



## تخمین خرج ایمن به منظور کنترل لرزش زمین در انفجارات سطحی

عارف علیپور\*<sup>۱</sup>، مجتبی مختاریان اصل<sup>۲</sup>

پذیرش مقاله: ۱۴۰۰/۰۴/۲۶

دریافت مقاله: ۱۳۹۹/۰۹/۰۵

### چکیده

لرزش زمین یکی از پیامدهای ناخواسته روش چالزنی و انفجار است. اساساً انتخاب خرج ایمن در تاخیرهای انفجاری، با توجه به حد مجاز لرزش و فاصله نقطه‌ی حساس مدنظر از محل انفجار، صورت می‌گیرد. در این مقاله با استفاده از داده‌های ثبت شده‌ی مربوط به انفجارات معدن روباز سونگون، کارایی رابطه‌های تجربی رگرسیونی متداول و روابط جدید مبتنی بر الگوریتم فرا ابتکاری، جهت تخمین ماکزیمم خرج ایمن در هر تاخیر انفجار، ارزیابی شده است. با توجه به اینکه روابط تجربی رایج، عمدتاً جهت تخمین ماکزیمم سرعت ذرات ارائه شده‌اند، هنگامی که خرج ایمن به صورت تابعی از ماکزیمم سرعت ذرات و فاصله تعریف می‌شود، جواب حاصل از این روش‌های تجربی رایج اغلب با خطای زیادی همراه است. در این پژوهش در کنار روابط تجربی غیرمستقیم مرسوم و رابطه‌ی نسبتاً جدید مستقیم ارائه شده توسط رای و همکاران، روابط جدیدی به منظور تخمین خرج ایمن انفجاری ارائه شده است؛ و ضرایب این روابط با استفاده از الگوریتم رقابت استعماری تعیین شده است. مطابق نتایج حاصل مبتنی بر شاخص‌های آماری ضریب همبستگی، مجذور میانگین مربعات خطا، واریانس قدرمطلق خطای نسبی و به حساب واریانس، مدل غیرخطی پیشنهادی مبتنی بر الگوریتم رقابت استعماری، منجر به ارتقای سطح دقت تخمین شده و حتی بهتر از مدل پیشنهادی رای و همکاران عمل کرده است؛ از این رو رابطه‌ی پیشنهادی به عنوان یک مدل کارا به منظور طراحی انفجارات ایمن در معدن سونگون پیشنهاد می‌شود.

**کلید واژه‌ها:** انفجار، لرزش، تخمین خرج ایمن، روش‌های تجربی و الگوریتم رقابت استعماری.

۱. عضو هیات علمی گروه مهندسی معدن و مواد، دانشگاه صنعتی ارومیه، ارومیه a.alipour@mie.uut.ac.ir

۲. عضو هیات علمی گروه مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی ارومیه، ارومیه

\* مسئول مکاتبات

## ۱. مقدمه

بار به صورت جدی توسط رای و همکاران مورد بررسی قرار گرفت؛ به عبارتی دیگر وقتی ماکزیمم خرج در هر تاخیر توسط روابط تجربی معمول به صورت تابعی از PPV و فاصله از سینه کار تخمین زده می شود، خطای تخمین خرج، بالا بوده و در عمل این روابط کارایی لازم را ندارند؛ و نیاز به رابطه‌ی مستقیم جهت تخمین خرج ایمن هر تاخیر ضروری است.

در چند دهه‌ی اخیر، هوش مصنوعی جهت حل مسائل مختلف علمی مورد استفاده قرار گرفته است. با توجه به توانمندی روش‌های فراابتکاری به عنوان شاخه‌ای از هوش مصنوعی، جهت تعیین ضرایب روابط رگرسیونی پیچیده، می توان از آن به عنوان یک ابزار نیرومند جهت ارتقا رابطه‌های تخمینگر شدت لرزش و خرج ایمن تاخیرهای انفجار استفاده کرد.

در مقاله حاضر نتایج ثبت ۳۷ انفجار سطحی در معدن مس سونگون مورد تحلیل واقع شده و روابط ارتقا یافته تخمینگر خرج ایمن انفجاری با استفاده از الگوریتم رقابت استعماری بدست آمده است، در نهایت مقایسه‌ای بین عمل کرد روابط تجربی مرسوم و روابط جدید پیشنهادی، صورت گرفته است.

## ۲. معرفی مورد مطالعاتی - معدن سونگون

معدن مس سونگون در شمال غرب ایران، در مختصات جغرافیایی، ۴۶ درجه و ۴۳ دقیقه طول شرقی و ۳۸ درجه و ۴۲ دقیقه عرض شمالی قرار دارد. سابقه معدنکاری در سونگون به دو قرن پیش بر می گردد. مطالعات امکان پذیری مقدماتی در سال ۱۳۷۰ توسط شرکت اس ان سی کانادا و در سال ۱۳۷۴ توسط شرکت ایتوک انجام شده است. عملیات پیش باطله - برداری نیز از سال ۱۳۷۲ توسط شرکت ترانشه معدن، آغاز و همزمان با انجام اکتشافات تکمیلی و تفضیلی به کمک شرکت - های مشاور پارس اولنگ و شرکت ریوتینو در سال ۱۳۷۸ به پایان رسیده است. این کانسار از نوع نهشته‌های پورفیری مس بوده و رگه‌های درهم پرعیار در توده‌ی نیمه عمیق مونزونیت پورفیری متمرکز شده‌اند. سنگ‌های درونگیر این توده‌ی مونزونیتی را واحدهای آهکی کرتاسه‌ی بالا و سری‌های ولکانیکی آندزیتی - لاتریتی تشکیل داده‌اند. با توجه به مشخصات

با وجود پیشرفت‌های اخیر در فن حفاری مکانیزه، هنوز چالزنی و انفجار متداولترین روش حفاری سنگ است. به - هنگام انفجار، تمامی انرژی ماده منفجره، صرف کار مطلوب نمی شود (Alipour et al., 2018) و انفجار علاوه بر محدوده‌ی مورد نظر، بر محدوده‌ی وسیعی از اطراف اثر نامطلوب می گذارد (Dowding, 1992).

برای طراحی انفجارات ایمن عاری از لرزش نامتعارف، بررسی‌های مختلفی توسط متخصصین صورت گرفته و استانداردهای مختلفی برای تامین ایمنی ابنیه‌ها، سازها و ... ارائه شده است ( Hosseinzadeh Gharehgheshlagh and Alipour, 2020). موضوع لرزش ناشی از انفجار از گذشته تاکنون موضوع بحث بسیاری از محققین بوده و از قدمتی طولانی برخوردار است. از تحقیقات اخیر می توان به کارهای صورت گرفته در مراجع مربوط (Kumar et al., 2016)، (Hudaverdi and Akyildiz, 2017) و (Koçaslan et al., 2017) اشاره کرد.

روابط تخمین گر متعددی جهت پیش بینی شدت لرزش در قالب ماکزیمم سرعت ذرات (Peak Particle Velocity) PPV ارائه شده است؛ عمدتاً این روابط مبتنی بر کارهای آماری صورت گرفته بروی داده‌های حاصل از انفجارات آزمایشی بوده و شدت لرزش را به صورت تابعی از فاصله از سینه کار و ماکزیمم مقدار خرج در هر تاخیر بیان می کنند ( Mokhtarian, 2020). به هنگامی که ماکزیمم خرج ایمن در هر تاخیر توسط این روابط سنتی غیر مستقیم تخمین زده می شود، میزان دقت و صحت تخمین از سطح پایینی برخوردار است. علت بروز چنین مساله‌ای به کاربری اصلی این روابط تجربی که بیشتر جهت تخمین PPV که تابعی از فاصله و ماکزیمم مقدار خرج در هر تاخیر است، مربوط می شود. توجه به این نکته ضروری است که این روابط بطور معمول دارای ضرایب آماری نسبتاً پایینی بوده و به هنگام معکوس شدن، دقت این روابط بسیار پایین می آید. مطلب مذکور برای اولین

### ۳. تخمین حداکثر خرج ایمن در هر تاخیر انفجار با

#### روش‌های تجربی

برای کاهش اثرات لرزش زمین و محافظت از سازه‌ها، محققین و موسسه‌های تحقیقاتی با توجه به معیارهای گوناگون، روابطی را برای پیش‌بینی لرزش ناشی از انفجار بر مبنای داده‌های آزمایشی ثبت شده، ارائه کرده‌اند. از معروفترین این روابط می‌توان به رابطه‌ی اداره‌ی معادن امریکا (Duvall and Fogelson, 1962)، رابطه‌ی لانگفورس-کیلستروم (Langefors and Kihlstrom, 1978) و رابطه‌ی آمبراسیس-هندرون (Ambraseys and Hendron, 1968) اشاره کرد.

رابطه‌ی ارائه شده توسط رای و همکاران، اولین رابطه‌ی مستقلی است که جهت تخمین خرج ایمن در هر تاخیر انفجارات سطحی گسترش یافته است (Rai et al., 2005). بعدها نیز تحقیقات مشابهی صورت گرفته است (Alipour and Khandelwal, 2011) (Alipour et al., 2012) و (Ashtiani, 2011) (and Singh, 2013).

به‌طور معمول در مدل‌سازی شدت لرزش ناشی از انفجار با استفاده از روابط تجربی، سه پارامتر اصلی ماکزیمم خرج در هر تاخیر، فاصله از محل سینه‌کار انفجار و ماکزیمم سرعت ذرات به‌کار گرفته می‌شوند (Hossaini and Sen, 2004) سایر پارامترهای طرح انفجار و پارامترهای ژئومکانیکی به‌صورت مستتر در ضریب و ثوابت موجود در روابط تجربی مورد توجه قرار می‌گیرند (Hossaini and Sen, 2006).

در تحقیقات تکمیلی سال‌های اخیر، با روش‌های پیش‌بینی مبتنی بر هوش مصنوعی، مدل‌سازی‌ها با پارامترهای بیشتر و در بردارنده خصوصیات ژئومکانیکی محدوده‌ی انفجار و مشخصه‌های طرح انفجاری صورت گرفته است (Khandelwal and Singh, 2009).

با این‌حال اهمیت پارامترهای ماکزیمم خرج در هر تاخیر انفجار، فاصله از محل سینه‌کار و ماکزیمم سرعت ذرات، و ارتباط‌دهی آنها بیشتر مورد توجه بوده است. در جدول ۳ مهمترین روابط تجربی رایج تخمین‌گر شدت لرزش و خرج

کانسار و به‌دلیل تناژ بالا، استخراج معدن به روش روباز صورت می‌گیرد. ذخیره‌ی احتمالی این معدن بیش از یک میلیارد تن و ذخیره قابل استخراج آن حدود ۷۹۶ میلیون تن برآورد شده است. به‌طور کلی محدوده‌ی معدن از دیدگاه زمین‌شناسی، از سنگ‌های کربناته کرتاسه بالایی، توده‌ی مونزونیتی پورفیری اصلی، دایک‌های مونزونیتی و دیوریتی و سایر واحدهای آتشفشانی تشکیل شده است. بر مبنای مطالعات ژئومکانیکی این محدوده به شش زون و بلوک مجزا تقسیم‌بندی شده است. اطلاعات ژئومکانیکی مربوط به بلوک‌های مختلف معدن سونگون در جدول ۱ ارائه شده است.

جدول ۱. مشخصات ژئومکانیکی بلوک‌های معدن سونگون

(Parsaei, 2010)

Block number	Lithology	USC (Mpa)	Rock mass deformation modulus (MPa)	Cohesion values of rock mass (KPa)
1	Monzonite	3.575	1862	205-220
2	Monzonite	1.402	1050	130-145
3	Monzonite	1.558	760	100-110
4	Monzonite	2.817	1841	195-210
5	Monzonite and Diorite	4.184	1683	220-240
6	Argillite	0.782	966	95-105

به‌علت حضور سازه‌های جنبی معدن، کنترل لرزش ناشی از انفجار ضروری است. با توجه به اهمیت انفجار به‌عنوان بخش مهمی از سیکل معدن‌کاری و روند ثابت الگوهای انفجاری در معدن سونگون، بررسی امکان ارائه‌ی رابطه‌ی میرایی امواج لرزشی ضروری است. در جدول ۲ خلاصه‌ای از مشخصات چالزنی و انفجار مربوط به این معدن ارائه شده است.

جدول ۲. مشخصات چالزنی و انفجار در محل معدن سونگون

Parameter	Related information	Parameter	Related information
Hole Diameter (mm)	90, 127	Stemming (m)	One third of Hole length
Hole length (m)	13-15	Specific Charge ( $gr/m^3$ )	300-800
Bench high (m)	12.5	Blast Hole inclination	Vertical
Burden & spacing (m)	2×2, 2×3, 2.5×3.5, 4×5	Charging configuration	Bottom priming, continuous charge

ایمن ارائه شده است. جدول ۳. مدل‌های تجربی منتخب تخمینگر حداکثر سرعت ذرات

Name of Predictor Equation	Equations
Duval & Fogelson, USBM	$PPV = K \cdot \left(\frac{R}{\sqrt{Q}}\right)^{-B}$
Ambraseys - Hendron	$PPV = K \cdot \left(\frac{R}{\sqrt[3]{Q}}\right)^{-B}$
Rai et al.	$Q_{max} = K \cdot (V \times D^2)^B$

پیشنهادی، در جدول ۵ آورده شده است. به کمک ضرایب بدست آمده‌ی جدول ۵ می‌توان ماکزیمم خرج ایمن هر تاخیر را با توجه به سطح مجاز و مشخص PPV و فاصله‌ی سینه‌کار انفجار تا محل مورد بررسی، مشخص نمود.

جدول ۵. روابط پیشنهادی تجربی مورد استفاده جهت تخمین خرج ایمن هر تاخیر در انفجارات معدن سونگون

Predictor	Formulation
USBM	$Q = D^2 \left(\frac{PPV}{302.07}\right)^{\frac{2}{1.561}}$
Ambraseys and Hendron	$Q = D^3 \left(\frac{PPV}{1810.6}\right)^{\frac{3}{1.58}}$
Rai et al.	$Q = 0.0598(PPV \times D^2)^{0.7066}$

با استفاده از روابط مندرج در جدول ۳ و بدست آوردن ضرایب مخصوص هر ساختگاه می‌توان رابطه‌ی مختص آنرا تعیین نمود. لازم به ذکر است که از سه رابطه‌ی پیشنهادی جدول ۳، رابطه‌ی پیشنهادی رای و همکاران به‌طور مستقیم به منظور تعیین خرج ایمن قابل استفاده است و دو رابطه‌ی دیگر با کارکرد اصلی تخمین ماکزیمم سرعت ذرات توسعه یافته‌اند. در روابط ارائه شده (جدول ۳)، PPV ماکزیمم سرعت ذرات، Q ماکزیمم خرج به‌ازای هر تاخیر، D فاصله و ثابت‌های K و B ضرایب ثابت محلی هستند، که از طریق رگرسیون بدست می‌آیند؛ در واقع این ضرایب به مشخصات محل انفجار بستگی دارند. مهمترین مشخصات محلی شامل: زمین‌شناسی محل، نوع سنگ‌ها، نوع و کمیت ماده‌ی منفجره در هر تاخیر، طول زمان تاخیر، پارامترهای ژئومتری طرح انفجار و ... می‌باشند.

به‌طور رایج با مبنا قرار دادن دو پارامتر اصلی میزان حداکثر سرعت ذرات و فاصله از سینه‌کار و بدست آوردن ضرایب مخصوص روابط پیشنهادی از طریق چندین انفجار آزمایشی، در هر پروژه‌ی درگیر با عملیات انفجاری می‌توان تخمینی جهت محاسبه خرج ایمن هر تاخیر، ارائه داد.

شکل کلی رابطه‌ی تخمینگر خرج ایمن هر تاخیر با قالب کلی مطابق رابطه‌ی ۱ قابل بیان است. در این رابطه  $k_0, k_1, k_2$  ضرایب ثابتی هستند که از طریق رگرسیون برای هر مورد مطالعاتی قابل تعیین هستند.

$$Q = k_0 \cdot D^{k_1} \cdot PPV^{k_2} \quad (1)$$

در تحقیق حاضر علاوه بر مدل تخمین ارائه شده در رابطه (۱)، مدل غیرخطی دیگری نیز مورد استفاده قرار گرفته است که در رابطه‌ی (۲) بیان شده است.

$$Q = k_0 + k_1 PPV^{k_2} + k_3 D^{k_4} + k_5 PPV^{k_6} D^{k_7} \quad (2)$$

در رابطه‌ی بالا  $k_0, k_1, k_2, k_3, k_4, k_5, k_6, k_7$  ضرایب ثابتی هستند که باید تعیین شوند.

جدول ۴. پارامترهای آمار توصیفی نتایج ثبت شده از انفجار

Parameter	PPV (mm/s)	R (m)	Q (kg/delay)
Mean	25.244	413.54	1004
Variance	1689	90413	6.898E+5
Standard deviation	41.1	300.69	830.55
Minimum	1.07	40	101
Median	4.72	341	843
Maximum	137	1179	3313

نتایج آماری تجزیه و تحلیل داده‌های ثبت شده بر مبنای روابط

حد نهایی رقابت استعماری یا شرط خاتمه الگوریتم، تمام تعداد تکرارهای تعیین شده یا تا زمانی که تمام مستعمرات تحت کنترل یک امپراطوری واحد قرار گیرند، می‌باشد. در این امپراطوری مستعمرات از لحاظ قدرت به کشور امپریالیست خیلی نزدیک هستند (Atashpaz-Gargari and Lucas, 2007a). تا بحال از ICA برای حل مسائل گوناگون بهینه‌سازی استفاده شده است، که از آن جمله می‌توان به پیش‌بینی بازار بورس (Sadaei et al., 2016)، طراحی فیلتر دیجیتال (Sharifi Ardalan and Mojallali, 2015)، مساله‌ی فروشنده دوره‌گرد (Behnamian et al., 2015) و مساله‌ی زمان‌بندی (Zandieh, 2011) و (Lian et al., 2012) اشاره کرد. فلوچارت روش حل مساله در شکل ۱ نشان داده شده است. به‌منظور تعیین ضرایب روابط پیشنهادی توسط الگوریتم رقابت استعماری توابع هدفی مطابق روابط ۳ و ۴ در نظر گرفته شده است.

$$\text{Minimize } \sum_{i=1}^n \left( k_0 \times D_i^{k_1} \times PPV_i^{k_2} \right)^2 \quad (3)$$

$$\text{Minimize } \sum_{i=1}^n \left( \begin{matrix} k_0 \\ +k_1 PPV_i^{k_2} \\ +k_3 D_i^{k_4} \\ +k_5 PPV_i^{k_6} D_i^{k_7} \\ -Q_i \end{matrix} \right)^2 \quad (4)$$

در روابط بالا  $k_0, k_1, k_2, k_3, k_4, k_5, k_6, k_7$  ضرایب ثابتی هستند که بر مبنای رگرسیون غیرخطی مبتنی بر الگوریتم ICA قابل تعیین هستند.  $Q_i, D_i$  و  $PPV_i$  نیز مقادیر ثبت‌شده مربوط به مورد مطالعاتی هستند.

#### ۴. کاربرد الگوریتم رقابت استعماری جهت تخمین حداکثر خرج ایمنی در هر تاخیر انفجار

در این بخش از تحقیق الگوریتم رقابت استعماری (Imperialist Competitive Algorithm) (ACI) برای تعیین ضرایب مدل تخمین خرج ایمنی استفاده شده است. ICA توسط آتش‌پز و لوکاس در سال ۲۰۰۷ ارائه شده است، که الهام‌گرفته از فرآیندهای سیاسی-اجتماعی می‌باشد (Atashpaz-Gargari and Lucas, 2007a). همانند دیگر الگوریتم‌های فرآیندکاری جمعیت محور، این الگوریتم نیز کار خود را با یک جمعیت اولیه تصادفی شروع می‌کند، که هر کدام از اعضای جمعیت "کشور" نامیده می‌شود. با توجه به تابع هدف مساله، تعدادی از بهترین کشورهای جمعیت اولیه به‌عنوان امپریالیست انتخاب شده و مابقی به‌عنوان مستعمره (Colony) در نظر گرفته می‌شوند. به مجموعه‌ی یک امپریالیست و مستعمراتش، امپراتوری (Empire) گفته می‌شود. امپریالیست با توجه قدرتش، مستعمرات را با یک روند خاصی به سمت خود جذب می‌کند. قدرت کل هر امپراطوری، به هر دو بخش تشکیل‌دهنده‌ی آن یعنی امپریالیست و مستعمرات آن بستگی دارد. با شکل‌گیری امپراطوری‌های اولیه، رقابت امپریالیستی میان آنها شروع شده و هر امپراطوری که نتواند در رقابت استعماری، موفق عمل کرده و بر قدرت خود بیفزاید (و یا حداقل از کاهش نفوذش جلوگیری کند) حذف خواهد شد. بنابراین بقای یک امپراطوری، وابسته به قدرت آن در جذب مستعمرات امپراطوری‌های رقیب و به سيطرة در آوردن آنها خواهد بود. در نتیجه، در جریان رقابت‌های امپریالیستی، به-تدریج بر قدرت امپراطوری‌های بزرگتر افزوده شده و امپراطوری‌های ضعیف‌تر حذف خواهند شد. امپراطوری‌ها برای افزایش قدرت خود، مجبور خواهند شد تا مستعمرات خود را نیز پیشرفت دهند.

با گذشت زمان، مستعمرات از لحاظ قدرت به امپریالیست نزدیک‌تر خواهند شد و شاهد یک نوع همگرایی در جواب‌های مساله خواهیم بود. حد نهایی رقابت استعماری، زمانی است که یک امپراطوری واحد در دنیا وجود داشته باشد.

تخمین PPV ارائه شده‌اند، تنها رابطه‌ای که به منظور تخمین خرج ایمن ارائه شده، رابطه‌ی رای و همکاران است؛ به دلیل فقدان رابطه‌ی مناسب، با استفاده از مهمترین پارامترهای قابل دسترس و تاثیرگذار که شامل: سطح ایمن شدت لرزش PPV و فاصله از سینه-کار مورد بررسی است، مدل کلی تعریف شده و ضرایب آن با استفاده از الگوریتم رقابت استعماری تعیین شده است.

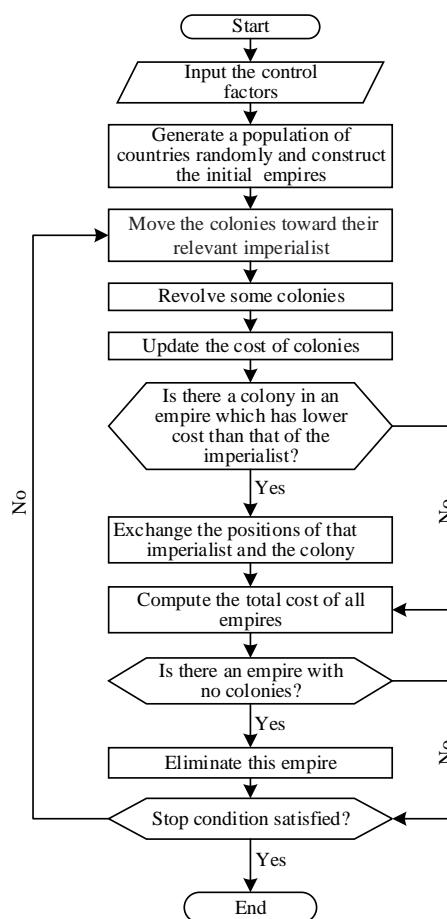
برای مقایسه برانده‌گی تخمین‌های صورت گرفته، آزمون‌های آماری مشخصی قابل استفاده هستند، که آزمون‌های مورد استفاده در این تحقیق در جدول ۶ جمع‌بندی شده‌اند. در روابط ارائه شده برای آزمون‌های آماری،  $Q_{Esti}$  و  $Q_{Meas}$  به ترتیب برابر با مقادیر اندازه‌گیری شده و تخمین زده شده‌ی ماکزیمم خرج هر تاخیر انفجار می‌باشند.

بر مبنای شاخص‌های قید شده در **Error! Reference source not found.** تمامی مدل‌های تخمین خرج ایمن مورد ارزیابی قرار گرفتند، که نتیجه آن در **Error! Reference source not found.** ارائه شده است. با توجه به مقادیر حاصله از آزمون‌های آماری (**Error! Reference source not found.**) مدل دوم تخمین مبتنی بر الگوریتم رقابت استعماری (رابطه‌ی ۶) در تمامی ارزیابی‌ها بهترین مقدار را دارا می‌باشد. در نتیجه این مدل به منظور طراحی انفجارات سطحی معدن سونگون پیشنهاد می‌شود.

جدول ۶. آزمون‌های آماری مورد استفاده برای مقایسه میزان

برانده‌گی تخمین

Statistical criteria	Formulation
Correlation Coefficient, R	$CC = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} [(Q_{Meas}^i - \overline{Q_{Meas}})(Q_{Esti}^i - \overline{Q_{Esti}})]}{\sqrt{\sum_{i=1}^{i=n} (Q_{Meas}^i - \overline{Q_{Meas}})^2 \times \sum_{i=1}^{i=n} (Q_{Esti}^i - \overline{Q_{Esti}})^2}}$
Route Mean Square Error, RMSE	$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \times \sum_{i=1}^{i=n} (Q_{Meas} - Q_{Esti})^2}$
Variance Absolute Relative Error, VARE	$VARE = \text{var} \left( \left  \frac{Q_{Meas} - Q_{Esti}}{Q_{Meas}} \right  \right) \times 100$
Variance Account for, VAF	$VAF = \left[ 1 - \frac{\text{var}(Q_{Meas} - Q_{Esti})}{\text{var}(Q_{Meas})} \right] \times 100$



شکل ۱. فلوچارت الگوریتم رقابت استعماری (Atashpaz- (Gargari and Lucas, 2007b)

ضرایب توابع هدف ارائه شده در روابط (۳) و (۴) با استفاده از الگوریتم رقابت استعماری که با زبان برنامه‌نویسی ++C در محیط مایکروسافت ویژوال استدیو ۲۰۱۳ بسط‌یافته، مطابق با روابط (۵) و (۶) تعیین شده است.

$$Q_{ICA_i} = 0.000121PPV^{0.13235} D^{2.2767} \quad (5)$$

$$Q_{ICA_{ii}} = -3136.4 + 2788.5PPV^{-0.436} + 16963.5D^{-0.456} + 0.0004275PPV^{1.294} D^{2.130} \quad (6)$$

۵. مقایسه عملکرد مدل‌های مختلف

پیشتر ذکر شد که روابط مندرج در جدول ۳ در اصل به منظور

## ۶. نتیجه گیری

لزوم توجه به انجام انفجارات ایمن با توجه به نارضایتی‌های مجاورین و جلوگیری از آسیب به سازه‌های اطراف ضروری است. رفتارنگاری صحیح، با هدف تحلیل مناسب نتایج، منجر به استفاده‌ی صحیح از انرژی مواد منفجره در راستای جابجایی مناسب سنگ می‌شود. توجه به روابط تجربی میرایی و استانداردهای موجود لرزش انفجار، مانع از انجام انفجارات بی‌مهابا و محتاطانه می‌شود.

روابط تجربی تخمین‌گر شدت لرزش به‌هنگام به‌کارگیری جهت تخمین خرج ایمن هر تاخیر، از عملکردی توام با خطای زیاد برخوردارند. با توجه به ارزیابی داده‌های مربوط به انفجارات معدن سونگون، عدم کارکرد مناسب رابطه‌های متداول این حوزه نظیر: روابط آمبراسیس-هندرون و اداره معادن آمریکا به اثبات رسید؛ می‌بایست توجه شود که دو مدل اداره‌ی معادن آمریکا و آمبراسیس - هندرون فقط جهت تخمین PPV به‌صورت تابعی از ماکزیمم خرج ایمن هر تاخیر و فاصله از سینه‌کار، عمل‌کرد مناسبی دارند؛ ولی کارایی لازم جهت تخمین خرج ایمن را ندارند.

برابر نتایج تحقیق حاضر، هرچند رابطه‌ی پیشنهادی رای و همکاران به‌منظور تخمین خرج ایمن انفجارات سطحی گسترش یافته، ولی در مقایسه با مدل‌های تجربی دیگر، از برتری محسوسی برخوردار نیست.

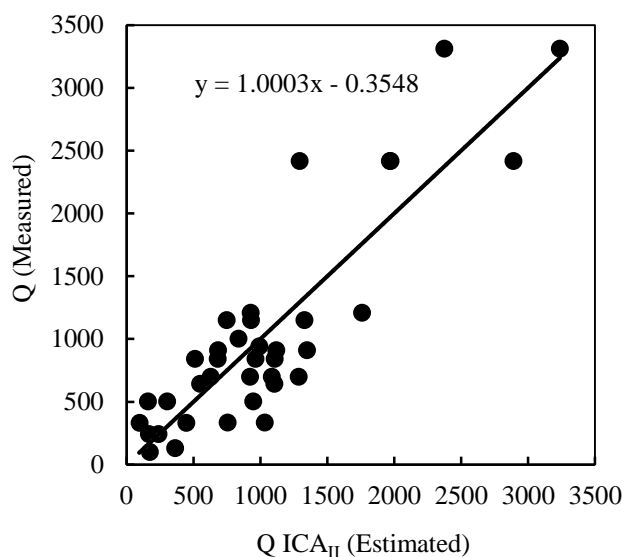
با استناد به شاخص‌های آماری، کارایی رابطه‌ی غیرخطی جدید مبتنی بر الگوریتم رقابت استعماری به‌عنوان بهترین رابطه‌ی تخمین‌گر ماکزیمم خرج ایمن به اثبات رسید، از این‌رو این رابطه به منظور طراحی انفجارات ایمن در معدن سونگون پیشنهاد می‌شود.

جدول ۷. مقایسه مدل‌های مختلف تخمین‌گر خرج ایمن هر

تاخیر بر مبنای آزمون‌های آماری

Model Name	R	RMSE	VARE	VAF (%)
USBM	0.76	534.98	0.2265	0.578
Ambraseys and Hendron	0.77	773.88	0.4382	0.500
Rai et al.	0.73	596.64	0.2135	0.510
Alipour and Mokhtarian (ICA <sub>I</sub> -based)	0.8	502.1	0.227	0.626
Alipour and Mokhtarian (ICA <sub>II</sub> -based)	0.88	397.2	0.191	0.764

در شکل ۲ مقادیر تخمین‌زده شده‌ی حداکثر خرج ایمن هر تاخیر انفجاری در مقابل مقادیر اندازه‌گیری شده ترسیم شده است.



شکل ۲. نمودار تخمین - اندازه‌گیری شده مدل ارائه شده‌ی

مبتنی بر الگوریتم رقابت استعماری

به هر مقدار که شیب خط حاصل از رگرسیون به عدد یک نزدیکتر باشد، دقت تخمین مدل بهتر خواهد بود. در شکل مذکور نیز نزدیکی شیب خط مربوط به این رابطه به عدد یک گویای دقت بالای مدل است.

## منابع

- Alipour, A., Ashtiani, M., 2011. Fuzzy modeling approaches for the prediction of maximum charge per delay in surface mining. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 48(2): 305-310.
- Alipour, A., Mokharian, M., Chehreghani, S., 2018. An Application of Fuzzy Sets to the Blastability Index (BI) Used in Rock Engineering. *Periodica Polytechnica Civil Engineering*, 62(3): 580-589.
- Alipour, A., Mokhtarian, M., Abdollahei Sharif, J., 2012. Artificial neural network or empirical criteria? A comparative approach in evaluating maximum charge per delay in surface mining — Sungun copper mine. *Journal of the Geological Society of India*, 79(6): 652-658.
- Ambraseys, N., Hendron, A., 1968. *Dynamic behavior of rock masses in rock mechanics in engineering practice* (KG Stagg & OC Zienkiewicz, Eds.). New York: John Wiley and Sons.
- Ardalan, Z., Karimi, S., Poursabzi, O., Naderi, B., 2015. A novel imperialist competitive algorithm for generalized traveling salesman problems. *Applied Soft Computing*, 26: 546-555.
- Atashpaz-Gargari, E., Lucas, C., 2007a. Imperialist competitive algorithm: an algorithm for optimization inspired by imperialistic competition, *Evolutionary computation, 2007. CEC 2007. IEEE Congress on. IEEE*, pp. 4661-4667.
- Atashpaz-Gargari, E., Lucas, C., 2007b. Imperialist competitive algorithm: An algorithm for optimization inspired by imperialistic competition, *2007 IEEE Congress on Evolutionary Computation*, pp. 4661-4667.
- Behnamian, J., Zandieh, M., 2011. A discrete colonial competitive algorithm for hybrid flowshop scheduling to minimize earliness and quadratic tardiness penalties. *Expert Systems with Applications*, 38(12): 14490-14498.
- Dowding, C.H., 1992. Suggested method for blast vibration monitoring. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 29(2): 145-156.
- Duvall, W.I., Fogelson, D.E., 1962. Review of criteria for estimating damage to residences from blasting vibrations. US Department of the Interior, Bureau of Mines.
- Hossaini, M., Sen, G.C., 2006. A Study of the Influence of Different Blasting Modes and Explosive Types on Ground Vibrations. *Iranian Journal of Science and Technology*, 30(B3): 313-325.
- Hossaini, S., Sen, G., 2004. Effect of explosive type on particle velocity criteria in ground vibration. *Journal of Explosives Engineering*, 21(4): 34-36.
- Hosseinzadeh Gharehgheshlagh, H., Alipour, A., 2020. Ground vibration due to blasting in dam and hydropower projects. *Rudarsko-geološko-naftni zbornik (The Mining-Geological-Petroleum Bulletin)*, 35(3).
- Hudaverdi, T., Akyildiz, O., 2017. Investigation of the site-specific character of blast vibration prediction. *Environmental Earth Sciences*, 76(3): 138.
- Khandelwal, M., Singh, T.N., 2009. Prediction of blast-induced ground vibration using artificial neural network. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 46(7): 1214-1222.
- Khandelwal, M., Singh, T.N., 2013. Application of an Expert System to Predict Maximum Explosive Charge Used Per Delay in Surface Mining. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 46(6): 1551-1558.
- Koçaslan, A., Yüksek, A.G., Görgülü, K., Arpaz, E., 2017. Evaluation of blast-induced ground vibrations in open-pit mines by using adaptive neuro-fuzzy inference systems. *Environmental Earth Sciences*, 76(1): 57.
- Kumar, R., Choudhury, D., Bhargava, K., 2016. Determination of blast-induced ground vibration equations for rocks using mechanical and geological properties. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 8(3): 341-349.
- Langefors, U., Kihlstrom, B., 1978. *The Modern Science of Rock Blasting*. Almquist & Wiksell.
- Lian, K., Zhang, C., Gao, L., Shao, X., 2012. A modified colonial competitive algorithm for the mixed-model U-line balancing and sequencing problem. *International Journal of Production Research*, 50(18): 5117-5131.
- Mokhtarian Asl, M., Alipour, A., 2020. A nonlinear model to estimate vibration frequencies in surface mines. *International Journal of Mining and Geo-Engineering*, 54(2): 167-171.
- Parsaei, M., 2010. Geomechanic and stability conditions analysis of the sungun copper mine's rock mass by numerical modeling. *Journal of Earth and Resources*, 3(3 (8)): -.
- Rai, R., Shrivastva, B.K., Singh, T.N., 2005. Prediction of maximum safe charge per delay in surface mining. *Mining Technology*, 114(4): 227-231.
- Sadaei, H.J., Enayatifar, R., Lee, M.H., Mahmud, M., 2016. A hybrid model based on differential fuzzy logic relationships and imperialist competitive algorithm for stock market forecasting. *Applied Soft Computing*, 40: 132-149.
- Sharifi, M.A., Mojallali, H., 2015. A modified imperialist competitive algorithm for digital IIR filter design, *2015 The International Symposium on Artificial Intelligence and Signal Processing (AISIP)*, pp. 7-12.