

## ارائه مدل ریاضی برای پیش‌بینی خردایش حاصل از انفجار با در نظر گرفتن سرعت امواج کشسانی

صادق تاجیک<sup>۱</sup>؛ مسعود منجزی<sup>۲\*</sup>؛ مجتبی رضاخواه<sup>۳\*</sup>؛ محمد امیری حسینی<sup>۴</sup>

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران.

۲- استاد، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران.

۳- استادیار، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران.

۴- رئیس تحقیقات معدن و زمین شناسی معدن سنگ آهن گلگهر

پذیرش: ۱۴۰۲/۰۶/۳۱

دریافت: ۱۴۰۲/۰۳/۲۹

(نویسندگان مسئول: [monjezi@modares.ac.ir](mailto:monjezi@modares.ac.ir) و [m.rezakhah@modares.ac.ir](mailto:m.rezakhah@modares.ac.ir))

### چکیده

عملیات انفجار یکی از مراحل کلیدی استخراج معادن روباز است که بر راندمان دیگر مراحل معدنکاری تأثیر مستقیم دارد. پیش‌بینی خردایش ناشی از انفجار از اهمیت بالایی برخوردار است و در این راستا، مدل‌های ریاضی و هوشمند مختلفی توسعه یافته‌اند. در اکثر روش‌های ارائه شده پارامترهای الگوی انفجار و خصوصیات توده سنگ در نظر گرفته شده است. در بخش روباره معدن گل‌گهر با توجه به تنوع رسوب‌گذاری و عدم امکان برداشت خصوصیات توده سنگ بر اساس روش‌های آزمایشگاهی، نیاز است از روش‌های غیر مخرب جهت برداشت خصوصیات توده سنگ بهره گرفته شود. در این مقاله، با استفاده از دستگاه لرزه نگار درون چاهی و بهره‌گیری از چال‌های انفجاری جهت برداشت سرعت امواج کشسانی (طولی و عرضی) برای سیزده بلوک انفجاری اندازه‌گیری شد و از روش آنالیز تصویری برای ارزیابی کیفیت خردایش استفاده گردید. دو مدل ریاضی مبتنی بر رگرسیون چندمتغیره، یکی خطی و دیگری غیرخطی، توسعه داده شدند. مدل غیرخطی با ضریب تعیین ۹۵٪ عملکرد بهتری نسبت به مدل خطی با ضریب تعیین ۸۰٪ داشت. این مطالعه نشان داد که لحاظ کردن ویژگی‌های امواج کشسانی توده سنگ می‌تواند بهبود قابل‌توجهی در پیش‌بینی خردایش انفجار ارائه دهد.

واژگان کلیدی: عملیات انفجار، پیش‌بینی خردایش، معدن گل‌گهر، امواج طولی و عرضی، آنالیز تصویری، مدل رگرسیون

### واژگان کلیدی

### ۱- مقدمه

مثال، مدل برنامه‌ریزی مختلط ارائه شده در این مقاله، انحرافات تولید را با استفاده از شبیه‌سازی احتمالی کاهش داده و عملکرد ماشین‌آلات بارگیری را در برنامه‌ریزی کوتاه‌مدت لحاظ کرده است [3]. علاوه بر این، در مدل‌های غیرخطی برای برنامه‌ریزی تولید، استفاده از قیود جدید باعث بهبود پیش‌بینی رفتار توده مواد شده است، که این امر می‌تواند در کیفیت خردایش مواد معدنی تأثیر مستقیم داشته

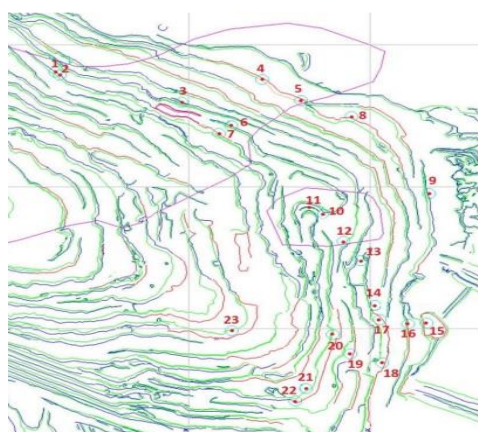
انفجار در معادن روباز با هدف خردایش سنگ انجام می‌شود [1] با توجه به تأثیرپذیری راندمان عملیات بارگیری و باربری از کیفیت خردایش سنگ، پیش‌بینی نتایج انفجاری از اهمیت بسزایی برخوردار است [2]. مطالعات متعددی به چالش‌های برنامه‌ریزی کوتاه‌مدت معادن روباز پرداخته‌اند و رویکردهای قطعی و احتمالی برای این منظور استفاده شده است. به عنوان

۵۰ کیلومتری شهرستان سیرجان قرار دارد. در اکتشافات انجام شده منطقه گل گهر دارای آنومالی‌های شش گانه سنگ آهن در وسعت ۴۰ کیلومتر مربع و ذخیره ۱۲۶۰ میلیون تن می‌باشد. موقعیت نسبی آنومالی‌های شش گانه گل گهر در شکل ۱ مشاهده می‌شود [11].



شکل ۱- موقعیت ذخایر شش گانه منطقه گل گهر

مقاله پیش‌رو در در نیمه شرقی معدن شماره یک گل گهر که بخش توسعه معدن می‌باشد، انجام گردیده است. موقعیت چال‌های اندازه‌گیری شده در شکل ۲ نشان داده شده است. این بخش از معدن شامل لابه بندی‌های رسوبی از گنگومرا، و گل سنگ با مشخصات ذکر شده در جدول ۱ می‌باشد. محدوده نهایی طراحی این معدن، به صورت یک بیضی تقریبی با ابعاد ۸۸۰ در ۲۸۳۰ متر می‌باشد. با احتساب ذخیره بخش توسعه، اطلاعات این معدن در جدول ۲ آورده شده است.



شکل ۲: موقعیت چال‌های برداشت شده

باشد [4]. همچنین، بهره‌گیری از مدل‌های ترکیبی همچون XGB بهینه‌شده با PSO و GWO می‌تواند دقت پیش‌بینی‌های مربوط به کیفیت خردایش سنگ را افزایش دهد، که این امر بر افزایش راندمان عملیات تأثیر بسزایی خواهد داشت [5]. مطالعات و تحقیقات در این راستا از سال ۱۹۷۰ آغاز گردیده است و محققین مختلف، برای پیش‌بینی خردایش حاصل از انفجار روش‌های مختلفی ارائه نموده‌اند. دنیس و گاما در سال ۱۹۷۰ مدل خود را ارائه نمودند که در آن از انرژی انفجار، طول بارسنگ و خصوصیات توده سنگ و ماده منفجره استفاده نموده‌اند [6]. کونینگهام در سال ۱۹۸۷ مدل کازرام اصلاح شده را ارائه نمود که در آن شاخص قابلیت انفجار، قدرت وزنی ماده منفجره و خرج ویژه استفاده شده است [7]. اورعی و همکاران در سال ۲۰۰۶ جهت پیش‌بینی خردایش از پارامترهای الگوی انفجار و نوع سنگ، با کمک شبکه‌های عصبی استفاده نمودند [8]. منجری و همکاران در سال ۲۰۱۰، با استفاده از پارامترهای الگوی انفجار و با روش شبکه‌های عصبی مصنوعی مقدار خردایش معدن سنگان را پیش‌بینی کردند [9]. شمس و همکاران در سال ۲۰۱۵، با کمک روش‌های استنتاج فازی، و با استفاده از پارامترهای بارسنگ، فاصله‌داری، قطر چال، طول خرج‌گذاری، خرج ویژه، ضریب چکش اشمیت و چگالی درزه‌ها، مدل خود را جهت پیش‌بینی خردایش در معدن سرچشمه رفسنجان ارائه نمودند [10]. با توجه به مطالب فوق، در اکثر روش‌های ارائه شده تنها پارامترهای الگوی انفجار و خصوصیات توده سنگ در نظر گرفته شده است و نقش امواج کشسانی توده‌سنگ لحاظ نشده است. علت بهره‌گیری از این روش در ارزیابی خصوصیات توده‌سنگ، تنوع تغییرات در بخش روباره و عدم امکان نمونه‌گیری گسترده جهت انجام تست‌های آزمایشگاهی می‌باشد. با استفاده از روش لرزه نگاری درون چاهی و برداشت خصوصیات کشسانی زمین در بخش‌های مختلف می‌توان تنوع چگالی مواد در هر بخش را اندازه‌گیری نمود. در این راستا، هدف مقاله حاضر، ارائه یک مدل ریاضی جهت پیش‌بینی خردایش حاصل از انفجار با لحاظ نمودن سرعت امواج کشسانی (طولی و عرضی) می‌باشد. به منظور محاسبه سرعت امواج کشسانی از دستگاه لرزه‌نگار درون‌چاهی استفاده شده است.

## ۲- معرفی مطالعه موردی

مجموعه صنعتی معدنی گل گهر در استان کرمان و در فاصله

گل‌گهر از اسفند سال ۱۴۰۱ تا شهریور ۱۴۰۲ برداشت شد (جدول ۳). محدودیت دستگاه لرزه‌نگار باعث گردید که تنها انفجارهایی که با قطر ۸ اینچ و یا کمتر بودند، برداشت شوند. مولفه شماره الگو در جدول ۳ دارای دو بخش می‌باشد که بخش اول شماره پله و بخش دیگر شماره انفجار است به عنوان مثال الگوی ۵-۸۸۹ یعنی پله ۵ انفجار شماره ۸۸۹.

### ۲-۳- ارزیابی انفجارهای انجام شده با استفاده از

#### آنالیز تصویر

جهت ارزیابی خردایش حاصل از انفجار، روش‌های مختلفی وجود دارد که از میان آن‌ها روش آنالیز تصویری به دلیل سادگی و کم هزینه بودن، دارای کاربرد بیشتری است. از مزیت‌های دیگر این روش، می‌توان به سرعت بالا و دقت مناسب اشاره نمود. برای انجام این روش بایستی به تعداد کافی تصویر از سنگ‌های خرد شده تهیه شود. در این تصاویر باید از ابزارهایی با اندازه مشخص، همچون توپ به عنوان مقیاس استفاده کرد. در ادامه، تصاویر را وارد نرم افزار کرده و با تعیین مرز خرده‌های حاصل از انفجار و مشخص نمودن مقیاس، تصاویر ارزیابی می‌شوند. در این مقاله از بسته نرم‌افزاری آنالیز تصویر Split Desktop استفاده شده است و توزیع خردایش هر انفجار به صورت جداگانه بدست آمده است. تصویر مربوط به یکی از انفجارها در شکل ۲ مشاهده می‌شود. شکل ۳ نیز همان توده خرد شده است که در نرم‌افزار Split Desktop مورد بررسی قرار گرفته است. برای تعیین توزیع خردایش حاصل از انفجار، می‌توان همانند شکل ۳، بعد از تهیه عکس از توده خرد شده، در حلقه اول مقیاس تصویر که دو توپ با قطر ۲۰۰ میلی‌متر می‌باشند، تعیین شود، در حلقه بعد، مرزبندی خرده‌های حاصل از انفجار را با مشخص نمودن خرده‌های سنگ‌ها، انجام می‌شود و در نهایت با پوشاندن قسمت‌های اضافه، می‌توان با مراجعه به بخش مشاهده نتایج، میزان توزیع خردایش را همچون شکل‌های ۴ و ۵ به صورت جدول و نمودار مشاهده کرد [12].



شکل ۳-نمایی از معدن

جدول ۱- مشخصات سنگ منطقه

نوع سنگ	مقاومت فشاری تک محوره (MPa)	دانسیته (gr/cm <sup>3</sup> )	مدول الاستیسیته (GPa)
کنگلوما	۲۱	۲/۳۶	۹
گل‌سنگ (خشک)	۱۳	۱/۹	۵/۰۸
گل‌سنگ (تر)	۳/۲	۲/۱	۳/۵

جدول ۲- اطلاعات معدن شماره یک گل‌گهر

پارامتر	مقدار
نسبت باطله برداری	۲.۲:۱
شیب پله‌ها	۵۵ - ۶۵ درجه
شیب نهایی	۴۲ درجه
ارتفاع پله‌ها	۱۵ متر
تعداد پله‌ها	غربی: ۱۹ مرکز: ۳۰ شرقی: ۴۳
عرض رمپ	۲۵ متر
شیب رمپ	۸ - ۱۰ درصد

### ۳- مواد و روش

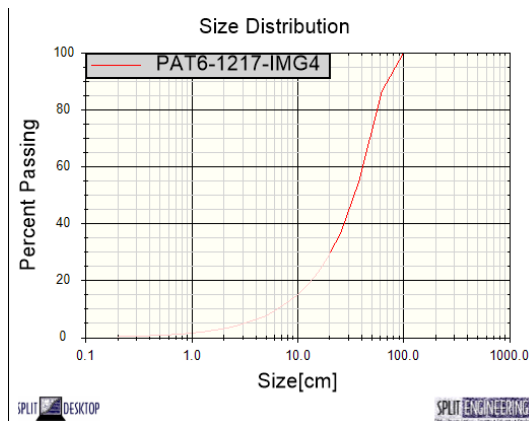
#### ۳-۱- توصیف انفجارهای انجام شده

اطلاعات ۱۳ بلوک انفجاری در نیمه شرقی معدن شماره یک

جدول ۳- اطلاعات انفجارهای انجام شده

انفجار ۱	انفجار ۲	انفجار ۳	انفجار ۴	انفجار ۵	انفجار ۶	انفجار ۷	انفجار ۸	انفجار ۹	انفجار ۱۰	انفجار ۱۱	انفجار ۱۲	انفجار ۱۳
شماره الگو ۱۱۶-۱۰	۱۱۶-۱۰	۱۱۶-۱۰	۱۱۶-۱۰	۱۱۶-۱۰	۱۱۶-۱۰	۱۱۶-۱۰	۱۱۶-۱۰	۱۱۶-۱۰	۱۱۶-۱۰	۱۱۶-۱۰	۱۱۶-۱۰	۱۱۶-۱۰
قطر چال (اینچ)	۸	۷.۵	۸	۸	۸	۸	۸	۷.۵	۷.۵	۸	۷.۵	۷.۵
طول متوسط چال (متر)	۷.۷	۱۱.۵۵	۱۴	۵.۵	۱۵	۸.۵	۱۶	۱۲	۹	۱۰	۱۵.۵	۷.۵
بارسنگ (متر)	۴	۶	۷	۶	۶.۵	۶	۶	۶	۶	۶	۶	۶
فاصله داری (متر)	۵	۷.۵	۹	۷	۸	۸	۷	۷	۷	۷.۵	۷	۷.۵
طول خرج گذاری (متر)	۳	۴	۴.۵	۲.۵	۴.۵	۳	۵	۴	۳.۵	۳.۵	۵	۲.۵
خرج ویژه (کیلوگرم بر متر مکعب)	۰.۱۸۷	۰.۱۳۷	۰.۱۵	۰.۱۲۳	۰.۱۸۹	۰.۱۸۳	۰.۱۶	۰.۱۵۱	۰.۱۲۵	۰.۱۸۳	۰.۱۵	۰.۱۳
چگالی سنگ (گرم بر سانتی متر مکعب)	۲.۴	۲.۲۸	۲.۵۲	۲.۳۳	۲.۳۸	۲.۳۱	۲.۱	۲.۳۷	۲.۴۵	۲.۴۹	۲.۳۷	۲.۱۶

در شکل ۴ که یک بخش از نتایج نرم‌افزار *Split Desktop* می‌باشد، منظور از  $F_{10}$  تا  $F_{90}$  درصد عبوری از سرنده آن سایز می‌باشند، به عنوان مثال در این عکس،  $F_{50}$  یعنی ۵۰ درصد از خرده‌های حاصل از انفجار دارای سایز کمتر از ۳۵.۱۰ سانتی‌متر می‌باشند. نتایج آنالیز تصویری خردایش بلوک‌های انفجاری، در جدول ۴ آورده شده است.



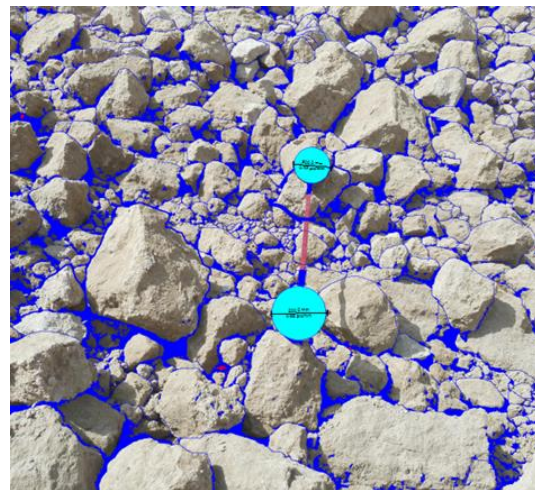
شکل ۷- میزان توزیع خردایش سنگ‌های خرد شده

### ۳-۳- محاسبه سرعت امواج طولی و عرضی در توده سنگ

امواج طولی<sup>۱</sup> (P) و عرضی<sup>۲</sup> (S) جز امواج کشسانی بوده و از پارامترهای ژئومکانیکی خاک و سنگ محسوب می‌شوند. امواج طولی به امواج تراکمی و امواج عرضی به امواج برشی نیز معروف می‌باشند. امواج کشسانی در اثر جابجایی ذرات و منتقل شدن انرژی به ذرات مجاور منتشر می‌شوند. در یک محیط الاستیک و همگن جهت انتشار امواج طولی در جهت حرکت ذره می‌باشد. در حالی که در امواج عرضی جهت حرکت ذره عمود بر جهت انتشار موج است. سرعت انتشار امواج طولی ( $V_P$ ) و عرضی ( $V_S$ ) به پارامترهای مختلفی از جمله ضرایب الاستیسیته و چگالی وابسته می‌باشد [13]. آزمایش لرزه‌نگاری درون‌چاهی<sup>۳</sup> یک روش مستقیم برای اندازه‌گیری سرعت امواج طولی و عرضی است [14].



شکل ۴- سنگ‌های خرد شده از انفجار



شکل ۵- مرزبندی سنگ‌های خرد شده از انفجار

PAT6-1217-IMG4	
% Passing	Size [cm]
F10	6.51
F20	13.40
F30	20.45
F40	28.16
F50	35.10
F60	41.77
F70	48.98
F80	57.08
F90	67.99
Topsize (99.95%)	101.17

شکل ۶- میزان توزیع خردایش سنگ‌های خرد شده

جدول ۴- نتایج آنالیز تصویری خردایش

شماره انفجار	شماره الگوی انفجاری	۸۰ درصد خردایش (cm)	۵۰ درصد خردایش (cm)
۱	۱۱۴۰-۱۰	۲۸	۲۰
۲	۱۲۲۸-۸	۳۵	۱۴
۳	۸۸۹-۵	۳۷	۱۸
۴	۱۲۷۵-۷	۳۸	۱۶
۵	۱۲۲۶-۹	۳۰	۱۷
۶	۱۱۶۰-۱۰	۲۷	۲۲
۷	۱۲۲۸-۹	۲۸	۱۱
۸	۱۲۲۹-۸	۲۸	۱۵
۹	۱۲۷۶-۷	۴۱	۲۰
۱۰	۱۲۱۷-۶	۴۲	۲۲
۱۱	۱۲۳۵-۹	۲۸	۱۹
۱۲	۱۲۳۳-۸	۴۰	۱۸
۱۳	۱۲۱۹-۶	۳۳	۱۵

- سوند لرزه نگاری درون چاهی (شماره ۲ در شکل ۸)
- سنسور تریگر (شماره ۳ در شکل ۸)
- پتک، الوار چوبی، پلیت و تلمبه.
- لپ تاپ

برای انجام آزمایش لرزه نگاری درون چاهی، همچون شکل ۸، در ابتدا سنسور تریگر در فاصله ۱ متری چال قرار می‌گیرد و سوند درون چاهی به داخل گمانه و عمق مشخص منتقل می‌شود، سپس سنسور تریگر و سوند درون چاهی با کابل‌های مخصوص به خود، به دستگاه لرزه نگار متصل گردیده و دستگاه لرزه نگار نیز با استفاده از WiFi به لپتاپ متصل می‌شود تا با استفاده از نرم‌افزار SPWAR زمان رسیدن امواج ثبت شود [16] و [17]. بعد از چیدمان تجهیزات و اطمینان از اتصال صحیح دستگاه به لپتاپ، با استفاده از یک پتک ۱۵ کیلوگرمی، یک ضربه عمود به صفحه به روی زمین، وارد کرده که موج طولی حاصل می‌شود. سپس با وارد نمودن ضربه افقی به الوار چوبی (به روی صفحه‌های نصب شده) موج عرضی ایجاد می‌شود [18].



شکل ۸- نحوه چیدمان تجهیزات آزمایش لرزه نگاری درون چاهی

وظیفه سنسور تریگر ثبت زمان آغاز موج و وظیفه سوند درون چاهی، ثبت زمان رسیدن موج است. با در دست داشتن زمان سیر موج و مسافت بین چشمه موج و گیرنده موج (سوند درون چاهی)، می‌توان به سادگی سرعت امواج طولی و عرضی را محاسبه نمود.

این روش در مقایسه با سایر روش‌های درون چاهی به دلیل سهولت انجام، سرعت اجرا و هزینه پایین عملیات، در مهندسی کاربرد زیادی دارد. اساس کار در این روش، اندازه گیری زمان سیر موج از سطح زمین تا اعماق مختلف است. در این روش چشمه موج در سطح و گیرنده موج در عمقی مشخص از سطح قرار دارد. زمان رسیدن امواج به دستگاه گیرنده، وابسته به فاصله بین چشمه لرزه‌ای و گیرنده، جنس و ضخامت لایه‌های زمین و سان قرار گرفتن آن‌ها از نظر زمین شناسی می‌باشد [15].

جهت انجام آزمایش لرزه نگاری درون چاهی از تجهیزات ذیل استفاده می‌گردد:

- دستگاه لرزه نگار SPSeisw (شماره ۱ در شکل ۸)

در رابطه بیان شده،  $\gamma$  متغیر وابسته،  $\beta_0$  ضریب ثابت،  $\beta_i$  ضریب متغیرهای مستقل و  $X_i$  متغیرهای مستقل می‌باشند [20].

جدول ۵- سرعت امواج طولی و عرضی

الگوی انفجار	$V_s$ (m/s)	$V_p$ (m/s)
۱۱۴۰-۱۰	۴۴۶	۱۰۲۲
۱۲۲۸-۸	۴۳۷	۷۵۹
۸۸۹-۵	۴۷۱	۸۷۱
۱۲۷۵-۷	۴۳۵	۹۰۷
۱۲۲۶-۹	۴۴۲	۱۰۰۳
۱۱۶۰-۱۰	۴۷۰	۸۲۹
۱۲۲۸-۹	۴۶۷	۹۸۳
۱۲۲۹-۸	۴۲۴	۹۱۰
۱۲۷۶-۷	۴۴۴	۱۰۳۱
۱۳۱۷-۶	۴۴۶	۹۴۹
۱۲۳۵-۹	۴۹۱	۹۴۱
۱۲۳۳-۸	۴۷۸	۹۰۳
۱۲۱۹-۶	۴۲۸	۸۱۳

در شکل ۹ انجام عملیات لرزه نگاری درون‌چاهی در معدن شماره ۱ گل‌گهر مشاهده می‌شود. در این شکل نحوه وارد نمودن ضربه جهت تولید موج عرضی نشان داده شده است. سرعت امواج طولی و عرضی برای تمامی بلوک‌های انفجاری و قبل از انجام عملیات انفجار، محاسبه گردید که در جدول ۵ آورده شده است.



شکل ۹- عملیات لرزه نگاری درون‌چاهی

#### ۳-۴- ارائه مدل پیش‌بینی خردایش

اکثر چالش‌های مهندسی با مدل‌های پیش‌بینی در ارتباط می‌باشند و معیار انتخاب این مدل‌ها دقت آن‌ها می‌باشد. یک مدل از مدل‌های پیش‌بینی، مدل مبتنی بر رگرسیون می‌باشد. رگرسیون در سال ۱۸۸۶ برای اولین بار توسط فرانسیس گالتون ۴ ارائه شد [19]. رگرسیون انواع مختلفی دارد که می‌توان به رگرسیون خطی و غیرخطی و همچنین یک متغیره و چند متغیره اشاره نمود. در مقاله حاضر، از رگرسیون خطی چند متغیره و رگرسیون غیرخطی چند متغیره استفاده شده است.

رگرسیون خطی چند متغیره: این مدل از رگرسیون یک تکنیک آماری است که از چندین متغیر مستقل برای پیش‌بینی یک متغیر وابسته استفاده می‌کند. در رگرسیون خطی چند متغیره رابطه بین متغیرها به صورت زیر می‌باشد:

$$y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_n X_n \quad (1)$$

آنالیز تصویری، رگرسیون خطی چند متغیره<sup>۵</sup> با استفاده از نرم افزار SPSS انجام گردید و رابطه (۲) ارائه گردید.

$$VP - 253.7 \times VS + 0.026 \times = 0.107 F_{80} \quad (2)$$

$$PF \times$$

با توجه به اطلاعات بلوک‌های انفجاری از جمله سرعت امواج تراکمی و برشی و خرج ویژه انفجارهای ثبت شده به همراه میزان خردایش ۸۰ درصدی توده‌های خرد شده حاصل از

متغیرهای وابسته و مستقل غیر خطی است. رگرسیون غیر خطی می‌تواند برای مدل‌سازی روابط پیچیده‌ای که با رگرسیون خطی قابل مدل‌سازی نیستند، استفاده شود. رگرسیون غیر خطی چند متغیره<sup>۷</sup> یک روش قدرتمند برای پیش‌بینی مقادیر متغیرهای وابسته است [21]. رابطه (۳) یک رگرسیون غیرخطی چند متغیره لگاریتمی می‌باشد که ارائه گردیده است.

رابطه ارائه شده شماره ۲ دارای ضریب تعیین<sup>۶</sup>، ۸۰ درصد می‌باشد و مطابق جدول ANOVA مقدار P-Value آن برابر با ۰.۰۰۱ می‌باشد که به معنای معنادار بودن مدل است. در رابطه فوق PF خرج ویژه می‌باشد. رگرسیون غیرخطی چند متغیره: رگرسیون غیر خطی روشی برای رگرسیون است که فرض می‌کند رابطه بین

$$F_{80} = 7753.9017 - 1320.8457 \times \ln(VS) - 528.3662 \times \ln(VP) + 2400.6944 \times \ln(PF) + 216.2925 \times (\ln(VS))^2 + 169.562 \times (\ln(VP))^2 - 4.6585 \times (\ln(PF))^2 - 290.6127 \times \ln(VS) \times \ln(VP) - 395.4664 \times \ln(VS) \times \ln(PF) - 6.9992 \times \ln(VP) \times \ln(PF) \quad \text{رابطه (۳)}$$

مقدار پیش‌بینی مدل‌های شماره یک و دو به همراه درصد خطای هر پیش‌بینی در جدول ۶ آورده شده است.

مدل ارائه شده شماره ۲ دارای ضریب تعیین ۹۵ درصد می‌باشد و مطابق جدول ANOVA مقدار P-Value آن کمتر از ۰.۰۰۵ می‌باشد که به معنای معنادار بودن مدل است.

جدول ۶- مقایسه مقادیر واقعی F80 با مقادیر پیش‌بینی شده

الگوی انفجار	مقادیر واقعی F80 (cm)	مقادیر F80 پیش‌بینی شده با مدل اول (cm)	مقادیر F80 پیش‌بینی شده با مدل دوم (cm)	درصد خطای رابطه (۲)	درصد خطای رابطه (۳)
۱۰-۱۱۴۰	۳۰	۲۶.۸	۲۹.۲	۱۰.۴	۲.۴
۸-۱۲۲۸	۳۵	۳۱.۷	۳۵.۵	۹.۳	-۱.۵
۵-۸۸۹	۳۷	۳۴.۹	۳۹.۴	۵.۶	-۶.۳۶
۷-۱۲۷۵	۳۸	۳۸.۹	۳۷.۹	-۲.۴	۰.۱۵
۹-۱۲۲۶	۳۰	۲۵.۴۲	۲۸.۰۱	۱۵.۲	۶.۶
۱۰-۱۱۶۰	۲۷	۲۴.۹۰	۲۶.۷	۷.۷	۰.۸۱
۹-۱۲۲۸	۲۸	۲۹.۰۹	۲۷.۹	-۳.۹	۰.۰۴
۸-۱۲۲۹	۲۸	۲۸.۴	۲۸.۶	-۱.۵۵	-۲.۲
۷-۱۲۷۶	۴۰	۳۶.۰۰۵	۳۸.۹	۹.۹۸	۲.۶
۶-۱۲۱۷	۴۲	۴۰.۶	۴۲.۷	۳.۱۳	۱.۷

-۱.۲	-۹.۱۹	۲۸.۳	۳۰.۵	۲۸	۹-۱۲۳۵
۲.۷	۸.۵۷	۴۱.۱	۳۶.۴۸	۴۰	۸-۱۲۳۳
۱.۸	-۲.۸۸	۳۲.۳	۳۳.۹	۳۳	۶-۱۲۱۹

رضایت بخش است و نتایج پیش‌بینی هر دو مدل با مقادیر واقعی تطابق مناسبی دارند، اما با مقایسه صورت گرفته، مدل رگرسیون غیرخطی چند متغیره در مقایسه با مدل خطی چند متغیره از دقت بالاتری برخوردار است و به عنوان مدل منتخب ارائه می‌شود.

#### پی‌نوشت

- <sup>1</sup> Compression Waves
- <sup>2</sup> Shear Waves
- <sup>3</sup> Downhole seismic testing
- <sup>4</sup> Francis Galton
- <sup>5</sup> Multiple Linear Regression
- <sup>6</sup> R Square
- <sup>7</sup> Multiple Nonlinear Regression
- <sup>8</sup> Muck Pile

#### ۵- سپاس‌گزاری

بدین وسیله از همکاران مجتمع صنعتی معدنی گل‌گهر همچین «مهندس احد سالاری باشقی» کارشناس شرکت مشاوره کوشا معدن که ما را در انجام این تحقیق یاری نموده‌اند، تشکر و قدردانی می‌نمایم.

مدل دوم با درصد خطای کمتر و دقت بالاتر، عملکرد بهتری نسبت به مدل اول در پیش‌بینی مقادیر F80 نشان می‌دهد.

#### ۴- نتیجه‌گیری

در مقاله حاضر، در ابتدا به ثبت بلوک‌های انفجاری در نیمه شرقی معدن شماره یک گل‌گهر پرداخته شد. در گام دوم تحقیق با انجام آزمایش لرزه‌نگاری درون‌چاهی مقادیر سرعت موج‌های طولی و عرضی برای تمامی بلوک‌های انفجاری محاسبه و ارائه گردید. دامنه تغییرات سرعت، برای موج طولی ۷۵۹ تا ۱۰۳۱ متر بر ثانیه و برای موج عرضی ۴۲۴ تا ۴۹۱ متر بر ثانیه می‌باشد. در گام سوم، بعد از انفجار هر الگو، از کپه خرده شده ۸ عکس برداری گردید و با استفاده از بسته نرم افزار Split Desktop که یک نرم افزار آنالیز تصویر قدرتمند می‌باشد، آنالیز تصویری خردایش صورت گرفت و میزان توزیع خردایش هر الگوی انفجار گزارش گردید. با استفاده از مقادیر سرعت امواج طولی و عرضی، مقادیر خرج ویژه، نتایج آنالیز تصویری و روش آماری رگرسیون، دو مدل خطی چندگانه و غیر خطی چند متغیره برای پیش‌بینی خردایش توسعه داده شد. طبق توضیحات ارائه گردیده، دقت هر دو مدل ارائه شده در پیش‌بینی مقادیر خردایش ۸۰ درصد عبوری از سرند،

## ۶- منابعها

- [1] Hustrulid WA; 1999; "Blasting principles for open pit mining: general design concepts; Balkema".
- [2] Hunter G, Dermott M, Miles N.J, Kumar Singh A; 1990; "A review of image analysis techniques for measuring blast fragmentation"; journal of mining science 11(1), 19-36.
- [3] Mirzehi, M., Rezakhah, M., Mousavi, A., & Nabavi, Z. (2023). New MIP model for short-term planning in open-pit mines considering loading machine performance: a case study in Iran. *International Journal of Mining and Mineral Engineering*, 14(4), 341-364.
- [4] Moreno, E., Ferreira, F., Goycoolea, M., Espinoza, D., Newman, A., & Rezakhah, M. (2015). Linear programming approximations for modeling instant-mixing stockpiles. In *Application of computers and operations research in the mineral industry-proceedings of the 37th international symposium, APCOM (Vol. 2009, pp. 582-587)*.
- [5] Kazemi, M. M. K., Nabavi, Z., Rezakhah, M., & Masoudi, A. (2023). Application of XGB-based metaheuristic techniques for prediction time-to-failure of mining machinery. *Systems and Soft Computing*, 5, 200061.
- [6] Gama D; 1995; "A model for rock mass fragmentation by blasting"; in 8th ISRM Congress. International Society for Rock Mechanics.
- [7] Cunningham C; 1987; "Fragmentation estimations and the Kuz-Ram Model-Four years on"; in Second International Symposium on Rock Fragmentation by Blasting: p 475-487.
- [8] Oraee K, B. Asi; 2006; "Prediction of Rock Fragmentation in Open Pit Mines using Neural Network Analysis"; in Fifteenth international symposium on mine planning and equipment selection (MPES 2006).
- [9] Monjezi M, Bahrami A, Varjani A.Y; 2010; "Simultaneous prediction of fragmentation and fly rock in blasting operation using artificial neural networks." *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 47(3): p 476-480.
- [10] Shams S, Monjezi M, JohariMajd V; 2015; "Application of fuzzy inference system for prediction of rock fragmentation induced by blasting"; *Arabian Journal of Geosciences*; 8(12): p. 10819-10832.

- [10] نادری حسین؛ ۱۳۹۶؛ گزارش پایان دوره آموزشی مجتمع صنعتی معدنی گل‌گهر سیرجان.
- [11] عطایی محمد؛ ۱۳۷۷؛ تعیین مدل توزیع عیار در آنومالی شماره ۳ معدن سنگ آهن گل‌گهر سیرجان؛ مرکز اسناد شرکت معدنی صنعتی گل‌گهر.
- [12] Split Engineering LLC Team; 2010; "Manual of Split-Desktop Image Analysis Software".
- [13] Sharma. P. V; (2002); "Environmental and engineering geophysics"; Cambridge university press, first published 1997, reprinted (2002).
- [14] Soleimani SH, Abtahi Najaf Abadi M, Moosavi P; 2019; "Land type classification by using downhole seismic in Tehran".
- [15] Rosli Saad, Edy Tonnizam M; 2014; "Dynamic Soil Properties Study Using Seismic Down-hole Geophysical Method".
- [16] دستورالعمل اپراتوری دستگاه لرزه نگار *SPSeisw*، شرکت پیشگام بنیان تجهیز.
- [17] دستورالعمل اپراتوری سوند درون‌چاهی *SPSe-3*، شرکت پیشگام بنیان تجهیز.
- [18] Ronaldo L, Houda j; 2000; "Determination of dynamic soil properties using geophysical methods".
- [19] Galton F; 1886; "Regression towards mediocrity in hereditary stature"; The Journal of the Anthropological Institute of Great Britain and Ireland.
- [20] Montgomery DC, Peck EA, Vining GG; 2012; "Introduction to linear regression analysis", vol 821. John Wiley & Sons.
- [21] Hoffman D, Deves T; 2015; "Nonlinear Multiple Regression methods and applications"; CRC Press.



## Development of a Mathematical Model for Predicting Blast-Induced Fragmentation Considering Elastic Wave Velocities

Sadegh Tajik<sup>1</sup>; Masoud Monjezi<sup>2\*</sup>; Mojtaba rezakhah<sup>3\*</sup>; Mohammad Amiri Hosseini<sup>4</sup>

1- M.Sc. Student, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.

2- Professor, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.

3- Assistant Professor, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.

4- Head of Research, Mining and Geology Department, Gol-Gohar Iron Ore Mine

Received: 19. Jun. 2023; Accepted: 22. Sep. 2023

(Corresponding authors: monjezi@modares.ac.ir & m.rezakhah@modares.ac.ir)

### **Keywords**

**Blasting Operations**  
**Fragmentation Prediction**  
**Gol-Gohar Mine**  
**Longitudinal and Transverse Waves**  
**Image Analysis**  
**Regression Model**

### **Final English Extended Abstract**

#### **Summary**

This study investigates predicting blast-induced rock fragmentation in open-pit mining, using elastic wave velocities (longitudinal and transverse) as key parameters. Conducted at Gol-Gohar Mine No. 1, data from 13 blasting blocks were analyzed. Image analysis and regression models (linear and nonlinear) were employed to assess fragmentation. The nonlinear model showed superior accuracy

(95%) compared to the linear model (80%), emphasizing the role of elastic wave properties in enhancing prediction reliability..

### **Introduction**

Blasting operations in open-pit mining significantly impact the efficiency of subsequent processes such as loading and hauling. Predicting the quality of fragmentation is crucial for optimizing these operations. While traditional methods rely on design parameters like burden and spacing, this study highlights the importance of incorporating elastic wave velocities, which reflect the geomechanical characteristics of the rock mass. By integrating these velocities, the study aims to develop more accurate predictive models, using Gol-Gohar Mine No. 1 as a case study.

### **Methodology and Approaches**

Elastic wave velocities were measured in 13 blasting blocks using downhole seismic equipment. Post-blasting fragmentation was analyzed with the Split Desktop software through image analysis of rock piles. Data included blast design parameters, wave velocities, and fragmentation outcomes. Regression models (linear and nonlinear) were developed using SPSS to predict fragmentation, comparing their accuracy based on determination coefficients.

### **Results and Conclusions**

The nonlinear regression model outperformed the linear model, achieving a determination coefficient of 95% compared to 80%. Incorporating elastic wave velocities significantly enhanced prediction accuracy. The study concludes that integrating geomechanical properties into fragmentation models improves reliability, offering a practical approach for optimizing blasting designs in open-pit mining.