

ارائه مدل تجربی پیش‌بینی متوسط ابعاد خردشدگی حاصل از انفجار در توده‌سنگ کنگلومرای سد گتوند علیا

حسن بخشنده امنیه^{۱*}، حمیدرضا مالکی نژاد^۲

^۱استادیار گروه مهندسی معدن- دانشکده مهندسی- دانشگاه کاشان- کاشان- ایران

bakhshandeh@kashanu.ac.ir

^۲دانشجوی کارشناسی ارشد گروه مهندسی معدن- دانشکده مهندسی- دانشگاه کاشان- کاشان- ایران

malekinezhad@grad.kashanu.ac.ir

دریافت مقاله: ۹۰/۴/۱۹ اصلاحیه: ۹۰/۹/۱۲

پذیرش مقاله: ۹۰/۱۰/۱۸

چکیده: هدف اصلی عملیات انفجار در پروژه‌های معدنی و عمرانی، خردشدگی توده‌سنگ است. خردشدگی یکی از مهم‌ترین پارامترهای مؤثر بر کارایی تجهیزات بارگیری، باربری و سنگ‌شکنی است؛ بنابراین، پیش‌بینی ابعاد قطعات خردشده حاصل از انفجار در تعیین پارامترهای الگوی انفجاری بهینه کمک خواهد کرد. هدف اصلی این تحقیق، ارائه مدلی جهت پیش‌بینی ابعاد خردشدگی حاصل از انفجار است که با استفاده از ترکیب مدل گرادی و کیپ (که بیان‌کننده تعداد ترک‌های شعاعی ایجاد شده پیرامون چال انفجاری است) و مفهوم متوسط خردشدگی بیان شده است. مدل پیشنهادی نشان می‌دهد که متوسط خردشدگی تابعی از ویژگی‌های توده‌سنگ (شامل سفتی شکست)، ویژگی‌های ماده منفجره مصرفی شامل «سرعت انفجار و چگالی ماده منفجره» و پارامترهای مربوط به هندسه طرح انفجار شامل «بار سنگ، فاصله چال‌ها در یک ردیف و قطر چال انفجاری» است. اعتبارسنجی این مدل در انفجارهای معادن سنگریزه سد گتوند علیا، قابلیت کاربرد مدل پیشنهادی را در انفجارهای معادن روباز نشان می‌دهد.

واژه‌های کلیدی: انفجار، متوسط ابعاد خردشدگی، مدل تجربی، کنگلومرا.

بنابراین، انفجار به عنوان اولین مرحله در فرآیند خردایش سنگ، اهمیت به‌سزایی در تعدیل میزان انرژی مصرفی برای کاهش اندازه قطعات سنگ دارد.

توده سنگ خرد شده حاصل از انفجار برای بارگیری باید دارای اندازه مناسب و برای تسهیل در امر نفوذ باید به اندازه کافی سست باشد. این فاکتورها از معیارهای کیفی ارزیابی خردشدگی هستند و نمی‌توانند اطلاعات زیادی در ارزیابی بهینه طرح انفجار ارائه دهند؛ بنابراین، کمی نمودن خردشدگی حاصل از انفجار، اولین گام در فرآیند بهینه‌سازی تولید و طراحی الگوی انفجاری بهینه است [۵].

یک روش مستقیم و دقیق برای کمی نمودن خردشدگی، تجزیه سرندهی مصالح است که به سبب حجم بالای مصالح، بالا بودن هزینه و ایجاد اختلال در فرآیند تولید از نظر اقتصادی مقرون به صرفه نیست. روش‌های مبتنی برعکس شامل روش عکس‌برداری و استفاده از عکس‌های استاندارد، روش عکس‌برداری و استفاده از خط مقیاس، روش فوتوگرافیک و روش پردازش تصویر، جایگزین مناسبی برای تعیین توزیع ابعاد خردشدگی حاصل از انفجار محسوب می‌شوند.

بسته‌های نرم‌افزاری پردازش تصویر شامل اسپلیت (۱۹۹۴)، فرگ اسکن (۱۹۹۶)، گلدسایز (۱۹۹۶)، ویپ فرگ (۱۹۹۶)، و فرگ آلیست (۲۰۰۲) از دهه ۱۹۹۰ گسترش پیدا کرده و به عنوان ابزاری قابل قبول در صنعت معدن‌کاری و کانه‌آرایی مورد استفاده قرار گرفته‌اند. مزیت اصلی سیستم‌های پردازش تصویر، پیوستگی و عدم وقفه در عملیات است که باعث شده با وجود محدودیت‌های ذاتی به عنوان تنها ابزار مناسب برای ارزیابی خردشدگی مطرح باشند [۶].

درجه خردشدگی بهینه وابسته به هدف پروژه، اندازه و نوع تجهیزات بارگیری، باربری و کانه‌آرایی است. چاکرپورتی و همکاران بر مبنای مطالعات صورت گرفته در سه معدن بزرگ ذغال نشان دادند که ماکزیمم اندازه مجاز قطعات حاصل از انفجار، باید ۰/۷۵ برابر اندازه جام شاول باشد، در حالی که اندازه بهینه قطعات، باید بین ۸ تا ۱۰/۵ درصد اندازه جام شاول باشد [۵]. این تعاریف با توجه به رابطه‌های (۲) و (۳) قابل بیان است:

$$K_{MAX} = 0.75 V^{1/3} \quad (2)$$

$$K_{OPT} = (0.08 - 0.105)V^{1/3} \quad (3)$$

که در آن، K_{MAX} ماکزیمم اندازه مجاز قطعات (متر)، K_{OPT} اندازه بهینه قطعات (متر) و V حجم جام شاول (متر مکعب) است [۵].

در پاره‌ای از پروژه‌ها، خردشدگی بهینه تنها یک اندازه مشخص نیست، بلکه یک توزیع خردشدگی خاص مورد نیاز است. به هر حال، پیمانکار برای انتخاب پارامترهای طرح انفجار، جهت دستیابی به خردشدگی مورد نظر، نیازمند پیش‌بینی خردشدگی حاصل از انفجار

۱. مقدمه

درجه خردشدگی حاصل از انفجار توده سنگ، نقش مهمی در کنترل و کمینه کردن هزینه‌های کلی تولید شامل بارگیری، باربری، سنگ‌شکنی و آسیا دارد. هدف اصلی انفجارهای تولیدی، دستیابی به خردشدگی بهینه است [۱]. معمولاً قطعات حاصل از انفجار بعد از عملیات بارگیری و باربری به عنوان خوراک به سنگ‌شکن اولیه و به دنبال آن به سنگ‌شکن ثانویه و آسیاها وارد می‌شوند. از نقطه نظر سیکل عملیات خردایش، خردشدگی بهینه حاصل از انفجار به گونه‌ای است که عملکرد سیکل مربوط به پیشینه، و مصرف انرژی حداقل باشد. برای ارزیابی انرژی مورد نیاز در خردایش سنگ، تئوری‌های زیادی ارائه شده است که می‌توان به تئوری‌های خردایش ریپینگر، کیک و باند اشاره کرد. در این میان، تئوری سوم (خردایش باند) به عنوان معتبرترین تئوری شناخته شده و مورد استفاده قرار گرفته است. در این تئوری، انرژی مورد نیاز برای کاهش ابعاد قطعات سنگ از رابطه (۱) محاسبه می‌شود [۲]:

$$W = 1 W_i \left(\frac{1}{\sqrt{P}} - \frac{1}{\sqrt{F}} \right) \quad (1)$$

در این رابطه، W انرژی مصرفی برای خردایش سنگ (کیلووات ساعت بر تن)، W_i اندیس کار باند (کیلووات ساعت بر تن)، P و F اندازه دهانه سرندهایی هستند که به ترتیب، ۸۰ درصد بار اولیه و محصول خرد شده از آن‌ها عبور می‌کنند و بر حسب میکرون بیان می‌شوند. با توجه به این تئوری، انرژی مصرفی در بخش سنگ‌شکنی و آسیا به دو روش قابل تغییر است. اگر اندازه ابعاد قطعات ورودی به سنگ‌شکن اولیه کاهش یابد، انرژی کمتری برای تولید محصولی با اندازه معین مورد نیاز خواهد بود. همچنین با کاهش اندیس کار باند می‌توان انرژی مصرفی در بخش سنگ‌شکنی و آسیا را کاهش داد.

نیلسن و کریستینسن نشان دادند که با افزایش خرج ویژه طرح انفجاری، ترک‌های ریزی داخل قطعات سنگ ایجاد می‌گردد که باعث نرم‌شدگی قطعات و در نتیجه کاهش اندیس کار باند و انرژی مصرفی در بخش سنگ‌شکنی و آسیا می‌شود [۳].

ورکمن و الوراتا با استفاده از قانون باند نشان دادند که بیشترین مصرف انرژی در فرآیند خردایش سنگ (شامل انفجار، سنگ‌شکنی و آسیا) مربوط به بخش سنگ‌شکنی و آسیاست و افزایش انرژی ورودی در بخش عملیات انفجار می‌تواند به طور قابل ملاحظه‌ای، مصرف انرژی در بخش سنگ‌شکنی و آسیا را کاهش دهد [۴].

خواهد بود [۱]. در این تحقیق، مدلی جهت پیش‌بینی متوسط خردشدگی حاصل از انفجار ارائه شده، و سپس در معدن سنگریزه سد گتوند علیا اعتبارسنجی شده است.

۲. تأثیر ویژگی‌های توده‌سنگ بر نتایج خردشدگی حاصل از انفجار

لیلی، قابلیت انفجارپذیری توده‌سنگ را که تابعی از توصیف کلی توده‌سنگ (RMD)، چگالی (JPS)، جهت‌یافتگی درزه‌ها (JPO)، وزن مخصوص (SGI) و سختی سنگ (H) است، با رابطه (۴) بیان کرد. این قابلیت در ارتباط نزدیک با خرج ویژه مورد نیاز در معادن روباز آهن است [۷].

$$BI = 0.5(RMD + JPS + JPO + SGI + H) \quad (4)$$

کونینگهام، برای اعمال ویژگی‌های توده‌سنگ در تعیین میانه توزیع خردشدگی، از شاخص قابلیت انفجارپذیری ارائه شده توسط لیلی استفاده نمود و فاکتور سنگ (A) را که با رابطه (۵) بیان شده، معرفی کرد [۸].

$$A = 0.12BI \quad (5)$$

جورگستن و چونگ و سینگ معتقدند که در میان ویژگی‌های توده‌سنگ، نتایج انفجار به طور مستقیم تحت تأثیر مقاومت سنگ است [۹ و ۱۰]. هاگن نشان داد که نتایج انفجار بیش از آنکه تحت تأثیر متغیرهای دیگر باشد، تحت تأثیر ویژگی‌های توده‌سنگ است و با کاهش فاصله‌داری درزه‌ها و ترک‌ها از اهمیت مقاومت سنگ بکر کاسته می‌شود و مقاومت توده‌سنگ، اهمیت بیشتری می‌یابد [۱۱]. اسکات پارامترهای مقاومتی، ویژگی‌های مکانیکی سنگ مثل مدول یانگ، نسبت پواسون، قابلیت انتقال موج ضربه، اندازه و شکل طبیعی بلوک‌ها را به عنوان پارامترهای کنترل‌کننده نتایج انفجار معرفی کرد [۱۲]. لو و لاتهام، ویژگی‌های سنگ بکر و ناپیوستگی‌های موجود در توده‌سنگ را به عنوان مهم‌ترین پارامترهای تأثیرگذار بر نتایج انفجار معرفی کردند. آن‌ها با تعریف انفجار به عنوان تغییر شکل توزیع اندازه درجا به توزیع اندازه توده خرد شده، مدلی تحت عنوان مدل انرژی-بلوک-انتقال را که در آن از قابلیت انفجارپذیری توده‌سنگ استفاده شده بود، توسعه دادند [۱۳]. چاکرابورتی و همکاران به این نتیجه دست یافتند که جهت‌یافتگی درزه‌ها به طور قابل ملاحظه‌ای بر متوسط خردشدگی و شکل قطعات تأثیرگذار است [۱۴ و ۱۵]. ترنتون پارامترهای تأثیرگذار بر نتایج خردشدگی را ویژگی‌های توده‌سنگ، هندسه طرح انفجار و ویژگی‌های ماده منفجره بیان کرد [۱۶].

رینا از داده‌های حین عملیات حفاری چال‌های انفجاری استفاده کرد و بین پارامتر شاخص حفاری (DI) ارائه شده توسط جیمنو (۱۹۸۴) که در رابطه (۶) بیان شده است و فاکتور سنگ ارائه شده توسط کونینگهام (۱۹۸۷)، رابطه (۷) را مطرح نمود [۱۷]:

$$DI = \left(\frac{V_P}{E \cdot N_r} \right) D^2 \quad (6)$$

که در آن، V_P نرخ نفوذ متهم (متر بر ساعت)، E فشار روی متهم (کیلوپوند نیرو)، N_r سرعت دوران میل متهم (دور بر دقیقه) و D قطر چال (اینچ) است.

$$A = 6.6942 DI^{0.4852} \quad (7)$$

چاکرابورتی و همکاران با آنالیز خطی داده‌های حاصل از ۳۵ انفجار در سه معدن بزرگ، درجه تأثیر پارامترهای مختلف از جمله مدول یانگ، مقاومت فشاری تک‌محوره و... را بررسی نموده و راهبردهای نتیجه‌بخشی را برای بهبود خردایش حاصل از انفجار در سنگ‌های درزه‌دار و توده‌ای ارائه کرده‌اند. نتایج مطالعات آن‌ها در جدول (۱) نشان داده شده است [۱۸].

جدول (۱): راهکارهایی برای بهبود خردشدگی در تشکیلات درزه‌دار و توده‌ای [۱۸]

راهکارهایی برای بهبود خردشدگی				RQD	نوع تشکیلات
افزایش ارتفاع پله	کاهش طول گل‌گذاری	افزایش نسبت فاصله چال‌ها در یک ردیف به بار سنگ	استفاده از ماده منفجره چگال-تر	کمتراز ۶۰	درزه‌دار
کاهش بار سنگ	افزایش نسبت فاصله چال‌ها در یک ردیف به بار سنگ	کاهش انحراف حفاری	استفاده از ماده منفجره چگال‌تر	بیشتر از ۶۰	توده‌ای

اخیراً کایلاک تأثیر ویژگی‌های توده‌سنگ (وزن مخصوص، آب محتوا، مقاومت فشاری تک‌محوره، مقاومت کششی، چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی) را بر نتایج خردشدگی حاصل از انفجار بررسی کرده است. کایلاک نشان داد که از بین ویژگی‌های مکانیکی و فیزیکی توده‌سنگ تنها بین زاویه اصطکاک داخلی، مقاومت کششی و خردشدگی، همبستگی بالایی وجود دارد [۱۹].

توسط پرسن برای خرج‌هایی با جفت‌شدگی کامل معادل نصف فشار انفجار است [۲۲].

$$p_d = \frac{\rho_e \cdot VOD^2}{4} \quad (11)$$

که در آن، p_d فشار انفجار (پاسکال)، ρ_e چگالی ماده منفجره (کیلوگرم بر متر مکعب) و VOD سرعت انفجار ماده منفجره (متر بر ثانیه) است [۲۳].

خرج ویژه به عنوان یک واحد رایج در آتشکاری پله‌ها محسوب می‌گردد که معادل جرم ماده منفجره مصرف شده (Q_e) برای شکستن واحد حجم سنگ (V) است و از رابطه (۱۲) محاسبه می‌شود:

$$q = \frac{Q_e}{V_R} \quad (12)$$

با استفاده از رابطه‌های (۹) تا (۱۲) می‌توان تناسب (۸) را به صورت تناسب (۱۳) بازنویسی کرد:

$$X_M \approx 1.5(K_{IC})^{\frac{1}{3}} \cdot (B \cdot S)^{\frac{1}{6}} \cdot D^{\frac{1}{2}} \cdot \left(\frac{1}{q \cdot VOD^2} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (13)$$

با توجه به تناسب (۱۳) متوسط ابعاد خردشدگی، تابعی از ویژگی‌های سنگ (K_{IC})، هندسه طرح انفجار (B ، S و D) و ویژگی‌های ماده منفجره مصرفی (VOD و q) است.

با توجه به اینکه سفتی شکست، یک ویژگی عمومی به شمار نمی‌آید و قابلیت دسترسی به آن پایین است و از جمله مهم‌ترین ویژگی‌های یک مدل خردشدگی، قابلیت دسترسی مناسب به پارامترهای ورودی آن می‌باشد، بنابراین می‌توان در تناسب (۱۳) با جایگزین کردن یک ضریب که دربرگیرنده ویژگی توده‌سنگ است، مدل پیشنهادی برای تعیین متوسط خردشدگی را به صورت رابطه (۱۴) بیان کرد:

$$X_M = K \cdot (B \cdot S)^{\frac{1}{6}} \cdot D^{\frac{1}{2}} \cdot \left(\frac{1}{q \cdot VOD^2} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (14)$$

که در آن، K ضریب مربوط به ویژگی‌های توده‌سنگ است و به صورت رابطه (۱۵) بیان می‌گردد:

$$K = \beta^\alpha \quad (15)$$

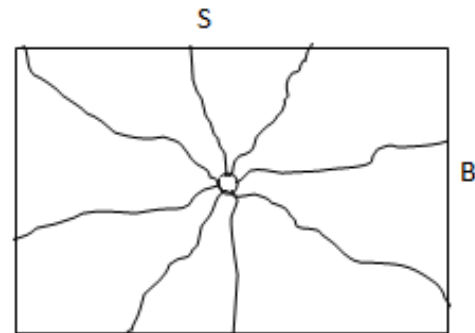
که در آن، α ضریب ثابت و β فاکتور بیان‌کننده میزان سختی و شرایط توده‌سنگ است و می‌تواند با توجه به داده‌های در دسترس با گزینه‌های متفاوتی همچون مقاومت فشاری توده‌سنگ، شاخص قابلیت انفجارپذیری توده‌سنگ یا داده‌های به دست آمده در حین عملیات حفاری چال‌های انفجاری جایگزین شود.

۳. مدل پیشنهادی برای پیش‌بینی متوسط ابعاد خردشدگی حاصل از انفجار

همان‌طور که در شکل (۱) نشان داده شده است، در صورتی که چال انفجاری با فاصله‌داری و بار سنگ مشخص در یک پله حفر گردد، پس از انفجار N ترک شعاعی ایجاد شده و مساحت مربوط به چال به N قطعه تبدیل خواهد شد. در این صورت، متوسط اندازه قطعات، X_M با جذر نسبت مساحت به تعداد ترک‌های ایجاد شده متناسب خواهد بود.

$$X_M \approx \left(\frac{B \cdot S}{N} \right)^{0.5} \quad (8)$$

که در آن، S فاصله چال‌ها در یک ردیف (متر)، B بار سنگ یا فاصله ردیفی چال‌ها (متر) و N تعداد ترک‌های ایجاد شده در اطراف چال پس از انفجار است.



شکل (۱): مساحت مربوط به چال انفجاری و ترک‌های ایجاد شده پس از انفجار

طبق مطالعات گرادی و کیپ، تعداد ترک‌ها می‌تواند با رابطه (۹) تعیین گردد [۲۰].

$$N = \pi D \left[\frac{\rho \cdot C_p \cdot \varepsilon}{6 K_{IC}} \right]^{\frac{2}{3}} \quad (9)$$

که در آن، D قطر چال (متر)، ε نرخ کرنش (ثانیه^{-۱})، ρ چگالی سنگ (کیلوگرم بر متر مکعب)، C_p سرعت موج طولی در سنگ (متر بر ثانیه) و K_{IC} سفتی شکست است و به عنوان ویژگی ذاتی سنگ، بیان‌کننده مقاومت سنگ در برابر ایجاد ترک‌های جدید و گسترش ترک‌های قبلی می‌باشد.

فاکتور نرخ می‌تواند با تناسب (۱۰) جایگزین شود [۲۱].

$$\rho \cdot C_p \cdot \varepsilon \approx 2 \frac{P_h}{D} \quad (10)$$

که در آن، P_h فشار چال (پاسکال) است.

فشار چال با فرض واکنش کامل انفجار به صورت تئوری، معادل تقریباً ۴۵ درصد فشار انفجار است. فشار چال بر طبق رابطه ارائه شده

۴. مطالعه موردی

۱.۴. تعیین متوسط خردشدگی و کالیبره کردن مدل

در مرحله اول، جهت کاربرد مدل پیشنهادی در معدن سنگریزه سد گتوند علیا، نرم افزار GOLDSIZE کالیبره شد. این فرآیند بر اساس نتایج تجزیه سرنندی و ۱۰ عکس تهیه شده از مصالح سنگریزه صورت گرفت. شکل (۲) نمونه‌ای از تصاویر گرفته شده را برای کالیبره کردن نرم افزار مذکور نشان می‌دهد. فرآیند تصحیح برای تبدیل نتایج دو بعدی به نتایج سه بعدی با رابطه‌های (۱۶) و (۱۷) مشخص شده است:

$$X_{C3D} = 0.7985X_{C2D} \quad (16)$$

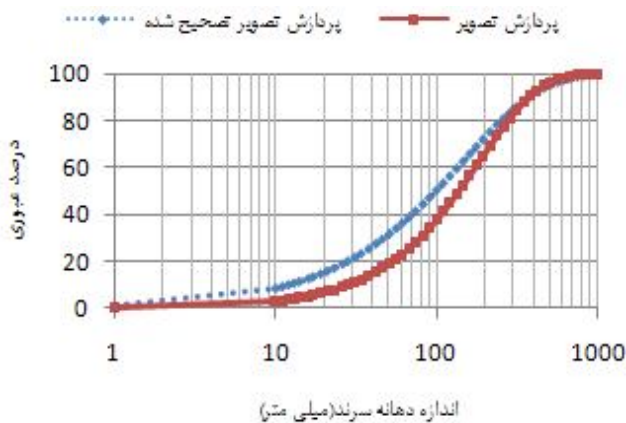
که در آن، X_C اندازه مشخصه منحنی توزیع، و بیانگر اندازه دهانه سرنندی است که ۶۳٪ درصد مصالح از آن عبور می‌کنند.

$$n_{3D} = 0.75095n_{2D} \quad (17)$$

که در آن، n شاخص یکنواختی توزیع خردشدگی است.

در مرحله بعد، یک الگوی انفجار طراحی و اجرا گردید. مشخصات این طراحی در جدول (۲) بیان شده است.

پس از انفجار، ۴۰ عکس از توده خرد شده تهیه شد که ۲۲ عکس آن انتخاب (به گونه‌ای که معرف کاملی از نتایج خردشدگی مصالح باشند) و با استفاده از نرم‌افزار GOLDSIZE متوسط خردشدگی معادل ۱۰ سانتی‌متر تعیین شد. منحنی توزیع تجمعی عبوری مصالح سنگریزه در شکل (۳) نشان داده شده است. برای تعیین ضریب K در مدل پیشنهادی از داده‌های موجود در جدول (۲) و روش آنالیز برگشتی استفاده شد. نتایج تحلیل در جدول (۳) مشخص شده است.



شکل (۳): منحنی توزیع تجمعی عبوری مصالح حاصل از انفجار آزمایشی با استفاده از پردازش تصویر

جدول (۳): تعیین ضریب K با استفاده از روش آنالیز برگشتی

ضریب K	متوسط خردشدگی (سانتی‌متر)
۱/۳۴۳	۱۰

۲.۴. اعمال ویژگی‌های توده‌سنگ در مدل

برای اعمال ویژگی‌های توده‌سنگ در مدل پیشنهادی از داده‌های به دست آمده در حین عملیات حفاری چال‌های انفجاری استفاده شد. برای حفر چال‌های الگوی طراحی شده، دستگاه حفاری دریل واگن از نوع ROC D7 اطلس کوپکو به کار گرفته شد. بر اساس تحقیقات پرابلت، نرخ نفوذ دستگاه حفاری با نیروی فید و سرعت چرخش رابطه مستقیم و با قطر چال و مقاومت فشاری سنگ رابطه معکوس دارد که به صورت رابطه (۱۸) بیان می‌گردد [۲۴]:

$$N = \frac{13.8F.n}{\sigma^2.d^{0.9}} \quad (18)$$

که در آن، F نیروی فید (کیلو نیوتن)، n سرعت چرخش (دور بر دقیقه)، σ مقاومت فشاری توده‌سنگ (مگاپاسکال)، d قطر چال (سانتی‌متر) و N نرخ نفوذ (متر بر دقیقه) است؛ بنابراین در این تحقیق، با توجه به دستگاه حفاری ROC D7 فرض بر این است که سختی



شکل (۲): نمونه‌ای از تصاویر گرفته شده برای کالیبره کردن نرم‌افزار

GOLDSIZE

جدول (۲): پارامترهای الگوی انفجار آزمایشی معدن شماره یک

پارامتر	مقدار
نوع ماده منفجره	آنفو
جنس سنگ	کنگومرا
قطر چال (میلی‌متر)	۷۶
ارتفاع پله (متر)	۶
بار سنگ (متر)	۲/۵
فاصله چال‌ها در یک ردیف (متر)	۲/۷
طول خرج گذاری (متر)	۳/۷۵
خرج ویژه (کیلوگرم بر متر مکعب)	۰/۴۱

طراحی شده در جدول (۴) بیان شده است. با توجه به داده‌های موجود در جدول (۴) مقدار متوسط β معادل $1843/4$ محاسبه شد. در نتیجه با توجه به رابطه (۱۵) و مشخص بودن β مقدار α معادل $0/0393$ محاسبه و مدل پیشنهادی برای معدن سنگریزه شماره یک سد گتوند علیا به صورت رابطه (۲۰) اصلاح گردید:

$$X_M = \beta^{0.0393} \cdot (B.S)^{\frac{1}{6}} \cdot D^{\frac{1}{2}} \cdot \left(\frac{1}{q.VOD^2} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (20)$$

توده سنگ با فشار فید، فشار ضربه و فشار چرخش رابطه مستقیم، و با نرخ نفوذ سرمته و قطر چال رابطه معکوس دارد و به صورت رابطه (۱۹) بیان می‌شود:

$$\beta = \frac{P_F \cdot P_P \cdot P_R}{N \cdot D} \quad (19)$$

که در آن، P_F فشار فید (بار)، P_P فشار ضربه (بار)، P_R فشار چرخش (بار)، و D قطر چال (میلی‌متر) است.

داده‌های ثبت شده در حین عملیات حفاری چال‌های انفجاری

جدول (۴): داده‌های ثبت شده از دستگاه حفاری دریل واگن از نوع ROC D7 در معدن سنگریزه یک سد گتوند علیا

شماره چال	فشار ضربه (بار)	فشار فید (بار)	فشار چرخش (بار)	طول چال (متر)	زمان حفر (دقیقه)	نرخ نفوذ (متر بر دقیقه)	β
۱	۱۶۰	۴۵	۴۷/۵	۶	۲/۲۳	۲/۶۹	۱۶۷۲/۵
۲	۱۶۰	۴۵	۴۷/۵	۶	۲/۲۹	۲/۶۲	۱۷۱۷/۵
۸	۱۶۰	۴۵	۴۷/۵	۶	۲/۳۹	۲/۵۱	۱۷۹۲/۵
۱۳	۱۶۰	۴۵	۴۷/۵	۶	۲/۶۷	۲/۲۴	۲۰۰۲/۵
۱۵	۱۶۵	۴۷	۴۸	۶	۲/۱	۲/۸۵	۱۷۱۴/۲۶۳
۱۷	۱۶۵	۴۷	۴۸	۶	۲/۱۵	۲/۷۹	۱۷۵۵/۰۷۹
۱۹	۱۶۵	۴۷	۴۸	۶	۲/۲۰	۲/۷۲	۱۷۹۵/۸۹۵
۲۰	۱۶۵	۴۷	۴۸	۶	۲/۲۶	۲/۶۵	۱۸۴۴/۸۷۴
۲۵	۱۷۰	۵۰	۵۰	۶	۲/۱۱	۲/۸۴	۲۰۲۴/۳۹۷
۲۶	۱۷۰	۵۰	۵۰	۶	۲/۱۷	۲/۷۶	۲۰۸۱/۹۶۳
۲۹	۱۷۰	۵۰	۵۰	۶	۲/۰۹	۲/۸۷	۲۰۰۵/۲۰۸
۳۴	۱۷۰	۵۰	۵۰	۶	۲/۰۲	۲/۹۷	۱۹۳۶/۱۸۴
۳۸	۱۸۰	۴۵	۵۰	۶	۲/۱۸	۲/۷۵	۱۹۳۸/۰۴۸
۴۲	۱۸۰	۴۵	۵۰	۶	۲/۲۵	۲/۶۶	۱۹۹۸/۳۵۵
۴۶	۱۸۰	۴۵	۵۰	۶	۱/۵۹	۳/۷۷	۱۴۱۲/۱۷۱
۴۸	۱۸۰	۴۵	۵۰	۶	۲/۰۳	۲/۹۵	۱۸۰۲/۹۶۱

الگو و رابطه (۲۰) متوسط خردشدگی معادل $12/7$ سانتی‌متر تعیین شد. برای اعتبارسنجی نتیجه به دست آمده از مدل پیشنهادی تصحیح شده برای معدن سنگریزه، از نتایج خردشدگی پس از انفجار عکس‌برداری شد و متوسط ابعاد خردشدگی با استفاده از نرم‌افزار GOLDSIZE تعیین شد. نتایج تحلیل در جدول (۷) بیان شده است. نتایج نشان می‌دهد که مدل پیشنهادی، قابلیت مناسبی برای پیش‌بینی متوسط ابعاد خردشدگی حاصل از انفجار دارد.

۳.۴. اعتبارسنجی مدل پیش‌بینی متوسط ابعاد خردشدگی

با توجه به اتمام مصالح معدن سنگریزه شماره یک، استخراج مصالح از معدن شماره دو آغاز شد. داده‌های ثبت شده در حین عملیات حفاری چال‌های انفجاری معدن شماره دو، در جدول (۵) ارائه شده است. همان‌طور که از داده‌های این جدول مشخص است، معدن شماره دو از نظر مشخصات توده‌سنگ، مشابه معدن شماره یک است. مقدار متوسط تعیین شده برای β در معدن شماره دو، معادل $1995/306$ است. الگوی انفجار معدن شماره دو در جدول (۶) ارائه شده است. با توجه به این

جدول (۵): داده‌های ثبت شده از دستگاه حفاری دریل واگن از نوع ROC D7 در معدن سنگریزه دو سد گتوند علیا

شماره چال	فشار ضربه (بار)	فشار فید (بار)	فشار چرخش (بار)	طول چال (متر)	زمان حفر (دقیقه)	نرخ نفوذ (متر بر دقیقه)	β
۱	۱۹۰	۵۵	۵۰	۱۰	۲/۴۸	۴/۰۳	۱۷۰۵
۵	۱۹۰	۵۵	۵۰	۱۰	۲/۸۱	۳/۵۵	۱۹۳۱/۸۷۵
۱۰	۱۹۰	۵۵	۵۰	۱۰	۳/۰۴	۳/۲۸	۲۰۹۰
۱۴	۱۹۰	۵۵	۵۰	۱۰	۳/۱۳	۳/۱۹	۲۱۵۱/۸۷۵
۱۸	۱۹۰	۵۵	۵۰	۱۰	۳/۱۵	۳/۱۷	۲۱۶۵/۶۲۵
۲۰	۱۹۰	۵۵	۵۰	۱۰	۳/۰۸	۳/۲۴	۲۱۱۷/۵
۲۵	۱۹۰	۵۵	۵۰	۱۰	۳/۱۵	۳/۱۷	۲۱۶۵/۶۲۵
۲۷	۱۹۰	۵۵	۵۰	۱۰	۳/۱۱	۳/۲۱	۲۱۳۸/۱۲۵
۲۹	۱۸۰	۴۵	۵۰	۱۰	۲/۵۹	۳/۸۶	۱۳۸۰/۱۹۷
۳۱	۱۸۰	۴۵	۵۰	۱۰	۳/۳۰	۳/۰۳	۱۷۵۸/۵۵۳
۳۵	۱۸۰	۴۵	۵۰	۱۰	۳/۳۰	۳/۰۳	۱۷۵۸/۵۵۳
۳۶	۱۸۰	۴۵	۵۰	۱۰	۳/۳۳	۳	۱۷۷۴/۵۳۹
۳۸	۱۸۰	۴۵	۵۰	۱۰	۴/۰۸	۲/۴۵	۲۱۷۴/۲۱۱
۴۱	۱۸۰	۴۵	۵۰	۱۰	۴/۱۶	۲/۴	۲۲۱۶/۸۴۲
۴۶	۱۸۰	۴۵	۵۰	۱۰	۴/۲۳	۲/۳۶	۲۲۵۴/۱۴۵
۴۹	۱۸۰	۴۵	۵۰	۱۰	۴/۰۲	۲/۴۸	۲۱۴۲/۲۳۷

مکان خاص، قابل تصحیح‌اند. همچنین اطلاعات مناسبی را در مورد نحوه تأثیر پارامترهای مختلف روی نتایج خردشدگی ارائه می‌کنند. با استفاده از ترکیب مدل گرادای و کیپ و مفهوم متوسط خردشدگی، مدلی جهت پیش‌بینی متوسط خردشدگی ارائه شد. در این مدل، با افزایش فاصله‌داری چال‌ها، بار سنگ و قطر چال، کاهش خرج ویژه و سرعت انفجار ماده منفجره مصرفی، متوسط خردشدگی زیاد می‌شود. با توجه به اینکه قابلیت دسترسی به ویژگی سفتی شکست پایین است، بنابراین از داده‌های ثبت شده در حین عملیات حفاری چال‌های انفجاری برای وارد کردن تأثیر ویژگی توده‌سنگ در نتایج خردشدگی حاصل از انفجار استفاده شد. در این روش، فرض بر این است که سختی توده‌سنگ متناسب با فشار فید، فشار ضربه و فشار چرخش دستگاه حفاری است و با نرخ نفوذ و قطر چال رابطه معکوس دارد. تصحیح و اعتبارسنجی مدل پیشنهادی در انفجارهای معادن سنگریزه سد گتوند علیا، قابلیت کاربرد آن را در انفجارهای معادن روباز نشان می‌دهد. مدل پیشنهادی پیش‌بینی متوسط ابعاد خردشدگی ارائه شده، در طراحی الگوی انفجاری برای تعیین پارامترهای طرح انفجار مورد استفاده قرار می‌گیرد.

جدول (۶): پارامترهای الگوی انفجار معدن شماره دو

پارامتر	مقدار
نوع ماده منفجره	آنفو
جنس سنگ	کنگلومرا
قطر چال (میلی متر)	۸۹
ارتفاع پله (متر)	۱۰
بار سنگ (متر)	۳
فاصله چال‌ها در یک ردیف (متر)	۳/۵
طول خرج گذاری (متر)	۶/۱
خرج ویژه (کیلوگرم بر متر مکعب)	۰/۳۲

جدول (۷): مقایسه متوسط خردشدگی مدل پیشنهادی و پردازش تصویر

روش تعیین خردشدگی	متوسط خردشدگی (سانتی‌متر)
مدل پیشنهادی تصحیح شده	۱۲/۷
پردازش تصویر تصحیح شده	۱۳/۱

۵. نتیجه گیری

هرچند پیش‌بینی دقیق ابعاد قطعات خرد شده حاصل از انفجار با استفاده از مدل‌های تجربی امکان‌پذیر نیست، اما این مدل‌ها برای هر

- [1] Engin, I. C., "A Practical Method of Bench Blasting Design for Desired Fragmentation Based on Digital Image Processing Technique and Kuz-Ram Model", International Journal on Rock Fragmentation by Blasting-FRAGBLAST, Vol. 9, pp. 257-263, 2010.
- [2] Bond, F. C., "The Third Theory of Comminution", Mining Engineering, pp. 484-494, 1952.
- [3] Nielsen, K., Kristiansen, J., "Blasting-Crushing-Grinding: Optimisation of an Integrated Comminution System", International Journal on Rock Fragmentation by Blasting-FRAGBLAST, Vol. 5, pp. 269-277, 1996.
- [4] Workman, L., Eloranta, J., "The Effects of Blasting on Crushing and Grinding Efficiency and Energy Consumption", Proceedings of the 29th Annual Conference on Explosives and Blasting Technique, Vol. 1, pp. 131-140, 2003.
- [5] Raina, A. K., Ramulu, M., Choudhury, P. B., Chakraborty, A. K., Sinha, A., Ramesh-Kumar, B., Fazal, M., "Productivity Improvement in an Opencast Coal Mine in India Using Digital Image Analysis Technique", International Journal on Rock Fragmentation by Blasting-FRAGBLAST, Vol. 9, pp. 707-716, 2010.
- [6] Sudhakar, J., Adhikari, G. R., Gupta, R. N., "Technical Note Comparison of Fragmentation Measurements by Photographic and Image Analysis Techniques", Rock Mechanics and Rock Engineering, Vol. 39, No. 2, pp. 159-168, 2006.
- [7] Lilly, P. A., "An Empirical Method of Assessing Rock Mass Blastability", In: Davidson, Large Open Pit Mining Conference, Ausimm, Victoria, pp. 89-92, 1986.
- [8] Cunningham, C. V. B., "The Kuz-Ram Model for Prediction of Fragmentation from Blasting", proceedings of the 2st International Symposium on Rock Fragmentation by Blasting, Keystone, Colorado, pp. 475-487, 1987.
- [9] Jurgensen, G. K., Chung, S. H., "Blast Simulation Surface and Underground with SABREX Model", CIM BULL, Vol. 80, No. 904, pp. 37-41, 1987.
- [10] Singh, D. P., "Effect of Physic-Mechanical Properties of Rock on Drilling and Blasting Operations in Underground Drivage", Workshop on Tunnels, Mine Roadways and Caverns, Colorado School of Mines, Colorado, Balkema, Rotterdam, Netherlands, pp. 63-68, 1991.
- [11] Hagan, T. N., "The Effect of Rock Properties on the Design and Result of Tunnel Blasts", Journal Rock Mechanics, Tunneling Technology, Vol. 1, No. 1, pp. 25-39, 1995.
- [12] Scott, A., "Blastability and Blast Design", In: Proceedings of the 5th International Symposium on Rock Fragmentation by Blasting, Colorado School of Mines, Colorado, Balkema, Rotterdam, Netherlands, pp. 27-36, 1996.
- [13] Lu, P., Latham, J. P., "A Model for the Transition of Block Size During Blasting", FRAGBLAST-the International Journal for Blasting and Fragmentation, Vol. 2, pp. 341-368, 1998.
- [14] Chakraborty, A. K., Jethwa, J. L., Paithankar, A. G., "Effects of Joint Orientation and Rock Mass Quality on Tunnel Blasting", Engineering Geology, Vol. 37, pp. 247-262, 1994.
- [15] Chakraborty, A. K., Raina, A. K., Ramulu, M., Jhanwar, J. C., "Development of Innovative Models for Optimization of Blast Fragmentation and Muck Profile Applying Image Analysis Technique and Subsystems Utilization Concept in Indian Surface Coal Mining Regime", CMRI Report (Coal S&T Project No.MT/103), CIMFR, India, 2002.
- [16] Thornton, D., Kanchibotla, S. S., Brunton, I., "Modeling the Impact of Rock Mass and Blast Design Variation on Blast Fragmentation", International Journal on Rock Fragmentation by Blasting, Vol. 6, No. 2, pp. 169-188, 2002.
- [17] Raina, A. K., Ramulu, M., Choudhury, P. B., Dudhankar, A., Chakraborty, A. K., "Fragmentation Prediction in Different Rock Masses Characterised by Drilling Index", International Journal on Rock Fragmentation by Blasting-FRAGBLAST, Vol. 7, pp. 117-121, 2003.
- [18] Chakraborty, A. K., Raina, A. K., Ramulu, M., Choudhury, P. B., Haldar, A., Sahu, P., Bandopadhyay, C. B., "Parametric Study to Develop Guidelines for Blast Fragmentation Improvement in Jointed and Massive Formations", Engineering Geology, Vol. 73, pp. 105-116, 2004.
- [19] Kilic, A. M., Yaser, E., Erdogan, Y., Ranjith, P. G., "Influence of Rock Mass Properties on Blasting Efficiency", Scientific Research and Essay, Vol. 4, No. 11, pp. 1213-1224, 2009.
- [20] Grady, D. E., Kipp, M. E., "Dynamic Rock Fragmentation", In Fracture Mechanics of Rock, B.K Atkinson ed, Academic Press, pp. 429-475, 1987.
- [21] Ouchterlony, F., "Prediction of Crack Lengths In Rock After Cautious Blasting with Zero Inter-Hole Delay", International Journal on Rock Fragmentation by Blasting, Vol. 1, pp. 417-444, 1997.
- [22] Esen, S., Onederra, I., Bilgin, H. A., "Modelling The Size of The Crushed Zone Around a Blasthole", International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, Vol. 40, pp. 485-495, 2003.
- [23] Muller, B., Hausmann, J., Niedzwiedz, H., "Control of Rock Fragmentation and Muck Pile Geometry During Production Blasts (Environmentally Friendly Blasting Technique)", International Journal on Rock Fragmentation by Blasting-FRAGBLAST, Vol. 9, pp. 277-286, 2010.
- [24] Mitrovic, S. S., Kricak, L. M., Negovanovic, M. N., Jankovic, I. V., Zekovic, D. I., "Influence of Rock Mass Blastability on Explosive Energy Distribution", FRAGBLAST, Vol. 9, pp.249-255, 2010.