



مقاله پژوهشی

## تأثیر پارامترهای هندسی الگوی انفجار بر خرج ویژه بهینه به کمک الگوریتم‌های خفاش و جستجوی کلاغ، مطالعه موردی: معدن سنگ آهن سادات سیریز زرنند

رقیه حیدری\*، سید مهدی موسوی نسب<sup>۱</sup>

۱- گروه مهندسی معدن، مجتمع آموزش عالی زرنند، کرمان، ایران

(دریافت: آبان ۱۴۰۱، پذیرش: آبان ۱۴۰۲)

### چکیده

چال زنی و انفجار، از جمله مهم‌ترین مراحل استخراج در معادن روباز هستند که بهینه‌سازی آنها می‌تواند در کاهش حجم حفاری، میزان مصرف مواد منفجره و در نهایت هزینه‌های استخراج معادن سطحی مؤثر باشد. در این تحقیق، بر اساس مطالعات میدانی، تعداد ۱۱ پارامتر حاصل از ۱۳۰ مجموعه انفجار عملی در معدن سنگ آهن سادات سیریز زرنند برداشت شده و ثبت گردید که ۶۰ سری در ماده معدنی و ۷۰ سری آن در باطله بودند. با توجه به ضریب همبستگی پایین بین داده‌های باطله، فقط محاسبات مربوط به ماده معدنی در نظر گرفته شد. خرج ویژه این معدن با شش تابع مختلف ریاضی توسط نرم‌افزار spss مدل‌سازی گردید و از بین آنها مدل تابع چند جمله‌ای با ضرایب غیر صحیح برای پیش‌بینی خرج ویژه انتخاب شد. بهینه‌سازی خرج ویژه توسط دو الگوریتم خفاش و جستجوی کلاغ انجام گردید. با توجه به الگوهای پیشنهادی، میزان خرج ویژه بهینه با الگوریتم‌های خفاش و جستجوی کلاغ به ترتیب ۰/۶۶ و ۰/۷۰۳ کیلوگرم بر مترمکعب به دست آمد و معلوم شد مقدار بهینه‌شده با الگوریتم خفاش، نتیجه مناسب‌تری را پیشنهاد می‌دهد. با آنالیز حساسیت، پارامترهای حساس و مؤثر در این معدن برای خرج ویژه مشخص شدند. این آنالیز نشان داد، همه پارامترهای هندسی ورودی به کاررفته در مدل‌سازی نسبت به خرج ویژه از حساسیت قوی برخوردار هستند و از بین آنها ضریب سفتی، بیشترین و خرج کل مصرفی، کم‌ترین حساسیت را دارد.

### کلمات کلیدی

بهینه‌سازی، خرج ویژه، الگوریتم خفاش، الگوریتم جستجوی کلاغ، آنالیز حساسیت، معدن سنگ آهن سادات سیریز زرنند

\*عهده‌دار مکاتبات: kohdasht3@gmail.com

DOI: 10.22034/ANM.2023.19088.1571

## ۱- مقدمه

انفجار یکی از عملیات اصلی در استخراج معادن روباز است که عملکرد آن ممکن است تحت تأثیر عوامل مختلفی قرار گیرد. این عوامل را می‌توان به سه گروه تقسیم کرد، گروه اول شامل پارامترهای طراحی انفجار، گروه دوم شامل خواص ماده منفجره و گروه سوم شامل ویژگی‌های توده سنگ تقسیم‌بندی کرد. فاصله بین چال‌ها، شیب چال، قطر و طول چال، الگوی حفاری، جهت و توالی از جمله پارامترهای قابل کنترل طراحی انفجار هستند. مشخصات مواد منفجره شامل نوع ماده منفجره، سرعت انفجار، چگالی، قدرت انفجار و حساسیت هستند که برای یک ماده منفجره خاص، قابل کنترل نیستند و گروه سوم شامل ویژگی‌های فیزیکی، مکانیکی و ژئومکانیکی توده سنگ است که در عملیات انفجار معدن هیچ‌کدام نمی‌توانند تحت کنترل قرار گیرند. مجموعه این پارامترهای غیرقابل کنترل از جمله تأثیرگذارترین عوامل بر نتایج حاصل از انفجار هستند [۶-۱].

خرج ویژه مصرفی یکی از مهم‌ترین پارامترهای فنی و اقتصادی در عملیات آتش‌کاری معادن به حساب می‌آید. تغییر این پارامتر می‌تواند باعث تغییر پیامدهای پس از انفجار همچون خردایش، عقب زدگی، پرتاب سنگ و لرزش زمین گردد. علاوه بر آن، تغییر خرج ویژه می‌تواند بر سودآوری و اقتصادی بودن معدن نیز تأثیر قابل توجهی بگذارد. در سال‌های اخیر، استخراج منابع معدنی، باعث توسعه سریع اقتصاد شده است [۸]. با افزایش تقاضا برای استخراج سنگ از طریق انفجار در معادن، بسیاری از پژوهشگران، تحقیقات متعددی را در قالب تجزیه و تحلیل‌های نظری، آزمایش‌های میدانی و شبیه‌سازی‌های عددی انجام داده‌اند [۹-۱۰]. علاوه بر آن، در ۲۰ سال گذشته، فناوری کامپیوتر به سرعت توسعه یافته و شبیه‌سازی عددی به یک روش تحقیقاتی مهم در مطالعات دانشگاهی تبدیل شده است که در میان آن‌ها

نمونه‌های مطالعاتی جهت شبیه‌سازی عددی در فرآیند انفجار معادن نیز وجود دارد [۱۲-۱۱].

با توجه به اهمیت موضوع، در این تحقیق تأثیر پارامترهای هندسی انفجار، به‌عنوان متغیرهای قابل کنترل، بر خرج ویژه بهینه مورد مطالعه قرار گرفت. در این مطالعه، از مدل‌سازی ریاضی توسط نرم‌افزار SPSS برای تعیین توابع پیش‌بینی خرج ویژه و الگوریتم‌های خفاش و جستجوی کلاغ در نرم‌افزار متلب برای بهینه‌سازی آن استفاده شد.

## ۲- زمین‌شناسی منطقه

کانسار آهن سیریز در فاصله ۷۵ کیلومتری شمال غربی شهرستان زرنند در استان کرمان و در پهنه ایران مرکزی قرار گرفته است. کانی‌سازی آهن، بیشتر به شکل عدسی‌ها، توده‌های نامنظم و رگه‌هایی در واحدهای آهنی- دولومیتی دگرگون‌شده پالئوزویک (سازند کوهبنان) و درون اسکارن‌های تشکیل‌شده در همبری توده نفوذی گرانیتوئید سیریز یافت می‌گردد. کالکوپیریت، هماتیت، مگنتیت، پیریت و هیدروکسیدهای آهن، مهم‌ترین کانه‌های موجود در آن هستند. با توجه به خصوصیات سنگ‌شناختی و کانی‌شناختی، اسکارن سیریز، متشکل از گرانیتوئید سیریز به‌عنوان منشأ کانی‌سازی، پهنه اسکارنی، کانسنگ آهن مگنتیتی- رگه‌ای و توده‌ای است. کانی‌سازی آهن، بیشتر با مجموعه کانی‌های ناشی از واکنش‌های پس‌رونده همراه بوده که نمایانگر نهشت فلزات در ارتباط با کاهش دمای سیال کانه ساز و آمیختگی احتمالی آن با سیال‌های جوی است [۱۶-۱۷].

معدن سنگ‌آهن سادات دارای ذخیره‌ی تقریبی ۵/۱۲۶ میلیون تن است [۱۶-۱۴]. در شکل ۱ موقعیت معدن و راه‌های دسترسی به آن نشان داده شده است. مساحت تقریبی ۱۷/۹۴۹ کیلومتر مربع و به شکل هیجده ضلعی است. در جدول ۱ مختصات رؤس معدن، بر حسب بیضوی مینا (مینای مسطحاتی) WGS1984 ارائه شده است.



شکل ۱: موقعیت جغرافیایی معدن سادات و راه‌های دسترسی به آن (با مقیاس ۱:۲,۵۰۰,۰۰۰)

چال زنی، انفجار، بارگیری و حمل است. چال زنی توسط ماشین‌های دورانی و ضربه‌ای، شامل دستگاه حفاری دریل واگن و دستگاه حفاری چال موازی، انجام می‌شود. قطر چال‌های حفر شده در این معدن متفاوت بوده به طوری که در بخش‌های مختلف معدن چال با قطرهای ۷۶/۲ میلی‌متر (۳ اینچ)، ۸۸/۹ میلی‌متر (۳/۵ اینچ) و ۱۰۱/۶ میلی‌متر (۴ اینچ) حفر می‌شود [۱۴]. سنگ‌های معدن از دو بخش سنگ بکر و دارای ناپیوستگی تشکیل شده‌اند. ناپیوستگی‌ها شامل ساختارهایی در توده سنگ مانند لایه‌بندی، گسل‌ها، درزه‌ها و سایر سطوح ضعیف است که به طور قابل توجهی بر خواص مکانیکی توده سنگ و نتایج انفجار تأثیر می‌گذارند [۱۸-۱۷].

#### ۴- مواد و روش‌ها

در این تحقیق، مطالعات و برداشت داده‌ها به صورت میدانی انجام شد. لذا، تعداد ۶۰ مجموعه انفجار عملی در پله‌های معدن صورت گرفت و داده‌های خام آن‌ها برداشت و ثبت گردید. داده‌های برداشت شده و این پارامترها شامل قطر چال (D)، طول چال (L)، بار سنگ (B)، فاصله‌داری (S)، خرج مصرفی کل (Q) و تعداد چال (NOH) هستند. بر مبنای پارامترهای برداشت شده، سایر اجزاء انفجار شامل ضریب سفتی (K/B)، نسبت گل‌گذاری (ST/B) و خرج ویژه (PF) در هر یک از عملیات انفجار محاسبه شدند. تعداد ۵ مجموعه از اجزاء برداشت شده و محاسبه شده در این تحقیق در جدول ۳ درج شده‌اند.

جدول ۱: مختصات رئوس معدن شماره یک [۱۴]

رئوس	طول جغرافیایی			عرض جغرافیایی		
	درجه	دقیقه	ثانیه	درجه	دقیقه	ثانیه
A	۵۵	۴۶	۴۳,۸۰	۳۱	۰۲	۳۷,۹۹
B	۵۵	۴۶	۴۳,۹۲	۳۱	۰۲	۳۰,۲۸
C	۵۵	۴۶	۵۹,۰۱	۳۱	۰۲	۳۰,۳۳
D	۵۵	۴۶	۵۹,۱۴	۳۱	۰۲	۱۹,۷۴
E	۵۵	۴۷	۲۲,۹۳	۳۱	۰۲	۱۹,۷۷
F	۵۵	۴۷	۲۳,۶۶	۳۱	۰۱	۴۹,۹۳
G	۵۵	۴۷	۳۷,۴۳	۳۱	۰۱	۴۹,۹۹
H	۵۵	۴۷	۳۷,۷۰	۳۱	۰۱	۳۴,۹۳
I	۵۵	۴۷	۴۲,۷۹	۳۱	۰۱	۳۴,۹۸
J	۵۵	۴۷	۴۳,۶۶	۳۱	۰۰	۲۸,۲۳
K	۵۵	۴۹	۰۱,۲۲	۳۱	۰۰	۲۹,۰۵
L	۵۵	۴۹	۰۱,۱۸	۳۱	۰۰	۲۲,۵۹
M	۵۵	۴۹	۱۰,۵۸	۳۱	۰۰	۲۲,۵۳
N	۵۵	۴۹	۱۰,۸۶	۳۰	۵۹	۵۳,۲۷
O	۵۵	۴۹	۵۵,۵۲	۳۰	۵۹	۵۴,۰۱
P	۵۵	۴۹	۵۴,۸۵	۳۱	۰۱	۲۱,۴۴
Q	۵۵	۵۰	۱۳,۴۹	۳۱	۰۱	۲۱,۷۵
R	۵۵	۵۰	۱۳,۴۱	۳۱	۰۲	۴۰,۷۹

#### ۳- عملیات استخراج در معدن مورد مطالعه

عملیات استخراج سنگ آهن در معدن سادات سیریز به روش روباز انجام می‌شود. مراحل استخراج، شامل عملیات

## ۴-۱- مدل سازی ریاضی

برای مدل سازی ریاضی، ابتدا متغیرهای مستقل (ورودی) و وابسته (خروجی یا پاسخ) مشخص شدند. بر این اساس، پارامترهای قطر چال (D)، طول چال (L)، بار سنگ (B)، فاصله‌داری (S)، ضریب سفتی (K/B)، نسبت گل گذاری (ST/B)، تعداد چال (NOH) و خرج مصرفی کل (Q) به‌عنوان متغیرهای مستقل و خرج ویژه (PF) به‌عنوان متغیر وابسته در نظر گرفته شدند. برای سنجش عملکرد هر یک از مدل‌های ریاضی از معیارهای ضریب تعیین  $R^2$ ، جذر میانگین مربعات خطا<sup>۱</sup> (RMSE)، شاخص عملکرد<sup>۲</sup> (VAF) و میانگین درصد خطای مطلق<sup>۳</sup> (MAPE) ملاک قرار گرفتند که این پارامترها با استفاده از روابط (۱) تا (۳) قابل محاسبه هستند [۱۹-۲۰].

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

$$VAF = 100 \left[ 1 - \frac{var(y_{meas} - y_{pred})}{var(y_{meas})} \right] \quad (2)$$

$$MAPE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left| \frac{(y_{meas} - y_{pred})}{y_{meas}} \right| \quad (3)$$

در این رابطه‌ها  $y_{meas}$  متغیر اندازه‌گیری شده (خرج ویژه اندازه‌گیری شده) و  $y_{pred}$ : متغیر پیش‌بینی شده (خرج ویژه پیش‌بینی شده) است.

## ۴-۲- آنالیز حساسیت پارامترها

آخرین مرحله در مدل سازی، تعیین میزان حساسیت خرج ویژه نسبت به پارامترهای ورودی است. با استفاده از آنالیز حساسیت می‌توان روند کلی تأثیر نسبی پارامترهای ورودی را بر متغیر پاسخ (تابع هدف) تعیین نمود [۲۱]. یکی از روش‌ها جهت تعیین حساسیت جواب نسبت به پارامترهای ورودی، روش میدان کسینوسی (CAM) است. این روش، یک فضای  $m$  بعدی، به‌صورت زیر در نظر می‌گیرد:

$$X = X_1 + X_2 + X_3 + \dots + X_m \quad (4)$$

که در آن  $m$  تعداد پارامترهای ورودی به مدل،  $X_1$  = قطر چال (mm)،  $X_2$  = طول متوسط چال (m)،  $X_3$  = ضخامت

جدول ۳: تعداد ۵ مجموعه پارامترهای برداشت‌شده و محاسبه‌شده در معدن سنگ آهن سادات سیریز

پارامترها	۵ نمونه از پارامترهای برداشت‌شده				
	۵	۴	۳	۲	۱
(PF) خرج ویژه ( $kg/m^3$ )	۰,۸۴۱	۰,۵۱۳	۰,۸۷۶	۰,۸۷۴	۰,۳۷۴
(Q) خرج مصرفی کل (Kg)	۲۰,۸۲۰	۵۵۵۰	۱۰,۴۱۰	۶۲۲۰	۵۰۴۰
(NOH) تعداد چال	۵۰۰	۱۹۰	۲۰۰	۱۷۱	۲۱۶
(ST/B) نسبت گل گذاری	۰,۶۸	۰,۶۸	۰,۶۸	۰,۸۳	۰,۷۷
(K/B) ضریب سفتی	۴,۵	۴	۴	۵,۵	۴,۵
(S) فاصله‌داری (m)	۲,۵	۲,۵	۲,۵	۲,۲	۲,۷
(B) بار سنگ (m)	۲,۲	۲,۵	۲,۵	۱,۸	۲,۲
(L) طول چال (m)	۹,۵	۹,۶	۱۰	۱۰	۱۱
(D) قطر چال (mm)	۷۶	۹۰	۱۰۱	۷۶	۱۰۱

برای مدل سازی، پیش‌بینی و بهینه‌سازی خرج ویژه از روش تحلیل رگرسیون استفاده شد. این تحلیل جهت بررسی روابط بین متغیرها و چگونگی وابستگی یک متغیر خاص به سایر متغیرها به کار می‌رود. دو متغیر می‌توانند رفتارهای متفاوتی نسبت به یکدیگر داشته باشند؛ لذا تحلیل رگرسیون به‌طور معمول دو نوع رفتار، شامل رفتارهای خطی و غیرخطی، برای متغیرها در نظر می‌گیرد. بر این مبنا، مطالعه این رفتارها توسط دو تحلیل رگرسیون خطی و غیرخطی (شامل مدل‌های لگاریتمی، توانی، نمایی، چندجمله‌ای و غیره) قابل انجام است.

جدول ۴: مقدار بیشینه، میانگین و کمینه پارامترهای هندسی ورودی و خرج ویژه

پارامترها	بیشینه	میانگین	کمینه
			(PF) خرج ویژه (kg/m <sup>3</sup> )
۰,۳۳۵	۰,۶۹۴	۱,۱۶۱	
			(Q) خرج مصرفی کل (Kg)
۱۴۶,۵۴	۶۵۱۰,۶۴۵	۲۰۸۲۰	
			(NOH) تعداد چال
۲۵	۱۷۹	۵۰۰	
			(ST/B) نسبت گل گذاری
۰,۴۵۴	۰,۷۲۵	۱	
			(K/B) ضریب سفتی
۳	۳,۵	۴	
			(S) فاصله داری (m)
۲	۲,۶۵۸	۴,۵	
			(B) بار سنگ (m)
۱,۷	۲,۲۸	۴	
			(L) طول چال (m)
۲,۸۵	۹,۲۰۵	۱۴,۲۶	
			(D) قطر چال (mm)
۷۶,۲	۹۵,۲۵	۱۱۴,۳	

## ۴-۵- تعیین توابع مدل سازی شده

توابعی که در این تحقیق برای مدل سازی ریاضی خرج ویژه استفاده شدند، شامل توابع نمایی، خطی، توانی، چندجمله‌ای، چندجمله‌ای با ضرایب غیر صحیح و تابع لگاریتمی است. داده‌های برداشت شده انفجار توسط نرم افزار SPSS آنالیز شده و در هر مورد توابع برازش به دست آمدند که نتایج حاصل از آن‌ها به صورت روابط (۶) تا (۱۱) هستند. رابطه (۶) مربوط به مدل تابع نمایی است.

$$\begin{aligned}
 PF &= \exp \left( 0.174518 - 2.62314(D^{-0.37033}) \right. \\
 &\quad - 0.00959(L^{-2.73587}) \\
 &\quad + 0.419175(B^{0.725618}) \\
 &\quad + 0.90144(S^{-1.71702}) \\
 &\quad - 5.2731 \left( \frac{K}{B} \right)^{-1.30385} \\
 &\quad + 0.385581 \left( \frac{ST}{B} \right)^{10.51065} \\
 &\quad + 1.408047(NOH^{-0.89388}) \\
 &\quad \left. - 1.14(Q^{-0.20024}) \right) \quad (6)
 \end{aligned}$$

بارسنگ  $X_4$ ، (m) = فاصله داری چال‌ها (m)،  $X_5$  = ضریب سفتی،  $X_6$  = نسبت گل گذاری،  $X_7$  = تعداد چال حفر شده،  $X_8$  = خرج مصرفی کل (kg) هر یک از این پارامترهای ورودی مانند X به وسیله یک بردار طولی به تابع هدف متصل می‌شوند. میزان تأثیر (حساسیت) هر کدام از پارامترهای ورودی X بر روی تابع هدف (خرج ویژه) از رابطه (۵) تعیین می‌شود [۲۲-۲۳].

$$R_{ij} = \frac{\sum_{k=1}^m x_{jk} x_{ik}}{\sqrt{\sum_{k=1}^m x_{jk} \sum_{k=1}^m x_{ik}}} \quad (5)$$

هر چه میزان تأثیر پارامتر ورودی بر متغیر پاسخ بیشتر باشد مقدار R به یک نزدیک تر خواهد بود. اگر مقدار R بیش از ۰/۹ باشد نشان از تأثیر بالای پارامتر ورودی بر خروجی و چنانچه مقدار R کمتر از ۰/۸ باشد نشان دهنده تأثیر کم آن پارامتر بر متغیر خروجی است.

## ۴-۳- بهینه سازی خرج ویژه توسط الگوریتم‌ها

در مسائل طراحی حقیقی، ممکن است که تعداد متغیرهای تصمیم‌گیری بسیار زیاد بوده و در نظر گرفتن تأثیر همه آن‌ها بر تابع هدف بسیار پیچیده گردد. در این مسائل، تابع هدف می‌تواند چندین نقطه بهینه محلی داشته باشد؛ اما همواره طراحان به دنبال پاسخ‌های بهینه سراسری (الگوریتم برای پیدا کردن پاسخ بهینه بخش‌های بزرگ‌تری از فضای مسئله را جستجو می‌کند). هستند. نمی‌توان چنین مشکلاتی را با استفاده از روش‌های سنتی مرسوم که تنها نقاط بهینه محلی را می‌یابند، برطرف نمود. در این موارد نیاز است که از روش‌های بهینه‌سازی کارا و مؤثر استفاده گردد که استفاده از الگوریتم‌های فرا ابتکاری یکی از روش‌های کارآمد و مؤثر است [۲۱].

## ۴-۴- نتایج و بحث

در این تحقیق تعداد ۶۰ مجموعه آتش کاری برداشت شد که از بین آن‌ها تعداد ۴۰ سری برای مطالعه انتخاب گردید و با نرم افزار SPSS نرمال سازی شدند. پس از آن ۳۱ مجموعه داده نرمال شده به دست آمد. مقدار بیشینه، میانگین و کمینه پارامترهای ورودی و خرج ویژه در جدول ۴ درج شده است.

$$\begin{aligned}
 PF &= \left( -86.9518 - .6366(D^{0.001606}) \right. \\
 &+ 136.0183(L^{-0.00435}) \\
 &- 3.32538(B^{-0.3392}) \\
 &+ 63.92146(S^{-0.00997}) \\
 &+ 0.684705 \left( \frac{K}{B} \right)^{0.617828} \\
 &+ 0.31254 \left( \frac{ST}{B} \right)^{4.649611} \\
 &- 75.2389(NO H^{0.006348}) \\
 &\left. + 4.462347(Q^{0.06685}) \right) \quad (10)
 \end{aligned}$$

رابطه (۱۱) مربوط به مدل تابع لگاریتمی است.

$$\begin{aligned}
 PF &= \left( 2.576 + 0.070 \ln(D) \right. \\
 &- 0.688 \ln(L) \\
 &- 1.124 \ln(B) \\
 &- 0.761 \ln(S) \\
 &- 0.78794 \ln \left( \frac{K}{B} \right) \\
 &+ 0.262257 \ln \left( \frac{ST}{B} \right) \\
 &- 0.52556 \ln(NO H) \\
 &\left. + 0.565811 \ln(Q) \right) \quad (11)
 \end{aligned}$$

#### ۴-۶- محاسبه شاخص‌های ارزیابی

پارامترهای ضریب تعیین، جذر میانگین مربعات خطاها، شاخص عملکرد و میانگین درصد خطای مطلق، برای مدل‌های مختلف با استفاده از روابطی که قبلاً ذکر شدند محاسبه شدند و نتایج حاصله در جدول ۵ درج شده است.

جدول ۵: مدل تابع‌ها و عملکرد آن‌ها

تابع	شاخص عملکرد	ضریب تعیین	جذر میانگین مربعات خطاها	میانگین درصد خطای مطلق
خطی	۸۹,۷۳۶	۰,۸۹۲	۰,۰۵۶	۰,۶۸۹
چندجمله‌ای	۷۶,۰۱۴	۰,۷۶۸	۰,۰۸۶	۰,۹۶۹
لگاریتمی	۹۳,۳۴۰	۰,۹۳۴	۰,۰۴۵	۰,۵۴۶
چندجمله‌ای با ضرایب غیر صحیح	۹۶,۸۲۵	۰,۹۶۹	۰,۰۳۱	۰,۳۲۳
نمایی	۶۹,۴۲۱	۰,۶۹۲	۰,۰۹۸	۱,۱۹۶

مقایسه بین شاخص‌های محاسبه‌شده مدل‌های مختلف در این جدول، می‌توان به کارایی هر چه بهتر تابع چندجمله‌ای با ضرایب غیر صحیح نسبت به سایر توابع پیش‌بینی پی برد. طبق این جدول، مدل چندجمله‌ای با ضرایب غیر صحیح دارای بالاترین ضریب همبستگی و

رابطه (۷) مربوط به مدل تابع خطی است.

$$\begin{aligned}
 PF &= (-0.819 + 0.004(D) - 0.045(L) \\
 &+ 0.254(B) - 0.160(S) \\
 &+ 0.232693 \left( \frac{K}{B} \right) \\
 &+ 0.541372 \left( \frac{ST}{B} \right) \\
 &- 0.00215(NO H) \\
 &+ 6.05E - 05(Q)) \quad (7)
 \end{aligned}$$

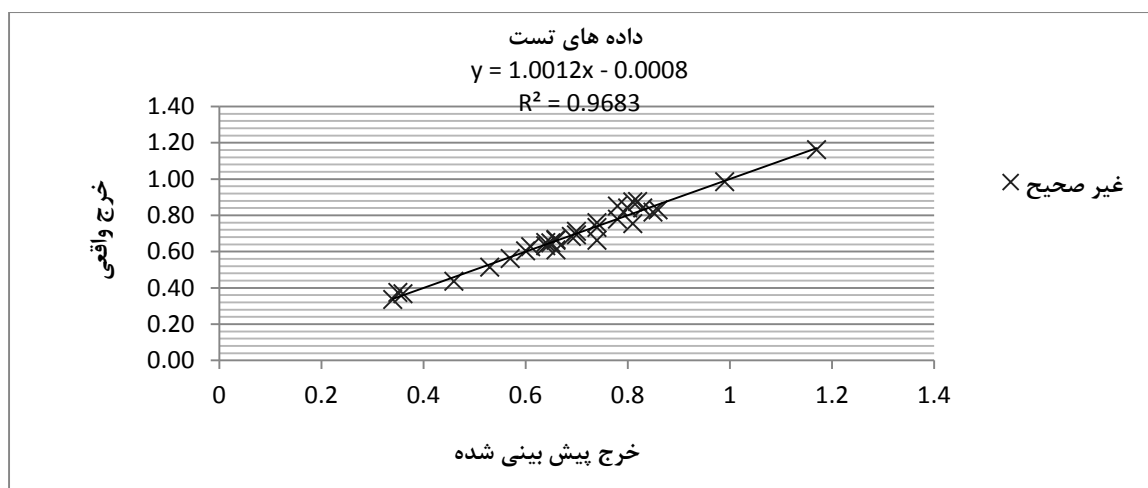
رابطه (۸) مربوط به مدل تابع توانی است.

$$\begin{aligned}
 PF &= 10 \left( \begin{aligned} &+0.100+0.100(D)+0.100(L)+0.100(B)+ \\ &0.100(S)+0.100\left(\frac{K}{B}\right)+ \\ &0.100\left(\frac{ST}{B}\right)+0.100(NO H)+0.100(Q) \end{aligned} \right) \quad (8)
 \end{aligned}$$

رابطه (۹) مربوط به مدل تابع چندجمله‌ای است.

$$\begin{aligned}
 PF &= \left( -0.178 + 0.009(D^1) \right. \\
 &+ 0.0004(L^2) \\
 &+ 0.0004(B^3) \\
 &- 0.001(S^4) + 7.166E \\
 &- 05 \left( \frac{K^5}{B} \right) \\
 &+ 0.109632 \left( \frac{ST^6}{B} \right) \\
 &- 1.748E - 19(NO H^7) \\
 &\left. + 4.734E - 35(Q^8) \right) \quad (9)
 \end{aligned}$$

رابطه (۱۰) مربوط به مدل چندجمله‌ای با ضرایب غیر صحیح است.

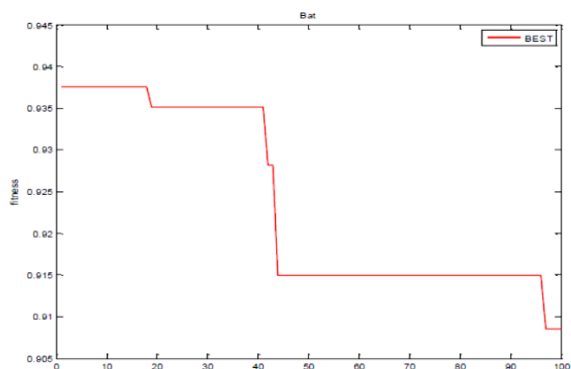


شکل ۲: نمودار بین خرج واقعی و خرج محاسبه شده توسط تابع چندجمله‌ای با ضرایب غیر صحیح

جدول ۷: خروجی‌های الگوریتم بهینه‌سازی خفاش

پارامتر	واحد	مقدار
D (قطر چال)	میلی‌متر	۷۹٫۹۳
L (طول چال)	متر	۸٫۳
B (بارسنگ)	متر	۱٫۲
S (فاصله‌داری)	متر	۱٫۴
K/B (نسبت ارتفاع پله به بارسنگ)	-	۳٫۳
ST/B (نسبت گل‌گذاری به بارسنگ)	-	۰٫۶۵۵
NOH (تعداد چال)	عدد	۴۰۴
Q (خرج مصرفی)	کیلوگرم	۱۱۸۷۴٫۵۴
مقدار بهینه‌ی تابع هدف (خرج ویژه)	کیلوگرم بر مترمکعب	۰٫۶۶۶

منحنی همگرایی مربوط به الگوریتم خفاش در شکل ۳ نشان داده شده است.



شکل ۳: منحنی همگرایی مربوط به الگوریتم خفاش

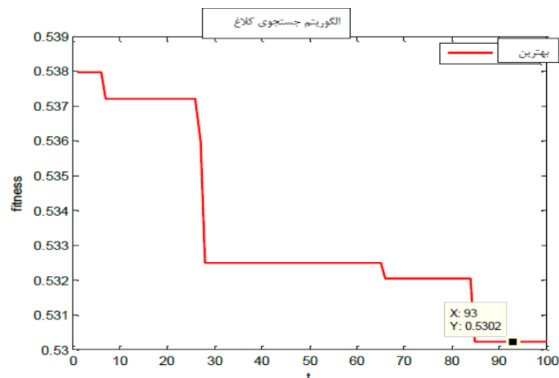
#### ۴-۷- پاسخ حاصل از بهینه‌سازی الگوریتم خفاش

الگوریتم خفاش<sup>۴</sup> (BA)، یک الگوریتم اکتشافی است که با تقلید از رفتار پژواک یابی خفاش‌ها برای انجام بهینه‌سازی عمل می‌کند. این الگوریتم به دلیل عملکرد عالی به‌طور گسترده در مسائل مختلف بهینه‌سازی استفاده می‌شود [۲۳-۲۴]. این الگوریتم بر اساس اصول زندگی خفاش‌ها طراحی و بیان شده است. خفاش‌ها تنها پستانداران بالدار هستند که برای شکار طعمه از انعکاس صدا بهره می‌برند. تاکنون، الگوریتم BA برای مسائل بهینه‌سازی دودویی و برای مسائل بهینه‌سازی چند هدف استفاده شده است. ورودی‌های الگوریتم بهینه‌سازی خفاش به شرح جدول ۶ است. الگوریتم خفاش با ۲۰۰ عدد جمعیت و در مدت زمان ۲ دقیقه و ۱۷٫۰۷ ثانیه به جواب نهایی و بهینه رسید.

جدول ۶: پارامترهای ورودی الگوریتم بهینه‌سازی خفاش

پارامتر	مقدار
اندازه جمعیت	۲۰۰
تعداد نسل‌ها	۱۰۰۰۰
مقدار ثابت Loudness	۰٫۴
نرخ پالس	۰٫۶
فرکانس پایین	۰
فرکانس بالا	۲
ابعاد مسئله	۶
تعداد تکرارها	۱۰۰۰۰

در جدول ۷ مقادیر بهینه‌ی پارامترهای تابع هدف و مقدار بهینه‌ی تابع هدف بیان شده است.



شکل ۴: منحنی همگرایی مربوط به الگوریتم کلاغ

#### ۹-۴- آنالیز حساسیت

آنالیز حساسیت برای این مدل تابع با استفاده از روش میدان کسینوسی انجام شد که نتایج آن در جدول ۱۰ مشاهده می‌شود. جدول ۱۰ نشان‌دهنده آن است که حساس‌ترین پارامترهای ورودی بر خرج ویژه در معدن سنگ آهن سادات به ترتیب شامل ضریب سفتی پله، نسبت گل‌گذاری، قطر چال، طول متوسط چال، فاصله ردیفی چال-ها، ضخامت بارسنگ، تعداد چال و خرج کل مصرفی است. در بین پارامترهای ورودی، ضریب سفتی پله بیشترین و خرج کل مصرفی، کم‌ترین تأثیر را بر خرج ویژه دارد.

جدول ۱۰: آنالیز حساسیت پارامترهای نرمال شده به روش

میدان کسینوسی

پارامتر	$R_{ij}$
D	۰٫۹۵۲
L	۰٫۹۴۱
B	۰٫۹۱۷
S	۰٫۹۲۳
$\frac{K}{B}$	۰٫۹۸۵
$\frac{ST}{B}$	۰٫۹۸۲
NOH	۰٫۹۱۳
Q	۰٫۸۷۷

در شکل ۵ شدت رابطه بین خرج ویژه و پارامترهای ورودی نرمال شده و در شکل ۶ مقایسه شدت رابطه بین خرج ویژه و پارامترهای ورودی داده‌های نرمال شده و اصلی نشان داده شده است.

همچنین با توجه به شکل ۶ می‌توان مشاهده کرد که پارامترهای اصلی و پارامترهای نرمال شده در این مقاله بسیار به هم نزدیک می‌باشند.

#### ۴-۸- پاسخ حاصل از بهینه‌سازی الگوریتم جستجوی کلاغ

الگوریتم جست‌وجوی کلاغ<sup>۵</sup> (CSA) یک روش فرا اکتشافی و نوین است که با شبیه‌سازی رفتار هوشمند کلاغ‌ها سعی در یافتن راه‌حل‌های بهینه برای مسائل مختلف بهینه‌سازی دارد. این روش مبتنی بر جمعیت، بر این اساس استوار است که کلاغ‌ها غذای اضافی خود را در مخفیگاه‌هایی پنهان می‌کنند و در صورت نیاز به آن‌ها مراجعه می‌کنند [۲۵]. ورودی‌های الگوریتم بهینه‌سازی جستجوی کلاغ به شرح جدول ۸ است. الگوریتم بهینه‌سازی جستجوی کلاغ با تعداد جمعیت ۱۰۰ عدد و در زمان ۲۰٫۸۶ ثانیه به جواب رسید و همگرا شد.

جدول ۸: پارامترهای ورودی الگوریتم بهینه‌سازی جستجوی کلاغ

پارامتر	مقدار
ابعاد مسئله	۶
اندازه جمعیت	۱۰۰
احتمال آگاهی	۰٫۱
طول پرواز	۴
تعداد تکرارها	۱۰۰۰۰

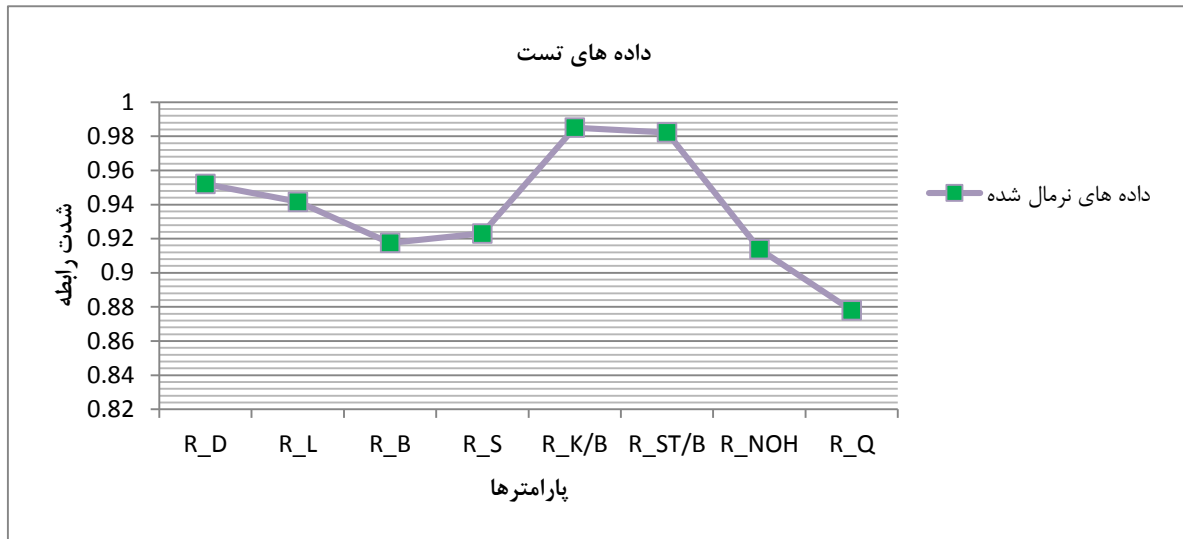
مقادیر بهینه متغیرهای ورودی و متغیر پاسخ (تابع هدف) در جدول ۹ درج شده است.

جدول ۹: خروجی‌های الگوریتم بهینه‌سازی جستجوی کلاغ

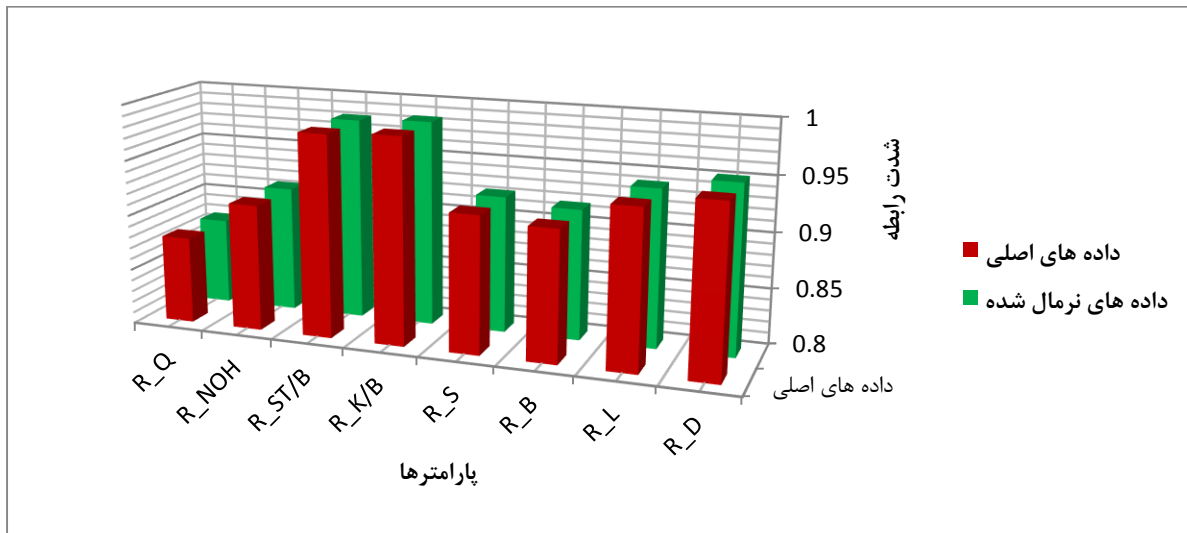
پارامتر	واحد	مقدار
D (قطر چال)	میلی‌متر	۹۶٫۵۰
L (طول چال)	متر	۱۱٫۲۰۸
B (بارسنگ)	متر	۳٫۱
S (فاصله‌داری)	متر	۳٫۵
K/B (نسبت ارتفاع پله به بار سنگ)	-	۳٫۶
ST/B (نسبت گل‌گذاری به بار سنگ)	-	۰٫۸۲۸
NOH (تعداد چال)	عدد	۳۰۶
Q (خرج مصرفی)	کیلوگرم	۱۵۴۹۱٫۹۶
مقدار بهینه‌ی تابع هدف (خرج ویژه)	کیلوگرم بر مترمکعب	۰٫۷۰۳

در شکل ۴ منحنی همگرایی مربوط به الگوریتم کلاغ نشان داده شده است.





شکل ۵: شدت رابطه بین خرج ویژه و داده‌های ورودی نرمال شده



شکل ۶: مقایسه شدت رابطه بین خرج ویژه و داده‌های نرمال شده و اصلی

## ۵- نتیجه‌گیری و پیشنهادها

خرج ویژه یکی از پارامترهای مهم فنی و اقتصادی در عملیات انفجار معادن سطحی محسوب می‌شود که می‌تواند تابعی از پارامترهای طراحی الگوی انفجار باشد. با توجه به اهمیت بهینه‌سازی در انفجار معدنی، در این تحقیق سعی شد تمامی پارامترهای هندسی مؤثر بر خرج ویژه مورد مطالعه قرار گیرند. برای دستیابی به این هدف، در این تحقیق جمع‌آوری داده‌های هندسی انفجار در ۶۰ مجموعه عملیات آتش‌کاری انجام شد و تحلیل آن‌ها توسط نرم‌افزارهای SPSS و متلب صورت گرفت و نتایج زیر به دست آمدند:

الف- با بررسی کارایی مدل‌های مختلف با شاخص‌های ارزیابی شامل ضریب تعیین، جذر میانگین مربعات خطاها، میانگین درصد خطای مطلق و شاخص عملکرد نشان داد که مدل تابع چندجمله‌ای با ضرایب غیر صحیح پیش‌بینی‌گیری دقیق‌تری از خرج ویژه دارد. در این تابع  $0.969 =$  ضریب همبستگی،  $9.825 =$  شاخص عملکرد، کمترین خطای  $0.31 =$  جذر میانگین مربعات خطا و  $0.323 =$  میانگین درصد خطای مطلق به دست آمد.

ب- تابع چندجمله‌ای با ضرایب غیر صحیح با روش میدان کسینوسی مورد آنالیز حساسیت قرار گرفت و مشخص شد همه پارامترهای ورودی در این مدل‌سازی نسبت به خرج

[4] Azimi, Y., Osanloo, M., Aakbarpour-Shirazi, M., Aghajani Bazzazi, A. (2010). Prediction of the blastability designation of rock masses using fuzzy sets. *Int J Rock Mech Min Sci*, 47 (7), pp. 1126-1140.

[5] P.H.S.W. Kulatilake, T. Hudaverdi, Q. Wu. (2012). New prediction models for mean particle size in rock blast fragmentation. *Geotech Geol Eng*, 30, pp. 665-684.

[6] Akbari, Majid., Lashkaripour, Gholamreza., Yarahamdi Bafghi, Alireza., Ghafoori, Mohammad. (2015). Blastability evaluation for rock mass fragmentation in Iran central iron ore mines. *International Journal of Mining Science and Technology* Volume 25, Issue 1, January, Pages 59-66.

[7] <https://www.mining-technology.com/buyers-guide/drilling-blasting>.

[8] Liu, B., Tian, K., Huang, B., Zhang, X., Bian, Z., Mao, Z., et al. (2021). Pollution Characteristics and Risk Assessment of Potential Toxic Elements in a Tin-Polymetallic Mine Area Southwest China: Environmental Implications by Multi-Medium Analysis. *Bull. Environ. Contam. Toxicol.* 1–11. doi:10.1007/S00128-021-03314-4.

[9] Wang, W., Wei, Y., Guo, M., Li, Y., and Wang, G. D. (2021). Coupling Technology of Deep-Hole Presplitting Blasting and Hydraulic Fracturing Enhance Permeability Technology in Low-Permeability and Gas Outburst Coal Seam: A Case Study in the No. 8 mine of Pingdingshan, China. *Adv. Civil Eng.* 1–12. doi:10.1155/5569678.

[10] Aldas, G. G. U., and Ecevitoglu, B. (2008). Waveform Analysis in Mitigation of Blast-Induced Vibrations. *J. Appl. Geophys.* 66 (1), 25–30. doi:10.1016/j.jappgeo.

[11] Li, B., Wang, E., Li, Z., Niu, Y., Li, N., and Li, X. (2021). Discrimination of Different Blasting and Mine Microseismic Waveforms Using FFT, SPWVD and Multifractal Method. *Environ. Earth Sci.* 80 (1), 1–16. doi:10.1007/S12665-020-09330-7.

[12] Li, X., Geng, J., Li, Q., Tian, W., and Zhou, T. (2021). Behaviors and Overlying Strata Failure Law for Underground Filling of a Gently Inclined Medium-Thick Phosphate Deposit. *Adv. Civil Eng.* 1–17. doi:10.1155/3275525.

[13] Moghdisi, Seyedjavad., Yazdi, Javad., Namdar Mohammadi, Tahereh. (2016). Mineralogy and geochemistry of Siriz iron deposit, north west of Zarand, Kerman province. *Geoscience Journal*, Volume 27, Number 106. (In Persian).

[14] Report of the Technical Office Sadat Siriz iron ore mine of Zarand, Zarand, Iran., 2017.

[15] <https://sisoo.ir>.

ویژه از حساسیت قوی برخوردار هستند. از بین پارامترهای ورودی، ضریب سفتی بیشترین و خرج کل مصرفی، کمترین حساسیت را دارند.

پ- تابع مذکور در الگوریتم‌های خفاش و جستجوی کلاغ در نرم‌افزار متلب فراخوانی شد و بهینه‌سازی آن توسط الگوریتم‌های مذکور انجام گردید. با توجه به الگوهایی پیشنهادی، میزان خرج ویژه بهینه با الگوریتم‌های خفاش و جستجوی کلاغ به ترتیب، ۰/۶۶۶ و ۰/۷۰۳ کیلوگرم بر مترمکعب به دست آمد. مقایسه نتایج بهینه‌شده با الگوریتم خفاش، خرج ویژه مناسب‌تری را به دست داد.

ت- مقایسه‌ی دو الگوریتم بهینه‌سازی خفاش و جستجوی کلاغ نشان داد که الگوریتم بهینه‌سازی جستجوی کلاغ دارای سرعت همگرایی و دستیابی به جواب بالاتری است، چراکه با تعداد جمعیت ۱۰۰ عدد به جواب رسید و همگرا شد؛ اما الگوریتم خفاش با ۲۰۰ عدد جمعیت به جواب نهایی و بهینه رسید.

ث- مقایسه‌ی دو الگوریتم بهینه‌سازی خفاش و جستجوی کلاغ نشان داد که الگوریتم بهینه‌سازی جستجوی کلاغ با سرعت بیشتری همگرا و بهینه می‌شود، چراکه با اندازه‌گیری زمان رسیدن به جواب بهینه بین دو الگوریتم نشان داد که الگوریتم جستجوی کلاغ در ۲۰/۸۶ ثانیه، اما الگوریتم خفاش با ۲ دقیقه و ۱۷/۰۷ ثانیه به جواب نهایی بهینه رسید و همگرا شد.

نگارندگان این تحقیق مواردی را برای پژوهش‌های بعدی به صورت زیر پیشنهاد می‌دهند:

۱- در عملیات انفجار خصوصیات فیزیکی، مکانیکی و ژئومکانیکی توده سنگ نیز برداشت‌شده و در محاسبه خرج ویژه بهینه لحاظ شوند.

۲- تأثیر عواملی همچون شاخص قابلیت انفجار، شاخص خردایش سنگ و مشخصات ماده منفجره بر خرج ویژه بهینه در عملیات آتش‌کاری نیز مورد مطالعه قرار گیرند.

## مراجع

[1] Konya CJ, Walter EJ. (1991). Rock blasting and overbreak control. US: Federal Highway Administration, No. FHWA-HI-92-001.

[2] S. Bhandari. (1997). Engineering rock blasting operations. Rotterdam, Brookfield.

[3] J.P. Latham, P. Lu. (1999). Development of an assessment system for the blastability of rock masses. *Int J Rock Mech Min Sci*, 36, pp. 41-55.

Neural Network Systems. Scientific Research Journal of Mining Engineering, Volume 1, Number 1, (In Persian).

[22] Sempritt, Chatterjee, Ali, S. Hadi, Bertram, Price. (2010). Regression analysis with examples. (translated by Hossein Ali Niromand), Mashhad: Ferdowsi University Press, (In Persian).

[23] Mirjalili, S.A., Mirjalili, S.M., Yang, X.S. (2014). Binary bat algorithm, Neural computing and applications.25(3-4): 663-681.

[24] Yechuang, Wang., Penghong, Wang., Jiangjiang, Zhang .,Zhihua, Cui., Xingjuan, Cai., Wensheng, Zhang., Jinjun, Chen. (2019). A Novel Bat Algorithm with Multiple Strategies Coupling for Numerical Optimization. International Journal of Scientific World (IJSW).

[25] Abdelazim G, Hussien., Mohamed, Amin., Mingjing, Wang., Guoxi, Liang., Ahmed, Alsanad., ABDU, GUMAEL., HUILING, CHEN. (2020). Crow Search Algorithm: Theory, Recent Advances, and Applications. IEEE Access ( Volume: 8).

[16] <https://gsi.ir/kerman/fa>.

[17] A. Karamia, S. Afiuni-Zadehb. (2013). Sizing of rock fragmentation modeling due to bench blasting using adaptive neuro-fuzzy inference system (ANFIS). Int J Min Sci Technol, 23 (6), pp. 809-813.

[18] ISRM (International Society for Rock Mechanics). (1978). Commission on standardization of laboratory and field tests, Suggested methods for the quantitative description of discontinuities in rock masses. Int J Rock Mech Min Sci Geomech Abstr, 15 (6), pp. 319-368.

[19] Alvarez Grima, M., Babuska, R. (1999). Fuzzy model for the prediction of unconfined compressive Strength of rock samples. Rock MechRock Eng, 36: 339-349.

[20] Yilmaz, I., Yuksek, A.G. (2008). An example of artificial neural network application for indirect estimation of rock parameters. Rock MechRock Eng, 41: 781-795.

[21] Saemi, M., Gilani, S.O. (2006). Determining of Optimal Powder Factor in Tunnel Blasting Using

<sup>†</sup>Bat Algorithm

<sup>^</sup>Crow Search Algorithm

<sup>1</sup>Root mean square error

<sup>2</sup>Value account for

<sup>3</sup>Mean absolute percentage error