

## (پژوهشی)

## تعیین قابلیت خردایش ناشی از انفجار بر اساس نسبت سرعت موج طولی و بعد فرکتال بلوک‌های انفجاری

مرتضی باغستانی<sup>۱</sup>، مسعود منجزی<sup>۲</sup>، علیرضا یاراحمدی بافقی<sup>۳\*</sup>، پیمان افضل<sup>۴</sup>

۱- دانشجوی دکتری مهندسی معدن، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس

۲- استاد، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس

۳- دانشیار، دانشکده مهندسی معدن و متالورژی، دانشگاه یزد / پژوهشکده فناوری‌های معدنکاری، دانشگاه یزد

۴- دانشیار، گروه مهندسی نفت و معدن، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تهران جنوب

(دریافت: بهمن ۱۳۹۷، پذیرش: مهر ۱۳۹۹)

## چکیده

انفجار یکی از مهم‌ترین عملیات در معادن و فعالیت‌های عمرانی است و قابلیت انفجار نیز از مهم‌ترین پارامترهای توده‌سنگ محسوب می‌شود. نتایج انفجار را می‌توان به پدیده‌های مطلوب و نامطلوب تقسیم‌بندی نمود. خردایش سنگ یکی از نتایج مطلوب انفجار است که بر فرآیندهای بعدی (بارگیری و حمل) و صنایع پایین دست تاثیرگذار است. در زمینه تعیین شاخص خردایش ناشی از انفجار تحقیقات گسترده‌ای صورت گرفته است. عوامل موثر بر انفجار را می‌توان به دو دسته عوامل قابل کنترل و غیر قابل کنترل تقسیم‌بندی نمود. شکل و ابعاد بلوک‌های برجا در جبهه‌کارهای انفجاری از جمله عوامل غیر قابل کنترل است که در پژوهش‌های انجام شده، مورد توجه قرار نگرفته است. در این مقاله از داده‌های انفجاری و ویژگی‌های توده‌سنگ معادن چغارت، چادرملو و سه‌چاهون استفاده شده است. بعد فرکتال جهت کمی‌سازی اندازه ذرات به روش شمارش جعبه مورد استفاده قرار گرفته است. جهت بررسی ارتباط بین شاخص خردایش (D80) به عنوان پارامتر وابسته و پارامترهای مستقل خرج ویژه، مقاومت فشاری تک محوری، نسبت سرعت موج طولی و نسبت شکل بلوک‌ها، از مدل‌های رگرسیون خطی، رگرسیون غیرخطی و شبکه عصبی استفاده شده است. نتایج حاصل از رگرسیون خطی نشان‌دهنده آن است که شاخص خردایش با نسبت شکل بلوک‌ها دارای ارتباط معنادار است. ضریب تعیین بین شاخص خردایش و پارامترهای مستقل در رگرسیون خطی، غیرخطی و شبکه عصبی به ترتیب برابر ۰/۵۲، ۰/۷۰ و ۰/۹۶ به دست آمده است؛ همچنین ضریب VAF مدل‌های رگرسیون خطی، غیرخطی و شبکه عصبی به ترتیب برابر ۳/۱۸، ۷۰/۳۳ و ۹۵/۲۸ است که نشان‌دهنده توانایی شبکه عصبی جهت پیش‌بینی خردایش ناشی از انفجار است.

## کلمات کلیدی

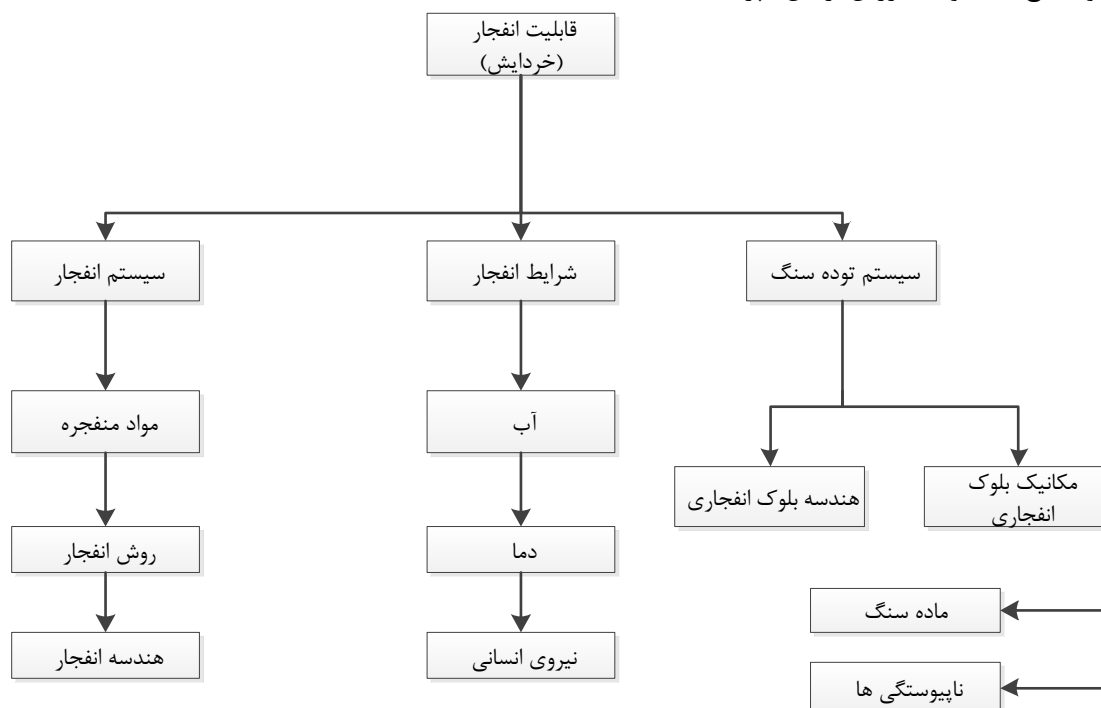
خردایش سنگ، بعد فرکتال، رگرسیون، سرعت موج طولی، شبکه عصبی

\* عهده‌دار مکاتبات: [ayarahmadi@yazd.ac.ir](mailto:ayarahmadi@yazd.ac.ir)

## ۱- مقدمه

لرزش هوا و عقب‌زدگی) تقسیم‌بندی نمود [۴-۸]. خردایش ناشی از انفجار بر صنایع پایین دست معدنی (خردایش، پرعیارسازی) تاثیرگذار است [۹، ۱۰]. عوامل موثر بر خردایش ناشی از انفجار را می‌توان به عوامل قابل کنترل (سیستم آتشکاری، طراحی الگوها، مواد منفجره مصرفی) و عوامل غیر قابل کنترل (پارامترهای توده‌سنگ) تقسیم‌بندی نمود [۱۱-۱۵] (شکل ۱).

عملیات حفاری و انفجار از لحاظ فنی و اقتصادی، در استخراج معادن و کارهای عمرانی به عنوان یک جزء اصلی از چرخه عملیاتی مطرح است [۱-۳]. نتایج انفجار را می‌توان به دو دسته نتایج مطلوب (خردایش سنگ، جابجایی توده خردشده) و نتایج نامطلوب (لرزش زمین، پرتاب سنگ،



شکل ۱: عوامل موثر بر خردایش توده‌سنگ [۳۱]

خردایش در معدن مس سونگون اصلاح نموده و ضرایب بهینه را جهت پیش‌بینی شاخص خردایش تعیین کرده‌اند [۲۲]. اکبری و همکاران (۲۰۱۵) به بررسی ارتباط بین شاخص خردایش با پارامترهای هندسه انفجار، ویژگی‌های توده‌سنگ و سیستم انفجار پرداختند [۱]. آنها نتیجه گرفتند که پارامترهای توده‌سنگ، بر توزیع اندازه ذرات خردشده تاثیر معنا داری دارد.

در سال‌های گذشته تحلیل رگرسیون و روش‌های هوش مصنوعی برای پیش‌بینی خردایش ناشی از انفجار مورد استفاده قرار گرفته است [۲۳-۳۰]. آلر و همکاران (۱۹۹۶) ارتباط بین پارامترهای هندسی بلوک انفجاری (بارسنگ، فاصله‌داری جانبی، طول چال، تعداد ردیف‌های انفجاری و ...) را با شاخص خردایش مورد بررسی قرار دادند [۲۳]. چاکرابرتی و همکاران (۲۰۰۴) با استفاده از رگرسیون خطی، پارامترهای موثر بر انفجار در توده‌سنگ‌های درزه‌دار

برای پیش‌بینی خردایش ناشی از انفجار مدل‌های مختلفی طی سالیان گذشته ارائه گردیده است. کوزنتسوف (۱۹۷۳) معادله نیمه تجربی را برای پیش‌بینی خردایش توده‌سنگ ارائه نمود [۱۶]. کانینگهام (۱۹۸۵) بر اساس مدل کوزنتسوف و تابع توزیع رزین-راملر، مدلی را جهت تعیین توزیع ذرات خردشده بر اساس فاکتور سنگ، ضریب یکنواختی ارائه نمود [۱۷]. هلمبرگ (۱۹۸۳) پارامترهای الگوی انفجار و توده‌سنگ را به عنوان عوامل اصلی در خردایش در نظر گرفته و مدل انفجاری سوئدیفو را ارائه نموده است [۱۸]. ری و ده‌مار (۱۹۹۶) مدل پیش‌بینی خردایش را بر پایه جهت‌یافتگی درزه‌ها ارائه نمودند [۱۹]. JKMRC مدل‌های خردایش را در راستای توسعه مدل کاز-رام ارائه نموده است. این مدل‌ها در بخش‌های ریزدانه و درشت‌دانه دارای توابع و ضرایب ویژه‌ای هستند [۲۰، ۲۱]. غیبی و همکاران (۲۰۰۹) مدل کاز-رام را جهت پیش‌بینی

بررسی‌های صورت گرفته با استفاده از روش‌های رگرسیون و شبکه‌های عصبی، پارامترهای ناپیوستگی‌ها در زمینه خردایش توده‌سنگ مورد توجه قرار نگرفته است.

برخی محققین این حوزه به دنبال امکان جایگزینی سرعت موج با ویژگی‌های ژئومکانیکی توده‌سنگ بوده‌اند. در این تحقیقات اختلاف بین سرعت موج الاستیک ماده‌سنگ و توده‌سنگ را ناشی اثر استهلاک ناپیوستگی‌ها دانسته‌اند و بدین ترتیب با این جایگزینی علاوه بر افزایش سرعت برداشت، کاهش هزینه‌ها را به دنبال داشته است. از جمله این کارها می‌توان به نتایج طرح پژوهشی طبقه‌بندی قابلیت انفجار در معادن سنگ آهن ایران مرکزی و پهنه‌بندی منطقه معدن چغارت اشاره نمود. در این طرح تحقیقاتی ارتباط بین سرعت موج طولی برجا و پارامترهای ژئومکانیکی توده‌سنگ (چگالی خطی درزه‌داری، اختلاف جهت‌داری درزه‌ها با جبهه کار انفجاری، گسترش درزه‌ها و مقاومت فشاری تک محوری ماده‌سنگ) دارای ارتباط معنادار (ضریب تعیین ۰/۹۱) است [۳۱].

هندسه فرکتال شاخه جدیدی از علوم ریاضی است (دهه ۱۹۸۰ میلادی) که جهت تعیین و توضیح پدیده‌های طبیعی مورد استفاده قرار می‌گیرد [۳۲]. هنگامی که هندسه اقلیدسی در توصیف پدیده‌های طبیعی دارای ضعف است، هندسه فرکتال در تشریح پدیده‌های مربوط به علوم زمین [۳۳-۴۲]، توصیف خصوصیات توده‌سنگ [۴۳-۴۸] و ویژگی‌های توده‌سنگ خردشده (قبل و بعد از انفجار) [۴۹، ۵۰، ۱۴] می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد.

در تحقیقات پیشین و در تعیین میزان خردایش، اثر شکل بلوک‌های برجا در جبهه‌کار انفجاری در نظر گرفته نشده است. با توجه به آن که تعیین شکل به وسیله هندسه اقلیدسی، به طور صریح قابل بیان نیست، لذا استفاده از هندسه فرکتال در تعیین و کمی‌سازی شکل بلوک‌های برجا، مناسب است. در این مقاله شکل قطعات برجا و خرد شده بر اساس هندسه فرکتال کمی‌سازی گردیده است. ارتباط این پارامتر، خصوصیات توده‌سنگ (سرعت موج طولی برجا و آزمایشگاهی، مقاومت فشاری تک محوری) و خرج ویژه با شاخص خردایش توده‌سنگ خردشده (D80: اندازه دهانه سرندی که ۸۰ درصد ذرات خردشده از آن عبور کنند) به صورت رگرسیون خطی، رگرسیون غیرخطی و شبکه عصبی مورد بررسی قرار گرفته است.

و بدون درزه را مورد بررسی قرار دادند. آنها در بررسی‌های خود از ۳۵ بلوک انفجاری در سه معدن روباز استفاده نموده و بررسی‌ها نشان داد که در بلوک‌های سنگی توده‌ای خصوصیات سنگ بکر و در توده‌سنگ درزه‌دار خصوصیات ناپیوستگی‌ها بر نتایج انفجار (میزان خردایش) تاثیرگذار است [۲۴]. بهرامی و همکاران (۲۰۱۱) با استفاده از روش رگرسیون چند متغیره و شبکه عصبی، ارتباط بین پارامترهای طراحی انفجاری (قطر چال، فاصله‌داری، بارسنگ، خرج ویژه و...) با خردایش را در معدن سنگان مورد مطالعه قرار دادند [۲۵]. در این مطالعه از پارامترهای توده‌سنگ (خصوصیات ناپیوستگی‌ها و ماده‌سنگ) در بررسی‌ها مورد استفاده نشده است. هادوردی و همکاران (۲۰۱۲) با استفاده از رگرسیون چند متغیره غیرخطی و پارامترهای الگوی انفجاری و خصوصیات توده‌سنگ، میزان اندازه متوسط ذرات خردشده را پیش‌بینی نمودند [۲۶]. ابراهیمی و همکاران (۲۰۱۶) با استفاده از شبکه عصبی (الگوریتم زنبور عسل)، هم‌زمان میزان خردایش و عقب‌زدگی در معدن انگوران را پیش‌بینی کردند [۲۷]. کرمی و افیونی‌زاده (۲۰۱۳) با استفاده از روش عصبی-فازی میزان خردایش را تخمین زدند. این محققین بیان نمودند که با استفاده از روش عصبی-فازی پیش‌بینی مقادیر خردایش، به مقادیر واقعی نزدیک‌تر است [۲۸]. شی و همکاران (۲۰۱۲) با استفاده از روش ماشین بردار پشتیبان و استفاده از پارامترهای الگوی انفجاری و خصوصیات توده‌سنگ، به پیش‌بینی متوسط اندازه ذرات خردشده پرداختند. این محققین نتایج حاصل از روش ماشین بردار را با روش‌های شبکه عصبی، رگرسیون چند متغیره و روش کوزنتسوف مورد مقایسه قرار دادند. نتایج نشان‌دهنده برتری مدل پیشنهادی (روش ماشین بردار پشتیبان) نسبت به سایر مدل‌ها است [۲۹]. مهردانش و همکاران (۲۰۱۸) به بررسی تاثیر خصوصیات توده‌سنگ بر نتایج انفجار با استفاده از روش شبکه عصبی، رگرسیون چند متغیره و درخت تصمیم پرداختند. این محققین تعداد ۴۲۳ داده انفجاری از ۱۴ معدن در سراسر دنیا را مورد پردازش قرار دادند. نتایج نشان داد که پارامترهای شاخص بار نقطه‌ای، مقاومت فشاری تک محوری، ضریب پواسون و چسبندگی در تعیین میزان خردایش ناشی از انفجار از درجه اهمیت بالاتری برخوردار است [۳۰]. در بیشتر

## ۲- برداشت و تهیه داده‌های تحقیق

$$D = -\lim_{r \rightarrow 0} \frac{\log(N(r))}{\log(r)} \quad (1)$$

که  $D$ : بعد فرکتال،  $N(r)$ : تعداد جعبه مورد نیاز جهت پوشش سطح مورد نظر،  $r$ : اندازه جعبه است. این روش در زمینه‌های مختلف علوم زمین و معدن جهت محاسبه بُعد فرکتال مورد استفاده قرار گرفته است [۵۲-۵۵].

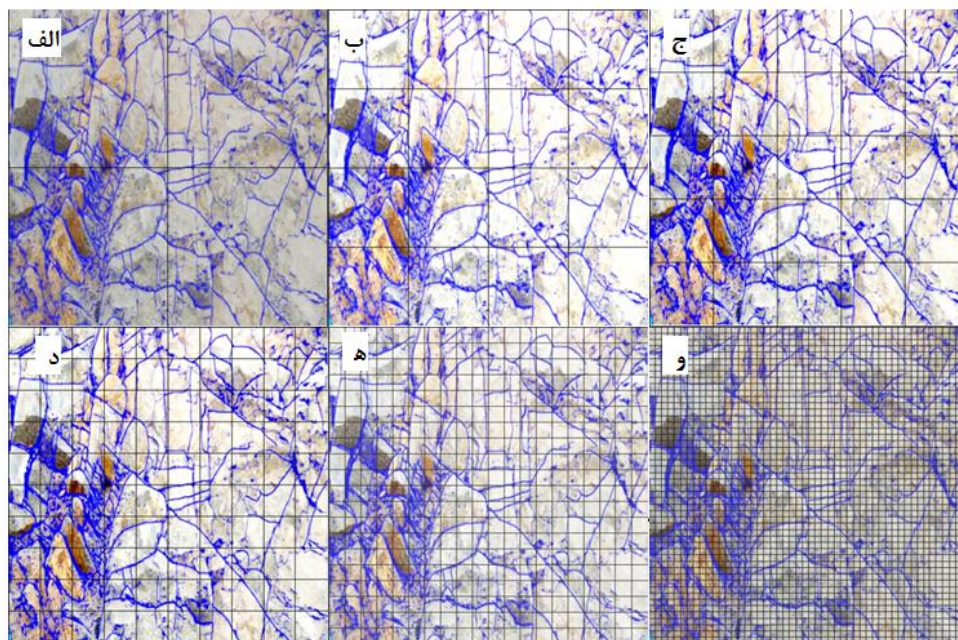
با توجه به روش شمارش جعبه در تعیین بعد فرکتال، در این مقاله توده سنگ برجا و توده سنگ خردشده مورد پردازش قرار گرفته و عدد فرکتال معادل محاسبه گردیده است. نمونه‌ای از مراحل پردازش سنگ برجا و محاسبه بعد فرکتال آن در شکل‌ها ۲ و ۳ نشان داده شده است. بر اساس شکل، بعد فرکتال حاصل برابر با ۱/۲۰ است. جهت و شبکه‌بندی اشکال و همچنین محاسبات مربوط به تعداد جعبه‌های هر شکل، از کد نوشته شده در نرم‌افزار Mathematica استفاده شده است.

همان گونه که از شکل ۳ پیدا است، مقادیر لگاریتمی تعداد جعبه‌ها در مقابل اندازه جعبه‌ها ترسیم گردیده است. شیب خط برازش شده به مقادیر (با در نظر گرفتن حداقل مربعات خطا) داده‌ها به عنوان بعد فرکتال معادل لحاظ می‌گردد.

در این تحقیق داده‌های ۴۳ بلوک انفجاری از معادن چغارت، چادرملو و سه‌چاهون برداشت شده است. داده‌های این مطالعه شامل: خرج ویژه بلوک‌های انفجاری، مقاومت فشاری تک محوری، سرعت موج طولی ماده سنگ و بلوک انفجاری، بعد فرکتال توده سنگ قبل از انفجار و بعد فرکتال توده سنگ خردشده است. داده اضافه شده در این مطالعه شکل بلوک‌های برجا در جبهه کار انفجاری و پس از انفجار با استفاده هندسه فرکتال کمی‌سازی گردیده و به عنوان پارامتر مستقل در نظر گرفته شده است. در ادامه به روش‌های استفاده شده اشاره شده است.

## ۲-۱- روش شمارش جعبه

روش شمارش جعبه توسط راسن و همکاران (۱۹۸۰) ارائه گردیده است. ساختار ساده و راحت این روش باعث کاربرد فراوان روش مذکور در تحلیل‌های فرکتالی شده است [۵۱]. بعد فرکتال در روش شمارش جعبه می‌تواند از شیب خط برازش شده به منحنی لگاریتم تعداد در برابر لگاریتم اندازه به دست آید (رابطه ۱).



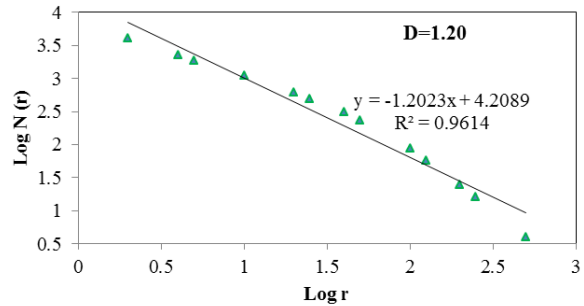
شکل ۲: شبکه‌بندی سطح بلوک برجا در اندازه‌های مختلف جعبه، الف) اندازه جعبه ۵۰۰\*۵۰۰ پیکسل، ب) اندازه جعبه ۲۵۰\*۲۵۰ پیکسل، ج) اندازه جعبه ۲۰۰\*۲۰۰ پیکسل، د) اندازه جعبه ۱۰۰\*۱۰۰ پیکسل، ه) اندازه جعبه ۵۰\*۵۰ پیکسل، و) اندازه جعبه ۱۰\*۱۰ پیکسل

فشاری تک‌محوری، مقاومت کششی (برزیلی) و بار نقطه‌ای انجام گرفت.



شکل ۴: برخی از نمونه‌های اخذ شده از بلوک‌های انفجاری جهت انجام تست‌های آزمایشگاهی

نتایج این آزمایش‌ها در جدول ۱ آمده است. بالاترین سرعت موج طولی برابر ۶۴۸۵ و کم‌ترین آن برابر ۴۰۲۳ متر بر ثانیه است. همچنین بازه تغییرات مقاومت فشاری تک محوری نمونه‌های سنگی بین ۲۵ تا ۱۱۰ مگاپاسکال است.



شکل ۳: تعیین بعد فرکتال بر اساس نمودار لگاریتم اندازه-تعداد

## ۲-۲- تعیین خواص توده‌سنگ بلوک‌های انفجاری

ویژگی‌های توده‌سنگ انفجاری شامل ویژگی‌های آزمایشگاهی و برجا برای ۴۳ بلوک انفجاری در معادن مورد مطالعه برداشت گردید. برای تعیین خواص ماده‌سنگ از هر بلوک ۳ نمونه سنگی تهیه گردید (شکل ۴). بر اساس موقعیت بلوک انفجاری و طول جبهه‌کار، نمونه‌های سنگی قبل از انفجار سینه‌کار تهیه شده است. در آزمایشگاه، بر اساس استانداردهای بین‌المللی (ASTM)، آزمایش غیر مخرب سرعت موج طولی و آزمایش‌های مخرب مقاومت

جدول ۱: نتایج آماری پارامترهای مورد استفاده در تحلیل برداشت شده از معادن مورد مطالعه

پارامتر/ویژگی	واحد	شاخص	کمینه	میانگین	بیشینه
خرج ویژه	$Kg/t$	$PF$	۰/۱۲	۰/۲۴	۰/۳۸
مقاومت فشاری تک محوری	$MPa$	$UCS$	۲۵	۵۹	۱۱۰
سرعت موج طولی ماده سنگ	$m/s$	$Vp_i$	۴۰۲۳	۵۲۶۹	۶۴۸۵
سرعت موج طولی برجا	$m/s$	$Vp_i$	۸۶۸	۱۵۴۷	۳۰۵۰
بعد فرکتال قبل از انفجار	-	$D_1$	۰/۸۵	۱/۱۷	۱/۵۰
بعد فرکتال بعد از انفجار	-	$D_2$	۱/۳۷	۱/۵۰	۱/۶۴
شاخص خردایش	$mm$	$D_{80}$	۱۴۷	۳۱۰	۸۰۳

نشان می‌دهد. میزان سرعت موج طولی برجا برای هر بلوک انفجاری به صورت متوسط وزنی بر اساس رابطه (۲) محاسبه و لحاظ گردیده است.

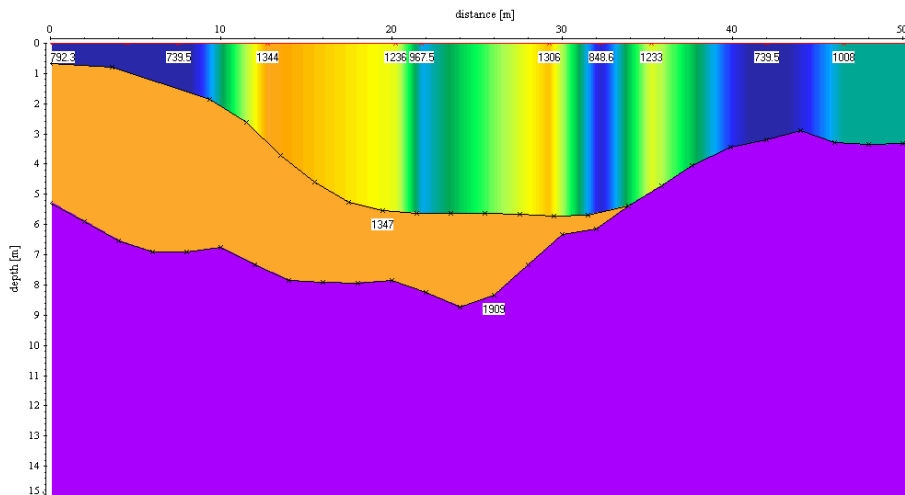
$$Vp_i = \frac{\sum vp_i \times s_i}{\sum s_i} \quad (2)$$

$s_i$ : مساحت لایه  $i$ ام،  $vp_i$ : سرعت موج طولی در لایه

$i$ ام

با توجه به بازه وسیع پارامترهای توده‌سنگ در بلوک‌های انفجاری، از سرعت موج طولی برجا، به عنوان پارامتر معرف خصوصیات استفاده شد. سرعت موج طولی برجا منعکس کننده خواص سنگ بکر، چگالی ناپیوستگی‌ها و ریز ترک‌ها، خواص مواد پر کننده ناپیوستگی‌ها و ... است. جهت ثبت سرعت موج طولی برجا در بلوک‌های انفجاری از دستگاه لرزه‌نگار 8 TERRALOC Mk ساخت شرکت ABEM سوئد استفاده شده است. شکل ۵ نمونه‌ای از پروفیل تغییرات سرعت موج برجا در بلوک انفجاری را



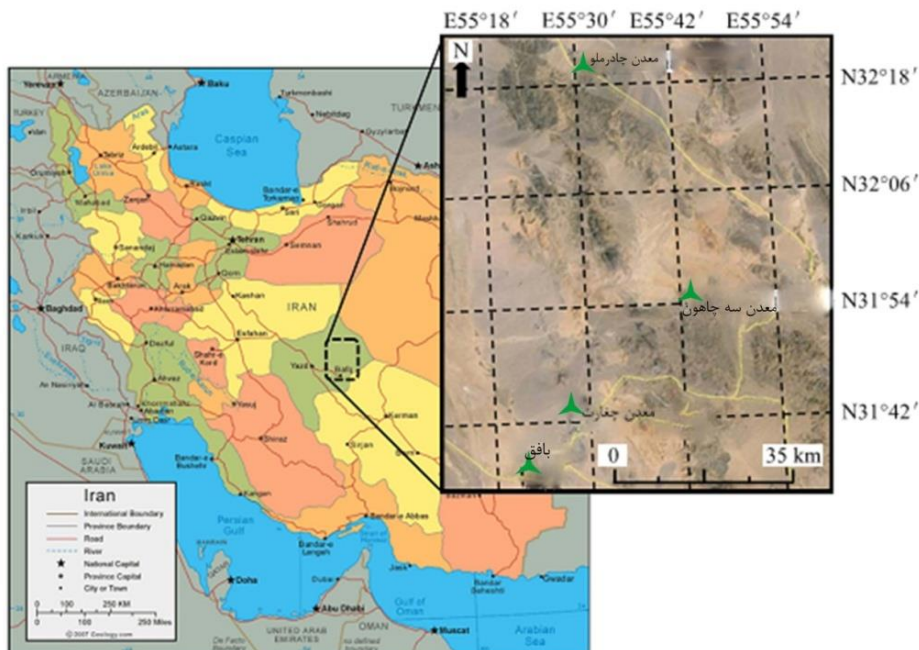


شکل ۵: پروفیل تغییرات سرعت موج برجا در بلوک انفجاری

### ۳- سیستم انفجار در معادن مورد مطالعه

در این پژوهش از داده‌های آتشفکری مربوط به معادن سنگ آهن چفارت، چادرملو و سه چاهون در بلوک بافق (شکل ۶) استفاده شده است. روش استخراج در هر سه معدن، روباز و پلکانی است. برخی از مشخصات مربوط به ذخیره و مدل هندسی طرح استخراج معادن در جدول ۲ اشاره شده است.

برداشت سرعت‌های موج طولی برجا نشان‌دهنده آن است که خصیصه‌های ناپیوستگی‌ها تاثیر بسزایی در انتقال موج و انرژی دارند، به گونه‌ای که بیشینه سرعت موج طولی برجا (شامل کلیه برداشت‌های سرعت موج طولی برجا) حدود ۳۰۵۰ متر بر ثانیه بوده که از کمینه سرعت موج طولی نمونه سنگ در آزمایشگاه به مراتب کمتر است. کمینه سرعت موج طولی برجا از بلوک‌های انفجاری نیز برابر ۸۶۸ متر بر ثانیه است. سرعت پایین قسمت بالای بلوک‌ها اغلب مربوط به تخریب ناشی از انفجار بلوک‌های بالایی و اضافه حفاری آنها است.



شکل ۶: موقعیت معادن مورد مطالعه (اقتباس از [۱])

جدول ۲: مشخصات معادن سنگ آهن مورد مطالعه

نام معدن	ذخیره قابل استخراج (میلیون تن)	ارتفاع پله استخراج (متر)	عرض پله ایمنی (متر)	شیب پله نهایی (درجه)	شیب کلی دیواره (درجه)
چفارت	۱۷۷	۱۰-۱۲/۵	۸-۱۰	۷۰	۳۸-۵۰
چادرمو	۳۲۰	۱۵	۱۰	۶۹/۵	۵۰-۵۵
سه چاهون	۱۳۲	۱۰	۱۰	۶۹/۵	۵۵

ادامه به روش‌های مورد استفاده در بررسی این ارتباط پرداخته است.

#### ۴-۱- رگرسیون خطی چند متغیره

مدل رگرسیون چند متغیره خطی به طور کلی بیان کننده ارتباط بین یک خروجی (پارامتر وابسته) و متغیرهای توصیفی (پارامترهای مستقل) است (رابطه ۵).

$$Y = a + b_1X_1 + b_2X_2 + \dots + b_nX_n \quad (5)$$

که  $Y$ : مقادیر تخمین زده شده،  $a$ : مقدار ثابت،  $b_i$ : ضرایب جزئی رگرسیون،  $X_i$ : پارامترهای مستقل است [۵۶].

با توجه به برداشتها و آزمایش‌های صورت گرفته از بلوک انفجاری (قبل و بعد از انفجار)، ارتباط بین شاخص خردایش (D80) و پارامترهای مستقل نظیر خرج ویژه (PF)، مقاومت فشاری تک محوری (UCS)، نسبت سرعت موج طولی ( $K_p$ ) و نسبت بعد فرکتال ( $K_d$ ) بر اساس روش رگرسیون خطی مورد بررسی قرار گرفت. برای بررسی ارتباط بین پارامترهای مستقل (خصوصیات توده‌سنگ، خرج ویژه و ...) و پارامتر وابسته (شاخص خردایش)، از نرم‌افزار SPSS Statistics 22 استفاده شده و رابطه (۶) به دست آمده است. نتایج بین شاخص خردایش و پارامترهای مستقل در جدول ۳ آمده است.

$$D_{80} = a + b_1PF + b_2K_p + b_3K_d + b_4UCS \quad (6)$$

همان گونه که از مقادیر جدول ۳ حاصل می‌شود، پارامترهای مستقل (مقاومت فشاری تک محوری، خرج ویژه، نسبت سرعت موج طولی برجا و نسبت شکل بلوک‌ها) مورد استفاده در رگرسیون خطی از سطح معناداری مناسبی برخوردار است.

پارامترهای الگوی انفجاری و مواد منفجره مصرفی به دقت برای محاسبه خرج ویژه مصرفی ثبت گردید. از سطوح سینه‌کار نیز عکس‌های مناسبی جهت پردازش تصویر و تعیین بعد فرکتال توده‌سنگ تهیه شد. بعد از انفجار نیز، از توده‌سنگ خرد شده، در فواصل زمانی مناسب (ابتدای بارگیری، نصف بارگیری و انتهای بارگیری توده خردشده) عکس تهیه شد و نهایتاً با استفاده از روش پردازش تصویر، نمودار دانه‌بندی خردایش توده‌سنگ و متوسط  $D_{80}$  هر بلوک تعیین شد (جدول ۱).

برای بررسی تاثیر سرعت موج طولی برجا و آزمایشگاهی بر نتایج خردایش، نسبت سرعت موج طولی ( $K_p$ ) بر اساس رابطه (۳) ارائه گردید.

$$K_p = \frac{VP_l}{(VP_l - VP_i)} \quad (3)$$

برای بیان اندازه شکل بلوک‌های برجا و سنگ خرد شده نیز از نسبت بعد فرکتال ( $K_d$ ) استفاده شده است (رابطه ۴). در رابطه (۴) میزان بعد فرکتال قبل از انفجار و پس از انفجار به ترتیب نشان دهنده میزان شکل توده برجا و ذرات خرد شده است.

$$K_d = \frac{D_2}{D_1} \quad (4)$$

که  $D_1$ : بعد فرکتال قبل از انفجار و  $D_2$ : بعد فرکتال بعد از انفجار است

#### ۴- بررسی روابط و تحلیل نتایج

هدف از این پژوهش یافتن ارتباط شاخص خردایش (D80) با سیستم توده‌سنگ و سیستم انفجار است. لذا اثر سیستم توده‌سنگ بر قابلیت خردایش ناشی از انفجار خلاصه می‌شود در نسبت ابعاد فرکتال ( $K_d$ ) و نسبت سرعت موج طولی ( $K_p$ ) و از طرف دیگر اثر سیستم انفجار نیز تنها با مقدار خرج ویژه نمایندگی می‌گردد که در

جدول ۳: نتایج ارتباط رگرسیون خطی بین شاخص خردایش و پارامترهای مستقل

پارامتر	ضریب بتا	سطح معناداری	ضریب t
ثابت	۳۴۶/۵۶	۰/۱۰۱	۱/۶۸
خرج ویژه	-۰/۴۵۱	۰/۰۰۱	-۳/۴۸
نسبت سرعت موج طولی	۰/۴۰۳	۰/۰۰۲	۳/۲۶
نسبت بعد فرکتال	۰/۴۰۶	۰/۰۰۳	-۳/۲۲
مقاومت فشاری تک محوری	۰/۳۶۹	۰/۰۰۴	۳/۰۲
ضریب همبستگی (R)		۰/۷۲	
ضریب تعیین (R <sup>2</sup> )		۰/۵۲	
ضریب تعیین تعدیل شده (R <sup>2</sup> Adj)		۰/۴۷	
ضریب F		۱۰/۱۵	

## ۴-۲- رگرسیون غیرخطی

رگرسیون غیرخطی جهت انطباق توابع غیرخطی بر روی داده‌های گردآوری شده مورد استفاده قرار گرفت. هدف در رگرسیون غیرخطی برازش تابع/توابع بر روی داده‌های گردآوری شده جهت رسیدن به حداکثر مقدار ضریب تعیین است. در گام بعدی بر اساس ضرایب و پارامترهای استفاده شده در رگرسیون خطی، تحلیل رگرسیون غیرخطی (ارتباط بین شاخص خردایش و پارامترهای مستقل) صورت گرفت. جهت بررسی ارتباط شاخص خردایش و پارامترهای مستقل توابع غیرخطی نظیر نمایی، لگاریتمی، توانی و چند جمله‌ای توان دار مورد استفاده قرار گرفته است. نتایج بررسی‌ها نشان‌دهنده آن است که معادله غیرخطی (رابطه ۷) بهترین تخمین را در زمینه شاخص خردایش ارائه می‌نماید.

$$D_{80} = \left(\frac{PF}{UCS}\right)^{\alpha} K_p^{\beta} K_d^{\gamma} + a \quad (7)$$

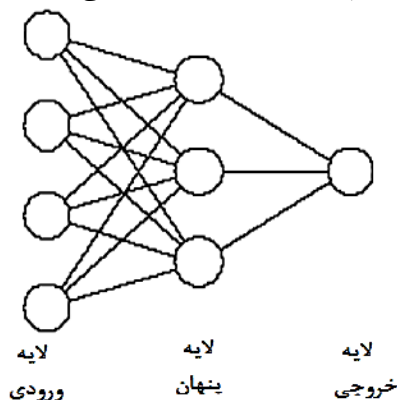
که  $a$ : ثابت معادله،  $\alpha, \beta, \gamma$ : توان‌های رابطه (۷) است.

نتایج رگرسیون غیرخطی بین شاخص خردایش و پارامترهای مستقل در جدول ۴ آورده شده است. جدول ۴: نتایج ارتباط رگرسیون غیرخطی بین شاخص خردایش و پارامترهای مستقل

پارامتر	مقدار
ثابت	۱۴۵/۴۶
$\alpha$	-۰/۸۵
$\beta$	۲/۴۷
$\gamma$	-۲/۱۸
ضریب تعیین (R <sup>2</sup> )	۰/۷۰

## ۴-۳- شبکه عصبی

شبکه‌های عصبی مصنوعی می‌توانند به عنوان یک ابزار نرم با مدلسازی باز خوردی مغز، در حل مسائل مورد استفاده قرار گیرد. شبکه‌های عصبی در زمینه‌های تخمین، دسته‌بندی، بهینه‌سازی و غیره در علوم مختلف به کار برده می‌شوند. یک ساختار ساده از شبکه عصبی شامل سه لایه ورودی، پنهان و خروجی است (شکل ۷). میزان نرون‌ها در لایه‌های ورودی و خروجی مشخص است، اما تعیین تعداد لایه پنهان و تعداد نرون لایه پنهان، بستگی به ماهیت مسئله، تعداد پارامترهای ورودی و خروجی دارد.



شکل ۷: ساختار ساده‌ای از شبکه عصبی مصنوعی

آموزش (یادگیری) شبکه عصبی از طریق تغییر وزن‌های ارتباطی بین نرون‌ها صورت می‌گیرد. به طور کلی آموزش شبکه عصبی بر دو نوع «آموزش با سرپرست» و «آموزش بدون سرپرست» است. در آموزش با سرپرست، مقادیر داده‌ها (متغیرهای توضیحی) و ستاده‌ها (متغیر وابسته) در مدل معرفی شده و هدف به دست آوردن مقادیر خروجی نزدیک به ستاده‌ها از طریق تغییر وزن‌های



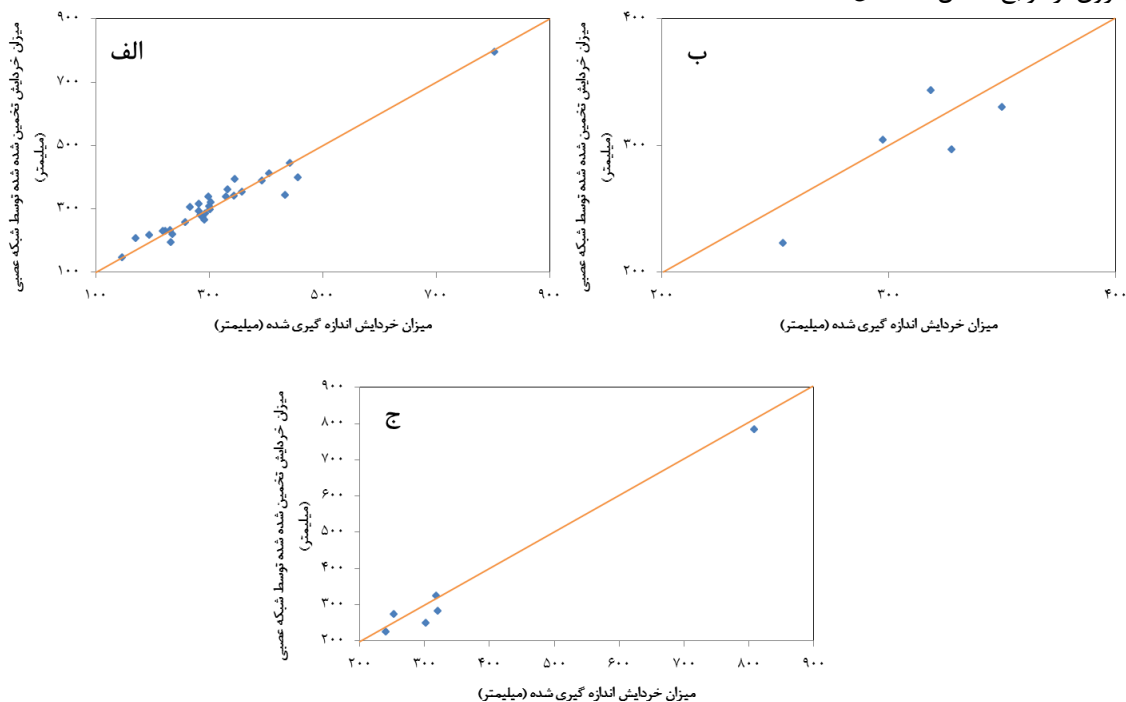
برای آزمایش و اعتبارسنجی شبکه عصبی مورد استفاده، ۳۰ درصد داده‌ها (به صورت تصادفی) به این دو بخش (آزمایش و اعتبارسنجی) اختصاص یافت و مابقی داده‌ها به بخش آموزش شبکه تخصیص داده شد. نتایج حاصل از شبکه عصبی در تعیین شاخص خردایش بر اساس پارامترهای ورودی در جدول ۵ آورده شده است. مقدار داده‌های تخمین زده شده توسط شبکه عصبی و مقادیر اندازه‌گیری شده خردایش در دسته‌بندی داده‌های آموزش، آزمایش و اعتبارسنجی در شکل ۸ نشان داده شده است. جدول ۵: نتایج پیش‌بینی خردایش ناشی از انفجار به وسیله شبکه عصبی

داده‌های آموزش	داده‌های آزمایش	داده‌های اعتبارسنجی
۰/۹۷	۰/۹۲	۰/۹۶
۲۶/۷۸	۲۲/۲۴	۳۰/۷۶

ارتباطی است. در آموزش بدون سرپرست تنها مقادیر داده‌ها به مدل معرفی می‌شود و مراحل یادگیری بدون مقادیر از قبل معرفی شده ستاده‌ها (متغیر وابسته) صورت می‌گیرد.

با توجه به ساختار شبکه عصبی و وجود نرون‌ها در لایه‌های مختلف، توابع انتقال (توابع فعال ساز) به کار گرفته شده تا تصمیم‌گیری در مورد آن که یک نرون خاص در شبکه‌های عصبی فعال شود یا خیر، انجام گیرد. این توابع در واقع یک قسمت در شبکه‌های عصبی هستند که ورودی آنها یک عدد است و خروجی آنها معمولاً یک عدد بین صفر و ۱ بوده و زمانی که مقدار خروجی نرون برابر ۱ است آن نرون فعال است.

در این مقاله پارامترهای مستقل در بخش رگرسیون به عنوان پارامترهای ورودی و شاخص خردایش به عنوان پارامتر خروجی در نظر گرفته شده است. تعداد لایه پنهان یک لایه و تعداد نرون لایه پنهان نیز با توجه به روش سعی و خطا، پنج نرون در نظر گرفته و در شبکه عصبی چند لایه پرسپترون از توابع انتقال Sigmoid استفاده شده است.



شکل ۸: ارتباط بین داده‌های خردایش تخمین زده شده و داده‌های اندازه‌گیری شده، (الف) داده‌های آموزش، (ب) داده‌های آزمایش، (ج) داده‌های اعتبارسنجی

با توجه به مدل‌های مورد استفاده برای پیش‌بینی شاخص خردایش (D80) بر اساس پارامترهای مستقل (خرج ویژه، مقاومت فشاری تک محوری، نسبت سرعت موج طولی، نسبت بعد فرکتال)، به منظور بررسی و مقایسه

ضریب تعیین در داده‌های آموزش، آزمایش و اعتبارسنجی در شبکه عصبی به ترتیب برابر ۰/۹۷، ۰/۹۲ و ۰/۹۶ است که نشان‌دهنده قابلیت پیش‌بینی شبکه عصبی در مقادیر شاخص خردایش (D80) است.

بُعد فرکتال استفاده شده است. برای پیش‌بینی خردایش ناشی از انفجار (D80) پارامترهای خرج ویژه (معرف) پارامترهای الگوی انفجار، نسبت سرعت موج طولی (معرف) پارامترهای توده‌سنگ و ماده‌سنگ، مقاومت فشاری تک محوری (ویژگی ماده‌سنگ) و نسبت بُعد فرکتال (معرف) شکل بلوک‌ها) استفاده شده است. ارتباط بین پارامترهای مستقل و پارامتر وابسته، با استفاده از مدل رگرسیون خطی، غیرخطی و شبکه عصبی مورد بررسی قرار گرفته است. با توجه به خصیصه‌های آماری میانگین مربعات خطا، ضریب VAF و ضریب تعیین، این مدل‌ها نسبت به یکدیگر در زمینه پیش‌بینی خردایش مورد مقایسه قرار گرفته‌اند. بر اساس میانگین مربعات خطا، مدل شبکه عصبی دارای کم‌ترین مقدار و مدل رگرسیون خطی دارای بیشینه مقدار است. میزان ضریب VAF مدل رگرسیون خطی، غیرخطی و شبکه عصبی به ترتیب برابر ۳/۱۸، ۷۰/۳۳ و ۹۵/۲۸ است. با توجه به مقایسه ضریب VAF مشخص می‌گردد که روش شبکه عصبی در پیش‌بینی مقادیر متغیر وابسته (شاخص خردایش) قابلیت بالایی دارد. ضریب تعیین در مدل رگرسیون خطی، رگرسیون غیرخطی و شبکه عصبی به ترتیب برابر ۰/۵۲، ۰/۷۰ و ۰/۹۶ است. ضریب تعیین مدل شبکه عصبی نسبت به مدل رگرسیون خطی و غیرخطی به مراتب بالاتر است که نشان‌دهنده برتری این مدل در پیش‌بینی مقادیر خردایش است.

## مراجع

- [1] Akbari, M., Lashkaripour, G., Bafghi, A. Y., & Ghafouri, M. (2015). Blastability evaluation for rock mass fragmentation in Iran central iron ore mines. *International Journal of Mining Science and Technology*, 25(1), 59-66.
- [2] Lyana, K. N., Hareyani, Z., Shah, A. K., & Hazizan, M. M. (2016). Effect of geological condition on degree of fragmentation in a Simpang Pulai marble quarry. *Procedia Chemistry*, 19, 694-701.
- [3] Sasaoka, T., Takahashi, Y., Sugeng, W., Hamanaka, A., Shimada, H., Matsui, K., & Kubota, S. (2015). Effects of rock mass conditions and blasting standard on fragmentation size at limestone quarries. *Open journal of geology*, 5(05), 331.
- [4] Mohamad, E. T., Armaghani, D. J., Hasanipناه, M., Murlidhar, B. R., & Alel, M. N. A. (2016). Estimation of air-overpressure produced by blasting operation through a neuro-genetic

مدل‌های پیش‌بینی خردایش (مدل رگرسیون خطی، مدل رگرسیون غیرخطی و شبکه عصبی) از میانگین مربعات خطا (رابطه ۸)، ضریب (VAF) (رابطه ۹) و ضریب تعیین (R2) (رابطه ۱۰) استفاده شده است [۳۰]. نتایج مشخصه‌های آماری مدل‌ها در جدول ۶ آورده شده است.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (y_{meas} - y_{pred})^2} \quad (8)$$

$$VAF = 100 \left[ 1 - \frac{var(y_{meas} - y_{pred})}{var(y_{meas})} \right] \quad (9)$$

$$R^2 = 100 \left[ \frac{(\sum_{i=1}^N (y_{meas} - \bar{y}_{meas})(y_{pred} - \bar{y}_{pred}))^2}{\sum_{i=1}^N (y_{meas} - \bar{y}_{meas})^2 \sum_{i=1}^N (y_{pred} - \bar{y}_{pred})^2} \right] \quad (10)$$

که  $y_{meas}$ : مقدار اندازه‌گیری شده،  $y_{pred}$ : مقدار پیش‌بینی شده،  $\bar{y}_{meas}$ : مقدار میانگین مقادیر اندازه‌گیری شده،  $\bar{y}_{pred}$ : مقدار میانگین پیش‌بینی شده، var: انحراف معیار است  
جدول ۶: مشخصه‌های آماری مدل‌های پیش‌بینی رگرسیون خطی، غیرخطی و شبکه عصبی

ضریب تعیین (R <sup>2</sup> )	میانگین		مشخصه آماری مدل
	ضریب (VAF)	مربعات خطا (RMSE)	
۰/۵۲	۳/۱۸	۱۲۵/۸۳	رگرسیون خطی
۰/۷۰	۷۰/۳۳	۶۱/۶۷	رگرسیون غیرخطی
۰/۹۶	۹۵/۲۸	۲۷/۶۸	شبکه عصبی

میانگین مربعات خطا در روش رگرسیون خطی نسبت به روش رگرسیون غیرخطی و شبکه عصبی بالاتر است که نشان‌دهنده توان پایین‌تر این روش در تخمین و پیش‌بینی شاخص خردایش است. همچنین با بررسی ضریب VAF و ضریب تعیین، مشخص می‌گردد که شبکه عصبی قابلیت مناسبی جهت پیش‌بینی خردایش با توجه به پارامترهای ورودی دارد.

## ۵- نتیجه‌گیری

پارامترهای موثر بر نتایج انفجار را می‌توان به دو دسته پارامترهای قابل کنترل و غیر قابل کنترل تقسیم‌بندی نمود. در تحقیقات پیشین، میزان اثر اندازه شکل بلوک‌ها برجا در خردایش توده‌سنگ در نظر گرفته نشده است. در این مقاله جهت کمی‌سازی اندازه شکل بلوک‌های برجا و خرد شده (به عنوان یکی از پارامترهای غیر قابل کنترل)، از

- Materials Characterization and Engineering, 5(06), 339.
- [16] Kuznetsov, V. M. (1973). The mean diameter of the fragments formed by blasting rock. *Soviet Mining*, 9(2), 144-148.
- [17] Cunningham, C. (1983). The Kuz-Ram Model for production of fragmentation from blasting. In Proc. 1<sup>st</sup> Symp. on Rock Fragmentation by Blasting, Lulea.
- [18] Hjelmberg, H. (1983, August). Some ideas on how to improve calculations of the fragment size distribution in bench blasting. In 1st International Symposium on Rock Fragmentation by Blasting. Lulea University Technology Lulea, Sweden (pp. 469-494).
- [19] Roy, P. P., & Dhar, B. B. (1996). Fragmentation analyzing scale—a new tool for breakage assessment. In Proceedings 5th international symposium on rock fragmentation by blasting-FRAGBLAST (Vol. 5).
- [20] Kanchibotla, S. S., Valery, W., & Morrell, S. (1999, November). Modelling fines in blast fragmentation and its impact on crushing and grinding. In *Explo '99—A conference on rock breaking*, The Australasian Institute of Mining and Metallurgy, Kalgoorlie, Australia (pp. 137-144).
- [21] Djordjevic, N. (1999). A two-component model of blast fragmentation. In *AusIMM Proceedings* (Vol. 2, pp. 9-13).
- [22] Gheibie, S., Aghababaei, H., Hoseinie, S. H., & Pourrahimian, Y. (2009). Modified Kuz—Ram fragmentation model and its use at the Sungun Copper Mine. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 46(6), 967-973.
- [23] Aler, J., Du Mouza, J., & Arnould, M. (1996). Evaluation of blast fragmentation efficiency and its prediction by multivariate analysis procedures. In *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts* (Vol. 7, No. 33, p. 315A).
- [24] Chakraborty, A. K., Raina, A. K., Ramulu, M., Choudhury, P. B., Haldar, A., Sahu, P., & Bandopadhyay, C. (2004). Parametric study to develop guidelines for blast fragmentation improvement in jointed and massive formations. *Engineering geology*, 73(1-2), 105-116.
- [25] Bahrami, A., Monjezi, M., Goshtasbi, K., & Ghazvinian, A. (2011). Prediction of rock fragmentation due to blasting using artificial neural network. *Engineering with Computers*, 27(2), 177-181.
- [26] Hudaverdi, T., Kuzu, C., & Fisne, A. (2012). Investigation of the blast fragmentation using the mean fragment size and fragmentation technique. *Environmental Earth Sciences*, 75(2), 174.
- [5] AminShokravi, A., Eskandar, H., Derakhsh, A. M., Rad, H. N., & Ghanadi, A. (2018). The potential application of particle swarm optimization algorithm for forecasting the air-overpressure induced by mine blasting. *Engineering with Computers*, 34(2), 277-285.
- [6] Murmu, S., Maheshwari, P., & Verma, H. K. (2018). Empirical and probabilistic analysis of blast-induced ground vibrations. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 103, 267-274.
- [7] Bakhtavar, E., Nourizadeh, H., & Sahebi, A. A. (2017). Toward predicting blast-induced flyrock: a hybrid dimensional analysis fuzzy inference system. *International journal of environmental science and technology*, 14(4), 717-728.
- [8] Faramarzi, F., Mansouri, H., & Farsangi, M. E. (2013). A rock engineering systems based model to predict rock fragmentation by blasting. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 60, 82-94.
- [9] MacKenzie, A. S. (1966, May). Cost of explosives—do you evaluate it properly. In *Mining Congress Journal* (Vol. 52, No. 5, pp. 32-41).
- [10] Taherkhani, H., & Doostmohammadi, R. (2015). Transportation costs: A tool for evaluating the effect of rock mass mechanical parameters on blasting results in open pit mining. *Journal of Mining Science*, 51(4), 730-742.
- [11] Singh, D. P., & Sastry, V. R. (1986). Influence of structural discontinuity on rock fragmentation by blasting. In *Proceedings of the 6th international symposium on intense dynamic loading and its effects*. Beijing. doi (Vol. 10).
- [12] Lyana, K. N., Hareyani, Z., Shah, A. K., & Hazizan, M. M. (2016). Effect of geological condition on degree of fragmentation in a Simpang Pulau marble quarry. *Procedia Chemistry*, 19, 694-701.
- [13] Singh, P. K., Roy, M. P., Paswan, R. K., Sarim, M., Kumar, S., & Jha, R. R. (2016). Rock fragmentation control in opencast blasting. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 8(2), 225-237.
- [14] Latham, J. P., & Lu, P. (1999). Development of an assessment system for the blastability of rock masses. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 36(1), 41-55.
- [15] Kulula, M. I., Nashongo, M. N., & Akande, J. M. (2017). Influence of Blasting Parameters and Density of Rocks on Blast Performance at Tschudi Mine, Tsumeb, Namibia. *Journal of Minerals and*

- [38] Hassanpour, S., & Afzal, P. (2013). Application of concentration–number (C–N) multifractal modeling for geochemical anomaly separation in Haftcheshmeh porphyry system, NW Iran. *Arabian Journal of Geosciences*, 6(3), 957-970.
- [39] Daya, A-A., & Moradi, R. (2018). Comparative analysis between concentration-number (CN) and concentration-area (CA) fractal models for separating anomaly from background in Siahrood 100,000 sheet, NW Iran. *Journal of Analytical and Numerical Methods in Mining Engineering*, 8(16), 87-95 (In Persian).
- [40] Geranian, H., Tokhmechi, B., & Heydari, A. (2014). Plotting Grade-Tonnage Curves with Fractal Methods and Comparing Them by Geostatistical Methods; a Case Study: Koh-e-Zar Gold Deposit in Torbat-e-Heydaryeh. *Journal of Analytical and Numerical Methods in Mining Engineering*, 3(6), 11-22 (In Persian).
- [41] Seyedrahimi-Niaaraq, M-M., Ghavami Riabi, R., Khalukakaei, R., Hezareh, M., & Hendi, R. (2012). Comparison results of gold mineralization geochemical data modeling from probability and concentration- area fractal plots in separation of subpopulations. *Journal of Analytical and Numerical Methods in Mining Engineering*, 1(1), 24-31 (In Persian).
- [42] Afzal, P., Ahmadi, K., & Rahbar, K. (2017). Application of fractal-wavelet analysis for separation of geochemical anomalies. *Journal of African Earth Sciences*, 128, 27-36.
- [43] Zhao, Y., Huang, J., & Wang, R. (1993, December). Fractal characteristics of mesofractures in compressed rock specimens. In *International journal of rock mechanics and mining sciences & geomechanics abstracts* (Vol. 30, No. 7, pp. 877-882). Pergamon.
- [44] Ehlen, J. (2000). Fractal analysis of joint patterns in granite. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 37(6), 909-922.
- [45] Billi, A., & Storti, F. (2004). Fractal distribution of particle size in carbonate cataclastic rocks from the core of a regional strike-slip fault zone. *Tectonophysics*, 384(1-4), 115-128.
- [46] Hamdi, E. (2008). A fractal description of simulated 3D discontinuity networks. *Rock mechanics and Rock engineering*, 41(4), 587-599.
- [47] Yasrebi, A. B., Wetherelt, A., Foster, P. J., Afzal, P., Coggan, J., & Ahangaran, D. K. (2013). Application of RQD- Number and RQD-Volume to delineate rock mass characterization in Kahang Cu-Mo porphyry deposit. *Archives of Mining Sciences*, 58(4), 1023-1035.
- index. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 56, 136-145.
- [27] Ebrahimi, E., Monjezi, M., Khalesi, M. R., & Armaghani, D. J. (2016). Prediction and optimization of back-break and rock fragmentation using an artificial neural network and a bee colony algorithm. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 75(1), 27-36.
- [28] Karami, A., & Afiuni-Zadeh, S. (2013). Sizing of rock fragmentation modeling due to bench blasting using adaptive neuro-fuzzy inference system (ANFIS). *International Journal of Mining Science and Technology*, 23(6), 809-813.
- [29] SHI, X. Z., Jian, Z. H. O. U., WU, B. B., HUANG, D., & Wei, W. E. I. (2012). Support vector machines approach to mean particle size of rock fragmentation due to bench blasting prediction. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 22(2), 432-441.
- [30] Mehrdanesh, A., Monjezi, M., & Sayadi, A. R. (2018). Evaluation of effect of rock mass properties on fragmentation using robust techniques. *Engineering with Computers*, 34(2), 253-260.
- [31] Yarahmadi Bafghi, A. R. (2013). Blastability Classification in Central Iron Ore Mines and Choghart Blastability Zoning. *Mining Engineering Research Center, Yazd University*, (In Persian).
- [32] Mandelbrot, B. B. (1982). *The fractal geometry of nature* (Vol. 1). New York: WH freeman.
- [33] Cheng, Q., Agterberg, F. P., & Ballantyne, S. B. (1994). The separation of geochemical anomalies from background by fractal methods. *Journal of Geochemical Exploration*, 51(2), 109-130.
- [34] Agterberg, F. P. (1995). Multifractal modeling of the sizes and grades of giant and supergiant deposits. *International Geology Review*, 37(1), 1-8.
- [35] Cheng, Q., Xu, Y., & Grunsky, E. (2000). Integrated spatial and spectrum method for geochemical anomaly separation. *Natural Resources Research*, 9(1), 43-52.
- [36] Li, C., Ma, T., & Shi, J. (2003). Application of a fractal method relating concentrations and distances for separation of geochemical anomalies from background. *Journal of Geochemical Exploration*, 77(2-3), 167-175.
- [37] Afzal, P., Alghalandis, Y. F., Khakzad, A., Moarefvand, P., & Omran, N. R. (2011). Delineation of mineralization zones in porphyry Cu deposits by fractal concentration–volume modeling. *Journal of Geochemical Exploration*, 108(3), 220-232.

- [48] Ficker, T. (2017). Fractal properties of joint roughness coefficients. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, (94), 27-31.
- [49] Crum, S. V. (1990, January). Fractal concepts applied to bench-blast fragmentation. In *The 31th US Symposium on Rock Mechanics (USRMS)*. American Rock Mechanics Association.
- [50] Ghosh, A., Daemen, J. J. K., & Van Zyl, D. (1990, January). Fractal-based approach to determine the effect of discontinuities on blast fragmentation. In *The 31th US Symposium on Rock Mechanics (USRMS)*. American Rock Mechanics Association.
- [51] Russell, D. A., Hanson, J. D., & Ott, E. (1980). Dimension of strange attractors. *Physical Review Letters*, 45(14), 1175.
- [52] Zuo, R., Cheng, Q., & Xia, Q. (2009). Application of fractal models to characterization of vertical distribution of geochemical element concentration. *Journal of Geochemical Exploration*, 102(1), 37-43.
- [53] Jaya, V., Raghukanth, S. T. G., & Sonika Mohan, S. (2014). Estimating fractal dimension of lineaments using box counting method for the Indian landmass. *Geocarto International*, 29(3), 314-331.
- [54] Boadu, F. K., & Long, L. T. (1994, April). The fractal character of fracture spacing and RQD. In *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts (Vol. 31, No. 2, pp. 127-134)*. Pergamon.
- [55] Mou, D., & Wang, Z. W. (2016). Comparison of box counting and correlation dimension methods in well logging data analysis associate with the texture of volcanic rocks.
- [56] Cohen, J., Cohen, P., West, S. G., & Aiken, L. S. (2003). *Applied multiple regression/correlation analysis for the behavioral sciences*.