مجله انجمن زمین‌شناسی مهندسی ایران
زمستان ۱۳۹۷، جلد یازدهم، شماره ٤، صفحه ٤١ تا ٥٣

مدل‌سازی و بهینه‌سازی الگوی چالزنی و انفجار معدن سنگ لاشه بغده‌کندی سقز

محمد رضائی* [۱]

دریافت مقاله: ۹۷/۱۱/۲۳ پذیرش مقاله: ۹۸/۰۲/۲۵

چکیده

در این تحقیق از نرم‌افزار Delpat برای شبیه‌سازی و بهینه‌سازی الگوی چالزنی و انفجار در معدن سنگ لاشه بغده‌کندی سقز استفاده شده است. بدین منظور، ابتدا اطلاعات لازم گردآوری و پارامترهای ژئومکانیکی مورد نیاز برآورد گردید. سپس بر اساس نرم‌افزار فوق، شبیه‌سازی الگوی انفجار برای قطر چال‌های مختلف انجام شد. با مقایسه هزینه‌های الگوی چالزنی و انفجار بر اساس قطر چال‌های مختلف، مشخص گردید که با افزایش قطر چال، هزینه‌ها کاهش می‌یابد. با این حال، استفاده از قطر چال بالا باعث افزایش حجم مواد منفجره مصرفی و درنتیجه لرزش زمین و پرتاب سنگ و آسیب رساندن به تجهیزات و ساختمان‌های اطراف خواهد شد. بر اساس نتایج مدل‌سازی، استفاده از چال با قطر ۱۰۲ میلی‌متر باعث کاهش هزینه کلی قابل توجه (۰/۰۸ دلار بر متر معکب) نسبت به چال با قطر ۷٦ میلی‌متر مورد استفاده در معدن شده و لذا به‌عنوان قطر چال بهینه برای معدن مذکور در نظر گرفته شد. دیگر پارامترهای الگوی چالزنی و انفجار هم بر اساس این قطر چال برآورد و برای استفاده عملی در معدن پیشنهاد شد. اجرای عملی انفجار بر اساس الگوی پیشنهادی باعث بهبود خردایش سنگ و کاهش هزینه‌ها و اثرات سوء ناشی از انفجار نسبت به الگوی قبلی گردید.

کلید واژه‌ها: *معدن سنگ لاشه بغده‌کندی، الگوی چالزنی و انفجار، خردایش سنگ، نرم‌افزار Delpat.*

۱- عضو هیات علمی گروه مهندسی معدن، دانشگاه کردستان، سنندج m.rezaei@uok.ac.ir
* مسئول مکاتبات

www.SID.ir

Archive of SID

۱. مقدمه

انجام انفجار معمول‌ترین روش تولید بزرگ مقیاس در معادن سطحی از جمله معادن روباز و سنگ لاشه است. بنابراین، بهینه‌سازی عملیات انفجار می‌تواند بهترین راه برای رسیدن به سودآوری بیشتر و کاهش هزینه‌های تولید در این معادن باشد. به‌طور کلی هدف اصلی از عملیات چالزنی و انفجار در معادن سطحی مانند معادن سنگ لاشه خردایش مناسب سنگ است. در اصل، انجام عملیات حفاری و انفجار در معادن سطحی، اولین گام در جهت خردایش سنگ و حصول ابعاد سنگ خرد شده‌ی مورد نیاز برای تأمین خوراک کارخانه است. بنابراین، خردایش سنگ ناشی از انفجار به‌طور جدی در وجوه مختلف بر اقتصاد کلی معدن تأثیرگذار خواهد بود. انجام یک انفجار مطلوب، باعث کاهش هزینه‌های کلی خردایش سنگ، بهبود بازدهی عملیات حفاری، بارگیری، باربری و بهبود عملیات بعد از استخراج (سنگ‌شکنی و آساکنی) می‌شود. بنابراین، اگر این مرحله خوب طراحی شود مواد با دانه‌بندی مناسب فراهم شده که برای بارگیری، باربری و مراحل فرآوری مطلوب خواهد بود. بر این اساس، طراحی مناسب الگوی حفاری و انفجاری و پیش‌بینی دقیق میزان خردایش سنگ به‌منظور بهینه‌سازی رابطه معدن-کارخانه می‌تواند به‌عنوان اولین گام در جهت بهینه‌سازی عملیات تولید تلقی شود. طراحی الگوی بهینه چالزنی و انفجار علاوه بر به حداقل رساندن هزینه‌های چال‌زنی و انفجار، باعث افزایش بازدهی مراحل بعدی فرآیند تولید، افزایش ایمنی و در نتیجه ماکزیمم کردن ارزش تولید می‌شود (Lownery et al., 2001, John-Paul et al., 2006). بنابراین، توسعه روشی سیستماتیک به منظور بهینه‌سازی پروسه چالزنی و انفجار برای رسیدن به خردایش بهینه در راستای سهولت حمل و نقل و فراهم نمودن ابعاد مناسب برای سنگ شکن‌ها، از اهمیت بالایی برخوردار است که بایستی در عمل و اجرا لحاظ گردد. به‌منظور دستیابی به موارد ذکر شده، شناسایی عوامل تأثیرگذار بر فرآیند چالزنی و انفجار مورد نیاز می‌باشد. برای انجام یک انفجار مناسب، در مرحله اول باید عوامل تأثیرگذار بر عملیات چالزنی و انفجار تعیین گردد و سپس الگوی بهینه انفجار بر مبنای این عوامل طراحی شود. به‌طور کلی، عوامل تأثیرگذار بر طراحی الگوی چالزنی و انفجار به دو دسته پارامترهای غیر قابل کنترل و قابل کنترل تقسیم‌بندی می‌شوند. دسته‌ی اول را همواره محیط اطراف دیکته کرده و لذا سازگار شدن با این عوامل نتیجه‌ی مطلوب‌تری را در بر خواهد داشت. از جمله پارامترهای غیر قابل کنترل هم می‌توان به شرایط ژئومکانیکی منطقه مورد مطالعه (جنس و مقاومت سنگ، گسل، درزه و ..) و شرایط آب و هوایی (رطوبت، دما و ریزش‌های جوی) اشاره کرد. پارامترهای قابل کنترل، عواملی هستند که می‌توان آن‌ها را تغییر داده و با طراحی صحیح و اصولی آن‌ها به انفجار بهینه دست یافت. از جمله‌ی این عوامل می‌توان به پارامترهای هندسی الگوی چالزنی، خواص فیزیکی مواد منفجره و زمان تأخیرها اشاره کرد (Monjezi et al., 2009).

با توجه به تغییر شرایط زمین‌شناسی و خصوصیات سنگ، تاکنون روابط تئوری قابل اعتمادی برای طراحی الگوی انفجار ارائه نشده و در بسیاری از موارد این امر به‌صورت سنتی و بر اساس تجربه پرسنل انجام می‌شود. به‌منظور توسعه‌ی روشی علمی و قابل اعتماد برای بهینه‌سازی طراحی انفجار، مطالعات زیادی توسط محققین مختلف صورت گرفته است. این مطالعات را می‌توان از دیدگاه‌های مختلف به چهار نوع کلی تقسیم بندی کرد که شامل ۱) مدل‌های تجربی بر اساس اندازه‌گیری برجا و مدل‌های ساده تحلیلی، ۲) مدل‌های عددی، ۳) مدل‌های با هدف جلوگیری از حوادث ناشی از انفجار، ٤) مدل‌های کامپیوتری و مدل‌های هوشمند می‌باشد (Liu et al., 2014). در مدل‌های تجربی، روابط بین پارامترهای تأثیرگذار و نتایج حاصل از انفجار با استفاد از تحلیل‌های آماری و بر اساس اندازه‌گیری‌های برجا توسعه می‌یابند (Yang and Rai, 2011). با این حال، در این روش تعداد بسیار زیادی داده اندازه‌گیری شده نیاز بوده و قابلیت کاربرد آن در عمل ضعیف است. در مدل‌های تحلیلی، روابط ریاضی ساده بین شرایط انفجار و نتایج انفجار بر اساس ساده سازی‌ها و فرضیات توده‌سنگ و ماده منفجره ایجاد می‌شوند

www.SID.ir

Archive of SID

(Yang et al., 1989). از آنجا که برخی از فاکتورهای تأثیرگذار بر نتایج انفجار در این معادلات نادیده گرفته شده و ساده سازی‌ها و فرضیات بسیار زیادی در نظر گرفته می‌شود، لذا تنها روابطی تقریبی را ارائه می‌کنند. در دهه‌های اخیر، روش‌های مدل‌سازی عددی مانند روش المان محدود، المان مجزا و تحلیل تغییر شکل ناپیوسته برای پیش‌بینی نتایج حاصل از انفجار استفاده شده است (Zhu, 2009). نتایج انفجار در این روش‌ها با توجه به بازخورد نتایج شبیه‌سازی اصلاح می‌شود. با این حال به جای طراحی کامل الگوی انفجار، انتخاب و بهینه‌سازی پارامترهای انفجار تنها در یک یا چند فاکتور انجام می‌شود. از طرف دیگر، استفاده از روش عددی در عملیات انفجار مشکل است زیرا مدل‌سازی عددی فرآیندی زمان‌بر بوده و تعیین برخی از پارمترهای مورد نیاز آن دشوار خواهد بود.

در سال‌های اخیر تعدادی از محققین از منظر جلوگیری از خطرات حاصل از انفجار مانند کنترل اثرات جانبی انفجار مثل لرزش ناشی از انفجار (Dehghani and Ataee-pour, 2011)، میزان پرتاب سنگ (Rezaei et al., 2011) و عقب‌زدگی (Monjezi et al., 2010)، بهینه‌سازی عملیات انفجار را مورد مطالعه قرار داده‌اند. با این حال، در تحقیقات فوق صرفاً از زاویه جلوگیری از خطرات و تضمین ایمنی به بهینه‌سازی عملیات انفجار پرداخته شده است. در یک طراحی ایده‌آل، بایستی بین کمترین اثرات سوء و بهترین نتایج حاصل از انفجار تعادل برقرار باشد. بنابراین، فاکتورهایی که ممکن است بر روی نتایج انفجار تأثیرگذار باشند بایستی به طور کامل در اثرات سوء و نتایج حاصل از انفجار در نظر گرفته شود. در سال‌های اخیر محققین مختلف از روش‌های هوشمند برای طراحی الگوی انفجار و پیش‌بینی نتایج حاصل از آن استفاده کرده‌اند (Kulatilake et al., 2010). مهم‌ترین مشکل روش‌های فوق، نیاز آن‌ها به مجموعه بسیار زیادی از داده‌ها به‌صورت ورودی–خروجی است که ممکن است تهیه و ثبت دقیق آن در عملیات انفجار امکان‌پذیر نباشد. با این حال در صورت اشکال در داده‌های مورد استفاده، نتایج این روش‌ها از اعتبار ساقط شده و قابلیت استفاده در عمل را نخواهند داشت. بعلاوه، از تکنیک‌های کامپیوتری و نرم‌افزارهای شبیه‌سازی در دهه‌های اخیر به‌منظور بهینه‌سازی فعالیت‌های معدنی از جمله بهبود کارائی ناوگان حمل و نقل معدن، بهینه‌سازی هم‌زمان عیار حد و ظرفیت کارخانه فرآوری و بهینه‌سازی عملیات انفجار معدن استفاده شده است (Qu et al., 2002). هر چند که این تکنیک‌ها ممکن است در برخی از موارد مشکلاتی شبیه روش‌های هوشمند را داشته باشند اما در مواردی مانند طراحی نرم‌افزارهای مرتبط بر اساس اصول علمی و تجربی و با در نظر گرفتن اکثریت پارامترهای تأثیرگذار، می‌تواند نتایج قابل اعتمادی در بر داشته باشد. به‌منظور رفع مشکلات خردایش حاصل از انفجار در معدن سنگ لاشه بغده‌کندی سقز، در تحقیق حاضر از نرم‌افزار تخصصی Delpat برای شبیه‌سازی و بهینه‌سازی الگوی حفاری و انفجار در معدن فوق الذکر استفاده شده است. هدفز تحقیق در نظر گرفتن اکثریت پارامترهای فنی و اقتصادی ممکن برای رسیدن به یک الگوی حفاری و انفجار بهینه است به‌طوری که ضمن دستیابی به خردایش مطلوب، هزینه‌های تولید را تا حد امکان کاهش داده و هم‌زمان کمترین اثرات سوء را داشته باشد. بر این اساس، اهداف تحقیق حاضر شامل بررسی خصوصیات فیزیکی و مکانیکی سنگ اصلی معدن، اندازه‌گیری خصوصیات مورد نیاز و طراحی الگوی بهینه بر اساس شرایط سنگ در بر گیرنده معدن با استفاده از نرم‌افزار Delpat بر مبنای مقایسه نتایج شبیه‌سازی انفجار برای چال‌های با قطر مختلف است.

۲. مواد و روش‌ها

در این تحقیق معدن سنگ لاشه بغده‌کندی سقز به‌عنوان مطالعه موردی در نظر گرفته شده است که در آن هدف اصلی تعیین الگوی بهینه چالزنی و انفجار از لحاظ فنی و اقتصادی با استفاده از نرم‌افزار تخصصی Delpat است. بر این اساس، گام‌های اجرایی، مواد و روش‌های تحقیق حاضر شامل موارد زیر می‌باشد:

www.SID.ir

Archive of SID

الف) جمع‌آوری اطلاعات موجود در معدن و اندازه‌گیری دیگر پارامترهای ضروری و آماده‌سازی داده‌ها

ب) استفاده از نرم‌افزار Delpat برای شبیه‌سازی و طراحی الگوی بهینه چالزنی و انفجار

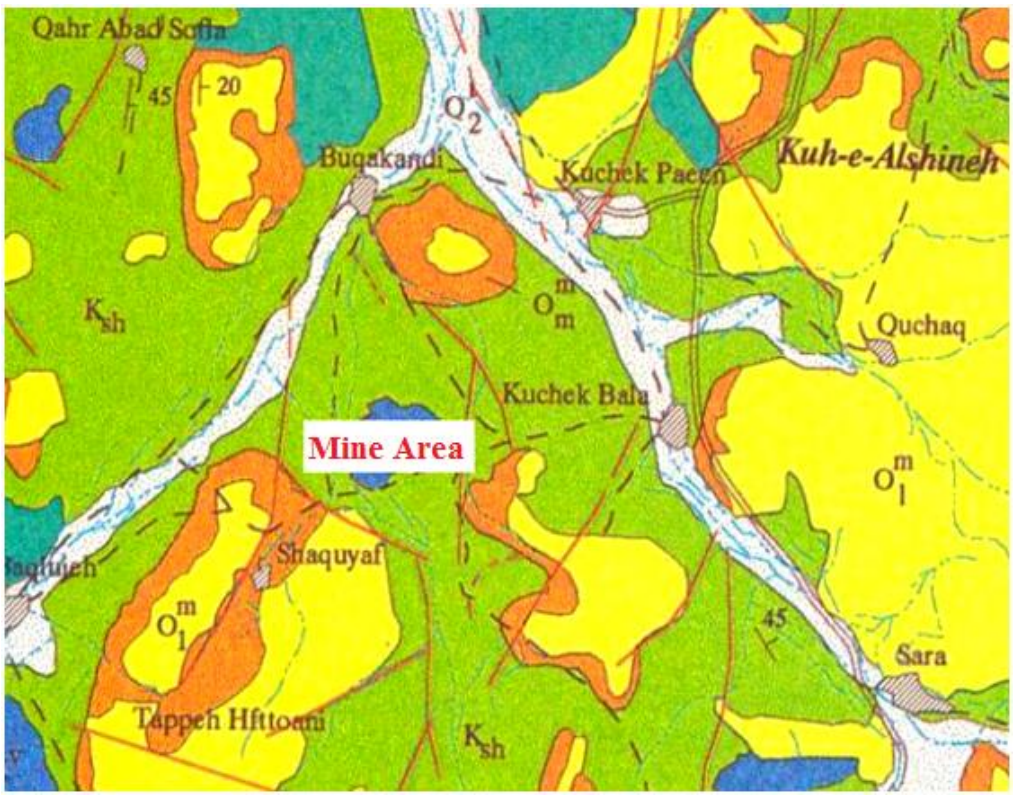
ج) تجزیه و تحلیل نتایجحاصله و اجرای الگوی پیشنهادی

۱-۲. مطالعه موردی

معدن سنگ لاشه بغده‌کندی در استان کردستان، شهرستان سقز و در بخش "سرا" قرار گرفته است. از لحاظ جغرافیایی، این معدن در شمال غرب استان کردستان و شمال شهرستان سقز قرار دارد که فاصله آن تا مرکز بخش "سرا" ۷ کیلومتر و تا شهرستان سقز ۲۲ کیلومتر است. گسترش معدن از طول جغرافیایی″٥٤ ′٠٨ °٤٦ تا ″٣٤ ′٠٩ °٤٦ و عرض جغرافیایی ٤٢″ ٢٣′ ٣٦° تا ″١٤ ٢٤′ ٣٦° می‌باشد (رضائی، ۱۳۹۵).

۱-۱-۲. زمین شناسی محدوده

محدوده معدن مورد مطالعه از لحاظ سنگ‌شناسی عمدتاً از سنگ‌های آندزیتی و آندزیت بازالتی تشکیل شده است. این سنگ‌ها در اصل بخشی از نهشته‌های مربوط به کرتاسه فوقانی است که شامل نهشته‌های ضخیمی از شیل‌های خاکستری تیره رسی و سیلتی با میان لایه‌های آهکی مارنی و افق‌هایی از گدازه‌های آندزیتی و آندزیت بازالتی است که در بخش فوقانی به یک افق آهک خاکستری ضخیم تبدیل شده است. در سمت جنوب محدوده هم نهشته‌های آهکی و مارنی رخنمون دارد. همچنین، در شرق محدوده آهک‌های کریستاله شده خاکستری و دولومیتی مربوط به تریاس و پرمین رخنمون دارد که از این سنگ‌ها معمولاً به‌عنوان سنگ‌های ساختمانی (مالون) استفاده می‌شود. معدن مورد مطالعه در شمال غربی نقشه زمین شناسی ۱/۱۰۰۰۰۰ سقز قرار دارد که رخنمون سنگ‌های دگرگون شده مربوط به پرکامبرین با پوششی از نهشته‌های پالئوزوئیک فوقانی و کرتاسه در بخشی از آن دیده می‌شود. در شکل (۱) محدوده معدن سنگ لاشه بغده‌کندی بر روی نقشه زمین شناسی ۱/۱۰۰۰۰۰ سقز نشان داده شده است (رضائی، ۱۳۹۵).



شکل ۱. محدوده‌ی معدن بر روی نقشه زمین شناسی ۱/۱۰۰۰۰۰ سقز (رضائی، ۱۳۹۵).

www.SID.ir

Archive of SID

۱-۲-۲. مشخصات ماده معدنی و میزان ذخیره

سنگ اصلی این معدن میکرودیوریت است که در نمونه‌های مورد مطالعه، رگچه‌های سفید رنگی از تبلور کلسیت هم مشاهده شده است. نتایج مطالعه مقاطع میکروسکوپی انکساری تهیه شده از نمونه‌ها در میکروسکوپ پلاریزان شامل سه نوع کانی اصلی، فرعی و ثانویه است. کانی‌های اصلی شامل فلدسپار، پیروکسن و کوارتز است. فلدسپارها از نوع پلاژیوکلازهای کلسیک بوده و حدود ۷۰ تا ۷۵ درصد زمینه سنگ را تشکیل می‌دهند. پلاژیوکلازهای قلیایی آلبیت هم حدود ۱۰ تا ۱۵ درصد زمینه سنگ را به خود اختصاص داده‌اند. پیروکسین‌ها نیز از نوع کلینوپیروکسین و عمدتاً اوژیت هستند که به رنگ سبز کم رنگ با بلورهای نیمه شکل‌دار و ابعاد تا ۰/۵ میلی‌متر مشاهده می‌شود. در نهایت، کانی کوارتز به مقدار بسیار کم (کمتر از ۲٪) و به شکل پراکنده در فضای بین برخی از فلدسپارها و یا در ساختارهای تداخلی (پرتیت، آنتی پرتیت) مشاهده می‌شود. کانی‌های فرعی موجود در سنگ شامل اسفن و کانی‌های اوپک هستند. کانی‌های ثانویه شامل کلریت و کلسیت هستند که کلریت بصورت آغشته در پیرامون فلدسپارها و پیروکسین‌ها و با فراوانی حدود ٤٪ دیده می‌شود. با در نظر گرفتن سنگ میکرودیوریت برای تخمین ذخیره اصلی معدن و با توجه به محاسبات انجام شده، میزان ذخیره قطعی معدن برابر ۲۵۰۰۰۰۰ تن و ذخیره احتمالی آن برابر با ٤۰۰۰۰۰۰ تن تخمین زده شده است (رضائی، ۱۳۹۵).

۳-۱-۲. جمع آوری داده و انجام آزمایشات

نظر به اینکه طراحی الگوی انفجار معدن نیازمند آگاهی از خصوصیات فیزیکی و مکانیکی سنگ است لذا انجام آزمایش‌های مربوطه ضروری می‌باشد. نتیجه آزمایش‌های انجام شده مربوط به خصوصیات فیزیکی و مکانیکی سنگ معدن در جدول (۱) نشان داده شده است.

جدول ۱. آزمایش‌های مربوط به خصوصیات سنگ (رضائی، ۱۳۹۵).

Test Type	Unit	Average value
Dry unconfined compressive strength	Kg/cm^3	801
Saturated unconfined compressive strength	Kg/cm^3	789
Bulk density	gr/cm^3	2.852
True density	gr/cm^3	2.837
Water absorbtion	%	0.19
Los Angeles Abrasion	%	15

۲-۲. نرم افزار Delpat

این نرم‌افزار با استفاده از زبان برنامه‌نویسی ویژوال بیسیک نوشته شده و تحت سیستم عامل ویندوز ۹۸ و نسخه‌های جدیدتر آن کار می‌کند که برای طراحی الگوی انفجار عملیات سطحی تهیه شده است. نرم‌افزار از دو قسمت مهم منوی اصلی و منوی خروجی تشکیل شده است. منوی اصلی این برنامه کامپیوتری در حقیقت همان صفحه اطلاعات آن است که کاربر می‌تواند تعدادی از پارامترها را انتخاب، وارد و یا تأیید نماید. پارامترهایی که بایستی در این بخش محاسبه و یا انتخاب گردد شامل حجم عملیات حفاری و مدت زمان انجام آن، قابلیت انفجار سنگ، اندازه دانه‌بندی سنگ مورد نیاز، ارتفاع پله در محل کار، نوع ماشین‌آلات حفاری، آرایش سیستم حفاری و نوع مواد منفجره مورد استفاده است (Kalayci et al., 2010).

حجم سنگ مورد نظر جهت انجام عملیات چالزنی و انفجار بر حسب متر مکعب و مدت زمانی که برای انجام عملیات مورد نیاز است بایستی توسط کاربر محاسبه و وارد شود. برای معادن روباز متوسط تا بزرگ مقیاس، معمولاً میزان برداشت سالیانه در نظر گرفته می‌شود. قابلیت انفجار پذیری سنگ یکی از خواص توده‌سنگ است که اجرای عملیات انفجار و نتایج آن را تحت تأثیر قرار می‌دهد. این شاخص به مقاومت،

www.SID.ir

Archive of SID

دانسیته، مدول یانگ، ساختار توده سنگ، شرایط محیط از نظر وجود آب یا رطوبت و غیره بستگی دارد.

قابلیت انفجار سنگ در این نرم‌افزار به پنج طبقه‌بندی خیلی خوب، خوب، متوسط، ضعیف و خیلی ضعیف تقسیم شده که با توجه به خصوصیات سنگ و شرایط محل کار، یکی از این پنج حالت در نظر گرفته می‌شود. اندازه قطعات تولید شده سنگ پس از انفجار، از جهت انتخاب سیستم بارگیری، ماشین‌آلات باربری، تجهیزات سنگ‌شگنی و استفاده ثانویه از این مواد دارای اهمیت است. بنابراین، خردایش سنگ حتی الامقدور باید مطابق با نیاز و نوع استفاده ثانویه از قطعات تولید شده باشد. باید توجه شود که کنترل خردایش سنگ با پارامترهای متفاوتی در الگوی حفاری و همچنین ترکیب خرج گذاری مرتبط است. در این بخش از نرم‌افزار، اندازه قطعات مورد نیاز سنگ بر حسب سانتی‌متر پس از انفجار و درصد وزنی آن‌ها توسط کاربر وارد می‌شود. در منوی نرم‌افزار اندازه ذرات را از ۱۰ تا ۱۵۰ سانتی‌متر می‌توان وارد کرد. ارتفاع پله در معادن روباز با توجه به نوع تجهیزات حفاری، ماشین‌آلات بارگیری و مسائل ایمنی معدن تعیین می‌شود. در این بخش از نرم‌افزار، ارتفاع پله مطابق آنچه که در منو وجود دارد بین ٤ تا ٢٤ متر قابل انتخاب بوده و هماهنگی آن با دیگر پارامترها به صورت اتوماتیک در محیط نرم‌افزار کنترل می‌شود.

در طراحی جدول زمانی مربوط به عملیات استخراج معادن سطحی، زمان مورد نیاز برای حفاری و انفجار به‌صورت مجزا اختصاص می‌یابد که بر حسب ساعات در روز بیان شده و هیچ گونه ارتباطی با تعداد ساعات شیفت کاری در روز نخواهد داشت. زمان در نظر گرفته شده در طراحی یا زمان واقعی مورد نیاز برای عملیات چالزنی و انفجار بر حسب ساعت در روز در این بخش از نرم‌افزار وارد خواهد شد. در بخش انتخاب ماشین چالزنی، بایستی نوع ماشین چالزنی از لیست موجود در نرم افزار انتخاب شود. چنانچه ماشین چالزنی مورد استفاده معدن در لیست موجود نباشد می‌توان ماشین چالزنی با پارامترهای مخصوص به خود را وارد نمود. در صورت اضافه کردن یک ماشین حفاری جدید، پارامترهایی نظیر قیمت ماشین، قیمت شاسی ماشین حفاری، دوره استهلاک، توان دستگاه، مصرف سوخت و حداقل و حداکثر قطر سرمته آن باید وارد نرم افزار شود. در نهایت، یک ماشین حفاری از میان گزینه‌های موجود در این قسمت انتخاب و تأیید می‌شود.

در قسمت آرایش سیستم حفاری، الگوی حفاری و زاویه شیب چال‌ها تعیین می‌شود. در این نرم‌افزار دو نوع الگوی حفاری شامل آرایش‌های لوزی و مستطیلی شکل وجود دارد که معمولاً در معادن روباز از این دو نوع آرایش برای حفر چال‌ها بیشتر استفاده می‌شود. زاویه شیب چال در معادن روباز معمولاً از صفر تا ٤٥ درجه نسبت به حالت قائم متغیر است که عدد صفر معرف چال قائم (۹۰ درجه) و عدد ٤٥ هم معرف چال با زاویه ٤٥ درجه نسبت به حال قائم می‌باشد. با این حال در بیشتر موارد، الگوهای حفاری برای شیب ۹۰ درجه (قائم) و یا حداکثر ۱۸ درجه نسبت به خط قائم (یا شیب ۳ به ۱) طراحی می‌شوند. در این قسمت از نرم‌افزار، زاویه شیب چال با توجه به عوامل مؤثر انتخاب می‌گردد که در ادامه بر اساس زاویه انتخاب شده، مقطع عرضی یک چال در پلان حفاری نمایش داده خواهد شد. در نهایت، اطلاعات مربوط به آرایش سیستم حفاری در منوی اصلی نرم‌افزار بایستی ذخیره گردد.

قسمت مربوط به انتخاب نوع مواد منفجره نرم‌افزار از چهار بخش مجزا تشکیل شده است که شامل انتخاب چاشنی، پرایمر، خرج ته چال و خرج میان چال یا خرج اصلی است. در این بخش از نرم‌افزار، چاشنی‌ها بر اساس تعداد در چال و قیمت ارزیابی شده‌اند که به سادگی قابل انتخاب یا حذف شدن هستند. پرایمرها هم توسط چهار پارامتر قدرت وزنی مطلق، دانسیته، سرعت انفجار و قیمت ارزیابی شده و قابل انتخاب یا اضافه شدن هستند. شرایط انتخاب این قسمت نیز مشابه مراحل قبل است. در نهایت بعد از انتخاب چاشنی، پرایمر، خرج ته چال و خرج اصلی، باید همه آن‌ها به‌صورت یک‌جا در نرم‌افزار ذخیره شوند. پس از کامل شدن منوی ورود اطلاعات، منوی نتایج که شامل خروجی مقادیر، هندسه الگوی

www.SID.ir

Archive of SID

چالزنی، توزیع اندازه قطعات سنگ و ایجاد گزارش است، فعال خواهد شد. می‌توان با بررسی خروجی‌ها و برای رسیدن به نتایج مطلوب پارامترهای ورودی را تغییر داد تا الگوی بهینه انفجار با نتایج دلخواه حاصل گردد.

۳. مدل‌سازی

در این بخش بر اساس مشخصات معدن سنگ لاشه بغده کندی (پارامترهای هندسی و ژئومکانیکی سنگ، خصوصیات ماده منفجره و نوع ماشین‌آلات) شبیه‌سازی در محیط نرم‌افزار Delpat انجام شده و خروجی‌های مربوطه مورد بحث قرار می‌گیرد. بر این اساس، بهینه‌ترین مقادیر انتخاب و الگوی حفاری و انفجار با بیشترین صرفه اقتصادی و تأمین ایمنی مورد نظر برای معدن پیشنهاد خواهد شد.

۱-۳- پارامترهای مدل‌سازی

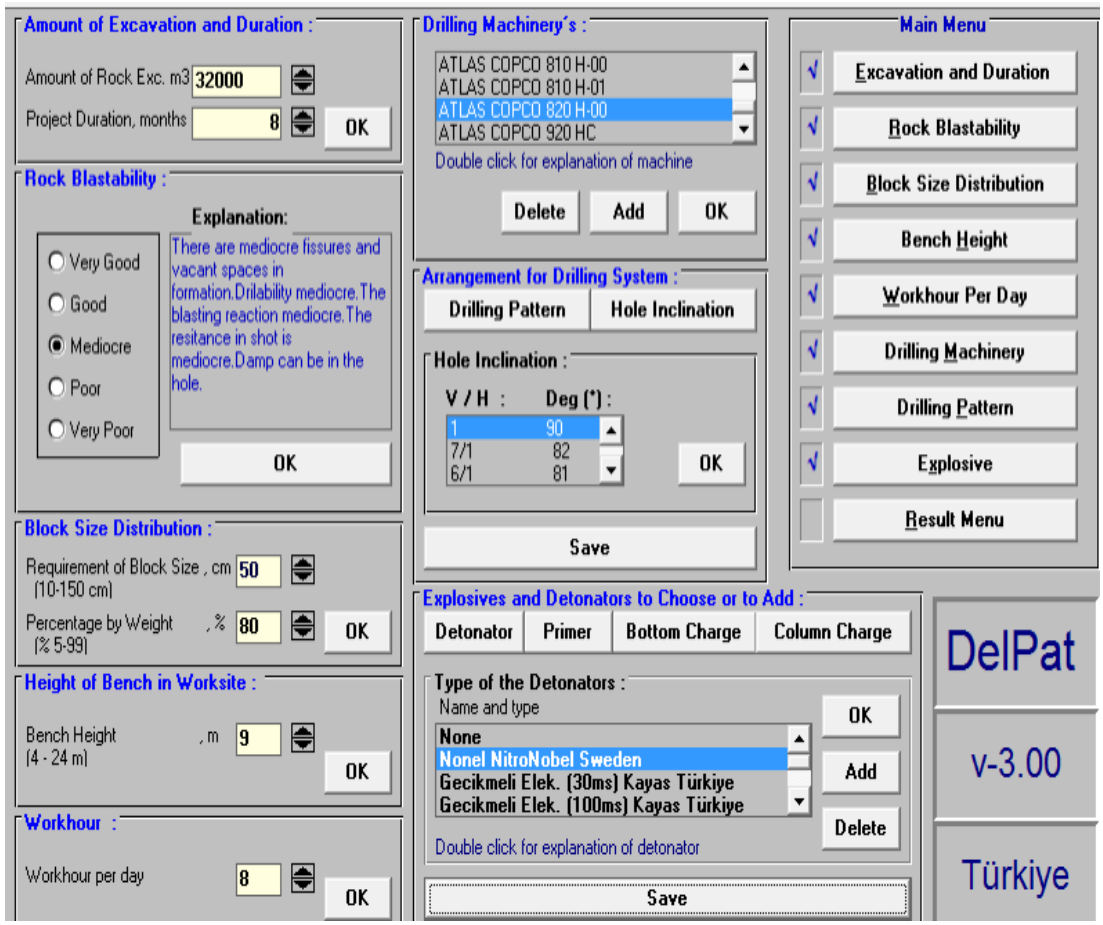
با توجه به شرایط معدن سنگ لاشه بغده‌کندی و توضیحات ارائه شده‌ی قبلی، برای هر کدام از بخش‌های منوی اصلی پارامترها و مقادیر مناسب محاسبه و انتخاب گردید تا بر اساس آن، مدل‌سازی صورت گرفته و نتایج ارزیابی گردد. در معدن سنگ لاشه بغده‌کندی استخراج سالیانه ۹۰ هزار تن است که با توجه به وزن مخصوص آن، این میزان برابرحدود ۳۲ هزار متر مکعب است. همچنین، با توجه به وضعیت آب و هوایی منطقه، تنها در ۸ ماه از سال امکان کار وجود دارد. با توجه به مشاهدات صحرایی و انجام آزمایشات لازم، قابلیت انفجار پذیری سنگ معدن متوسط (Mediocre) در نظر گرفته می‌شود. با در نظر گرفتن دهانه سنگ شکن‌های معدن، حداکثر اندازه قطعات مورد نظر ۵۰ سانتیمتر بوده و درصد وزنی ۸۰ در نظر گرفته می‌شود. بر اساس نتایج آزمایشات انجام شده، نوع سنگ و تجهیزات مورد استفاده در معدن، ارتفاع پله ۹ متر انتخاب گردید. زمان کاری در نظر گرفته شده برای این معدن ۸ ساعت در روز است. با توجه به شرایط موجود و سختی سنگ معدن، محدودیت‌ها، اهداف مورد نظر و سایر عوامل، آرایش حفاری لوزی شکل و سیستم انفجار نانل انتخاب و در نظر گرفته شد. شیب چال‌ها با توجه به سختی بالای سنگ معدن و دیگر شرایط موجود، ۹۰ درجه (چال قائم) در نظر گرفته می‌شود. مقادیر و پارامترهای انتخاب شده برای معدن مورد مطالعه در منوی اصلی نرم‌افزار Delpat در جدول (۲) و شکل (۲) نشان داده شده است.

جدول ۲. پارامترهای ورودی مربوط به معدن لاشه بغده‌کندی به منظور مدل‌سازی انفجار با استفاده از نرم‌افزار Delpat.

Parameter		Value	Unit
Excaavation operation	Excaavation volume	32000	Cubic meter
	Excaavation time	8	Month
Rock blastability		Mediocre	Mediocre
Block size distribution	Requirement of block size	50	Centimeter
	Percentage by weight	80	Percent
Height of bench in worksite		9	Meter
Work hour per day		8	Hour
Drilling machinery		ATLAS COPCO 820 H-00	
Arrangement of drilling system	Drilling pattern	Staggered	-
	Hole inclination	90	Degree
Explosives and detonators	Type of detonators	Nonel system	-
	Primer	Emulite	-
	Column charge	ANFO	-
	Bottom charge	ANFO	-

www.SID.ir

Archive of SID



شکل ۲. نمایش منوی اصلی Delpat برای معدن سنگ لاشه بغده‌کندی.

۲-۳. *نتایج مدل‌سازی*

در این بخش، خروجی‌های نرم‌افزار Delpat بر اساس شبیه-سازی پارامترها و شرایط معدن سنگ لاشه بغده‌کندی که قبلاً تشریح شد ارائه می‌شود. در خروجی نرم‌افزار، نتایج محاسبات برای یک یا چند قطر چال بر اساس پارامترهای ورودی شبیه‌سازی می‌شود که در آن می‌توان نتایج مربوط به قطر چال‌های متفاوت را با یکدیگر مقایسه نمود. بر اساس پارامترهای ورودی برای معدن سنگ لاشه بغده‌کندی سقز، نتایج شبیه‌سازی مربوط به متغیرهای الگوی حفاری و انفجار در شکل (۳) نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل فوق ملاحظه می‌شود نتایج الگوی حفاری برای چهار نوع قطر چال بدست آمده که می‌توان با مقایسه آن‌ها مقدار قطر چال بهینه را انتخاب نمود. از شکل (۳) می‌توان نتیجه گرفت که چال با قطر ۱۱۵ میلی‌متر منجر به کمترین هزینه انفجار و همچنین هزینه کلی تولید در معدن می‌شود. لذا این قطر چال می‌تواند به عنوان قطر چال بهینه (از لحاظ اقتصادی) در معدن مورد مطالعه انتخاب و پیشنهاد شود به شرطی که از لحاظ ایمنی (پرتاب سنگ و لرزش زمین) مشکلی ایجاد نکند.

۲-۳-۱. *مشخصات هندسی الگوی حفاری*

حجم سنگی که قرار است خرد شود توسط هندسه الگوی حفاری تعیین می‌گردد. در این قسمت از نرم‌افزار، الگوی حفاری شامل چندین ردیف چال (به‌صورت پلان)، مقطع عرضی یک چال و نمونه شیب‌دار یا قائم چال‌ها ارائه خواهد شد. به‌عنوان مثال، کلیه ویژگی‌های هندسه الگوی حفاری برای قطر چال برابر با ۱۰۲ میلی‌متر در شکل (٤) نشان داده شده است که شامل سطح آزاد، گل‌گذاری، خرج اصلی و خرج ته چال، طول، زاویه و قطر چال، بارسنگ و فاصله ردیفی چال‌ها می‌باشد.

www.SID.ir

Archive of SID

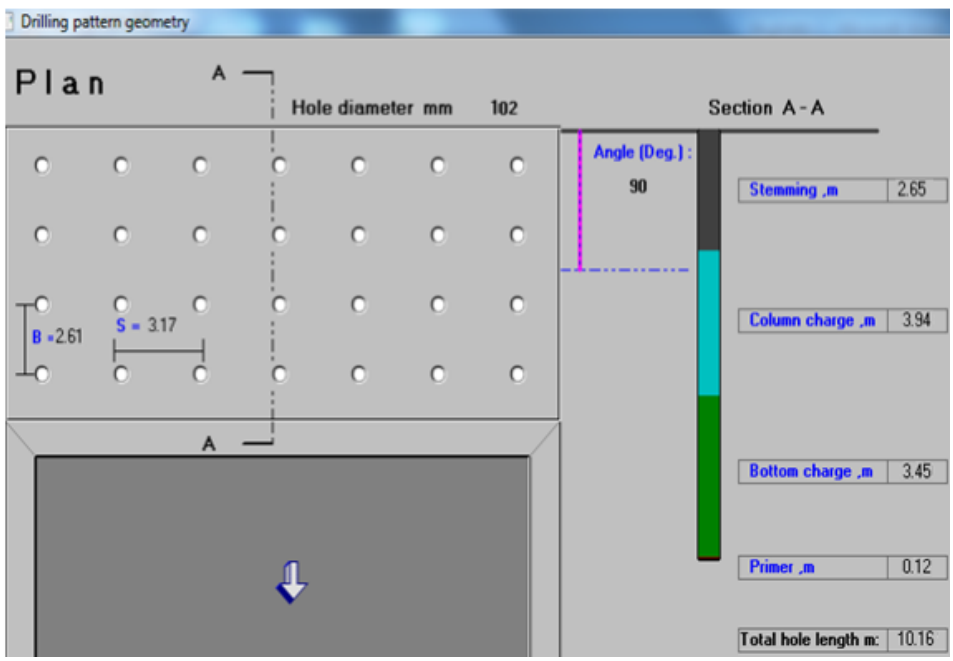
Output of the Values

Please choose one hole diameter

Hole Diameter (mm)	76	89	102	115
Burden ,B (m)	2.36	2.50	2.61	2.84
Spacing ,S (m)	2.37	2.74	3.17	3.43
Subdrill (m)	0.86	0.98	1.12	1.20
Hole lenght (m)	9.92	10.08	10.16	10.27
Ratio of S/B	1.00	1.10	1.21	1.21
Specific drilling (drm/m3)	0.18	0.15	0.12	0.10
Yield per drm (m3/drm)	5.59	6.85	8.28	9.73
Yield per hole (m3/hole)	55.46	69.09	84.20	99.91
1. Productivity number of machine	1 (69 %)	1 (69 %)	1 (69 %)	1 (69 %)
2. Productivity number of machine	2 (34 %)	2 (34 %)	2 (34 %)	2 (34 %)
Drilling cost ($/m3)	0.50	0.50	0.49	0.49
Stemming (m)	2.06	2.46	2.65	2.91
Height of emptiness (m/hole)	None	None	None	None
The Amount of primer (kg/hole)	1.50	1.50	1.50	1.50
Height of primer charge (m)	0.21	0.15	0.12	0.09
Bottom charge (kg/hole)	10.73	17.56	24.91	34.75
Height of bottom charge (m)	2.68	3.19	3.45	3.79
Column charge (kg/hole)	19.26	22.69	27.47	30.80
Height of column charge (m)	4.98	4.28	3.94	3.48
Total charge (kg/hole)	31.48	41.75	53.88	67.05
Specific charge (kg/m3)	0.40	0.42	0.45	0.47
Total column charge in this project (ton)	11,111	10,510	10,441	9,863
Total bottom charge in this project (ton)	6,191	8,134	9,468	11,131
Total primer charge in this project (ton)	865	695	570	480
Blasting cost ($/m3)	0.33	0.30	0.27	0.25
1. Productivity total cost ($/m3)	0.66	0.61	0.58	0.55
2. Productivity total cost ($/m3)	0.84	0.80	0.77	0.74

Block size distibution 80 % 50 cm
Rock blastability Mediocre

شکل ۳. نتایج شبیه‌سازی الگوی انفجار برای معدن سنگ لاشه بغده‌کندی با استفاده از نرم‌افزار.



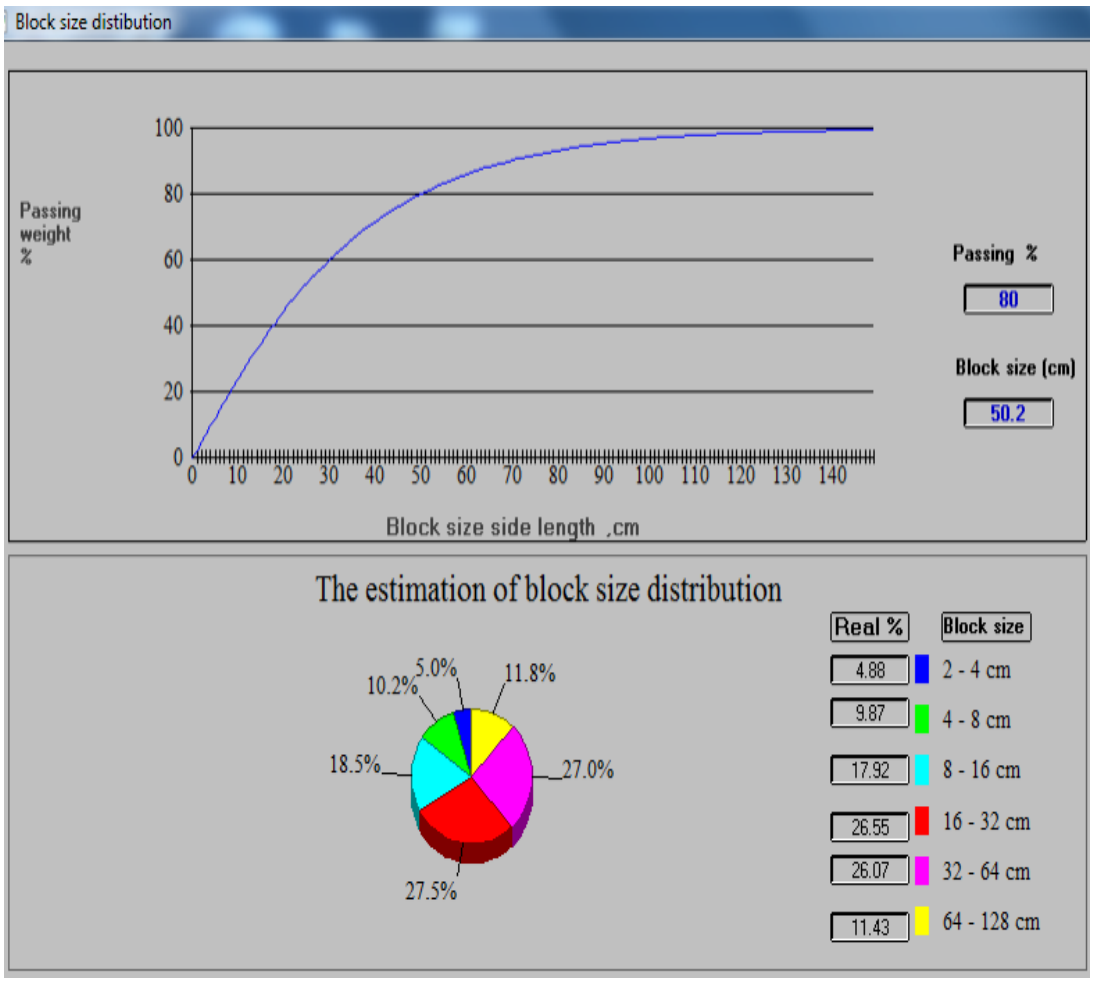
شکل ٤. مشخصات هندسی الگوی حفاری و انفجار برای چال با قطر ۱۰۲ میلی‌متر.

www.SID.ir

Archive of SID

۲-۲-۳. *دانه‌بندی سنگ*

در این نرم‌افزار توزیع اندازه قطعات سنگ به‌صورت دو نمودار گرافیکی نشان داده شده است (شکل ۵). یکی از نمودارها مربوط به درصد مواد وزنی باقی‌مانده روی سرند نسبت به طول ابعاد قطعات سنگ بوده و نمودار بعدی که در قسمت پایین قرار گرفته و به‌صورت دایره‌ای است مربوط به تخمین توزیع اندازه قطعات سنگ می‌باشد.



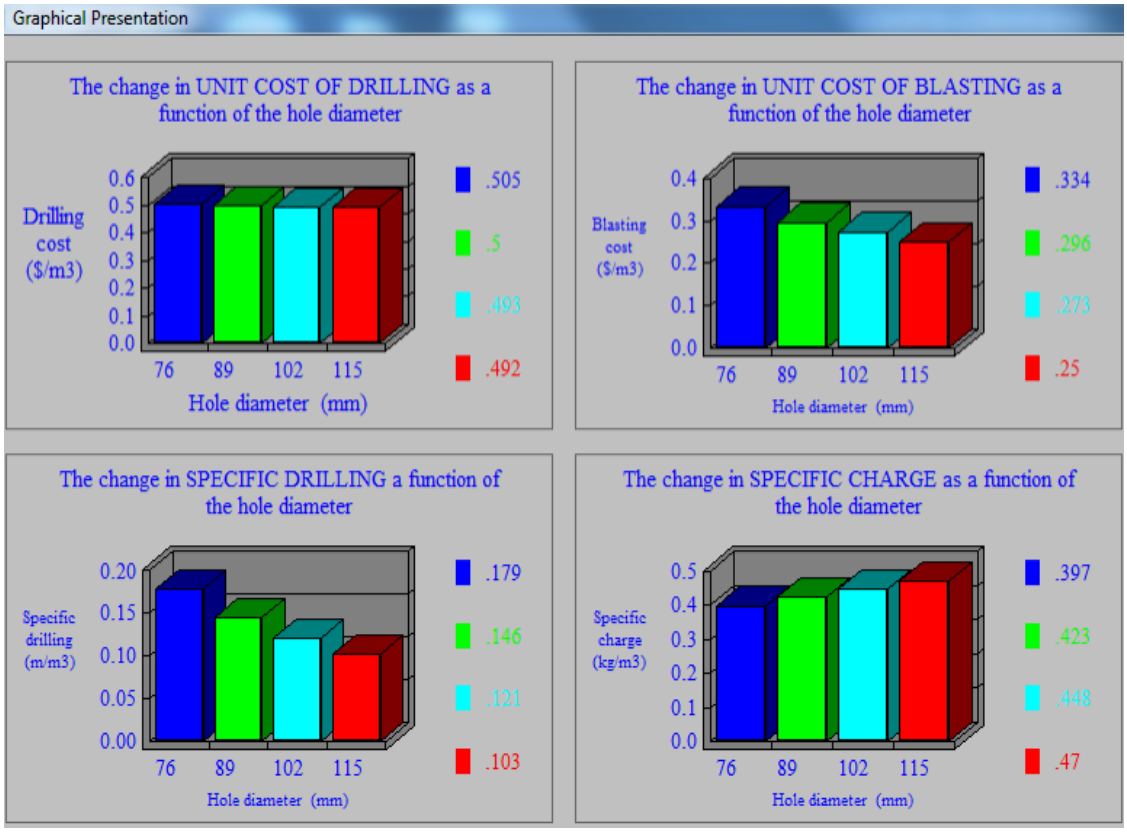
شکل ۵. منحنی دانه‌بندی و توزیع اندازه قطعات سنگ حاصل از انفجار.

۳-۲-۳. *نتایج کلی مدل‌سازی*

گزارش نهایی شبیه‌سازی شامل ارائه گزارش به‌صورت فایل، گزارش بر روی صفحه نمایش و گزارش گرافیکی است. در این گزارش‌ها نتایج مربوط به محاسبات برای حالت‌های متفاوت و قطرهای مختلف دیده می‌شود. نتایج نهایی طراحی الگوی انفجار به‌صورت گرافیکی برای قطرهای مختلف و نمودارهای مربوطه در شکل (٦) نشان داده شده است. همانطور که در شکل فوق هم مشاهده می‌شود هزینه حفاری با افزایش قطر چال به‌صورت جزئی کاهش پیدا می‌کند اما هزینه کلی به‌طور قابل ملاحظه‌ای کاهش یافته است. از طرف دیگر، حفاری ویژه و خرج ویژه با افزایش قطر چال به‌ترتیب کاهش و افزایش پیدا می‌کنند.

www.SID.ir

Archive of SID



شکل ٦. نتایج گرافیکی شبیه‌سازی الگوی حفاری و انفجار.

٤. نتایج و بحث

بر اساس پارامترها و اطلاعات جمع‌آوری شده از معدن، الگوی حفاری و انفجار برای ٤ قطر چال با استفاده از نرم‌افزار Delpat طراحی گردید. با توجه به شکل‌های (٣) تا (٦)، خلاصه برخی از مهم‌ترین نتایج حاصل از شبیه‌سازی برای قطرهای ٧٦، ٨٩، ١٠٢ و ١١٥ میلی‌متر همراه با هزینه‌های چالزنی، انفجار، خردایش و هزینه کل برای هر یک از الگوها، در جدول (٣) ارائه شده است.

جدول ٣. نتایج شبیه‌سازی الگوهای مختلف انفجار با استفاده از نرم افزار Delpat.

Parameter	Hole diameter			
	76	89	102	115
Bench height (m)	9	9	9	9
Burden (m)	2.36	2.5	2.61	2.84
Spacing (m)	2.37	2.74	3.17	3.43
Subdrilling (m)	0.86	0.98	1.12	1.2
Stemming (m)	2.06	2.46	2.65	2.91
The amount of primer (Kg/hole)	1.5	1.5	1.5	1.5
Bottom charge (Kg/hole)	10.73	17.56	24.91	34.75
Column charge (Kg/hole)	19.26	22.69	27.47	30.8
Hole lemgth (m)	9.92	10.08	10.16	10.27
Drilling cost ($/m^3)	0/5	0.5	0.49	0.49
Blasting cost ($/m^3)	0.33	0.3	0.27	0.25
Total cost ($/m^3)	0.66	0.61	0.58	0.51

لازم به ذکر است که طراحی الگوی حفاری و انفجار در معدن مورد مطالعه تاکنون به‌صورت تجربی انجام شده و قطر چال مورد استفاده ٧٦ میلی‌متر بوده است. با انجام محاسبات برای قطر چال فوق، هزینه کلی برابر با ٠/٦٦ دلار بر متر مکعب

www.SID.ir

Archive of SID

برآورد گردید. همانطور که در جدول (٤) هم مشاهده می‌شود هزینه کلی برای قطر ۸۹ میلی‌متر ۰/٦۱ دلار بر متر مکعب، برای قطر ۱۰۲ میلی‌متر ۰/۵۸ دلار بر متر مکعب و برای قطر ۱۱۵ میلی‌متر ۰/۵۱ دلار بر متر مکعب است. با افزایش قطر چال طبیعتاً بارسنگ و فاصله ردیفی چال‌ها افزایش می‌یابد یعنی حفر چال‌های با قطر ۱۰۲ و ۱۱۵ میلی‌متر منجر به کمترین هزینه حفاری و انفجار می‌شود. با بررسی‌های به عمل آمده، مشخص گردید که استفاده از چال‌های با قطر ۱۱۵ میلی‌متر از لحاظ ایمنی (پرتاب سنگ و لرزش) مشکلاتی در معدن ایجاد می‌کند زیرا تأسیسات سنگ‌شکنی و ساختمان‌های اداری معدن در فاصله حداکثر ۱۵۰ متری از محل انجام انفجار قرار دارند و لذا در محدوده پرتاب سنگ و لرزش زمین ناشی از انفجار قرار می‌گیرند. بر اساس الگوی چالزنی و انفجار شبیه‌سازی شده توسط نرم‌افزار، با در نظر گرفتن قطر چال ۱۰۲ میلی‌متر، هزینه‌ها نسبت به الگوی قبلی مورد استفاده در معدن (قطر چال ۷٦ میلی‌متر) به‌طور قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌یابد. با توجه به اینکه استفاده از قطر ۱۱۵ میلی‌متر قطعا منجر به لرزش زمین و پرتاب سنگ زیاد شده و ایمنی تأسیسات و ساختمان‌های معدن به خطر خواهد افتاد لذا با در نظر گرفتن شرایط اقتصادی و ایمنی، حفر چال‌های با قطر ۱۰۲ میلی‌متر به‌عنوان قطر چال بهینه برای طراحی الگوی حفاری و انفجار معدن مذکور پیشنهاد گردید. بر اساس قطر ۱۰۲ میلی‌متر، سایر پارامترهای الگوی حفاری و انفجار هم توسط نرم‌افزار محاسبه شده که نتایج حاصله در ستون مربوط به قطر چال ۱۰۲ میلی‌متر در شکل (۳) نشان داده شده است. با اجرای عملی الگوی پیشنهادی در معدن، بهبود نتایج از جمله خردایش مطلوب و کاهش اثرات سوء ناشی از انفجار نسبت به الگوی قبلی مشاهده گردید. علاوه بر این، کاهش چشمگیری هم در هزینه‌های استخراج معدن اتفاق افتاد (۰/۰۸ دلار بر متر مکعب). به‌عنوان مثال، در یک راند انفجار در معدن (با در نظر گرفتن ۵۰ هزار تن مواد استحراجی با وزن مخصوص ۲/۸۵ گرم بر سانتیمتر مکعب)، حدود ۱٤۰۰ دلار صرفه جویی خواهد شد که برای معادن سنگ لاشه مبلغی قابل توجه می‌باشد.

۵. نتیجه‌گیری

در این تحقیق از محیط نرم‌افزار Delpat برای مدل‌سازی و بهینه‌سازی الگوی انفجار معدن سنگ لاشه بغده‌کندی سقز استفاده شده است. بدین منظور، ابتدا الگوی انفجار فعلی معدن بررسی و هزینه کلی استخراج آن برابر با ۰/۷ دلار بر متر مکعب برآورد گردید. سپس، اطلاعات مورد نیاز برای مدل‌سازی الگوی حفاری و انفجار در معدن مورد مطالعه اندازه‌گیری و جمع‌آوری شد. با استفاده از نرم افزار مذکور، برای قطرهای ۷٦، ۸۹، ۱۰۲ و ۱۱۵ میلی‌متر الگوهای مختلف حفاری و انفجار شبیه‌سازی و ارزیابی گردید. با مقایسه هزینه‌های چالزنی، هزینه‌های انفجار و هزینه کلی تولید برای قطر چال‌های مختلف مشخص شد که با افزایش قطر چال، هزینه‌ها کاهش می‌یابد. با این حال، با در نظر گرفتن قطر چال بیشتر، حجم مواد منفجره مورد استفاده افزایش یافته و باعث لرزش زیاد زمین و پرتاب سنگ بیشتر خواهد شد. در صورت استفاده از چال با قطر بالا، تجهیزات سنگ‌شکنی و دانه‌بندی و ساختمان‌های اداری معدن در محدوده پرتاب سنگ و لرزش زمین ناشی از انفجار قرار گرفته و دچار آسیب و خسارت می‌شوند. از طرف دیگر، استفاده از چال با قطر ۱۰۲ میلی‌متر باعث کاهش هزینه کلی قابل توجه (۰/۰۸ دلار بر متر معکب) نسبت به چال با قطر ۷٦ میلیمتر می‌شود که بر اساس روش تجربی در معدن استفاده می‌شود. بنابراین، قطر چال ۱۰۲ میلی‌متر به عنوان قطر چال بهینه در این تحقیق برای معدن سنگ لاشه بغده کندی سقز انتخاب شد. دیگر پارامترهای الگوی حفاری و انفجار بر اساس این قطر چال محاسبه و برای استفاده عملی در معدن پیشنهاد گردید. اجرای الگوی انفجار پیشنهادی در معدن باعث شد که در مقایسه با الگوهای قبلی، خردایش سنگ بهبود و اثرات سوء ناشی از انفجار (پرتاب سنگ و لرزش زمین) کاهش یابد.

www.SID.ir

Archive of SID

تشکر و قدردانی

این مقاله مستخرج از طرح پژوهشی به شماره قرارداد ٤/٣١٢٩٨ مورخ ١٣٩٥/٠٦/٢٤ فی‌مابین معاونت پژوهشی و فناوری دانشگاه کردستان، شرکت کوهستان کاوه بوکان و نویسنده مقاله به عنوان مجری طرح است. بدین‌وسیله از حمایت ارگان‌های فوق تشکر و قدردانی می‌شود.

منابع

رضائی، م.، ۱۳۹۵. طراحی الگوی حفاری و انفجار معدن سنگ لاشه بغده کندی سقز، طرح تحقیقاتی، دانشگاه کردستان. ۷۵ ص.

Dehghani, H., Ataee-pour, M., 2011. Development of a model to predict peak particle velocity in a blasting operation, Int. J Rock Mech. Min. Sci. 48(1): 51–58.

John-Paul, L., Jan Van, M., Sebastien, D., 2006. Prediction of fragmentation and yield curves with reference to armourstone production, Eng Geol. 87: 60-74.

Kalayci, U., Ozer, U., Karadogan, A., Celiksirt, M.C., Erkan, V., 2010. Delpat applications and ground vibration analysis caused by blasting at excavation of Boyabad dam and H.P.P construction. 10th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM, Vol. 1: 395–406.

Kulatilake, P.H.S.W., Qiong, W., Hudaverdi, T., Kuzu, C., 2010. Mean particle size prediction in rock blast fragmentation using neural networks, Eng Geol. 114(3-4): 298–311.

Liu, J., Sun, P., Liu, F., Zhao, M., 2014. Design and optimization for bench blast based on Voronoi diagram, Int. J Rock Mech. Min. Sci. 66: 30–40.

Lownery, M.A., Kemeny, J., Girdner, K., 2001. Advances in blasting practices through the accurate quantification of blast fragmentation, Mining Engineering 53(10): 55–61.

Monjezi, M., Rezaei, M., Yazdyan Varjani, A., 2009. Prediction of rock fragmentation due to blasting in Gol-E-Gohar iron mine using fuzzy logic, Int. J Rock Mech. Min. Sci. 46(8): 1273–1280.

Monjezi, M., Rezaei, M., Yazdyan, A., 2010. Prediction of backbreak in open-pit blasting using fuzzy set theory, Expert Syst. Appl. 37(3): 2637–2643.

Qu, S.J., Hao, S.H., Chen, G.P, Li, B.H., Bian, G.Z., 2002. The BLAST-CODE model-A computer- aided bench blast design and simulation system, Int. J. Blast Frag. 6(1): 85–103.

Rezaei, M., Monjezi, M., Yazdian Varjani, A., 2011. Development of a fuzzy model to predict flyrock in surface mining, Safety Sci. 49(2): 298–305.

Yang, H.S., Rai, P., 2011. Characterization of fragment size vis-à-vis delay timing in quarry blasts, Powder Techno. 25(1): 120-126.

Yang, R., Kavetsky, A., Mckenzie, C.K., 1989. A two-dimensional kinematic model for predicting muckpiles hape in bench blasting, Int J Min Geol Eng. 7(3): 209–226.

Zhu, Z.M., 2009. Numerical prediction of crater blasting and bench blasting, Int. J Rock Mech. Min. Sci. 46(6): 1088–1096.

www.SID.ir