

کاهش قابل توجه در قیمت تمام شده با تغییر روش حفر از آتشفکری به مکانیکی بر اساس ویژگی‌های توده‌سنگ در معدن سنگ آهک سردار بوکان

گلسا صادق اسلام^۱، حسن مومینوند^{۲*}

۱- کارشناسی ارشد مهندسی استخراج معدن، گروه مهندسی معدن، دانشگاه ارومیه، ارومیه

۲- دانشیار گروه مهندسی معدن، دانشگاه ارومیه، ارومیه

(دریافت ۱۳۹۸/۰۲/۰۲، پذیرش ۱۳۹۸/۰۸/۰۴)

چکیده

تغییر روش حفر از چالزنی و آتشفکری به مکانیکی با استفاده از ماشین‌آلات دارای مزایای متعددی است. میزان سستی توده سنگ برجا مبنای مهمی برای تغییر روش حفر است. چنانچه تغییر روش حفر امکان پذیر باشد، قیمت تمام شده صحیح هر روش نیز معیار مهمی است. میزان سستی توده سنگ برجا برای قابلیت حفر به روش مکانیکی با استفاده از بولدوزر را می‌توان با استفاده از ویژگی‌های توده‌سنگ نظیر مقاومت فشاری یک محوری و فاصله ناپیوستگی‌ها یا در حدود سست بازه تغییرات شاخص قابلیت انفجار (BI) و شاخص خردایش سنگ (RFI) مورد بررسی قرار داد. خرج ویژه مبتنی بر ویژگی‌های توده‌سنگ برجا را می‌توان بر اساس شاخص BI یا RFI که با استفاده از آن قیمت تمام شده حداقل می‌شود، برآورد کرد. در این تحقیق پارامترهای توده‌سنگ برجا مربوط به شاخص قابلیت انفجار و شاخص خردایش سنگ در معدن سنگ آهک سردار بوکان اندازه‌گیری و برداشت شده و امتیازهای BI برابر ۲۰/۳۳ و RFI برابر ۴۲ تعیین شده‌اند. مقاومت فشاری یک محوری برابر ۱۳/۲۸ و فاصله ناپیوستگی‌ها کمتر از ۰/۱ متر و همچنین هر یک از امتیازهای به دست آمده مربوط به آستانه سستی شاخص‌های BI و RFI است که در چنین شرایطی بولدوزر قادر است، ماده معدنی را حفر کند. خرج ویژه حاصل از امتیاز BI برابر ۰/۱۸ کیلوگرم بر مترمکعب و خرج ویژه حاصل از امتیاز RFI برابر ۰/۲۵۳ کیلوگرم بر متر مکعب حاصل شد. طی عملیات چالزنی و آتشفکری در چند مرحله با تغییر الگوی چال‌ها کلیه هزینه‌های بخش‌های مختلف و قیمت تمام شده فرآیند چالزنی و آتشفکری به روش صحیح تعیین شد. عملیات آتشفکری برای خرج ویژه ۰/۲۵۳ کیلوگرم بر متر مکعب به عنوان خرج ویژه حداقل نیز اجرا شد و بر اساس خرج ویژه حداقل، قیمت تمام شده برابر ۱۴۴۳۴ ریال بر مترمکعب (۶۴۴۳ ریال بر تن) مربوط به سال ۱۳۹۶ حاصل شد. برای جایگزین روش حفر از چالزنی و آتشفکری به مکانیکی، از بولدوزر استفاده شد و قیمت تمام شده حفر با استفاده از بولدوزر ۸۳۱۹ ریال بر متر مکعب (۳۷۱۳ ریال بر تن) مربوط به سال ۱۳۹۶ حاصل شد که ۵۸ درصد قیمت تمام شده حفر به روش چالزنی و آتشفکری در حالت اجرای الگوی بهینه (خرج ویژه حداقل) است. امکان تغییر روش حفر سنگ از آتشفکری به مکانیکی می‌تواند تحول مهمی در بهره‌وری اقتصادی، ایمنی و زیست محیطی باشد.

کلمات کلیدی

حفر، چالزنی، آتشفکری، مکانیکی، بولدوزر، ویژگی‌های توده سنگ، قیمت تمام شده، بهره‌وری.

۱- مقدمه

مهندس آتشباری از دامنه تغییرات خرج ویژه است که برای راهنمایی و مقایسه و در ابتدای کار ممکن است، مفید باشند. یک نوع سنگ در شرایط مختلف دارای ویژگی‌های متغیر برجا است و همچون مقاومت فشارشی یک محوری تنها یکی از ویژگی‌های موثر توده‌سنگ در خرج ویژه است. کلیه عوامل توده سنگ که در خرج ویژه موثرند، در این جدول‌ها لحاظ نشده‌اند.

برای برآورد خرج ویژه با استفاده از تئوری انتقال انرژی از پارامترهای متعددی مانند انرژی سطحی مخصوص، ضریب انتقال انرژی از ماده منفجره به سنگ (ضریب امپدانس)، سطح جدید به وجود آمده با انفجار، سرعت عبور موج فشارشی در سنگ (V_p) است. برای یک نوع سنگ همچون سنگ آهک سرعت عبور موج دارای مقدار ثابتی نیست، همچنین سرعت عبور موج در توده سنگ به علت وجود ناپیوستگی‌ها بسیار کمتر از سنگ سالم است و با تغییر جهت یافتگی ناپیوستگی‌ها، سرعت امواج تغییر می‌کند و به نحو دیگری تاثیر جهت یافتگی ناپیوستگی‌ها در آتشباری با توجه به نسبت استقرار آن‌ها با جهت دامنه پله مورد ارزیابی و امتیازدهی قرار گرفته است [۹، ۱۰]. این می‌تواند یکی از علت‌هایی باشد که برآورد خرج ویژه با استفاده از تئوری انتقال انرژی برای معادن روباز دور از خرج ویژه واقعی حاصل شود. فرمول‌های تجربی برای برآورد خرج ویژه به صورت استفاده از نسبت بار سنگ به قطر چال، فاقد پارامترهای متعدد موثر توده سنگ برجا در آتشباری‌اند [۸-۵] اما روش‌هایی که مبتنی بر ویژگی‌های برجای توده سنگ است و پارامترهای موثرتری را مورد توجه قرار داده، بیشتر مبین خرج ویژه لازم برای انفجار سنگ می‌توانند باشند زیرا ویژگی‌های توده سنگ مهمترین پارامترها در میزان خردایش‌اند [۱۱-۱۵].

برای نشان دادن تاثیر پارامترهای توده سنگ در خرج ویژه، پژوهش‌های متعددی به عمل آمده است. شاخص‌های قابلیت انفجار (BI) و خردایش سنگ (RFI) به علت در نظر گرفتن پارامترهای بیشتر، نسبت به روش‌های دیگر، بهتر بیانگر ویژگی‌های توده سنگ است. بازه تغییرات امتیازات BI حدود ۲۰ تا ۱۰۰ به ترتیب برای سست‌ترین و سخت‌ترین شرایط توده سنگ و برعکس بازه تغییرات امتیازات RFI حدود ۱۶ تا ۴۲ به ترتیب برای سخت‌ترین و سست‌ترین شرایط توده سنگ گزارش شده است [۹-۱۱]. خرج ویژه مبتنی بر ویژگی‌های توده سنگ برجا به خرج ویژه واقعی و مورد نیاز آتشباری

چالزنی و آتشباری یکی از روش‌های مرسوم حفر سنگ است و درصد قابل توجهی از هزینه مربوط به استخراج معادن روباز را به خود اختصاص می‌دهد. مطالعه موردی معدن سنگ گچ ایواوغلی خوی نشان می‌دهد که ۴۰ درصد قیمت تمام شده واحد محصول مربوط به هزینه‌های چالزنی و آتشباری است [۱]. تغییر روش حفر از چالزنی و آتشباری به مکانیکی با استفاده از ماشین‌آلات ممکن است، مزایای متعددی در رابطه با جلوگیری از صدمات زیست‌محیطی ناشی از لرزش زمین، عقب‌زدگی، پرتاب سنگ، ایجاد صدا، ایجاد گرد و غبار و گازهای سمی، صدمه به جانوران و گیاهان، خسارات جانی و مالی ناشی از استفاده مواد منفجره، افزایش تعداد مراحل اجرای حفر شامل چالزنی، تهیه و حفاظت مواد منفجره و آتشباری، نیازمند پرسنل دارای تخصص‌های متعدد چالزنی و آتشباری و همچنین افزایش ایمنی را در بر داشته باشد. توده سنگ یک جسم همگن نیست و دارای پارامترهای متعدد موثر بر خرج ویژه برای خردایش آن است. برای تعیین خرج ویژه حفر سنگ به روش آتشباری راهکارهای متعددی به شرح زیر تاکنون ارائه شده است:

- برآورد خرج ویژه با استفاده از جداول تجربی برای بعضی از سنگ‌ها [۳، ۲].

- برآورد خرج ویژه با استفاده از فرمول‌های انتقال انرژی از ماده منفجره به سنگ و مقدار انرژی برای خردایش سنگ [۴].
- برآورد خرج ویژه با استفاده از نسبت بار سنگ به قطر چال حاصل از فرمول‌های تجربی [۸-۵].

- برآورد خرج ویژه مبتنی بر ویژگی‌های توده سنگ مانند روش شاخص قابلیت انفجار (BI) [۹، ۱۰] و برآورد نسبت بار سنگ به قطر چال با استفاده از شاخص خردایش سنگ (RFI) [۱۱].

- برآورد خرج ویژه و الگوی چال‌های انفجار به صورت تجربی طی انجام عملیات چالزنی و آتشباری با به حداقل رساندن قیمت تمام شده مجموع انفجار اصلی و ثانویه [۱۱].

خرج ویژه ارائه شده در جدول‌ها تابع پارامترهایی مانند مقاومت فشارشی یک محوری و درجه هوازدگی است [۳، ۲]. در چنین جداولی خرج ویژه از حدود ۰٫۱۵ کیلوگرم بر مترمکعب برای سست‌ترین سنگ‌ها تا ۱٫۵ کیلوگرم بر مترمکعب برای سنگ‌های با مقاومت خیلی زیاد در برابر شکسته‌شدن تغییر می‌کند. یکی از مزیت‌های وجود چنین جدول‌هایی، آگاهی

توجه به مشخصات توده سنگ است. ایفار و گوگتان [۲۶] به بررسی و ارزیابی شاخص قابلیت حفاری برای انتخاب مناسب ماشین‌آلات معدنی در معادن روباز با توجه به مشخصات توده سنگ و با استفاده از نظریه مجموعه‌های فازی پرداختند. آنها در مطالعاتشان مشخصه‌هایی از توده سنگ شامل مقاومت فشارشی یک محوری، جهت‌یافتگی ناپیوستگی‌ها و هوازدگی را مورد بررسی قرار دادند. نتایج حاصل از بررسی‌های آنها نشان داد که با استفاده از نظریه مجموعه‌های فازی می‌توان بر عدم اطمینان پارامترهای موجود در سیستم‌های کلاسیک غلبه کرده و قابلیت حفاری توده سنگ را در ۷ کلاس با دقت بالایی طبقه‌بندی کرد. امین و همکاران [۲۷] به ارزیابی قابلیت حفاری مکانیکی از دیدگاه مصرف انرژی ویژه و آهنگ تولید دستگاه با کمک مطالعات آماری پرداختند. آنها در مطالعاتشان پارامترهایی مانند وزن حجمی، سختی چکش اشمیت، سرعت موج فشارشی، شاخص بار نقطه‌ای، مقاومت کششی، مقاومت فشارشی یک محوری و شاخص دوام سنگ را مورد ارزیابی قرار دادند. تیمبوس و سارا اوقلو [۲۸] به بررسی قابلیت اجرای انواع روش‌های حفاری مانند حفر مکانیکی، شکست هیدرولیکی و انفجار در توده سنگ با استفاده از شاخص مقاومت زمین‌شناسی پرداختند. سیستم طبقه‌بندی پیشنهادی تنها قابلیت ارزیابی اجرای روش‌های حفاری در توده سنگ‌های همگن را دارد و برای سنگ‌های ضعیف و خاک‌های سخت کارایی ندارد. کایا و همکاران [۷] به ارزیابی انواع روش‌های حفاری مانند حفاری مکانیکی و انفجار در یک پروژه تونل‌سازی در کشور ترکیه پرداختند. آنها در این مطالعه قابلیت حفاری را با کمک روش‌های پیشنهادی پتيفر و فوکس [۲۴] و تیمبوس و سارا اوقلو [۲۸] مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج حاصل از این مطالعات نشان داد که پارامترهایی مانند شاخص مقاومت زمین‌شناسی، شاخص مقاومت بار نقطه‌ای و ناپیوستگی‌ها از جمله مهمترین پارامترها برای ارزیابی قابلیت حفاری زیرزمینی است.

دیندارلو و ایردموسا [۲۹] به بررسی و طبقه‌بندی قابلیت حفاری مکانیکی با کمک درخت تصمیم پرداختند. آنها در مطالعه‌شان ۴۶ توده سنگ را از دیدگاه قابلیت حفاری مکانیکی در کلاس‌های مختلف مورد ارزیابی قرار دادند و نتایج حاصل را با سایر سیستم‌های طبقه‌بندی کلاسیک مورد مقایسه قرار دادند. نتایج حاصل از این بررسی‌ها نشان داد که درخت تصمیم می‌تواند با حل عدم قطعیت‌ها (مهمترین محدودیت

نزدیکتر است. با وجود پژوهش‌های متعددی که برای برآورد خرج ویژه و خردایش مبتنی بر ویژگی‌های توده سنگ برجا به عمل آمده است [۱۱، ۹، ۱۶-۱۹]، تاکنون بهره‌وری حاصل از شرایط تغییر روش حفر از آتشکاری به مکانیکی مبتنی بر ویژگی‌های توده سنگ برجا و قیمت تمام شده مورد توجه قرار نگرفته است. میزان سستی توده سنگ برجا می‌تواند مبنای مهمی برای تغییر روش حفر باشد. میزان سستی توده سنگ برجا را می‌توان در حدود کمترین امتیازات شاخص قابلیت انفجار و بیشترین امتیازات شاخص خردایش سنگ در آتشکاری و همچنین قابلیت حفر توده سنگ با رپرها و تیغه (شرایط سست‌تر) بولدوزر جستجو کرد. پژوهش‌های به عمل آمده در مورد قابلیت حفر توده سنگ با بولدوزر بیشتر در زمینه پروژه‌های عمرانی بوده و بر ویژگی‌های ژئومکانیکی مانند مقاومت سنگ سالم و فاصله ناپیوستگی‌ها استوار بوده است [۲۰-۲۳]. چنین ویژگی‌های ژئومکانیکی مانند مقاومت فشارشی یک محوری و فاصله ناپیوستگی‌ها در شاخص قابلیت انفجار و شاخص خردایش سنگ نیز وجود دارند.

پتيفر و فوکس [۲۴]. بر اساس مطالعات فرانکلین و همکاران [۲۰] به ارزیابی قابلیت اجرای انواع روش‌های حفاری با توجه به مشخصات مقاومتی توده سنگ (مقاومت بار نقطه‌ای) و مشخصات ناپیوستگی توده سنگ پرداختند. پتيفر و فوکس روش‌های حفر آتشکاری، حفر با ماشین‌آلات شامل بولدوزرهای D6 تا D11 و بیل‌های مکانیکی را بر اساس مقاومت بار نقطه‌ای و جهت‌یافتگی ناپیوستگی‌ها مورد ارزیابی قرار دادند. مک‌گریگور و همکاران [۲۲] طی مطالعه‌ای بر روی داده‌های جمع‌آوری شده از بزرگراه‌ها و معادن کشور استرالیا، دریافتند که شاخص قابلیت حفاری مکانیکی توده سنگ تابعی از پارامترهای مقاومت فشارشی یک محوری سنگ سالم، سرعت موج فشارشی، زبری و مقاومت ناپیوستگی‌ها، هوازدگی توده سنگ و همچنین وزن بولدوزر است.

باساریر و کارپوز [۲۵] سیستم طبقه‌بندی جدید خود را در ۶ کلاس شامل ۵ کلاس حفاری به صورت مکانیکی و یک کلاس حفاری با استفاده از مواد منفجره بر اساس مشخصات توده سنگ از قبیل مقاومت فشارشی یک محوری، سرعت موج فشارشی (P)، جهت‌یافتگی ناپیوستگی‌ها و سختی چکش اشمیت برای ارزیابی قابلیت حفاری ارایه دادند. همچنین این سیستم طبقه‌بندی قادر به ارزیابی توان تولید انواع ماشین‌آلات حفاری (انواع بولدوزرهای D8 تا D11) با

آتشباری قیمت تمام شده فرآیند خردایش سنگ از چالزنی تا پایان مرحله آتشباری تعیین شده است. خرج ویژه تا حد امکان کاهش داده شده و قیمت تمام شده مربوط به آن تعیین شده است. همچنین قیمت تمام شده حفر سنگ به روش مکانیکی با استفاده از بولدوزر نیز تعیین شد. در نهایت قیمت تمام شده حداقل فرآیند خردایش سنگ از چالزنی تا پایان مرحله آتشباری با قیمت تمام شده حفر سنگ به روش مکانیکی با استفاده از بولدوزر مقایسه شده و بهره‌وری آن‌ها مورد بررسی قرار گرفته است.

۲- شاخص‌های قابلیت انفجار و شاخص خردایش سنگ

تعداد طبقه‌بندی‌های توده سنگ برای چالزنی و آتشباری زیاد نیستند. یکی از مهمترین و مرسوم‌ترین روش‌ها مبتنی بر ویژگی‌های توده سنگ به علت در نظر گرفتن پارامترهای بیشتر، طبقه‌بندی لیلی [۱۰] با عنوان شاخص قابلیت انفجار (BI) متشکل از پنج پارامتر شامل شرح توده سنگ^۳ (RMD)، فاصله ناپیوستگی^۴ (JPS)، جهت‌یافتگی ناپیوستگی^۵ (JPO)، وزن مخصوص^۶ (SGI) و مقاومت فشاری تک محوری^۷ (UCS) مطابق جدول ۱ است. شاخص قابلیت انفجار برابر ۵۰ درصد جمع امتیازهای پنج پارامتر است (جدول ۱). حداکثر مقدار BI، ۱۰۰ است. مقدار ۱۰۰ برای ماده معدنی سنگ آهن سخت با طبیعت یک‌پارچه در ناحیه پیلبارا در استرالیا غربی حاصل شده است. حد پایین این شاخص برای شیل‌های نرم هوازده و خردشده توسط لیلی [۹] حدود ۲۰ گزارش شده است. لیلی [۹] با استفاده از داده‌های تجربی خرج ویژه آنفو و مطالعه شاخص قابلیت انفجار، رابطه بین خرج ویژه آنفو به کیلوگرم بر تن (q) و شاخص قابلیت انفجار (BI) را به صورت رابطه ۱ ارائه داده است:

$$q = 0.004BI \quad (1)$$

شاخص قابلیت انفجار به علت در نظر گرفتن پارامترهای بیشتر نسبت به روش‌های دیگر، بهتر بیانگر ویژگی‌های توده سنگ است. با توجه به وجود ویژگی‌های متعدد و پیچیده سنگ، روش شاخص قابلیت انفجار برای یک نوع ماده منفجره مستدل‌تر از فرمول‌های تجربی است. به این علت روش یاد شده بیشتر مورد استفاده قرار گرفته است [۳۱، ۱۶].

شاخص خردایش سنگ نیز دارای پنج پارامتر شامل بازشدگی ناپیوستگی‌ها^۸، فاصله ناپیوستگی‌ها جهت‌یافتگی ناپیوستگی‌ها، شرح توده سنگ (خرد شده، بلوکی و یکپارچه)

در سیستم‌های کلاسیک) با دقت بیشتری به ارزیابی قابلیت اجرای روش‌های حفاری در توده سنگ پردازد.

لیانگ و همکاران [۲۳] به بررسی و ارزیابی قابلیت حفاری توده‌سنگ پرداختند. آن‌ها در طی مطالعه‌ای یک سیستم طبقه‌بندی جدید مبتنی بر مشخصات توده سنگ شامل مقاومت فشاری یک محوری، مقاومت بار نقطه‌ای، سختی اشمیت، چگالی، مقاومت کششی، شاخص دوام سنگ، تعداد، فاصله و جهت یافتگی ناپیوستگی‌ها و رطوبت ارائه دادند. در نهایت آن‌ها توانستند با استفاده از سیستم طبقه‌بندی جدید خود، قابلیت حفاری توده سنگ را در ۴ کلاس حفاری به صورت مکانیکی و یک کلاس حفاری با مواد منفجره با دقت بالایی طبقه‌بندی کنند.

پیریانتو و همکاران [۳۰] نشان دادند که آهنگ تولید حفر با ریپرهای بولدوزر برای ماسه‌سنگ، ماسه‌سنگ توفی، ماسه‌سنگ سیلتی و سنگ رس سیلتی به ترتیب دارای مقاومت‌های فشاری یک محوری ۶۳۱، ۵۶۵، ۴۷۱، ۳۶۹ مگاپاسکال به ترتیب برابر ۲۱۷/۴، ۳۲۵/۷، ۳۴۹/۲ و ۴۰۷/۷ مترمکعب در ساعت است. اما تاکنون رابطه‌ای بین تولید ساعتی بولدوزر و ویژگی‌های ژئومکانیکی ارائه نشده است. چنانچه حفر به روش مکانیکی امکان‌پذیر باشد، قیمت تمام شده هر دو روش نیز معیار مهمی برای تبدیل روش حفاری است. برای مقایسه قیمت تمام شده آتشباری با روش حفر مکانیکی نیاز است، خرج ویژه و الگوی چال‌های آتشباری به صورت تجربی طی انجام عملیات چالزنی و آتشباری برای به حداقل رساندن قیمت تمام شده در فرآیند انفجار طوری که آتشباری امکان‌پذیر باشد، به دست آورد.

معدن مورد تحقیق، سنگ آهک سردار بوکان است. این معدن در فاصله ۳۸ کیلومتری شمال شهرستان بوکان و در شرق جاده بوکان-میان‌دوآب قرار گرفته است. در این تحقیق ضمن تشریح شاخص قابلیت انفجار (BI) و شاخص خردایش سنگ (RFI)، ابتدا ویژگی‌های مکانیکی و فیزیکی سنگ شامل مقاومت فشاری یک محوری و وزن حجمی با استفاده از نمونه‌های آزمایشگاهی و ویژگی‌های ناپیوستگی‌ها شامل فاصله ناپیوستگی‌ها، بازشدگی ناپیوستگی‌ها، جهت‌یافتگی ناپیوستگی‌ها و شرح توده سنگ شامل خرد شده، بلوکی و یک پارچه به صورت برجای تعیین و شاخص قابلیت انفجار و شاخص خردایش سنگ برآورد شده‌اند. در ادامه همچنین الگوی چال‌های آتشباری با توجه به شاخص قابلیت انفجار و شاخص خردایش سنگ مورد بررسی قرار گرفته و طی عملیات

جدول ۱: پارامترهای شاخص قابلیت انفجار و امتیاز آن‌ها [۱۰]

امتیاز	پارامترهای شاخص قابلیت انفجار (BI)
۱۰	۱- شرح توده سنگ (RMD)
۲۰	۱-۱- پودری (خردشده)
۵۰	۲-۱- بلوکی
	۳-۱- توده‌ای (کاملاً یکپارچه)
۱۰	۲- فاصله ناپیوستگی (JPS)
۲۰	۱-۲- نزدیک، متر ۰٫۱ <
۵۰	۲-۲- متوسط، متر ۰٫۱ -
	۲-۳- عریض، متر ۱ >
۱۰	۳- جهت‌یافتگی ناپیوستگی (JPO)
	۱-۳- افقی
۲۰	۲-۳- شیب به طرف بیرون جبهه‌کار
۳۰	۳-۳- امتداد عمود بر جبهه‌کار
۴۰	۴-۳- شیب به طرف داخل جبهه‌کار
۱۰ تا ۵۰	۴- وزن مخصوص (SGI) SGI= 25G- 50
UCS	۵- مقاومت فشارشی یک محوری (UCS) به مگاپاسکال
۰٫۵	
BI = 0.5(RMD+ JPS+ JPO+ SGI+ 0.05UCS)	

جدول ۲: پارامترهای شاخص خردایش سنگ و عدد معرف آن‌ها [۱۱]

عدد معرف	پارامترهای شاخص خردایش سنگ (RFI)
DPA	۱- جدایش دهانه درزه‌ها (ناپیوستگی‌ها)
۸	۱-۱- خیلی کم بسته، میلی‌متر ۱ <
۷	۲-۱- کم، میلی‌متر ۵-۱
۶	۳-۱- متوسط و پر شده، میلی‌متر ۵۰-۵
۵	۴-۱- متوسط و بدون پرشدگی، میلی‌متر ۵۰-۵
۴	۵-۱- زیاد و پر شده، میلی‌متر ۵۰ >
۳	۶-۱- زیاد و بدون پرشدگی، میلی‌متر ۵۰ >
DPS	۲- فاصله درزه‌ها
۱۲	۱-۲- نزدیک، متر ۰٫۱ <
۷	۲-۲- متوسط، متر ۰٫۱-۱
۴	۳-۲- عریض، متر ۱ >
DPO	۳- جهت‌یافتگی درزه‌ها
۶	۱-۳- افقی
۵	۲-۳- شیب به طرف بیرون جبهه‌کار
۴	۳-۳- امتداد عمود بر جبهه‌کار
۳	۴-۳- شیب به طرف داخل جبهه‌کار
RMD	۴- شرح توده سنگ
۱۰	۱-۴- پودری (خرد شده)
۶	۲-۴- بلوکی
۴	۳-۴- کاملاً یکپارچه
UCS	۵- مقاومت فشارشی یک محوری ماده‌سنگ
۶	۱-۵- خیلی کم، مگاپاسکال ۲۵ <
۵	۲-۵- مقاومت کم، ۲۵ تا ۵۰ مگاپاسکال
۴	۳-۵- مقاومت متوسط، ۵۰ تا ۱۰۰ مگاپاسکال
۳	۴-۵- مقاومت زیاد، ۱۰۰ تا ۲۰۰ مگاپاسکال
۲	۵-۵- مقاومت خیلی زیاد، ۲۰۰ مگاپاسکال >
RFI = DPA+ DPS+ DPO+ RMD+ UCS	

و مقاومت فشارشی یک محوری سنگ سالم است (جدول ۲). امتیاز مربوط به هر پارامتر با یک عدد معرف نشان داده شده است. این روش نه تنها تاثیر ویژگی‌های متعدد پیچیده توده سنگ را به طور کامل تر نشان می‌دهد، بلکه مجموع اعداد معرف به عنوان شاخص خردایش سنگ به شیوه‌ای ساده برابر عدد نسبت B/ϕ_{II} خلاصه می‌کند مجموع اعداد معرف (RFI) حداکثر ۴۲ و حداقل ۱۶ است [۱۱].

۳- اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی و برجا برای تعیین شاخص‌های قابلیت انفجار و خردایش سنگ و خرج ویژه حاصل از آن‌ها

۳-۱- تعیین مقاومت فشارشی یک محوری و وزن مخصوص سنگ

برای تعیین مقاومت فشارشی یک محوری، بلوک‌های قابل حمل سنگ از سه ناحیه (A، B و C) پله‌های معدن سردار بوکان برداشت و برای انجام آزمون‌های آزمایشگاهی به آزمایشگاه مکانیک سنگ منتقل شد (شکل ۱). ابتدا مغزه‌های به قطر ۵۴٫۷ میلی‌متر با دستگاه مغزه‌گیر تهیه شد، سپس دو انتهای نمونه‌ها با دستگاه مغزه‌بر بریده و آماده‌سازی شدند. مقاومت فشارشی نمونه‌ها بر اساس دستورالعمل انجمن

بین‌المللی مکانیک سنگ تعیین شد [۳۲]. نتایج آزمایش مقاومت فشارشی یک محوری برای زون‌های مورد تحقیق در جدول ۲ نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهد که میانگین مقاومت‌های فشارشی یک محوری سه زون نسبت به یکدیگر نزدیک‌اند (جدول ۳). سنگ آهک این معدن دارای مقاومت خیلی کم و در عین حال نسبتاً همگن است. میانگین کلی مقاومت سنگ آهک برابر ۱۳٫۳۸ مگاپاسکال است. وزن مخصوص نمونه‌های سنگ آهک در سه زون معدن سردار بوکان نیز بر اساس دستورالعمل انجمن بین‌المللی مکانیک سنگ اندازه‌گیری شد [۳۳]. همچنین ابعاد نمونه‌ها مطابق جدول ۴ اندازه‌گیری شد. نمونه‌های آماده‌سازی شده به مدت ۲۴ ساعت داخل خشک‌کن با درجه حرارت ۱۰۵ درجه

فشارشی یک محوری، وزن مخصوص و برداشت‌های برج، پارامترهای شاخص قابلیت انفجار مشخص شدند. شاخص قابلیت انفجار در زون‌های مختلف معدن سنگ آهک سردار بوکان به ترتیب در جدول‌های ۵، ۶ و ۷ نشان داده شده است. میانگین شاخص قابلیت انفجار برای معدن مورد مطالعه برابر با ۲۰٫۳۳ است که حدود مقدار حداقل برای شاخص قابلیت انفجار است. با استفاده از چنین مقدار حداقلی برای شاخص قابلیت انفجار که سنگ دارای پایین‌ترین حد سستی بر اساس شاخص قابلیت انفجار برای چالزنی و آتشباری است، می‌توان موضوع تغییر روش حفر از چالزنی و آتشباری به روش

سانتی‌گراد نگهداری شدند، سپس وزن خشک آن‌ها با استفاده از ترازوی دیجیتال اندازه‌گیری شده و در نهایت وزن حجمی آن‌ها تعیین شد. وزن حجمی از سه ناحیه (A، B و C) پله‌های معدن به ترتیب ۲٫۲۶، ۲٫۳۵ و ۲٫۲۵ گرم بر سانتی‌متر مکعب است (جدول ۴). میانگین کلی وزن حجمی برابر ۲٫۲۴ گرم بر سانتی‌متر مکعب (تن بر متر مکعب) است.

۳-۲- تعیین امتیاز شاخص قابلیت انفجار سنگ و خرج ویژه حاصل از آن

بر اساس نتایج حاصل از اندازه‌گیری‌های تعیین مقاومت



شکل ۱: نمایی از پله‌های معدن سنگ آهک سردار بوکان

جدول ۳: نتایج آزمایش مقاومت فشارشی یک محوری نمونه‌های سنگ آهک معدن سردار بوکان

زون	شماره نمونه	قطر نمونه (میلی‌متر)	سطح مقطع (میلی‌متر مربع)	حداکثر نیروی وارد (نیوتون)	مقاومت فشارشی یک محوری (مگاپاسکال)	متوسط مقاومت فشارشی یک محوری (مگاپاسکال)
A	۱	۵۴٫۷	۲۳۵۰	۳۳۱۲۷	۱۴٫۰۹	۱۴٫۱۶
	۲	۵۴٫۷	۲۳۵۰	۳۳۲۴۶	۱۴٫۱۵	
	۳	۵۴٫۷	۲۳۵۰	۳۳۴۷۸	۱۴٫۲۵	
B	۴	۵۴٫۷	۲۳۵۰	۲۹۳۵۷	۱۲٫۴۹	۱۲٫۸۱
	۵	۵۴٫۷	۲۳۵۰	۲۹۸۶۸	۱۲٫۷۰	
	۶	۵۴٫۷	۲۳۵۰	۳۱۱۲۵	۱۳٫۲۴	
C	۷	۵۴٫۷	۲۳۵۰	۳۱۸۲۶	۱۳٫۵۴	۱۳٫۱۸
	۸	۵۴٫۷	۲۳۵۰	۳۱۱۷۳	۱۳٫۲۶	
	۹	۵۴٫۷	۲۳۵۰	۲۹۹۲۶	۱۲٫۷۳	

$$q = 0.0813 \left(\frac{kg}{ton} \right) \times 2.24 \left(\frac{ton}{m^3} \right) = 0.18 \left(\frac{kg}{m^3} \right) \quad (3)$$

خرج ویژه ۰٫۰۸۱۳ کیلوگرم بر تن (۰٫۱۸ کیلوگرم بر مترمکعب) حاصل از شاخص قابلیت انفجار نیز خرج ویژه حداقلی است.

حفر مکانیکی را مورد بررسی قرار داد. خرج ویژه پیش‌بینی شده با استفاده از شاخص قابلیت انفجار به شرح رابطه‌های ۲ و ۳ به دست آمد:

$$q = 0.004BI = 0.004 \times 20.33 = 0.0813 \left(\frac{kg}{ton} \right) \quad (2)$$

جدول ۴: نتایج وزن مخصوص نمونه‌های سنگ آهک معدن سردار بوکان

زون	شماره نمونه	قطر نمونه (میلی‌متر)	طول نمونه (میلی‌متر)	حجم نمونه (سانتی‌متر مکعب)	وزن نمونه (گرم)	وزن حجمی (گرم بر مترمکعب)	متوسط وزن حجمی (گرم بر مترمکعب)
A	۱	۵۴٫۷	۳۵٫۷	۸۳٫۸۵	۱۷۹٫۷	۲٫۴۰	۲٫۲۶
	۲	۵۴٫۷	۳۵٫۲	۸۲٫۶۸	۱۷۹٫۱	۲٫۳۹	
	۳	۵۴٫۷	۳۰٫۴	۷۱٫۴۰	۱۵۱٫۴	۱٫۹۷	
B	۴	۵۴٫۷	۴۰٫۴	۹۴٫۸۹	۱۸۸٫۷	۲٫۳۱	۲٫۳۵
	۵	۵۴٫۷	۲۵٫۴	۵۹٫۶۶	۱۲۵٫۶	۲٫۳۴	
	۶	۵۴٫۷	۲۹٫۵	۶۹٫۲۹	۱۵۲٫۲	۲٫۴۰	
C	۷	۵۴٫۷	۲۶٫۵	۶۲٫۲۴	۱۳۱٫۷	۲٫۳۵	۲٫۲۵
	۸	۵۴٫۷	۳۰	۷۰٫۴۶	۱۳۰٫۳	۲٫۱۵	
	۹	۵۴٫۷	۳۹	۹۱٫۶۰	۱۷۵٫۷	۲٫۲۴	

جدول ۵: برآورد شاخص قابلیت انفجار در در زون A معدن سنگ آهک سردار بوکان

امتیاز	توصیف پارامتر	پارامتر
۱۰	خرد شده	شرح توده سنگ (RMD)
۱۰	کمتر از ۱۰ سانتی‌متر	فاصله ناپیوستگی (JPS)
۱۰	افقی	جهت یافتگی ناپیوستگی (JPO)
۱۰	SGI=25G-50=25×2.26-50	وزن مخصوص (SGI)
۰٫۷۰۸	0.05UCS=0.05×14.16	مقاومت فشارشی یک محوری (UCS)
$BI = 0.5(RMD + JPS + JPO + SGI + 0.05UCS) = 20.35$		

جدول ۶: برآورد شاخص قابلیت انفجار در در زون B معدن سنگ آهک سردار بوکان

امتیاز	توصیف پارامتر	پارامتر
۱۰	خرد شده	شرح توده سنگ (RMD)
۱۰	کمتر از ۱۰ سانتی‌متر	فاصله ناپیوستگی (JPS)
۱۰	افقی	۳- جهت یافتگی ناپیوستگی (JPO)
۱۰	SGI=25G-50=25×2.35-50	۴- وزن مخصوص (SGI)
۰٫۶۴	0.05UCS=0.05×12.81	۵- مقاومت فشارشی یک محوری (UCS)
$BI = 0.5(RMD + JPS + JPO + SGI + 0.05UCS) = 20.32$		

جدول ۷: برآورد شاخص قابلیت انفجار در در زون C معدن سنگ آهک سردار بوکان

امتیاز	توصیف پارامتر	پارامتر
۱۰	خرد شده	شرح توده سنگ (RMD)
۱۰	کمتر از ۱۰ سانتی متر	فاصله ناپیوستگی (JPS)
۱۰	افقی	۳- جهت یافتگی ناپیوستگی (JPO)
۱۰	$S_{GI}=25G-50=25 \times 2.25-50$	۴- وزن مخصوص (SGI)
۰.۶۶	$0.05UCS=0.05 \times 13.18$	۵- مقاومت فشارشی یک محوری (UCS)
$BI = 0.5(RMD+JPS+JPO+SGI+0.05UCS) = 20.33$		

جدول ۸: برآورد شاخص خردایش سنگ در معدن سنگ آهک سردار بوکان

امتیاز	توصیف پارامتر	پارامتر
۸	خیلی کم بسته، میلی متر < ۱	جدایش دهانه درزه‌ها (ناپیوستگی‌ها)
۱۲	نزدیک متر ۰/۱ <	فاصله درزه‌ها
۶	افقی	جهت یافتگی درزه‌ها
۱۰	خرد شده	شرح توده سنگ
۶	خیلی کم ۲۵ مگاپاسکال <	مقاومت فشارشی یک محوری
$RFI = DPA + DPS + DPO + RMD + UCS = 42$		

۳-۳- تعیین امتیاز شاخص خردایش

بر اساس نتایج حاصل از اندازه‌گیری‌های تعیین مقاومت فشارشی یک محوری و برداشت‌های برجا، پارامترهای شاخص خردایش سنگ مشخص شدند. مجموع امتیازهای شاخص خردایش سنگ برای زون‌های مورد مطالعه با توجه به یکسان بودن پارامترهای توده سنگ برابر ۴۲ (جدول ۸) برآورد شد. مقدار ۴۲ حاصل از شاخص خردایش سنگ (RFI) برابر نسبت بار سنگ به قطر چال است ($B/\phi_{ch} = 42$). در طراحی چالزنی و آتشباری برای تغییر خرج ویژه در عمل نسبت B/ϕ_{ch} تغییر داده می‌شود. به این علت خردایش سنگ برابر چنین نسبتی قرار داده شده است. با افزایش نسبت B/ϕ_{ch} خرج ویژه کاهش می‌یابد و بر عکس با کاهش نسبت B/ϕ_{ch} مقدار آن افزایش می‌یابد. چنانچه اندازه قطر چال (قطر سرمته) ثابت باشد، با افزایش بار سنگ نسبت B/ϕ_{ch} افزایش یافته و در نتیجه خرج ویژه کاهش می‌یابد. با استفاده از نسبت بار سنگ به قطر چال به دست آمده، خرج ویژه در مرحله طراحی الگوی چال‌های آتشباری تعیین می‌شود. خرج ویژه مربوط به نسبت بار سنگ به قطر چال ۴۲، برابر ۰.۲۵۳ کیلوگرم بر مترمکعب (۰.۱۱ کیلوگرم بر تن) به دست آمده است (بند ۴ مقاله). شاخص خردایش سنگ ۴۲ دارای حداکثر امتیاز است.

با استفاده از چنین مقدار حداکثری برای شاخص خردایش سنگ که توده سنگ دارای پایین‌ترین حد سستی به منظور انفجار است، معیار مناسبی برای تغییر روش حفر از چالزنی و آتشباری به روش حفر مکانیکی است. روش برآورد خرج ویژه مبتنی بر ویژگی‌های برجای توده سنگ، نه تنها خرج ویژه را واقعی‌تر برآورد می‌کند بلکه به وسیله آن‌ها می‌توان حد پایین سستی توده سنگ را که امکان تغییر روش از آتشباری به روش حفر مکانیکی است، به دست آورد. دو شاخص قابلیت انفجار و خردایش سنگ، امتیازهای متفاوتی دارند. هرچه شاخص قابلیت انفجار بیشتر باشد، حفر توده سنگ با آتشباری سخت‌تر و برعکس با افزایش امتیاز شاخص خردایش سنگ حفر راحت‌تر است. در معدن مورد تحقیق شاخص قابلیت انفجار دارای حدود کمترین مقدار در بازه تغییرات آن (۲۰/۳۳) و شاخص خردایش سنگ دارای بیشترین مقدار در بازه تغییرات آن (۴۲) است. بر اساس مقادیر شاخص‌های قابلیت انفجار و خردایش سنگ به دست آمده و همچنین مقاومت فشارشی یک محوری خیلی کم سنگ آهک (۱۳/۳۸ مگاپاسکال) و فاصله درزه‌های کمتر ۰/۱ متر، تغییر روش حفر از چالزنی و آتشباری به مکانیکی با وسیله‌ای مانند بولدوزر امکان‌پذیر است. گرچه روش حفر مکانیکی دارای مزایای قابل توجهی است اما قیمت تمام شده

سنگ به قطر چال برابر ۴۲ برای قطر چال ۱۰۱/۶ میلی‌متر (۴ اینچ)، طول چال ۱۲ متر و شبکه مثلث متساوی‌الاضلاع نیز به کار گرفته شد (جدول ۱۰). خرج ویژه در این حالت برابر ۰/۲۵۳ کیلوگرم بر مترمکعب (۰/۱۱ کیلوگرم بر تن) حاصل شد. خرج ویژه مصرفی بر اساس نسبت بار سنگ به قطر چال ۴۲ حاصل از روش شاخص خردایش سنگ (RFI)، ۰/۰۴ بیشتر از خرج ویژه برآورد شده حاصل از شاخص قابلیت انفجار سنگ (BI) است.

هزینه‌های حفر سنگ بر اثر انفجار شامل هزینه‌های چالزنی، خرج اصلی ماده منفجره آنفو، امولایت (پرایمر)، چاشنی الکتریکی، حمل و اسکورت مواد منفجره، دستمزد آتشفاری و سایر هزینه‌های مربوط به مواد منفجره است. روش پرداخت مستقیم هزینه‌ها، روش دقیق، آسان و امکان‌پذیر برای تعیین قیمت تمام شده است. با داشتن قیمت واحد هر یک از اقلام هزینه‌ها و مقدار مصرف آن به ازای یک متر مکعب یا یک تن سنگ مانند حفاری ویژه، خرج ویژه آنفو، خرج ویژه پرایمر (امولایت) و چاشنی ویژه، می‌توان هر یک از اقلام هزینه‌ها و در نتیجه جمع آن‌ها با عنوان قیمت تمام شده را به ازای یک مترمکعب یا یک تن سنگ تعیین کرد. هزینه‌های واحد چالزنی به متر طول چال برای قطر معین، ماده منفجره خرج اصلی آنفو، امولایت، چاشنی الکتریکی تاخیری و سایر هزینه‌ها مربوط به سال ۱۳۹۶ در جدول ۱۱ نشان داده شده‌اند. سایر هزینه‌ها شامل هزینه‌های حمل و اسکورت مواد منفجره، دستمزد آتشفاری و نظارت بر مصرف مواد منفجره‌اند. چنین هزینه‌هایی نیز به ازای مصرف یک کیلوگرم مواد منفجره تعیین شدند تا با داشتن خرج ویژه، مقدار آن‌ها برای یک متر مکعب یا یک تن سنگ به راحتی تعیین شود. سایر هزینه‌ها به ازای مصرف یک کیلوگرم مواد منفجره به ترتیب به شرح زیر تعیین شد.

- هزینه حمل و اسکورت مواد منفجره بر اساس قرارداد به ازای یک کیلوگرم ماده منفجره برابر با ۲۸۰۰ ریال است.

- هزینه دستمزد آتشفاری بر اساس قرارداد به ازای یک کیلوگرم ماده منفجره برابر با ۱۴۵۰۰ ریال است.

- هزینه یک بار نظارت بر مصرف مواد منفجره ۲۵۰۰۰۰۰ ریال است. در هر مرحله از انفجار برای آتشفاری ۴۸ چال دارای قطر ۱۰۱/۶ میلی‌متری مقدار ۲۶۶۴ کیلوگرم (۲۶۶۴=۵۵/۵×۴۸) مصرف می‌شود، بنابراین هزینه نظارت بر مصرف یک کیلوگرم مواد منفجره ۹۳۸ ریال است.

برای هر دو روش حفر آتشفاری و مکانیکی نیز معیار مهمی است که نیاز است، تعیین شود.

۴- چالزنی و آتشفاری و برآورد قیمت تمام شده

بهینه‌سازی قیمت تمام شده چالزنی و آتشفاری می‌تواند تاثیر به‌سزایی در اقتصاد معدن داشته باشد. برای رسیدن به این هدف علاوه بر اشراف به دانش چالزنی و آتشفاری و اجرای آن، برآورد قیمت تمام شده به صورت دقیق نقش مهمی در بهینه‌سازی عملیات حفر از دیدگاه اقتصادی دارد. استخراج در معدن سردار بوکان به صورت روباز و در حال حاضر دارای چهار پله که جبهه‌کارهای آن‌ها در تراز بالاتر از ناحیه اطراف بوده و فاقد باطله است. برای حفر سنگ از روش چالزنی و آتشفاری استفاده شده است اما با توجه به آثار مخرب روش حفر چالزنی و آتشفاری، در صورت امکان علاقه به تغییر روش حفر به مکانیکی نیز وجود داشته است.

در انفجارهای قبلی معدن نسبت بار سنگ به قطر چال (B/ϕ_h) برابر ۳۰ و خرج ویژه مصرفی به تبع آن برابر ۰/۶۷ کیلوگرم بر مترمکعب (۰/۲۹ کیلوگرم بر تن) برای چال به قطر ۷۶ میلی‌متر (۳ اینچ) و طول ۱۱ متر و شبکه مستطیل استفاده شده که نسبت بار سنگ به قطر چال خیلی کمتر از مقدار برآورد شده مبتنی بر ویژگی‌های توده سنگ سست بوده و خرج ویژه نیز خیلی بیشتر از مقدار برآورد شده مبتنی بر ویژگی‌های توده سنگ برجا است. در هر مرحله تعداد ۴۸ حلقه چال انفجاری در سه ردیف، حفر و انفجار شده‌اند. نتایج سنگ خرد شده پس از انفجار فاقد قطعات بزرگ است و نیاز به خردایش ثانویه نیز ندارد و در این معدن تنها انفجار اصلی توده سنگ برجا برای خردایش سنگ کافی است. با افزایش نسبت بار سنگ به قطر چال یا به عبارت دیگر کاهش خرج ویژه، قیمت تمام شده انفجار اصلی کاهش می‌یابد. بر این اساس نسبت بار سنگ به قطر چال افزایش یافته و به تبع آن خرج ویژه تا حدی که حفر سنگ امکان‌پذیر بود، کاهش داده شد. در شبکه مثلث متساوی‌الاضلاع توزیع انرژی بهتر است. مشخصات پارامترهای چال‌های آتشفاری برای نسبت بار سنگ به قطر چال (B/ϕ_h) برابر ۴۰، قطر خرج ۷۶ میلی‌متر و طول چال ۸ متر برای شبکه مثلث متساوی‌الاضلاع مطابق جدول ۹ تغییر داده شد. خرج ویژه مصرفی برابر ۰/۲۷۵ کیلوگرم بر مترمکعب (۰/۱۲ کیلوگرم بر تن) حاصل شد.

بر اساس شاخص خردایش سنگ به دست آمده، نسبت بار

جدول ۹: مشخصات پارامترهای چال انفجار مرحله دوم دارای نسبت بار سنگ به قطر چال برابر ۴۰ و قطر چال ۷۶ میلی‌متر

ردیف	پارامترها	واحد	مقدار پارامترها
۱	قطر چال ها (ϕ_h)	میلی‌متر	۷۶
۲	بار سنگ (B)	متر	۳٫۰۴
۳	نسبت بار سنگ به قطر چال (B/ϕ_h)	-	۴۰٫۰
۴	فاصله چال ها (S)، ($S=1.15B$)	متر	۳٫۵۰
۵	اضافه حفر چال (U)، ($U=0.33B$)	متر	۱٫۰
۶	شیب چال (α)	درجه	۸۰
۷	طول چال ها (H)، ($H=(K/\sin\alpha)+U$)	متر	۸
۸	ارتفاع پله (K)، ($K=(H-U)\sin\alpha$)	متر	۶٫۸۹
۹	طول گل گذاری (St)، ($S_t=0.905B$)	متر	۲٫۷۵
۱۰	طول خرج (Le)، ($Le=(H-S_t)$)	متر	۵٫۲۵
۱۱	حجم سنگ بازای یک چال (V)، ($V=BKS$)	متر مکعب	۷۳٫۳۱
۱۲	وزن واحد حجم سنگ (γ_r)	تن بر متر مکعب	۲٫۲۴
۱۳	وزن سنگ به ازای یک چال (W)	تن	۱۶۴٫۲۱
۱۴	حفاری ویژه (H/V)	متر بر متر مکعب	۰٫۱۰۹
۱۵	ضریب سفتی (K/B)	-	۲٫۲۷
۱۶	چاشنی ویژه (1/KBS)	یک بر متر مکعب	۰٫۱۰۱۴
۱۷	نوع خرج میان چال (خرج اصلی) آنفو	-	-
۱۸	وزن حجمی آنفو (γ_c)	گرم بر سانتی‌متر مکعب	۰٫۸۵
۱۹	تراکم خرج در میان چال (I_c)	کیلوگرم بر متر	۳٫۸۵
۲۰	مقدار خرج میان چال (Q_c)	کیلوگرم	۲۰٫۲۱
۲۱	نوع خرج ته چال امولایت	-	-
۲۲	وزن حجمی امولایت (Q_b)	گرم بر سانتی‌متر مکعب	۱٫۲۵
۲۳	مقدار خرج ته چال (Q_b)	کیلوگرم	۰٫۳۷
۲۴	کل خرج چال (Q)، ($Q=Q_c+Q_b$)	کیلوگرم	۲۰٫۵۸
۲۵	خرج ویژه میان چال (q_c)	کیلوگرم بر متر مکعب	۰٫۲۷
۲۶	خرج ویژه ته چال (q_b)	کیلوگرم بر متر مکعب	۰٫۱۰۰۵
۲۷	خرج ویژه مصرفی (q) به ازای متر مکعب سنگ	کیلوگرم بر متر مکعب	۰٫۲۷۵
۲۸	خرج ویژه مصرفی (q_t) به ازای تن سنگ	کیلوگرم بر تن	۰٫۱۲

هزینه حفاظت و نگهداری انبار مواد منفجره در معدن سنگ آهک سردار بوکان به دلیل نبود انبار صفر ریال است. هزینه حفاظت و نگهداری انبار مواد منفجره در معدن مشابه ۱۷۰۰۰۰۰۰ ریال در ماه (۲۰۴۰۰۰۰۰۰ ریال در سال) است. در حال حاضر ۵۰۰۰۰۰ تن سنگ در سال آتشباری می‌شود که هزینه حفاظت و نگهداری انبار برابر ۴۰۸۰ ریال به ازای یک تن سنگ است. با توجه به خرج ویژه ۰٫۱۱ کیلوگرم بر تن، هزینه حفاظت و نگهداری انبار ۳۷۰۹۰ ریال به ازای مصرف یک کیلوگرم مواد منفجره است. اگرچه با داشتن انبار، انتقال حجم بیشتری از مواد منفجره امکان‌پذیر بوده و باعث می‌شود که هزینه حمل و اسکورت مواد منفجره کمتر شود اما

هزینه حفاظت و نگهداری انبار در مقایسه قابل توجه است. این نشان می‌دهد که آتشباری موردی (بدون داشتن انبار) اقتصادی‌تر است. بنابراین برای کاهش هزینه‌ها، آتشباری به صورت موردی و بدون انبار مواد منفجره استفاده می‌شود. مجموع هزینه‌های حمل و اسکورت مواد منفجره، دستمزد آتشباری و نظارت بر مصرف مواد منفجره با عنوان سایر هزینه‌ها برای مصرف یک کیلوگرم مواد منفجره برابر ۱۸۲۳۸ ریال ($2800+14500+938=18238$) است (جدول ۱۱). با استفاده از حفاری ویژه، خرج ویژه مواد منفجره آنفو، پرایمر (امولایت)، خرج ویژه کلی و چاشنی ویژه و هزینه واحد چالزنی برای یک متر طول چال دارای قطر معین، هزینه‌های

هزینه حفاظت و نگهداری انبار مواد منفجره در معدن سنگ آهک سردار بوکان به دلیل نبود انبار صفر ریال است. هزینه حفاظت و نگهداری انبار مواد منفجره در معدن مشابه ۱۷۰۰۰۰۰۰ ریال در ماه (۲۰۴۰۰۰۰۰۰ ریال در سال) است. در حال حاضر ۵۰۰۰۰۰ تن سنگ در سال آتشباری می‌شود که هزینه حفاظت و نگهداری انبار برابر ۴۰۸۰ ریال به ازای یک تن سنگ است. با توجه به خرج ویژه ۰٫۱۱ کیلوگرم بر تن، هزینه حفاظت و نگهداری انبار ۳۷۰۹۰ ریال به ازای مصرف یک کیلوگرم مواد منفجره است. اگرچه با داشتن انبار، انتقال حجم بیشتری از مواد منفجره امکان‌پذیر بوده و باعث می‌شود که هزینه حمل و اسکورت مواد منفجره کمتر شود اما

جدول ۱۰: مشخصات پارامترهای چال انفجار مرحله سوم دارای نسبت بار سنگ به قطر چال برابر ۴۲ و قطر چال ۱۰/۱۶ میلی‌متر

ردیف	پارامترها	واحد	مقدار پارامترها
۱	قطر چال ها (ϕ_h)	میلی‌متر	۱۰/۱۶
۲	بار سنگ (B)	متر	۴/۲۷
۳	نسبت بار سنگ به قطر چال (B/ϕ_h)	-	۴۲/۰
۴	فاصله چال‌ها (S)، ($S=1.15B$)	متر	۴/۹۱
۵	اضافه حفر چال (U)، ($U=0.33B$)	متر	۱/۴۱
۶	شیب چال (α)	درجه	۸۰
۷	طول چال‌ها (H)، ($H=(K/\sin\alpha)+U$)	متر	۱۲
۸	ارتفاع پله (K)، ($K=(H-U)\sin\alpha$)	متر	۱۰/۴۳
۹	طول گل‌گذاری (S_t)، ($S_t=0.905B$)	متر	۳/۸۶
۱۰	طول خرج (Le)، ($Le=(H-S_t)$)	متر	۸/۱۴
۱۱	حجم سنگ به ازای یک چال (V)، ($V=BKS$)	متر مکعب	۲۱۸/۶۷
۱۲	وزن واحد حجم سنگ (γ_r)	تن بر متر مکعب	۲/۲۴
۱۳	وزن سنگ به ازای یک چال (W)	تن	۴۸۹/۸۲
۱۴	حفراری ویژه (H/V)	متر بر متر مکعب	۰/۰۵۵
۱۵	ضریب سفتی (K/B)	-	۲/۴۴
۱۶	چاشنی ویژه (1/KBS)	یک بر متر مکعب	۰/۰۰۵
۱۷	نوع خرج میان چال (خرج اصلی) آنفو	-	-
۱۸	وزن حجمی آنفو (γ_e)	گرم بر سانتی‌متر مکعب	۰/۸۵
۱۹	تراکم خرج در میان چال (I_c)	کیلوگرم بر متر	۶/۸۹
۲۰	مقدار خرج میان چال (Q_c)	کیلوگرم	۵۴/۶۶
۲۱	نوع خرج ته چال امولایت	-	-
۲۲	وزن حجمی امولایت (γ_b)	گرم بر سانتی‌متر مکعب	۱/۲۵
۲۳	مقدار خرج ته چال (Q_b)	کیلوگرم	۰/۷۴
۲۴	کل خرج چال (Q)، ($Q=Q_c+Q_b$)	کیلوگرم	۵۵/۴
۲۵	خرج ویژه میان چال (q_c)	کیلوگرم بر متر مکعب	۰/۲۵
۲۶	خرج ویژه ته چال (q_b)	کیلوگرم بر متر مکعب	۰/۰۰۳۴
۲۷	خرج ویژه مصرفی (q) به ازای متر مکعب سنگ	کیلوگرم بر متر مکعب	۰/۲۵۳
۲۸	خرج ویژه مصرفی (q_t) به ازای تن سنگ	کیلوگرم بر تن	۰/۱۱

جدول ۱۱: قیمت واحد هر یک از اقلام هزینه‌ها در سال ۱۳۹۶

ردیف	نوع	واحد	قیمت واحد (ریال)
۱	چالزنی (چال دارای قطر ۱۰/۱۶ میلی‌متر)	یک متر طول	۸۰۰۰۰
۲	چالزنی (چال دارای قطر ۷۶ میلی‌متر)	یک متر طول	۴۵۰۰۰
۳	آنفو	یک کیلوگرم	۱۷۳۸۵
۴	امولایت	یک کیلوگرم	۷۸۴۸۰
۴	چاشنی الکتریکی تاخیری	یک عدد	۱۶۱۵۰۹
۵	سایر هزینه‌ها (هزینه حمل و اسکورت مواد منفجره، دستمزد آتشباری و نظارت بر مصرف مواد منفجره)	برای مصرف یک کیلوگرم مواد منفجره	۱۸۲۳۸

مترمکعب و با توجه به وزن حجمی ۲/۲۴ تن بر مترمکعب، به ترتیب برابر ۱۷۷۵۰، ۷۷۰۸ و ۶۴۴۳ ریال بر تن حاصل شد.

۵- حفر به روش مکانیکی با استفاده از بولدوزر و برآورد قیمت تمام شده

تغییر روش حفر از آتشیاری به مکانیکی با استفاده از ماشین‌آلات می‌تواند جذابیت قابل توجهی در رابطه با صدمات زیست‌محیطی ناشی از لرزش زمین، پرتاب سنگ، ایجاد صدا، گرد و غبار و گازهای سمی، صدمه به جانوان و

مواد منفجره و سایر هزینه‌ها برای مصرف یک کیلوگرم مواد منفجره، قیمت تمام شده برای سه الگوی دارای خرج ویژه‌های ۰/۶۷، ۰/۲۷۵ و ۰/۲۵۳ کیلوگرم بر مترمکعب (نسبت بار سنگ به قطر چال ۳۰، ۴۰ و ۴۲) تعیین شد (جدول‌های ۱۲، ۱۳ و ۱۴). نمودار هیستوگرام کلیه هزینه‌های فرآیند چالزنی و آتشیاری یک مترمکعب سنگ برای سه الگوی یاد شده در شکل ۲ نشان داده شده است. قیمت تمام شده برای سه الگوی دارای خرج ویژه‌های ۰/۶۷، ۰/۲۷۵ و ۰/۲۵۳ کیلوگرم بر مترمکعب به ترتیب برابر ۳۹۷۶۱، ۱۷۲۶۷ و ۱۴۴۳۴ ریال بر

جدول ۱۲: هزینه چالزنی و آتشیاری توده سنگ برجا مرحله اول خرج ویژه ۰/۶۷ کیلوگرم بر مترمکعب، نسبت بار سنگ به قطر چال ۳۰ و قطر چال ۷۶ میلی‌متر

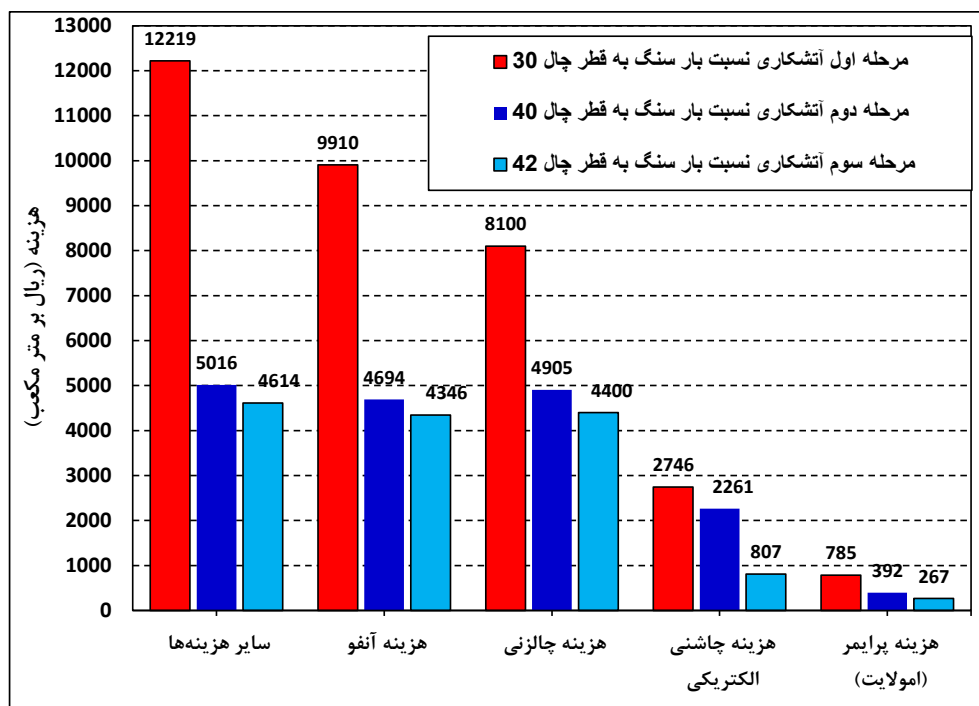
ردیف	نوع هزینه در بخش‌های مختلف انفجار اصلی	نوع هزینه در بخش‌های مختلف چالزنی و آتشیاری (ریال بر متر مکعب)
۱	هزینه چالزنی (حفاری ویژه × هزینه حفر یک متر چال) = $۴۵۰۰۰ \times ۰/۱۸$	۸۱۰۰
۲	هزینه آنفو (خرج ویژه آنفو × هزینه یک کیلوگرم آنفو) = $۱۷۳۸۵ \times ۰/۵۹$	۱۰۲۵۷
۳	هزینه امولایت (خرج ویژه امولایت × هزینه یک کیلوگرم امولایت) = $۷۸۴۸۰ \times ۰/۰۸$	۶۲۷۸
۴	هزینه چاشنی الکتریکی (چاشنی ویژه × هزینه یک عدد چاشنی) = $۱۶۱۵۰۹ \times ۰/۰۱۸$	۲۹۰۷
۵	سایر هزینه‌ها (هزینه حمل و اسکورت مواد منفجره، دستمزد آتشیاری و نظارت بر مصرف مواد منفجره) (خرج ویژه کلی × هزینه یک کیلوگرم مواد منفجره مصرف شده = $۰/۶۷ \times ۱۸۲۳۸$)	۱۲۲۱۹
۶	هزینه آتشیاری (جمع ردیف ۲ تا ۵)	۳۱۶۶۱
۷	قیمت تمام شده برای یک متر مکعب سنگ (جمع ردیف ۱ و ۶)	۳۹۷۶۱

جدول ۱۳: هزینه چالزنی و آتشیاری توده سنگ برجا مرحله دوم خرج ویژه ۰/۲۷۵ کیلوگرم بر مترمکعب، نسبت بار سنگ به قطر چال ۴۰ و قطر چال ۷۶ میلی‌متر

ردیف	نوع هزینه در بخش‌های مختلف انفجار اصلی	نوع هزینه در بخش‌های مختلف چالزنی و آتشیاری (ریال بر متر مکعب)
۱	هزینه چالزنی (حفاری ویژه × هزینه حفر یک متر چال) = $۴۵۰۰۰ \times ۰/۱۰۹$	۴۹۰۵
۲	هزینه آنفو (خرج ویژه آنفو × هزینه یک کیلوگرم آنفو) = $۱۷۳۸۵ \times ۰/۲۷$	۴۶۹۴
۳	هزینه امولایت (خرج ویژه امولایت × هزینه یک کیلوگرم امولایت) = $۷۸۴۸۰ \times ۰/۰۰۵$	۳۹۲
۴	هزینه چاشنی الکتریکی (چاشنی ویژه × هزینه یک عدد چاشنی) = $۱۶۱۵۰۹ \times ۰/۰۱۴$	۲۲۶۱
۵	سایر هزینه‌ها (هزینه حمل و اسکورت مواد منفجره، دستمزد آتشیاری و نظارت بر مصرف مواد منفجره) (خرج ویژه کلی × هزینه یک کیلوگرم مواد منفجره مصرف شده = $۰/۲۷۵ \times ۱۸۲۳۸$)	۵۰۱۵
۶	هزینه آتشیاری (جمع ردیف ۲ تا ۵)	۱۲۳۶۲
۷	قیمت تمام شده برای یک متر مکعب سنگ (جمع ردیف ۱ و ۶)	۱۷۲۶۷

جدول ۱۴: هزینه چالزنی و آتشباری توده سنگ بر جا مرحله سوم خرج ویژه ۰٫۲۵۳ کیلوگرم بر مترمکعب، نسبت بار سنگ به قطر چال ۴۲ و قطر چال ۱۰۱٫۶ میلی‌متر

ردیف	نوع هزینه در بخش‌های مختلف انفجار اصلی	قیمت تمام شده (ریال بر متر مکعب)
۱	هزینه چالزنی (حفراری ویژه × هزینه حفر یک متر چال = $۰٫۰۵۵ \times ۸۰۰۰۰$)	۴۴۰۰
۲	هزینه آنفو (خرج ویژه آنفو × هزینه یک کیلوگرم آنفو = $۰٫۲۵ \times ۱۷۳۸۵$)	۴۳۴۶
۳	هزینه امولایت (خرج ویژه امولایت × هزینه یک کیلوگرم امولایت = $۰٫۰۳۴ \times ۷۸۴۸۰$)	۲۶۷
۴	هزینه چاشنی الکتریکی (چاشنی ویژه × هزینه یک عدد چاشنی = $۰٫۰۰۵ \times ۱۶۱۵۰۹$)	۸۰۷
۵	سایر هزینه‌ها (هزینه حمل و اسکورت مواد منفجره، دستمزد آتشباری و نظارت بر مصرف مواد منفجره (خرج ویژه کلی × هزینه یک کیلوگرم مواد منفجره مصرف شده = $۰٫۲۵۳ \times ۱۸۲۳۸$)	۴۶۱۴
۶	هزینه آتشباری (جمع ردیف ۲ تا ۵)	۱۰۰۳۴
۷	قیمت تمام شده برای یک متر مکعب سنگ (جمع ردیف ۱ و ۶)	۱۴۴۳۴

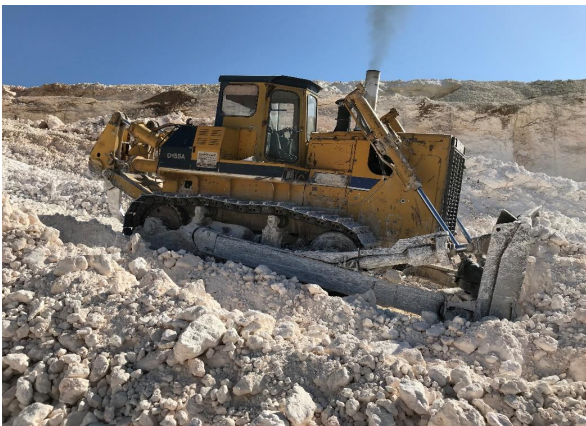


شکل ۲: هزینه‌های بخش‌های مختلف برای سه الگوی دارای نسبت بار سنگ به قطر چال ۳۰، ۴۰ و ۴۲ به ترتیب مطابق خرج ویژه‌های خرج ویژه‌های ۰٫۶۷، ۰٫۲۷۵ و ۰٫۲۵۳ کیلوگرم بر متر مکعب

چالزنی و آتشباری است. با وجود مزایای حفر به روش مکانیکی تاکنون تاثیر شرایط ژئومکانیکی توده سنگ بر جا و مقایسه قیمت تمام شده حفر مکانیکی با آتشباری مورد بررسی قرار نگرفته است. حفر به روش مکانیکی در معدن با استفاده از بولدوزر انجام می‌شود. تاکنون رابطه‌ای بین متر مکعب سنگ قابل حفر با بولدوزر و ویژگی‌های ژئومکانیکی توده سنگ

گیاهان، عقب‌زدگی، خسارات جانی و مالی ناشی از استفاده مواد منفجره، افزایش تعداد مراحل اجرای حفر شامل چالزنی، تهیه و حفاظت مواد منفجره و آتشباری و همچنین نیازمند پرسنل دارای تخصص‌های متعدد چالزنی و آتشباری و موضوع ایمنی است. تعیین قیمت تمام شده معیار مهمی دیگری برای جایگزینی روش حفر مکانیکی به جای حفر به روش

مفید راننده بولدوزر ۱۴۷۹۲۹ ریال حاصل شد (جدول ۱۵). مجموع هزینه‌های ساعت کاری مفید بولدوزر و راننده برابر ۱۶۸۸۶۷۰ ریال به دست آمد. در نتیجه قیمت تمام شده حفر به روش مکانیکی با استفاده از بولدوزر ۸۳۱۹ ریال بر متر مکعب (۳۷۱۳ ریال بر تن) حاصل شد. قیمت تمام شده فرآیند چالزنی و آتشباری یک متر مکعب سنگ برای سه الگوی دارای نسبت بار سنگ به قطر چال ۳۰، ۴۰، ۴۲ و حفر به روش مکانیکی با استفاده از بولدوزر در شکل ۴ نشان داده شده است. قیمت تمام شده حفر به روش مکانیکی با استفاده از بولدوزر ۵۸ درصد قیمت تمام شده حفر به روش چالزنی و آتشباری در مرحله با الگوی بهینه (کمترین خرج ویژه) است.



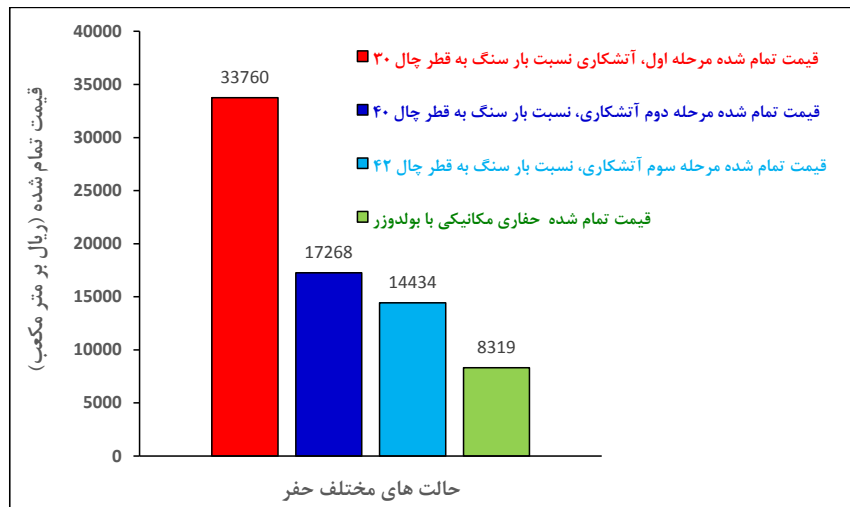
شکل ۳: بولدوزر کوماتسو D155A استفاده شده در معدن

برجا ارایه نشده است. برای سنگ‌های دارای مقاومت‌های فشارشی یک محوری بین ۳۶۹ تا ۶۳۱ مگاپاسکال آهنگ تولید حفر با ریپر به طور متوسط بین ۴۰۷۷ و ۲۱۷۴ متر مکعب در ساعت گزارش شده است [۳۰]. علاوه بر مقاومت فشارشی یک محوری فاصله درزه‌ها نیز تاثیر بارزی در روش حفر به صورت استفاده از ریپرهایی بولدوزر و تیغه آن دارند. توده سنگ معدن سردار بوکان دارای مقاومت فشارشی یک محوری برابر ۱۳۳۸ مگاپاسکال، وزن حجمی ۲٫۲۴ تن بر متر مکعب، فاصله درزه‌های کمتر از ۰٫۱ سانتی‌متر و خرد شده است. فاصله کم درزه‌ها و توده سنگ خرد شده و بسیار سست، شرایطی را فراهم آورده که بولدوزر قادر است، توده سنگ را با ریپر و تیغه حفر کند و محصول ساعتی آن افزایش یابد. بولدوزر مورد استفاده در معدن، کوماتسو D155A است و طی اندازه‌گیری نشان داده شد که قادر است ۲۰۳ متر مکعب در ساعت (۴۵۴٫۷ تن بر ساعت) سنگ آهک سست حفر کند (شکل ۳).

پارامترهای مربوط به هزینه‌های حفر به روش مکانیکی با استفاده از بولدوزر و قیمت تمام شده در جدول ۱۵ آورده شده است. هزینه ساعت کار بولدوزر در معدن برابر ۱۳۰۰۰۰۰ ریال بر ساعت است. شیفیت کاری معدن ۸ ساعت و زمان مفید کاری در هر شیفیت ۶٫۷۵ ساعت است. دستمزد ماهیانه راننده بولدوزر ۲۵۰۰۰۰۰ ریال است. هزینه ساعت کاری مفید بولدوزر برابر ۱۵۴۰۷۴۱ ریال و دستمزد ساعتی کار

جدول ۱۵: پارامترهای مربوط به سیستم حفر مکانیکی با استفاده از بولدوزر مربوط به سال ۱۳۹۶

ردیف	پارامتر سیستم حفر	واحد	مقدار
۱	مدت زمان شیفیت‌های کاری معدن	ساعت	۸
۲	زمان مفید کاری معدن در هر شیفیت	ساعت	۶٫۷۵
۳	تولید ساعتی بولدوزر	مترمکعب در ساعت (تن در ساعت)	۲۰۳ (۴۵۴٫۷)
۴	هزینه ساعت کاری بولدوزر بدون در نظر گرفتن دستمزد راننده	ریال در ساعت	۱۳۰۰۰۰۰
۵	هزینه ساعت کاری مفید بولدوزر بدون در نظر گرفتن دستمزد راننده	ریال در ساعت	۱۵۴۰۷۴۱
۶	دستمزد ماهیانه هر راننده بولدوزر	هزار ریال	۲۵۰۰۰۰۰۰
۷	متوسط روزهای کاری راننده در معدن	روز	۲۵
۸	ساعات کار مفید راننده در ماه	ساعت در ماه	۱۶۹
۹	دستمزد راننده به ازای یک ساعت کار مفید	ریال در ساعت	۱۴۷۹۲۹
۱۰	مجموع هزینه ساعت کاری مفید بولدوزر و دستمزد راننده	ریال در ساعت	۱۶۸۸۶۷۰
۱۱	قیمت تمام شده به ریال بر تن	ریال بر متر مکعب	۸۳۱۹
۱۲	قیمت تمام شده به ریال بر متر مکعب	ریال بر تن	۳۷۱۳



شکل ۴: مقایسه قیمت تمام شده حفر به روش مکانیکی با استفاده از بولدوزر با روش حفر با استفاده از چالزنی و آتشکاری دارای سه حالت نسبت بار سنگ به قطر چال ۳۰، ۴۰ و ۴۲ به ترتیب مطابق خرج ویژه‌های ۰٫۶۷، ۰٫۲۷۵ و ۰٫۲۵۳ کیلوگرم بر متر مکعب مربوط به سال ۱۳۹۶

۶- نتیجه‌گیری

قابلیت انفجار و دارای خرج ویژه کمتر از الگوی به کار گرفته شده قبلی در معدن بهتر است و قیمت تمام شده آن نزدیک به یک سوم کاهش یافته است. به علت قرار گرفتن امتیازهای شاخص قابلیت انفجار و شاخص خردایش سنگ در آستانه سست آن‌ها، در این معدن قیمت تمام شده چالزنی و آتشکاری در شرایط اجرای الگوی بهینه خیلی کم است.

- قیمت تمام شده حفر به روش مکانیکی با استفاده از بولدوزر ۸۳۱۹ ریال بر متر مکعب (۳۷۱۳ ریال بر تن) حاصل شد که ۵۸ درصد قیمت تمام شده حفر به روش چالزنی و آتشکاری در مرحله با الگوی بهینه (کمترین خرج ویژه) است. از طرفی صدمات زیست‌محیطی ناشی از لرزش زمین، پرتاب سنگ، ایجاد صدا، گرد و غبار و گازهای سمی، صدمه به جانوان و گیاهان، عقب‌زدگی، خسارات جانی و مالی ناشی از استفاده مواد منفجره افزایش تعداد مراحل اجرای حفر شامل چالزنی، تهیه و حفاظت مواد منفجره و آتشکاری و همچنین نیازمند به پرسنل دارای تخصص‌های متعدد چالزنی و آتشکاری بوده و افزایش ایمنی را در بر دارد. این باعث تحول مهمی در بهره‌وری معدن می‌شود.

۷- سپاس‌گزاری

از آقای مهندس وحید محبی کارشناس محترم آزمایشگاه مکانیک سنگ گروه مهندسی معدن دانشگاه ارومیه برای همراهی بی‌دریغ در انجام آزمایش‌ها و همچنین از آقای

در این پژوهش موضوع امکان‌پذیری تغییر روش حفر از آتشکاری به مکانیکی مبتنی بر ویژگی‌های توده سنگ برجا و قیمت تمام شده هر یک از روش‌های حفر در عمل مورد بررسی قرار گرفت و دستاوردهای حاصل از آن به شرح زیر است:

- مقدار شاخص قابلیت انفجار (۲۰/۳۳) به دست آمده حدود حداقل مقداری است که برای این شاخص گزارش شده است که خرج ویژه حاصل از آن نیز حداقل است. مقدار شاخص خردایش سنگ (۴۲) نیز حداکثر مقدار حاصل شده که مربوط به پایین‌ترین حد سستی سنگ به منظور انفجار در طبقه‌بندی شاخص خردایش سنگ است و خرج ویژه مربوط به آن برابر ۰٫۲۹ کیلوگرم بر متر مکعب (۰٫۱۳ کیلوگرم بر تن) حاصل شد. مقاومت فشاری یک محوری خیلی کم سنگ آهک (۱۳،۲۸ مگاپاسکال) و فاصله درزه‌های کمتر از ۰٫۱ متر و قرار گرفتن مقدار شاخص قابلیت انفجار و شاخص خردایش سنگ در حدود سست‌ترین آستانه آن‌ها، امکان تغییر روش حفر از چالزنی و آتشکاری به مکانیکی با بولدوزر را فراهم ساخت.

- قیمت تمام شده برای سه الگوی دارای خرج ویژه‌های ۰٫۶۷، ۰٫۲۷۵ و ۰٫۲۵۳ کیلوگرم بر متر مکعب به ترتیب برابر ۳۹۷۶۱، ۱۷۲۶۷ و ۱۴۴۳۴ ریال بر متر مکعب (۱۷۷۵۰، ۷۷۰۸ و ۶۴۴۳ ریال بر تن) حاصل شد. الگوی چال‌های آتشکاری بر اساس ویژگی‌های ژئومکانیکی با استفاده از شاخص

the design and results of tunnel blasts". Journal of Rock Mechanics and Tunnelling Technology, 1(1): 25-39.

[14] Chakraborty, A. K., Raina, A. K., Ramulu, M., Choudhury, P. B., Haldar, A., Sahu, P., and Bandopadhyay, C. B. (2014). "Parametric Study to Develop Guidelines for Blast Fragmentation Improvement in Jointed and Massive Formations". Engineering Geology, 73: 105-116.

[15] Faramarzi, F., Mansouri, H., and Ebrahimi Farsangi, M. A. (2013). "A rock engineering systems based model to predict rock fragmentation by blasting". International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 60: 82-94. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2012.12.045>.

[16] Cunningham, C. V. B. (1978). "Fragmentation estimation and the Kuz – Ram model". The 2nd International Symposium on Rock Fragmentation by Blasting, Keystone Colorado, 475-487.

[17] Hamdi, E., Du Mouza, J. A. (2005). "A methodology for rock mass characterisation and classification to improve blast results". International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 42(2): 177-194. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2004.07.005>.

[18] Kiliç, A. M., Yasar, E., Erdogan, Y., and Ranjith, P. G. (2009). "Influence of rock mass properties on blasting efficiency". Scientific Research and Essay, 4(11): 1213-1224.

[19] Singh, P. K., Roy, M. P., Paswan, R. K., Sarim, M. D., Kumar, S., and Anjan Jha, R. R. (2016). "Rock fragmentation control in opencast blasting". Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 8: 225-237.

[20] Franklin, J. A., Broch, E., and Walton, G. (1971). "Logging the mechanical character of rock". Institute of Mining and Metallurgy, 80: 1-9.

[21] Karpuz, C., Pasamehmetoglu, A. G., Bozdog, T., and Muftuoglu, Y. V. (1990). "Rippability assessment in surface coal mining". In Proceedings of the fourth international symposium on mine planning and equipment selection, Calgary, Rotterdam: Balkema, 315-322.

[22] MacGregor, F., Fell, R., Mostyn, G. R., Hocking, G., and Nally, G. (1994). "The estimation of rock rippability". Quarterly Journal of Engineering Geology, 27: 123-44.

[23] Liang, M., Mohamad, E. T., Komoo, I., and Ma, C. K. (2017). "An excavatability classification system for surface excavation in sedimentary rocks". Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 76: 241-251. DOI: 10.1007/s10064-015-0807-9.

[24] Pettifer, G. S., and Fookes, P. G. (2014). "A revision of

مهندس مصطفی زاده کارشناس معدن سنگ آهک سردار بوکان برای حمایت در انجام برداشتها در معدن و هماهنگی های به عمل آمده سپاس گذاری می شود.

۸- مراجع

[۱] صادق اسلام، گ.؛ ۱۳۹۷؛ "بررسی آستانه تغییر روش حفر از آتشیاری به مکانیکی بر اساس قابلیت انفجار توده سنگ سست با ملاحظه قیمت تمام شده". پایان نامه کارشناسی ارشد، استخراج معدن، دانشگاه ارومیه، ۱۰۶ صفحه.

[2] Pal Roy, P. (2005). "Rock Blasting :Effects and Operations". Blkema, pp. 345.

[3] Sen, G. C. (1993). "Blasting Technology for Mining and Civil Engineering". University of New South Wales Press, LTD, Sydney, Australia, pp. 143.

[4] Berta, G. (1990). "Explosives: an Engineering Tool". Italesplosivi, Milano, Italy.

[5] Anderson, O. (1952). "Blast hole burden design - introducing a new formula". Australian Institute of Mining and Metallurgy, 166 -167: 115-1130.

[6] Ash, R. L. (1963). "The mechanics of rock breakage (Part 2) – Standards for blasting design". Pit and Quarry, 56(3): 126-131.

[7] Kaya A., Bulut F., Alemdağ S., 2011. "Applicability of excavatability classification systems in underground excavations: A case study". Scientific Research and Essays Vol. 6 (25), pp. 5331-5341.

[8] Langfors, U., and Kihlstrom, B. (1978). "The modern technique of rock blasting". John Wiley and Sons, Inc. New York, pp. 405.

[9] Lilly, P. A. (1986). "An empirical method of assessing rock mass blastability". Julius Kruttschnitt Mineral Research Center, 89-92.

[10] Lilly, P. A. (1992). "The use of blastability index in the design of blasts for open pit mines". In: Proceedings of the West Australian conference on mining geomechanics. Kalgoorlie, WA: Western Australian School of Mines, 421-426.

[11] Moomivand, H. (2007). "Development of a new method for blasthole pattern design in open pit mines". Journal of Engineering Faculty, Tehran, University, 41(3): 355 - 361.

[12] Hudson, J. A. (1992). "Rock Systems Engineering: Theory and Practice". Ellishorwood, Chicester.

[13] Hagan, T. N. (1995). "The effect of rock properties on

- [31] Bellairs, P. (1990). "Rock properties and their effect on blasting results". Dyno Westfarmers Limited Explosives.
- [32] ISRM, (1981a). "Suggested methods for determining the uniaxial compressive strength and deformability of rock materials". In Brown, E. T., Editor, Rock characterization, testing and monitoring ISRM suggested methods, Oxford: Pergamum Press, pp. 113.
- [33] ISRM, (1981b). "Suggested methods for determining water content, porosity, density, absorption and related properties". In Brown, E. T., Editor, Rock characterization, testing and monitoring ISRM suggested methods, Oxford: Pergamum Press, pp. 113.
- [25] Basarir, H., and Karpuz, C. A. (2004). "Rippability classification system for marls in lignite mines". Engineering Geology, 74: 303–18.
- [26] Iphar, M., and Goktan, R. M. (2006). "An application of fuzzy sets to the Diggability Index Rating Method for surface mine equipment selection". International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 43: 253–266.
- [27] Amin, M., Huei, C. S., Hamid, Z. A., and Ghani, M. K. (2009). "Rippability assessment of rock based on specific energy and production rate". 2nd Construction Industry Research Achievement International Conference.
- [28] Tsiambaos, G., and Saroglou, E. H. (2010). "Excavatability assessment of rock masses using the Geological Strength Index (GSI)". Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 69: 13–27.
- [29] Dindarloo, S. R., and Siami-Irdemoosa, E. (2015). "Ground rippability classification by decision trees". Transactions of The Society for Mining, Metallurgy & Exploration, 338: 492–501.
- [30] Pebrianto, R., Asof, M., Susilo, B. K., and Gofar, N. (2014). "Evaluation of factors affecting ripping productivity in open pit mining excavation". Electronic Journal of Geotechnical Engineering, 19: 10447–1045.

¹ Blastability index

² Rock fragmentation index

³ Rock Mass Description

⁴ Joint plane spacing

⁵ Joint plane orientation

⁶ Specific Gravity Index

⁷ Uniaxial compressive strength

⁸ Discontinuity plane aperture



Imam Khomeini International University
Vol. 5, No. 1, Spring 2020, pp. 22-26



نشریه مهندسی منابع معدنی
Journal of Mineral Resources Engineering
(JMRE)

DOI:10.30479/jmre.2019.10495.1252

The Significant Reduction in Cost Price by Changing Excavation from Blasting to Mechanical Method Based on Rock Mass Properties in Sardar Bucan Limestone Mine

Sadegheslam G.¹, Moomivand H.^{2*}

1- M.Sc, Dept. of Mining Engineering, Urmia University, Urmia, Iran
sadegheslam.uut@gmail.com

2- Associate Professor, Dept. of Mining Engineering, Urmia University, Urmia, Iran
h.moomivand@urmia.ac.ir

(Received: 22 Apr. 2019, Accepted: 26 Oct. 2019)

Abstract: Changing excavation from drilling and blasting to mechanical method has many advantages related to the environmental health, safety, and economic benefits. The rock mass weakness degree due to the possibility of excavation by a bulldozer can be the important basis for the changing the excavation method. In addition, the cost price of each method is also an important criterion. The rock mass weakness degree can be investigated using rock mass properties such as uniaxial compressive strength (UCS) and discontinuity spacing or relatively lower limit of blastability index (BI) or at the higher limit of rock fragmentation index (RFI). UCS=13.38 MPa, discontinuity spacing<0.1 m, BI=20.33 and RFI=42 were obtained in Sardar Bucan limestone mine. The powder factors were also obtained 0.18 kg/m³ and 0.253 kg/m³ for using BI and RFI respectively. Drilling and blasting operations were carried out for using different powder factors especially for minimum powder factor of 0.253 kg/m³ with burden to blasthole diameter ratio of 42 corresponding RFI=42. The cost price was assessed 14434 Rls/ m³ (6443 Rls/ton) for powder factor of 0.253 kg/m³. Mechanical excavation using a bulldozer was applied to replace the method of drilling and blasting, and the cost price of excavation by bulldozer was obtained equal to 8319 Rls/m³ (3713 Rls/ton), which was 58% of the cost of drilling and blasting method at the optimized conditions. The possibility of changing excavation from blasting to mechanical method can be an important development in the safety, economic and environmental benefits.

Keywords: Excavation, Blasting, Mechanical, Bulldozer, Cost price.

INTRODUCTION

Drilling and blasting is one of the most common methods for rock excavation particularly in open pit mines. Changing the excavation from drilling and blasting to mechanical method using machines can have many benefits due to preventing environmental damage caused by ground vibrations, back break, fly rock, sound pollution, *dust creation* and toxic gases, damaging the animal and plants, life and financial losses due to the use of explosives, increasing the number of operation stages in blasting process, need of more

expert personnel and enhancing safety. Changing the excavation method may be feasible for some in-situ rock mass conditions that has less been investigated. The rock mass properties due to the possibility of excavation by a bulldozer and cost price can be the important factors to change the excavation from blasting to mechanical method. In this study, changing the excavation from drilling and blasting to mechanical method has been investigated based on rock mass properties and cost price in Sardar Bucan limestone mine to find an efficient excavation method.

METHODS

Several methods have been proposed to assess powder factor and blasthole pattern for excavation by drilling and blasting [1-10]. Many rock mass parameters affect the powder factor and assessment of powder factor based on rock mass properties using rock mass classification such as BI [8,9] and RFI [10] is more reliable than the other methods. BI rating represents the effects of five parameters on the in-situ rock mass blasting including: rock mass description, discontinuity spacing, discontinuity orientation, specific gravity and uniaxial compressive strength of rock material. Powder factor (q) in kg/ton can be determined by BI as follows:

$$q = 0.004BI \quad (1)$$

RFI rating also represents the effects of five in-situ rock mass parameters according to Table 1. The RFI rating has been assessed equal to the optimized burden (B) to blasthole diameter (f_h) ratio ($RFI = B/f_h$) by carrying out drilling and blasting operations for several blasthole patterns in different mines [10].

Table 1. Parameters of rock fragmentation index (RFI) and rating [10]

Parameters	Rating
1 Discontinuity plane aperture	DPA
1.1 Very low aperture, < 1 mm	8
1.2 Low aperture, 1 – 5 mm	7
1.3 Intermediate aperture, 5 – 50 mm for infilled joints	6
1.4 Intermediate aperture, 5 – 50 mm for unfilled joints	5
1.5 High aperture, >50 mm for infilled joints	4
1.6 High aperture, >50 mm for unfilled joints	3
2 Discontinuity plane spacing	DPS
2.1 Close, <0.1 m	12
2.2 Intermediate, 0.1 – 1 m	7
2.3 Wide, >1 m	4
3 Discontinuity plane orientation	DPO
3.1 Horizontal	6
3.2 Dip out of the face	5
3.3 Strike normal to face	4
3.4 Dip into face	3
4 Rock mass description	RMD
4.1 Powdery/Friable	10
4.2 Blocky	6
4.3 Totally massive	4
5 Unconfined compressive strength of rock material	UCS
5.1 Very low strength, < 25 MPa	6
5.2 low strength, 25 – 50 MPa	5
5.3 Medium strength, 50 – 100 MPa	4
5.4 High strength, 100 – 200 MPa	3
5.5 Very high strength, > 200 MPa	2
RFI = DPA+DPS+DPO+RMD+UCS (Total rating)	

Excavatability assessment of rock mass by mechanical method using bulldozer has been investigated in civil engineering projects based on the geo-technical properties of rock mass such uniaxial compressive strength and discontinuity spacing [11-15]. Such parameters have also been defined in BI and RFI systems. In this study, rock mass parameters related to the BI and RFI systems were measured in Sardar Bucan limestone mine, then BI and RFI ratings were determined. Drilling and blasting operations were also carried out for three different blasthole patterns having different powder factors. The cost price was assessed for three stages of drilling and blasting operations using powder factors 0.67, 0.275 and 0.253 kg/m³ respectively and mechanical excavation using bulldozer.

FINDINGS AND ARGUMENT

BI and RFI ratings were obtained 20.33 and 42 respectively. Each of the obtained ratings is related to the loose threshold of BI and RFI systems. UCS was also obtained 13.38 MPa and discontinuity spacing was less than 0.1 m in which the bulldozer can be able to excavate the in-situ rock mass [15]. Powder factors of 0.18 kg/m³ and 0.253 kg/m³ were obtained for using BI and RFI respectively. Drilling and blasting operations has also been carried out for three different blasthole patterns having burden to blasthole diameter ratio of 30, 40 and 42 and relevant powder factors of 0.67, 0.275 and 0.253 kg/m³ respectively. Various costs including the cost of drilling, main explosive charge (ANFO), primer (emulite), electric detonator and other costs due to the blasting operations, explosive transport, escort and safekeeping of the use of explosive were assessed in each stage of drilling and blasting process according to the paid expenses in year 2017. (Figure 1). All costs decreased with an increase of the powder factor. The cost price of 33760, 17268 and 14434 Rls/m³ were obtained for using powder factors 0.67, 0.275 and 0.253 kg/m³ respectively. Powder factor of 0.253 kg/m³ was related to RFI =42 as a minimum powder factor and relevant cost price was obtained 14434 Rls/m³. The cost price of excavation by bulldozer was also obtained 8319 Rls/m³, which was 58% of the cost of drilling and blasting method at the optimized condition (Figure 2).

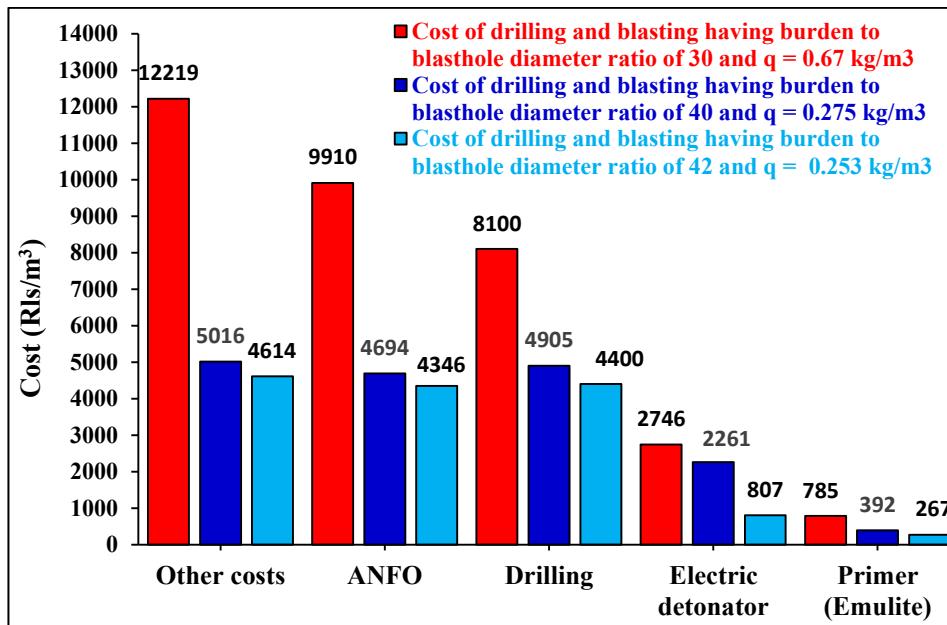


Figure 1. Comparison between various costs of drilling, main explosive charge (ANFO), primer (emulite), electric detonator and other costs including: blasting operations, explosive transport, escort and safekeeping of the use of explosive for different powder factors of blasting operations

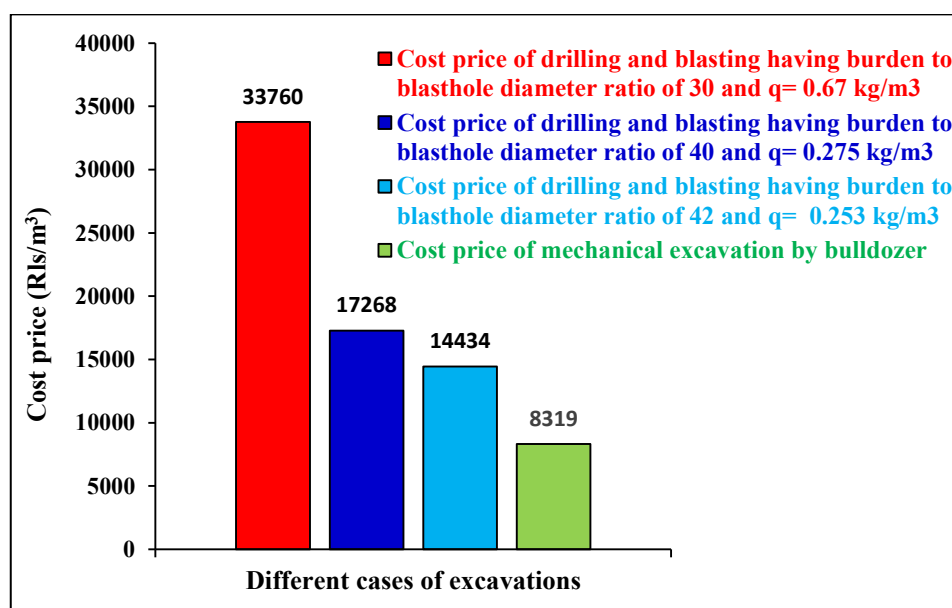


Figure 2. Comparison between cost price for different powder factor (q) of blasting operations and excavation by bulldozer

CONCLUSIONS

1. The obtained ratings of 20.33 for BI and 42 for RFI and relevant lower values of powder factors represent the lower limit of the rock mass weakness for excavation by blasting. The loose threshold of BI and RFI system, low value of uniaxial compressive strength (13.38 MPa) and discontinuity spacing of less than 0.1 m made the possibility of changing excavation from drilling and blasting to mechanical method.

2. Cost price of three blasthole patterns having powder factors of 0.670, 0.275 and 0.253 kg/m³ was obtained 33760, 17268 and 14434 Rls/m³ respectively. The optimized powder factor (0.253 kg/m³) using RFI is lower than the former powder factor (0.67 kg/m³) used in Sardar Bucan limestone mine and cost price also reduced to about one third by reduction of the powder factor from 0.670 to 0.253 kg/m³. The cost price of optimized drilling and blasting operation has a very low value because of lower rating of BI and higher rating of RFI.

3. The cost price of excavation by bulldozer was 8319 Rls/m³ (3713 Rls/ton) which was 58% of the cost price of optimized drilling and blasting operations. In addition, mechanical excavation has also several other advantages due to the environmental damages and etc.

REFERENCES

- [1] Pal Roy, P. (2005). "Rock Blasting: Effects and Operations". Blkema, pp. 345.
- [2] Sen, G. C. (1993). "Blasting Technology for Mining and Civil Engineering". University of New South Wales Press, LTD, Sydney, Australia, pp. 143.
- [3] Berta, G. (1990). "Explosives: an Engineering Tool". Italesplosivi, Milano, Italy.
- [4] Anderson, O. (1952). "Blast hole burden design - introducing a new formula". Australian Institute of Mining and Metallurgy, 166-167: 115-1130.
- [5] Ash, R. L. (1963). "The mechanics of rock breakage (Part 2) - Standards for blasting design". Pit and Quarry, 56(3): 126-131.
- [6] Kaya, A., Bulut, F., and Alemdağ, S. (2011). "Applicability of excavatability classification systems in underground excavations: A case study". Scientific Research and Essays, 6(25): 5331-5341.

- [7] Langfors, U., and Kihlstrom, B. (1978). "*The modern technique of rock blasting*". John Wiley and Sons, Inc. New York, pp. 405.
- [8] Lilly, P. A. (1986). "*An empirical method of assessing rock mass blastability*". Julius Kruttschnitt Mineral Research Center, 89–92.
- [9] Lilly, P. A. (1992). "*The use of blastability index in the design of blasts for open pit mines*". In Proceedings of the West Australian Conference on Mining Geomechanics, Kalgoorlie, WA: Western Australian School of Mines, 421–426.
- [10] Moomivand, H. (2007). "*Development of a new method for blasthole pattern design in open pit mines*". Journal of Engineering Faculty, Tehran, University, 41(3): 355–361 (in Persian).
- [11] Franklin, J. A, Broch, E., and Walton, G. (1971). "*Logging the mechanical character of rock*". Institute of Mining and Metallurgy, A1–A51.
- [12] Karpuz, C., Pasamehmetoglu, A. G., Bozdag, T., and Muftuoglu Y. V. (1990). "*Rippability assessment in surface coal mining*". In Proceedings of the Fourth International Symposium on Mine Planning and Equipment Selection, Calgary, Rotterdam: Balkema, 315–322.
- [13] MacGregor, F., Fell, R., Mostyn, G. R., Hocking, G., and Nally, G. (1994). "*The estimation of rock rippability*". Quarterly Journal of Engineering Geology, 27: 123–144.
- [14] Liang, M., Mohamad, E. T., Komoo, I., and Ma, C. K. (2017). "*An excavatability classification system for surface excavation in sedimentary rocks*". Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 76: 241–251. DOI: 10.1007/s10064-015-0807-9.
- [15] Pettifer, G. S, and Fookes, P. G. (2014). "*A revision of the graphical method for assessing the excavability of rock*". Quarterly Journal of Engineering Geology, 27: 145–164.