

بهینه‌سازی خردایش ناشی از انفجار با رویکرد معدن-کارخانه در معدن شماره ۱ سنگ آهن گل‌گهر

امین حکمی^۱؛ حمید منصوری^۲؛ محمدعلی ابراهیمی فرسنگی^{۳*}

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی استخراج معدن، دانشگاه شهید باهنر کرمان، Hakami.amin@gmail.ir
۲- دانشیار بخش مهندسی معدن، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شهید باهنر کرمان، hmansouri@uk.ac.ir
۳- دانشیار بخش مهندسی معدن، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شهید باهنر کرمان، maebrahimi@uk.ac.ir
(دریافت ۴ آذر ۱۳۹۴، پذیرش ۸ خرداد ۱۳۹۶)

چکیده

میزان خردایش سنگ حاصل از انفجار نه تنها بر عملیات بارگیری و باربری تأثیرگذار است، بلکه بر فرآیندهای پایین‌دستی نظیر سنگ‌شکنی و آسیاکنی هم تأثیر مستقیم می‌گذارد. از آن جمله می‌توان به ظرفیت آسیاهای خودشکن و نیمه خودشکن اشاره کرد که به توزیع ابعادی خوراک ورودی بسیار وابسته است. در این تحقیق برای بهینه‌سازی خردایش ناشی از انفجار بر اساس رویکرد معدن-کارخانه، تأثیر خردایش ناشی از انفجار بر عملکرد آسیاهای خودشکن و نیمه خودشکن در معدن شماره ۱ سنگ آهن گل‌گهر بررسی شد. ابتدا وضعیت خردایش انفجارهای معمول این معدن در سنگ آهن (الگوی ۵×۶ متر) با روش آنالیز تصویری مطالعه شد. همزمان وضعیت سختی سنگ ارسالی به سنگ‌شکن از انفجارهای معمول معدن نیز بررسی شد. در مرحله بعد مدل مناسب برای پیش‌بینی خردایش الگوی انفجار معدن انتخاب شده و کارایی آن در پیش‌بینی خردایش سنگ حاصل از انفجار ارزیابی شد. سپس با بررسی ۲۰ الگوی قابل اجرا در معدن، الگوی جدید ۴×۵ متر بر اساس میزان خردایش و سایر عوامل فنی و اقتصادی انتخاب و جایگزین الگوی معمول شد. بررسی عملکرد آسیاها در معدن نشان داد که در زمان اجرای الگوی پیشنهادی، به‌طور میانگین، ظرفیت آسیاها ۸ درصد نسبت به میانگین سایر ماه‌های سال افزایش یافته است. هم‌چنین انرژی ویژه خردایش به‌طور متوسط ۵ درصد کاهش یافته است.

کلمات کلیدی

خردایش ناشی از انفجار، رویکرد معدن-کارخانه، معدن شماره ۱ سنگ آهن گل‌گهر

۱- مقدمه

خردایش یکی از مهم‌ترین و حساس‌ترین نتایج هر انفجار در معدن روباز است که تأثیر آن بر مراحل بعدی چرخه تولید معدن یعنی بارگیری و باربری و مهم‌تر از آن بر فرآیند فرآوری مواد معدنی، امری اثبات شده است. به‌طوری که خردایش مناسب علاوه بر افزایش راندمان تولید، باعث کاهش هزینه‌های کلی فرآیند معدن‌کاری نیز می‌شود. تحقیقات نشان داده است که ظرفیت و بهره‌وری فرآیند خردایش به توزیع ابعادی مواد خرد شده حاصل از انفجار وابستگی فراوانی دارد. به‌خصوص آسیاهای خودشکن و نیمه خودشکن که نسبت به تغییر توزیع ابعادی خوراک ورودی حساس هستند. چون هزینه‌های مرتبط با حفاری و انفجار نسبت به کل هزینه‌های تولید در معادن روباز، کم‌ترین سهم را دارد، صرف هزینه در حفاری و انفجار برای افزایش خردایش می‌تواند به صرفه‌تر از واحد آسیاکنی باشد. بنابراین بهینه‌سازی خردایش حاصل از انفجار با در نظر گرفتن ملزومات واحد خردایش معدن، یکی از نکات مهمی است که باید به آن توجه داشت [۱]. عموماً این تصور وجود دارد که معدن و کارخانه به‌صورت دو واحد مستقل از هم بوده که هر یک بایستی روی به حداقل رساندن هزینه‌های مربوط به خود تمرکز داشته باشند تا هزینه‌های کلی کاهش پیدا کند. اگر خردایش حاصل از انفجار به سطحی برسد که معدن و کارخانه هردو از نظر عملیاتی راضی باشند و هم‌چنین هیچ راهی برای کاهش بیش‌تر هزینه‌های انفجار وجود نداشته باشد، این خردایش به‌عنوان خردایش بهینه پذیرفته می‌شود [۱]. رویکرد معدن-کارخانه، رویکرد کلی یک مجموعه جهت به حداقل رساندن مصرف انرژی از طریق بهینه‌سازی تمام مراحل و در پی آن، هزینه‌ها در عملیات معدنکاری و فرآوری مواد معدنی است.

این رویکرد برای اولین بار در سال ۱۹۹۸ توسط موسسه تحقیقاتی JKMR استرالیا مطرح شد. در سال ۱۹۹۹ "کانچیوتلا" و همکاران به بررسی و مدل‌سازی ذرات ریز و نقش آن‌ها در سنگ‌شکنی و آسیاکنی در معدن "کادایهیل" در استرالیا پرداخته و سپس با توجه به برداشت‌های انجام شده مدلی مناسب برای پیش‌بینی خردایش و تأثیر آن بر سایر مراحل خردایش سنگ ارائه کردند [۲].

سپس "کانچیوتلا" و همکاران در سال ۲۰۰۱ به بررسی خردایش انفجار و تأثیر آن بر سنگ‌شکن و آسیاهای معدن طلای "پورگرا" در گینه نو پرداختند [۳]. آن‌ها پس از اجرای الگوهای مختلف انفجار نتیجه گرفتند که افزایش خرج ویژه و

همچنین کوچک کردن گلوگاه سنگ‌شکن باعث افزایش ۱۵ درصدی در ظرفیت آسیاها می‌شود.

در سال ۲۰۰۴ "وندلیندر"^۴ و همکاران، به بررسی تأثیر خردایش ناشی از انفجار بر عملکرد سنگ‌شکن و آسیای خودشکن در معدن آهن "هیپینگ"^۵ در مینسوتای شمالی پرداختند [۴]. تحقیقات آن‌ها نشان داد که افزایش خرج ویژه انفجار در عمل باعث افزایش انرژی مصرفی سنگ‌شکن برای خردایش می‌شود. استنباط آن‌ها این بود که با افزایش خرج ویژه ذرات ریز افزایش یافته و این ذرات تمایل بیش‌تری به توان‌کشی در سنگ‌شکن دارند. سپس آن‌ها خرج ویژه مصرفی در معدن را با انرژی کل خردایش مطالعه کردند. بررسی‌ها نشان داد با افزایش خرج ویژه انرژی مصرفی کاهش یافته است. در پایان بررسی آن‌ها مشخص کرد که افزایش خرج ویژه تأثیر چشم‌گیری بر ظرفیت آسیا دارد.

"برگر"^۶ و همکاران، در سال ۲۰۰۶ با انجام رویکرد معدن-کارخانه در معدن مس "باتو هیجاوو"^۷ در اندونزی موفق به افزایش ۱۰ درصدی ظرفیت آسیاها در این معدن شدند [۵].

آن‌ها دریافته‌اند که علاوه بر مشخصات الگوی انفجار و مواد منفجره مورد استفاده، خواص مکانیکی ماده معدنی نیز نقش مهمی در تعیین خردایش حاصل از انفجار دارد.

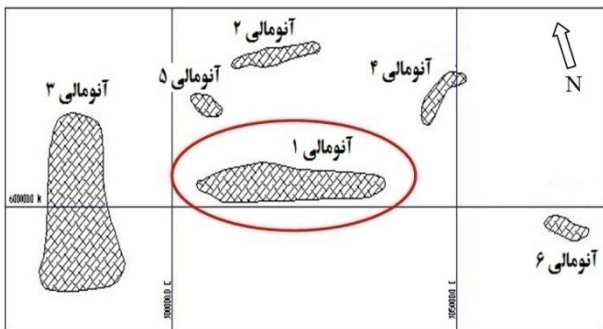
در سال ۲۰۰۷، "دنس"^۸ و همکاران، با مطالعه موردی بهینه‌سازی انفجار در یک معدن روباز در جنوب آمریکا نشان دادند که کاهش اندازه قطعات بار ورودی به سنگ‌شکن تأثیر بسیار زیادی بر افزایش کارایی آسیاها می‌گذارد [۶]. آن‌ها ثابت کردند که افزایش هزینه‌های انفجار به دلیل افزایش خرج ویژه در برابر کاهش هزینه‌های آسیاکنی بسیار ناچیز است.

هم‌چنین "دنس"^۹ و همکاران در سال ۲۰۱۱ در معدن طلای "نیومونت آهافو"^۹ در غرب غنا با کاهش اندازه ابعاد خردایش حاصل از انفجار، موفق به افزایش ظرفیت آسیاهای نیمه خودشکن در این معدن شدند [۷].

در سال ۲۰۱۱ "هارت"^{۱۰} و همکاران با استفاده از رویکرد معدن-کارخانه در معدن طلای "بادینگتون"^{۱۱} در غرب استرالیا توانستند کارایی آسیاها را افزایش دهند. هدف آن‌ها اجرای یکپارچه فرآیند معدن-کارخانه به منظور کاهش هزینه‌های کلی تولید و افزایش ظرفیت و سوددهی کارخانه بود [۸].

در این فرآیند تأثیر هر بخش از عملیات بر روی سایر قسمت‌ها به‌طور کامل نظارت شد. با استفاده از داده‌های برداشت شده مدل مناسب برای افزایش بازدهی کلی معدن و کارخانه به‌دست آمد.

میلی متر غالباً در انفجارهای کنترل شده دیواره‌های نهایی استفاده می‌شود. خرج مصرفی بسته به خشک یا آبدار بودن چال‌ها آنفو یا امولایت و سیستم آغازش برای تمامی الگوها نازل است. هم‌چنین از پنتولیت ۳ پوندی در ته چال به عنوان پرایمر و از پنتولیت ۱ پوندی یا امولایت فشنگی به‌عنوان بوستر استفاده می‌شود. تأخیرهای بین چال‌ها ثابت و مقدار آن ۲۵ میلی‌ثانیه است. هم‌چنین تأخیر انتهای چال‌ها نیز همواره ثابت و برابر ۵۰۰ میلی‌ثانیه است. تأخیر بین ردیفی بسته به شرایط متغیر است.



شکل ۱: موقعیت قرارگیری آنومالی شماره ۱ سنگ آهن گل‌گهر نسبت به سایر آنومالی‌های مجموعه گل‌گهر [۱۰]

چون در این تحقیق تلاش شده است که کم‌ترین اختلال در تولید معدن به‌وجود آید، به همین دلیل انفجارهای معمول معدن در سنگ آهن (الگوی ۵×۶ متر) طی یک بازه زمانی (۸ انفجار طی مدت یک ماه) برداشت و بار حاصل از خردایش این انفجارها به سنگ‌شکن ژیراتوری معدن ارسال و عملکرد آسیاها در این بازه زمانی پایش شده است. اجرای الگوهای طراحی شده در معدن با دو مشکل اصلی روبرو است:

الف) خطای دهانه‌یابی چال‌ها

ب) خطای در میزان عمق چال‌ها

به علت ریزشی یا ناصاف بودن محل قرارگیری دستگاه حفاری و گاهی خطای اپراتور حفاری، دستگاه در محل دقیق دهانه چال قرار نمی‌گیرد و باعث ایجاد خطای دهانه‌یابی می‌شود. این خطا که در ردیف اول الگوی حفاری بیش‌تر به چشم می‌خورد، باعث تغییر ابعاد بارسنگ و فاصله ردیفی واقعی چال‌ها می‌شود. خطای دیگر موجود در بخش حفاری به میزان عمق چال‌های حفر شده بر می‌گردد. این خطا در اکثر الگوهای حفر شده مشاهده می‌شود. شکل ۲ وضعیت حفاری ویژه در الگو طراحی شده و اجرا شده (واقعی) را نشان می‌دهد.

در سال ۲۰۱۴ "کانچیپوتلا" رویکرد معدن-کارخانه را به‌صورت کامل شرح داد و بیان کرد که خردایش معدن و کارخانه دو واحد جدا از یکدیگر نیستند و هم‌چنین هزینه این دو واحد نیز در مجموع وابسته به یکدیگر است. دانستن اهمیت خردایش سنگ ناشی از انفجار و اثر آن بر کارایی فرآیند کلی خردایش امری ضروری است [۹].

آن‌چه مشخص است این است که در تمامی تحقیقات انجام شده، هدف اصلی کاهش ابعاد سنگ خرد شده ناشی از انفجار با افزایش خرج ویژه بوده است که تأثیر این افزایش خردایش سنگ به‌طور مشخص در ظرفیت آسیاها دیده شده است. در تحقیق حاضر، برای اولین بار در ایران، رویکرد معدن-کارخانه در معدن شماره ۱ سنگ آهن گل‌گهر به‌منظور بهینه‌سازی الگوی انفجار با در نظر گرفتن عملکرد کل چرخه تولید از حفاری تا آسیاکنی استفاده شده است.

۲- معرفی معدن شماره ۱ سنگ آهن گل‌گهر

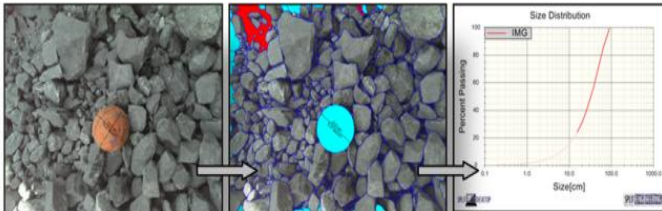
معدن سنگ آهن گل‌گهر از ۶ آنومالی تشکیل شده‌اند که در محدوده استان کرمان و در فاصله ۵۰ کیلومتری جنوب غربی شهرستان سیرجان، ۲۳۵ کیلومتری مرکز استان و ۳۲۰ کیلومتری جنوب شرقی شیراز واقع شده‌اند. معدن شماره ۱ سنگ آهن گل‌گهر دارای ۳۱۳ میلیون تن ذخیره زمین‌شناسی است که تقریباً همه آن با توجه به عوامل اقتصادی قابل استخراج است. شکل کلی ذخیره شماره ۱ تقریباً به صورت یک عدسی کشیده با امتداد NW-SE است (شکل ۱) [۱۰]. سیستم استخراج در معدن شماره ۱ سنگ آهن گل‌گهر به صورت روباز بوده و برای به‌دست آوردن خوراک مناسب برای ارسال به کارخانه تغلیظ، سینه‌کارهای مختلف معدن به‌صورت همزمان استفاده می‌شوند. بارگیری توسط شاول‌های کابلی و هیدرولیکی صورت گرفته و باربری عموماً توسط کامیون‌های ۱۰۰ تنی انجام می‌شود. کاواک نهایی معدن به‌صورت یک بیضی با ابعاد تقریبی ۳۰۰×۸۰۰ متر است که شامل ۲۵ پله با ارتفاع ۱۵ متر و شیب کلی دیواره‌های معدن بین ۳۸ تا ۴۵ درجه است. رمپ‌های دسترسی به معدن با شیب ۸ درصد و عرض ۲۵ متر طراحی شده‌اند. تولید روزانه معدن در حدود سی هزار تن است.

۲-۱ بررسی انفجارهای معمول در سنگ آهن در معدن

شماره ۱ سنگ آهن گل‌گهر

قطر چال در انفجارهای معمول در سنگ آهن در معدن شماره ۱ سنگ آهن گل‌گهر عموماً ۲۵۱ میلی‌متر و الگوی معمول ۵×۶ متر است. از طرف دیگر الگوی ۳×۴ متر با قطر چال ۱۵۴

سه مرحله متفاوت بارگیری (ابتداء، اواسط و انتهای بارگیری) تهیه و توسط نرم افزار آنالیز تصویری Split-Desktop ارزیابی قرار شده و توزیع ابعادی هر انفجار به صورت جداگانه به دست آمد (شکل ۳). نتایج خردایش حاصل از ۸ انفجار برداشت شده که طبق الگوی معمول معدن اجرا شده‌اند، در جدول ۲ نشان داده شده‌اند.

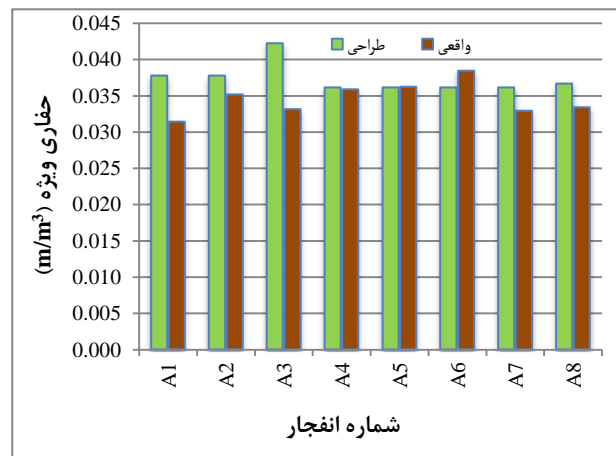


شکل ۳: روند آنالیز تصویری نمونه عکس تهیه شده

جدول ۲: خردایش الگوهای معمول برداشت شده در معدن شماره ۱ سنگ آهن گل گهر

ردیف	شماره انفجار	D ₈₀ (cm)	D ₅₀ (cm)	D ₂₀ (cm)
۱	A1	۳۰	۱۶	۶
۲	A2	۴۷	۲۴	۸
۳	A3	۳۶	۱۶	۵
۴	A4	۳۵	۱۷	۶
۵	A5	۳۳	۱۴	۴
۶	A6	۲۶	۱۳	۴
۷	A7	۳۴	۲۰	۹
۸	A8	۱۹	۹	۲
میانگین		۳۳	۱۶	۶

تفاوت خردایش این ۸ انفجار به خوبی نشان می‌دهد که علاوه بر الگوی انفجار و خصوصیات ماده منفجره، خصوصیات مکانیک سنگی توده سنگ نیز در نتیجه خردایش انفجارها مؤثر است. برای تعیین وضعیت خردایش بار ارسالی به آسیاها نیز به‌طور متناوب از پایل خروجی سنگ‌شکن عکس‌برداری و آنالیز تصویری انجام شد. شکل ۴ وضعیت خردایش خوراک ارسالی به آسیاها در طی بازه برداشت داده انفجارهای معمول معدن شماره ۱ سنگ آهن گل گهر را نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشخص است D₈₀ خوراک ارسالی به آسیاها پس از تأثیرگذاری سنگ‌شکن به‌طور میانگین از ۳۳ سانتی‌متر به ۱۳ سانتی‌متر کاهش یافته است.



شکل ۲: مقادیر حفاری ویژه الگوهای ۵×۶ متر برداشت شده

همان‌طور که از شکل ۲ مشاهده می‌شود، عمق چال‌های حفر شده در اکثر انفجارهای برداشت شده کم‌تر از میزان طراحی شده است. در نتیجه خرج مصرفی در انفجارهای برداشت شده نسبت به مقدار طراحی کاهش یافته و خرج ویژه واقعی نسبت به طراحی کوچک‌تر است (جدول ۱).

جدول ۱: داده‌های مربوط به خرج ویژه انفجارهای برداشت شده در معدن شماره ۱ سنگ آهن گل گهر

ردیف	شماره انفجار	خرج ویژه (gr/m ³)	
		واقعی	طراحی
۱	A1	۹۳۰	۱۱۲۰
۲	A2	۱۳۲۰	۱۴۵۰
۳	A3	۱۴۳۰	۱۹۴۰
۴	A4	۱۰۰۰	۹۹۰
۵	A5	۱۵۲۰	۱۴۷۰
۶	A6	۱۶۳۰	۱۴۷۰
۷	A7	۱۳۷۰	۱۴۷۰
۸	A8	۱۳۷۰	۱۴۶۰
میانگین		۱۳۲۰	۱۴۲۰

۲-۲- ارزیابی خردایش حاصل از انفجار الگوهای معمول در معدن شماره ۱ سنگ آهن گل گهر

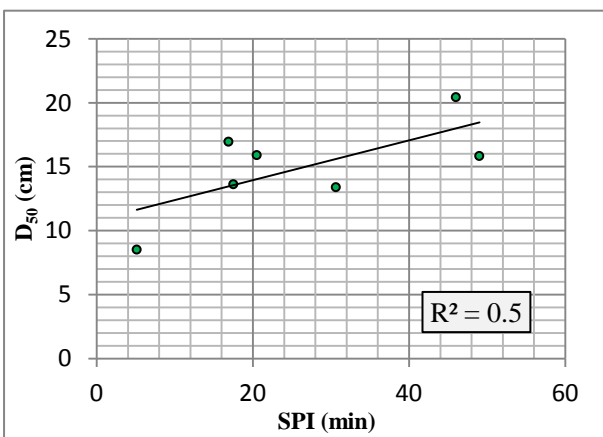
برای بررسی وضعیت خردایش حاصل از انفجارهای معدن شماره ۱ سنگ آهن گل گهر از روش آنالیز تصویری استفاده شد. برای این منظور از هر انفجار به‌طور میانگین ۱۵ عکس در

برای انجام این آزمایش نمونه‌هایی تصادفی به جرم تقریبی ۳۰ تا ۵۰ کیلوگرم از سطح توده سنگ خرد شده پس انجام انفجار جمع‌آوری و آزمایش سختی سنگ بر روی آن‌ها انجام پذیرفت. برای افزایش دقت آزمایش سختی سنگ، از هر انفجار دو نمونه تهیه و آزمایش انجام گرفت. سپس میانگین دو آزمایش به عنوان سختی سنگ بعد از انفجار محاسبه شد.

بر اساس آزمایش‌های انجام شده سختی سنگ آهن معدن شماره ۱ گل‌گهر در جدول ۳ طبقه‌بندی شده است. چون نوسان زیاد سختی سنگ در آسیاها باعث مشکلات عدیده‌ای نظیر تغییرات توان‌کشی و پرشدگی آن‌ها می‌شود، بنابراین همگن‌سازی خوراک کارخانه بر اساس این گروه‌بندی می‌تواند از وقوع چنین مشکلاتی جلوگیری کند. شکل ۵ میزان D_{50} ناشی از هر انفجار (برای الگوهای ۵×۶ متر) را بر حسب سختی آن نشان می‌دهد.

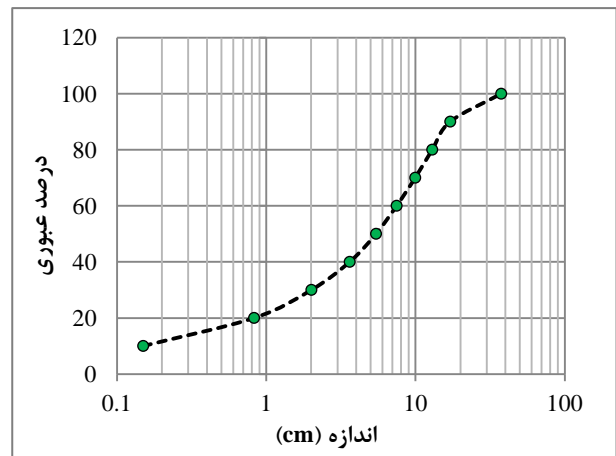
جدول ۳: طبقه‌بندی سختی سنگ آهن معدن شماره ۱ سنگ آهن گل‌گهر

سطح سختی	زمان آزمایش سختی (دقیقه)
بسیار نرم	کمتر از ۱۰
نرم	۱۰-۲۰
متوسط	۲۰-۴۰
سخت	۴۰-۸۰
بسیار سخت	بیش از ۸۰



شکل ۵: ارتباط بین سختی سنگ و میزان D_{50} برای الگوهای ۵×۶ متر در معدن شماره ۱ سنگ آهن گل‌گهر

همان‌طور که مشاهده می‌شود، می‌توان گفت که افزایش سختی سنگ به‌عنوان یکی از عوامل اثرگذار بر ابعاد سنگ خرد شده، منجر به افزایش ابعاد قطعات سنگ پس از انفجار می‌شود. سایر



شکل ۴: وضعیت خردایش بار ارسالی به آسیاها در معدن شماره ۱ سنگ آهن گل‌گهر

۲-۳- تعیین سختی سنگ خوراک سنگ‌شکن و آسیاها برای انفجارهای معمول در معدن شماره ۱ سنگ آهن گل‌گهر

۲-۳-۱- آزمایش سختی سنگ معدن

آزمایش SPI^{12} یک آزمایش اختصاصی در مقیاس آزمایشگاهی برای پیش‌بینی رفتار خردایشی سنگ‌ها و توان مصرفی ویژه در آسیاها نیمه خودشکن است [۱۱]. در سال ۱۹۹۳ شرکت Minnovex امکان استفاده از این آزمایش کوچک مقیاس (با نمونه‌ای به جرم ۲ کیلوگرم) را برای پیش‌بینی توان مورد نیاز آسیاها نیمه خودشکن بررسی کرد [۱۲]. مشخصه بارز این آزمایش کم هزینه بودن و اجرای آسان آن با نمونه‌ای به مراتب کمتر از سایر آزمایش‌ها است. هدف این آزمایش، تهیه نمونه مورد نظر با D_{80} برابر ۱۲/۷ میلی‌متر، خردایش آن توسط آسیای نیمه خودشکن آزمایشگاهی و رساندن D_{80} این نمونه به ۱/۷ میلی‌متر است. آزمایش SPI بیان می‌کند که زمان مورد نیاز برای کاهش اندازه نمونه با انرژی ویژه خردایش آسیا ارتباط دارد [۱۲]. معادله ۱ آخرین رابطه ارائه شده را نشان می‌دهد [۱۳]:

$$(SAG.AG) \frac{kWh}{t} = 5.9 \left(\frac{T}{\sqrt{P_{80}}} \right)^{0.55} f_{SAG} \quad (1)$$

در این رابطه:

T : زمان حاصل از آزمایش سختی (دقیقه)

P_{80} : اندازه محصول آسیای نیمه خودشکن صنعتی (میکرون)

f_{SAG} : ضریب تصحیح بسته به نوع مدار خردایش آسیا

kWh/t : انرژی ویژه خردایش (SPI)

مشخص است که با افزایش مقدار سختی سنگ در برابر خردایش، زمان انجام آزمایش نیز افزایش می‌یابد.

الگوی جدید و جدول ۵ گزینه‌های پیشنهادی الگوهای جدید قابل اجرا در معدن را نشان می‌دهد.

۳-۱- تعیین مدل مناسب پیش‌بینی خردایش

برای پیش‌بینی خردایش سنگ ناشی از انفجار، ابتدا باید مدل مناسب انتخاب شود. بدین منظور دانه‌بندی پیش‌بینی شده سنگ خرد شده توسط دو مدل متداول پیش‌بینی خردایش یعنی "کازرام اصلاح شده" و مدل "KCO" با میانگین خردایش اندازه‌گیری شده ۸ الگوی معمول ۵×۶ متر مقایسه شد.

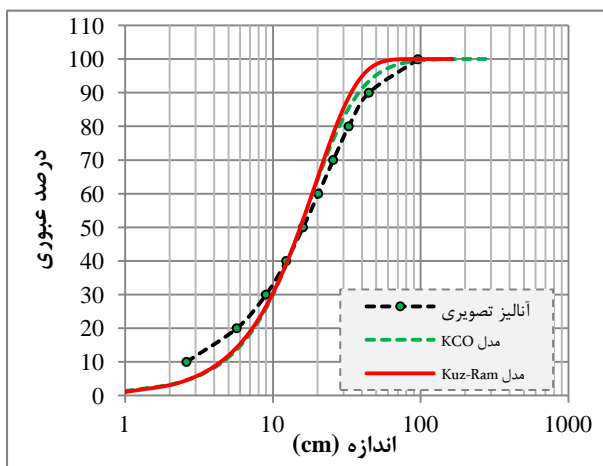
عوامل همچون ویژگی‌های ماده سنگ و توده سنگ نیز روی خردایش تأثیرگذار هستند.

۳-۲- انتخاب الگوهای مختلف انفجار

به‌منظور طراحی یک الگوی انتخابی بهینه و بررسی عملکرد آسیاها، گزینه‌های مختلفی از نظر فنی، قابلیت اجرا و هزینه‌های انفجار بررسی شدند. با توجه به محدودیت دستگاه حفاری (قطر ۲۵۱ میلی‌متر برای حفاری در معدن شماره ۱ سنگ آهن گل‌گهر) از میان پارامترهای قابل تغییر در هندسه انفجار، تنها بارسنگ و فاصله ردیفی به‌عنوان پارامترهای متغیر انتخاب شدند. جدول ۴ مقادیر پارامترهای ثابت در طراحی

جدول ۴: مقادیر پارامترهای ثابت جهت طراحی الگوهای جدید پیشنهادی

نوع خرج	طول خرج (l) (m)	گل‌گذاری (T) (m)	افزافه حفاری (J) (m)	عمق چال (L) (m)	قطر چال (D) (mm)	ارتفاع پله (H) (m)
امولایت	۱۲	۵	۲	۱۷	۲۵۱	۱۵



شکل ۶: مقایسه خردایش ۸ الگوی ۵×۶ متر اجرا شده در معدن شماره ۱ سنگ آهن گل‌گهر با مدل‌های پیش‌بینی خردایش

شکل ۶ مقادیر پیش‌بینی این دو مدل و میانگین مقادیر واقعی خردایش برای الگوهای ۵×۶ متر را نشان می‌دهد. برای بررسی دقت این دو مدل برای پیش‌بینی خردایش، مقادیر ضریب تعیین (R^2) و جذر میانگین مربع خطاها ($RMSE^{13}$) برای هر دو مدل محاسبه شد. مقدار R^2 برای مدل پیش‌بینی خردایش "KCO" و "کازرام اصلاح شده" مقدار ۰/۹۹ و ۰/۹۵ و مقدار $RMSE$ برای این دو مدل به ترتیب ۵/۹ و ۱۵/۲ به‌دست آمد.

نتایج مقادیر بالا نشان می‌دهد که مدل پیش‌بینی خردایش KCO را می‌توان برای پیش‌بینی سایر الگوهای پیشنهادی در معدن شماره ۱ سنگ آهن گل‌گهر استفاده کرد.

۲-۳- پیش‌بینی خردایش الگوهای پیشنهادی قابل اجرا در معدن شماره ۱ سنگ آهن گل‌گهر

با استفاده از مدل پیش‌بینی خردایش KCO، خردایش تمامی گزینه‌های قابل اجرا در معدن شماره ۱ سنگ آهن گل‌گهر که در جدول ۵ به آن‌ها اشاره شد، پیش‌بینی شدند (شکل ۷).

همان‌گونه که از شکل مشخص است روند افزایش D_{80} با بزرگ شدن الگوی اجرایی (کاهش خرج ویژه) نسبت به افزایش D_{50} بیش‌تر است.

جدول ۵: الگوهای پیشنهادی جدید قابل اجرا در معدن شماره ۱ سنگ آهن گل‌گهر

SDF (m^3/m^3)	PF (gr/m^3)	J/B	T/B	S/B	B/D	H/B	S (m)	B (m)	پارامتر گزینه
۰/۰۷۱	۳۳۵۰	۰/۵۰	۱/۲۵	۱/۰۰	۱۶	۳/۸	۴	۴	۱
۰/۰۶۳	۲۹۸۰	۰/۵۰	۱/۲۵	۱/۱۳	۱۶	۳/۸	۴/۵	۴	۲
۰/۰۵۷	۲۶۸۰	۰/۵۰	۱/۲۵	۱/۲۵	۱۶	۳/۸	۵	۴	۳
۰/۰۵۲	۲۴۴۰	۰/۵۰	۱/۲۵	۱/۳۸	۱۶	۳/۸	۵/۵	۴	۴
۰/۰۵۶	۲۶۵۰	۰/۴۴	۱/۱۱	۱/۰۰	۱۸	۳/۳	۴/۵	۴/۵	۵
۰/۰۵۰	۲۳۸۰	۰/۴۴	۱/۱۱	۱/۱۱	۱۸	۳/۳	۵	۴/۵	۶
۰/۰۴۶	۲۱۷۰	۰/۴۴	۱/۱۱	۱/۲۲	۱۸	۳/۳	۵/۵	۴/۵	۷
۰/۰۴۲	۱۹۹۰	۰/۴۴	۱/۱۱	۱/۳۳	۱۸	۳/۳	۶	۴/۵	۸
۰/۰۴۵	۲۱۴۰	۰/۴۰	۱/۰۰	۱/۰۰	۲۰	۳/۰	۵	۵	۹
۰/۰۴۱	۱۹۵۰	۰/۴۰	۱/۰۰	۱/۱۰	۲۰	۳/۰	۵/۵	۵	۱۰
۰/۰۳۸	۱۷۹۰	۰/۴۰	۱/۰۰	۱/۲۰	۲۰	۳/۰	۶	۵	۱۱
۰/۰۳۵	۱۶۵۰	۰/۴۰	۱/۰۰	۱/۳۰	۲۰	۳/۰	۶/۵	۵	۱۲
۰/۰۳۷	۱۷۷۰	۰/۳۶	۰/۹۱	۱/۰۰	۲۲	۲/۷	۵/۵	۵/۵	۱۳
۰/۰۳۴	۱۶۲۰	۰/۳۶	۰/۹۱	۱/۰۹	۲۲	۲/۷	۶	۵/۵	۱۴
۰/۰۳۲	۱۵۰۰	۰/۳۶	۰/۹۱	۱/۱۸	۲۲	۲/۷	۶/۵	۵/۵	۱۵
۰/۰۲۹	۱۳۹۰	۰/۳۶	۰/۹۱	۱/۲۷	۲۲	۲/۷	۷	۵/۵	۱۶
۰/۰۳۱	۱۴۹۰	۰/۳۳	۰/۸۳	۱/۰۰	۲۴	۲/۵	۶	۶	۱۷
۰/۰۲۹	۱۳۷۰	۰/۳۳	۰/۸۳	۱/۰۸	۲۴	۲/۵	۶/۵	۶	۱۸
۰/۰۲۷	۱۲۸۰	۰/۳۳	۰/۸۳	۱/۱۷	۲۴	۲/۵	۷	۶	۱۹
۰/۰۲۵	۱۱۹۰	۰/۳۳	۰/۸۳	۱/۲۵	۲۴	۲/۵	۷/۵	۶	۲۰

B= بار سنگ , S= فاصله ردیفی , PF= خرج ویژه , SDF= حفاری ویژه

جدول ۶: مقایسه میزان خردایش و هزینه الگوهای مختلف پیشنهادی قابل اجرا در معدن شماره ۱ سنگ آهن گل گهر با الگوی معمول معدن

الگو	D ₈₀ (cm)	اختلاف (%)	هزینه (Rial/m ³)	اختلاف (%)
۵×۶	۲۸/۱	-	۳۹۳۰۰	-
۴×۴	۱۷/۴	۳۸	۷۳۸۰۰	۸۷
۴×۴/۵	۱۸/۷	۳۳	۶۵۶۰۰	۶۷
۴×۵	۲۰/۱	۲۸	۵۹۰۰۰	۵۰
۴×۵/۵	۲۱/۴	۲۴	۵۳۷۰۰	۳۶
۴/۵×۴/۵	۳۰/۰	۲۵	۵۸۳۰۰	۴۸
۴/۵×۵	۲۲/۵	۲۰	۵۲۵۰۰	۳۳
۴/۵×۵/۵	۲۳/۹	۱۵	۴۷۷۰۰	۲۱
۴/۵×۶	۲۵/۳	۱۰	۴۳۸۰۰	۱۱
۵×۵	۲۴/۹	۱۱	۴۷۲۰۰	۲۰
۵×۵/۵	۲۶/۵	۶	۴۲۹۰۰	۹

$$SP=1769-9.53D_{50}+444.45n-3.37nD_{80} \quad (2)$$

که در آن :

SP: بهره وری شاول (ton/h)

D₅₀: اندازه ۵۰ درصد ذرات عبوری (cm)

D₈₀: اندازه ۸۰ درصد ذرات عبوری (cm)

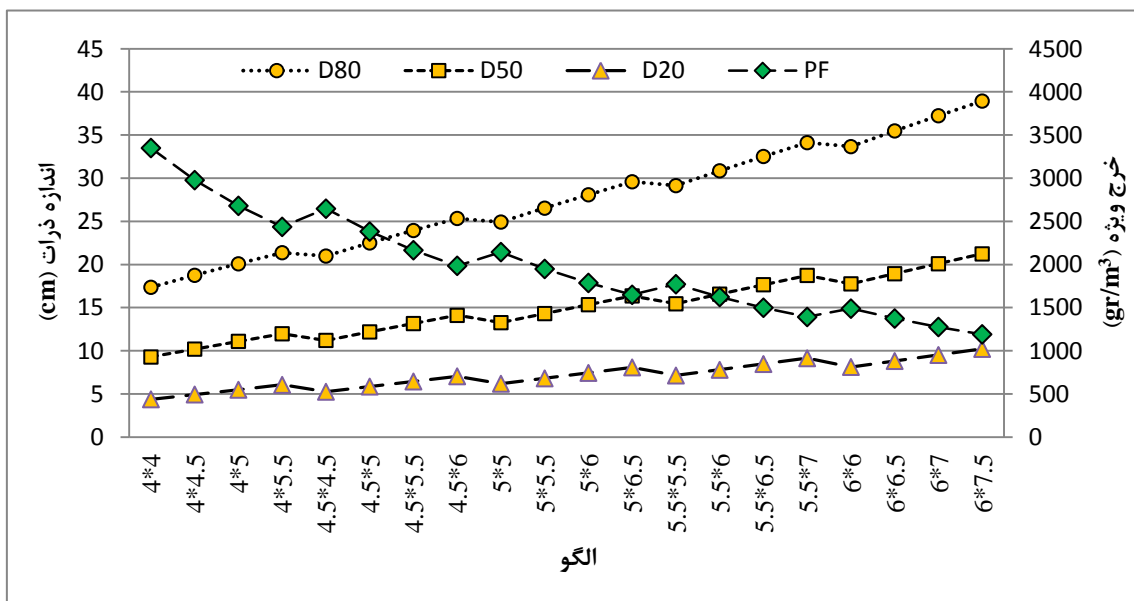
n: ضریب یکنواختی انفجار

بررسی فنی و اقتصادی الگوهای پیشنهادی قابل اجرا در معدن شماره ۱ سنگ آهن گل گهر

رسیدن به خردایش ریزتر نیازمند کوچک تر کردن الگو است. بنابر این الگوی انتخابی می بایست از بین الگوهای کوچک تر از الگوی معمول معدن (۵×۶ متر) انتخاب شود. چون هزینه پرداختی برای هر مترمکعب سنگ آهن استخراجی از معدن ثابت است، بنابراین تغییر در الگو فقط به تغییر در هزینه حفاری و انفجار منجر می شود و سایر هزینه های استخراجی ثابت می ماند. با توجه به فرضیات جدول ۴ می توان هزینه های حفاری و انفجار برای هر یک از الگوهای پیشنهادی جدول ۵ را با الگوی معمول معدن (۵×۶ متر) مقایسه کرد.

جدول ۶ اختلاف افزایش میزان خردایش و هزینه های حفاری و انفجار هر یک از این الگوهای پیشنهادی را با الگوی معمول معدن نشان می دهد.

مسلماً انتخاب الگوی کوچک تر نسبت به الگوی رایج با افزایش هزینه حفاری و انفجار همراه است، اما مطمئناً کاهش ابعاد خردایش حاصل از انفجار بر عملکرد سیستم بارگیری و حمل تأثیر به سزائی دارد. در این راستا "اوصانلو" و "حکمت" به بررسی نقش خردایش بر بهره وری شاول ها در معدن شماره ۱ سنگ آهن گل گهر پرداختند [۱۴]. آن ها پس از بررسی خردایش انفجارها و بهره وری شاول ها، رابطه زیر را ارائه دادند :



شکل ۷: تغییرات در خردایش و خرج ویژه الگوهای مختلف پیشنهادی قابل اجرا در معدن شماره ۱ سنگ آهن گل گهر

با استفاده از رابطه ۲، بهره‌وری شاول برای تمامی الگوهای جدول ۶ محاسبه شد (جدول ۷).

جدول ۷: بهره‌وری شاول برای الگوهای پیشنهادی قابل اجرا در معدن شماره ۱ سنگ آهن گل‌گهر

الگو	ضرب یکنواختی (n)	بهره‌وری شاول (ton/h)	تغییر نسبت به الگوی معمول (%)
۵×۶	۱/۵۲	۲۱۵۴	-
۴×۴	۱/۴۶	۲۲۴۴	۴
۴×۴/۵	۱/۵۱	۲۲۴۸	۴
۴×۵	۱/۵۵	۲۲۴۷	۴
۴×۵/۵	۱/۵۹	۲۲۴۷	۴
۴/۵×۴/۵	۱/۴۶	۲۲۰۸	۳
۴/۵×۵	۱/۵۰	۲۲۰۶	۲
۴/۵×۵/۵	۱/۵۳	۲۲۰۰	۲
۴/۵×۶	۱/۵۷	۲۱۹۸	۲
۵×۵	۱/۴۴	۲۱۶۲	۱
۵×۵/۵	۱/۴۸	۲۱۵۸	۱

با توجه به جدول ۷ ملاحظه می‌شود که کوچک‌تر شدن الگو باعث افزایش ظرفیت بارگیری و در نتیجه افزایش تولید روزانه معدن می‌شود. این افزایش درآمد تولید می‌تواند بخشی از افزایش هزینه‌های ناشی از کوچک شدن الگو را جبران کند. بنابراین با توجه به محدودیت قطر چال دستگاه‌های حفاری موجود در معدن و همچنین اولویت بخش تولید و تعهد معدن به تامین خوراک کارخانه عملاً اجرای الگوهای کوچک‌تر از ۴×۴ متر غیرمنطقی به نظر می‌رسید. همچنین با توجه به روند افزایش خرج ویژه و هزینه‌های حفاری و انفجار الگوهای کوچک‌تر از الگوی معمول معدن (جدول ۶ و شکل ۷)، الگوی ۴×۵ متر انتخاب و جایگزین الگوی معمول معدن در سنگ آهن شد.

۴- اجرای الگوی جدید انتخابی

در طی اجرای الگوی انتخابی، تعداد ۹ انفجار با الگوی ۴×۵ متر اجرا و برداشت شد. به علت ریزشی بودن چال‌ها، خرج ویژه الگوهای طراحی شده با مقدار واقعی خرج ویژه متفاوت است (جدول ۸). همان‌طور که ملاحظه می‌شود، خرج ویژه با کوچک‌تر شدن الگو افزایش یافته است و الگوهای اجرا شده به دلیل عدم حفاری کامل چال‌ها، خرج ویژه مصرفی کم‌تری نسبت به طراحی داشته‌اند.

۴-۱- تعیین خردایش الگوی جدید انتخاب شده
همانند الگوهای معمول برداشت شده، خردایش انفجارهای با الگوی جدید نیز با آنالیز تصویری تعیین شد (جدول ۹).
با مقایسه خردایش الگوی جدید (۴×۵ متر) و الگوی معمول معدن (۵×۶ متر)، مشخص می‌شود که انتخاب الگوی جدید باعث افزایش خردشدگی سنگ آهن معدن و افزایش سهم ذرات ریز در انفجار شده است. بررسی میانگین خردایش انفجارهای الگوی جدید (۴×۵ متر) با مدل پیش‌بینی خردایش KCO، مجدداً نشان می‌دهد که این مدل برای پیش‌بینی خردایش مناسب است ($R^2=0/89$ و $RMSE=14/5$).

جدول ۸: خرج ویژه انفجارهای برداشت شده با الگوی ۴×۵ متر در معدن شماره ۱ سنگ آهن گل‌گهر

ردیف	شماره انفجار	خرج ویژه (gr/m ³)	
		طراحی	واقعی
۱	B1	۲۵۷۰	۱۷۴۰
۲	B2	۲۵۰۰	۲۲۰۰
۳	B3	۲۳۴۰	۱۸۷۰
۴	B4	۲۱۷۰	۱۸۵۰
۵	B5	۲۱۷۰	۱۹۸۰
۶	B6	۲۵۲۰	۲۱۳۰
۷	B7	۲۲۸۰	۱۸۸۰
۸	B8	۲۱۱۰	۱۸۷۰
۹	B9	۲۰۵۰	۱۸۱۰
میانگین		۲۳۰۰	۱۹۲۵

جدول ۹: وضعیت خردایش الگوهای ۴×۵ متر اجرا شده در معدن شماره ۱ سنگ آهن گل‌گهر

ردیف	شماره انفجار	D ₈₀ (cm)	D ₅₀ (cm)	D ₂₀ (cm)
۱	B1	۲۷	۱۵	۴
۲	B2	۲۰	۸	۱
۳	B3	۲۸	۱۳	۳
۴	B4	۲۳	۱۲	۳
۵	B5	۲۵	۱۲	۴
۶	B6	۳۴	۱۷	۴
۷	B7	۲۷	۱۳	۴
۸	B8	۲۳	۱۲	۴
۹	B9	۲۷	۱۱	۲
میانگین		۲۶	۱۳	۳

۴-۲- وضعیت خوراک سنگ شکن ژیراتوری و آسیاها در

معدن شماره ۱ سنگ آهن گل گهر

چون دهانه خروجی سنگ شکن ۲۰ سانتی متر است، بنابراین با کاهش ابعاد سنگ حاصل از انفجار می توان سهم ذرات زیر ۲۰ سانتی متر را در بار ارسالی به سنگ شکن افزایش داد. جدول ۱۰ میانگین سهم ذرات زیر ۲۰ سانتی متر را در انفجارهای برداشت شده معمول و جدید نشان می دهد.

از جدول ۱۰ مشخص است که با کوچک تر شدن الگوی انفجار، سهم ذرات زیر ۲۰ سانتی متر عبوری از دهانه خروجی سنگ شکن حداقل ۹ درصد افزایش یافته است و به طور میانگین ۶۹ درصد ذرات پس از انفجار بدون نیاز به سنگ شکنی وارد مرحله آسیاکنی می شوند.

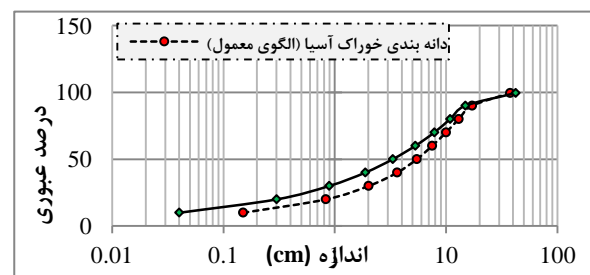
جدول ۱۰: سهم ذرات زیر ۲۰ سانتی متر در الگوهای

معمول و جدید

الگو	درصد ذرات زیر ۲۰ سانتی متر		
	میانگین	بیش ترین	کم ترین
۵×۶ متر	۶۰	۸۲	۴۳
۴×۵ متر	۶۹	۷۹	۵۵

همچنین انجام آزمایش سختی روی نمونه های تهیه شده از انفجارها با الگوی جدید نشان داد که سنگ این انفجارها از لحاظ سختی نسبت به انفجارهای برداشت شده با الگوی معمول، سخت تر بوده اند.

پس از شروع بارگیری انفجارهای الگوی جدید، برای تعیین دانه بندی خوراک آسیاها همانند قبل از پایل خروجی سنگ شکن عکس برداری و آنالیز تصویری انجام شد. وضعیت خوراک آسیاها قبل و بعد از اجرای الگوی جدید در شکل ۸ آورده شده اند.



شکل ۸: دانه بندی خوراک آسیاها قبل و بعد از اجرای الگوی جدید

از شکل ۸ مشخص است که با افزایش خردایش در معدن، خردایش خوراک آسیاها پس از سنگ شکنی نیز افزایش داشته است. مقدار D_{80} خوراک ارسالی به آسیاها به طور میانگین از ۱۳ سانتی متر به ۱۱ سانتی متر و D_{50} خوراک از ۶ سانتی متر به ۳ سانتی متر کاهش یافته است.

۵- عملکرد سنگ شکن ژیراتوری و آسیاها در معدن

شماره ۱ سنگ آهن گل گهر

شاخص های معین برای بررسی و بهینه سازی عملکرد آسیاها عبارتند از:

- ظرفیت (تن بر ساعت)

- توان ویژه مصرفی (کیلووات ساعت بر تن)

عملکرد خردایش سنگ در آسیاهای خودشکن و نیمه خودشکن متفاوت است. آسیای نیمه خودشکن به دلیل وجود گلوله به عنوان واسط خردایش نسبت به کاهش اندازه خوراک ورودی حساسیت کمتری دارد و عموماً کاهش اندازه خوراک ورودی باعث افزایش ظرفیت و به دنبال آن کاهش توان مصرفی می شود [۱۵]. اما چون در آسیاهای خودشکن واسطه خردایش کاملاً از خود خوراک ورودی تامین می شود، بنابراین تغییرات اندازه خوراک ورودی بر ظرفیت آسیا بسیار اثرگذار است و می تواند باعث کاهش ظرفیت آسیا شود [۱۵]. ثابت شده است که وجود ذرات در محدوده ۵۰-۲۵ میلی متر (ذرات با ابعاد بحرانی) در خوراک ورودی به آسیای خودشکن باعث کاهش کارایی و ظرفیت آسیا می شود [۱۵]. علت این امر این است که این ذرات نه آن قدر درشت هستند که باعث خرد شدن سایر سنگ ها شوند و نه آن قدر کوچک هستند که به راحتی خرد و از آسیا خارج شوند. بنابراین زمان ماند آن ها در آسیا زیاد بوده و باعث پرشدگی آسیا و کاهش ظرفیت ورودی به آن می شوند.

در معدن شماره ۱ سنگ آهن گل گهر، خردایش اولیه توسط یک دستگاه سنگ شکن ژیراتوری با ظرفیت ۳۰۰۰ تن بر ساعت و خروجی ۲۰۰ میلی متر انجام می شود. در مرحله بعدی، سه آسیای خشک (یک آسیای نیمه خودشکن و دو آسیای خودشکن) که به صورت موازی کار می کنند، خوراک خروجی از سنگ شکن را تا ابعاد ۴۵۰ میکرون خرد می کنند.

مقایسه میانگین ظرفیت سنگ شکن در حین اجرای الگوی جدید با سایر ماه های سال نشان می دهد که ظرفیت سنگ شکن ۱۷ درصد افزایش یافته است (شکل ۹).

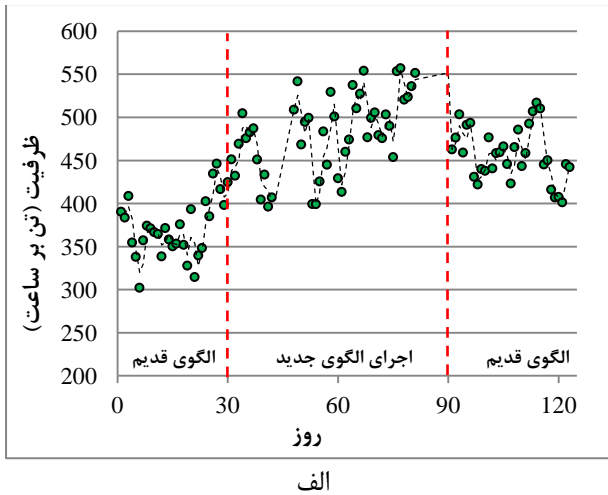
برای بررسی عملکرد ۳ آسیای شماره ۱ (نیمه خودشکن)، شماره ۲ و ۳ (خودشکن) در معدن شماره ۱ سنگ آهن گل گهر، میانگین ماهیانه ظرفیت، توان مصرفی آسیاها و توان

مصرفی ویژه، قبل، حین و بعد از اجرای الگوی جدید بررسی شد.

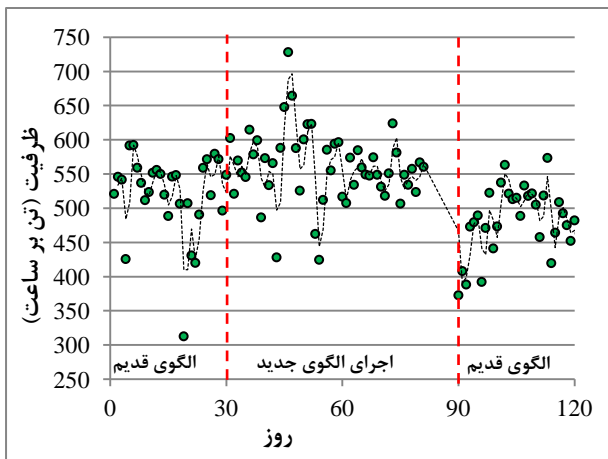
همان‌طور که از شکل های ۱۰- الف، ب و ج ملاحظه می‌شود، ظرفیت در هر سه آسیا در حین اجرای الگوی جدید افزایش یافته است.

همچنین با مقایسه عملکرد آسیاها در زمان اجرای الگوی جدید (مرداد و شهریور ماه) با سایر ماه‌های سال ۹۳ مشخص شد که سه آسیا به طور میانگین ۸ درصد افزایش ظرفیت نسبت به سایر ماه‌ها داشته‌اند.

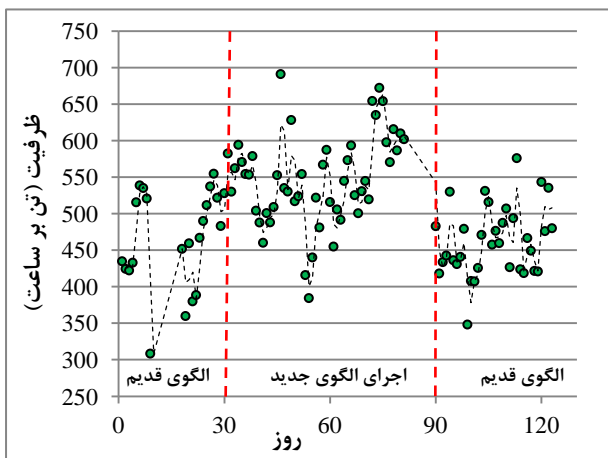
مقایسه انرژی ویژه خردایش آسیاها در حین اجرای الگوی جدید با سایر ماه‌های سال نشان داد که آسیاهای شماره ۱ و ۲ به‌طور میانگین با ۱۵ و ۹ درصد کاهش انرژی ویژه مصرفی روبرو بوده‌اند، اما آسیا شماره ۳ به‌طور متوسط ۷ درصد افزایش انرژی مصرفی به ازای هر تن سنگ داشته است. در مجموع میانگین انرژی ویژه مصرفی در هر سه آسیا به میزان ۵ درصد نسبت به میانگین سایر ماه‌های سال کاهش یافته است.



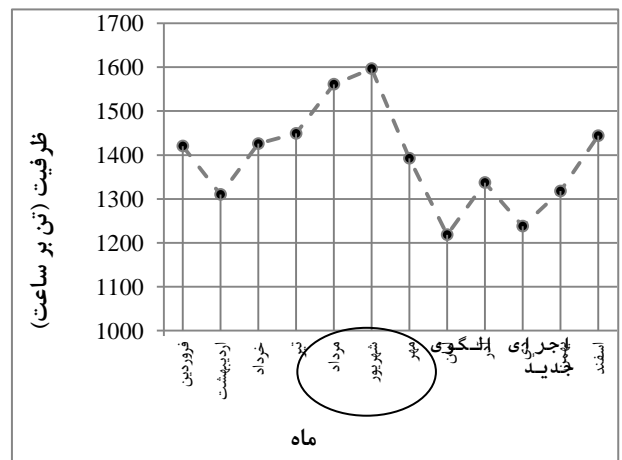
الف



ب



ج



شکل ۹: ظرفیت سنگ شکن قبل و بعد از اجرای الگوی جدید

شکل ۱۰: وضعیت ظرفیت آسیاهای معدن شماره ۱ سنگ آهن گل‌گهر حین اجرای الگوی جدید: الف- آسیای شماره ۱، ب- آسیای شماره ۲، ج- آسیای شماره ۳

Operator's Forum, Society For Mining, Metallurgy & Exploration, pp. 32-48.

[5]. Burger, B., McCaffery, K., Jankovic, A., Valery, W., McGaffin, I., 2006. *Batu Hijau Model for*

Throughput Forecast. Mining and Milling Optimisation and Expansion Studies, Proceedings 3rd International Symposium of Society for Mining, Metallurgy and Exploration, St. Louis, Missouri, pp. 461-480.

[6]. Dance, A., Valery, W., Jankovic, A., La Rosa, D., Colacioppo, J., 2007. *Process Integration and Optimisation- a Case Study in Productivity Improvement*, Proceedings 6th Large Open Pit Mining Conference, Perth, Western Australia, pp 47-54.

[7]. Dance, A., Mwansa, S., Valery, W., Amonoo, G., Bisiaux, B., 2011. *Improvement in SAG Mill Throughput from Finer Feed Size at the Newmont Ahafo Operation*. Proceedings the 5th SAG Conference, Vancouver, Canada, pp. 57-64.

[8]. Hart, S., Rees, T., Tavani, S., Valery, W., Jankovic, A., 2011. *Process Integration and Optimisation of the Boddington HPGR Circuit*, Proceedings the 5th SAG Conference, Vancouver, Canada, pp. 124-131.

[9]. Kanchibotla, S., 2014. *Mine to Mill Value Chain Optimization: Role of Blasting*, Mineral Processing and Extractive Metallurgy: 100 Years of Innovation, Society for Mining, Metallurgy & Exploration, Englewood, CO, United States, pp. 51-64

[۱۰]. شرکت مهندسی مشاور کوشا معدن، ۱۳۸۳. گزارش آشنایی با معدن سنگ آهن گل گهر.

[11]. Dobby, G., Bennett, C., Kosick, G., 2001. *Advances in SAG Circuit Design and Simulation Applied to the Mine Block Model*, 4th International Autogenous and Semi-Autogenous Grinding Technology, pp. 221-234.

[12]. Kosick, G. A., Bennett, C., 1999. *The Value of Ore Body Power Requirement Profiles for SAG Circuit Design*, Proceedings 31th Mineral Conference, Ottawa, Canada.

[13]. Amelunxen, P., Berrios, P., Rodriguez, E., 2014. *The SAG Grindability Index Test*, Minerals Engineering 55, pp. 42-51.

[14]. Hekmat, A., Osanloo, M., 2005. *Prediction of Shovel Productivity in the Gole-Gohar Iron Mine*, Journal of Mining Science, Vol 41, pp. 177-184.

۶- نتیجه گیری

در این تحقیق به بررسی وضعیت انفجارهای معمول معدن شماره ۱ سنگ آهن گل گهر از نظر اجرایی و خردایش پرداخته شد. در ادامه الگویی جدید برای بهینه سازی خردایش ناشی از انفجار بر اساس رویکرد معدن-کارخانه انتخاب و انفجارهای انجام شده بر اساس این الگو بررسی شدند. در نهایت تأثیر این الگوی جدید بر عملکرد سه آسیای موجود در معدن شماره ۱ سنگ آهن گل گهر بررسی شد. با توجه به داده های برداشت شده مشخص شد که با تغییر الگوی انفجار از ۵×۶ متر به ۴×۵ متر، ظرفیت آسیاهای خودشکن و نیمه خودشکن معدن شماره ۱ سنگ آهن گل گهر به طور متوسط ۸ درصد افزایش یافته است. همچنین میانگین انرژی مصرفی آسیاها در مقایسه با میانگین سایر ماه های سال ۱۳۹۳ ۵ درصد کاهش یافته است. این نتایج تایید کننده عملکرد رویکرد معدن-کارخانه در معدن شماره ۱ سنگ آهن گل گهر است.

۷- قدردانی

بدین وسیله از کارکنان محترم معدن شماره ۱ سنگ آهن گل گهر که ما را در انجام این پژوهش یاری نموده اند تشکر و قدردانی می شود.

مراجع

[1]. Kanchibotla, S. S., 2003. *Optimum Blasting? Is it Minimum Cost per Broken Rock or Maximum Value per Broken Rock?*, in Proceedings 7th International Symposium on Rock Fragmentation by Blasting, pp. 35-48.

[2]. Kanchibotla, S. S., Valery, W., Morrell, S., 1999. *Modeling Fines in Blast Fragmentation and its Impact on Crushing and Grinding*, Proceedings the Explo-99 Conference, Kalgoorlie, Australia, pp. 137-144.

[3]. Kanchibotla, S. S., Grundstrom, C., Jankovic, A., Thornton, D. M., 2001. *Blast Fragmentation for Maximizing the SAG Mill Throughput at Porgera Goldmine*, Proceedings the 27th Annual Conference on Explosives and Blasting Technique, Orlando, Florida, pp. 383-399.

[4]. VanDelinder, P., Eloranta, J., Orobona, M., 2004. *Blasting for Improved Autogenous Milling at Hibbing Taconite Company, Improving and Optimizing Operations. Things that Actually Work! Plant*

Their Operation and Optimisation, JKMRRC Monograph Series in Mining and Mineral Processing 2, pp. 49-92.

[15]. Napier, T. J., Morrell, S., Morrison, R. D., Kojovic, T., 1996. *Mineral Comminution Circuits:*

پی نوشت

- 1 Kanchibotla
- 2 Cadia Hill
- 3 Porgera
- 4 VanDelinde
- 5 Hibing
- 6 Burger
- 7 Batu Hijau
- 8 Dance
- 9 Newmont Ahafo
- 10 Hart
- 11 Boddington
- 12 SAG Power Index
- 13 Root Mean Square Error