



پیش‌بینی میرایی امواج لرزش زمین ناشی از انفجار با مدل جدید مبتنی بر الگوریتم رقابت استعماری

مجتبی مختاریان اصل* و عارف علی‌پور

استادیار، دانشکده مهندسی معدن و مواد، دانشگاه صنعتی ارومیه

دریافت مقاله: ۱۳۹۶/۰۴/۲۸؛ پذیرش مقاله: ۱۳۹۶/۰۷/۳۰

* نویسنده مسئول مکاتبات: m.mokhtarian@uut.ac.ir

واژگان کلیدی

چکیده

لرزش ناشی از انفجار در معادن و تأثیر آن بر سازه‌ها و تجهیزات مجاور از پیامدهای منفی سیکل معدنکاری محسوب می‌شود. به منظور کنترل لرزش و مدیریت اثرات نامطلوب آن، اقدام به اندازه‌گیری و مدل‌سازی میرایی امواج می‌شود. با انجام چندین انفجار آزمایشی و تحلیل امواج لرزشی ناشی از آن، مدل میرایی این امواج برای هر ساختگاه و معدن مطالعاتی تعیین می‌شود. به طور معمول بر مبنای فاصله محل اندازه‌گیری موج تا سینه‌کار انفجار و بیشینه خرج به ازای هر تأخیر، اقدام به مدل‌سازی میرایی حداکثر سرعت ذرات می‌شود. در تحقیق حاضر با استفاده از چند مدل تجربی، معادله حداکثر سرعت ذرات برای انفجارات معدن سونگون تعیین شده است. همچنین با استفاده از الگوریتم رقابت استعماری مدل دیگری نیز برای پیش‌بینی میرایی امواج ارائه شده است. با توجه به آزمون‌های آماری صورت گرفته بین نتایج حاصل از تخمین حداکثر سرعت ذرات توسط مدل‌های مختلف و مقادیر اندازه‌گیری شده، در گستره معدن مس سونگون عملکرد مناسب مدل مبتنی بر الگوریتم رقابت استعماری در تخمین بیشینه سرعت ذرات به اثبات رسیده است.

انفجار
لرزش زمین
بیشینه سرعت ذرات
الگوریتم رقابت استعماری
مس سونگون

استفاده از پارامترهای ذکر شده می‌توان لرزش ناشی از انفجار را به لحاظ کمی تحلیل کرد. در محدوده‌ی رفتار الاستیک، انتشار امواج در محیط موجب ارتعاش الاستیک ذرات می‌شود؛ که به صورت لرزش زمین ظاهر می‌شود. شدت میرایی اثر کرده به موج وابسته به خصوصیات فیزیکی و مکانیکی محیط انتشار است. حداکثر سرعت ذرات به‌عنوان مهم‌ترین شاخص برای ارزیابی کمی لرزش ناشی از انفجار بکار گرفته می‌شود (Bakhshandeh et al., 2012).

تاکنون تحقیقات زیادی جهت ارتباط دادن پارامترهای ژئومکانیکی با میزان لرزش زمین حاصل از انفجار صورت نگرفته است. تعدد پارامترهای مؤثر و پیچیدگی تأثیر متقابل این پارامترها بر یکدیگر و بر میزان لرزش ناشی از انفجار مانع از دستیابی به مدل کمی ریاضی با توانایی بالا، برای تخمین لرزش ناشی از انفجار، بر مبنای شرایط ژئومکانیکی شده است. مدل‌های تجربی مختلفی برای این منظور ارائه شده است که به طور عمده بر مبنای دو پارامتر اصلی خرج به ازای هر تأخیر و فاصله از محل انفجار هستند. تأثیر پارامترهای ژئومکانیکی و آتشیاری در این مدل‌ها به‌صورت ثابت‌های عددی منظور شده است؛ که با توجه به شرایط منطقه تعیین و در مدل‌ها ظاهر می‌شوند (Mesec et al., 2015). با ثبت مقادیر کمی لرزش ناشی از انفجار با استفاده از دستگاه‌های لرزه‌نگار، رفتار نگاری انفجار صورت گرفته و به منظور تطبیق با استانداردهای موجود مورد تحلیل قرار می‌گیرد؛ اما مشخصاً به هنگام طراحی اولیه نیاز به در نظر داشتن سطح لرزش مشخص ضروری بوده و متناسب با آن، مقدار و توزیع مشخصی از ماده منفجره در الگوی انفجار اعمال می‌شود. از این‌رو معادله‌های میرایی در قالب فرمول‌های تجربی به‌عنوان مبنای این طراحی مدنظر قرار می‌گیرند (Alipour et al., 2012).

با افزایش فاصله از محل انفجار، شدت لرزش زمین و در نتیجه جابجایی، سرعت و شتاب ذرات کاهش می‌یابد. از طرفی دیگر، افزایش مقدار مواد منفجره منجر به افزایش انرژی آزاد شده برای فاصله‌ی یکسان می‌گردد. از این‌رو با مدنظر قرار دادن این نکته، کل مواد ناریه مصرفی را با اعمال تأخیرهایی در حد نصف ثانیه با مقدار کم منفجر می‌کنند. اعمال تأخیر با زمان محدود ضمن ارتقا کیفیت خردایش سنگ از برهم‌نهی امواج لرزه‌ای جلوگیری می‌کند؛ بنابراین حداکثر مقدار ماده منفجره مصرفی در هر تأخیر حائز اهمیت است. لازم به ذکر است علی‌رغم دسترسی کامل به دستگاه لرزه‌نگار، به‌منظور طراحی مناسب و اعمال ماده منفجره مصرفی (خرج) ایمن در هر تأخیر انفجار، استفاده از روابط تجربی ضروری است. تاکنون مدل‌های میرایی تجربی مختلفی ارائه شده است. در پژوهش حاضر از بین مدل‌های موجود، مدل‌های ارائه شده توسط اداره معادن آمریکا، لانگفورس- کیلستروم و آمبراسیس- هندرون برای تحلیل تجربی لرزش ناشی از انفجارات در معدن سونگون انتخاب شده‌اند. در جدول ۱ مدل‌های تجربی منتخب ارائه شده است. در این مدل‌ها،

لرزش زمین ناشی از انفجار یکی از تبعات ناخواسته انفجار محسوب می‌شود. شناسایی پارامترهای مؤثر بر سطح لرزش و اعمال تمهیداتی در برای کاهش اثر مخرب آن‌ها موضوع بحث بسیاری از محققین و مؤسسات پژوهشی بوده است. موسسه‌های مختلفی نظیر اداره معادن آمریکا، موسسه‌ی آفتس فرانسه و موسسه تحقیقات مرکزی هند بررسی‌های زیادی در این زمینه انجام داده‌اند. (Siskind et al., 1980, Duclus et al., 1993, Bagchi et al., 2000) در این راستا به کارگیری شاخص‌های بیان کمی لرزش زمین و استفاده از دستگاه‌های لرزه‌نگار از گام‌های اساسی اولیه محسوب می‌شود. به‌طور عمده نتایج تحقیقات بر کاهش میزان لرزش ناشی از انفجار و پیش‌بینی میزان لرزش و به دست آوردن محدوده‌ی خطری در اطراف محل انفجار استوار است. هدف از پیش‌بینی لرزش زمین ناشی از انفجار در گام اول به دست آوردن معیاری مرتبط با خسارات است که در صورت نیاز، موضوع کاهش لرزش مطرح بوده و باید راه‌هایی برای کمینه کردن آن ارائه کرد و گام دوم بررسی اثرات پارامترهای مختلف به ویژه زمان‌های تأخیر بر روی لرزش است. افزایش مقدار خرج و عدم توزیع مناسب آن سطح بالایی از لرزش را ایجاد می‌کند. همچنین هر چه فاصله از مرکز انفجار بیشتر شود، شدت لرزش زمین کاهش می‌یابد. لرزش ناشی از انفجار از گذشته تاکنون موضوع بحث بسیاری از محققین بوده است. از تحقیقات اخیر می‌توان به کارهای صورت گرفته توسط (Kumar et al., 2016) و (Kumar et al., 2017) اشاره کرد.

حداکثر سرعت ذرات (PPV) ناشی از انفجار به‌عنوان یکی از شاخص‌های کمی ارزیابی لرزش مطرح است. در تحقیق حاضر با مبنا قرار دادن چند مدل میرایی تجربی شدت لرزش زمین اقدام به تعیین رابطه تخمینگر PPV در گستره معدن مس سونگون شده است، همچنین با توجه به توانمندی بالای روش‌های فرا ابتکاری در مسائل بهینه‌سازی، از الگوریتم رقابت استعماری (ICA) برای تعیین ضرایب مدل تخمین PPV استفاده شده و رابطه جدیدی نیز در این زمینه ارائه شده است.

۲- مدل‌های تجربی میرایی امواج لرزش ناشی از

انفجار

امواج لرزه‌ای ناشی از خواص الاستیک سنگ‌ها هستند. چنانچه به نقطه‌ای از سنگ نیرویی اثر کند که از حد الاستیک سنگ تجاوز نکند، تغییر شکل اندکی در آن نقطه ایجاد می‌گردد که به نقطه مجاور منتقل شده و به همین ترتیب از طرف آن نقطه به نقاط دیگر انتشار می‌یابد. دامنه موج لرزش، سرعت ذره‌ای، شتاب ذره‌ای، فرکانس ارتعاشات و جابجایی ذرات پارامترهایی از امواج هستند؛ که به‌عنوان معیاری جهت ارزیابی لرزش ناشی از انفجار بکار می‌روند. با

انفجار و پارامترهای ژئومکانیکی به صورت مستتر در ضریب K و سایر فاکتورهای موجود در فرمول‌های تجربی ظاهر می‌شوند (Hossaini et al., 2004).

PPV حداکثر سرعت ذرات، Q ماکزیمم خرج به ازای هر تأخیر، R فاصله از محل انفجار و K و B ضرایب ثابت مربوط به مشخصات محلی و نوع مواد منفجره هستند. در روابط تجربی ارائه شده شرایط

جدول ۱: مدل‌های تجربی منتخب تخمینگر حداکثر سرعت ذرات.

| رابطه پیشنهادی | نام مدل |
|---|---|
| $PPV = K \cdot \left(\frac{R}{\sqrt{Q}}\right)^{-B}$ | اداره معادن آمریکا (Duvall et al., 1962) |
| $PPV = K \cdot \left(\frac{R}{\sqrt[3]{Q}}\right)^{-B}$ | آمبراسیس_هندرون (Ambraseys et al., 1968) |
| $PPV = K \cdot \left(\sqrt{\frac{Q}{R^{3/2}}}\right)^B$ | لانگفورس_کیلستروم (Langefors et al., 1978) |

مطالعات ژئومکانیکی این محدوده به ۶ زون و بلوک مجزا تقسیم‌بندی شده است. اطلاعات ژئومکانیکی مربوط به بلوک‌های مختلف معدن در جدول ۲ ارائه شده است (Abbaszadeh et al., 2008).

به علت حضور سازه‌های جانبی در نزدیکی معدن، کنترل لرزش زمین ناشی از انفجار ضروری است. با توجه به اهمیت انفجار به‌عنوان بخش مهمی از عملیات معدنکاری و روند ثابت الگوهای انفجار در معدن سونگون، تعیین معادله استهلاک امواج برای پیش‌بینی خسارت‌های احتمالی ضروری است. در جدول ۳ خلاصه‌ای از مشخصات چالزنی و انفجار مربوط به این معدن ارائه شده است.

۳- منطقه مورد مطالعه - معدن مس 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. با توجه به مشخصات کانسار و به دلیل حجم بالا، استخراج معدن به روش روباز طراحی شده است. ذخیره احتمالی این معدن بیش از یک میلیارد تن و ذخیره قابل استخراج آن حدود ۷۹۶ میلیون تن برآورد شده است. به طور کلی محدوده معدن از دیدگاه زمین‌شناسی، از سنگ‌های کربناته کرتاسه بالایی، توده مونزونیتی پورفیری سونگون به عنوان مهم‌ترین بخش، دایک‌های مونزونیتی و دیوریتی و سایر واحدهای آتش‌فشانی تشکیل شده است. بر مبنای

جدول ۲: پارامترهای ژئومکانیکی بلوک‌های معدن سونگون.

| شماره بلوک | لیتولوژی | مقاومت فشاری توده سنگ (MPa) | مدول یانگ توده سنگ (MPa) | چسبندگی توده سنگ (MPa) |
|------------|--------------------------|-----------------------------|--------------------------|------------------------|
| ۱ | توده مونزونیتی | ۳/۵۷۵ | ۱۸۶۲ | ۲۰۵-۲۲۰ |
| ۲ | توده مونزونیتی | ۱/۴۰۲ | ۱۰۵۰ | ۱۳۰-۱۴۵ |
| ۳ | توده مونزونیتی | ۱/۵۵۸ | ۷۶۰ | ۱۰۰-۱۱۰ |
| ۴ | توده مونزونیتی | ۲/۸۱۷ | ۱۸۴۱ | ۱۹۵-۲۱۰ |
| ۵ | دایک مونزونیتی و دیوریتی | ۴/۱۸۴ | ۱۶۸۳ | ۲۲۰-۲۴۰ |
| ۶ | آرژیلیت | ۰/۷۸۲ | ۹۶۶ | ۹۵-۱۰۵ |

جدول ۳: مشخصات چالزنی و انفجار در محل معدن سونگون.

| مشخصات چالزنی و انفجار | توصیف مربوط |
|-------------------------|-------------------------------|
| نوع خرج گذاری آنفو | پیوسته با خرج مضاعف در ته چال |
| خرج ویژه (kg / m^3) | ۰/۳-۰/۸ |
| میزان گل گذاری | معادل ۰/۳۳ طول چال |
| زاویه چال | عمودی |
| قطر چال‌ها (mm) | ۱۲۷ و ۹۰ |
| عمق چال‌ها (m) | ۱۳-۱۵ |
| ارتفاع پله (m) | ۱۲/۵ |
| بارسنگ × فاصله‌داری (m) | ۲×۲ و ۲×۳، ۰.۲/۵×۳/۵، ۰.۴×۵ |

انتخاب شود. به منظور تعیین پارامترهای ثابت B و K برای هر یک از روابط تجربی ارائه شده در جدول ۱ از رگرسیون استفاده شد؛ که نتایج آن در شکل های ۱ تا ۳ ارائه شده است. نتایج حاصل از رگرسیون نیز برای هر مدل تجربی در جدول ۵ جمع بندی شده است. با توجه به نتایج جمع بندی شده در جدول ۵ مدل لانگفوس- کیلستروم برای رخدادهای مختلف ثبت شده در گستره معدن سونگون از عملکرد ضعیف تری نسبت به سایر روابط برخوردار بوده و استفاده از مدل آمبراسیس-هندرون با توجه به ضریب رگرسیون بیشتر آن قابل توجه است.

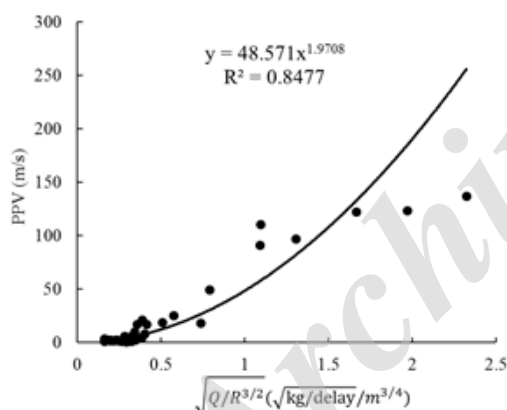
۴- تعیین پارامترهای مدل های تجربی برای معدن

مورد مطالعه

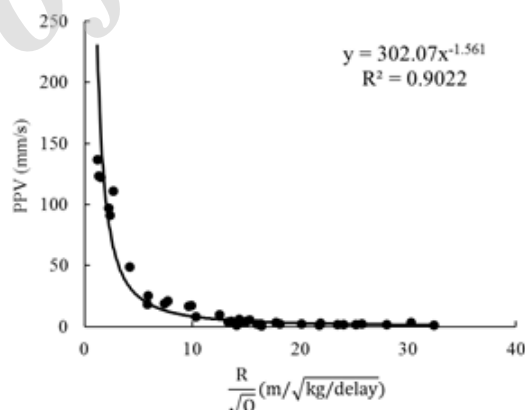
نتایج حاصل از ۳۷ انفجار ثبت شده در معدن سونگون به منظور تعیین ضرایب ثابت رابطه ی استهلاک PPV مورد استفاده قرار گرفت. پارامترهای آمار توصیفی نتایج ثبت شده از انفجار در جدول ۴ ارائه شده است. قابلیت مدل های تجربی برای پروژه های مختلف اجرایی متفاوت است. ممکن است رابطه ای برای یک مورد مطالعاتی خاص جوابگو باشد؛ ولی برای مورد دیگر از دقت پایینی برخوردار باشد. برای مورد های مختلف مطالعاتی باید کارایی هر یک از روابط سنجیده شده و رابطه ای که بیشترین همخوانی را با نتایج دارد،

جدول ۴: پارامترهای آمار توصیفی نتایج ثبت شده از انفجار.

| پارامتر | Q (kg/ delay) | R (m) | PPV (mm/s) |
|------------------|---------------|--------|------------|
| میانگین | ۱۰۲۴ | ۴۱۳/۵۴ | ۲۵/۲۴۴ |
| واریانس | ۶/۸۹۸E+۵ | ۹۰۴۱۳ | ۱۶۸۹ |
| انحراف استاندارد | ۸۳۰/۵۵ | ۳۰۰/۶۹ | ۴۱/۱ |
| حداقل | ۱۰۱ | ۴۰ | ۱/۰۷ |
| میانه | ۸۴۳ | ۳۴۱ | ۴/۷۲ |
| حداکثر | ۳۳۱۳ | ۱۱۷۹ | ۱۳۷ |



شکل ۳: نتایج رگرسیون برای مدل لانگفوس- کیلستروم.



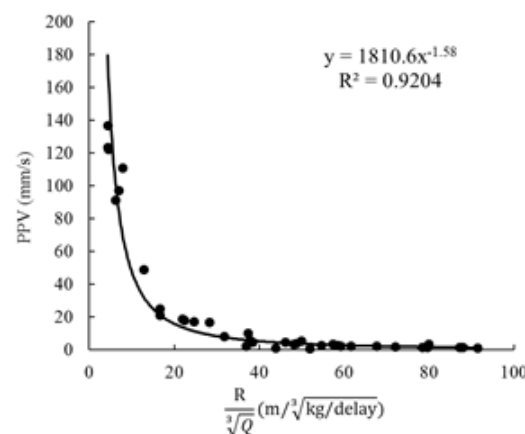
شکل ۱: نتایج رگرسیون برای مدل اداره معادن آمریکا.

جدول ۵: پارامترهای ثابت B و K برای هر یک از مدل های تجربی.

| معادله | B | K | R ² |
|--------------------|------|--------|----------------|
| اداره معادن آمریکا | ۱/۵۶ | ۳۰۲/۰۷ | ۰/۹۰ |
| آمبرسیس - هندرون | ۱/۵۸ | ۱۸۱۰/۶ | ۰/۹۲ |
| لانگفوس - کیلستروم | ۱/۹۷ | ۴۸/۵۷ | ۰/۸۵ |

۵- ارائه مدل میرایی مبتنی بر الگوریتم رقابت استعماری

در این بخش به منظور افزایش دقت برآورد لرزش زمین ناشی از انفجار از الگوریتم رقابت استعماری استفاده شده است. ICA توسط



شکل ۲: نتایج رگرسیون برای مدل آمبراسیس- هندرون.

$$\text{Minimize } \sum_{i=1}^n (kQ_i^\alpha R_i^\beta - PPV_i)^2 \quad (2)$$

در رابطه فوق k ، α و β ضرایب ثابت مجهولی هستند که توسط ICA تعیین می‌شوند و Q_i ، R_i و PPV_i مقادیر ثبت شده از انفجار در معدن مس سونگون می‌باشند.

از زبان برنامه‌نویسی ++C در محیط میکروسافت ویژوال استودیو برای بسط الگوریتم رقابت استعماری به منظور حداقل‌سازی تابع هدف استفاده شد و ضرایب ثابت توسط الگوریتم رقابت استعماری به صورت رابطه‌ی (۳) تعیین شدند.

$$k = 768.819, \alpha = 0.3795 \text{ \& } \beta = -1.1516 \quad (3)$$

بنابراین مدل تخمین PPV تعیین شده توسط ACI به صورت رابطه‌ی (۴) قابل بیان است.

$$PPV = 768.819Q^{0.3795}R^{-1.1516} \quad (4)$$

در تحقیق حاضر علاوه بر مدل کلی تخمین PPV ارائه شده در رابطه (۱)، مدل‌های دیگری نیز بسط یافته و مورد ارزیابی قرار گرفته است. بهترین مدل از میان مدل‌های تخمین بررسی شده در رابطه (۵) ارائه شده است.

$$PPV_i = \left| k_0 + k_1 (\log Q_i)^{k_2} + k_3 \exp(k_4 / R_i) + k_5 Q_i^{k_6} R_i^{k_7} \right| \quad (5)$$

k_0 ، k_1 ، k_2 ، k_3 ، k_4 ، k_5 ، k_6 و k_7 ضرایب ثابتی هستند که باید برای داده‌های ثبت شده، تعیین شوند. تأثیر واحدهای سنگی مختلف برای مدل تخمین ارائه شده در ضرایب ثابت (k_i) مستتر است؛ به عبارت دیگر برای سایت مورد بررسی با ثبت چندین داده انفجار باید ضرایب ثابت طبق روش تشریح شده در تحقیق، تعیین شوند. برای تعیین ضرایب ثابت تابعی با هدف کمینه‌سازی مربعات خطا در نظر گرفته شد؛ که در رابطه زیر ارائه شده است.

$$\text{Minimize } \sum_{i=1}^n \left(\left| \frac{k_0 + k_1 (\log Q_i)^{k_2} + k_3 \exp(k_4 / R_i)}{+k_5 Q_i^{k_6} R_i^{k_7}} - PPV_i \right| \right)^2 \quad (6)$$

با تعیین ضرایب ثابت توسط الگوریتم رقابت استعماری، مدل تخمین PPV برای ساختگاه معدن مس سونگون به صورت رابطه (۷) قابل بیان است.

$$PPV_i = \left| \frac{-216.513 + 203.865(\log Q_i)^{0.1467}}{-41.7787 \exp(-94.3247 / R_i)} + 298.048 Q_i^{0.3139} R_i^{-0.8304} \right| \quad (7)$$

۶- مقایسه عملکرد مدل‌های مختلف تخمین PPV

در این بخش، جهت مقایسه کارایی مدل‌های رایج تجربی و مدل‌های مبتنی بر الگوریتم رقابت استعماری آزمون‌های مختلفی استفاده شد که در ادامه بحث آمده است.

۶-۱- نمودار تخمین-مقدار واقعی

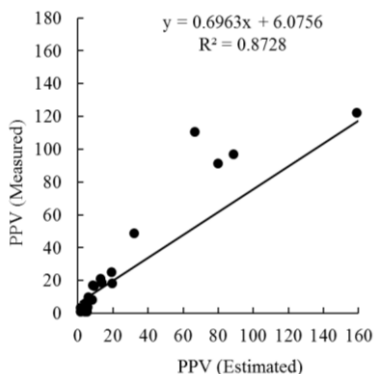
در این آزمون مقادیر تخمین زده شده PPV توسط هر یک از مدل‌ها

آتش‌پز و لوکاس (۲۰۰۷) ارائه شده است که الهام گرفته از فرآیندهای سیاسی - اجتماعی است (Atashpaz-Gargari et al., 2007). 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 مسئله، تعدادی از بهترین کشورهای جمعیت اولیه به عنوان امپریالیست انتخاب شده و مابقی به عنوان مستعمره در نظر گرفته می‌شوند. به مجموعه یک امپریالیست و مستعمراتش، امپراتوری گفته می‌شود. امپریالیست با توجه به قدرتش، مستعمرات را با یک روند خاصی به سمت خود جذب می‌کند. قدرت کل هر امپراتوری، به هر دو بخش تشکیل‌دهنده آن یعنی امپریالیست و مستعمرات آن بستگی دارد. با شکل‌گیری امپراتوری‌های اولیه، رقابت امپریالیستی میان آن‌ها شروع شده و هر امپراتوری 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 امپراتوری وابسته به قدرت آن در جذب مستعمرات امپراتوری‌های رقیب و به سيطرة در آوردن آن‌ها خواهد بود. در نتیجه، در جریان رقابت‌های امپریالیستی، به تدریج بر قدرت امپراتوری‌های بزرگ‌تر افزوده شده و امپراتوری‌های ضعیف‌تر حذف خواهند شد. امپراتوری‌ها 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 مسئله خواهیم بود. حد نهایی رقابت استعماری یا شرط خاتمه الگوریتم اتمام کل تعداد تکرارهای تعیین شده یا تا زمانی که تمام مستعمرات تحت کنترل یک امپراتوری واحد قرار گیرند، است. در این امپراتوری مستعمرات از لحاظ قدرت به کشور امپریالیست خیلی نزدیک هستند (Atashpaz-Gargari and Lucas, 2007). تا به حال 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 et al., 2015)، مسئله فروشنده دوره‌گرد (Ardalan et al., 2015)، بهینه‌سازی چند هدفه (Shafiee et al., 2010) و مسئله زمان‌بندی (Behnamian et al., 2011, Lian et al., 2012) اشاره کرد. الگوریتم نحوه تعیین جواب بهینه مسئله توسط الگوریتم رقابت استعماری در شکل ۴ نشان داده شده است. با توجه به روابط تجربی ارائه شده در جدول ۱ مشخص است که حالت کلی این روابط به صورت رابطه زیر قابل بیان است.

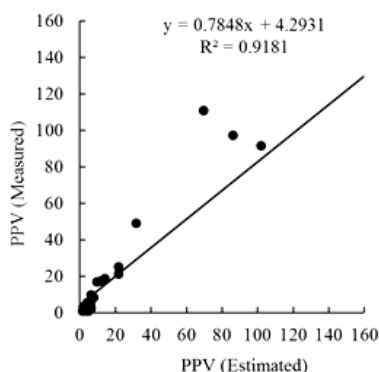
$$PPV = kQ_i^\alpha R_i^\beta \quad (1)$$

در رابطه فوق k ، α و β ضرایب ثابتی هستند که باید برای هر ساختگاه تعیین شوند. به منظور تعیین مدل میرایی PPV توسط الگوریتم رقابت استعماری تابع هدفی به صورت رابطه‌ی (۲) در نظر گرفته شد.

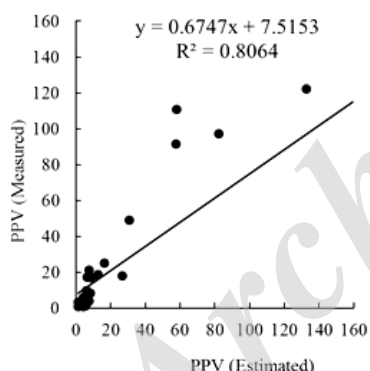
مختاریان اصل و علی پور، پیش بینی میرایی امواج لرزش زمین ناشی از انفجار با مدل جدید مبتنی بر الگوریتم رقابت استعماری، صفحات ۱۰۴-۹۵.



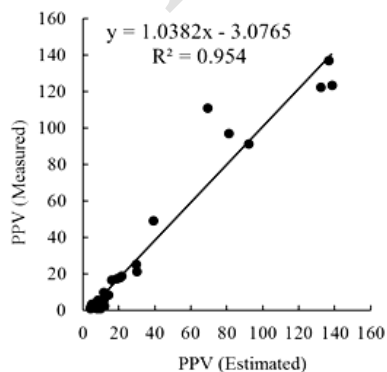
شکل ۵: نمودار تخمین - اندازه گیری شده حاصل از مدل اداره معادن آمریکا.



شکل ۶: نمودار تخمین - اندازه گیری شده حاصل از مدل آمبراسیس هندرون.



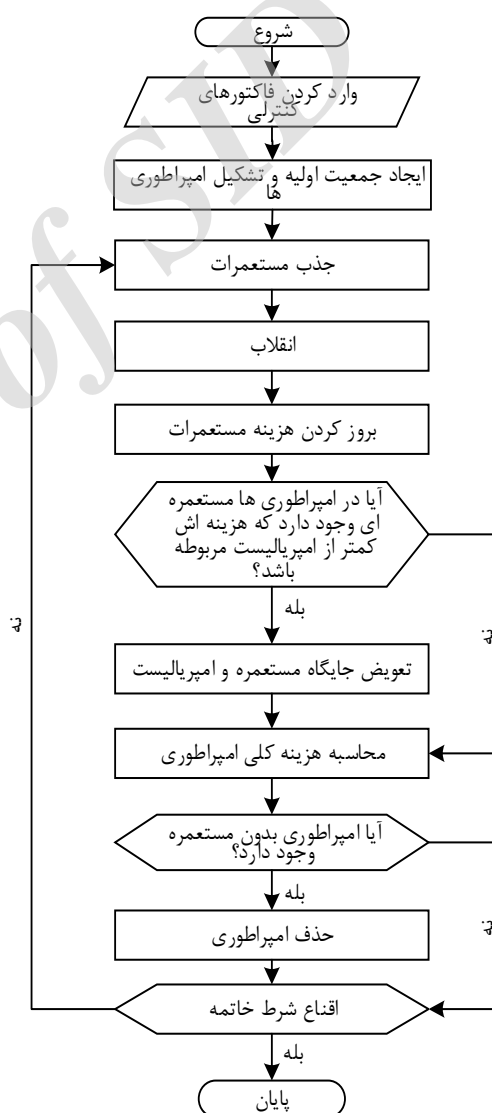
شکل ۷: نمودار تخمین - اندازه گیری شده حاصل از مدل لانگفوس - کیلستروم.



شکل ۸: نمودار تخمین - اندازه گیری شده حاصل از الگوریتم رقابت استعماری رابطه (۴).

در مقابل مقادیر اندازه گیری شده PPV ترسیم می شود. به هر مقدار که شیب خط حاصل از برازش و ضریب تعیین (R^2) به عدد یک نزدیک تر باشند، دقت تخمین PPV توسط مدل بهتر خواهد بود. نتایج حاصل از این آزمون برای هر یک از مدل های مورد مطالعه در شکل های ۵ تا ۹ نمایش داده شده است.

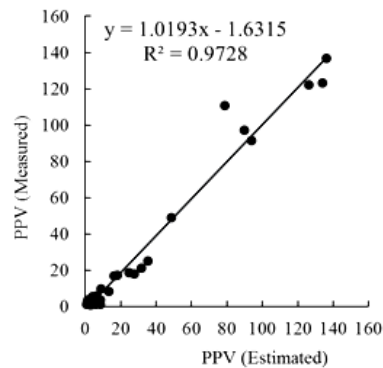
همان طور که از شکل های ۵ تا ۹ مشخص است؛ از بین مدل های مورد مطالعه در این تحقیق، مدل مبتنی بر الگوریتم رقابت استعماری که توسط رابطه (۷) بیان می شود، با شیب ۱/۰۱۹ و ضریب تعیین ۰/۹۷۳ نزدیک ترین مقادیر را نسبت به عدد یک دارا است؛ بنابراین با توجه به این آزمون مدل تخمین ارائه شده رابطه (۷) برای معدن سونگون مناسب تر است.



شکل ۴: الگوریتم رقابت استعماری (Atashpaz-Gargari and Lucas, 2007).

نشریه پژوهش‌های ژئوفیزیک کاربردی، دوره ۴، شماره ۱، ۱۳۹۷.

تعدادی شاخص و آزمون آماری پیشنهاد شده است؛ که آزمون‌های مورد استفاده در این تحقیق در جدول ۶ جمع‌بندی شده‌اند. معادلات ریاضی مربوط به هر یک از این شاخص‌ها به صورت جداگانه معرفی و توضیحات لازم به منظور تفسیر راحت‌تر ذکر شده است. در معادلات ارائه شده برای آزمون‌های آماری، PPV_{Meas} و PPV_{Esti} به ترتیب برابر با مقادیر اندازه‌گیری شده و تخمین زده شده‌ی حداکثر سرعت ذرات می‌باشند. بر مبنای شاخص‌های قید شده در جدول ۶ تمامی مدل‌های تخمین PPV مورد ارزیابی قرار گرفتند؛ که نتیجه آن در جدول ۷ ارائه شده است. با توجه به مقادیر حاصله از آزمون‌های آماری (جدول ۷) مدل تخمین PPV مبتنی بر الگوریتم رقابت استعماری که با رابطه (۷) بیان می‌شود، در تمامی ارزیابی‌ها با اختلاف قابل‌ملاحظه‌ای بهترین مقدار را دارا است. در نتیجه این مدل به منظور طراحی انفجارات در معدن مس سونگون پیشنهاد می‌شود.



شکل ۹: نمودار تخمین - اندازه‌گیری شده حاصل از الگوریتم رقابت استعماری رابطه (۷).

۲-۶- آزمون‌های آماری

در متون فنی برای مقایسه میزان برازندگی تخمین‌های صورت گرفته

جدول ۶: آزمون‌های آماری مورد استفاده برای مقایسه میزان برازندگی تخمین.

| توضیحات | معادله | پارامتر آماری |
|-------------------------|--|--|
| مقدار کوچک‌تر بهتر است. | $MAE = \frac{1}{n} \times \left[\sum_{i=1}^{i=n} PPV_{Meas}^i - PPV_{Esti}^i \right]$ | میانگین قدر مطلق خطا ^۱ (MAE) |
| مقدار کوچک‌تر بهتر است. | $RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \times \sum_{i=1}^{i=n} (PPV_{Meas}^i - PPV_{Esti}^i)^2}$ | مجدور میانگین مربعات خطا ^۲ (RMSE) |
| مقدار کوچک‌تر بهتر است. | $VARE = \text{var}(PPV_{Meas} - PPV_{Esti})$ | واریانس قدر مطلق خطا ^۳ (VARE) |
| مقدار بزرگ‌تر بهتر است. | $VAF = \left[1 - \frac{\text{var}(PPV_{Meas} - PPV_{Esti})}{\text{var}(PPV_{Meas})} \right] \times 100$ | به حساب واریانس ^۴ (VAF) |

جدول ۷: مقایسه مدل‌های مختلف تخمین PPV بر مبنای آزمون‌های آماری.

| نام مدل تخمین | MAE | RMSE | VARE | VAF (%) |
|------------------------|--------|--------|----------|---------|
| اداره معادن آمریکا | ۹/۴۰۱ | ۲۲/۰۷۲ | ۳۹۸/۷۸۱ | ۷۰/۶۸۱ |
| آمیرسیس - هندرون | ۷/۳۸۰ | ۱۵/۸۲۲ | ۱۹۵/۸۵۲ | ۸۴/۹۰۰ |
| لانگفوردس - کیلستروم | ۱۰/۸۱۹ | ۲۵/۰۴۵ | ۴۵۱۰/۲۱۷ | ۶۱/۹۰۴ |
| مدل مبتنی بر رابطه (۴) | ۵/۷۸۸ | ۹/۰۵۱ | ۴۸/۴۱۴ | ۹۵/۲۶۸ |
| مدل مبتنی بر رابطه (۷) | ۳/۹۵۲ | ۶/۸۲۵ | ۳۰/۹۶۶ | ۹۷/۲۴۳ |

- 1- Mean absolute error
- 2- Route Mean Square Error
- 3- Variance absolute error
- 4- Variance account for

networks approach, *Safety Science*, 50 (9), 1913-1916.

۷- نتیجه‌گیری

علی‌رغم رفتار نگاری انفجارها در معدن سونگون، به منظور طراحی انفجار ایمن نیاز به کارگیری و تعیین معادله میرایی موج انفجار است. از میان مدل‌های تجربی مرسوم، رابطه پیشنهادی آمبراسیس-هندرون بیشترین تطابق را با وضعیت آتشیاری و ژئومکانیکی معدن مس سونگون را دارد. البته به منظور تخمین دقیق‌تر حداکثر سرعت ذرات از الگوریتم رقابت استعماری با هدف کمینه شدن خطای تخمین استفاده شد. مجذور میانگین مربعات خطا برای بهترین معادله میرایی تجربی (رابطه آمبراسیس-هندرون) حدود ۱۶ حاصل شده، حال آنکه این مقدار برای رابطه جدید پیشنهادی (۷) حدود ۷ به دست آمده است. همچنین واریانس قدر مطلق خطای مدل بسط یافته نیز در مقایسه با مدل‌های دیگر به طور فاحشی کوچک است. لذا با توجه به آزمون‌های صورت گرفته، پیشنهاد می‌شود از رابطه (۷) برای طراحی انفجار در معدن سونگون استفاده شود.

۸- منابع

- Behnamian, J. and Zandieh, M., 2011, A discrete colonial competitive algorithm for hybrid flowshop scheduling to minimize earliness and quadratic tardiness penalties, *Expert Syst. Appl.*, 38 (12), 14490-14498.
- Duclus, S., Panigoni, T. and Michel, M.C., 1993, L'utilisation du guide pour la mesure et le suivi de l'effet des vibrations induites par les travaux, *Tunnels et ouvrages souterrains*, (210), 466-472.
- Duvall, W.I. and Fogelson, D.E., 1962, Review of criteria for estimating damage to residences from blasting vibrations: US Department of the Interior, Bureau of Mines.
- Hossaini, S.M.F. and Sen, G.C., 2004, Effect of explosive type on particle velocity criteria in ground vibration, *The Journal of Explosive Engineering*, 21 (4), 34-39.
- Hudaverdi, T. and Akyildiz, O., 2017, Investigation of the site-specific character of blast vibration prediction, *Environmental Earth Sciences*, 76 (3), 138.
- Koçaslan, A., Yüksek, A., Görgülü, K. and 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. and 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. and Kihlström, B., 1978, *The modern technique of rock blasting*, John Wiley & Son.
- Lian, K., Zhang, C.H., Gao, L. and 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.
- Mesec, J., Žganec, S. and Kovač, I., 2015, In-hole velocity of detonation (VOD) measurements as a framework for the selection type of explosive, *International Journal of Mining Science and Technology*, 25 (4), 675-680.
- Sadaei, H., Enayatifar, R., Lee, M.H. and 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.
- Shafiee, S.H. and Topal, E., 2010, An overview of global gold market and gold price forecasting, *Resources Policy*, 35 (3), 178-189.
- Sharifi, M.A. and Mojallali, H., 2015, A modified
- Alipour, A., Mokhtarian, M. and 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.R. and Hendron, A.J., 1968, Dynamic Behaviour of Rock Masses, *Rock Mechanics in Engineering Practice*.
- Ardalan, Z., Karimi, S., Poursabzi, O. and Naderi, B., 2015, A novel imperialist competitive algorithm for generalized traveling salesman problems, *Appl. Soft Comput.*, 26 (C), 546-555.
- Atashpaz-Gargari, E. and Lucas, C., 2007, Imperialist competitive algorithm: An algorithm for optimization inspired by imperialistic competition, *IEEE Congress on Evolutionary Computation*, pp. 25-28.
- Abbaszadeh, M., Shahryar, K., Sharifzade, M. and Heydari, M., 2008, Classification and Determination of Sungun Copper Mine Rock Mass Properties Uncertainties, *Journal of Engineering Geology*, 2 (2), 377-394.
- Bagchi, A., Burman, B.K., Nabibuallah, M., Prakash, A.J., Roy, P.P., Singh, R.B. and Singh, M.M., 2000, Investigation into the influence of blasting pattern & geotechnical properties of the surrounding rock mass on the ground vibration, fragmentation, fly off etc., *CMRI Internal Report*.
- Bakhshandeh Amnieh, H., Siamaki, A. and Soltani, S., 2012, Design of blasting pattern in proportion to the peak particle velocity (PPV): Artificial neural

نشریه پژوهش‌های ژئوفیزیک کاربردی، دوره ۴، شماره ۱، ۱۳۹۷.

C.H., 1980, Structure response and damage produced by ground vibration from surface mine blasting, Report of Investigations- United States, Bureau of Mines.

imperialist competitive algorithm for digital IIR filter design, Optik- International Journal for Light and Electron Optics, 126 (21), 2979-2984.

Siskind, D.E., Stagg, M.S., Kopp, J.W. and Dowding,

Archive of SID



Development of ground vibration attenuation model by imperialist competitive algorithm

Mojtaba Mokhtarian Asl* and Aref Alipour

Assistant Professor, Department of Mining and Metallurgical Engineering, Urmia University of Technology, Urmia, Iran

Received: 19 July 2017; Accepted: 22 October 2017

Corresponding author: m.mokhtarian@uut.ac.ir

Keywords

Blasting
Ground Vibration
Peak Particle Velocity
Imperialist Competitive Algorithm
Sungun Copper Mine

Extended Abstract

Summary

The effect of blast-induced ground vibrations on mines and on adjacent structures and facilities is an example of the adverse consequences of the mining cycle. In order to control the vibrations, and also, managing the adverse effects, the measurement and modeling of the concerned wave attenuation are necessary. Normally, by implementing several trial blasts and analyzing corresponding ground vibrations, we can determine the related

attenuation model for different sites and mines. Usually, the modeling of the peak particle velocity (PPV) damping is performed based on the distance between blast-face and monitoring station and maximum charge used per delay. In this research, using different empirical models, the PPV equation is determined for blasting in the Sungun copper mine. Moreover, imperialist competitive algorithm (ICA) has been employed to develop prediction model for ground vibrations. A comparison of the results obtained from different models are made based on several statistical tests between monitored and predicted values of PPV. According to these statistical tests, fairly good performance of the ICA-based model in the forecasting of PPV is proved.

Introduction

Drilling and blasting are typical methods of rock excavation. The ground vibrations are an adverse effect of blasting that cannot be completely eliminated; but certainly can be minimized up to permissible level to avoid possible damages to surrounding structures. Ground vibration is directly related to the maximum charge per delay and distance between blast face and monitoring station. To predict ground vibration, several empirical models have been developed by various investigators. In the most of these models, the PPV is the parameter of concern.

Methodology and Approaches

In this paper, the ICA was proposed to get an appropriate equation for forecasting the PPV in the Sungun copper mine. For comparison purposes, three well-known empirical models were also used. To evaluate the performance of PPV models, the correlation between the predicted and real measured values of PPV was determined. Standard statistical evaluation criteria were used to evaluate the performances of different PPV predictor models.

Results and Conclusions

Considering the calculated statistical error between the forecasted and real measured values of PPV, the ICA-based model has the lowest values of MAE, VARE and RMSE, while it has the highest value of VAF, in comparison with the empirical models.