

بهینه‌سازی هزینه انفجار در معادن سنگ آهک با استفاده از رگرسیون چند متغیره غیر خطی و الگوریتم فرا ابتکاری PSO

رضا بستامی^۱، عباس آقاجانی بزازی^{۲*}، هادی حمیدیان شورمستی^۳، کاوه آهنگری^۴

۱- دانشجوی دکتری مهندسی معدن، گروه معدن، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات، تهران، ایران، Bastami870@gmail.com

۲- استادیار گروه مهندسی معدن، دانشگاه کاشان، ایران a.aghajani.bazzazi@gmail.com

۳- استادیار گروه مهندسی معدن، دانشگاه آزاد اسلامی واحد قائم‌شهر، ایران hhamidian@yahoo.com

۴- دانشیار گروه مهندسی معدن، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات، تهران، ایران kaveh.ahangari@gmail.com

چکیده

پیش‌بینی و بهینه‌سازی هزینه انفجار برای رسیدن به خردایش مطلوب با در نظر داشتن کنترل پیامدهای نامطلوب ناشی از انفجار قابل توجه است. در این پژوهش با جمع‌آوری داده‌های انفجار در ۶ معدن سنگ آهک در ایران با استفاده از رگرسیون چند متغیره غیر خطی با ارائه مدلی به منظور پیش‌بینی هزینه انفجار پرداخته شد. این مدل در مقایسه با مدل رگرسیون چند متغیره خطی ضریب همبستگی بالاتری (۰/۹۱۳) و جذر متوسط مربعات خطا (۱۰۸۹ ریال بر تن) کمتری دارد و مدل غیرخطی در مقایسه با مدل خطی تطابق بهتری را با هزینه‌های واقعی انفجار نشان می‌دهد. براساس آنالیز حساسیت انجام گرفته، فاصله‌داری و تعداد چال‌ها به ترتیب بیشترین و کمترین تأثیر را بر روی مدل هزینه انفجار داشتند. هم‌چنین در این پژوهش با استفاده از روش رگرسیون چند متغیره غیرخطی علاوه بر دست‌یابی به تابع هزینه انفجار، توابع محدودکننده مورد نظر در انفجار شامل خردایش، پرتاب سنگ و عقب‌زدگی مدل و این توابع به‌عنوان ورودی در الگوریتم فرا ابتکاری تراکم ذرات (PSO) برای بهینه‌سازی هزینه انفجار استفاده شد. با استفاده از این روش فاصله‌داری، تعداد و طول چال‌ها به ترتیب ۳/۶ متر، ۴۶۲ حلقه و ۱۳ متر به‌عنوان پارامترهای طراحی انفجار و خردایش، پرتاب سنگ و عقب‌زدگی به ترتیب ۴۴ سانتی‌متر، ۸۴/۵ متر و ۳/۶ متر به‌عنوان محدودیت‌های انفجار و هزینه انفجار ۶۲۳۵ ریال بر تن به‌دست آمد که منجر به کاهش ۱۲/۹ درصدی هزینه انفجار و کنترل بهینه پیامدهای نامطلوب ناشی از انفجار شد.

کلمات کلیدی

هزینه انفجار، معادن سنگ آهک، رگرسیون چند متغیره غیر خطی، الگوریتم بهینه‌سازی تراکم ذرات، بهینه‌سازی

۱- مقدمه

هدف اولیه انفجار، خردایش بهینه و جابه‌جایی سنگ خرد شده است. بررسی‌ها نشان می‌دهد که تنها ۲۰ تا ۳۰ درصد از کل انرژی حاصل از ماده منفجره صرف خردایش و جابه‌جایی سنگ‌ها می‌شود و مابقی به صورت پدیده‌های مخرب نامطلوب مانند لرزش زمین، انفجار هوا، پرتاب سنگ و عقب زدگی هدر می‌رود [۱]. بررسی محاسبه هزینه انفجار بدون در نظر گرفتن پیامدهای نامطلوب ناشی از انفجار بی‌معنی و غیراصولی خواهد بود. با توجه به اهمیت و تأثیر به‌سزای انفجار در هزینه استخراج مواد معدنی ضرورت ارائه مدلی به‌منظور پیش‌بینی هزینه انفجار احساس می‌شود بنابراین محاسبه هزینه بهینه انفجار برای دستیابی به خردشدگی مطلوب با رعایت محدودیت‌های انفجار یک مسأله اساسی در معدن به‌شمار می‌رود.

جیمینو و همکاران در سال ۱۹۹۵ معادله پایه‌ای را برای محاسبه هزینه هر متر حفاری براساس هزینه‌های مستقیم و غیرمستقیم ارائه کردند. هزینه‌های مستقیم شامل تعمیر و نگهداری، پرسنلی، انرژی، گریس، روغن، راد، سر مته و ... و هزینه‌های غیرمستقیم استهلاک، بیمه، مالیات و ... را شامل می‌شود [۲].

الوارنتا در سال ۱۹۹۵ ارتباط بین هزینه حمل مواد معدنی و فرآوری با هزینه انفجار براساس خرج ویژه و میزان خردشدگی سنگ را به‌دست آورد [۳].

کانچیپوتلا در سال ۲۰۰۳ در مقاله‌ای با عنوان «انفجار بهینه؟ حداقل هزینه و یا حداکثر ارزش هر تن سنگ شکسته» حداکثر سوددهی، هزینه‌ها و انفجار بهینه در یک معدن طلا و یک معدن زغال‌رو باز بر مبنای مدل‌های شبیه‌سازی کامپیوتری و مطالعات میدانی را مورد مطالعه قرار داد [۴].

راجپوت در سال (۲۰۰۹) در پژوهشی تأثیرات خصوصیات خردایش را روی هزینه انفجار بررسی کرد و یک مدل برای بررسی تأثیر قطر چال بر روی الزامات انفجار به جهت رسیدن به خردایش d80 و محاسبه پارامترهای طراحی انفجار برای دانه‌بندی ۳۵۰-۷۵ میلی‌متر ارائه کرد [۵].

عثمان و محمد در سال ۲۰۱۳ کاربرد آنالیز ترکیبی PCA را روی اطلاعات و پارامترهای ۳۱ انفجار در معدن سیمانی در شمال پاکستان مورد تجزیه و تحلیل قرار دادند و این

پارامترها به‌صورت مدلی برای پیش‌بینی هزینه انفجار استفاده شد [۶].

آنون در سال ۲۰۱۴ در مقاله‌ای به بررسی کاهش هزینه حفاری و انفجار در معادن مس و طلا پارک شمالی در کشور استرالیا از طریق بهینه‌سازی طراحی انفجار و استفاده از سیستم انفجار الکتریکی (Uni Tronic™) پرداخت و موفق شد خردایش بهتر را با خرج ویژه کمتر فراهم کند [۷].

آفوم و تمنج در سال ۲۰۱۵ در مقاله‌ای کاهش هزینه‌های عملیات حفاری و انفجار در یک معدن طلا روباز در کشور غنا را در سه پیت از طریق بهینه‌سازی انفجار و استفاده از مدل کوز - رام مورد مطالعه قرار دادند و در نهایت خردایش متوسط ۲۵ الی ۵۶ سانتی‌متر را به‌دست آوردند [۸].

آدبایو و موتاندوا در سال ۲۰۱۵ در پژوهشی ارتباط انحراف چال انفجاری را با اندازه قطعه سنگ و هزینه خردایش مورد بررسی قرار دادند و در پژوهش خود از آنفو، آنفو سنگین و امولسیون در چال‌هایی با قطر ۱۹۱ الی ۳۱۱ میلی‌متر استفاده کردند و نتایج نشان داد که با افزایش انحراف چال اندازه متوسط قطعه سنگ کاهش یافته و از طرف دیگر هزینه حفاری و انفجار افزایش می‌یابد [۹].

غنی‌زاده و همکاران در سال ۲۰۱۸ در پژوهشی با جمع‌آوری داده‌های سه معدن مس در ایران به‌صورت یک تابعی از قطر چال، ارتفاع پله، مقاومت فشاری تک محوری و جهت دسته درزه محاسبه هزینه انفجار را برحسب متر مکعب به‌صورت یک مدل خطی، با استفاده از نرم‌افزار کامفار و روش‌های آماری ارائه نمودند [۱۰].

میراندا و همکاران در سال ۲۰۱۹ با ارائه مقاله‌ای از روش‌های عددی برای یافتن کمینه هزینه انفجار در مقایسه با روش‌های سنتی و تجربی استفاده کردند. این مدل روی توسعه الگوی انفجار با اصلاح خودکار بارسنگ، فاصله داری، گل‌گذاری، اضافه‌حفاری و تعداد چال به‌منظور تضمین تقاضای تولید از لحاظ حجم انفجار پایه‌ریزی شده است [۱۱].

با مرور پژوهش‌های صورت گرفته توسط این محققین ضرورت ارائه مدلی برای پیش‌بینی و بهینه‌سازی هزینه انفجار در معادن سنگ آهک احساس می‌شود. در این تحقیق از رگرسیون چند متغیره غیرخطی برای پیش‌بینی هزینه انفجار در معادن سنگ آهک استفاده و نتایج حاصله با داده‌های واقعی جمع‌آوری شده از ۶ معدن سنگ آهک در ایران و هم‌چنین رگرسیون چندمتغیره خطی مقایسه شده است و با

آورد [۱۳ و ۱۲]. پس از جمع‌آوری داده‌های خام به‌منظور تجزیه و تحلیل آن‌ها از آمار توصیفی برای تنظیم داده‌ها و از آمار استنباطی (ضریب همبستگی و رگرسیون چند متغیره) برای پیش‌بینی هزینه انفجار استفاده شد. الگوریتم بهینه‌سازی تراکم ذرات یکی از الگوریتم‌های فرا ابتکاری است که با الهام گرفتن از اصول حاکم بر رفتار گونه‌های اجتماعی موجود در طبیعت از قبیل گروه پرندگان و ماهی‌ها در سال ۱۹۹۵ توسط جیمز کندی^۲ روانشناس اجتماعی و راسل سی ابرهارت^۳ مهندس برق ابداع شد. این الگوریتم یک روش بهینه‌سازی تصادفی و مبتنی بر اساس همکاری اجتماعی، رقابت گروهی و بهبود اعضای جمعیت عمل می‌کند [۱۴ و ۱۵].

۳- پایگاه داده‌ها

به‌منظور مدل‌سازی و اعتبار سنجی روش رگرسیون چند متغیره و الگوریتم فرا ابتکاری PSO در این تحقیق از داده‌های ۶ معدن سنگ آهک در ایران استفاده شده است. مشخصات این معادن در جدول ۱ و موقعیت جغرافیایی این معادن بر روی نقشه ایران در شکل ۱ نشان داده شده است.

بهره گرفتن از الگوریتم بهینه‌سازی تراکم ذرات^۱ (PSO) و با اعمال توابع محدودیت‌های خردایش، پرتاب سنگ و عقب‌زدگی و نسبت فاصله‌داری به ضخامت بارسنگ ($S \geq B$) و رابطه طول چال به ضخامت بارسنگ ($H = (3-4)B$) هزینه انفجار و پارامترهای بهینه طراحی به‌دست آمد.

۲- روش کار

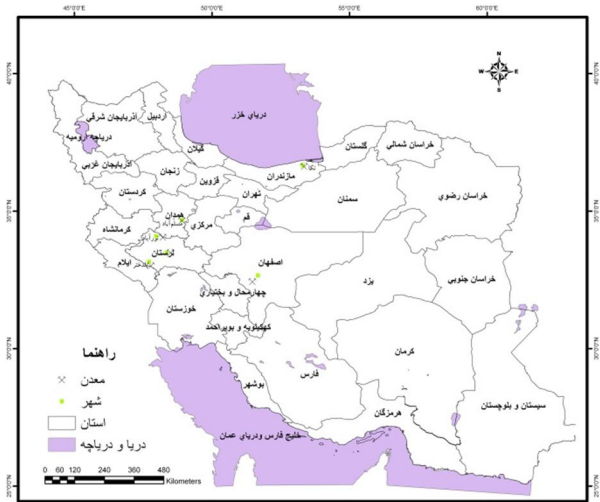
در این تحقیق پس از جمع‌آوری داده‌ها، پارامترهای ورودی، خروجی و محدودیت‌ها تعیین شد و از روش آماری رگرسیون چند متغیره جهت ارائه مدلی برای پیش‌بینی هزینه انفجار هم‌چنین محدودیت‌های انفجار از جمله خردایش، پرتاب سنگ و عقب‌زدگی استفاده شده است. سپس با وارد کردن مدل هزینه انفجار به‌عنوان تابع هدف و توابع خردایش، پرتاب سنگ و عقب‌زدگی به‌عنوان محدودیت‌های انفجار، با استفاده از الگوریتم تراکم ذرات (PSO) که یکی از کارآمدترین روش‌های فرا ابتکاری است بهینه‌سازی صورت گرفت. رگرسیون چندمتغیره روش آماری برای بررسی رابطه بین متغیرهای وابسته و مستقل و تحلیل داده‌ها در مدل‌سازی است. با استفاده از این روش می‌توان متغیر وابسته را از روی متغیرهای مستقل پیش‌بینی و ارتباط بین آن‌ها را به‌دست

جدول ۱: مشخصات معادن سنگ آهک مورد مطالعه [۱۶]

ردیف	نام معدن	ذخیره قطعی (تن)	ظرفیت استخراج سالیانه (تن)	نزدیکترین شهر به معدن
۱	آبلو	۸۹۳۴۰۰۰۰	۴۰۰۰۰۰۰	نکا مازندران
۲	تجره	۴۳۰۰۰۰۰	۱۵۰۰۰۰	خرم‌آباد
۳	مسلم‌آباد	۷۰۰۰۰۰۰	۳۰۰۰۰۰	همدان
۴	تنگ فنی	۹۰۰۰۰۰	۱۰۰۰۰۰	پلدختر
۵	سیمان سپاهان	۱۳۵۰۰۰۰۰	۶۰۰۰۰۰	اصفهان
۶	برخوردار ۱	۱۶۰۰۰۰۰	۱۶۰۰۰۰	نورآباد

مبنای قیمت مواد منفجره و هزینه‌های دی ماه سال ۹۷ به روز رسانی شد و مبنای پژوهش قرار گرفت. براساس این داده-ها هزینه خرید مواد منفجره ۶۲/۹ درصد، هزینه حمل، اسکورت، پرسنلی، نظارت بر مصرف و کانتین ۱۶/۸ درصد، دستمزد شرکت آتشباری ۸/۵ درصد و هزینه خردایش ثانویه و پیامدهای نامطلوب ناشی از انفجار ۱۱/۸ درصد هزینه هر انفجار را شامل می‌شود.

تعداد داده‌های جمع‌آوری شده و مورد استفاده در این پژوهش اطلاعات پارامترهای طراحی، ژئومکانیکی و نتایج ۱۱۴۶ الگوی انفجار در ۶ معدن سنگ آهک در ایران است. پارامترهای ورودی، خروجی، محدودیت‌ها و مشخصات آماری این پارامترها که اطلاعات آنها از این معادن جمع‌آوری شده در جدول ۲ نشان داده شده است.



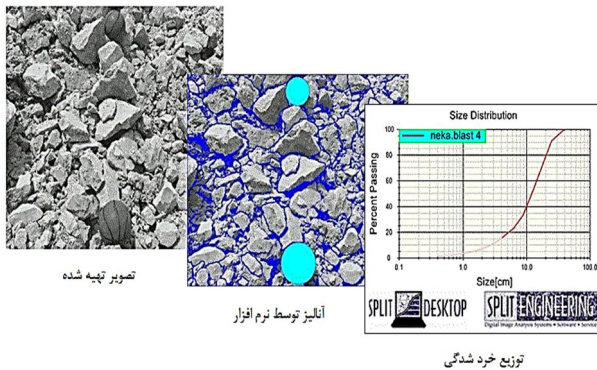
شکل ۱: موقعیت جغرافیایی معادن سنگ آهک مورد مطالعه

در راستای هدف این پژوهش و به منظور دستیابی به داده‌های واقعی، هزینه انفجار ۶ معدن سنگ آهک مربوط به بازه زمانی سال ۱۳۹۰ الی ۱۳۹۷ جمع‌آوری و داده‌ها بر

جدول ۲: پارامترهای ورودی، خروجی، محدودیت‌ها و مشخصات آماری آن‌ها

انحراف معیار	میانگین	کمینه	بیشینه	نماد	واحد	معیارها		پارامترها
						ورودی‌ها	خروجی‌ها	
۲۵۹۸/۴۸۸	۸۵۵۱/۳۰	۱۰۲۰	۱۲۴۰۰	AN	Kg	آنفو		
۱۲۲/۴	۳۴۸	۴۵	۶۵۰	Det	عدد	تعداد چاشنی		
۱۱۵/۴	۲۹۵/۴	۴۰	۶۰۰	EM	Kg	امولایت		
۱۳۶/۶	۲۷۱/۵	۲۹	۵۵۳	N	حلقه	تعداد چال		
۳/۲	۹/۵	۴	۲۰/۵	H	m	طول چال		
۸/۲	۸۳	۷۶	۱۰۰	D	mm	قطر چال		
۰/۵۳	۲/۳۶	۱/۷	۳/۵	B	m	بارسنگ		
۰/۶۱	۲/۸	۱/۹	۴	S	m	فاصله داری		
۰/۵۳	۱/۸۳	۰/۸۵	۲/۶	T	m	گل گذاری		
۰/۴۲	۰/۸۲	۰/۲	۱/۵	J	m	اضافه حفر چال		
۰/۰۴	۲/۶۶	۲/۶	۲/۷	Yr	ton/m ³	وزن مخصوص سنگ		
۰/۱۶	۳/۲۷	۳	۳/۵	HA	موس	سختی سنگ		
۴۹/۹	۶۰۰/۶	۵۳۰	۶۷۱	σc	Kg/cm ²	مقاومت فشاری تک محوری		
۷/۹۴	۳۶	۲۰	۴۷	Fr	cm	خردایش		
۱۹/۲	۹۶/۵	۶۰	۱۴۰	Fl	m	پرتاب سنگ		محدودیت‌ها
۱/۴	۳/۴	۱	۶	BB	m	عقب زدگی		
۳۹۹۵	۱۳۴۶۸	۷۱۵۷	۲۳۴۸۱	BC	ریال برتن	هزینه انفجار		خروجی

مرحله نخست مطابق جدول ۳ همبستگی بین متغیرهای ورودی توسط ضریب همبستگی پیرسون^۴ به دست آمد.



شکل ۲: نمونه مراحل کاربرد نرم افزار Split Desktop

از ۱۴۶ انفجار ثبت شده در ۶ معدن سنگ آهک ۸۰ درصد داده‌ها برای مدل‌سازی و ۲۰ درصد نیز به صورت تصادفی برای آزمایش مدل استفاده شد. با استفاده از نرم افزار SPSS 24 و روش Forward برای پیش‌بینی هزینه انفجار با در نظر گرفتن محدودیت‌های خردایش، پرتاب سنگ و عقب‌زدگی مدل‌های رگرسیون چندمتغیره خطی به صورت روابط ۱ الی ۴ ساخته شد:

از متر لیزری و دوربین نقشه‌برداری توتال استیشن برای اندازه‌گیری پرتاب سنگ، عقب‌زدگی و از روش آنالیز تصویری با استفاده از نرم‌افزار Split Desktop نسخه ۴ خردایش سنگ‌های ناشی از هر الگوی انفجاری در معدن اندازه‌گیری شد [۱۷].

در این روش تصویربرداری به صورت تصادفی و با در نظر گرفتن تنوع ابعادی و با استفاده از دو مقیاس در بالا و پایین کوبه انفجاری انجام شده است. سپس جهت تعیین خردایش واقعی (d80) تصاویر با استفاده از نرم‌افزار Split Desktop 4 مورد آنالیز قرار گرفت و منحنی توزیع ابعادی هر انفجار به صورت جداگانه به دست آمد.

شکل ۲ مراحل آنالیز تصویری را با استفاده از نرم‌افزار Split Desktop در یکی از معدن مورد مطالعه را نشان می‌دهد.

۴- ارائه مدل پیش‌بینی و بهینه‌سازی هزینه انفجار

۴-۱- مدل‌سازی با رگرسیون چندمتغیره

برای پیش‌بینی هزینه انفجار بر اساس داده‌های جمع‌آوری شده از ۶ معدن سنگ آهک به کمک رگرسیون چند متغیره در

جدول ۳: ماتریس ضرایب همبستگی پیرسون برای پارامترهای ورودی

متغیرها	AN	Det	EM	N	H	D	B	S	T	J	γ_r	HA	σ_c
AN	1												
Det	0/554	1											
EM	0/567	0/759	1										
N	0/34	0/845	0/699	1									
H	0/295	0/394	0/241	0/703	1								
D	0/206	0/473	0/34	0/681	0/675	1							
B	0/194	0/59	0/518	0/724	0/569	0/631	1						
S	0/254	0/598	0/526	0/711	0/535	0/514	0/964	1					
T	0/037	0/559	0/431	0/765	0/757	0/802	0/787	0/787	1				
J	0/031	0/35	0/105	0/542	0/579	0/47	0/745	0/745	0/769	1			
γ_r	0/424	0/423	0/704	0/294	0/061	0/014	0/197	0/217	0/074	0/398	1		
HA	0/376	0/581	0/785	0/579	0/254	0/249	0/544	0/574	0/47	0/107	0/842	1	
σ_c	0/194	0/494	0/723	0/51	0/27	0/319	0/384	0/391	0/377	0/114	0/848	0/945	1

$$BC = 22148.722 - 6624.528 S - 0.597AN + 217.96D - 1711.786T \quad (1)$$

$$Fr = -26.776 + 0.529 D + 4.901 S + 0.001AN \quad (2)$$

$$FL = 85.95 - 41.097T + 12.176S + 0.62 \quad (3)$$

$$BB = -2.912 + 0.000186AN - 2.465T + 0.086D + 0.756S \quad (4)$$

شاخص‌های آماری جذر متوسط مربعات خطا (RMSE) و ضریب تصمیم‌گیری (R^2) استفاده شده است [۱۲ و ۱۳].

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (O_i - T_i)^2} \quad (9)$$

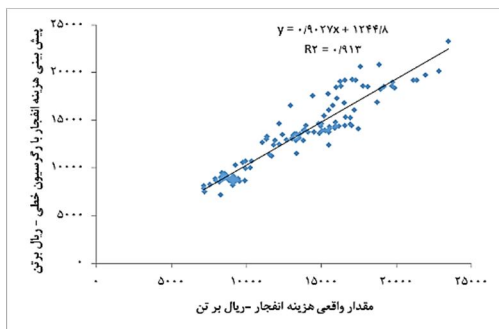
$$R^2 = 100 \left[\frac{\sum_{i=1}^n (T_i - \bar{T}_i) \times (O_i - \bar{O}_i)}{\sqrt{(\sum_{i=1}^n (T_i - \bar{T}_i)^2 \times \sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O}_i)^2)}} \right]^2 \quad (10)$$

که در آن O_i : آمین مقدار واقعی، T_i : آمین مقدار پیش‌بینی شده، \bar{O}_i میانگین مقدار واقعی و \bar{T}_i میانگین مقدار پیش‌بینی شده، و n تعداد سری داده است.

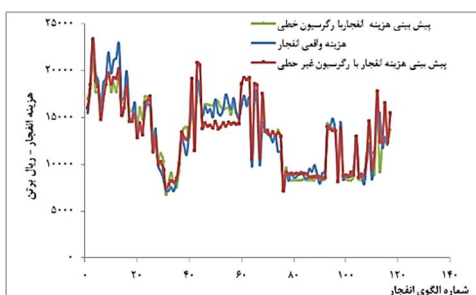
براساس داده‌های آموزش و آزمون، شاخص‌های ارزیابی عملکرد فوق برای مدل‌های پیشنهادی محاسبه شد که نتایج حاصله در جدول ۴ نشان داده شده است.

جدول ۴: شاخص‌های عملکرد مربوط به مدل‌های رگرسیون چند متغیره خطی و غیر خطی

مرحله آزمون مدل		مرحله آموزش مدل		مدل
جذر متوسط مربعات خطا	ضریب همبستگی	جذر متوسط مربعات خطا	ضریب همبستگی	
۱۱۶۱	۰/۸۵۵	۱۲۱۰	۰/۸۸۵	رگرسیون چند متغیره خطی
۱۰۹۸	۰/۹۳۱	۱۰۸۹	۰/۹۱۳	رگرسیون چند متغیره غیرخطی



شکل ۴: رابطه بین مقدار پیش‌بینی شده و اندازه‌گیری شده هزینه انفجار با رگرسیون چند متغیره غیرخطی



شکل ۵: مقایسه هزینه پیش‌بینی شده دو مدل با هزینه واقعی

علاوه بر مدل خطی، با این داده‌ها مدل‌های غیرخطی چند جمله‌ای، توانی، نمایی و لگاریتمی پردازش شدند و با توجه به R^2 بیشتر مدل لگاریتمی نسبت به سایر مدل‌های غیرخطی برای پیش‌بینی هزینه انفجار و سایر محدودیت‌ها به صورت روابط ۵ الی ۸ استفاده شدند.

$$BC = \frac{10^{5.648}}{S^{1.627} \times N^{0.28} \times H^{0.176}} \quad (5)$$

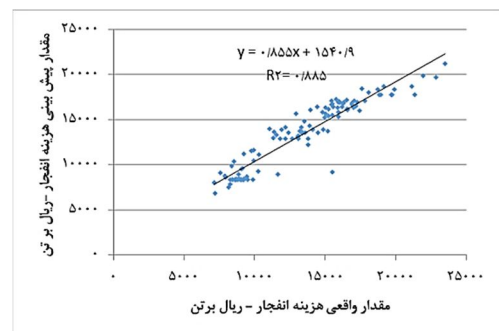
$$Fr = 10^{1.089} \times H^{0.313} \times S^{0.362} \quad (6)$$

$$FL = \frac{10^{2.262}}{H^{0.3}} \quad (7)$$

$$BB = \frac{10^{0.23}}{10^{0.056}} \quad (8)$$

مبنای ارزیابی عملکرد مدل‌ها در این تحقیق مقایسه نتایج حاصل با یکدیگر و با داده‌های واقعی است. بدین منظور، از

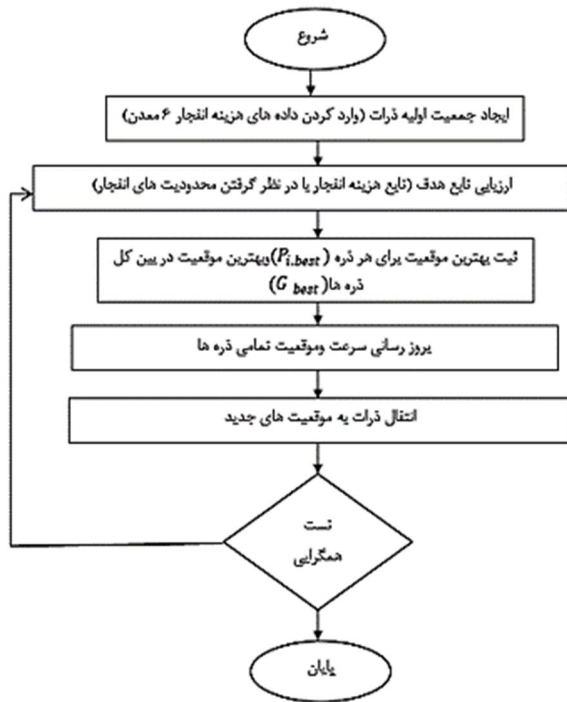
همچنین دقت نتایج حاصل از مدل‌های رگرسیون چند متغیره خطی و غیرخطی در مقایسه با مقادیر واقعی هزینه انفجار به ترتیب در شکل‌های ۳ و ۴ و میزان تطابق نتایج حاصل از دو مدل با داده‌های واقعی در شکل ۵ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود میزان تطابق مدل رگرسیون چند متغیره غیرخطی با داده‌های واقعی و دقت آن به‌طور قابل ملاحظه‌ای از مدل رگرسیون چند متغیره خطی بیشتر است.



شکل ۳: رابطه بین مقدار پیش‌بینی شده و اندازه‌گیری شده هزینه انفجار با رگرسیون چند متغیره خطی

۴-۲- بهینه‌سازی با الگوریتم فرا ابتکاری تراکم ذرات (PSO)

فرآیند بهینه‌سازی به وسیله الگوریتم PSO در شکل ۷ نشان داده شده است



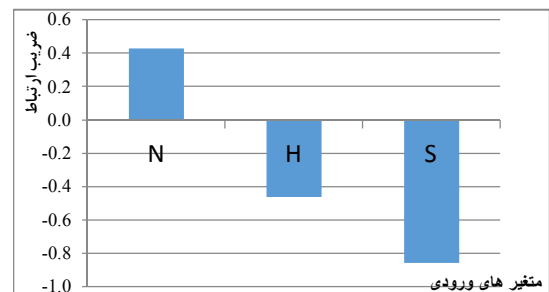
شکل ۷: فرآیند بهینه‌سازی با استفاده از الگوریتم PSO

پس از انجام دادن یک سری آنالیز، مناسب‌ترین پارامترهای الگوریتم PSO حاصل شد که در جدول ۵ نشان داده شده است.

یکی از اقدامات اساسی پس از مدل‌سازی، تعیین میزان حساسیت پارامتر خروجی نسبت به هر کدام از پارامترهای ورودی است به عبارتی با استفاده از روش تحلیل حساسیت^۵ که در این تحقیق از روش ضریب ارتباط (RF) بهره گرفته شد، می‌توان تأثیر نسبی پارامترهای ورودی را روی تابع هزینه انفجار با استفاده از مقادیر واقعی و مدل توسعه داده شده رگرسیون چند متغیره غیرخطی با استفاده از رابطه زیر تعیین کرد [۲۱ و ۲۰ و ۱۹ و ۱۸].

$$r(P_{k,i}, \mu) = \frac{\sum_{i=1}^n (P_{k,i} - \bar{P}_k) \times (\mu_i - \bar{\mu})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (P_{k,i} - \bar{P}_k)^2 \times \sum_{i=1}^n (\mu_i - \bar{\mu})^2}} \quad (11)$$

که در آن $P_{k,i}$: i امین مقدار مربوط به k امین پارامتر ورودی و \bar{P}_k مقدار متوسط مربوط به k امین پارامتر ورودی و μ_i : i امین مقدار برای پارامتر خروجی و $\bar{\mu}$ مقدار متوسط برای پارامتر خروجی و n تعداد متغیرهای ورودی است. نتایج حاصل از آنالیز حساسیت مدل رگرسیون چند متغیره غیرخطی با استفاده از رابطه ۱۱ در شکل ۶ نمایش داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود فاصله‌داری و تعداد چال به ترتیب بیشترین و کمترین تأثیر را بر تابع هدف (هزینه انفجار) دارند.



شکل ۶: آنالیز حساسیت هزینه انفجار نسبت به متغیرهای ورودی

جدول ۵: پارامترهای قابل کنترل الگوریتم PSO استفاده شده در این پژوهش

پارامتر	علامت	مقدار
بیشینه تعداد تکرار	MaxIt	۲۰۰
اندازه جمعیت (ذرات)	Npop	۱۴۶
تعداد متغیرهای تصمیم (ورودی)	Nvar	۳
وزن اینرسی	W	۱
نرخ تعدیل وزن اینرسی	Wdamp	۰/۹۹
درجه (ولوم) سرعت	Volum vel	۰/۰۳
ضریب یادگیری شخصی	C ₁	۲
ضریب یادگیری جمعی	C ₂	۲

۱۰۸۹ محاسبه شد که حکایت از برتری مدل رگرسیون چندمتغیره غیرخطی دارد. این در حالی است که در طول روند استخراج در این معادن میانگین هزینه انفجار، خریدار، پرتاب سنگ و عقب زدگی به ترتیب ۱۳۴۶۸ ریال بر تن، ۳۶ سانتی متر، ۹۷ متر و ۳ متر است. در ۱۴۶ الگوی انفجاری این پژوهش پایین ترین هزینه انفجار ۷۱۵۷ ریال بر تن با خریدار ۴۰ سانتی متر، پرتاب سنگ ۱۱۰ متر و عقب زدگی ۵ متر می باشد. مقایسه بین مقادیر به دست آمده از روش رگرسیون چند متغیره غیرخطی - الگوریتم تراکم ذرات (NLR - PSO) و میانگین مقادیر داده ها با کمینه داده ها در جدول ۷ نشان داده شده است.

جدول ۶: پارامترهای الگوی بهینه سازی شده با استفاده از

الگوریتم PSO

مقدار بهینه	واحد	پارامتر	نوع
۳/۶	m	S	الگوی
۴۶۲	حلقه	N	پیشنهادی
۱۳	m	H	
۴۴	cm	Fr	
۸۴/۵	m	FL	محدودیت ها
۳/۶	m	BB	
۶۲۳۵	Rial/TON	BC	هزینه انفجار

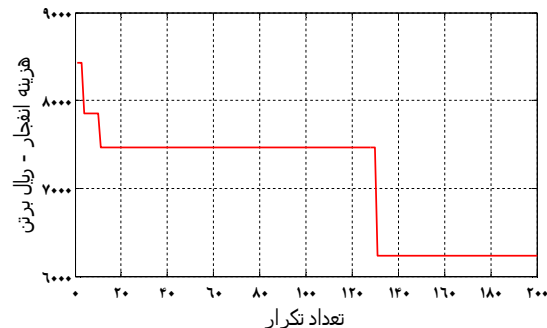
جدول ۷: مقایسه بین مقادیر به دست آمده از روش رگرسیون چند متغیره غیرخطی - الگوریتم تراکم ذرات (NLR-PSO)

با میانگین و کمینه مقادیر واقعی

مدل	BC		Fr		FL		BB	
	مقدار (تن/ریال)	تفاوت با کمینه داده ها (%)	اندازه (سانتی متر)	تفاوت با کمینه داده ها (%)	اندازه (متر)	تفاوت با کمینه داده ها (%)	اندازه (متر)	تفاوت با کمینه داده ها (%)
NLR-PSO	۶۲۳۵	- ۱۲/۹	۴۴	+ ۱۰	۸۴/۵	- ۲۳/۲	۳/۶	- ۲۸
میانگین داده ها	۱۳۴۶۸	+ ۸۸/۲	۳۶	- ۱۰	۹۷	- ۱۱/۸	۳/۴	- ۳۲
کمینه داده ها	۷۱۵۷	۰	۴۰	۰	۱۱۰	۰	۵	۰

سنگ از ۱۱۰ به ۸۴/۵ متر که از مهم ترین پیامدهای نامطلوب ناشی از انفجار هستند از نقاط قوت این پژوهش به شمار می روند. در نهایت با مقایسه نتایج به دست آمده برای BB, FL, Fr, BC در جدول ۷ از رضایت بخش بودن نتیجه حاصل از مدل NLR-PSO حکایت دارد.

شکل ۸ کمترین مقدار به دست آمده برای تابع هزینه انفجار از آغاز اجرای برنامه تا شماره تکرار درج شده بر روی محور افقی را نشان می دهد.



شکل ۸: کمترین مقدار به دست آمده برای تابع هزینه انفجار حاصل از رگرسیون چند متغیره خطی بعد از ۲۰۰ تکرار

پارامترهای الگوی انفجار با استفاده از روش بهینه سازی PSO در جدول ۶ پیشنهاد شده است. همان گونه که ملاحظه می شود بهترین مقدار به دست آمده برای هزینه انفجار ۶۲۳۵ ریال بر تن است.

۵- بحث و بررسی

چنان که در شکل های ۳ و ۴ مشخص است، برای مدل رگرسیون چندمتغیره خطی و غیرخطی مقدار R^2 به ترتیب برابر ۰/۸۸۵ و ۰/۹۱۳ بدست آمد. در همین حال مطابق جدول ۴ مقادیر RMSE نیز برای دو مدل به ترتیب ۱۲۱۰

مطابق جداول ۷ و ۸، براساس بهینه سازی انجام شده با PSO الگوی پیشنهادی با این الگوریتم، کاهش ۱۲/۹ درصدی هزینه انفجار را از ۷۱۵۷ به ۶۲۳۵ ریال بر تن نشان می دهد. افزایش سائز خریدار حاصل از انفجار از ۴۰ به ۴۴ سانتی متر با توجه به وجود سنگ شکن های فکی در کارخانه های فراوری برای روند تولید مشکل ساز نیست. کاهش ۲۸ درصدی عقب زدگی از ۵ به ۳/۶ متر و کاهش ۲۳/۲ درصدی پرتاب

۶- نتیجه گیری

در این تحقیق پس از جمع‌آوری داده‌ها و تعیین پارامترهای ورودی و محدودیت‌های انفجار از مدل‌های رگرسیون چندمتغیری خطی و غیرخطی برای پیش‌بینی هزینه انفجار استفاده شد. در مدل ارائه شده با رگرسیون چندمتغیره غیرخطی در مقایسه با خطی، ضریب تصمیم‌گیری بیشتر و جذر متوسط مربعات خطا کمتری مشاهده شد و مقایسه نتایج حاصل از مدل رگرسیون چند متغیره غیرخطی با مدل رگرسیون چند متغیره خطی براساس داده‌های واقعی نشان داد که مدل غیرخطی تطابق بهتری نسبت به مدل خطی با هزینه‌های واقعی انفجار دارد.

براساس آنالیز حساسیت صورت گرفته با استفاده از روش RF بر روی مدل هزینه انفجار به روش رگرسیون چندمتغیره غیرخطی نشان داد که فاصله داری و تعداد چال به ترتیب بیشترین و کمترین تأثیر را بر تابع هدف دارند.

در این پژوهش از الگوریتم فرا ابتکاری PSO برای بهینه‌سازی هزینه انفجار با در نظر گرفتن محدودیت خردایش، پرتاب سنگ و عقب‌زدگی استفاده شد. با مقایسه نتایج به دست آمده برای هزینه انفجار، خردایش، پرتاب سنگ و عقب‌زدگی با استفاده از مدل NLR-PSO و مقادیر به دست آمده حاصل از آزمایش‌های صورت گرفته نشان از مناسب بودن این مدل در پیش‌بینی و بهینه‌سازی هزینه انفجار دارد. در تحقیقات بعدی پیشنهاد می‌شود از مدل‌ها و الگوریتم‌های فرا ابتکاری دیگر در سایر مواد معدنی استفاده و نتایج مقایسه شود.

پی‌نوشت‌ها

1. Partical swarm optimization
2. James kennedy
3. Russel C. Eberhart
4. Pearson correlation coefficient
5. Sensitivity Analysis
6. Relevancy Factor

منابع:

- [4] Kanchibotla, S.S; 2003; "Optimum Blasting? It is minimum cost per broken rock or maximum value per broken rock?", Fragblast: International journal for blasting and Fragmentation, vol.7, pp: 35-48.
- [5] Rajpot, M.A; 2009; "The Effect of Fragmentation specification on blasting cost", A these submitted to the Department of mining Engineering in conformity with the requirements for the degree of master science (Engineering), Queen's university Kingston, Ontario, Canada.
- [6] Usman, T; Muhammad, Kh; 2013; "Modeling of blasting cost at Deewan Cement Quarry", Hattar using Multivariate Regression, J. Engg. And Appl. Sci, Vol. 32, No. 1.
- [7] Anon; 2014; "Reducing the cost of Drill and Blast through Blast Design optimization".
- [8] Afum, B.O; Temeng, V.A; 2015; "Reducing drill and cost through blast optimization – A case study", Ghana mining journal, Vol. 15. No. 2, pp: 50-57.
- [9] Adebayo, B; Mutandwa, B; 2015; "Correlation of Blast-hole Deviation and Area of Block eith Fragment size and Fragmentation cost", International Research journal of Engineering and Technology (IRJET). Vol. 2. Pp: 402-406.
- [10] Ghanizadeh zarghami, A; et al; 2018; "A model to calculate blasting costs using hole diameter, uniaxial compressive strength", and joint set orientation, The journal of the Southem African Institute of mining and Metallurgy, Vol. 118, pp: 869-877.
- [11] Miranda, V; et al; 2019; "A Numerical Approach Blast Pattern Expansion", O-Pitblast Lda, Porto, Portugal.
- [12] Majidi, A; Rezaei M; 2013; "Prediction of unconfined compressive strength of rock surrounding a roadway using artificial neural network", journal of neural computing and Application, no. 23(2), pp: 381-389.
- [13] Rezaei, M; et al; 2014; "An intelligent approach to predict unconfined compressive strength of rock surrounding access tunnels in Long wall coal mining", Neural computing and application, no. 24(1), pp:233-241.
- [14] Eberhart, R.C; Kennedy J; "A new optimizer using particle swarm theory", proceeding of the sixth international symposium on micro machine and Human science, Nagoya, Japan, piscataway, NJ: IEEE Service, pp: 39-43.
- [15] Kennedy, J; Eberhart, R.C; 1995; "Particle Swarm Optimization", Proceeding of the IEEE International conference on neural networks, Vol. 4, pp: 1942-1948.
- [16] Iranian Mining Engineering Organization; 2019; "http://www.ime.org.ir/Mines".
- [17] Split Engineering LLC Team; 2010; "Split-Desktop", Version3.0, http://www.spliting.com/company, asp.
- [18] Guangying, C; et al; 2014; "The genetic algorithm based back propagation neural network for MMP
- [1] Singh ,TN; Singh ,V; 2005; "An intelligent approach to prediction and control ground vibration in mines", Geotechnical & Geological Engineering, no. 23(3), PP: 249-262.
- [2] Jimeno,CL; et al; 1995; " Drilling and blasting of rocks, Rotterdam", A.A. Balkema.
- [3] Eloranta, J.w; 1995; "The effect of fragmentation on Downstream processing costs", Proceedings of Explo 95 conference, Brisbane, old Australia, PP: 25-28.

prediction in CO₂ – EOR process”, Fuel, no. 126, pp: 202-212.

[19] Saltelli, A; et al; 2008; “*Global sensitivity Analysis: the primer. John wiley & sons*”.

[20] Sebastian, HM; et al; 1985; “*Correlation of minimum miscibility pressure for impure CO₂ streams*”, J pet Technol, no. 37, pp: 2076-2082.

[21] Yuan, H; et al; 2005; “*Improved MMP Correlations for CO₂ floods using analytical gas flooding theory*”, SPE Reserve Eval Eng no. 8, pp: 418-425.

Optimization of blasting cost in lime stone mines using nonlinear multivariate regression and PSO metaheuristic algorithm

Bastami Reza¹, Aghajani bazzazi Abbas^{2*}, Hamidian shormasti Hadi³, Ahangari Kaveh⁴

1- Ph.D. student of mining engineering, Mining group, Islamic Azad University Science and Research Branch, Tehran, Iran, Bastami870@Gmail.com.

2- Assistant Professor of Mining Engineering, University of Kashan, Iran, a.aghajani.bazzazi @gmail.com.

3- Assistant Professor of Mining Engineering, Islamic Azad University, Qaem Shahr Branch, Iran, hhamidian@yahoo.com.

4- Associate Professor of Mining Engineering, Islamic Azad University Science and Research Branch, Tehran, Iran, kaveh.ahangari@gmail.com.

Abstract

The prediction and optimization of blasting cost to achieve optimal fragmentation is significant, considering the control of the adverse consequences of the blast. In this study, by collecting blasting data in six limestone mines in Iran, a model was developed to predict the cost of blast using nonlinear multivariate regression. Compared to linear regression model, this model has a higher correlation coefficient (0.913) and root mean square error (1089 Rials per ton) and in comparison with the linear model, the nonlinear model shows a better match with the actual cost of the blast. Based on sensitivity analysis, spacing and number of holes had the highest and the least effect on the cost model of the blast, respectively. In addition, in this study along with achieving the blast cost function, the restrictive functions of the blast include fragmentation, fly rock and back break was modeled using nonlinear multivariate regression method, and these functions as inputs in the metaheuristic algorithm of Particles Swarm Optimization (PSO) were used to optimize the cost of blast. Using this method of spacing, the number and length of holes as design parameters of blast are 3.6 meters, 462 loops, and 13 meters respectively and fragmentation fly rock and back break as blasting limitations are 44 cm, 84.5 meters and 3.6 meters and blasting cost was 6235 Rials per ton, which results in a 12.9 percent reduction in the cost of blast and optimal control of the adverse consequences of the blast.

Keywords

Blasting cost, Limestone mines, nonlinear multivariate regression, Particles swarm Optimization algorithm, Optimization

* Correspondent responsible