1986
Imam Hossein
Comprehensive
University

Construction Science and Technology
Volume 6, Issue 2 , page : 1-12
https://stc.ihu.ac.ir/

Providing the optimal blast pattern to achieve the target crushing dimensions using a combination of neural network and optimization algorithms

Emad Ansari Ardehjani[*1], Seyed Farshid Shojaei[2], Mohammad Ataei[3], Raheb Bagherpour[4]

1. PhD candidate, Faculty of Mining, Petroleum and Geophysics Engineering, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran, Email: eaa.emad14@gmail.com
2. Senior Expert, Sanat and Mining Holding, Khatam Elania Manufacturing Base, Tharullah Kerman Institute, Kerman, Iran
3. Professor, Faculty of Mining, Petroleum and Geophysics Engineering, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran
4. Professor, Department of Mining Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran

ARTICLE INFO

Article history:

Article Type: Research paper

Received: 2024 November 19

Revised: 2025 August 2

Accepted: 2025 September 3

Available online: 2025 September 3

Keywords:

Blasting Optimization,

Fragmentation,

Neural Networks,

Metaheuristic Algorithms,

Mining Engineering

ABSTRACT

Optimal mining means doing the best possible way to extract a mineral. This is achieved by choosing the right extraction method and implementing it in the best possible way. This reduces both fixed and variable extraction costs and increases the profit from mining operations. This research focuses on optimizing blasting parameters to improve crushing efficiency and reduce costs in the mining industry. For this purpose, data from the Rockfill dam sedimentation in Dar Alo mine was used to conduct this research. A neural network model was developed to predict the crushing results based on various blasting parameters. Then, metaheuristic algorithms, including the Whale Optimization Algorithm (WOA) and the Firefly Algorithm (FA), were used to optimize blasting patterns. Three different patterns from metaheuristic algorithm methods were proposed to the mine. The results show that the WOA optimized pattern performs better than the FA optimized pattern in terms of dispersion and cost-effectiveness.

Cite this article: Ansari Ardehjani, E., Shojaee, S., Ataei, M., & Bagherpour, R. (2025). Providing the optimal blast pattern to achieve the target crushing dimensions using a combination of neural network and optimization algorithms.. Construction science and technology, 6(2), 1-12. **DOR** 20.1001.1.29812577.1404.6.2.1.7

علوم و فنون سازندگی

علوم و فنون سازندگی / سال ۱۴۰۴/ دوره ۶/ شماره ۲/ صفحه ۱۲-۱

https://stc.ihu.ac.ir/

ارائه الگوی انفجار بهینه برای دستیابی به ابعاد خردایش مطلوب با استفاده از ترکیبی از شبکه‌ی عصبی و الگوریتم‌های بهینه‌سازی

عماد انصاری اردەجانی[1*]، سید فرشید شجاعی[2]، محمد عطائی[3]، راحب باقرپور[4]

۱. دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران، ایمیل :eaa.emad14@gmail.com

۲. کارشناس ارشد، هلدینگ صنعت و معدن قرارگاه سازندگی خاتم الانبیاء، موسسه ثارالله کرمان، کرمان، ایران

۳. استاد تمام، دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران

۴. استاد تمام، گروه مهندس معدن، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران

چکیده

معدنکاری بهینه به معنای انجام بهترین روش ممکن برای استخراج یک ماده‌ی معدنی است. این مهم با انتخاب روش درست استخراج و اجرای آن در بهترین حالت ممکن محقق خواهد شد. این کار موجب کاهش هزینه‌های استخراجی ثابت و متغیر شده و سود ناشی از عملیات معدنکاری را افزایش می‌دهد. این تحقیق بر بهینه‌سازی پارامترهای عملیات انفجار برای افزایش کارایی خردایش و کاهش هزینه‌ها در معدنکاری تمرکز دارد. به این منظور از تعداد ۹۰ داده‌ی انفجاری معدن راکفیل سد رسوبگیر درآلو برای اجرای این پژوهش استفاده شد. یک مدل شبکه عصبی برای پیش‌بینی نتایج خردایش بر اساس پارامترهای مختلف انفجار از معدن توسعه داده شد. سپس با استفاده از الگوریتم‌های فراابتکاری نهنگ (WOA) و الگوریتم کرم شب تاب (FA)، الگوهای انفجار بهینه سازی شدند. سه الگوی مختلف از روش‌های الگوریتم‌های فراابتکاری به معدن پیشنهاد شده است. نتایج نشان می‌دهد که الگوی بهینه ارائه شده WOA از الگوی بهینه ارائه شده در الگوریتم FA از نظر پراکندگی و مقرون‌به‌صرفه بودن بهتر عمل می‌کند. الگوریتم نهنگ برای سنگ‌های ضعیف، الگوی ۳,۵×۴ را پیشنهاد کرده است. همچنین برای سنگ قوی‌تر نیز الگوهای ۲,۷۵×۲,۷۵ و ۳×۲,۷۵ به ترتیب با استفاده از الگوریتم‌های کرم شب‌تاب و نهنگ پیشنهاد شده است.

مشخصات مقاله

تاریخچه مقاله:

نوع مقاله: علمی پژوهشی

دریافت: ۱۴۰۳/۰۸/۲۹

بازنگری: ۱۴۰۴/۰۵/۱۱

پذیرش: ۱۴۰۴/۰۶/۱۲

ارائه آنلاین: ۱۴۰۴/۰۶/۱۲

کلید واژه ها:

بهینه‌سازی انفجار،

خردایش،

شبکه‌ی عصبی،

الگوریتم‌های فراابتکاری،

مهندسی معدن

استناد: انصاری اردەجانی, عماد, شجاعی, سید فرشید, عطایی, محمد, & باقرپور, راحب. (۱۴۰۴). ارائه الگوی انفجار بهینه برای رسیدن به ابعاد خردایش هدف با استفاده از ترکیبی از شبکه‌ی عصبی و الگوریتم‌های بهینه‌سازی. علوم و فنون سازندگی, ۶(۲), ۱-۱۲. DOR 20.1001.1.29812577.1404.6.2.1.7

ناشر: دانشگاه جام امام حسین(ع).

۱. مقدمه

بهینه‌سازی عملیات چالزنی و آتشکاری در معادن، کلید کاهش هزینه‌ها و افزایش بهره‌وری است. این عملیات که نزدیک به ۴۰ درصد از هزینه‌های تولید را شامل می‌شود، شامل حفر چال‌ها در سنگ و انفجار آن‌ها برای خرد کردن سنگ معدن است. هدف اصلی بهینه‌سازی، انتخاب بهترین روش حفاری و انفجار است تا بتوان با کمترین هزینه، سنگ معدن را با کیفیت مناسب خرد کرد. این کار علاوه بر کاهش هزینه‌های مستقیم مانند هزینه مواد منفجره و انرژی، به کاهش هزینه‌های جانبی مانند بارگیری، حمل و نقل و خردایش ثانویه نیز کمک می‌کند. روش‌های مختلفی برای بهینه‌سازی عملیات چالزنی و آتشکاری وجود دارد. روش‌های تجربی اغلب بر پایه‌ی آزمون و خطا هستند و ممکن است زمان‌بر و پرهزینه باشند. در مقابل، الگوریتم‌های بهینه‌سازی با استفاده از داده‌ها و مدل‌های ریاضی، بهترین تنظیمات را برای عملیات انفجار پیشنهاد می‌دهند. با بهینه‌سازی این عملیات، می‌توان به اهداف زیر دست یافت:

- کاهش هزینه‌های تولید: با کاهش مصرف مواد منفجره و انرژی و بهبود بهره‌وری تجهیزات.
- بهبود کیفیت خردایش: با کنترل دقیق انرژی انفجار و ایجاد شکستگی‌های یکنواخت در سنگ.
- کاهش اثرات زیست محیطی: با کاهش تولید گرد و غبار، لرزش و صدا.

۲. پیشینه پژوهش

برای توسعه یک الگوی بهینه حفاری و انفجار، روش‌های مختلفی می‌توانند به کار گرفته شوند، از جمله روش‌های تجربی و الگوریتم‌های بهینه‌سازی متاهیوریستیک نوآورانه. روش‌های تجربی شامل آزمون و خطا و آزمایش الگوهای انفجاری مختلف برای یافتن الگویی مناسب است که نیازهای تکه‌تکه شدن را برآورده کرده و هزینه‌ها را کاهش دهد. با این حال، به دلیل خطرات و هزینه‌های مرتبط با این رویکرد، استفاده از آن به تنهایی توصیه نمی‌شود. الگوریتم‌های بهینه‌سازی مدرن امکان انتخاب بهترین گزینه از میان گزینه‌های متعدد و شرایط متغیر را فراهم می‌کنند. توصیه می‌شود ابتدا الگوها را با استفاده از روش‌های تجربی پیشنهاد و اجرا کرده و سپس با استفاده از الگوریتم‌های بهینه‌سازی آن‌ها را اصلاح کرد تا الگوی بهینه حفاری و انفجار برای معدن به دست آید. پژوهشگران در سال ۲۰۲۰ الگوریتم رقابتی امپریالیستی (ICA)، خوشه‌بندی k-means و روش TOPSIS را برای بهینه‌سازی الگوهای انفجار در معدن مس سونگون ایران ترکیب کردند. اما نتایج آن‌ها با الگوریتم‌های بهینه‌سازی پیشرفته (مانند الگوریتم‌های ژنتیک، PSO) مقایسه نشد تا برتری رویکرد ترکیبی ICA-k-means-TOPSIS تأیید شود [۸]. محققان در سال ۲۰۲۲ از الگوریتم بهینه‌سازی ملخ (GOA) برای بهینه‌سازی پارامترهای انفجار استفاده کردند، اما این الگوریتم به رویکرد آزمون و خطا وابسته بود که زمان‌بر بوده و فاقد دقت سیستماتیک است [۱۱]. در سال ۲۰۲۳ مدل شبکه عصبی بیزی مبتنی بر اهمیت جایگشتی (PI-BANN) و رگرسیون چندمتغیره (MVR) را برای پیش‌بینی نرخ تولید انفجار (BPR) در معادن سنگ آهک هند توسعه داده شد. اما مدل‌های آن‌ها تنها بر داده‌های معادن سنگ آهک هند آموزش دیده بودند و قابلیت تعمیم به مناطق زمین‌شناسی یا معدنی دیگر را نداشتند و تنها با ۲۰ دور انفجار آزمایش شدند [۱۴]. در یک تحقیق در سال ۲۰۲۴ مدل پیش‌بینی هزینه انفجار (BC) را با استفاده از الگوریتم‌های کرم شب‌تاب (FF) و گرگ خاکستری (GWO) بر اساس داده‌های شش معدن سنگ آهک ایران توسعه داده شد، اما از شبکه عصبی برای تأیید برتری الگوریتم‌های FF/GWO استفاده نکردند. این می‌توانست کار آن‌ها را بهبود بخشد [۱۹]. در سال ۲۰۲۴ رویکرد مبتنی بر شبکه عصبی کانولوشنی (CNN) با معماری اصلاح‌شده U-Net را برای تشخیص لبه قطعات سنگ منفجر شده و تحلیل توزیع اندازه پیشنهاد شد. اما آن‌ها چالش‌های واقعی مانند نورپردازی ضعیف، تداخل گردوغبار یا زوایای دوربین که بر کیفیت تصویر در حین استقرار میدانی تأثیر می‌گذارند را در نظر نگرفتند [۱۶]. خلاصه‌ای از تحقیقات اخیر در زمینه بهینه‌سازی انفجار در جدول ۱ ارائه شده است. با توجه به کمبودهای موجود در مرور ادبیات و نیاز اعلام‌شده یک معدن سنگ‌ریزه برای بهینه‌سازی الگوی حفاری و انفجار به منظور دستیابی به اندازه‌های تکه‌تکه مناسب، این تحقیق انجام و ارائه شد. ۹۰ نقطه داده انفجاری از این معدن برای این تحقیق استفاده شد. به طور کلی، بهینه‌سازی عملیات چالزنی و آتشکاری، یک گام مهم در جهت افزایش بهره‌وری و کاهش هزینه‌های تولید در صنعت معدنکاری است. با استفاده از روش‌های مناسب و فناوری‌های نوین، می‌توان به نتایج قابل توجهی در این زمینه دست یافت. برای توسعه یک الگوی بهینه حفاری و انفجار، می‌توان از روش‌های مختلفی از جمله روش‌های تجربی و الگوریتم‌های بهینه‌سازی فراابتکاری نوآورانه استفاده کرد. روش‌های تجربی شامل آزمون و خطا، آزمایش الگوهای مختلف انفجار برای یافتن الگوی مناسبی است که الزامات خردایش را برآورده کرده و هزینه‌ها را کاهش دهد.

بااین‌حال، به دلیل خطرات و هزینه‌های ذاتی مرتبط با این رویکرد، به عنوان یک روش مستقل توصیه نمی‌شود.

الگوریتم‌های بهینه‌سازی مدرن، انتخاب بهترین گزینه ممکن را از بین گزینه‌های متعدد و شرایط متغیر امکان‌پذیر می‌کنند. توصیه می‌شود ابتدا الگوها را با استفاده از روش‌های تجربی پیشنهاد و پیاده‌سازی شود و سپس آن‌ها را با استفاده از الگوریتم‌های بهینه‌سازی اصلاح گردد تا به یک الگوی بهینه حفاری و انفجار برای معدن دست یافت.این پژوهش با هدف بهبود عملیات چالزنی و آتشکاری در یک معدن خاص انجام شده است. هدف، دستیابی به ابعاد خردایش مناسب سنگ برای مصارف بعدی مانند ساخت آب‌بند و موج‌شکن بوده است. محققان با استفاده از داده‌های انفجارهای قبلی و تحلیل تصاویر، الگوهای مختلفی را بررسی کرده و در نهایت با ترکیب روش‌های تجربی و الگوریتم‌های هوش مصنوعی (شبکه عصبی، کرم شب‌تاب و نهنگ)، سه الگوی بهینه برای انفجار در این معدن پیشنهاد داده‌اند. این الگوها با توجه به نیازهای خاص این معدن و با هدف کاهش هزینه‌ها و افزایش بهره‌وری معدن محاسبه و ارائه شده‌اند.

۳. روش تحقیق

۱،۳. مطالعه موردی و جمع‌آوری اطلاعات

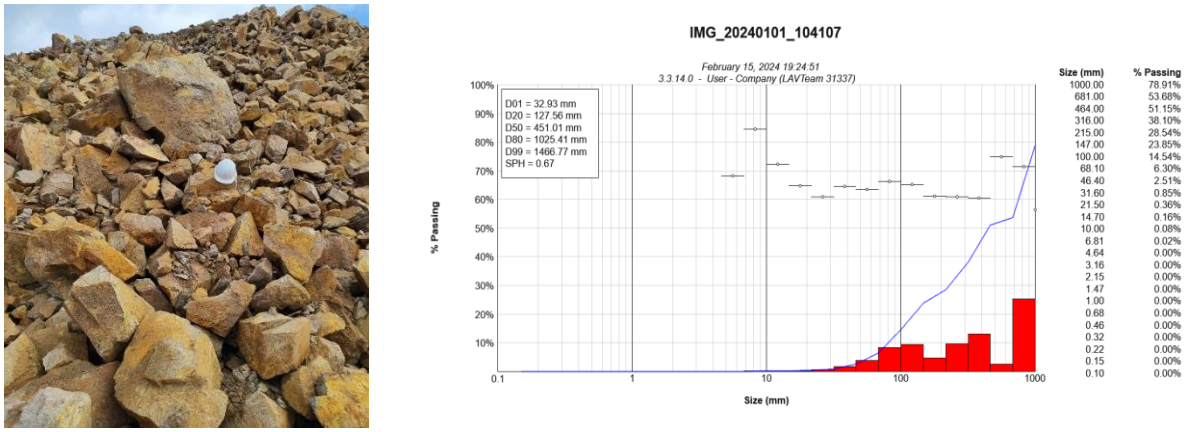
این پژوهش با هدف بهبود نتایج انفجار در یک معدن سنگ انجام شده است. محققان با تحلیل تصاویر ۸ انفجار قبلی و مقایسه نتایج با ابعاد مورد نیاز، علل عدم موفقیت در دستیابی به خردایش مطلوب را بررسی کرده‌اند. با استفاده از نرم‌افزارهای تحلیل تصویر و یک شاخص استاندارد (کلاه ایمنی)، اندازه ذرات پس از انفجار اندازه‌گیری شده است. هدف نهایی، بهبود الگوهای انفجار و دستیابی به ابعاد خردایش مطلوب است. در جدول ۲ ابعاد خردایش مورد نیاز نشان داده شده است. برای نمونه در در شکل ۱ یک نمونه از تصاویر مربوط به آنالیز خردایش پس از انفجار نشان داده شده است. پردازش تصویر با استفاده از نرم افزار WipFrag نسخه ۳،۳. انجام شده است.

جدول ۱. سابقه‌ی موضوع

پژوهشگر	سال	موضوع	روش مورد استفاده	پارامترهای مورد بررسی	ارجاع
Jahed *et al.*	2015	Prediction of blast-induced air overpressure: a hybrid AI-based predictive model	شبکه عصبی	پارامترهای آتشکاری	[1]
Jahed *et al.*	2015	Neuro-fuzzy technique to predict air-overpressure induced by blasting	روش فازی	پارامترهای آتشکاری	[2]
Jahed *et al.*	2016	A combination of the ICA-ANN model to predict air-overpressure resulting from blasting	شبکه عصبی	پارامترهای آتشکاری	[3]
Ataei & Sereshki	2017	Improved prediction of blast-induced vibrations in limestone mines using Genetic Algorithm	الگوریتم فرابتکاری	پارامترهای الگوی انفجار	[4]
Hoseini *et al.*	2018	A quantitative model for evaluation and classification of blastings in open-pit mines	تجربی	پارامترهای آتشکاری	[5]
Ataei et al.	2019	An experimental study of the repeated blasting effect on surrounding rock weakness incorporating ultrasonic wave velocity measurement	تجربی	پارامترهای آتشکاری	[6]
Mulenga & Kaunda	2020	Blast Design for Improved Productivity using a Modified Available Energy Method	تجربی	پارامترهای آتشکاری	[7]
Mohammadi *et al.*	2020	Investigating and Ranking Blasting Patterns to Reduce Ground Vibration using Soft Computing Approaches and MCDM Technique	تجربی	پارامترهای آتشکاری	[8]
Moomivand *et al.*	2021	A new approach to improve the assessment of rock mass discontinuity spacing using image analysis technique	تجربی-پردازش تصویر	قابلیت انفجار توده‌ی سنگ، درزه داری توده سنگ و پارامترهای عملیات انفجار	[9]
Li *et al.*	2021	Prediction of blasting mean fragment size using support vector regression combined with five optimization algorithms	الگوریتم فرابتکاری	پارامترهای الگوی انفجار	[10]
Bayat *et al.*	2022	Blasting pattern optimization using gene expression programming and grasshopper optimization algorithm to minimise blast-induced ground vibrations	الگوریتم فرابتکاری	پارامترهای آتشکاری	[11]
Moomivand *et al.*	2022	Development of new comprehensive relations to assess rock fragmentation by blasting for different open pit mines using GEP algorithm and MLR procedure	الگوریتم‌های فرابتکاری برای بهبود خردایش حاصل از انفجار	پارامترهای آتشکاری	[12]
Shamsi *et al.*	2022	Prediction of fly-rock using gene expression programming and teaching–learning-based optimization algorithm.	الگوریتم‌های فرابتکاری	پارامترهای آتشکاری	[13]
Taiwo	2022	Improvement of small-scale dolomite blasting productivity: comparison of existing empirical models with image analysis software and artificial neural network models	تجربی	پارامترهای آتشکاری	[14]
Taiwo *et al.*	2023	Artificial neural network modeling as an approach to Limestone blast production rate prediction: A comparison of PI-BANN, and MVR models	شبکه عصبی و الگوریتم‌های فرابتکاری	پارامترهای آتشکاری	[15]
Sharifi *et al.*	2024	Determining Rock Fragment Size Distribution Using a Convolutional Neural Network	شبکه عصبی و الگوریتم‌های فرابتکاری	پارامترهای آتشکاری	[16]
Nguyen et al.	2024	Enhanced Prediction Model for Blast-Induced Air Over-Pressure in Open-Pit Mines Using Data Enrichment and Random Walk-Based Grey Wolf Optimization–Two-Layer ANN Model	شبکه عصبی	پارامترهای آتشکاری	[17]
Rabbani *et al.*	2024	Optimization of an artificial neural network using four novel metaheuristic algorithms for the prediction of rock fragmentation in mine blasting	شبکه عصبی	پارامترهای آتشکاری	[18]
Fattahi *et al.*	2024	Enhancing blasting efficiency: A smart predictive model for cost optimization and risk reduction	الگوریتم‌های فرابتکاری	هزینه انفجار	[19]

جدول ۲. ابعاد خردایش مورد نیاز

ابعاد خردایش بهینه (cm)	شماره سرند	ابعاد خردایش $X_n \geq$
70-80	X_{99}	ابعاد خردایش ≥ 80
$60 \leq X_{80} \leq 70$	X_{80}	ابعاد خردایش ≥ 70
$40 \leq X_{50} \leq 60$	X_{50}	ابعاد خردایش ≥ 40
$15 \leq X_{20} \leq 25$	X_{20}	-



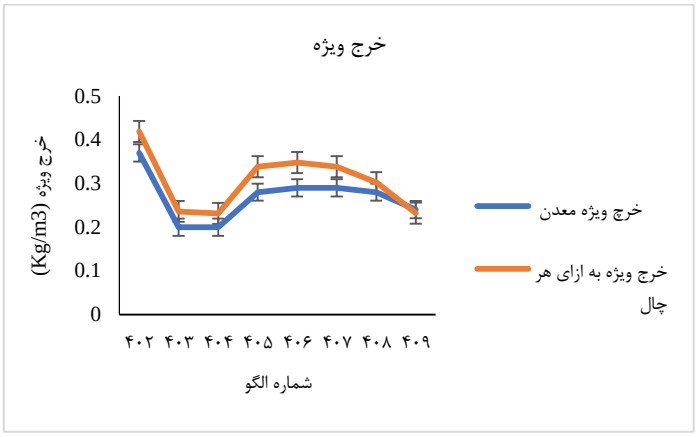
شکل ۱. توده سنگ انفجاری و آنالیز خردایش حاصل از اجرای الگوی ۴۰۷

۸ الگوی انفجاری (۴۰۲ تا ۴۰۹) با پارامترهایی مثل خرج ویژه و حفاری ویژه در این معدن اجرا شده‌اند. پارامترهای هر الگو در جدول ۳ آورده شده است. شکل ۲ مقایسه خرج ویژه واقعی و محاسباتی را نشان می‌دهد. خرج ویژه واقعی بیشتر از محاسباتی است. دلایل این تفاوت عبارتند از: عدم رعایت اضافه حفاری، ناهموار بودن سطح سینه‌کار و اختلاف در طول گل‌گذاری. خرج ویژه هر چال با تقسیم وزن خرج انفجاری بر حجم سنگ استخراج شده محاسبه شده است.

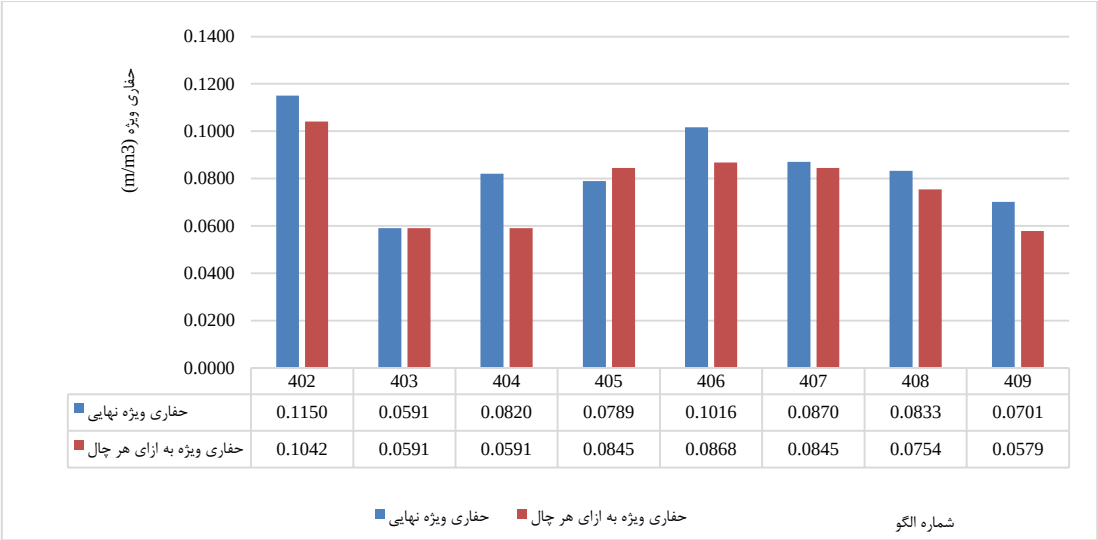
در شکل ۳ مقایسه میان حفاری ویژه برای هر چال و حفاری ویژه نهایی هر الگو نشان داده شده است. مطابق جدول ۳ و شکل ۳ این مقادیر در الگوهای ۴۰۳، ۴۰۵، ۴۰۷ و ۴۰۸ تقریباً برابر است؛ و تنها در دو الگوی ۴۰۴ و ۴۰۶ حفاری ویژه متوسط نهایی مقداری از حفاری ویژه هر چال بیشتر است. از علل این امر می‌توان به دو عامل عدم رعایت متراژ اضافه حفاری و تغییرات سطح تراز سینه‌کار انفجاری به دلیل تغییرات جنس سنگ و آتشکاری نامناسب قبلی و ایجاد پاشنه و یا خردایش بیش از حد اشاره کرد. حفاری ویژه از تقسیم طول هر چال بر مترمکعب سنگ استخراجی توسط هر چال محاسبه شده است.

جدول ۳. پارامترهای عملیات انفجار

شماره الگو	تعداد چال	B	S	S/B	عمق حفاری (m)	طول گل‌گذاری (m)	طول خرج گذاری (m)	قطر چال (mm)	مترمکعب هر چال	وزن آنفو محاسباتی (Kg)	خرج ویژه معدن (Kg/m3)	خرج ویژه به ازای هر چال	حفاری ویژه (m/m3)	حفاری ویژه به ازای هر چال
۴۰۲	۱۲۵	۳	۳.۲	۱.۰۷	۸.۴	۲.۵	۵.۹	۰.۰۹	۸۰.۶۴	۳۳.۷۶	۰.۳۷	۰.۴۲	۰.۱۱۵	۰.۱۰۴
۴۰۳	۹۷	۳.۶	۴.۷	۱.۳۱	۹.۶	۲.۹	۶.۷	۰.۰۹	۱۶۲.۴۳	۳۸.۳۴	۰.۲	۰.۲۴	۰.۰۵۹	۰.۰۵۹
۴۰۴	۹۲	۳.۶	۴.۷	۱.۳۱	۹.۲	۲.۹	۶.۳	۰.۰۹	۱۵۵.۶۶	۳۶.۰۵	۰.۲	۰.۲۳	۰.۰۸۲	۰.۰۵۹
۴۰۵	۸۰	۳.۲	۳.۷	۱.۱۶	۱۰.۸	۳.۲۴	۷.۵۶	۰.۰۹	۱۲۷.۸۷	۴۳.۲۶	۰.۲۸	۰.۳۴	۰.۰۷۹	۰.۰۸۴
۴۰۶	۷۰	۳.۲	۳.۶	۱.۱۳	۷.۸	۲.۳۴	۵.۴۶	۰.۰۹	۸۹.۸۶	۳۱.۲۵	۰.۲۹	۰.۳۵	۰.۱۰۲	۰.۰۸۷
۴۰۷	۱۱۶	۳.۲	۳.۷	۱.۱۶	۹.۷	۲.۹۱	۶.۷۹	۰.۰۹	۱۱۴.۸۵	۳۸.۸۶	۰.۲۹	۰.۳۴	۰.۰۸۷	۰.۰۸۴
۴۰۸	۱۰۵	۳.۴	۳.۹	۱.۱۵	۸.۲	۲.۴۶	۵.۷۴	۰.۰۹	۱۰۸.۷۳	۳۲.۸۵	۰.۲۸	۰.۳۰	۰.۰۸۳	۰.۰۷۵
۴۰۹	۱۳۰	۳.۶	۴.۸	۱.۳۳	۸.۲	۲.۴۶	۵.۷۴	۰.۰۹	۱۴۱.۷۰	۳۲.۸۵	۰.۲۴	۰.۲۳	۰.۰۷۰	۰.۰۵۸

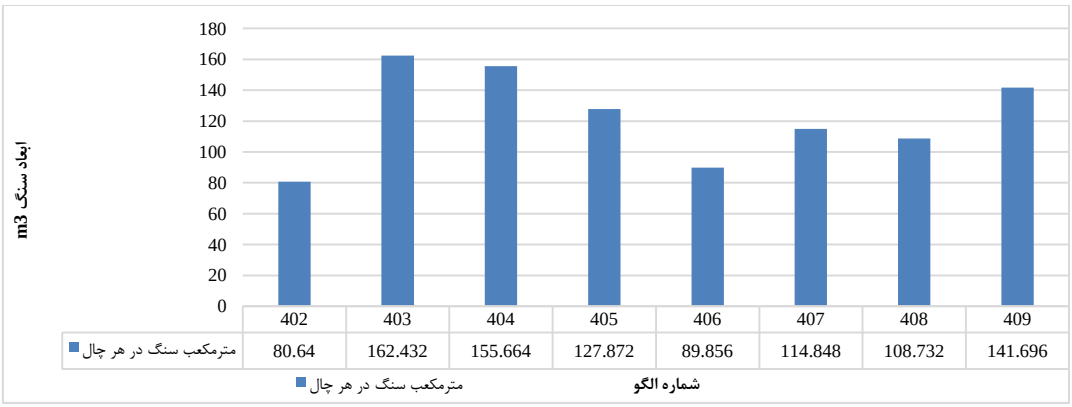


شکل ۲. مقایسه خرج ویژه در هر چال و خرج ویژه متوسط نهایی



شکل ۳. مقایسه حفاری ویژه در هر چال و حفاری ویژه متوسط نهایی

شکل ۴ حجم سنگ استخراجی هر چال را نشان می‌دهد. افزایش حجم منجر به بزرگتر شدن ابعاد شبکه انفجار می‌شود. الگوهای ۴۰۶ و ۴۰۷ به ابعاد خردایش موردنظر نزدیک‌تر هستند. با بررسی جدول ۳، مشخص می‌شود که شبکه با بارسنگ ۳/۲ و فاصله ردیفی ۳/۶ برای عمق چال ۸ تا ۱۰ متر مناسب است. به طور کلی، بهتر است فاصله ردیفی در حدود ۱/۱۵ برابر بارسنگ باشد. نتایج کامل خردایش در جدول ۴ آورده شده است. پردازش تصویر با استفاده از نرم افزار WipFrag نسخه ۳,۳ انجام شده است.



شکل ۴. مقایسه ابعاد بلوک استخراجی به ازای هر چال در هر الگو

جدول ۴. نتایج کلی انفجار

شماره الگو	تفسیر انفجار
۴۰۲	این الگو تا حدودی می‌تواند نیازهای خردایش هدف معدن را برآورده کند؛ اما بنا به دلایلی که می‌تواند بیشتر به اجرای نادرست شبکه انفجار بر روی سینه‌کار مربوط باشد، خردایش حاصله تا حدودی منطبق بر خردایش هدف نیست.
۴۰۳	با توجه به ریزدانه بودن بخشی از انفجار و تا حدودی مناسب بودن بخش دیگر انفجار، عامل یکنواخت نبودن پخش انرژی حاصل از انفجار را علت این اتفاق دانست. البته از آنجایی که ابعاد بولدر حاصله بسیار بزرگ نیست می‌توان نتیجه گرفت در صورت اجرای درست، این شبکه الگو پاسخگوی این نوع جنس سنگ خواهد بود.
۴۰۴	شرایط مشابه با الگوی ۴۰۳
۴۰۵	شرایط مشابه با الگوی ۴۰۳
۴۰۶	نتیجه‌ی انفجار مناسب است. این شماره‌ی الگو و شبکه‌ی آن در صورت اجرای درست می‌تواند به‌عنوان الگوی مناسب در معدن M1 استفاده شود.
۴۰۷	نتیجه‌ی انفجار مناسب است. این شماره‌ی الگو و شبکه‌ی آن در صورت اجرای درست می‌تواند به‌عنوان الگوی مناسب در معدن M1 استفاده شود.
۴۰۸	بخشی به‌شدت ریزدانه و بخشی با بولدرهای بزرگ به دلیل عدم اجرای درست الگوی انفجار و عدم پخش یکنواخت انرژی حاصل از انفجار در سنگ.
۴۰۹	به‌شدت ریزدانه؛ با توجه به بزرگ‌تر شدن شبکه‌ی الگوی انفجار این پدیده به دلیل تغییرات جنس سنگ و ضعیف بودن سنگ منطقه روی داده است.

کلید اصلی برای بهینه کردن عملیات انفجار در این مجموعه معادن سنگ نخست شامل، تعیین میزان و مقدار ابعاد سنگ خرد شده‌ی مورد نیاز است. بدان معنا که میزان و حجم مورد نیاز برای هر اندازه از سنگ تعیین شود تا بر اساس آن الگوی انفجار ارائه شود؛ دوم اینکه الگوی پیشنهادی به‌درستی بر روی سینه‌کار پیاده‌سازی و اجرا شود.

۲،۳. تجزیه و تحلیل الگوهای انفجاری اجرا شده در معدن

با توجه به پردازش شکل و محاسبه‌ی ابعاد خردایش آتشکاری‌های انجام شده در این مجموعه معادن سنگ و بازدید از سینه‌کارهای استخراجی، موارد زیر در مورد نتیجه‌ی آتشکاری‌های انجام شده در معدن به چشم خورد:

۱- تشکیل قطعات بولدر پس از آتشکاری
۲- قطعات به‌شدت ریزدانه و خرد شده
۳- عقب‌زدگی‌های شدید پس از هر انفجار
۴- عدم خردایش یکنواخت و متناسب با ابعاد هدف (قرارگیری دانه‌بندی توده سنگ انفجاری در بازه‌ی بسیار خرد شده و یا بولدر)
۵- عدم رعایت شبکه‌ی انفجار طراحی شده در تمام سطح سینه‌کار انفجاری (تغییرات ناهماهنگ بارسنگ و فاصله‌ی ردیفی چال‌ها در سطح سینه‌کار انفجاری)
۶- عدم رعایت فاصله‌ی بارسنگ در لبه‌ی سینه‌کار (بارسنگ کوچک‌تر از بارسنگ طراحی شده است)
۷- عدم متر‌کشی درست در زمان پیاده‌سازی الگوی چالزنی
۸- عدم رعایت اضافه حفاری و تشکیل پاشنه در کف پله‌ها
۹- عدم لق‌گیری دیواره‌ی سینه‌کارهای انفجاری پیش از چالزنی برای آتشکاری بعدی

۳،۳. ارائه‌ی الگوی آتشکاری با استفاده از روش‌های تجربی

از آنجایی تمام پارامترهای هندسی الگوی آتشکاری و نتایج حاصل از آن شامل ابعاد خردایش، لرزش زمین، لرزش هوا، عقب‌زدگی، ایجاد پاشنه، تشکیل بولدر و قطعات بزرگ سنگ و مواردی از این دست به طور مستقیم با بارسنگ در ارتباط هستند، بنابراین در ابتدا با استفاده از فرمول‌ها و روابط تجربی، بارسنگ مناسب برای معدن سنگ محاسبه می‌شود. با این کار می‌توان به صورت تجربی و تقریبی پارامترهای هندسی مربوط به الگوی انفجار را محاسبه کرد. همچنین امکان پیش‌بینی تقریبی ابعاد خردایش و نتایج حاصل از اجرای این الگوهای پیشنهادی وجود دارد. به این منظور از دو فرمول تجربی

پرکاربرد آش و کُونیا استفاده شده است. روابط ۱ و ۲ این دو فرمول تجربی را نشان می‌دهند. اطلاعات مورد نیاز برای محاسبه‌ی تجربی بارسنگ در معدن سنگ با استفاده از دو رابطه‌ی آش و کُونیا به شرح جدول ۵ است. محاسبات مربوطه برای محاسبه بارسنگ بوسیله این دو رابطه در جدول ۶ آورده شده است[20].

$$B = \frac{\varphi_h \times K_b}{12} \quad \text{رابطه اش} \quad (۱)$$

$$B = 3.15 \times \varphi_h \times (\frac{\rho_e}{\rho_r})^{0.33} \quad \text{رابطه کونیا} \quad (۲)$$

φ_h قطر چال.

K_b ضریبی که به ماده منفجره و سنگ مربوط می شود و از ۱۴ تا ۴۹ تغییر می‌کند و به طور میانگین ۳۰ در نظر گرفته می‌شود.

ρ_e وزن مخصوص ماده‌ی منفجره.

ρ_r وزن مخصوص سنگ.

جدول ۵. اطلاعات مربوطه برای محاسبه‌ی بارسنگ در معدن سنگ با استفاده از دو رابطه‌ی اش و کونیا

اطلاعات ورودی	اندازه
وزن مخصوص ماده‌ی منفجره (آنفو)	900 (Kg/m^3)
وزن مخصوص سنگ	2400 (Kg/m^3)
قطر چال	90 mm
قطر چال	125 mm
ارتفاع پله	8 m

جدول ۶. محاسبه‌ی بارسنگ در معدن سنگ

بارسنگ محاسبه شده با قطر ۹۰ (m)	حداقل (m)	متوسط (m)	حداکثر (m)
رابطه‌ی آش	۱	۲,۵	۳
رابطه کُونیا	۲	۲	۲
بارسنگ محاسبه شده با قطر ۱۱۰ (m)	**حداقل (m)**	**متوسط (m)**	**حداکثر (m)**
رابطه‌ی آش	۱,۳	۲,۷۵	۴,۵
رابطه کُونیا	۲,۵	۲,۵	۲,۵

همچنین علاوه بر روابط پرکاربرد یاد شده می‌توان اندازه‌ی بارسنگ را با استفاده از ارتباط آن با قطر چال(Φ_h) و ارتفاع پله (H) به صورت تجربی و حدودی محاسبه کرد. این روابط به ترتیب در معادلات ۳ و ۴ آورده شده است[20].

$$B = K_b \, \Phi_h \quad (۳)$$

K_b = ضریب ثابت، شامل فاکتورهای انرژی انفجاری و چگالی سنگ است.

$$H = K_H B \quad (۴)$$

K_H = ضریب ثابت، به طور معمول $K_H > 1$ است ، اما بیشتر بین ۱/۵ تا ۲ است.

لازم به ذکر است این مقدار تجربی بوده و سایر محققین به اعداد مختلفی برای این ضریب رسیده‌اند. بر اساس تجربیات و آتشکاری‌های انجام شده بهترین مقدار این ضریب در حدود ۳ است. برای محاسبه بارسنگ به روش تجربی و استفاده از تجربیات محققین و رعایت نکات زیر الزامی است:

۱. نسبت قطر چال به ارتفاع پله باید حداقل $60 \leq \frac{H}{\Phi_h}$ باشد.

نسبت ارتفاع پله به بارسنگ باید حداقل $3 \leq \frac{H}{B}$ باشد. برای شرایط $1 = \frac{H}{B}$ امکان ایجاد بولدر و قطعات سنگ با ابعاد درشت و ایجاد پاشه در کف پله بسیار محتمل است. که کار ماشین آلات بارگیری را بسیار دشوار خواهد کرد. لازم به ذکر است اگر $2 = \frac{H}{B}$ باشد مشکلات مطرح شده تا حدودی حل خواهد شد [20].

با توجه به مطالب گفته شده بهترین مقدار قطر چال با توجه به ارتفاع ۸ متری پله‌های معدن سنگ بر اساس روابط تجربی حداقل معادل ۱۳۵ سانتی‌متر است. اما با توجه به دستگاه چالزنی موجود در سر معدن، که یک دریل واگن است قطر چال انفجاری حفر شده حداکثر معادل ۱۱۰ سانتی‌متر خواهد بود. به این منظور تمام محاسبات برای دو قطر چال ۹۰ و ۱۱۰ سانتی‌متری محاسبه خواهد شد.لازم به ذکر است مناسب‌ترین حالت محاسبه بارسنگ تطابق آن با پارامترهای تغییر ناپذیر معدن در شرایط اجرایی مانند ارتفاع پله است. محاسبات مربوط به محاسبه بارسنگ بر اساس ارتفاع پله در جدول ۷ آورده شده است.

جدول ۷. محاسبه‌ی بارسنگ با استفاده از رابطه‌ی بین بارسنگ و ارتفاع پله

بارسنگ محاسبه شده (m)	$1 = \frac{H}{B}$	$2 = \frac{H}{B}$	$3 \leq \frac{H}{B}$
B	۸	۴	۲,۷

با مشخص شدن بازه‌ی مناسب بارسنگ (B) بین حداقل ۲,۵ تا ۳ متر با استفاده از اکثر روش‌های مناسب و مطمئن تجربی،

می‌توان سایر پارامترهای هندسی الگوی آتشکاری شامل فاصله ردیفی چال‌ها (S)، گل‌گذاری (T)، و اضافه حفاری (U) را به صورت تقریبی برای معدن سنگ تخمین زد. لازم به ذکر است L در روابط زیر طول ستون خرج گذاری شده است[20].

(۵)	فاصله ردیفی چال	$S = (1-2)\,B$	
(۶)	اضافه حفاری	$U = K_U B$	$U = (0.2-0.5)\,B$
(۷)	طول گل‌گذاری	$T = K_T B$	$T = (0.7-1.3)\,B$
(۸)			$T = 0.3\,L$

توجه: K_U=ضریب ثابت، مقدار آن از ۰/۲۳ تا ۰/۳۲ است. و مقدار آن معمولاً ۰/۳ در نظر گرفته می‌شود.

توجه: K_T= ضریب ثابت و مقدار آن $K_T > ۰/۷$ است.

با توجه به موارد بالا می‌توان یک الگوی تجربی برای معدن سنگ به دست آورد. مقدار پارامترهای هندسی الگوی انفجار به دست آمده از روابط تجربی در جدول ۸ آورده شده است. با مقایسه الگوهای به دست آمده در جدول ۸ و الگوهای اجرا شده در معدن می‌توان دریافت این الگوها مشابه یکدیگر بوده اما با توجه به آنالیز خردایش انجام شده درجدول ۴، الگوهای ارائه شده توسط روش‌های تجربی برای رسیدن به خردایش هدف مناسب نیستند. بنابراین برای دستیابی به ابعاد خردایش هدف الگوهای معدن باید مجدد محاسبه شده و از روش‌های دیگری برای محاسبه آن استفاده کرد. به این منظور با استفاده از شبکه عصبی و الگوریتم‌های فراابتکاری این عمل انجام گرفته است.

جدول۸. محاسبه‌ی پارامترهای آتشکاری با استفاده از روابط تجربی

پارامتر	روابط	بازه‌ی ضرایب	اندازه حداقل (m)		پارامترهای هندسی پیشنهادی
ارتفاع پله (H)	–	-	8		8
قطر چال انفجاری (Φ_h)	$60 \le \frac{H}{\Phi_h}$	–	0.130		0.130
بارسنگ (B)	$3 \le \frac{H}{B}$	–	2.5		2.5-3
فاصله ردیفی چال (S)	$S = K_S B$	$1 \le K_S \le 2$	2.5	$B = 2.5$	3-3.5
			3	$B = 3$	
اضافه حفاری (U)	$U = K_U B$	$0.2 \le K_U \le 0.5$	0.5	$B = 2.5$	0.75-1
			0.6	$B = 3$	
گل‌گذاری (T)	$T = K_T B$	$0.7 \le K_T \le 1.3$	1.75	$B = 2.5$	1.75-2

۴,۳. بهینه‌سازی الگوی انفجاری

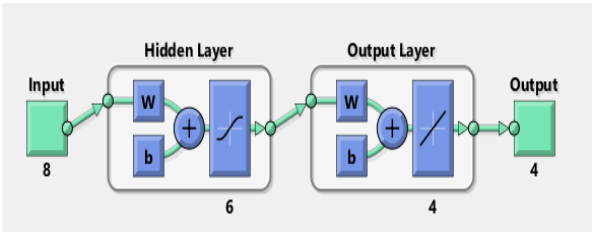
در این بخش با استفاده از داده‌های ۹۰ الگوی انفجار، اقدام به ساخت شبکه‌ی عصبی مناسب برای بهینه‌سازی الگوهای انفجار شد. این داده‌ها تعداد ۹۰ داده است که از تعداد ۸۰ عدد آن به عنوان داده‌ی آموزش و ۱۰ عدد به عنوان داده‌ی آزمایش استفاده شده است. خروجی شبکه عصبی به عنوان یک تابع برازندگی در دو الگوریتم فرابتکاری نهنگ و کرم شب‌تاب برای انتخاب شبکه انفجار مناسب قرار داده شد. در انتها سه الگو بهینه به انتخاب الگوریتم‌های فراابتکاری پیشنهاد شد. مشکلات و چالش‌های مربوط به بهینه‌سازی در مقدمه فصل اول و نتیجه‌گیری این فصل شرح داده شده است.

برای رسیدن به بازه‌ی ابعاد خردایش بهینه برای استفاده به‌عنوان خوراک باید ابعاد خردایش حاصل ار انفجار در بازه‌ی مشخصی قرار گیرد، ابعاد بهینه مد نظر در جدول ۲ آورده شده است. سوال مطرح شده در این بخش این است که ابعاد و اندازه‌ی پارامترهای هندسی انفجار باید به چه صورت در نظر گرفته شود تا خردایش هدف مد نظر در جدول ۲ حاصل شود.

۱,۴,۳. شبکه‌ی عصبی

هدف ساخت شبکه عصبی، پیدا کردن ارتباط بین پارامترهای عملیات انفجار و ایجاد یک تابع برازندگی برای بهینه‌سازی است. این تابع در الگوریتم فراابتکاری استفاده می‌شود تا بهترین الگوی انفجار را انتخاب کند (جدول ۹).

یک شبکه پرسپترون سه لایه با ۸ نورون ورودی (قطرچال، ارتفاع پله، و...) و ۴ نورون خروجی (ابعاد خردایش) طراحی شده است. این شبکه، روابط بین پارامترهای ورودی و خروجی را مدل‌سازی می‌کند. خروجی‌های شبکه توسط یک الگوریتم فراابتکاری بهینه‌سازی می‌شوند تا به الگوی انفجار بهینه برسند (شکل ۵). شبکه عصبی مورد نظر با ۸۰ داده تحت آموزش قرار گرفت.



شکل ۵. توپولوژی شبکه عصبی طراحی شده با ۶ نورون در لایه مخفی

جدول ۹. قیدهای استفاده شده در شبکه‌ی عصبی و الگوریتم‌های فراابتکاری

پارامتر	روابط	بازه‌ی ضرایب
ارتفاع پله (H)	۸ متر	-
قطر چال انفجاری (Φ_h)	$60 \leq \frac{H}{\Phi_h}$	-
بارسنگ (B)	$3 \leq \frac{H}{B}$	-
فاصله ردیفی چال (S)	$S = K_S B$	$1 \leq K_S \leq 2$
اضافه حفاری (U)	$U = K_U B$	$0.2 \leq K_U \leq 0.5$
گل‌گذاری (T)	$T = K_T B$	$0.7 \leq K_T \leq 1.3$

کلیه نتایج مربوط به مدل سازی نشان می دهد که مدل پیشنهادی تا حد زیادی مورد قبول است و می توان از آن به عنوان مدل خردایش استفاده نمود. در ادامه از مدل پیشنهادی بدست آمده برای بهینه‌سازی استفاده شده است. پس از بدست آوردن مدل مناسب با استفاده از دو الگوریتم بهینه‌سازی نهنگ و کرم شب‌تاب الگوی مناسب آتشکاری را برای رسیدن به خردایش بهینه به دست آمده است. در این راستا ابتدا تابع هزینه مورد نظر باید ساختار بندی شود . توابع هزینه مناسب محدب و مشتق پذیر هستند. در این جهت تابع هزینه زیر جهت بهینه‌سازی ارائه شده است. این تابع همواره مثبت است و مقدار بهینه آن در وسط بازه‌های خردایش بهینه قرار دارد.

$$vcost=(X20-20)^2+(X50-37.5)^2+(X80-57.5)^2+(X90-65)^2$$

برای بهینه‌سازی این تابع با توجه به مدل خردایش پیشنهادی باید قیدهای جدول ۵ در نظر گرفته شود.

۲،۴،۳. هدف شبکه عصبی

هدف اصلی این شبکه عصبی پیش‌بینی ابعاد خردایش (X20، X50، X80 و X90) بر اساس پارامترهای مختلف انفجار در عملیات معدنکاری است. به عبارت دیگر، شبکه تلاش می‌کند با توجه به ویژگی‌های انفجار مانند قطر چال، ارتفاع پله، بارسنگ و ...، ابعاد ذرات حاصل از انفجار را تخمین بزند.

۳،۴،۳. ساختار شبکه عصبی

- **لایه ورودی:** شامل ویژگی‌های مختلف انفجار مانند قطر چال، ارتفاع پله، بارسنگ و سایر پارامترهای ذکر شده است.
- **لایه‌های پنهان:** جزئیات دقیق لایه‌های پنهان در کد ارائه شده است (تعداد نورون‌ها، توابع فعال‌سازی و وزن‌ها به بخش ضمیمه مراجعه شود). این لایه‌ها وظیفه استخراج ویژگی‌های پیچیده از داده‌های ورودی را بر عهده دارند.
- **لایه خروجی:** شامل چهار نورون است که هر کدام یکی از ابعاد خردایش X20، X50، X80 و X90 را پیش‌بینی می‌کنند.

۴،۴،۳. تابع فعال‌سازی

- از تابع فعال‌سازی tansig در لایه‌های پنهان استفاده شده است. این تابع یک تابع سیگموئید است که خروجی را به بازه [۱، ۱-] محدود می‌کند.

۵،۴،۳. تابع هزینه

- **تابع هزینه MSE:** تابع هزینه تعریف شده، در واقع یک تابع مجموع مربعات خطا (Mean Squared Error) است. این تابع اختلاف بین مقادیر پیش‌بینی شده توسط شبکه عصبی (X20، X50، X80، X90) و مقادیر واقعی را محاسبه کرده و سپس مجذور این اختلاف‌ها را با هم جمع می‌کند.
- **تفسیر تابع هزینه:** هرچه مقدار تابع هزینه کمتر باشد، نشان‌دهنده آن است که پیش‌بینی‌های شبکه عصبی به مقادیر واقعی نزدیک‌تر هستند و در نتیجه عملکرد شبکه بهتر است.
- **هدف آموزش:** هدف آموزش شبکه عصبی، یافتن وزن‌ها و بایاس‌هایی است که مقدار تابع هزینه را به حداقل برسانند.

۶،۴،۳. نحوه رسیدن به تابع هزینه

۱. **پیش‌بینی خروجی:** شبکه عصبی با استفاده از وزن‌ها و بایاس‌های خود، برای هر نمونه ورودی، چهار مقدار خروجی (x20، x50، x80، x90) را پیش‌بینی می‌کند.

۲. **محاسبه خطا:** برای هر نمونه، اختلاف بین مقادیر پیش‌بینی شده و مقادیر واقعی محاسبه می‌شود.

۳. **محاسبه مجموع مربعات خطا:** مجذور اختلاف‌های محاسبه شده برای همه نمونه‌ها با هم جمع می‌شود.

۴. **میانگین‌گیری:** برای به دست آوردن تابع هزینه نهایی، مقدار به دست آمده در مرحله قبل بر تعداد نمونه‌ها تقسیم می‌شود.

۵،۳. نتایج بهینه‌سازی با استفاده از دو الگوریتم وال و کرم‌شب‌تاب

از دو الگوریتم نهنگ و کرم‌شب‌تاب برای بهینه‌سازی استفاده شده است. الگوریتم بهینه‌سازی وال (WOA) یک الگوریتم بهینه‌سازی الهام گرفته از طبیعت است که از رفتار شکار نهنگ‌ها الهام گرفته شده است [21]. الگوریتم بهینه‌سازی کرم شب تاب (FA) یکی دیگر از الگوریتم‌های الهام گرفته از طبیعت است که در حوزه هوش ازدحامی (Swarm Intelligence) قرار می‌گیرد .این الگوریتم از رفتار زیست‌شناختی کرم‌های شب‌تاب الهام گرفته شده است که برای جفت‌یابی و ارتباط با یکدیگر از نور استفاده می‌کنند[22]. مطابق جدول ۹، الگوی پیشنهادی توسط الگوریتم کرم شب‌تاب ۲،۸۵×۳،۲۵ و توسط الگوریتم نهنگ ۳،۲۶×۳،۸۷ محاسبه شده است. هر دو الگو در بازه الگوهای معمول قرار دارند، اما الگوی پیشنهادی توسط الگوریتم نهنگ به نظر مناسب‌تر است. برای اطمینان، بهتر است هر دو الگو در معدن اجرا شوند. یک نکته مهم، تغییر ضریب گل‌گذاری از ۰،۷ به حدود ۱ در الگوهای پیشنهادی است. این افزایش گل‌گذاری باعث کاهش هزینه هر چال و افزایش ابعاد خردایش می‌شود. برای تأیید این نتایج، باید الگوها اجرا و با استفاده از پردازش تصویر، کیفیت خردایش بررسی شود. جدول ۱۰ پارامترهای بهینه الگوی پیشنهادی با قطر چال ۹۰ میلیمتر را نشان می‌دهد.

جدول ۹. پارامترهای خروجی آتشکاری محاسبه شده به وسیله‌ی الگوریتم‌ها (قطر بهینه)

پارامتر	الگوریتم کرم شب‌تاب	الگوریتم نهنگ
قطر چال انفجاری (Φ_h)	98.38	109.69
ارتفاع پله (H)	8.95	8.58
اضافه حفاری (U)	**0.3**	**0.3**
گل‌گذاری (T)	2.75	3.48
بارسنگ (B)	2.86	3.26
فاصله ردیفی چال (S)	3.25	3.87
خروجی خردایش تخمین زده شده توسط مدل برای پارامترهای ارائه شده توسط دو الگوریتم		
X_{20}	15.2433	14.35
X_{50}	34.5600	35
X_{80}	57.9433	55.7
X_{90}	70.0000	75.2

جدول ۱۰. پارامترهای خروجی آتشکاری محاسبه شده به وسیله‌ی الگوریتم‌ها (قطر ۹۰)

پارامتر	الگوریتم کرم شب تاب	الگوریتم نهنگ (۱)	الگوریتم نهنگ (۲)
قطر چال انفجاری (Φ_h)	90	90	90
ارتفاع پله (H)	8.55	9.2	8.7
اضافه حفاری (U)	0.3	0.3	0.3
گل‌گذاری (T)	3.32	2.18	2.6
بارسنگ (B)	2.75	2.72	3.5
فاصله ردیفی چال (S)	2.78	3	4
خروجی خردایش تخمین زده شده توسط مدل برای پارامترهای ارائه شده توسط دو الگوریتم			
X_{20}	15.2433	15.2433	15.1
X_{50}	34.5600	34.5600	32.25
X_{80}	57.9433	57.9433	56.8
X_{90}	70.0000	70.0000	73.41

۴. بحث و نتیجه‌گیری

این پژوهش با هدف بهینه‌سازی عملیات انفجار در معادن سنگ انجام شده است. هدف اصلی، کاهش هزینه‌ها و افزایش بهره‌وری با دستیابی به ابعاد خردایش مطلوب پس از انفجار بوده است. با بررسی دقیق داده‌های انفجارهای قبلی، مشکلات و ایرادات موجود در الگوهای انفجاری شناسایی شد. برای رفع این مشکلات، از ترکیبی از روش‌های تجربی و الگوریتم‌های هوش مصنوعی (کرم شب‌تاب و نهنگ) استفاده شد. نتایج نشان داد که الگوریتم‌های هوش مصنوعی، به ویژه الگوریتم نهنگ، در ارائه الگوهای انفجاری بهینه عملکرد بهتری دارند.

بر اساس نتایج حاصل از الگوریتم‌ها، برای انواع مختلف سنگ، الگوهای انفجاری جدیدی پیشنهاد شده است. الگوریتم نهنگ برای سنگ‌های ضعیف، الگوی ۳،۵×۴ را پیشنهاد کرده است. برای سنگ قوی‌تر، الگوهای ۲،۷۵×۲،۷۵ و ۳×۲،۷۵ به ترتیب با استفاده از الگوریتم‌های کرم شب‌تاب و نهنگ پیشنهاد شده است. مقایسه نتایج نشان داد که الگوهای انفجاری پیشنهادی، منجر به افزایش حجم سنگ استخراج شده به ازای هر چال انفجاری و در نتیجه کاهش هزینه‌های استخراج شده‌اند. به طور کلی، این پژوهش ثابت می‌کند که روش‌های علمی و محاسباتی عملکرد عملیات انفجار را بهبود می‌بخشند. الگوهای انفجاری پیشنهادی در این پژوهش می‌توانند به عنوان یک راهکار عملی برای بهبود بهره‌وری و کاهش هزینه‌های تولید در صنعت معدنکاری مورد استفاده قرار گیرند.

۵. منابع

[1] D. Jahed Armaghani, M. Hajihassani, A. Marto, R. Shirani Faradonbeh, and E. T. Mohamad, "Prediction of blast-induced air overpressure: a hybrid AI-based predictive model," *Environ. Monit. Assess.*, vol. 187, pp. 1–13, 2015.

[2] D. Jahed Armaghani *et al.*, "Neuro-fuzzy technique to predict air-overpressure induced by blasting," *Arab. J. Geosci.*, vol. 8, pp. 10937–10950, 2015.

[3] D. Jahed Armaghani, M. Hasanipanah, and E. Tonnizam Mohamad, "A combination of the ICA-ANN model to predict air-overpressure resulting from blasting," *Eng. Comput.*, vol. 32, pp. 155–171, 2016.

[4] M. Ataei and F. Sereshki, "Improved prediction of blast-induced vibrations in limestone mines using Genetic Algorithm," *J. Min. Environ.*, vol. 8, no. 2, pp. 291–304, 2017, doi: 10.22044/jme.2016.654.

[5] S. M. Hoseini, F. Sereshki, and M. Ataei, "A quantitative model for evaluation and classification of blastings in open-pit mines," *J. Min. Environ.*, vol. 9, no. 1, pp. 127–141, 2018.

[6] M. Ataei and H. A. Baydokhti, "An experimental study of the repeated blasting effect on surrounding rock weakness incorporating ultrasonic wave velocity measurement," *Rud. Zb.*, vol. 34, no. 4, 2019.

[7] S. Mulenga and R. Kaunda, "Blast design for improved productivity using a modified available energy method," *J. Min. Environ.*, vol. 11, no. 3, pp. 643–659, 2020.

[8] D. Mohammadi, R. Mikaeil, and J. Abdollahei Sharif, "Investigating and Ranking Blasting Patterns to Reduce Ground Vibration using Soft Computing Approaches and MCDM Technique," *J. Min. Environ.*, vol. 11, no. 3, pp. 881–897, 2020.

[9] H. Moomivand, S. Seadati, and H. Allahverdizadeh, "A new approach to improve the assessment of rock mass discontinuity spacing using image analysis technique," *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, vol. 143, p. 104760, 2021.

[10] E. Li, F. Yang, M. Ren, X. Zhang, J. Zhou, and M. Khandelwal, "Prediction of blasting mean fragment size using support vector regression combined with five optimization algorithms," *J. Rock Mech. Geotech. Eng.*, vol. 13, no. 6, pp. 1380–1397, 2021.

[11] P. Bayat, M. Monjezi, A. Mehrdanesh, and M. Khandelwal, "Blasting pattern optimization using gene expression programming and grasshopper optimization algorithm to minimise blast-induced ground vibrations," *Eng. Comput.*, pp. 1–10, 2022.

[12] H. Moomivand, H. Amini Khoshalan, J. Shakeri, and H. Vandyousefi, "Development of new comprehensive relations to assess rock fragmentation by blasting for different open pit mines using GEP algorithm and MLR procedure," *Int. J. Min. Geo-Engineering*, vol. 56, no. 4, pp. 401–411, 2022.

[13] R. Shamsi, M. S. Amin, H. Dehghani, M. Bascompta, B. Jodeiri Shokri, and S. Entezam, "Prediction of fly-rock using gene expression programming and teaching–learning-based optimization algorithm," *J. Min. Environ.*, vol. 13, no. 2, pp. 391–406, 2022.

[14] B. O. Taiwo, "Improvement of small-scale dolomite blasting productivity: comparison of existing empirical models with image analysis software and artificial neural network models," *J. Min. Environ.*, vol. 13, no. 3, pp. 627–641, 2022.

[15] B. O. Taiwo *et al.*, "Artificial neural network modeling as an approach to limestone blast production rate prediction: a comparison of PI-BANN and MVR models," *J. Min. Environ.*, vol. 14, no. 2, pp. 375–388, 2023.

[16] E. Sharifi, M. A. E. Farsangi, H. Mansouri, and E. Rashedi, "Determining Rock Fragment Size Distribution Using a Convolutional Neural Network," *Rud. Zb.*, vol. 39, no. 2, pp. 1–14, 2024.

[17] H. Nguyen, X.-N. Bui, C. Drebenstedt, and Y. Choi, "Enhanced Prediction Model for Blast-Induced Air Over-Pressure in Open-Pit Mines Using Data Enrichment and Random Walk-Based Grey Wolf Optimization–Two-Layer ANN Model," *Nat. Resour. Res.*, vol. 33, no. 2, pp. 943–972, 2024.

[18] A. Rabbani *et al.*, "Optimization of an artificial neural network using four novel metaheuristic algorithms for the prediction of rock fragmentation in mine blasting," *J. Inst. Eng. Ser. D*, pp. 1–20, 2024.

[19] H. Fattahi, H. Ghaedi, and D. J. Armaghani, "Enhancing blasting efficiency: A smart predictive model for cost optimization and risk reduction," *Resour. Policy*, vol. 97, p. 105261, 2024.

[20] C. Lopez Jimeno, E. López Jimeno, and F. J. A. Carcedo, "Drilling and blasting of rocks. AA Balkema." Taylor & Francis Group, Rotterdam, 1995.

[21] S. Mirjalili and A. Lewis, "The whale optimization algorithm," *Adv. Eng. Softw.*, vol. 95, pp. 51–67, 2016.

[22] X.-S. Yang, "Firefly algorithm, stochastic test functions and design optimisation," *Int. J. bio-inspired Comput.*, vol. 2, no. 2, pp. 78–84, 2010.