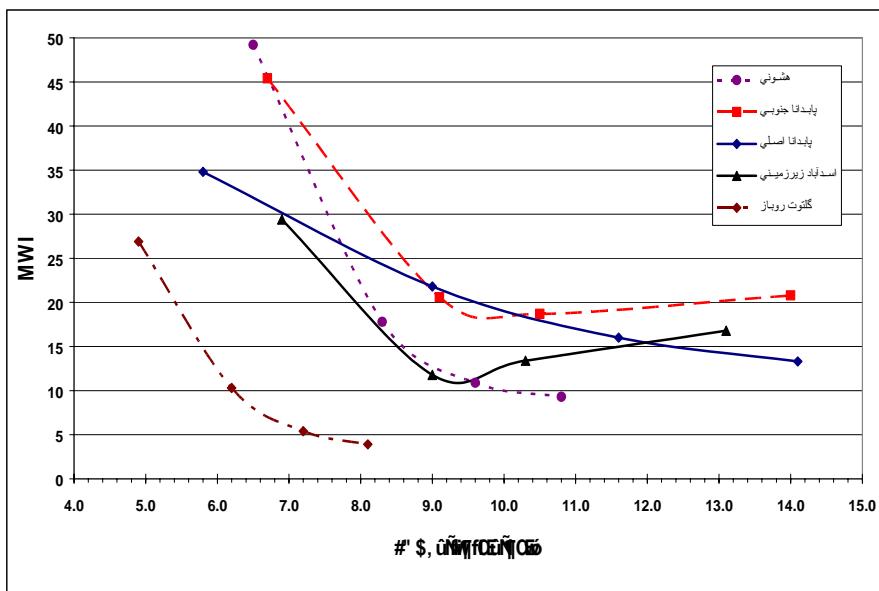
شکل ۲ نشان می‌دهد که برای زغالسنگ‌های معدن پابدانا جنوبی و اسدآباد زیرزمینی یک چگالی بهینه وجود دارد که در آن چگالی MWI کمترین مقدار را دارد لذا برای کنترل هرچه بهتر عملیات واحد جیک می‌توان از این چگالی‌ها در برنامه‌ریزی چگالی تنظیمی جیک استفاده نمود. همانطور که در شکل ۳ دیده می‌شود، مقادیر MWI برای زغال‌های معدن گلتوت روباز و پابدانا جنوبی به ترتیب در کنسانترهای با خاکستر ۵/۱٪ و ۱۲/۹٪ مساوی ۲۰ است. این امر نشان می‌دهد که دو زغالسنگ



علیرغم شستشوپذیری یکسان، ممکن است دو کنسانتره با خاکسترها متفاوت تولید کنند لذا برای بهینه‌سازی راندمان یا خاکستر یا هر دو باید نسبت‌های مناسبی از این دو زغال با هم ترکیب شوند. در هر حال از آنجاییکه شاخص MWI نیز از مدل کردن نقاط آزمایشگاهی بدست می‌آید، عاری از خطای نیست ولی از آنجاییکه دامنه خاص و مورد نظری از منحنی شستشوپذیری را برای ارزیابی مورد استفاده قرار می‌دهد، نسبت به GWI دارای رجحان است. ضمن اینکه با استفاده از این شاخص میتوان محدوده چگالی عملیاتی بهینه و نیز مقدار خاکستر کنسانتره را تعیین نمود به نحوی که از پتانسیل شستشوپذیری خوراک بطور مطلوب استفاده شود.



شکل ۲- رابطه MWI با چگالی جدایش برای زغالهای مختلف



شکل ۳- رابطه MWI با خاکستر کنسانتره زغالهای مختلف

نتیجه‌گیری

- شاخص MWI نسبت به شاخص‌های SWI و GWI برتری دارد.
- با استفاده از این شاخص علاوه بر مقایسه شستشوپذیری زغالسنگ‌های مختلف، می‌توان خاکستر کنسانتره را تعیین و خطوط تولید را بر مبنای آن تنظیم نمود تا در فرآیند زغالشویی از خواص شستشوپذیری خوارک حداکثر استفاده بعمل آید.
- چگالی بهینه جهت مدارهای ثقلی با این شاخص قابل تعیین است.

تقدیر و تشکر

بدینوسیله از همکاری اعضای گروه همت و تمام عزیزانی که ما را در انجام این پژوهه یاری دادند، تشکر می‌شود.



منابع

- [۱] Sarkar, G.G., et al (۱۹۶۲). An index for the comparison and correlation of washability characteristics of coal, IV Coal Preparation Congress, Paper E4, Harrogate
- [۲] Sarkar, G.G., et al (۱۹۷۷). Sedimentation Patterns: do they offer clues to coal quality in *World Coal*, ۱۰—۱۳
- [۳] Govindarajan, B. and Rao, T.C. (۱۹۹۴). Indexing the washability characteristics of coal, in *Int. J. Min. Proc.*, ۴۲, ۲۸۵
- [۴] Salama, A.I.A. & Wang, N. (۲۰۰۱). A coal processing characteristics index, in *CIM Bulletin*, (Sept.), ۷۹
- [۵] کاizarانی نژاد، رضا (۱۳۸۱). تعیین شاخص شستشویزیری زغالسنگ‌های کرمان، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، بخش معدن، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شهید باهنر، کرمان
- [۶] Majumder, A.K. and Barnwal, J.P. (۲۰۰۴). Development of new coal washability index, in *Minerals Engineering*, ۱۷, ۹۳-۹۶