Archive of SID

نشریه علمی-پژوهشی "مهندسی معدن"
Iranian Journal of Mining Engineering
(IRJME)

دوره یازدهم، شماره ۳۲، پاییز ۱۳۹۵، صفحه ۱تا۸
Vol.11, No. 32, 2016, pp1-8

"یادداشت فنی"

بررسی آزمایشگاهی تأثیر دانسیته بار بر توان کشی آسیاهای گردان

رشاد حسامی[۱]؛ مصطفی مالکی مقدم[۲]؛ صمد بنیسی[۳*]

۱- کارشناس ارشد فرآوری مواد معدنی، دانشگاه شهید باهنر کرمان، Hesami@kmpc.ir
۲- دکترای فرآوری مواد معدنی، دانشگاه ولیعصر (عج) رفسنجان، Maleki@mail.vru.ac.ir
۳- استاد، بخش مهندسی معدن، دانشگاه شهید باهنر کرمان، Banisi@mail.uk.ac.ir

(دریافت۷ اسفند ۱۳۹۲، پذیرش۱۸ فروردین ۱۳۹۴)

چکیده

توان‌کشی یکی از مهم‌ترین پارامترهای کنترلی آسیاهای گردان محسوب می‌شود. توان کشی به عوامل مختلفی از جمله دانسیته بار، خصوصیات ماده معدنی، اندازه گلوله و نوع آسیا وابسته است. اغلب در روابط ارائه شده جهت تخمین توان‌کشی، برای فضای خالی بین گلوله‌ها که تأثیر مستقیمی بر دانسیته بار دارد، عددی در حدود ۴۰٪ در نظر گرفته می‌شود. در این تحقیق فضای خالی بین ذرات، از نسبت حجمی آب قرار گرفته بین ذرات به کل حجم تعیین شد. نتایج نشان داد که فضای خالی بین گلوله‌ها و ماده معدنی، به شکل و توزیع ابعادی آن‌ها بستگی دارد. مقدار فضای خالی برای گلوله و ماده معدنی در حالت تک‌اندازه به ترتیب، از ۳۹٪ و ۳۸/۱٪برای اندازه ۱۲ میلی‌متری به ۳۷/۸٪ و ۳۷/۱٪ برای اندازه ۸ میلی‌متری کاهش یافت. فضای خالی برای زنجیره گلوله پیشنهادی Bond با بزرگترین اندازه گلوله ۱۱/۴ و ۸/۸ میلی‌متر به ترتیب ۳۶٪ و ۳۵/۲٪ به‌دست آمد. برای ماده معدنی با بزرگ‌ترین اندازه ذره ۱۱/۴ میلی‌متر و زنجیره ابعادی پیشنهادی Bond فضای خالی برابر با ۳۴/۵٪ اندازه‌گیری شد. نتایج نشان داد که فضای خالی بین گلوله ها در حالت زنجیره ابعادی کمتر از حالت تک‌اندازه است و با کوچک‌تر شدن اندازه بزرگ‌ترین گلوله زنجیره، فضای خالی کاهش می‌یابد. به‌منظور بررسی تغییرات دانسیته بار بر توان‌کشی در آسیاهای صنعتی، زنجیره ابعادی گلوله آسیای گلوله‌ای مجتمع مس سرچشمه در ابتدای راه‌اندازی و در حین کار که گلوله ها تحت سایش قرار گرفته‌اند با کوچک مقیاس کردن گلوله‌ها تحت آزمایش قرار گرفتند. مقدار فضای خالی در این دو حالت که نشانه تغییر توزیع دانه‌بندی گلوله‌ها در اثر سایش طی عملیات بود، به ترتیب ۳۳/۵٪ و ۳۶/۱٪ به‌دست آمد. این میزان کاهش(۲/۶٪) در فضای خالی به‌دلیل اضافه کردن گلوله جبرانی با بزرگ‌ترین اندازه تشخیص داده شد. در این تحقیق، رابطه تخمین توان کشی Bond برای آسیاهای گلوله‌ای با در نظر گرفتن دانسیته بار تصحیح شد.

کلمات کلیدی

توان کشی، فضای خالی، دانسیته بار

*نویسنده مسئول مکاتبات

www.SID.ir

Archive of SID

۱- مقدمه

دستیابی به روابطی که از طریق آن ها بتوان تخمین صحیحی از میزان انرژی مورد نیاز برای آسیاکنی را به‌دست آورد، همواره مورد توجه طراحان، سازندگان و کارکنان کارخانه‌ها بوده و بر این مبنا روابط مختلفی ارائه شده است. بیشتر سازندگان آسیا روابط مخصوص به خود برای محاسبه توان مورد نیاز دارند. روابط مورد استفاده توسط طراحان ساده‌تر بوده و اغلب حداکثر توان را با توجه به میزان پرشدگی و سرعت دوران آسیا محاسبه می‌کنند. از سوی دیگر، روابط ارائه‌شده توسط محققان اغلب پیچیده‌تر بوده و شامل اندازه‌گیری مقدار متغیرهایی است که دسترسی به آن‌ها بسیار مشکل و یا با توجه به شرایط عملیاتی، غیرممکن است. بنابراین تلاش‌های انجام‌شده در سال‌های اخیر، در راستای ارائه مدل‌هایی بوده است که علاوه بر سادگی، بتواند به‌طور صحیحی توان مورد نیاز در آسیاها را پیش‌بینی کند و عوامل مختلف عملیاتی را در نظر گیرد [۳-۱].

اولین تلاش‌ها برای پیش‌بینی توان‌کشی در آسیاهای گردان در سال ۱۹۱۹ میلادی انجام شد [۴]. متأسفانه اغلب مدل‌های ارائه‌شده فاقد اطلاعات مربوط به کاربرد عملی در مقیاس صنعتی می‌باشند و تنها نتایج بررسی‌های آزمایشگاهی گزارش شده است. حتی در مورد رابطه Bond [۵،۶] نیز که عنوان می‌شود بر پایه اطلاعات آسیای گلوله‌ای صنعتی بوده است، هیچ اطلاعاتی منتشر نشده است.

از روابطی که برای محاسبه توان کشی در آسیاهای خودشکن و نیمه‌خودشکن ارائه شده است می‌توان به رابطه Austin اشاره کرد که فقط برای این نوع آسیاها کاربرد دارد [۷]. رابطه Harris و همکاران [۸] و رابطه Morrell [۳،۹] توان مورد نیاز را برای آسیاهای گلوله‌ای، خودشکن و نیمه‌خودشکن محاسبه می‌کنند. بنا بر بررسی انجام‌شده به جز رابطه ارائه‌شده توسط Austin، سایر روابط ارائه‌شده، برای پیش‌بینی توان برای استفاده در آسیاهای خودشکن و نیمه‌خودشکن مناسب نیستند [۳]. امروزه از رابطه Bond برای محاسبه توان و انتخاب آسیاهای گلوله‌ای استفاده می‌شود و از روابط مهم در تخمین توان کشی این نوع آسیاها به شمار می‌رود. در این رابطه، توان لازم بر حسب کیلووات (kW_b) به ازای هر تن گلوله با استفاده از پرشدگی (J)، سرعت آسیا (C_S)، طول (L)، قطر داخلی آسیا (D) و ضریب اندازه گلوله (S_S) محاسبه می‌شود (رابطه ۱).

$$kW_b = \left(4.879\, D^{0.3}(3.2-3J)C_S\left(1-\frac{0.1}{2^{(9-10C_S)}}+S_S\right)\right) \qquad (۱)$$

برای تعیین توان کشی کل بار داخل آسیا، مقدار به‌دست آمده از رابطه ۱ باید در مقدار تناژ گلوله داخل آسیا ضرب شود. در ادامه نشان داده خواهد شد که در رابطه ۱، Bond مقدار ثابتی را برای فضای خالی بین گلوله ها در نظر گرفته است.

وزن کل گلوله داخل آسیا از رابطه ۲ قابل تعیین است.

$$W = J\pi\frac{D^2}{4}L\rho_{Bulk} \qquad (۲)$$

با توجه به رابطه ۲، دانسیته توده گلوله (ρ_{Bulk})، در محاسبه توان‌کشی مؤثر است. دانسیته توده‌ای اغلب با در نظر گرفتن دانسیته گلوله‌ها و فضای خالی بین گلوله‌ها تعریف می‌شود. بنابراین، به‌دست آوردن میزان فضای خالی بین گلوله‌ها برای آسیاهای گلوله‌ای و یا مواد معدنی برای آسیاهای خود شکن و نیمه‌خود شکن بسیار مهم است. به‌همین دلیل، تاکنون روش-های مختلف آزمایشگاهی و محاسباتی استفاده شده است. Morrell برای به‌دست آوردن توان لازم برای آسیاهای با مشخصات معلوم، مقدار فضای خالی بین همه اندازه گلوله‌ها را برابر با مقدار ثابت ۴۰ درصد در نظر گرفت [۳]. Sichalwe و همکاران، فضای خالی بین ذرات را، با ترکیب روش محاسباتی و روش آزمایشگاهی دنبال کردن ذرات نشان‌دار، به‌دست آوردند [۱۰].

خصوصیت ماده معدنی و به‌ویژه دانسیته توده‌ای آن از عوامل مهم در توان کشی آسیاهای خودشکن و نیمه‌خود شکن است و عدم توجه کافی به این موضوع باعث ایجاد خطا در تحلیل پدیده‌های مشاهده شده در آسیاهای صنعتی می‌شود. در ادامه چند مورد از این مشاهدات صنعتی ذکر می‌شود تا اهمیت موضوع تحقیق روشن‌تر شود.

الف) به‌دلیل اهمیت پرشدگی (نسبت حجم مواد به حجم مفید درون آسیا) در آسیاهای نیمه‌خودشکن کارخانه فرآوری مجتمع سنگ آهن گل‌گهر سیرجان، آسیا در زمان‌های مختلف به‌طور ناگهانی متوقف می‌شد و علاوه بر توان آن، پرشدگی کلی آسیا با اندازه‌گیری مستقیم از درون آسیا تعیین می‌شود. در برخی از این موارد، علیرغم یکسان بودن میزان توان کشی آسیا، پرشدگی‌های بسیار متفاوتی به‌دست می‌آمد. این در حالی بود که تفاوت قابل مشاهده‌ای در نوع ماده معدنی در دو حالت گزارش نشده بود. به‌عنوان مثال، در یک مورد میزان پرشدگی بار (گلوله و ماده معدنی) داخل آسیای نیمه‌خودشکن شماره ۲ این مجتمع با اندازه گیری مستقیم از داخل آسیا در زمانی که ۴٪ گلوله داشت و توان کشی ۲۲۰۰ کیلووات بود، ۳۵٪ به‌دست آمد. در همین شرایط و توان یکسان در زمانی دیگر

www.SID.ir

Archive of SID

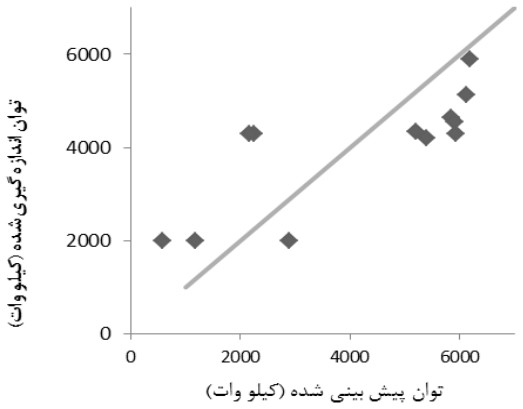
میـزان پرشـدگی ۱۹/۷٪ انـدازه گیـری شـد. ایـن تفـاوت ۱۵ درصدی در پرشدگی که در توان یکسان به‌دست آمـد، یکـی از عوامل مهم شـروع ایـن تحقیـق در خصـوص تحلیـل مسـئله و بررسی عدم توانایی روابط موجود در تخمین تـوان کشـی در دو حالت بود. در روابط ارائه شده تنها عامل قابـل تغییـر، دانسـیته سنگ معدن بود که با تغییر آن نیز امکـان توجیـه ایـن پدیـده حاصل نشد.

ب) در آسیای نیمه‌خودشکن کارخانه‌ی فـرآوری مجتمـع مـس میدوک شهربابک، میزان پرشدگی بار داخل آسـیا بـا توجـه بـه داده‌های به‌دست آمده از وزن سنج‌ها پیش‌بینی می‌شدند. نکته قابل توجه در این اندازه‌گیری‌ها ایـن بـود کـه در برخـی مـوارد برای یک میزان قرائت شده از وزن سنج‌ها میزان پرشدگی‌هـای مختلفی با اندازه‌گیری مستقیم بار درون آسیا به‌دست مـی‌آمـد. حتی در بعضی موارد، علیرغم معمول بودن داده‌های وزن‌سنج‌ها به‌دلیل پرشدگی زیاد بار داخـل آسـیا، مـواد از دهانـه خروجـی آسیا بیرون می‌ریخـت. چـون زمـانی کـه از وزن‌سـنج‌هـا بـرای تخمین پرشدگی استفاده می‌شود، دانسیته توده‌ای ثـابتی بـرای بار فرض می‌شود، هر تغییـر بـارزی در دانسـیته تـوده‌ای مـواد تفسیر میزان قرائت‌های وزن سنج‌ها را با مشکل مواجه می‌کند.

ج) آقای قوهستانی با توجـه بـه تـوان‌هـای انـدازه‌گیـری شـده آسیاهای نیمه‌خودشکن کارخانه فرآوری مجتمع مس میدوک و توان به‌دست آمده از مدل Morrell، نشـان داد کـه در مقـادیر توان کشی پایین، مقدار توان به‌دست آمـده از مـدل از واقعیـت کمتر و در میزان توان‌کشی‌های بالا، مقدار توان مدل از واقعیت بیشتر بود (شکل ۱) [۱۱]. ایشان علت این امر را به ضرایب به‌کار برده شده در مدل از جمله تخلخل مخلـوط گلولـه و بخـش درشت سنگ معدن و کسـر حجمـی جامـد در پالـپ خروجـی مربوط دانستند. Morrell پیشنهاد کرده است که در صورت در دست نداشتن این پارامترها از اعداد پیشنهادی او استفاده شود. این پارامترهـا بـر مقـدار دانسـیته بـار داخـل آسـیا تأثیرگـذار می‌باشند. این نتایج نشان داد که در صورت تغییر دانسیته توده بار این مدل به‌خوبی قادر به پیش‌بینی توان نیست.

د) در آسیاهای گلوله‌ای، معیار معمولی کـه از آن بـرای اضـافه کردن گلوله‌های جبرانی به آسیا استفاده می‌شـود، تـوان کشـی است. به عبارت دیگـر، بـا بررسـی رونـد تغییـر تـوان کشـی در خصوص اضافه کردن گلوله‌های جبرانی تصمیم‌گیری می‌کننـد. در آسیاهای گلوله‌ای نسبت حجمی گلوله به ماده معدنی که در بین آن‌ها قرار می‌گیرد زیاد است و همین امر باعث می‌شود کـه توان کشی اغلب به میزان گلولـه بسـتگی داشـته باشـد. بـرای خردایش مناسب، فراهم کردن فضاهایی با اندازه هـای مختلـف بـرای ذرات و همچنـین ایجـاد طیـف وسـیعی از نیـروی وارده توسط گلوله ها باید از زنجیره گلوله مناسب استفاده کرد. بـرای رسیدن به این هدف، در زمان راه اندازی آسیا، زنجیره گلولـه‌ای بر اساس پیشنهاد Bond استفاده می‌شود و فرض بـر آن اسـت که با سایش یکنواخت گلوله ها و اضافه کردن گلوله جبرانی بـا بزرگترین اندازه، همواره زنجیـره اولیـه در آسـیا وجـود خواهـد داشت. ولی به دلیل عدم سـایش یکنواخـت گلولـه‌هـا، زنجیـره ابعادی گلوله‌ها دستخوش تغییر می‌شود که این امر باعث تغییر در دانسیته بار می‌شود. آگاهی از این میزان تغییر و تأثیر آن بـر توان کشی، می‌تواند به کنترل بهتر عملیات خردایش به واسـطه استفاده حداکثری از آسیا منجر شود.

چون دانسیته عملیاتی بار بسـته بـه شـرایط عملیـاتی متفـاوت است، در نتیجه ثابت فرض کردن مقدار فضای خـالی در روابـط تعیین توان کشی، باعث ایجاد خطا مـی‌شـود. در ایـن تحقیـق، تأثیر اندازه و شکل ذرات بر فضای خالی بـین آن‌هـا کـه باعـث تغییر دانسیته توده‌ای بار می‌شود، بررسی شد.



شکل ۱: مقایسه توان واقعی و توان به‌دست آمده از مدل Morrell [۱۱] (خط نشان‌دهنده برابری توان‌های اندازه‌گیری شده و مدل است.)

۲- روش تحقیق

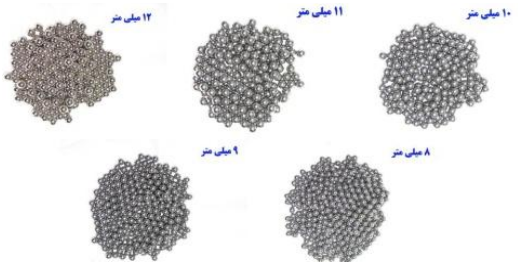
۲-۱- تعیین فضای خالی بین ذرات

به‌منظور تعیین دانسیته بار داخل آسیا در حالت سکون (استاتیک)، از گلوله و ماده معدنی در ابعاد مختلف استفاده شد. در این آزمایش‌ها از گلوله‌هایی با جنس فولاد و با دانسیته ۷/۸ گرم بر سانتی‌مترمکعب به‌عنوان ذرات با شکل یکنواخت،

www.SID.ir

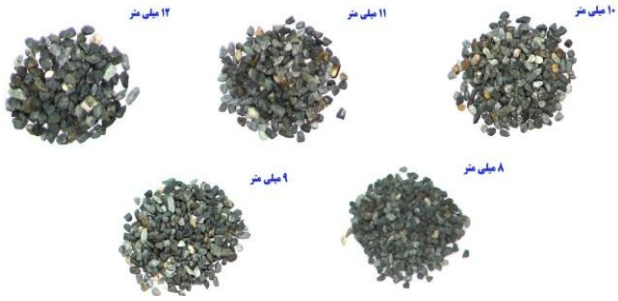
Archive of SID

استفاده شد (شکل ۲).



شکل ۲: گلوله‌های مورد استفاده در آزمایش‌ها

به‌منظور تعیین دانسیته‌ی بار در حالتی که ذرات دارای شکل غیریکنواخت باشند، از ماده معدنی (سنگ آهن) استفاده شد. این نمونه سنگ آهن از بار برگشتی کارخانه فرآوری شرکت صنعتی و معدنی سنگ آهن گل گهر سیرجان تهیه شد. این مواد، به‌عنوان ذرات با ابعاد بحرانی شناخته می شوند چون در آسیای نیمه‌خودشکن خرد نشده و از آن خارج شده بودند. دلیل انتخاب سنگ آهن از مدار بار برگشتی به علت سخت بودن این ذرات بود. نکته مهم در خصوص این مواد عدم وجود ترک، درزه و شکاف در آن‌ها است که در اندازه‌گیری فضای خالی بین ذرات با استفاده از آب، منجر به نتایج دقیق‌تر می‌شود. (شکل ۳).



شکل ۳: ماده معدنی (سنگ آهن) مورد استفاده در آزمایش‌ها

۲-۱-۱-ذرات در اندازه‌های یکسان

آزمایش‌های مربوط به تعیین فضای خالی بین گلوله‌ها و ماده معدنی تک اندازه، در اندازه‌های ۸، ۹، ۱۰، ۱۱ و ۱۲ میلی‌متر انجام شد.

۲-۱-۲- ذرات با توزیع ابعادی

پس از انجام آزمایش‌های مربوط به گلوله‌ها و ماده معدنی در حالت تک اندازه، آزمایش‌هایی مشابه زنجیره‌ی ابعادی اول و سوم Bond [۱۲] که بزرگ‌ترین اندازه گلوله‌ی آن‌ها به ترتیب ۱۱/۴و ۸/۹ میلی‌متر(۴/۵ و ۳/۵ اینچ) است، با کوچک مقیاس کردن انجام شد (جدول ۱). همچنین آزمایش دیگری با استفاده از ماده معدنی در حالتی که توزیع ابعادی آن، مشابه زنجیره‌ی اول Bond با بزرگ‌ترین اندازه ذره۱۱/۴ میلی‌متر بود، انجام شد. توزیع ابعادی بر مبنای اندازه گلوله‌های ۱۲ و ۸ میلی‌متر و با کوچک مقیاس کردن اندازه گلوله‌های ارائه شده در جدول ۱ تشکیل داده شد.

جدول۱: ترکیب گلوله‌های پیشنهادی Bond برای شروع کار آسیا، (مقادیر بر حسب درصد وزنی)[۱۲]

اندازه گلوله های جبرانی (اینچ)	۴/۵	۴	۳/۵	۳	۲/۵	۲	۱/۵
۴/۵	۲۳/۰						
۴	۳۱/۰	۲۳/۰					
۳/۵	۱۸/۰	۳۴/۰	۲۴/۰				
۳	۱۵/۰	۲۱/۰	۳۸/۰	۳۱/۰			
۲/۵	۷/۰	۱۲/۰	۲۵/۵	۳۹/۰	۳۴/۰		
۲	۳/۸	۶/۵	۱۱/۵	۱۹/۰	۴۶/۰	۴۰/۰	
۱/۵	۱/۷	۲/۵	۴/۵	۸/۰	۱۷/۰	۴۵/۰	۵۱/۰
۱	۰/۵	۱/۰	۱/۵	۳/۰	۶/۰	۱۵/۰	۴۹/۰
کل (درصد)	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰

۲-۱-۳- تعیین فضای خالی بین گلوله‌ها در آسیای گلوله‌ای مجتمع مس سرچشمه

برای مشخص شدن تفاوت فضای خالی بین گلوله‌ها در ابتدای راه‌اندازی و در حین کار آسیا که سایش اتفاق افتاده است، آزمایش‌هایی با کوچک مقیاس کردن اندازه این گلوله‌ها در این دو حالت انجام شد. توزیع اولیه‌ی دانه‌بندی گلوله در ابتدای راه‌اندازی آسیا در جدول ۲ نشان داده شده است.

جدول ۲ : توزیع ابعادی اولیه گلوله‌ی آسیای گلوله‌ای مجتمع مس سرچشمه

اندازه (mm)	۷۶	۶۳/۵	۵۰/۸	۳۸/۱	۳۱/۸	۲۵/۴
وزن (درصد)	۲۶/۵	۲۲/۳	۱۷/۸	۱۳/۱	۱۱/۱	۹

بنیسی و همکاران در سال ۱۹۹۹ [۱۳] پس از تخلیه کامل گلوله‌ها از یکی از آسیاهای اولیه کارخانه تغلیظ مجتمع مس سرچشمه، گلوله‌ها را دسته‌بندی، شمارش و تعیین وزن کردند. نتایج این دانه‌بندی در جدول ۳ نشان داده شده است.

جدول۳: نتایج دانه‌بندی گلوله‌های درون آسیای اولیه مجتمع مس سرچشمه [۱۳]

اندازه (mm)	+۷۰	-۷۰+۶۰	-۶۰+۵۰	-۵۰+۴۰	-۴۰	گلوله‌های ناقص
وزن (درصد)	۴۷/۵	۲۷/۲	۱۴/۱	۵/۸	۱/۶	۴/۰

www.SID.ir

Archive of SID

در اثر ساییده شدن، گلوله‌هایی با ابعاد مختلف در آسیا ظاهر شدند که در بررسی در گروه‌های مختلف جای داده شدند. مقایسه نتایج جدول های ۱ و۲ نشان می‌دهد که دانه‌بندی گلوله‌ها در حین کار بر خلاف پیش‌بینی ابتدایی، متفاوت از دانه‌بندی اولیه است. بنیسی و همکاران این عدم تطابق را به سایش غیر یکنواخت گلوله‌ها (بر خلاف انتظار اولیه) به دلیل متفاوت بودن سختی گلوله‌ها از سطح تا مرکز آن‌ها مربوط دانستند. این امر باعث شده بود تا گلوله‌ها پس از سایش تا اندازه معینی شکل کروی خود را از دست دهند.

۲-۲- روش کار

برای انجام آزمایش، از یک ظرف بزرگ با حجم ۲/۳ لیتر استفاده شد که بر اساس نوع آزمایش از گلوله و یا ماده معدنی پر می‌شد. اندازه ظرف مورد نظر طوری انتخاب شد تا نسبت قطر ظرف به قطر ذرات بیش از ۱۰ به ۱ باشد تا اثر دیواره قابل صرف نظر کردن باشد. ابتدا استوانه پر از مواد می‌شد و در مرحله بعد آب ریخته می‌شد تا سطح آب با بار داخل استوانه هم سطح شود. پس از ریختن آب در استوانه، تعدادی حباب هوا محبوس می‌شد که برای خارج کردن حباب‌ها، استوانه به تعداد معینی (۵ بار) تکان داده می‌شد تا حباب‌ها راهی برای رسیدن به سطح پیدا کنند. کسر فضای خالی از نسبت حجم آب درون ظرف به حجم کل ظرف به‌دست آمد. چون تکرارپذیری آزمایش ها در نتایج بسیار مهم است، آزمایش برای هر اندازه از ذرات و زنجیره‌ها ۱۰ بار تکرار شد و متوسط اندازه‌گیری‌ها به‌عنوان میزان فضای خالی بین ذرات در نظر گرفته شد. در هر مورد انحراف معیار که نشان‌دهنده میزان خطای اتفاقی بود نیز محاسبه می‌شد. با توجه به انتخاب ماده معدنی بدون درز و ترک، و بررسی انحراف معیار داده ها (۰/۱ تا ۰/۲ درصد)، دقت آزمایش خوب ارزیابی شد.

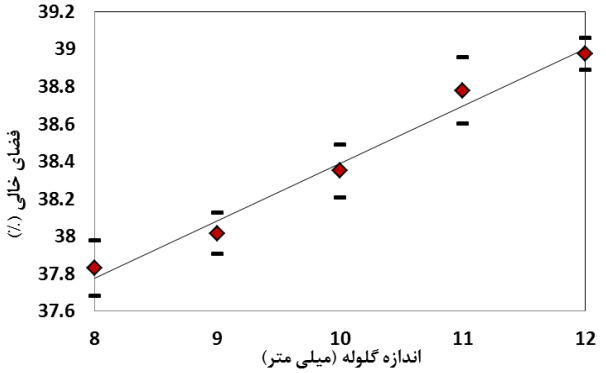
۳- ارائه یافته‌ها و بحث

۳-۱- فضای خالی بین ذرات با شکل یکنواخت

۳-۱-۱- گلوله‌های تک اندازه

متوسط و انحراف معیار فضای خالی برای هر اندازه گلوله در شکل ۴ نشان داده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود میزان فضای خالی بین گلوله‌ها با کوچک تر شدن قطر ذرات از ۱۲ به ۸ میلی‌متر کمتر می‌شود. کمتر شدن فضای خالی بین ذرات با قطر آن‌ها نسبت مستقیم دارد. این نتیجه به‌دلیل انحنا بیشتر در گلوله های بزرگ‌تر قابل پیش‌بنیی بود ولی نکته مهم این آزمایش ها، کمی کردن این نوع ارتباط برای استفاده در روابط تخمین توان کشی است.

بررسی آماری داده‌ها نشان داد که با ۹۵ درصد اطمینان، تفاوت بین مقدار فضای خالی بین گلوله‌ها در اندازه‌های یکسان معنی‌دار است. میزان خطا از طریق تکرار اندازه‌گیری، ۰/۵٪ به‌دست آمد.



شکل ۴: تغییرات فضای خالی به دست آمده نسبت به قطر گلوله‌ها (متوسط: علامت لوزی؛ محدوده ۹۵ درصد اطمینان: دو خط موازی)

۳-۱-۲- گلوله‌ها با توزیع ابعادی

آزمایش‌های انجام شده با استفاده از زنجیره ابعادی گلوله پیشنهادی Bond برای اندازه‌های اول و سوم که بزرگ‌ترین اندازه گلوله آن‌ها به ترتیب ۱۱/۴ و ۸/۸ میلی متر می‌باشد، نشان داد که با کاهش اندازه بزرگ‌ترین گلوله‌ی زنجیره ابعادی، از ۱۱/۴ به ۸/۸ میلی متر، مقدار فضای خالی بین گلوله‌ها ۰/۸ درصد کاهش می‌یابد. در جدول ۴ نتایج نشان داده شده است.

جدول ۴: فضای خالی بین گلوله‌ها با توزیع ابعادی

اندازه گلوله (میلی‌متر)	فضای خالی (٪)	انحراف معیار(٪)
زنجیره اندازه اول Bond (۱۱/۴میلی متر)	۳۶/۰	۰/۱
زنجیره اندازه سوم Bond (۸/۸ میلیمتر)	۳۵/۲	۰/۱

۳-۲- فضای خالی بین ذرات با شکل غیریکنواخت

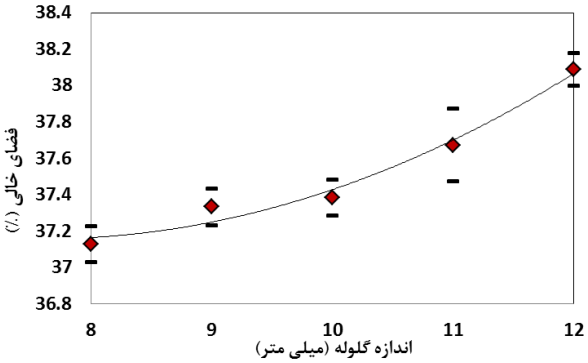
۳-۲-۱- ماده معدنی در حالت تک اندازه

برای بررسی تأثیر شکل ذرات در مقدار فضای خالی بین آن‌ها، در آزمایش‌های تعیین فضای خالی، از ماده معدنی به‌عنوان ذرات با شکل غیریکنواخت استفاده شد. نتایج نشان داد

www.SID.ir

Archive of SID

که همانند گلوله‌ها، با کوچک شدن قطر ذرات از ۱۲ به ۸ میلی‌متر، مقدار فضای خالی کاهش می‌یابد (شکل ۵). علاوه بر مشاهده روند کاهشی در مقدار فضای خالی بین ذرات ماده معدنی، برای هر اندازه از ذرات، این مقدار کاهش برای ماده معدنی ۰/۹ (از۳۸ به ۳۷/۱) درصد ولی برای گلوله ۱/۲ (از۳۹ به ۳۷/۸) درصد بود. دلیل این تفاوت در مقادیر فضای خالی، به شکل و نحوه چیدمان ذرات مربوط می‌شود. در زمان استفاده از ماده معدنی، اشکال نامنظم ذرات، باعث قرارگیری فشرده‌تر ذرات در کنار هم و در نتیجه کاهش فضای خالی می‌شود. با بررسی آماری نتایج، تفاوت بین مقادیر فضای خالی برای ماده معدنی در اندازه‌های یکسان در سطح اطمینان ۹۵ درصد معنادار تشخیص داده شد.



شکل ۵: تغییرات فضای خالی نسبت به اندازه ذرات (ماده معدنی در حالت تک اندازه)

۳-۲-۲- ماده معدنی با توزیع ابعادی

در حالت استفاده از زنجیره ابعادی (زنجیره اول Bond؛ ۱۱/۴ میلی متر)، علاوه بر گلوله، مقدار فضای خالی برای ذرات ماده معدنی اندازه‌گیری شد که میانگین آن برابر ۳۴/۵ درصد با انحراف معیار ۰/۲درصد به‌دست آمد. مقدار فضای خالی بین ذرات با اندازه‌های متفاوت ۱/۵ درصد کمتر از مقدار فضای خالی بین گلوله‌ها در اندازه‌های متفاوت است که مربوط به شکل و فشردگی بیشتر ذرات می‌شود.

۳-۳- فضای خالی بین گلوله‌های آسیای مجتمع مس سرچشمه

آزمایش‌هایی برای تعیین مقدار فضای خالی بین گلوله‌ها در ابتدای راه‌اندازی و در حین عملیات آسیای اولیه مجتمع مس سرچشمه با کوچک مقیاس کردن آن‌ها انجام شدند. مقادیر فضای خالی به‌دست آمده در جدول ۵ نشان داده شده است. همان‌طور ملاحظه می‌شود مقدار فضای خالی در ابتدای راه‌اندازی آسیا به دلیل بازه وسیع تر گلوله‌ها و وجود گلوله‌های ریز در بین گلوله‌های درشت ۳۳/۵ درصد و در حین عملیات که گلوله ها سایش پیدا کرده و توزیع ابعادی آن‌ها متفاوت شده ۳۶/۱ درصد به‌دست آمد. این کاهش ۲/۶ درصدی فضای خالی، به‌دلیل کمبود گلوله‌های ریز به واسطه اضافه کرده گلوله‌های جبرانی با بزرگ‌ترین اندازه در حین کار آسیا و سایش غیریکنواخت گلوله‌ها بوده است.

جدول ۵: مقدار فضای خالی بین گلوله‌ها در ابتدای راه‌اندازی و در حین عملیات آسیای مجتمع مس سرچشمه

	فضای خالی (٪)	انحراف معیار(٪)
زنجیره‌ی گلوله در زمان راه‌اندازی آسیا	۳۳/۵	۰/۱
زنجیره‌ی گلوله در حین کار آسیای گلوله‌ای	۳۶/۱	۰/۲

۳-۴- تأثیر دانسیته بار در توان کشی آسیا

میزان فضای خالی بین گلوله‌ها، از عوامل مؤثر در مقدار دانسیته‌ی بار توده ای است. چون با تغییر اندازه گلوله‌ها میزان فضای خالی بین گلوله‌ها تغییر می‌کند، در نتیجه دانسیته بار در گلوله‌ها با اندازه مختلف، متفاوت خواهد بود. همان‌طور که اشاره شده است بین مقدار دانسیته بار و توان کشی آسیا یک رابطه‌ی مستقیم وجود دارد. در جدول ۶ مشخصات آسیای گلوله‌ای اولیه مس سرچشمه آمده است.

جدول ۶: مشخصات آسیای گلوله‌ای مس سرچشمه

قطر(متر)	۵/۰۳
طول(متر)	۸/۲۳
درصد پرشدگی(٪)	۴۰
سرعت(نسبت به سرعت بحرانی)	۷۰ درصد
اندازه بزرگ‌ترین گلوله(میلی‌متر)	۷۶

با توجه به توزیع ابعادی گلوله ها در ابتدای راه اندازی، میزان فضای خالی بین گلوله‌ها ۳۳/۵ درصد به‌دست آمد. در این حالت مقدار توان با استفاده از رابطه‌های ۱ و ۲، برابر ۳۷۶۴ کیلووات به دست آمد. در حین کار آسیا با داشتن توزیع ابعادی گلوله ها و با احتساب فضای خالی ۳۶/۱ درصد بین گلوله‌ها که در تعیین دانسیته توده ای(ρ_{Bulk}) مؤثر است مقدار توان آسیا با استفاده از رابطه‌های ۱ و ۲، ۳۶۰۰ کیلووات به‌دست آمد. این بدین معنا است که اگر این تغییر دانسیته توده‌ای در نظر گرفته شود کاهش ۴/۵ درصدی (از ۳۷۶۴ به ۳۶۰۰ کیلو وات) قابل محاسبه است. در غیر این صورت، در روابط ۱ و۲ اگر میزان

www.SID.ir

Archive of SID

فضای خالی همواره ثابت فرض شود، این کاهش در توان کشی قابل تشخیص نخواهد بود.

در کارخانه‌هایی که به‌طور خودکار از حلقه بسته توان کشی و اضافه کردن گلوله های جبرانی استفاده می‌شود، اگر گلوله‌ها مصرف شوند و همزمان با آن‌ها به دلیل تغییر در توزیع ابعادی گلوله ها و کم شدن فضای خالی ممکن است در توان کشی تفاوتی مشاهده نشود. به‌عبارت دیگر، با اینکه سطح بار در آسیا کاهش پیدا کرده ولی به دلیل کاهش فضای خالی و افزایش دانسیته توده ای این دو همدیگر را خنثی کنند و در روند توان کشی تفاوت معنی داری مشاهده نشود. در این حالت، به‌دلیل اضافه نکردن گلوله جبرانی کارایی آسیاکنی تحت تأثیر قرار می‌گیرد.

در کارخانه هایی مانند مس سرچشمه که با کنترل مستقیم سطح بار گلوله های جبرانی اضافه می‌شود، مشکل به نحو دیگری در عملیات تأثیر می‌گذارد. با تغییر در دانه‌بندی گلوله-ها و کم شدن فضای بین آن‌ها و در نتیجه کاهش سطح بار، گلوله های جبرانی با بزرگ‌ترین اندازه اضافه می‌شوند. این کار باعث می‌شود که سهم گلوله‌های بزرگ نسبت به توزیع اولیه بیشتر شود (جدول های ۲ و ۳) و بر تولید ذرات ریز تأثیر منفی بگذارد. سهم گلوله های بزرگتر از ۷۰ میلی‌متر در حین عملیات ۴۷/۵ درصد به‌دست آمد در حالی که در ابتدا ۲۶/۵ درصد بود. این تفاوت چشمگیر ۲۱ درصدی نقش زیادی در کاهش تولید ذرات ریز (محصول) به واسطه کاهش سطح جانبی گلوله‌ها و در نتیجه مکانیزم سایش دارد.

۳-۵- اصلاح رابطه توان کشی Bond

همان‌طور که در مقدمه بیان شد، برای محاسبه توان کشی در آسیاهای گلوله‌ای از رابطه تجربی Bond استفاده می‌شود. در این رابطه به‌طور مستقیم به دانسیته بار اشاره‌ای نشده است. با توجه به نتایج با تغییر در دانه‌بندی ذرات، مقدار دانسیته توده بار تغییر می‌کند و یک مقدار ثابتی را نمی‌توان برای آن فرض کرد.

برای به‌دست آوردن مقدار دقیق‌تر توان کشی در آسیاهای گلوله‌ای، مقدار فضای خالی در رابطه ۱ باید در نظر گرفته شود. برای انجام این کار رابطه ۱ که مقدار توان کشی به ازای هر تن بار داخل آسیا را محاسبه می‌کند در تناژ کل گلوله ضرب شده (رابطه ۲) تا رابطه ۳ به‌دست آید. شایان ذکر است که ضریب بزرگی گلوله (S_s) در آخر به رابطه اضافه می‌شود.

$$kW = 3.832D^{2.3}LJ\rho_{bulk}(3.2-3J)C_S\left(1-\frac{0.1}{2^{(9-10C_S)}}\right) \quad (۳)$$

و از طرفی، بین دانسیته توده‌ای، دانسیته گلوله و فضای خالی می‌توان رابطه (۴) را نوشت:

$$\rho_{bulk} = \rho_{ball}(1-\varphi) \quad (۴)$$

با جای‌گذاری مقدار دانسیته توده بار از رابطه ۴ در رابطه ۳، و گنجاندن ضریب اندازه گلوله، معادله‌ای تصحیح شده برای تعیین مقدار توان کشی در آسیاهای گلوله‌ای به‌دست آمد (رابطه ۵).

$$kWb = 3.832\,D^{2.3}L\rho_{Ball}(3.2J-3J^2)(1-\varphi)\left(1-\frac{0.1}{2^{(9-10C_S)}}\right)C_S + S_s \quad (۵)$$

فضای خالی (φ) را می‌توان بر اساس زنجیره گلوله و با استفاده از روشی که در این تحقیق مورد استفاده قرار گرفت (کوچک مقیاس کردن زنجیره گلوله و استفاده از روش آزمایش شرح داده شده در بخش ۲-۱)، به‌دست آورد یا این‌که از رابطه زیر استفاده کرد.

$$\varphi = 0.0031B + 0.324 \quad (۶)$$

در این رابطه، B حداکثر اندازه گلوله جبرانی مورد استفاده بر حسب میلی‌متر است. این رابطه از برازش داده‌های حاصل از آزمایش‌های تعیین فضای خالی زنجیره گلوله باند به‌دست آمد. این آزمایش ها برای زنجیره اول و سوم Bond که بزرگترین اندازه گلوله آن‌ها به ترتیب ۱۱/۴ و ۸/۸ میلی‌متر است، انجام شدند. به‌دلیل تجربی بودن رابطه (۶)، نتایج آن تنها در محدوده‌ای که در آن آزمایش ها انجام شده معتبر است.

۴- نتیجه‌گیری

- فضای خالی بین گلوله‌ها در حالت تک اندازه با کاهش ابعاد از ۸ تا ۱۲ میلی‌متر، از مقدار ۳۹ درصد به ۳۷/۸ درصد و برای ماده معدنی از مقدار ۳۸/۱ درصد به ۳۷/۱ درصد کاهش یافت.
- فضای خالی بین گلوله‌ها برای زنجیره ابعادی اول و سوم از

www.SID.ir

Archive of SID

جدول Bond به‌ترتیب ۳۶ و ۳۵/۲ درصد به‌دست آمد. این مقدار برای ماده معدنی و برای زنجیره ابعادی اول Bond ۳۴/۵ درصد اندازه‌گیری شد.

- کاهش فضای بین ذرات ماده معدنی در مقایسه با گلوله با همان اندازه نشان داد که شکل ذرات عامل مؤثری در تعیین فضای خالی است. در حالت ذرات با توزیع ابعادی به‌دلیل جور شدگی و فشردگی بیشتر، میزان فضای خالی کاهش یافت.

- در زنجیره ابعادی مختلف گلوله، با کاهش اندازه‌ی بزرگ‌ترین گلوله‌ی موجود در زنجیره، فضای خالی کاهش پیدا کرد.

- زنجیره ابعادی گلوله آسیای گلوله‌ای مجتمع مس سرچشمه در ابتدای راه‌اندازی و در حین کار که گلوله‌ها تحت سایش قرار گرفته‌اند با کوچک مقیاس کردن گلوله‌ها تحت آزمایش قرار گرفتند. مقدار فضای خالی در این دو حالت که نشانه تغییر توزیع دانه‌بندی گلوله‌ها در اثر سایش طی عملیات بود، به ترتیب ۳۳/۵٪ و ۳۶/۱٪ به‌دست آمد. این میزان کاهش(۲/۶٪) در فضای خالی به دلیل اضافه کردن گلوله جبرانی با بزرگ‌ترین اندازه تشخیص داده شد.

- رابطه‌ی اصلاح شده‌ای برای محاسبه توان‌کشی بر اساس رابطه Bond ارائه شد که در آن مقدار دانسیته توده بار در نظر گرفته شده است.

۵- تقدیر و تشکر

از آقای دکتر غلامعباس پارساپور و سایر اعضای مرکز تحقیقات مهندس کاشی‌گر که در انجام این تحقیق یاری رساندند و همچنین پژوهشکده سنگ آهن و فولاد گل گهر به دلیل تامین مواد معدنی، تشکر و قدردانی می‌شود.

۶- ضمایم

kW_b: کیلووات به ازای هر تن گلوله

kW : کیلووات

D: قطر آسیا (متر)

J: کسر پرشدگی بار داخل آسیا

C_S: کسری از سرعت بحرانی

S_S: ضریب اندازه گلوله

W: تناژ بار داخل آسیا (تن)

L: طول آسیا (متر)

ρ_{Ball}: دانسیته گلوله (گرم بر سانتی مترمکعب)

ρ_{Bulk}: دانسیته توده گلوله (گرم بر سانتی‌متر مکعب)

φ: کسر فضای خالی

مراجع

[1] Mulenga F. K., Moys M. H.; 2014; "*Effects of slurry filling and mill speed on the net power draw of a tumbling ball mill*", Minerals Engineering, vol. 56, pp 45-56.

[2] Rezaeizadeh M., Fooladi M., Powell M.S., Mansouri S.H.; 2010; "*Experimental observations of lifter parameters and mill operation on power draw and liner impact loading*", Minerals Engineering, vol. 23, pp 1182–1191.

[3] Morrell S.; 1993; "*The optimization of power draw in wet tumbling mills*", Ph.D. Thesis, The University of Queensland, Australia.

[4] Davis E.W.; 1919; *"Fine crushing in ball mills"*, AIME Transactions, vol 61, pp 250-296.

[5] Bond F.C.; 1961; *"Crushing and grinding calculations"*, Allis Chalmers, Publication No. 07R9235B, Revised Jan.

[6] Bond F.C.; 1962; *"Additions and revision to "Crushing and grinding calculations" (Bond, 1961) "*.

[7] Austin L.G.; 1990; *"A mill power equation for SAG mills"*, Minerals and Metallurgical Processing, pp 57 – 63.

[8] Harris C.C.; Scknock E.M.; Arbiter N.; 1985; *"Grinding mill power consumption"*, Mineral Processing and Technology Review, vol 1, pp 297 – 345.

[9] Morrell S.; 2003; *"Grinding mills: How to accurately predict their power draw"*, XXII International Mineral Processing Congress, pp 50-59.

[10] Sichalwe K., Govender I., Mainza A.N.; 2011; "*Characterising porosity of multi-component mixtures in rotary mills*", Minerals Engineering, vol. 24, pp 276–281.

[۱۱] قوهستانی، ولی اله؛ ۱۳۹۰؛ **"افزایش کارایی آسیای نیمه‌خودشکن کارخانه پرعیارکنی مجتمع مس میدوک"**؛ پایان نامه مقطع کارشناسی ارشد، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان.

[12] Bond F.C.; 1958; *"Grinding ball size selection"*, Mining Engineering, pp 592-595.

[13] Banisi S.; Langari-zadeh G.; Pourkani M.; Kargar M.; Laplante A.; 2000; "*Mesasurement of ball size distribution in a 8 m * 5 m primary mill of Sarcheshmeh copper mine*", CIM Bulletin, vol 9.3, No. 1042, 110-121.

www.SID.ir