

توسعه مدل پیش‌بینی خردایش ناشی از آتشکاری در فضاهای زیرزمینی

مقاله پژوهشی

حسن بخشنده امنیه^{۱*}؛ سعید جان نثاری^۲؛ جعفر خانی^۳؛ محمد غفوری مقدم^۴

۱- دانشیار؛ دانشکده مهندسی معدن، دانشکده فنی، دانشگاه تهران، hbakhshandeh@ut.ac.ir

۲- دانشجوی دکتری استخراج؛ دانشکده مهندسی معدن، دانشکده فنی، دانشگاه تهران، s.jannesary@ut.ac.ir

۳- دانشجوی دکتری؛ دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس، jafar.khani@modares.ac.ir

۴- دانش آموخته‌ی کارشناسی ارشد؛ دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس، m.ghafori.m@gmail.com

دریافت دست‌نوشته: ۱۴۰۲/۰۸/۲۹؛ پذیرش دست‌نوشته: ۱۴۰۳/۰۷/۱۴

شماره صفحات: ۴۷ تا ۵۹

شناسه دیجیتال (DOI): 10.22044/tuse.2024.13826.1482

واژگان کلیدی	چکیده
آتشکاری تونل مدل پیش‌بینی نرم افزار <i>Split Desktop</i> میانگین ابعاد خردایش	هدف عملیات انفجار رسیدن به خردایش مناسب و حداقل کردن پدیده‌های نامطلوب انفجار است. درجه خردشدگی توده‌سنگ حاصل از انفجار، نقش مهمی در کنترل و کمینه کردن هزینه‌های کلی تولید شامل بارگیری، باربری، سنگ‌شکنی و آسیا دارد. یکی از روش‌های کاهش هزینه‌های عملیات معدن‌کاری، پیش‌بینی خردشدگی الگوهای طراحی شده توسط مهندسين انفجار است. در انفجارهای روباز بر خلاف آتشکاری تونل و فضاهای زیرزمینی، مدل‌های مختلف پیش‌بینی خردشدگی قطعات حاصل از انفجار توسعه داده شده است. در این تحقیق به منظور ارزیابی و توسعه مدل پیش‌بینی خردایش از نتایج ۲۳ عملیات آتشکاری تونل استفاده شده است و نتایج خردایش آن‌ها با استفاده از نرم افزار <i>Split Desktop</i> ارزیابی و تحلیل شده است. نتایج میانگین ابعاد خردایش (X_{50}) حاصل از مدل کاز رام اصلاح شده برای تونل با نتایج تحلیل تصویر مقایسه و ضریب همبستگی آن‌ها برابر $0/80$ بدست آمده است. به منظور افزایش دقت پیش‌بینی ابعاد قطعات خردشده با استفاده از رگرسیون چند متغیره دو مدل پیش‌بینی خردشدگی X_{50} و X_{80} در تونل ارائه شده است. نتایج ارزیابی مدل نشان می‌دهد که خطای نتایج پیش‌بینی خردایش با تحلیل تصویر برای دو مدل توسعه داده شده کم‌تر از مدل کاز رام اصلاح شده بوده و مقادیر ضریب همبستگی برای دو مدل پیش‌بینی X_{50} و X_{80} ارائه شده به ترتیب برابر $0/95$ و $0/85$ بدست آمده است.

۱- مقدمه
قابل کنترل، انواع مؤلفه‌های طراحی انفجار می‌باشند مانند خرج ویژه؛ و مؤلفه‌های غیرقابل کنترل، مشخصات مربوط به ماده سنگ و ناپیوستگی‌ها است. این مؤلفه‌ها به خصوصیات زمین‌شناسی و تکتونیک منطقه وابسته بوده و در آتشکاری یک منطقه عملیاتی، ثابت و غیرقابل کنترل هستند. در انفجارهای روباز، مدل‌های مختلفی از جمله مدل کاز رام (*Kaz Ram Model*)، مدل *KCO* و تابع سوپرک

چالزنی و انفجار یکی از مهم‌ترین روش‌های شکستن و خردکردن توده‌سنگ برجا است. خردایش توده‌سنگ در اثر انفجار نقش مهمی بر عملیات‌های بعدی تولید مانند بارگیری و باربری دارد. مؤلفه‌های مؤثر بر خردایش توده‌سنگ به دو دسته کلی مؤلفه‌های قابل کنترل و مؤلفه‌های غیر قابل کنترل تقسیم می‌شوند. مؤلفه‌های

سنگ آهن با استفاده از نرم افزار متلب با روش حداقل مربعات خطا توانست مدل کاز رام را اصلاح کند. مقدار خطای مدل اصلاح شده با نتایج تحلیل تصویر حدود ۳/۵٪ بوده درحالی‌که مقدار خطای مدل کاز رام قبل از اصلاح بیش از ۶۵ درصد بوده است (Lawal, 2021).

عملیات آتشکاری در تونل، به دلیل داشتن یک سطح آزاد، پیچیده‌تر از آتشکاری روباز است. بنابراین مقادیر بالای خرج‌ویژه، حفاری‌ویژه و همچنین مقادیر کمتر فاصله‌داری و بارسنگ توسط طراحان برای انجام عملیات انفجار بهینه در نظر گرفته می‌شود. به دلیل وجود خصوصیات متفاوت فضا‌های زیرزمینی و تونل‌ها، همچنین به علت تعدد مؤلفه‌های مؤثر بر خردایش حاصل از انفجار، ارائه یک رابطه مشخص و دقیق برای پیش‌بینی میزان خردایش مشکل است. محمدی و همکارانش در سال ۲۰۱۸ با استفاده از روش تجربی کاز رام که مخصوص انفجار روباز می‌باشد و استفاده از رگرسیون، مدلی برای پیش‌بینی خردایش آتشکاری تونل ارائه کردند (Mohammadi, 2018). هیمانشو (Himanshu) و همکاران در سال ۲۰۲۱ در معدن زیرزمینی بالاریا (Balaria) بر اساس اندازه‌ی از پیش‌تعریف شده‌ی قطعات خردشده و با استفاده از محاسبات برگشتی مدل کاز رام اندازه‌ی فاصله داری و بارسنگ چال‌های انفجاری بلند را بدست آوردند (Himanshu, et al., 2021).

در این تحقیق به منظور ارزیابی و توسعه مدل پیش‌بینی خردایش ناشی از انفجار در فضا‌های زیرزمینی، داده‌های ۲۳ عملیات آتشکاری تونل برداشت شد. با توجه به برداشت‌های انجام شده و نتایج تحلیل تصویر نرم افزار Split Desktop، مقایسه‌ای بین نتایج تحلیل تصویر و مدل پیش‌بینی خردایش کاز رام اصلاح شده انجام شد. به منظور افزایش دقت، مدل پیش‌بینی خردشدگی X_{50} و X_{80} توسعه داده شده است.

۲- پیش‌بینی خردایش

خردشدگی حاصل از انفجار، نقش مهمی در کنترل و کمینه کردن هزینه‌های کلی تولید شامل بارگیری، باربری، سنگ‌شکنی و آسیا دارد. هر چه توزیع خردایش یکنواخت‌تر و ابعاد خردشدگی کوچکتر و تعداد بولدرها کمتر باشد،

برای پیش‌بینی کمی توزیع اندازه قطعات حاصل از انفجار مورد استفاده قرار گرفته است (Lopez, et al., 1995). مدل کاز رام پرکاربردترین این مدل‌ها است. این مدل با سه معادله ترکیبی از رابطه کارنتسوف (Kuznetsov)، رابطه شاخص یکنواختی و رابطه روزین-راملر (Rosin-Rammler) تعریف شده است (Cunningham, 1983); (Cunningham, 1987); (Kuznersev, 1973); (Rosin, 1993). اکثر مدل‌های پیش‌بینی خردایش بر اساس برداشت‌های میدانی از انفجار معادن روباز است. مؤلفه‌های متعددی در اندازه خردایش سنگ و توزیع دانه‌بندی آن تأثیرگذار است. با توجه به ساختار غیرهمگن زمین و مؤلفه‌های متعدد طراحی نمی‌توان از تمامی مؤلفه‌ها در مدل‌های پیش‌بینی خردایش استفاده کرد. به همین دلیل تاکنون مدل جامعی برای تمامی شرایط ارائه نشده و هر یک از این مدل‌ها دارای مزایا و معایبی است.

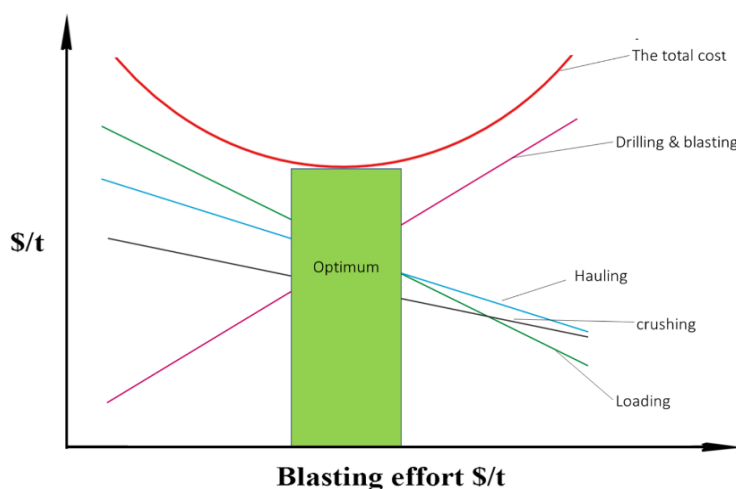
مدل کاز رام اصلاح شده یکی از کاربردی‌ترین مدل‌های پیش‌بینی خردایش است. محققین با استفاده از این مدل و نتایج تحلیل خردایش سعی در اصلاح ضرایب این مدل با توجه به ویژگی‌های ژئومکانیکی توده‌سنگ و ماده منفجره می‌کنند. لیس (Lith) و همکاران در سال ۲۰۰۴ به منظور کاهش زمان و هزینه استخراج در معادن تخریب طبقات فرعی (Sublevel Caving) مدل کامپیوتری بر اساس مدل کاز رام برای طراحی بهینه انفجار ارائه دادند (Lith, 2004). غیبی و همکاران در سال ۲۰۰۹ با انجام تغییراتی بر روی مدل کاز رام، آن را اصلاح کردند. آنان مطالعات خود را بر روی ۱۰ منطقه انفجاری معدن روباز مس سونگون با خصوصیات ماده منفجره و پارامترهای هندسی چال یکسان انجام دادند (Gheibie, 2009). چانگپینگ (Changping) و همکاران در سال ۲۰۱۷ تأثیر چالزنی و انفجار را برای بهبود جریان ثقلی مواد در معادن تخریب طبقات فرعی ارزیابی کردند. از این‌رو با استفاده از نرم افزار عددی LS-DYNA اثرات زمان تأخیر و موقعیت آغازگر بر میزان خردایش ناشی از انفجار در معادن تخریب طبقات فرعی را بررسی کردند (Changping Yi, 2017). همچنین لاوال (Lawal) در سال ۲۰۲۱ از نتایج تحلیل تصویر دو مجموعه انفجار در معادن روباز سنگ آهک و

خردایشی که یکی از این شرایط را برآورده نکند، خردایش مطلوب نیست. برای دستیابی به خردایش مطلوب، باید هر چهار شرط رعایت شود. به طور کلی آتشکاری بهینه در معادن مطابق شکل ۱، به دست آوردن درجه خردایش مناسب برای رسیدن به کمترین ترکیب هزینه چالزنی، انفجار، بارگیری، باربری و سنگ‌شکنی تعریف شده است (Rosales-Huamani, et al., 2003); (Kanchibotla, 2003).

بیانگر خردایش مناسب عملیات انفجار است. اگر خردایش سنگ تمام شرایط زیر را داشته باشد، به عنوان خردایش مطلوب تعریف می‌شود (Zhang, 2016):

- حداقل هزینه از حفاری تا آسیا در زنجیره خردایش: حفاری-انفجار-بارگیری و باربری-سنگ شکن-آسیا
- حداکثر بازیابی ماده معدنی
- بهره‌وری بالا
- کاهش اثرات نامطلوب انفجار بر محیط زیست و افزایش

ایمینی



شکل ۱ - هزینه‌های عملیاتی نسبی در مقابل هزینه‌های انفجار (Lopez, et al., 1995)

آتشکاری تونل داشته است (Mohammadi, 2018).

۳- مدل کاز رام اصلاح شده برای آتشکاری تونل

محمدی و همکاران در سال ۲۰۱۸ با استفاده از رگرسیون چند متغیره، مدل کاز رام را برای آتشکاری تونل اصلاح کردند. در این پژوهش ضرایب مدل کاز رام با استفاده از اطلاعات عملیات‌های آتشکاری جمع‌آوری شده، نتایج تحلیل خردایش نرم‌افزار *Split Desktop* و روش رگرسیون چند متغیره اصلاح شده است. برخلاف مؤلفه‌های آتشکاری روباز برای طراحی مؤلفه‌های تونل بایستی برخی ساده‌سازی‌ها انجام شود؛ در ادامه این روابط بیان شده‌اند (Mohammadi, 2018).

$$q = \frac{Q}{V} = \frac{Q}{A \times L} \quad (1)$$

تاکنون مطالعات زیادی در زمینه پیش‌بینی و تعیین خردایش توده‌سنگ حاصل از آتشکاری برای انفجار روباز انجام شده است ولی مطالعات خردایش برای فضاها‌ی زیرزمینی و تونل‌ها به دلیل شرایط محیطی کمتر انجام شده است. مدل‌های پیش‌بینی خردایش ارائه شده در معادن روباز را می‌توان به دو دسته کلی مدل‌های تجربی و مدل‌های نوین یا فراابتکاری تقسیم‌بندی کرد. در انفجارهای معادن روباز مدل تجربی کاز رام از جمله پرکاربردترین این مدل‌ها است. مدل کاز رام با سه رابطه ترکیبی کازنتسوف، شاخص یکنواختی و روزین-راملر تعریف شده است (Cunningham, 1983); (Cunnigham, 1987); (Kuznersev, 1973); (Rosin, 1993). در سال ۲۰۱۸ محمدی و همکارانش مدل تجربی کاز رام را با بکارگیری روش رگرسیون و تغییر ضرایب، برای پیش‌بینی خردایش آتشکاری تونل ارائه کردند که نتایج قابل‌قبولی در خصوص پیش‌بینی خردایش

محققین پیشنهاد شده است. یکی از پرکاربردترین روش‌های ارزیابی خردایش انفجار، روش تحلیل تصاویر دیجیتال است که با به‌کارگیری نرم‌افزارهای تحلیل تصاویر دیجیتالی انجام می‌شود (Campbell & Thurley, 2017). نرم‌افزار Split Desktop یکی از نرم‌افزارهای حوزه تحلیل تصویر است. این نرم‌افزار ابزاری برای تحلیل تصاویر دیجیتالی به منظور تعیین توزیع ابعادی سنگ خردشده حاصل از انفجار است. نسخه نخست این نرم‌افزار توسط گروه تحقیقاتی بخش مهندسی معدن و علوم زمین دانشگاه آریزونا آمریکا تهیه شد (Team, S.E.L, 2010). فرایند اندازه‌گیری قطعات شامل مقیاس‌گذاری (به منظور اندازه‌گیری ابعاد قطعات خرد شده) و کاهش خطای زاویه لنز دوربین با توده سنگ خردشده، تعیین محدوده قطعات سنگ (مرز بندی قطعات به صورت دستی یا خودکار) و در نهایت توزیع اندازه قطعات نمایش داده می‌شود. در شکل ۲، فرایند تحلیل تصویر با نرم‌افزار Split Desktop را نشان می‌دهد.

جدول ۱- امتیاز مربوط به مؤلفه‌های فیزیکی و ژئومکانیکی توده‌سنگ در مدل لیلی (Lilly, 1986)

امتیاز	مؤلفه
۱۰	به‌راحتی به قطعات کوچک تقسیم می‌شود
۲۰	بلوکی
۵۰	توده‌ای
۱۰	فاصله بین صفحات درزه بسته
۲۰	متوسط
۵۰	باز
۱۰	افقی
۲۰	شیب به سمت خارج
۳۰	جهت صفحه درزه JPO
۴۰	شیب به سمت داخل
	جهت کار
	SGI اثر وزن مخصوص سنگ بر حسب تن
	بر متر مکعب
	$SGI = 25G - 50$
	G : وزن مخصوص
	HF : سختی سنگ در مقیاس موس
۱ تا ۱۰	

$$Q_e = \frac{Q}{N} \quad (2)$$

که در آن L ؛ پیشروی افقی تونل (m)، Q ؛ میزان کل ماده منفجره در الگوی آتشفشانی (kg)، Q_e ؛ میزان خرج هر چال (kg)، V ؛ میزان حجم مصالح انفجار شده در هر الگوی آتشفشانی (m^3)، A ؛ سطح مقطع تونل (m^2)، q ؛ خرج ویژه (kg/m^3)، N تعداد کل چال‌های انفجاری است. ضرایب و روابط X_m (یا X_{50} = میانگین ابعاد خردایش) به صورت زیر تغییر یافته است (Mohammadi, 2018).

$$X_m = 1.8BIq^{-0.75}Q_e \left(\frac{115}{S_{ANFO}}\right)^{0.15} \quad (3)$$

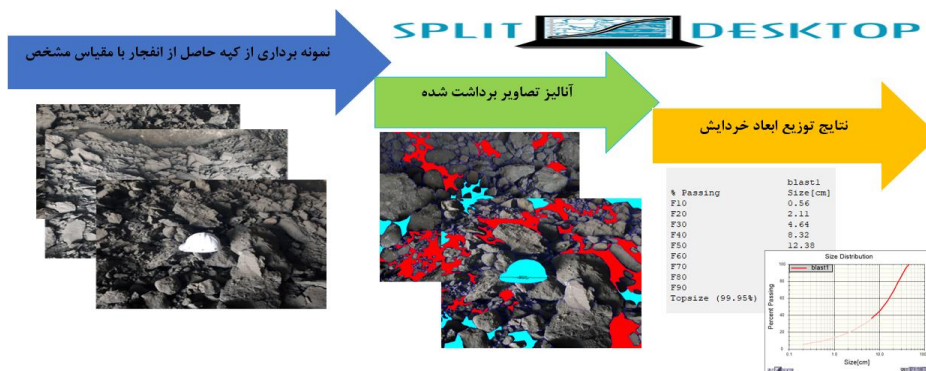
S_{ANFO} ؛ قدرت حجمی نسبی مواد منفجره است ($ANFO=100$ و $TNT=115$ و $Slurry=117$) و BI ؛ شاخص قابلیت انفجار لیلی است که به صورت رابطه ۴ ارائه شده است، شاخص BI از مجموع امتیازهای مربوط به ۵ مؤلفه فیزیکی و ژئومکانیکی توده‌سنگ محاسبه می‌شود. امتیاز مربوط به هر یک از مؤلفه‌های فیزیکی و ژئومکانیکی به کار برده شده در رابطه BI در جدول ۱، ارائه شده است (Lilly, 1986).

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

از معایب این مدل می‌توان به پیچیدگی اندازه‌گیری شاخص BI در حین عملیات حفاری و آتشفشانی همچنین عدم به‌کارگیری مؤلفه‌های مربوط به طراحی الگوی آتشفشانی و ابعاد سطح مقطع تونل اشاره کرد.

۴- اندازه‌گیری خردایش ناشی از انفجار

از جمله اطلاعات بسیار مهم در بهینه‌سازی عملیات انفجار، ویژگی‌های خردایش از قبیل شکل و اندازه قطعات است. پس از انفجار، باید نتایج حاصل ارزیابی شود. با استفاده از این نتایج، الگوی حفاری و انفجار مناسب برای رسیدن به نتیجه مطلوب به دست می‌آید. روش‌های مختلفی مانند تحلیل کیفی، سرنده کردن، روش تحلیل تصویر، روش اسکنر سه بعدی ($LIDAR$) و غیره برای ارزیابی خردایش بعد از انفجار ارائه شده است. روش اسکنر سه بعدی یکی از جدیدترین روش‌ها است که با توجه به محدودیت‌های عملیاتی و فضایی زیرزمینی از جمله عدم نور کافی، توسط



شکل ۲- فرایند تحلیل تصویر با نرم‌افزار Split Desktop

۵- برداشت‌های میدانی

تقسیم‌بندی کرد. در روند کلی برداشت اطلاعات، از هر عملیات انفجاری اطلاعات مربوط به الگوی آن جمع‌آوری و بعد از انفجار چندین عکس از کپه خردشده برای اندازه‌گیری متوسط ابعاد خردایش و توزیع دانه‌بندی قطعات خردشده حاصل انفجار گرفته شده است. در شکل ۳، نمونه توده‌ی خردشده بعد از انفجار در جبهه‌کار تونل را نشان می‌دهد. برداشت‌های انجام شده با استفاده از نرم‌افزار تحلیل تصویر Split Desktop تحلیل شده است. در شکل ۴، دامنه نتایج تحلیل تصویر نشان داده شده است.

در جدول ۲، خلاصه‌ای از برداشت‌های انجام شده از تونل‌ها شامل مشخصات طراحی انفجار و مؤلفه‌های ژئومکانیکی بیان شده است. مؤلفه‌ی خرج ویژه بر مبنای آنفو با در نظرگرفتن قدرت حجمی آنفو برابر ۱۰۰ و قدرت حجمی امولایت برابر ۱۱۷ می‌باشد و بر این اساس میانگین وزنی گرفته شده است.

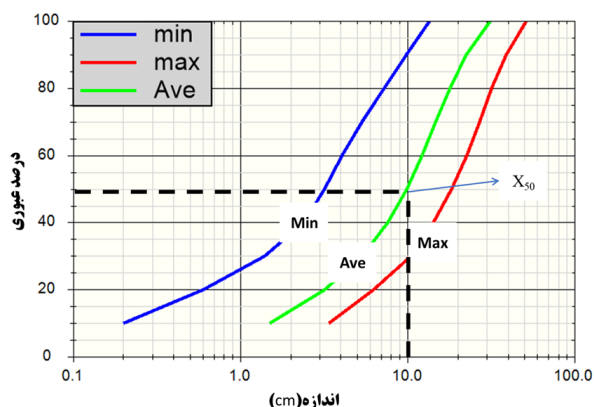
در این تحقیق برداشت‌های میدانی از ۲۳ عملیات آتشکاری تونل انجام شده است. در این میان ۱۰ برداشت از معدن زیرزمینی مس چهل‌کوره در استان سیستان و بلوچستان و ۱۳ برداشت از تونل شمالی حیران در استان اردبیل می‌باشد. روش معدن‌کاری زیرزمینی در معدن مس چل‌کوره، روش استخراج انباره‌ای است. در این روش از سه نوع سطح مقطع تونل با عنوان تونل گزنگ (شیب‌دار) تونل باربری و تونل تولیدی استفاده می‌شود. همچنین تونل شمالی حیران در مسیر پرتود اردبیل- آستارا که طول کل پروژه تونل ۷۳۰ متر بوده و با کارفرمایی اداره کل راه و شهرسازی استان اردبیل انجام شده است. عملیات حفاری تونل با استفاده از روش آتشکاری در سال ۱۴۰۰ آغاز شد و عملیات حفاری در شهریور ماه ۱۴۰۱ به پایان رسیده است.

اطلاعات برداشت شده را می‌توان به سه دسته مؤلفه‌های طراحی الگوی چالزنی و انفجار، مؤلفه‌های ژئومکانیکی و برداشت تصاویر از توده سنگ خردشده



شکل ۳- توده‌ی خردشده بعد از انفجار در جبهه‌کار تونل

توسعه مدل پیش‌بینی خردایش ناشی از آتشفشانی در فضاهاى زیرزمینی، حسن بخشنده امنیه و ...، ص ۴۷-۵۹



شکل ۴- دامنه نتایج تحلیل تصویر ۲۳ عملیات آتشفشانی تونل

جدول ۲- خلاصه‌ای از مشخصات هندسی، ژئومکانیکی و مواد منفجره تونل‌های برداشت شده

مشخصات هندسی تونل‌ها	تعداد چال	سطح مقطع (m^2)	حجم انفجار شده (m^3)	خرج ویژه (kg/m^3)	حفاری ویژه (m^3)	وزن امولایت (kg)	وزن آنفو (kg)	قطر چال (mm)	طول چال (m)	رده‌بندی توده سنگ* بیناوسکی	مقاومت فشاری تک محوره** (Mpa)	شاخص قابلیت انفجار*** لیلی
کمترین مقدار	26/00	5/20	6/76	0/92	0/98	14/20	0/00	32/00	1/30	35	80	40
بیشترین مقدار	88/00	55/00	220/00	2/69	6/88	170/00	420/00	51/00	4/00	70	110	75
میانگین	55/26	32/26	116/44	1/82	3/22	45/97	126/52	-	2/79	45	90	68

*Rock Mass Rating(RMR)

**Unconfined Compression Test(UCT)

***Blastability Index(BI)

پیش‌بینی مقادیر X_{50} نشان می‌دهد. با توجه به شکل ۶، ضریب همبستگی R^2 مقادیر پیش‌بینی شده و اندازه‌گیری شده X_{50} برابر $0/۸۰$ بدست آمده است.

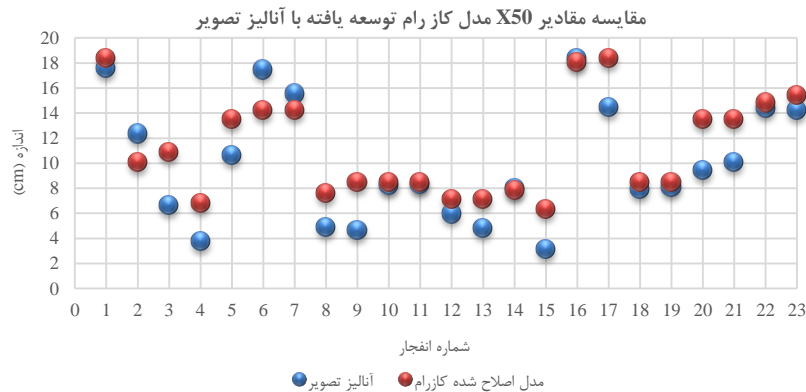
جدول ۳ مقایسه نتایج X_{50} مدل پیش‌بینی خردایش کاز رام توسعه یافته با نتایج تحلیل تصویر در آتشفشانی تونل

X_{50} تحلیل تصویر (cm)	X_{50} کاز رام توسعه یافته (cm)	درصد عبوری
10/0	11/3	میانگین
4/7	4/0	انحراف معیار
3/2	6/4	کمترین مقدار
18/4	18/4	بیشترین مقدار

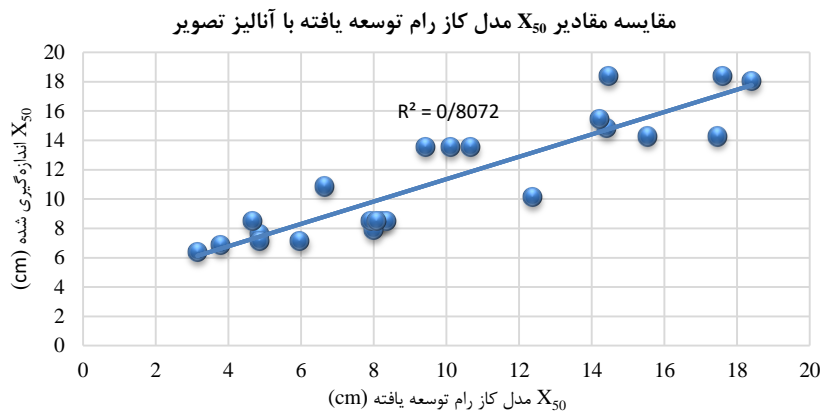
۶- پیش‌بینی خردایش با مدل کاز رام توسعه یافته

با استفاده از اطلاعات برداشت شده، خردایش با مدل کاز رام توسعه یافته پیش‌بینی شد. خلاصه‌ای از نتایج میانگین ابعاد خردایش (X_{50}) پیش‌بینی شده و تحلیل تصویر در جدول ۳، بیان شده است. شکل ۵، مقایسه مقادیر X_{50} هر انفجار با نتایج مدل کاز رام و تحلیل تصویر، نشان داده شده است.

همانطور که در شکل ۵، مشاهده می‌شود اختلافی بین نتایج X_{50} مدل کاز رام توسعه یافته و تحلیل تصویر وجود دارد. این اختلاف را می‌توان با استفاده از ضریب همبستگی R^2 نشان داد که دقت مدل کاز رام توسعه یافته را برای



شکل ۵- مقایسه مقادیر X₅₀ مدل کاز رام توسعه یافته با تحلیل تصویر برای آتشکاری تونل



شکل ۶- مقایسه مقادیر X₅₀ مدل کاز رام توسعه یافته با تحلیل تصویر در انفجارهای تونل

خردایش تحلیل تصویر بررسی شده است.

۱-۷- تحلیل اطلاعات

به توجه به اطلاعات برداشت شده و نتایج بدست آمده از تحلیل تصویر می‌توان تأثیر مؤلفه‌های طراحی آتشکاری را بر میزان خردایش بررسی کرد. از این رو ارتباط چهار مؤلفه خرج ویژه، سطح مقطع، طول چال و تعداد چال در واحد متر مربع با میزان خردایش ارزیابی شده است. خرج ویژه به میزان خرج مصرفی به ازای هر متر مکعب سنگ خرد شده گفته می‌شود. خرج ویژه به عنوان یکی از مهم‌ترین مؤلفه‌های طراحی می‌باشد. در برداشت‌های انجام شده خرج ویژه ۰/۹۲ تا ۲/۶۹ کیلوگرم بر متر مکعب تغییر کرده است. همانطور که در شکل ۷- الف، مشاهده می‌شود با افزایش

۷- پیش‌بینی خردایش با استفاده از

رگرسیون خطی چند متغیره

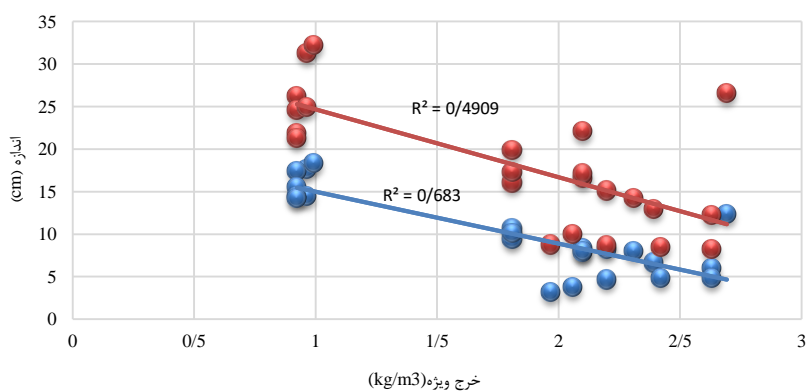
یکی از روش‌های کاربردی برای توسعه یک مدل پیش‌بینی کننده، تحلیل رگرسیون آماری است. یکی از روش‌های مرسوم این تحلیل، روش رگرسیون خطی چندگانه (*Multiple Linear Regression*) است. این روش مدلی را بر اساس رابطه بین متغیرهای ورودی مستقل و متغیرهای خروجی وابسته ایجاد می‌کند. مدل پیش‌بینی ساخته شده می‌تواند مقدار هدف را با توجه به مقدار ورودی تخمین بزند. مهم‌ترین مرحله ساخت مدل، انتخاب مؤلفه پیش‌بینی کننده مناسب است (Kulatilake, 2010). از این رو برای ارائه مدل، ارتباط بین مؤلفه‌های برداشت شده با مقادیر

تونل با طول چال مختلف انجام شده است. همانطور که در شکل ۷- پ، مشاهده می‌شود، با افزایش طول چال تونل ابعاد اندازه قطعات خردشده افزایش یافته است. در طراحی‌های آتشکاری تونل به طور کلی هر چه سطح مقطع بزرگ‌تر باشد تراکم چال‌ها در واحد سطح کمتر می‌شود. به منظور تأثیر تراکم تعداد چال در واحد سطح بر میزان خردشدگی، متوسط تعداد چال در واحد سطح بررسی شده است. همانطور که در شکل ۷- ت، مشاهده می‌شود با افزایش تعداد چال در واحد متر مربع تونل متوسط ابعاد قطعات خردشده کاهش پیدا کرده است.

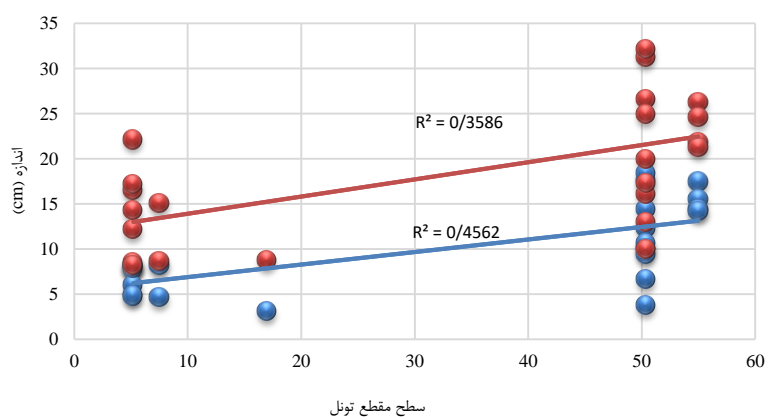
خرج ویژه ابعاد متوسط قطعات خردشده کاهش پیدا کرده است.

تونل‌ها به دلایل نوع کاربرد در ابعاد متفاوتی طراحی می‌شوند. برداشت‌های انجام شده از چندین تونل با سطح مقطع‌های مختلف انجام شده است. همانطور که در شکل ۷- ب، مشاهده می‌شود با افزایش سطح مقطع تونل متوسط ابعاد قطعات خردشده افزایش پیدا کرده است.

در هر سیکل انفجار مقدار معینی از طول تونل حفر می‌شود که آن را مقدار پیشروی گویند و معمولاً مقدار پیشروی کمتر از طول چال‌ها می‌باشد. برداشت‌ها از چندین

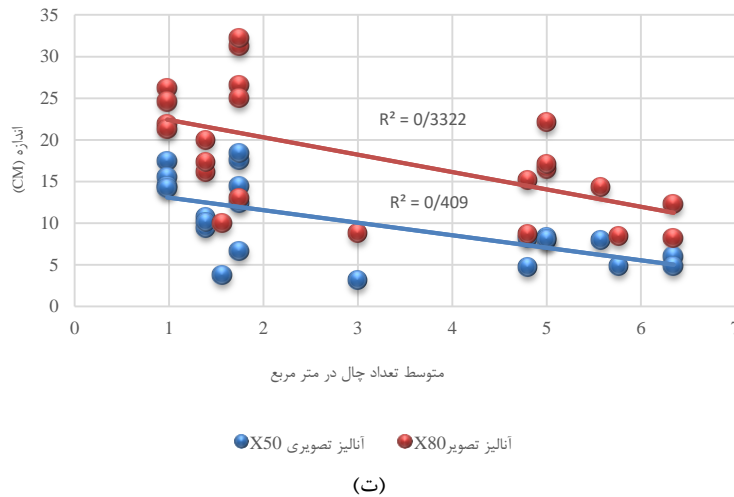
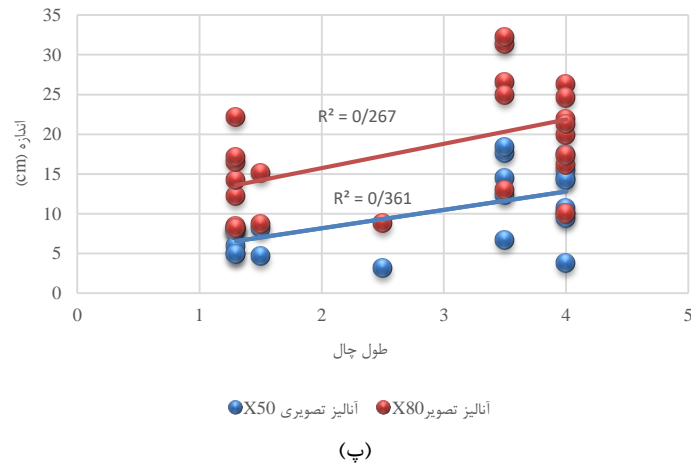


● آنالیز تصویری X50 ● آنالیز تصویری X80
(الف)



● آنالیز تصویری X50 ● آنالیز تصویری X80
(ب)

شکل ۷- وابستگی فاکتورهای مؤثر بر خردشدگی در عملیات انفجار تونل



ادامه شکل ۷- وابستگی فاکتورهای مؤثر بر خردشدگی در عملیات انفجار تونل

$$X_{80} = 0.973A - 4.735N - 24.091L - 5.092q + 77.277 \quad (۶)$$

که در آن‌ها X_{80} و X_{50} به ترتیب برابر اندازه سرندی است که ۵۰ و ۸۰ درصد مواد از آن عبور می‌کند (cm)، L ؛ متوسط طول چال (m)، A ؛ سطح مقطع تونل (m^2)، q ؛ خرج ویژه (وزن خرج براساس قدرت حجمی ماده منفجره بر پایه آنفو محاسبه شده است). (Kg/m^3) و N تعداد متوسط چال در واحد سطح است. این مدل با توجه به ویژگی‌های ژئومکانیکی توده سنگ برداشت شده برای مؤلفه RMR ۳۵ تا ۷۰ و BI برابر ۴۰ تا ۷۵ پیشنهاد می‌شود.

۷-۳- بحث و تحلیل نتایج

ارزیابی مدل فرآیندی است که برای اندازه‌گیری کیفیت و عملکرد مدل انجام می‌شود. در این فرآیند، مدل آموزش

۷-۲- ارائه مدل پیش‌بینی خردایش با رگرسیون

چند متغیره خطی

با توجه به ارتباط مؤلفه‌های خرج ویژه، سطح مقطع، طول چال و تعداد چال در واحد سطح بر خردایش که در شکل ۷، نشان داده شده است با استفاده از ۱۹ انفجار از ۲۳ انفجار برداشت شده، دو مدل رگرسیون چند متغیره خطی برای پیش‌بینی X_{80} و X_{50} ساخته شده است. از ۴ انفجار دیگر برای ارزیابی مدل استفاده شده است. معادلات ۵ و ۶ به ترتیب روابط رگرسیون چند متغیره خطی برای پیش‌بینی خردایش X_{80} و X_{50} می‌باشد.

$$X_{50} = 0.549A - 0.654N - 10.504L - 4.779q + 32.064 \quad (۵)$$

در این روابط t_i برابر مقدار پیش‌بینی شده، y_i برابر مقدار اندازه‌گیری شده و n برابر تعداد داده‌ها می‌باشد. خطاهای مدل ارائه شده پیش‌بینی خردایش در جدول ۵، بیان شده است. نتایج نشان می‌دهد مقدار خطای مدل X_{50} ارائه شده کمتر است. ضریب تعیین R^2 این نتایج را تایید می‌کند؛ به طوری که مقدار R^2 (شکل ۸) برای مدل‌های پیش‌بینی خردایش X_{50} و X_{80} به ترتیب برابر $0/95$ و $0/85$ می‌باشد.

جدول ۴- خطاهای مدل ارائه شده پیش‌بینی خردایش

اطلاعات آماری		خطای میانگین		ریشه میانگین
		مربعات	مربعات	مربعات خطا
		X_{80}	X_{50}	X_{80}
خطای مدل		16/40	2/27	4/05

داده شده با داده‌های آزمون ارزیابی قرار می‌گیرند. به منظور ارزیابی مدل‌های ارائه شده از ۴ آزمون انفجار استفاده شده است. مشخصات ۴ انفجار به همراه نتایج خردایش در جدول ۴، بیان شده است.

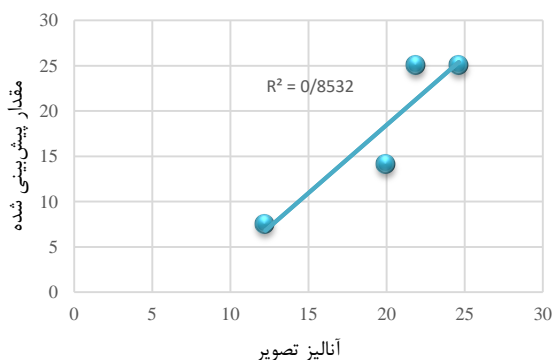
رویکردهای متفاوتی از جمله دقت (Accuracy)، حساسیت (Sensitivity)، ویژگی‌های خطا (Error characteristics) برای ارزیابی پیش‌بینی مدل‌ها وجود دارد. در این پژوهش به منظور ارزیابی دو مدل پیشنهادی ضریب تعیین R^2 ، میانگین مربع خطاها (Mean Squared Error = MSE) و جذر میانگین مربعات خطا (Root Mean Squared Error = $RMSE$) بررسی شد. $RMSE$ به ترتیب از روابط ۷ و ۸ محاسبه می‌شوند.

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |t_i - y_i| \quad (7)$$

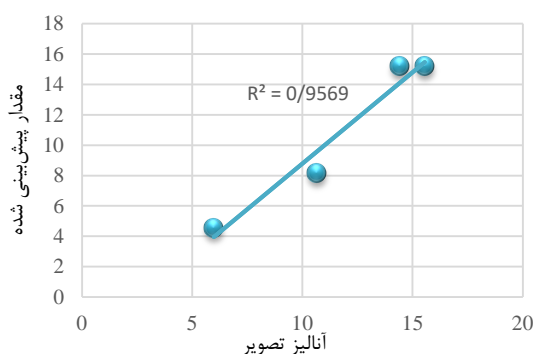
$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (t_i - y_i)^2}{n}} \quad (8)$$

جدول ۵- مشخصات و نتایج خردایش انفجارهای در نظر گرفته شده به منظور ارزیابی مدل‌های ارائه شده

شماره انفجار	تحلیل تصویر X_{50} (cm)	تحلیل تصویر X_{80} (cm)	خرج ویژه (kg/m^3)	سطح مقطع (m^2)	طول چال (m)	تعداد چال در	پیش‌بینی شده X_{50} (cm)	پیش‌بینی شده X_{80} (cm)
1	10/67	19/93	1/8	50/4	4	1/4	8/17	14/16
2	15/56	24/61	0/9	55	4	1/0	15/19	25/08
3	5/98	12/24	2/6	5/2	1/3	6/3	4/54	7/58
4	14/43	21/87	0/9	55	4	1/0	15/19	25/08



ب- پیش‌بینی شده X_{80}



الف- پیش‌بینی شده X_{50}

شکل ۸- عملکرد مدل ارائه شده برای پیش‌بینی داده‌های واقعی

۸- نتیجه‌گیری

به‌منظور پیش‌بینی و ارزیابی خردایش حاصل از آتشکاری تونل، اطلاعات ۲۳ عملیات آتشکاری از چندین تونل برداشت شد. تصاویر برداشت شده از کپه خرد شده عملیات‌های انفجار با نرم افزار تحلیل تصویر *Split Deskto* پردازش شد. نتایج تحلیل تصویر انجام شده با مدل تجربی کاز رام اصلاح شده مقایسه شد. برای افزایش دقت پیش‌بینی و همچنین انجام محاسبات راحت‌تر با توجه به داده‌های برداشتی و تحلیل تصاویر انجام شده با استفاده از رگرسیون چند متغیره دو مدل برای پیش‌بینی X_{50} و X_{80} خردشدگی در تونل ارائه شده است. در ادامه نتایج حاصل از این تحقیق بیان شده است.

- نتایج تحلیل تصاویر نشان داد که مقادیر متوسط X_{50} و X_{80} خردایش انفجارها برابر ۱۰ و ۱۸/۱ سانتی‌متر است.
- پردازش و تحلیل تصاویر توزیع دانه‌بندی قطعات خردشده و نتایج پیش‌بینی خردایش مدل کاز رام اصلاح شده نشان می‌دهد که ضریب همبستگی بین نتایج X_{50} مدل تجربی کاز رام اصلاح شده با نتایج X_{50} تحلیل تصاویر برابر ۰/۸۰ است.
- بررسی اطلاعات برداشت شده و تحلیل خردشدگی نشان می‌دهد که در طراحی آتشکاری تونل با افزایش خرج ویژه و تعداد چال (در واحد متر مربع) ابعاد خردایش کاهش و با افزایش سطح مقطع و طول چال ابعاد خردایش افزایش می‌یابد.
- ارزیابی مدل رگرسیون ارائه شده نشان داد که مدل

توسعه داده شده دارای دقت بالاتری نسبت به مدل کاز رام اصلاح شده دارد و مقادیر ضریب همبستگی برای دو مدل ارائه شده برای پیش‌بینی X_{50} و X_{80} به ترتیب برابر ۰/۹۵ و ۰/۸۵ می‌باشد.

۹- فهرست نمادها

جدول ۶- سیاهه‌ی نمادها

نماد	واحد	شرح
Q	Kg	میزان کل ماده منفجره در الگوی آتشکاری
Q _e	Kg	میزان خرج هر چال
L	m	پیشروی افقی تونل
S _{ANFO}		قدرت حجمی نسبی مواد منفجره برمبنای آنفو
V	m ³	میزان حجم مصالح انفجار شده در هر الگوی آتشکاری
A	m ²	سطح مقطع تونل
q	Kg/m ³	خرج ویژه
N	-	تعداد کل چال‌های انفجاری
X ₅₀ یا X _m	cm	میانگین ابعاد خردایش و یا اندازه سرنندی که ۵۰٪ مواد از آن عبور کند.
X ₈₀	cm	اندازه سرنندی که ۸۰٪ مواد از آن عبور کند.

۱۰- مراجع

- Campbell, A. D., & Thurley, M. J. (2017). Application of laser scanning to measure fragmentation in underground mines. *Mining Technology*, 126(4): p. 240-247.
- Changping Yi, J. S. (2017). Numerical modelling for blast-induced fragmentation in sublevel caving mines. *Tunnelling and Underground Space Technology*.
- Cunningham, C. (1983). The Kuz-Ram model for prediction of fragmentation from blasting. *in Proc. First Int. Symp. on Rock Fragmentation by Blasting*.
- Cunningham, C. (1987). Fragmentation estimations and the Kuz-Ram model-four years on. *in Proc. 2nd int. symp. on rock fragmentation by blasting*.

- Gheibie, S. A. (2009). Modified Kuz—Ram fragmentation model and its use at the Sungun Copper Mine. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 967-973.
- Jalali, S. M., & Eftekari, M. (2008). An Experimental Criterion to Determine Pillar Strength in Salt Mines. Modern Management of Mine Prouducting, *Geology & Environmental Protection* (pp. 27-34). Alben: International Scientific GeoConference.
- Jalali, S. M., & Forouhandeh, S. F. (2011, June). Reliability Estimation of Auxiliary Ventilation Systems in Long Tunnels during Construction. *Safety Science*, 49(5), 664-669. Retrieved from <http://dx.doi.org/10.1016/j.ssci.2010.12.015>
- Jalali, S. M., Emami, M., Najafi, M., Gharib-Bolok, F., Mohammadi, H., & Ramezanzadeh, A. (2015). Underground Coal Gasification as a Strategy to Improve Energy Economy of Iran. *Iranian Energy Economics*, 4(13), 63-88. Retrieved from http://jiec.atu.ac.ir/article_852_202.html
- Kanchibotla, S. (2003). Optimum blasting? Is it minimum cost per broken rock or maximum value per broken rock? *Fragblast*, 7(1): p. 35-48.
- Kulatilake, P. H., Qiong, W., Hudaverdi, T., & Kuzu, C. (2010). Mean particle size prediction in rock blast fragmentation using neural networks. *Engineering Geology*, 114(3-4): p. 298-311.
- Kuznetsov, V. M. (1973). The mean diameter of the fragments formed by blasting rock. *Soviet mining science*, 9: p. 144-148.
- Lawal, A. I. (2021). A new modification to the Kuz-Ram model using the fragment size predicted by image analysis. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 138, 104595.
- Lilly, P. (1986). An empirical method of assessing rock mass blastabilit. *The Aus*.
- Lith, A. K. (2004). Prediction of fragmentation for ring blasting in large-scale sublevel caving. *In Proceedings of 13th International Symposium on Mine Planning and Equipment Selection*.
- Lopez, J. C., Lopez, J. E., Carcedo, F. J., & de Ramiro, Y. V. (1995). *Drilling and blasting of rocks*. USA: CRS Press, 41, 35947.
- Mohammadi, H. B. (2018). Development of a rock fragmentation model for using in tunnel blasts. *Geotechnical and Geological Engineering*, 36: p. 2379-2390.
- Ouchterlony, F. (2005). The Swebrec© function: linking fragmentation by blasting and crushing. *Mining Technology*, 114(1): p. 29-44.
- Rosales-Huamani, J. A., Perez-Alvarado, R. S., Rojas-Villanueva, U., & Castillo-Sequera, J. L. (2020). Design of a predictive model of rock breakage by blasting using artificial neural networks. *Symmetry*, 12(9): p. 1405.
- Rosin, P. A. (1933). The laws governing the fineness of powdered coal. *J. Inst. Fuel*, 7(31): p. 29-36.
- Singh, B., & Goel, R. K. (2006). *Tunnelling in Weak Rocks*. (J. A. Hudson, Ed.) Amsterdam: Elsevier B.V.
- Team, S.E.L. (2010). *Manual of Split-Desktop Image Analysis Software. Version 3*.

Development of a model for predicting fragmentation due to blasting in underground spaces

H. Bakhshandeh Amnieh^{1*}; S. Jannesary²; J. khani³; M. Ghafari Goghadam⁴

1- Associate Professor; School of Mining, College of Engineering, University of Tehran. hbakhshandeh@ut.ac.ir

2- PhD Candidate; School of Mining, College of Engineering, University of Tehran. s.jannesary@ut.ac.ir

3- PhD Student; Mining Department, Faculty of Engineering, Tarbiat Modares University, jafar.khani@modares.ac.ir

4- MSc Graduate; Faculty of Engineering, Mining Department, Tarbiat Modares University, m.ghafari.m@gmail.com

Received: 20 Nov 2023; Accepted: 5 Oct 2024

DOI: 10.22044/tuse.2024.13826.1482

Keywords

Tunnel blasting
Prediction model
Split Desktop software
Mean fragment size

Extended Abstract

Summary

The primary purpose of blasting operations is to achieve optimal rock fragmentation while minimizing the adverse effects associated with the blasting process. Effective fragmentation significantly influences overall production costs, including expenses related to loading, transporting, and crushing the materials. Consequently, accurately predicting the extent of fragmentation resulting from an explosion is essential for blasting designers. In open-pit blasting, various models have been developed to forecast fragmentation; however, tunnel explosions and underground characteristic present unique challenges that require specialized predictive models.

Introduction

This research focuses on evaluating and developing a predictive model specifically for tunnel blasting fragmentation. To achieve this, data from 23 blasting operations were collected and analyzed using Split Desktop software. The mean fragment size (X_{50}) was derived from the modified Kaz-Ram model modified for tunnel blasts, and then, was compared with the results obtained through image analysis. In addition, in order to increase the accuracy of the prediction of fragmented parts, two prediction models X_{50} and X_{80} of fragmentation in the tunnel were presented using multivariate regression.

Methodology and Approaches

In this study, Split Desktop software was used to evaluate the fragmentation from blasting. Additionally, SPSS software was utilized for statistical analyses and comparison of the results. Moreover, to enhance the accuracy of fragmentation predictions and to develop new models, multivariate regression methods were used.

Results and Conclusions

The image analysis indicates that the correlation coefficient between the X_{50} results of the modified Kaz-Ram empirical model and the image analysis results is 0.80. Furthermore, the evaluation of the developed regression model shows that this model has higher accuracy compared to the modified Kaz-Ram model, and as a result, the correlation coefficients for predicting X_{50} and X_{80} being 0.95 and 0.85 have been obtained, respectively.