سیر تکاملی الگوریتم‌های پیش‌بینی میزان خردایش حاصل از انفجار در روش استخراج روباز

لیلا محمودی[۱]، عباس آقاجانی‌بزازی[۲*]، امیرحسین بانگیان تبریزی[۳]

[۱] دانش‌آموخته‌ی کارشناسی‌ارشد مهندسی معدن، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات mahmoodi.leila62@gmail.com
[۲] عضو هیئت علمی گروه مهندسی معدن، دانشگاه کاشان (نویسنده مسئول) a_aghajani_bazzazi@kashanu.ac.ir
[۳] عضو هیئت علمی گروه مهندسی معدن، دانشگاه آزاد اسلامی - واحد تهران جنوب ah_bangian@azad.ac.ir

چکیده

عملیات حفاری و انفجار، اولین مرحله در فرآیند استخراج معادن روباز محسوب می‌شود که هدف اصلی از آن، خردایش سنگ است. طراحی مناسب سیستم حفاری و انفجار در راستای نیل به نتایج مطلوب عملیات معدنکاری، بسیار مهم و ضروری است. در سال‌های اخیر، روند رو به رشد الگوریتم‌های مختلف و ضرورت حل مسایل مختلف مهندسی، موجب گسترش کاربردهای الگوریتم‌های ابتکاری و فراابتکاری در شاخه‌های مختلف مهندسی شده است. مسأله‌ی پیش‌بینی نتایج خردایش حاصل از انفجار در معادن نیز محققان را بر آن داشته که با استفاده از این ابزارهای جدید مهندسی، در حل مسایل بکوشند. در این پژوهش، با مروری بر تحقیقات انجام‌شده، سیر تکاملی الگوریتم‌های پیش‌بینی میزان خردایش مورد بررسی قرار گرفته است. تحلیل‌ها حاکی از آن است که گذار از روش‌های مبتنی بر تجربه به سوی روش‌های فراابتکاری، نه‌تنها نتایج مطلوب‌تری را به همراه دارد، بلکه باعث تسهیل در حل مسأله شده است. با به‌کارگیری الگوریتم‌های فراابتکاری، می‌توان میزان اثرگذاری پارامترهای بیش‌تری را بررسی کرد که در روش‌های تجربی امکان‌پذیر نبوده و یا توأم با میزان خطای قابل توجهی است. نتایج حاصل از توسعه الگوریتم PSO نیز در قالب مطالعه موردی (معدن سرب و روی انگوران) نشان داد که مقدار بهینه RMSE برابر ۰/۲۶ است که دلالت بر مطلوبیت تابع خطی محاسبه‌شده در حالت استاندارد دارد. میزان ضریب تعیین ۰/۹۲ بین مقادیر واقعی اندازه‌گیری‌شده خردایش پس از انفجار و میزان پیش‌بینی‌شده آن، دلالت بر این دارد که تابع خطی پیشنهادشده با دقت بالایی می‌تواند میزان خردایش را پیش‌بینی کند.

واژه‌های کلیدی: الگوریتم‌های پیش‌بینی، خردایش، الگوریتم، روش استخراج روباز، انفجار.

۱- مقدمه

عملیات حفاری و انفجار از مهم‌ترین فرآیندهای استخراجی معادن روباز هستند؛ به‌طوری که پیش‌بینی میزان خردایش سنگ پس از انفجار می‌تواند در کاهش حجم حفاری، میزان مصرف مواد منفجره، توزیع دانه‌بندی قطعات خردشده و هزینه‌های استخراج معادن روباز مؤثر واقع شود [۱]. در اغلب موارد برای طراحی یک الگوی انفجار مناسب در معادن از روش‌های تجربی(سنتی) استفاده می‌شود که به لحاظ خردایش پس از انفجار، نتایج قابل قبولی را در پی ندارد. علت این امر نیز تنوع پارامترهای مؤثر و تغییر آنها در بخش‌های مختلف کانسار است که معمولاً از توده‌سنگ‌های متنوعی تشکیل شده است. با توجه به اهمیت موضوع میزان خردایش سنگ پس از انفجار، پیچیدگی آن و نیز تأثیر چشمگیر آن در هزینه تمام‌شده یک تن ماده معدنی استخراجی و همچنین اثرات غیرقابل اغماض آن در فرآیند فرآوری و به‌ویژه در بخش سنگ‌شکنی، بررسی دستاوردهای نوین در این باره ضروری است. روش‌های جدیدی در سال‌های اخیر کاربردهای فراوان مهندسی یافته است که می‌توان به روش‌های تجربی، ابتکاری و فراابتکاری اشاره کرد. از سوی دیگر، تنوع پارامترهای اثرگذار در پیش‌بینی میزان خردایش حاصل از انفجار، محققان را بر آن داشته است که با نگرش‌های نوینی این موضوع را مورد تحلیل قرار دهند. در این پژوهش، مطالعات انجام‌شده در خصوص پیش‌بینی میزان خردایش سنگ پس از انفجار در معادن روباز مورد بررسی قرار می‌گیرد.

۲- ضرورت انجام تحقیق

با توجه به اهمیت فنی و اقتصادی عملیات انفجار در استخراج روباز معادن و نظر به هزینه‌های چشمگیری که در راستای فرآیندهای مختلف انفجار در معادن روباز صرف می‌شود، لازم است که با نگرشی جدید مبحث میزان خردایش سنگ پس از چال‌زنی و انفجار مورد بررسی قرار گیرد. هزینه‌های چال‌زنی و انفجار نیز جزو هزینه‌های جاری معادن محسوب می‌شود که در حدود ۲۵-۳۰ درصد هزینه‌های فعالیت‌های استخراجی را به خود اختصاص می‌دهد [۲]. از طرف دیگر، با توجه به افزایش قیمت مواد منفجره و نیز هزینه‌های مربوط به فرآیند سنگ‌شکنی که مصرف انرژی فراوانی را به خود اختصاص می‌دهد، اهمیت پیش‌بینی میزان خردایش سنگ و بهینه‌سازی آن دو چندان شده و ضرورت انجام پژوهشی در راستای بررسی مطالعات پیشین پیش‌بینی میزان خردایش سنگ پس از انفجار در معادن روباز، به‌ویژه در بخش‌هایی از کانسار که حاوی کانسنگ بوده و باید به سنگ‌شکنی ارسال شود، بسیار محسوس است. مع‌الوصف، هدف اصلی این پژوهش، مروری بر مطالعات انجام‌شده در راستای پیش‌بینی میزان خردایش سنگ پس از انفجار در معادن روباز است. از اهداف دیگر این تحقیق می‌توان به مقایسه نتایج پژوهش‌های مختلف اشاره کرد.

۳- مروری بر مطالعات انجام‌شده

فرآیند شکستگی سنگ با انفجار در معادن روباز، پدیده پیچیده‌ای است که توسط تعداد زیادی از متغیرها و پارامترها کنترل می‌شود. در حال حاضر، اعمال تمامی متغیرها در تحلیل‌های تک‌متغیره امکان‌پذیر نیست؛ به‌ویژه زمانی که تأثیر برخی از آنها و اثر آنها بر همدیگر، هنوز مورد تحلیل و بررسی قرار نگرفته است. با این حال، اساساً اندازه‌گیری ابعاد سنگ‌های خردشده برای اعتبارسنجی طراحی فرآیندهای الگوهای انفجار لازم و ضروری است.

پیش‌بینی عددی (کمّی‌سازی) میزان خردایش سنگ در بزرگ‌مقیاس بسیار دشوار بوده و به دلایل فنی-اقتصادی، دارای کاربردهای اندکی است. همچنین مجزا کردن تأثیر متغیرهای جزئی بر پارامترهای مؤثر در خردایش سنگ بر اساس اطلاعات به‌دست‌آمده به دلایل مختلف و شرایط تجربی دشوار است. بنابراین در طول سالیان اخیر، پژوهشگران با استفاده از الگوریتم‌های مختلف ابتکاری، فراابتکاری و فوق‌ابتکاری به بررسی میزان خردایش سنگ‌های حاصل از انفجار پرداخته و سعی کرده‌اند با کمّی‌سازی این پارامتر بتوانند به پیش‌بینی میزان خردایش سنگ‌ها پس از انفجار بپردازند.

تا کنون تحقیقات نسبتاً جامعی در رابطه با میزان خردایش سنگ حاصل از انفجار در معادن روباز انجام شده است که در جدول(۱) به برخی از مهم‌ترین آنها اشاره شده است. با مروری بر تحقیقات انجام‌گرفته، سیر تکاملی مدل‌های تجربی، مدل‌های ریاضی، احتمالاتی و بسیار قابل توجه است. در اکثر پژوهش‌ها با استفاده از نتایج روش پردازش تصویری به بررسی الگوی انفجار پرداخته شده است. در مطالعاتی نیز با استفاده از روش‌های مختلف ریاضی و تحقیق در عملیاتی، به بررسی این موضوع مهم پرداخته شده است. از سوی دیگر، با رشد الگوریتم‌های ابتکاری و فراابتکاری، کاربرد آنها در پیش‌بینی نتایج انفجار نیز چشمگیر است. استفاده از شبکه‌های عصبی و سایر الگوریتم‌های هوش مصنوعی، باعث بهبود نتایج پیش‌بینی‌ها شده است. در اکثر تحقیقات انجام‌شده، روش شبکه عصبی مصنوعی در راستای موضوع مورد اشاره به کار گرفته است. لازم به ذکر است که در روش شبکه عصبی هیچ رابطه‌ای ارائه نمی‌شود و کاربر از چگونگی میزان پیش‌بینی مطلع نمی‌شود.

جالب توجه است که در مطالعات مختلف، برای اندازه‌گیری توزیع خرد شدن سنگ از روش پردازش تصویری استفاده شده است. تکنیک پردازش تصویری دیجیتال، با استفاده از نرم‌افزارها و تجهیزات مورد نیاز از روش‌های تجزیه و تحلیل میزان خردایش سنگ پس از انفجار است و در بسیاری از موارد، جایگزین روش‌های متداول (تجزیه و تحلیل بصری، عکاسی، فتوگرامتری، تعداد تخته‌سنگ) و یا تکنیک‌های آنالیز سرندی شده است.

جدول۱: پژوهش‌های انجام‌شده در خصوص پیش‌بینی میزان خردایش پس از انفجار در روش استخراج روباز

پژوهشگر(ان)	سال	موضوع	منابع
دینیس و گاما (Dinis & Gama)	۱۹۷۰	ارائه مدل تجربی برای تعیین درصد تجمعی ابعاد قطعات حاصل از انفجار	[۱]
کوزنتسوف (Kuznetsov)	۱۹۷۳	ارائه رابطه‌ی تجربی برای پیش‌بینی اندازه متوسط خردایش انفجار	[۲]
لارسن (Larsen)	۱۹۷۳	ارائه مدل تجربی برای تعیین ابعاد قطعات سنگ حاصل از انفجار	[۳]
نورن و پورتر (Noren & Porter)	۱۹۷۴	تعیین غیرمستقیم ابعاد خردایش حاصل از انفجار	[۴]
مؤسسه آتشکاری سوئد	۱۹۷۴	اصلاح فرمول لارسون	[۵]
رید (Rade)	۱۹۷۶	تعیین دانه‌بندی جبهه‌کار انفجاری به روش عکس‌برداری	[۶]
کونینگهام (Cunningham)	۱۹۸۳	اصلاح معادله کوزنتسوف برای برآورد ابعاد متوسط خردایش خردایش	[۷]
آسوکن و کونینگهام (Aswgen & Cunningham)	۱۹۸۶	تخمین خردایش سنگ‌ها در انفجار با استفاده از عکس استاندارد	[۸]
کانینگهام (Cunningham)	۱۹۸۷	اصلاح مدل کاز-رام	[۹]
هانتر (Hunter)	۱۹۹۰	برآورد خردایش بر اساس خصوصیات مکانیکی و ژئومکانیکی توده‌سنگ	[۱۰]
اوچترلونی و همکاران (Ouchterlony et al)	۱۹۹۰	بررسی اختلاف نتایج استفاده از آنالیز سرندی و پردازش تصویری دیجیتال	[۱۱]
گُش و همکاران (Ghosh et al)	۱۹۹۰	اهمیت درزه‌های برجا و شکستگی‌ها در خردایش حاصل از انفجار	[۱۲]
مجتبایی و همکاران	۱۹۹۰	تأثیر درزه‌ها بر نتایج انفجار	[۱۳]
کو و روستن (Ku & Rustin)	۱۹۹۳	ارائه مدلی برای تعیین میزان خردایش سنگ	[۱۴]
چاکرابورتی و همکاران (Chakraborty et al)	۱۹۹۴	تأثیر جهت‌یافتگی درزه‌های توده‌سنگ بر ابعاد بلوک قطعات انفجار	[۱۵]
پال‌روی (Pal Roy)	۱۹۹۵	اثرگذاری ناپیوستگی‌های توده‌سنگ در ترک‌خوردگی‌های حاصل از انفجار	[۱۶]
هاگان (Hagan)	۱۹۹۵	وابستگی نتایج انفجار به خواص توده‌سنگ	[۱۷]
مائرز و همکاران (Maerz)	۱۹۹۶	به‌کارگیری پردازش تصویری در ارزیابی نتایج خردایش حاصل از انفجار	[۱۸]
آلر و همکاران (Aler)	۱۹۹۶	بررسی بازدهی انفجار و بررسی تأثیر پارامترهای ژئومکانیکی بر انفجار	[۱۹]
اُزسلیک (Ozcelik)	۱۹۹۸	تأثیر پارامترهای ساختاری توده‌سنگ در توزیع اثر انفجار	[۲۰]
کاسترو (Castro)	۱۹۹۸	توسعه شاخص انفجار با استفاده از تحلیل تفکیک خطی	[۲۱]
لاتهام و لو (Latham & Lu)	۱۹۹۹	بررسی ساختار ناپیوستگی‌های توده‌سنگ بر نتایج انفجار	[۲۲]
چانگ و کاتسابانیس (Chang & Catsaianis)	۲۰۰۰	ارائه مدل CK	[۲۳]
چاکرابورتی و همکاران (Chakraborty et al)	۲۰۰۴	اثرگذاری RQD بر انفجار روباره و خردایش سنگ	[۲۴]
حمدی و موزا (Hamdi & Mouza)	۲۰۰۵	ارائه روش تحلیل خوشه‌ای و طبقه‌بندی توده‌سنگ با دیدگاه قابلیت انفجار	[۲۵]
اوچترلونی (Ouchterlony)	۲۰۰۵	ارائه مدل KCO	[۲۶]
حسینی و همکاران	۲۰۰۶	استفاده از شاخص توده‌سنگ برای اندیس خردشدگی انفجار	[۲۷]
لاتام و همکاران (Latham et al)	۲۰۰۶	تخمین خردایش و منحنی عملکرد با استفاده از تولید سنگ‌ریزه	[۲۸]
عطایی و زیاری	۲۰۰۶	بررسی توزیع خردشدگی سنگ‌ها در اثر انفجار در معادن روباز	[۲۹]
مورین و فیکارازو (Morin & Ficazaro)	۲۰۰۶	کاربرد شبیه‌سازی مونت‌کارلو برای تخمین خردایش حاصل از انفجار	[۳۰]
ابراهیمی و همکاران	۲۰۰۶	اعتبارسنجی نتایج پردازش تصویری در دانه‌بندی سنگ حاصل از انفجار	[۳۱]
تقی‌زاده و همکاران	۲۰۰۶	اعتبارسنجی نتایج روش پردازش تصویری جهت دانه‌بندی انواع سنگ	[۳۲]
اورعی و عاصی	۲۰۰۶	تخمین خردایش سنگ در معادن روباز با استفاده از شبکه عصبی	[۳۳]
ماریو و فرانچسکو (Mario & Francesco)	۲۰۰۶	ارائه مدل شبیه‌سازی مونت‌کارلو بر اساس مدل کاز-رام	[۳۴]
دربانی و همکاران	۲۰۰۷	ارائه مدل فازی برای پیش‌بینی خردشدگی در معادن روباز	[۳۵]
سینگ و نارندرولا (Singh & Narendrula)	۲۰۰۸	پیش‌بینی و ارزیابی خردایش سنگ در اثر انفجار	[۳۶]
سینگ و اوکونور (Singh & Oconnor)	۲۰۰۸	تخمین خردایش انفجار حلقه‌ای با استفاده از مدل کاز-رام	[۳۷]
حسینی و همکاران	۲۰۰۸	تحلیل کیفیت انتقال انرژی حاصل از انفجار	[۳۸]
شریعت‌علوی و همکاران	۲۰۰۹	بررسی خردشوندگی سنگ‌ها در اثر انفجار	[۳۹]
عنایت‌اللهی و همکاران	۲۰۰۹	پیش‌بینی خردایش ناشی از انفجار با استفاده از رگرسیون	[۴۰]
غیبی و همکاران	۲۰۰۹	مدل اصلاح‌شده کاز-رام برای خردایش سنگ حاصل از انفجار	[۴۱]

ادامه جدول۱: پژوهش‌های انجام‌شده در خصوص پیش‌بینی میزان خردایش پس از انفجار در روش استخراج روباز

پژوهشگر(ان)	سال	موضوع	منابع
اوزدمیر و همکاران (Ozdemir et al)	۲۰۰۹	ارزیابی فرآیندهای مختلف انفجار با استفاده از پردازش تصویری نرم‌افزاری	[۴۲]
منجزی و همکاران	۲۰۰۹	ارائه مدل استدلالی فازی برای پیش‌بینی خردایش حاصل از انفجار	[۴۳]
ارگین (Engin)	۲۰۱۰	بررسی طراحی انفجار پله‌ای با استفاده از پردازش تصویری دیجیتالی	[۴۴]
هوداوردی و همکاران (Hudaverdi et al)	۲۰۱۰	ایجاد پایگاه داده انفجار برای توسعه مدل‌های پیش‌بینی خردایش سنگ	[۴۵]
کولاتیلیک و همکاران (Kulatilake et al)	۲۰۱۰	ارائه روش شبکه عصبی برای پیش‌بینی نتایج خردایش انفجار	[۴۶]
ریاحی و همکاران	۲۰۱۰	بررسی خردایش انواع سنگ ناشی از انفجار به کمک پردازش تصویری	[۴۷]
منجزی و همکاران	۲۰۱۰	تخمین خردایش حاصل از انفجار با استفاده از آنالیز شبکه عصبی	[۴۸]
مالکی‌نژاد و بخشنده امنیه	۲۰۱۱	پیش‌بینی خردایش حاصل از انفجار با استفاده از مدل‌های کاز-رام و KCO	[۴۹]
ضیایی و همکاران	۲۰۱۱	استفاده از آنالیز حساسیت به منظور دست‌یابی به خردایش مناسب انفجار	[۵۰]
باقری و همکاران	۲۰۱۲	ارائه روشی برای طراحی انفجار بر اساس مدل خردایش کاز-رام	[۵۱]
بخشنده امنیه و مالکی‌نژاد	۲۰۱۲	ارائه مدل تجربی پیش‌بینی متوسط ابعاد خردایش انفجار در توده‌سنگ	[۵۲]
هوداوردی و همکاران (Hudaverdi et al)	۲۰۱۲	بررسی خردایش با استفاده از میانگین ابعاد قطعات و شاخص خردایش	[۵۳]
فرامرزی و همکاران	۲۰۱۳	ارائه مدل سیستم‌های مهندسی سنگ برای تخمین خردایش انفجار	[۵۴]
مرادجو نمین و همکاران	۲۰۱۴	مقایسه روش‌های تجربی پیش‌بینی خردایش ناشی از انفجار	[۵۵]
بخت‌آور و همکاران	۲۰۱۵	استفاده از تحلیل رگرسیون ابعادی در پیش‌بینی میانگین ابعاد خردایش	[۵۶]
سیدی و همکاران	۲۰۱۵	ارزیابی استفاده از روش‌های تجربی در محاسبه ضخامت بارسنگ	[۵۷]
رستگار	۲۰۱۵	استفاده از پردازش تصویری در تحلیل خردایش پس از انفجار	[۵۸]
احمدی‌نژاد و بانگیان	۲۰۱۶	بررسی تطبیق‌پذیری مدل‌های تجربی محاسبه‌ی ابعاد خرده‌های انفجاری	[۵۹]
احمدی‌نژاد و بانگیان	۲۰۱۶	تحلیل سازگاری الگوهای ریاضی در پیش‌بینی ابعاد خردایش انفجار	[۶۰]

لازم به ذکر است که با توجه به اهمیت موضوع، می‌بایست ارتباط میان تأثیر پارامترهای مختلف فرآیند انفجار و میزان خردایش سنگ پس از انفجار نیز بررسی شود؛ زیرا وابستگی زیادی بین پارامترهای مختلف فرآیند انفجار در معادن روباز وجود دارد. هر یک از روش‌ها و الگوریتم‌های ارائه‌شده، مزایا و معایبی دارند. با توجه به اهمیت روند پیشرفت الگوریتم‌های مذکور، برخی از مهم‌ترین روش‌های تجربی و ابتکاری بررسی میزان خردایش حاصل از انفجار در ادامه مورد بررسی قرار می‌گیرند.

۳-۱- الگوریتم‌های تجربی

الف) مدل سوئدیفو: که توسط مؤسسه تحقیقات آتشکاری سوئد (۱۹۷۴) ارائه شد [۵]:

$$X_{50} = C_b \cdot \left(1 + 4.67\left(\frac{T}{L}\right)^{2.5}\right) . e^{\left(0.29 \ln B^2 \sqrt{\frac{S}{1.25}} - 1.18 \ln\left(\frac{q}{c}\right)^{-0.82}\right)} \quad (۱)$$

که در آن: C_b ثابت قابلیت انفجار، B بارسنگ، S فاصله‌داری چال‌ها، T طول گل‌گذاری، L عمق چال انفجاری، q خرج ویژه و C ثابت سنگ است.

ب) مدل کاز-رام: که توسط کونینگهام (۱۹۸۳) ارائه شد [۷]:

$$X_{50} = A.\left(\frac{V}{Q}\right)^{0.8} .Q^{0.167} .\left(\frac{115}{E}\right)^{0.633} \quad (۲)$$

که در آن: X_{50} اندازه‌ای که ۵۰٪ مواد از ان کوچک‌تر هستند، A شاخص قابلیت انفجار، V حجم توده‌سنگ خردشده در اثر انفجار هر چال و Q جرم ماده منفجره است.

ج) مدل CK: که برای نشان دادن توزیع ابعادی خردایش پس از انفجار از تابع روزین-راملر استفاده شد [۲۳]:

$$n = \frac{0.842}{(\ln X_{80} - \ln X_{50})} \quad (۳)$$

که: X_{80} ابعاد سرندی که ۸۰٪ مواد از آن عبور می‌کنند و X_{50} اندزه متوسط مواد خردشده بوده و از روابط (۴) و (۵) محاسبه می‌شوند:

$$X_{50} = A.Q_h^{0.037}.B^{-0.023}.S^{0.024}.H^{0.036}.q^{-1.230} \quad (۴)$$

$$X_{80} = 3A.Q_h^{0.037}.B^{-0.057}.S^{0.041}.H^{0.041}.q^{-1.070} \quad (۵)$$

A فاکتور سنگ، Q_h جرم ماده منفجره، B بارسنگ، S فاصله‌داری چال‌ها و H ارتفاع چال است. در نتیجه، اندازه‌ی مشخصه‌ی سرند (X_c) از رابطه‌ی (۶) به دست می‌آید.

$$X_c = e^{(0.565\ln X_{50} + 0.435\ln X_{80})} \quad (۶)$$

۳-۲- الگوریتم‌های ابتکاری

الف) الگوریتم بهینه‌سازی تراکم ذرات (PSO): در این الگوریتم که با الهام‌گیری از زندگی گروهی جانوران از جمله حشرات، پرندگان و ماهی‌ها ابداع شده است، برای حل یک مسأله بهینه‌سازی جمعیتی از جواب‌های کاندید با استفاده از یک فرمول ساده به‌طور تصادفی در دامنه مسأله حرکت می‌کنند و آن را با هدف یافتن جواب بهینه سراسری مورد کاوش قرار می‌دهند. برخلاف الگوریتم ژنتیک، در الگوریتم PSO باید بهترین جواب به‌دست‌آمده برای مسأله بهینه‌سازی از آغاز اجرای برنامه تا آخرین تکرار، توسط هر یک از ذرات نیز ذخیره‌سازی شود. از سوی دیگر، الگوریتم PSO نیز همانند الگوریتم ژنتیک ذاتاً برای حل مسائل بیشینه‌سازی بدون قید در حالت پیوسته مناسب است. با این حال، می‌توان با انجام تغییراتی در شیوه تعریف تابع هدف، از آن برای حل مسائل بهینه‌سازی در حالت تحت قید پیوسته نیز استفاده کرد.

ب) توسعه‌ی الگوریتم PSO: در روش توسعه‌یافته الگوریتم PSO، بر اساس معادلات (۷) و (۸)، موقعیت و سرعت هر ذره محاسبه می‌شود و این روش تا زمانی که معیارهای خاتمه الگوریتم برآورده شوند، ادامه می‌یابد [۶۱].

$$v_{new} = \omega v + c_1 r_1 (P_{best} - p) + c_2 r_2 (g_{best} - p) \quad (۷)$$

$$p_{new} = p + v_{new} \quad (۸)$$

که در آن: v_{new} سرعت جدید، v سرعت فعلی، p موقعیت فعلی ذرات، p_{new} موقعیت جدید ذرات، w وزن سکون (بین ۰/۴ و ۰/۹)، r_1 و r_2 اعداد تصادفی که معمولاً بین [۰,۱] انتخاب می‌شوند، c_1 ضریب مؤلفه خودشناختی، c_2 ضریب مؤلفه اجتماعی، P_{best} بهترین موقعیت ذره‌ای و g_{best} بهترین موقعیت بین ذرات است.

به منظور پیاده‌سازی و تحلیل نتایج حاصل از الگوریتم توسعه‌یافته ارائه‌شده، از مدل PSO با هفت پارامتر ورودی و یک پارامتر خروجی برای پیش‌بینی میزان خردایش سنگ‌های پس از انفجار در معدن سرب و روی انگوران (در قالب مطالعه‌ی موردی) استفاده شد. به منظور استانداردسازی داده‌های ورودی نیز از رابطه (۹) استفاده شده است.

$$0 \le \frac{x - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}} \le 1 \quad (۹)$$

که در آن: X_n مقدار نرمال‌شده، X_r مقدار واقعی، X_{min} کمینه مقدار برای متغیر وابسته و X_{max} بیشینه مقدار برای متغیر وابسته است.

تابع هدف (کمینه‌سازی) مورد استفاده نیز به‌صورت رابطه (۱۰) تعریف شد:

$$z = \min RMSE = \min \sqrt{\frac{1}{m}\sum_{i=1}^{m}(A_i - P_i)^2} \quad (۱۰)$$

با به‌کارگیری رابطه خطی بین پارامترهای مختلف، رابطه پارامترهای ورودی و میزان خردایش به‌صورت رابطه (۱۱) نوشته شد:

$$d_{80} = \alpha_1 X_1 + \alpha_2 X_2 + \alpha_3 X_3 + \alpha_4 X_4 + \alpha_5 X_5 + \alpha_6 X_6 + \alpha_7 X_7 \quad (۱۱)$$

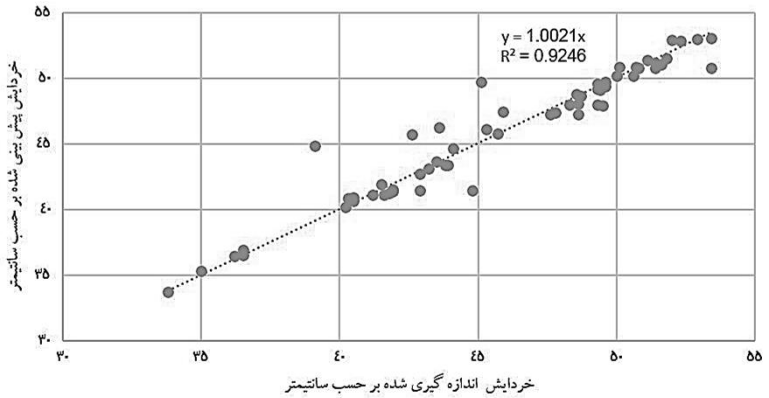
مقادیر بهینه فاکتورهای وزن نیز با استفاده از الگوریتم PSO و داده‌های واقعی برای برآورد میزان خردایش سنگ‌ها حاصل از انفجار در معدن سرب و روی انگوران تعیین شد. در حقیقت، الگوریتم PSO بهترین مدل‌های داده را با توجه به کم‌ترین مقدار برای RMSE پیدا می‌کند. برای به دست آوردن نتایج باید مقادیر α_1 تا α_7 را محاسبه کرد. هدف اصلی الگوریتم، یافتن مقادیر ضرایب مذکور است که با هدف کمینه‌سازی تابع هدف، مدل ارائه‌شده را حل کند. بنابراین مقادیر مختلف برای هر پارامتر در نظر گرفته شد و ارزش بهینه زمانی تعیین شد که تابع مناسب کمینه مقدار را تعیین می‌کند. مقادیر بهینه این پارامترها برای مدل PSO بدین شرح است: شتاب شناختی (C_1) و شتاب اجتماعی (C_2) برابر با ۱/۴، θ_{max} برابر با ۰/۹، θ_{min} برابر با ۰/۴ و تعداد تکرار برابر با ۲۰۰. نتایج حاصل از پیاده‌سازی الگوریتم نشان داد که حداقل میزان محاسبه‌شده برای RMSE در حالت معادله استاندارد ۰/۲۶ است. باید مقادیر $y_{standard}$ را نیز محاسبه کرد. بدین منظور از رابطه (۱۲) بهره گرفته شده است:

$$y_{standard} = \alpha_1 X_1 + \alpha_2 X_2 + \alpha_3 X_3 + \alpha_4 X_4 + \alpha_5 X_5 + \alpha_6 X_6 + \alpha_7 X_7 \quad (۱۲)$$

همچنین، مطابق تعریف استانداردسازی y، رابطه (۱۳) نیز برقرار است:

$$y_{standard} = \frac{y_1 - y_{\min}}{y_{\max} - y_{\min}} \quad (۱۳)$$

پس از انجام محاسبات، اعتبارسنجی رابطه بین مقادیر پیش‌بینی‌شده و مقادیر اندازه‌گیری‌شده خردایش سنگ‌های حاصل از انفجار (بر حسب سانتی‌متر) انجام گرفت که در شکل (۹) نشان داده شده است.



شکل (۹): رابطه بین مقادیر پیش‌بینی‌شده و مقادیر اندازه‌گیری‌شده خردایش سنگ‌های حاصل از انفجار

۴- بحث و تحلیل

تحلیل و ارزیابی خردایش پس از انفجار، در بررسی کارایی انفجار، امری بسیار مهم و ضروری است. در عملیات معدنکاری معمولاً از روش‌های مختلفی از جمله روش مشاهده‌ای، پردازش تصویری، روش فوتوگرامتری یا عکاسی با سرعت بالا (عکاسی سریع) به منظور ارزیابی خردایش حاصل از انفجار استفاده می‌شود. در سال‌های اخیر نیز توسعه مدل‌ها و الگوریتم‌های مختلف ابتکاری و فراابتکاری و استفاده از این ابزارهای مهندسی، رشد قابل توجهی داشته است. الگوریتم بهینه‌سازی تراکم ذرات از روش‌های سراسری بهینه‌سازی محسوب می‌شود که با استفاده از آن می‌توان مسایل

بهینه‌سازی پیوسته (نظیر پیش‌بینی میزان خردایش سنگ‌های حاصل از انفجار) را نیز حل کرد.

جالب توجه است که در دوره‌ای نه‌چندان طولانی، سیر تکاملی روش‌های پیش‌بینی نتایج انفجار در معادن از روش‌های تجربی به سمت روش‌های فراابتکاری سوق داده شده است. نتایج مطالعاتی که در سال‌های اخیر در خصوص پیش‌بینی نتایج انفجار در معادن روباز نشان می‌دهد که به‌کارگیری الگوریتم‌های نوین مهندسی برای حل مسایل پیچیده مهندسی معدن، همواره توأم با پاسخ‌ها و راه حل‌هایی بوده است که سازگاری و قرابت قابل توجهی با شرایط واقعی داشته است.

۵- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، با مروری بر مطالعات انجام‌شده در خصوص روش‌های پیش‌بینی خردایش ناشی از انفجار در معادن روباز، سیر تکاملی حل مسأله مذکور مورد بررسی قرار گرفت و مشخص شد که در پیش‌بینی میزان خردایش که با استفاده از الگوریتم‌های ابتکاری و فراابتکاری نیز می‌توان از این الگوریتم‌ها بهره گرفت. با مقایسه نتایج حاصل از مدل اصلاح‌شده الگوریتم تراکم ذرات، نتایج نشانگر سازگاری تابع خطی ارائه‌شده با شرایط واقعی معدن سرب و روی انگوران است و می‌توان از این الگوریتم در پیش‌بینی میزان خردایش سنگ‌های حاصل از انفجار در سایر معادن نیز بهره برد. نتایج حاصل از کاربرد الگوریتم PSO در قالب مطالعه موردی نشان می‌دهد که میزان بهینه RMSE برابر با ۰/۲۶ دلالت بر مطلوبیت تابع خطی محاسبه‌شده در حالت استاندارد دارد. میزان ضریب تعیین ۰/۹۲ بین مقادیر واقعی اندازه‌گیری‌شده پس از انفجار و میزان پیش‌بینی‌شده آن دلالت بر این دارد که تابع خطی پیشنهادشده با دقت بالایی می‌تواند میزان خردایش را پیش‌بینی کند.

منابع

[1] Dinis and Gama, C. “A model for rock-mass fragmentation by blasting”. Proceedings 8th International congress on rock mechanics. Também publicado Na Revista Geotecnia, Março de. 1(76): 41-51. 1996.
[2] Kuznetsov, V.M. “Mean diameter of fragments formed by blasting rock”. Soviet mining science 9(2): 144-148. 1973.
[3] 37-Kim, K. “Blasting design using fracture toughness and image analysis of the bench face and muckpile”. Thesis of M.Sc, Blacksburg: Virginia Polytechnic Institute and State University. 2006.
[4] Catasus, P. “Experimental analysis of fragmentation, vibration and rock movement in ppen-pit blasting”. Thesis Doctoral, Department of mining engineering: Madrid University of Polytechnic. 2004.
[5] Lopez Jimeno, C. “Drilling and blasting of rocks”. A. A. Balkema. 1995.
[6] Gokhale, B.V., “Rotary drilling and blasting in large surface mines. Taylor & Francis Group. London: UK. 2011.
[7] Cunningham, C.V.B. “The Kuz-Ram model for prediction of fragmentation from blasting”. In: Holmberg, R., Rustan, A. (Eds.), proceedings of 1th. International symposium on rock fragmentation by blasting, Lulea. Sweden, pp. 439-453. 1983.
[8] Van Aswgen, H., Cunningham, C.V.B. “The estimation of fragmentation in blast muckpiles by means of standard photographs”. Journal of South African Institue of Mining and Metallurgy. 86(12): 56-65. 1986.
[9] Cunningham, C.V.B. “Fragmentation estimations and Kuz-Ram model—Four years” on. Proceedings of 2th. International symposium on rock fragmentation by blasting. Keystone. Colorado. pp. 475-487. 1987.
[10] Hunter G.C. “Review of Image analysis techniques for measuring blast fragmentation”. Mining science & technology, vol. 11: 19-36. 1990.
[11] Ouchterlony, F., Niklasson, B., Abrahamsson, S. “Fragmentation monitoring of production blasts at Mrica”. In: McKenzie, C. (ed.), International symposium on rock fragmentation by blasting, FragBlast 3. Brisbane, Australia, pp. 283-289. 1990.
[12] Ghosh, A., Daemen, J.J.K., Vanzyl, D. “Fractal based approach to determine the effect of discontinuities on blast fragmentation”. Proceeding of the 31st U.S. symposium on rock mechanics. Golden, pp. 905–912. 1990.
[13] Mojtabai, N., Farmer, I.W., Savely, J.P. “Optimisation of rock fragmentation in bench blasting.” Proceeding of 31st US symposium on rock mechanics. Balkema. Rotterdam. pp. 897-901. 1990.
[14] Morin, M. A., Ficarazzo, F. “Monte-Carlo simulation as a tool to predict blasting fragmentation based on the kuz-ram model”. Computers & geoscience, vol. 32: 352-359. 2006.
[15] Chakraborty, A.K., Jethwa, J.L., Paithankar, A.G. “Effects of joint orientation and rock mass quality on tunnel blasting”. Engineering geology 37: 247-262. 1994.
[16] Pal Roy, P. “Breakage assessment through cluster analysis of joint set orientations of exposed benches of opencast mines”. Geotechnical and geological engineering 13: 79-92. 1995.
[17] Hagan, T.N. “The effect of rock properties on the design and results of tunnel blasts”. Journal of rock mechanics and tunnelling technology 1 (1): 25–39. 1995.
[18] Maerz, N.H., Palangio, T.C., Franklin, J.A. “WipFrag image based granulometry system”. In proceeding

measurement of blast fragmentation. Balkema, Rotterdam. 1996.
[19] Aler, J., DuMouza, J., Arnould, M. “Measurement of the fragmentation efficiency of rock mass blasting and its mining applications”. International journal of rock mechanics and mining sciences and geomechanics abstracts 33: 125-139. 1996.
[20] Ozcelik, Y. “Effect of discontinuities on fragment size distribution in open-pit blasting — a case study”. Transactions of the institution of mining and metallurgy 107: 146–150. 1998.
[21] Castro, J.T., Liste, A.V., Gonzalez, A.S. “Blasting index for exploitation of aggregates”. In: Singhhal, R.K. (ed.), proceedings of the 7th mine planning and equipment selection symposium, Calgary, Canada, pp. 165–168. 1998.
[22] Latham, J.P., Lu, P. “Development of an assessment system for the blastability of rock masses”. International journal of rock mechanics and mining sciences and geomechanics abstracts 36: 41-55. 1999.
[23] Spathis, A.T. ”Formulae and techniques for assessing features of blast-induced fragmentation distributions. Rock”. Fragmentation by blasting (Frag blast 9): 209-219. 2010.
[24] Chakraborty, A.K., Raina, A.K., Ramulu, M., Choudhury, P.B., Haldar, A., Sahu, P., Bandopadhyay, C. “Parametric study to develop guidelines for blast fragmentation improvement in jointed and massive formations”. Engineering geology 73: 105-116. 2004.
[25] Hamdi, E., Du Mouza, J. “A methodology for rock mass characterization and classification to improve blast results”. International journal of rock mechanics & mining sciences 42: 177–194. 2005.
[26] Ouchterlony, F. “The swebrec function linking fragmentation by blasting and crushing”. Mining technology. vol. 114: 29-44. 2005.
[27] Hoseinie, S.H., Pourrahimian, Y., Aghababaei, H. “Application of rock mass index to determinate of blasting index”. 15th International symposium on mine planning and equipment selection. Torino. Italy. 2006.
[28] Latham, J.P., Meulen, J.V., Dupray, S. “Prediction of fragmentation and yield curves with reference to armourstone production”. Engineering geology. 12(87): 60-74. 2006.
[۲۹] عطایی، م؛ زیاری، ن. "بررسی توزیع خرد شدگی سنگ‌ها در اثر انفجار در معدن سنگ آهن سنگان"، نشریه حفاری و آتشکاری. شماره ۳. ۱۳۸۵.
[30] Karami, A., Afiuni-Zadeh, S. “Sizing of rock fragmentation modeling due to bench blasting using adaptive neuro-fuzzy inference system and radial basis function”. International journal of mining science and technology. vol. 22: 459-463. 2012.
[۳۱] ابراهیمی‌امیری، ح؛ منصوری، ح؛ امیررحمت، م. "اعتبارسنجی نتایج حاصل از روش آنالیز تصویری در دانه‌بندی سنگ معدن مس سرچشمه". دومین کنفرانس معادن روباز ایران. ۱۳۸۴.
[۳۲] تقی‌زاده، ن؛ منصوری، ح. "اعتبارسنجی نتایج حاصل از روش آنالیز تصویری جهت دانه‌بندی انواع سنگ‌آهن معدن گل‌گهر". دومین کنفرانس معادن روباز ایران. ۱۳۸۴.
[33] Oraee, K., Asi, B. “Prediction of rock fragmentation in open pit mines, using neural network analysis”. 5th International symposium on mine planning and equipment selection. Turin. Italy. 2006.
[۳۴] سامی، ع. "بهینه سازی خردایش انفجار با استفاده از شبیه سازی مونت‌کارلو بر اساس مدل کاز-رام". (پایان‌نامه کارشناسی‌ارشد)، دانشکده مهندسی معدن، متالورژی و نفت، دانشگاه صنعتی امیرکبیر. ۱۳۸۶.
[۳۵] دربانی، ح؛ ابراهیمی‌فر سنگی، م.ع؛ منصوری، ح. "پیش‌بینی خرد شدگی در معادن روباز یک مدل فازی". سومین کنفرانس مکانیک سنگ ایران. دانشگاه امیرکبیر. ۱۳۸۶.
[36] Singh, S.P., Narendrula, R. “Prediction and assessment of rock fragmentation”. 5th International symposium on mine planning & equipment selection. Turin. Italy. 2008.
[37] Singh, S. P., Oconnor, C. P. “Fragmentation prediction during ring blasting using a discrete Kuz-Ram model”. 5th International symposium on mine planning & equipment selection. Turin. Italy. 2006.
[38] Rezaei, M., Monjezi, M., Yazdian Varjani, A. “Development of a fuzzy model to predict flyrock in surface mining”. Safty science. vol. 49: 298-305. 2011.
[۳۹] شریعت‌علوی، ح؛ زارع، م؛ بیرانوند، ا. "بررسی خردشوندگی سنگ‌ها در اثر انفجار در معدن سنگ آهن مرکزی ایران". دومین کنفرانس مهندسی معدن ایران. ۱۳۸۷.
[۴۰] عنایت‌اللهی، ا؛ اسدی، ا؛ مجدی، ع. "پیش‌بینی خردایش ناشی از انفجارهای معدن سنگ آهن گل‌گهر با استفاده از رگرسیون خطی". سومین کنفرانس مهندسی معدن. ۱۳۸۸.
[41] Gheibie, S., Aghababaei, H., Hoseinie, S.H., Pourrahimian, Y. “Modified Kuz-Ram fragmentation model and its use at the Sungun copper mine”. International journal of rock mechanics & mining sciences 46: 967-973. 2009.
[42] Ozdemir, K., Kahriman, A., Karadogan, A., Tuncer, G. “Rock blasting fragmention control using the split digital image analysis system”. 2009.

[43] Monjezi, M., Rezaei, M., Yazdian Varjani, A. “Prediction of rock fragmentation due to blasting in Gol-e-Gohar iron mine using fuzzy logic”. International journal of rock mechanics & mining sciences 46: 1273-1280. 2009.
[44] Engin, I.C. “A partical method of bench blasting design for desired fragmention based on digital image processing technique and Kuz-Ram model”. International journal on rock fragmentation by blasting (FRAGBLAST), vol. 9: 257-263. 2010.
[45] Hudaverdi, T., Kulatilake, P.H.S.W., Kuzu, C. “Prediction of blast fragmentation using multivariate analysis procedures”. To appear in 2010.
[46] Kulatilake, P. H. S. W., Qiong, W., Hudaverdi, T. “Mean particle size prediction in rock blast fragmentation using neural networks”. Engineering geology 21: 298-311. 2011.
[۴۷] ریاحی، م؛ خو شرو، س.ح؛ ر ضایی، ب؛ امیررحمت، م؛ "برر سی خردایش انواع سنگ نا شی از انفجار معدن مس میدوک با ا ستفاده از آنالیز تصویری". سومین کنفرانس مهندسی معدن ایران. ۱۳۸۸.
[48] Monjezi, M., Amiri, H., Farrokhi, A. “Prediction of rock fragmentation due to blasting in Sarcheshmeh copper mine using artificial neural networks”. Geotech geol engineering 16: 423-30. 2010.
[۴۹] مالکی‌نژاد، ح.ر؛ بخ شنده امنیه، ح. "پیش‌بینی خرد شدگی حا صل از انفجار معدن سرریز سد گتوند علیت با ا ستفاده از مدل‌های کاز-رام و KCO". اولین کنفرانس مهندسی انفجار و جایگاه آن در سازندگی کشور. دانشگاه صنعتی امیرکبیر. ۱۳۸۹.
[۵۰] ضیایی، ا؛ آهنگری، ک؛ عابدینی، م. "سرلک شاه‌محمدی، ع. طراحی الگوی حفاری و انفجار بهینه معدن شماره ۳ گل‌گهر سیرجان با استفاده از آنالیز حساسیت در جهت دست‌یابی به خردایش مناسب". کنگره بین‌المللی معدن. ۱۳۸۹.
[۵۱] باقری، م؛ خوشرو، ح؛ عطایی، م. "یک روش جدید برای طراحی الگوی حفاری و انفجار بر اساس اصلاح مدل خردایش کاز-رام در معدن سنگ آهن گل‌گهر". اولین کنفرانس فناوری‌های معدنکاری ایران. ۱۳۹۱.
[۵۲] بخشنده امنیه، ح؛ مالکی‌نژاد، ح. "ارائه مدل تجربی پیش‌بینی متوسط ابعاد خرد شدگی حاصل از انفجار در توده سنگ کنگلومرای سد گتوند علیا". نشریه علمی پژوهشی مدیریت انرژی. ۱۳۹۱.
[53] Hudaverdi, T., Kuzu, C., Fisne, A. “Investigation of the blast fragmentation using the mean fragment size and fragmentation index”. International journal of rock mechanics & mining sciences. vol. 56: 136-45. 2012.
[54] Faramarzi, F., Mansouri, H., Ebrahimi, M. A. “A rock engineering systems based model to predict rock fragmentation by blasting”. International journal of rock mechanics and mining sciences. vol. 60: 82-94. 2013.
[۵۵] مرادجو، ا؛ منجزی، م؛ ر ستم‌آبادی، س. "مقایسه بین روش‌های تجربی پیش‌بینی خردایش سنگ نا شی از انفجار در معدن مس سونگون". پنجمین کنفرانس مهندسی معدن. ۱۳۹۳.
[56] Bakhtavar, E; Khoshrou, H & Badroddin, M. “Using dimensional-regression analysis to predict the mean particle size of fragmentation by blasting at the Sungun copper mine”. Arabian journal of geoscience. vol. 8: 2111-2120. DOI: 10.1007/s12517-013-1216-2. 2015.
[۵۷] سیدی، و؛ ابراهیم‌زاده، د؛ حدائقی، ع. "تعیین ضخامت بار سنگ با توجه به شرایط موجود در معدن سنگ آهک م سگرآباد کارخانه سیمان تهران". فصلنامه علمی-پژوهشی فن‌آوری سیمان. شماره۱۲. ۱۳۹۳.
[۵۸] رستگار، ع. "بررسی خطای ناشی از ویژگی‌های تصویر و پردازش دیجیتال در حوزه آنالیز تصویری خردایش سنگ ناشی از انفجار". http://www.mining-eng.ir ۱۳۹۳.
[۵۹] احمدی‌نژاد، ع.ر؛ بانگیان، ا.ح. "تطبیق‌پذیری مدل‌های تجربی محاسبه توزیع ابعاد خرده‌های انفجاری، معادن سنگ پرکننده سد باطله معدن مس سرچشمه". سومین کنفرانس معادن روباز ایران. دانشگاه شهید باهنر کرمان. ۱۳۹۴.
[۶۰] احمدی‌نژاد، ع.ر؛ بانگیان، ا.ح. "تحلیل سازگاری الگوهای ریا ضی در پیش‌بینی ابعاد خرده‌های انفجاری (مطالعه موردی)". ش شمین همایش ملی زمین‌شناسی محیط زیست. دانشگاه آزاد اسلامی واحد اسلامشهر. ۱۳۹۴.
[۶۱] محمودی، ل؛ آقاجانی‌بزاری، ع؛ بانگیان تبریزی، ا.ح. "پیش‌بینی میزان خردایش سنگ پس از انفجار با ا ستفاده از الگوریتم بهینه سازی تراکم ذرات (مطالعه موردی: معدن سرب و روی انگوران)". پایان‌نامه مقطع کار شناسی ار شد. دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات. دانشکده فنی و مهندسی. گروه مهندسی معدن. ۱۳۹۶.