

## بهینه‌سازی هزینه انفجار در معادن سنگ آهک با الگوریتم PSO

رضا بستامی<sup>۱</sup>، عباس آقاجانی بزازی<sup>۲\*</sup>، هادی حمیدیان شورمستی<sup>۳</sup>، کاوه آهنگری<sup>۴</sup>

<sup>۱</sup> دانشجوی دکتری مهندسی معدن، گروه مهندسی معدن، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات، تهران، ایران، Bastami870@gmail.com

<sup>۲</sup> استادیار گروه مهندسی معدن، دانشکده مهندسی، دانشگاه کاشان، کاشان، ایران، a\_aghajani\_bazzazi@kashanu.ac.ir

<sup>۳</sup> استادیار گروه مهندسی معدن، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد قائم‌شهر، قائم‌شهر ایران، hhamidian@Qaemiau.ac.ir

<sup>۴</sup> دانشیار گروه مهندسی معدن، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات، تهران، ایران، ahangari@srbiau.ac.ir

(دریافت: ۲۵ اردیبهشت ۱۳۹۸ - پذیرش: ۳۱ شهریور ۱۳۹۸)

### چکیده

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

### کلمات کلیدی

هزینه آتشباری، معادن سنگ آهک، رگرسیون چند متغیره غیرخطی، الگوریتم بهینه‌سازی تراکم ذرات، بهینه‌سازی.

\* نویسنده مسئول مکاتبات.

## ۱- مقدمه

هدف اولیه آتشیاری، 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 عقب‌زدگی هدر می‌رود [۱]. بررسی محاسبه هزینه آتشیاری بدون در نظر گرفتن پیامدهای نامطلوب ناشی از آن بی‌معنی و غیراصولی خواهد بود. با توجه به اهمیت و تاثیر به سزای آتشیاری در هزینه استخراج مواد معدنی ضرورت ارایه مدلی برای پیش‌بینی هزینه آتشیاری احساس می‌شود، بنابراین محاسبه هزینه بهینه آتشیاری برای دستیابی به خردشدگی مطلوب با رعایت محدودیت‌های آتشیاری یک مساله اساسی در معدن به شمار می‌رود.

مهم‌ترین مطالعاتی که توسط محققان در زمینه هزینه آتشیاری و موارد مرتبط با آن انجام شده است، در ادامه بررسی شده است. نیلسن در سال ۱۹۸۳ در پژوهشی تاثیر خرج ویژه بهینه را در هزینه عملیات استخراج معدن روباز سنگ آهن سیدارگر نورژ با ملاحظه زیرسیستم‌های مختلف استخراج بررسی کرد و یک مدل کامپیوتری در زمینه هزینه عملیات چالزنی و آتشیاری، بارگیری، باربری و سنگ‌شکنی ارایه داد [۲]. جیمنو و همکاران در سال ۱۹۹۵ معادله پایه‌ای را برای محاسبه هزینه هر متر حفاری بر اساس هزینه‌های مستقیم و غیرمستقیم ارایه کردند. هزینه‌های مستقیم شامل تعمیر و نگهداری، پرسنلی، انرژی، گریس، روغن، راد، سر مته و نظایر آن و هزینه‌های غیرمستقیم استهلاک، بیمه، مالیات و نظایر آن را شامل می‌شود [۳]. الوارنتا در سال ۱۹۹۵ ارتباط بین هزینه حمل مواد معدنی و فرآوری با هزینه آتشیاری بر اساس خرج ویژه و میزان خردشدگی سنگ را به دست آورد [۴]. کانچیوتلا در سال ۲۰۰۳ در مقاله‌ای با عنوان «انفجار بهینه؟ حداقل هزینه و یا حداکثر ارزش هر تن سنگ شکسته» حداکثر سوددهی، هزینه‌ها و آتشیاری بهینه در یک معدن طلا و یک معدن زغال روباز بر مبنای مدل‌های شبیه‌سازی کامپیوتری و مطالعات میدانی را مورد مطالعه قرار داد [۵]. راجپوت در سال ۲۰۰۹ در پژوهشی اثرات ویژگی‌های خردایش را روی هزینه آتشیاری بررسی کرد و یک مدل برای بررسی تاثیر قطر چال بر روی الزامات آتشیاری برای رسیدن به خردایش  $d_{80}$  و محاسبه پارامترهای طراحی آتشیاری برای دانه‌بندی ۷۵ تا ۳۵۰ میلی‌متر ارایه کرد [۶]. 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 به صورت مدلی برای پیش‌بینی هزینه آتشیاری استفاده شد [۷]. آفوم و تمنج در سال ۲۰۱۵ در مقاله‌ای کاهش هزینه‌های عملیات چالزنی و آتشیاری در یک معدن طلای روباز در کشور غنا را در سه کاواک از طریق بهینه‌سازی آتشیاری و استفاده از مدل کوز-رام مورد مطالعه قرار دادند و در نهایت خردایش متوسط ۲۵ تا ۵۶ سانتی‌متر را به دست 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 تا ۳۱۱ میلی‌متر استفاده کردند و نتایج نشان داد که با افزایش انحراف چال اندازه متوسط قطعه سنگ کاهش یافته و از طرف دیگر هزینه چالزنی و آتشیاری افزایش می‌یابد [۹]. جکسون در سال ۲۰۱۵ در پژوهشی در یک معدن زغال‌سنگ به بهینه‌سازی هزینه نهایی آتشیاری پرداخت و پس از گردآوری اطلاعات و مقایسه با نمونه‌های قبلی یک طرح جامع برای عملیات آتشیاری پایه‌ریزی کرد [۱۰]. غنی‌زاده و همکاران در سال ۲۰۱۸ در پژوهشی با جمع‌آوری داده‌های سه معدن مس در ایران به صورت یک تابعی از قطر چال، ارتفاع پله، مقاومت فشاری تک محوری و جهت دسته درزه محاسبه هزینه آتشیاری را بر حسب متر مکعب به صورت یک مدل خطی، با استفاده از نرم‌افزار کامفار و روش‌های آماری ارایه دادند [۱۱]. میراندا و همکاران در سال ۲۰۱۹ در پژوهشی از روش‌های عددی برای یافتن کمینه هزینه آتشیاری در مقایسه با روش‌های سنتی و تجربی استفاده کردند. این مدل روی توسعه الگوی آتشیاری با اصلاح خودکار بارسنگ، فاصله ردیفی، گل‌گذاری، اضافه حفاری و تعداد چال برای تضمین تقاضای تولید از لحاظ حجم آتشیاری پایه‌ریزی شده است [۱۲].

اغلب این مطالعات در مورد محاسبه هزینه حفاری، ارتباط هزینه آتشیاری با هزینه حمل مواد معدنی، تاثیر ویژگی‌های خردایش بر روی هزینه آتشیاری، کاهش هزینه چالزنی و آتشیاری و ارایه مدل هزینه آتشیاری در یک معدن خاص و پیامدهای نامطلوب ناشی از آتشیاری انجام شده است. با مرور پژوهش‌های انجام شده و تا جایی که نویسندگان می‌دانند هیچ مطالعه‌ای برای پیش‌بینی و بهینه‌سازی هزینه آتشیاری در معادن سنگ آهک انجام نشده است، از این‌رو ضرورت ارایه مدلی برای این هدف احساس می‌شود. در این تحقیق از رگرسیون چند متغیره غیرخطی برای پیش‌بینی هزینه آتشیاری در معادن سنگ آهک استفاده و نتایج حاصل با

جیمز کندی<sup>۲</sup> روانشناس اجتماعی و راسل سی ابرهارت<sup>۳</sup> مهندس برق ابداع شد. این الگوریتم یک روش بهینه‌سازی تصادفی و مبتنی بر اساس همکاری اجتماعی، رقابت گروهی و بهبود اعضای جمعیت عمل می‌کند [۱۵-۱۸]

### ۳- پایگاه داده‌ها

برای مدل‌سازی و اعتبارسنجی 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 نشان داده شده است.

در راستای هدف این پژوهش و برای دست‌یابی به داده‌های واقعی، هزینه آتشیاری ۶ معدن سنگ آهک مربوط به بازه زمانی سال ۱۳۹۰ تا آبان ماه سال ۱۳۹۷ جمع‌آوری و داده‌ها بر مبنای قیمت مواد منفجره و هزینه‌های دی ماه سال ۹۷ به روز رسانی شد و مبنای پژوهش قرار گرفت.

بر اساس این داده‌ها به طور میانگین هزینه خرید مواد منفجره ۶۲/۹ درصد، هزینه حمل، اسکورت، پرسنلی، نظارت بر مصرف و کانتین ۱۶/۸ درصد، دستمزد شرکت آتشیاری ۸/۵ درصد و هزینه خردایش ثانویه و پیامدهای نامطلوب ناشی از آتشیاری 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 ۱۴۶ الگوی آتشیاری 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.

داده‌های واقعی جمع‌آوری شده از ۶ معدن سنگ آهک در ایران و همچنین رگرسیون چندمتغیره خطی مقایسه شده است و با بهره گرفتن از الگوریتم بهینه‌سازی تراکم ذرات<sup>۱</sup> 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 آتشیاری و پارامترهای بهینه طراحی به دست 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 برای ارایه مدلی برای پیش‌بینی هزینه آتشیاری، همچنین محدودیت‌های آتشیاری از جمله خردایش، پرتاب سنگ و عقب‌زدگی استفاده شده است. سپس با وارد کردن مدل هزینه آتشیاری به عنوان تابع هدف و توابع خردایش، پرتاب سنگ و عقب‌زدگی به عنوان محدودیت‌های آتشیاری، با استفاده از الگوریتم تراکم ذرات (PSO) که یکی از کارآمدترین روش‌های فرا ابتکاری است بهینه‌سازی انجام 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 به دست آورد [۱۳ و ۱۴]. پس از جمع‌آوری داده‌های خام برای تجزیه و تحلیل آن‌ها از آمار توصیفی برای تنظیم داده‌ها و از آمار استنباطی (ضریب همبستگی و رگرسیون چند متغیره) برای پیش‌بینی هزینه آتشیاری 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

جدول ۱- مشخصات معادن سنگ آهک مورد مطالعه

ردیف	نام معدن	ذخیره قطعی (هزار تن)	ظرفیت استخراج سالانه (هزار تن)	مختصات جغرافیایی (WGS 84)		
				نزدیک‌ترین شهر	عرض جغرافیایی	طول جغرافیایی
۱	آبلو	۸۹۳۴۰	۴۰۰۰	نکا مازندران	۳۶° ۳۸' ۵"	۵۳° ۲۱' ۳"
۲	تجره	۴۳۰۰	۱۵۰	خرم‌آباد	۳۳° ۳۰' ۵"	۴۸° ۲۹' ۴۴"
۳	مسلم‌آباد	۷۰۰۰	۳۰۰	همدان	۳۴° ۳۹' ۳۷"	۴۸° ۵۴' ۲۲"
۴	تنگ فنی	۹۰۰	۱۰۰	پلدختر	۳۳° ۱' ۲۴"	۴۷° ۴۶' ۴۳"
۵	سیمان سپاهان	۱۳۵۰۰	۶۰۰	اصفهان	۳۲° ۲۶' ۲۸/۳۷"	۵۱° ۲۸' ۴/۶۳"
۶	برخوردار ۱	۱۶۰۰	۱۶۰	نورآباد	۳۴° ۳' ۸"	۴۸° ۱۲' ۵۳" James Kennedy

<sup>۲</sup>- Russel C. Eberhart

<sup>۱</sup>- Partical swarm optimization (PSO)

جدول ۲- پارامترهای ورودی، خروجی، محدودیت‌ها و مشخصات آماری آن‌ها.

پارامترها		معیارها				
انحراف معیار	میانگین	کمینه	بیشینه	نماد	واحد	
۲۵۹۸,۴۸۸	۸۵۵۱,۳۰	۱۰۲۰	۱۲۴۰۰	AN	کیلوگرم	آنفو
۱۲۲,۴	۳۴۸	۴۵	۶۵۰	Det	عدد	تعداد چاشنی الکتریکی
۱۱۵,۴	۲۹۵,۴	۴۰	۶۰۰	EM	کیلوگرم	امولایت
۱۳۶,۶	۲۷۱,۵	۲۹	۵۵۳	N	حلقه	تعداد چال
۳,۲	۹,۵	۴	۲۰,۵	H	متر	طول چال
۸,۲	۸۳	۷۶	۱۰۰	D	میلی‌متر	قطر چال
۰,۵۳	۲,۳۶	۱,۷	۳,۵	B	متر	بارسنگ
۰,۶۱	۲,۸	۱,۹	۴	S	متر	فاصله‌داری
۰,۵۳	۱,۸۳	۰,۸۵	۳,۶	T	متر	گل‌گذاری
۰,۴۲	۰,۸۲	۰,۲	۱,۵	J	متر	اضافه حفر چال
۰,۰۴	۲,۶۶	۲,۶	۲,۷	$\gamma_r$	تن بر متر مکعب	وزن مخصوص سنگ
۰,۱۶	۳,۲۷	۳	۳,۵	HA	موس	سختی سنگ
۴۹,۹	۶۰۰,۶	۵۳۰	۶۷۱	$\sigma_c$	کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع	مقاومت فشاری تک محوری
۷,۹۴	۳۶	۲۰	۴۷	Fr	سانتی‌متر	خردایش (متوسط دانه‌بندی)
۱۹,۲	۹۶,۵	۶۰	۱۴۰	Fl	متر	پرتاب سنگ
۱,۴	۳,۴	۱	۶	BB	متر	عقب‌زدگی
۳۹۹۵	۱۳۴۶۸	۷۱۵۷	۲۳۴۸۱	BC	ریال بر تن	هزینه آتشیاری

می‌دهد.

#### ۴- ارزیابی مدل پیش‌بینی و بهینه‌سازی هزینه آتشیاری

##### ۴-۱- مدل‌سازی با رگرسیون چند متغیره

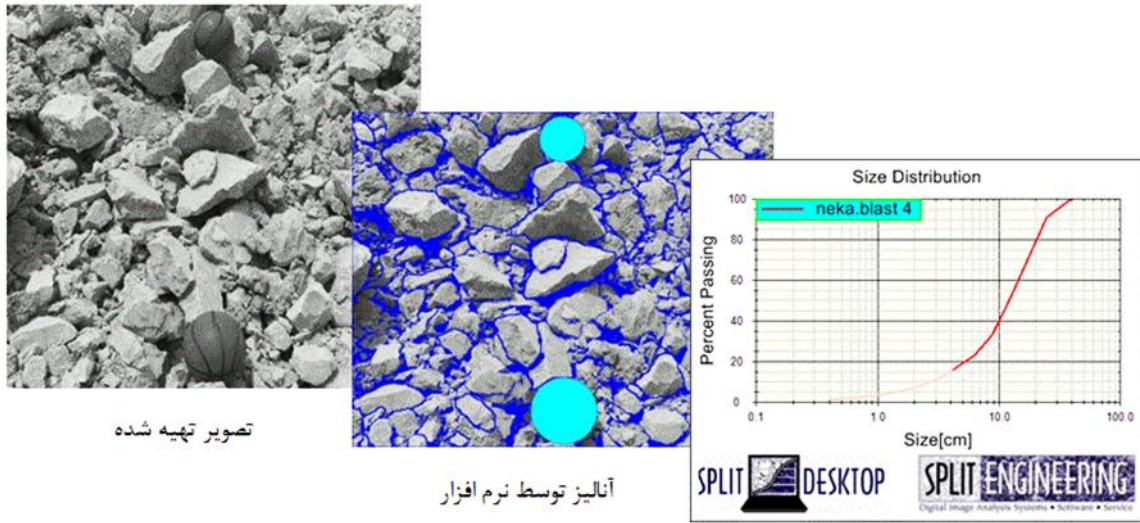
برای پیش‌بینی هزینه آتشیاری بر اساس داده‌های جمع‌آوری شده از ۶ معدن سنگ آهک به کمک رگرسیون چند متغیره در مرحله نخست مطابق جدول ۳ همبستگی بین متغیرهای ورودی با ضریب همبستگی پیرسون<sup>۱</sup> به‌دست آمد.

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 نرم‌افزار SPSS 24 و روش Forward برای پیش‌بینی هزینه آتشیاری با در نظر گرفتن محدودیت‌های خردایش، پرتاب سنگ و عقب‌زدگی مدل‌های رگرسیون چند متغیره خطی به صورت روابط ۱ تا ۴ ساخته شد.

از متر لیزری و دوربین نقشه‌برداری توتال استیشن به ترتیب برای اندازه‌گیری عقب‌زدگی، پرتاب سنگ و همچنین از روش آنالیز تصویری با استفاده از نرم‌افزار Split Desktop نسخه ۴ خردایش سنگ‌های ناشی از هر الگوی انفجاری در معادن اندازه‌گیری شد [۱۹].

در این روش تصویربرداری با استفاده از دوربین عکاسی به صورت تصادفی و با در نظر گرفتن تنوع ابعادی و با استفاده از دو مقیاس در بالا و پایین کوپه انفجاری انجام شده است. عکس‌ها در سه سایز بزرگ، متوسط و کوچک به طور جداگانه برداشت شدند. برای برطرف کردن خطاهای احتمالی و قابل اعتمادتر بودن نتایج حاصل از آنالیز تصویری در هر آتشیاری از معادن مورد مطالعه به طور متوسط ۱۲ تا ۲۴ عکس مورد آنالیز قرار گرفت. سپس برای تعیین خردایش واقعی ( $d_{80}$ ) تصاویر با استفاده از نرم‌افزار Split Desktop 4 مورد آنالیز قرار گرفت و منحنی توزیع ابعادی هر آتشیاری به صورت جداگانه به دست آمد. در نهایت نتایج حاصل از آنالیز تمامی عکس‌ها در نرم‌افزار با هم ترکیب شدند. شکل ۱ مراحل آنالیز تصویری با استفاده از نرم‌افزار Split Desktop در یکی از معادن مورد مطالعه را نشان

<sup>۱</sup>- Pearson correlation coefficient



توزیع خرد شدگی

شکل ۱- نمونه مراحل کاربرد نرم‌افزار Split Desktop.

جدول ۳- ماتریس ضرایب همبستگی پیرسون برای پارامترهای ورودی.

متغیرها	AN	Det	EM	N	H	D	B	S	T	J	$\gamma_r$	HA	$\sigma_c$
AN	۱												
Det	۰٫۵۵۴	۱											
EM	۰٫۵۶۷	۰٫۷۵۹	۱										
N	۰٫۳۴	۰٫۸۴۵	۰٫۶۹۹	۱									
H	۰٫۲۹۵	-۰٫۳۹۴	-۰٫۲۴۱	۰٫۷۰۳	۱								
D	۰٫۲۰۶	-۰٫۴۷۳	-۰٫۳۴	-۰٫۶۸۱	۰٫۶۷۵	۱							
B	-۰٫۱۹۴	-۰٫۵۹	-۰٫۵۱۸	-۰٫۷۲۴	۰٫۵۶۹	۰٫۶۳۱	۱						
S	-۰٫۲۵۴	-۰٫۵۹۸	-۰٫۵۲۶	-۰٫۷۱۱	۰٫۵۳۵	۰٫۵۱۴	۰٫۹۶۴	۱					
T	-۰٫۰۳۷	-۰٫۵۵۹	-۰٫۴۳۱	-۰٫۷۶۵	۰٫۷۵۷	۰٫۶۴۷	۰٫۸۰۲	۰٫۷۸۷	۱				
J	-۰٫۰۳۱	-۰٫۳۵	-۰٫۱۰۵	-۰٫۵۴۲	۰٫۵۷۹	۰٫۴۷	۰٫۷۴۷	۰٫۷۴۵	۰٫۷۶۹	۱			
$\gamma$	۰٫۴۲۴	۰٫۴۲۳	۰٫۷۰۴	۰٫۲۹۴	۰٫۰۶۱	-۰٫۰۱۴	-۰٫۱۹۷	-۰٫۲۱۷	-۰٫۰۷۴	۰٫۳۹۸	۱		
HA	۰٫۳۷۶	۰٫۵۸۱	۰٫۷۸۵	۰٫۵۷۹	-۰٫۲۵۴	-۰٫۲۴۹	-۰٫۵۴۴	-۰٫۵۷۴	-۰٫۴۷	-۰٫۰۷	۰٫۸۴۲	۱	
$\sigma_c$	۰٫۱۹۴	۰٫۴۹۴	۰٫۷۲۳	۰٫۵۱	-۰٫۲۷	-۰٫۳۱۹	-۰٫۳۸۴	-۰٫۳۹۱	-۰٫۳۷۷	۰٫۱۱۴	۰٫۸۴۸	۰٫۹۴۵	۱

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

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

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

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

$\bar{T}_i$  میانگین مقدار پیش‌بینی شده  
 $n$  تعداد سری داده

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

جدول ۴- شاخص‌های عملکرد مربوط به مدل‌های رگرسیون چند متغیره خطی و غیرخطی.

مدل	مرحله آموزش مدل		مرحله آزمون مدل	
	هسته‌بندی رتبه متوسط	هسته‌بندی رتبه متوسط	هسته‌بندی رتبه متوسط	هسته‌بندی رتبه متوسط
رگرسیون چند متغیره خطی	۰٫۸۸۵	۱۲۱۰	۰٫۸۵۵	۱۱۶۱
رگرسیون چند متغیره غیرخطی	۰٫۹۱۳	۱۰۸۹	۰٫۹۳۱	۱۰۹۸

هم‌چنین دقت نتایج حاصل از مدل‌های رگرسیون چندمتغیره خطی و غیرخطی در مقایسه با مقادیر واقعی هزینه آتشیاری به ترتیب در شکل‌های ۲ و ۳ و میزان تطابق نتایج حاصل از دو مدل با داده‌های واقعی در شکل ۴ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود میزان تطابق مدل رگرسیون چند متغیره غیرخطی با داده‌های واقعی و دقت آن به طور قابل ملاحظه‌ای از مدل رگرسیون چندمتغیره خطی بیشتر است.

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 آتشیاری و سایر محدودیت‌ها به صورت روابط ۵ تا ۸ استفاده شد.

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

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

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

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

مبنای ارزیابی عملکرد مدل‌ها در این تحقیق مقایسه نتایج حاصل با یکدیگر و با داده‌های واقعی است [۱۳ و ۱۴]. بدین منظور، از شاخص‌های آماری جذر متوسط مربعات خطا (RMSE) و ضریب همبستگی ( $R^2$ ) استفاده شده است.

$$R^2 = 100 \left( \frac{\sum_{i=1}^n (T_i - \bar{T}_i) \times (O_i - \bar{O}_i)}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (T_i - \bar{T}_i)^2 \times \sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O}_i)^2}} \right)^2 \quad (9)$$

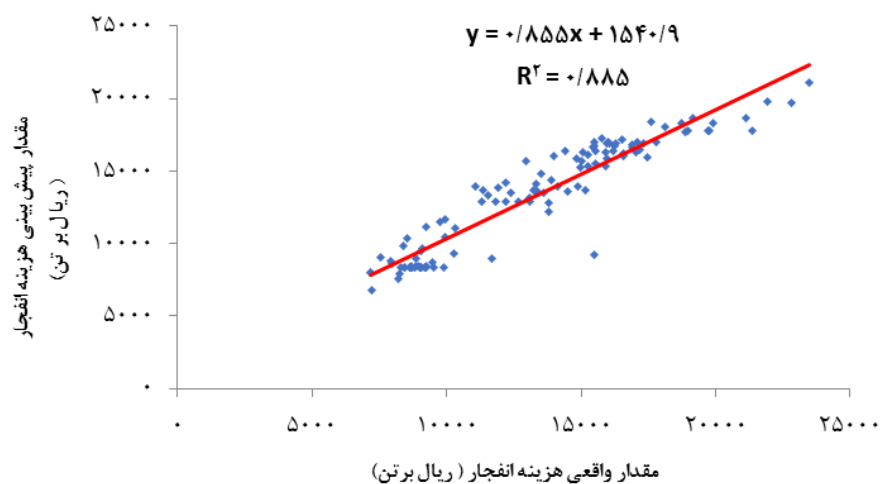
$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (O_i - T_i)^2} \quad (10)$$

که در آن:

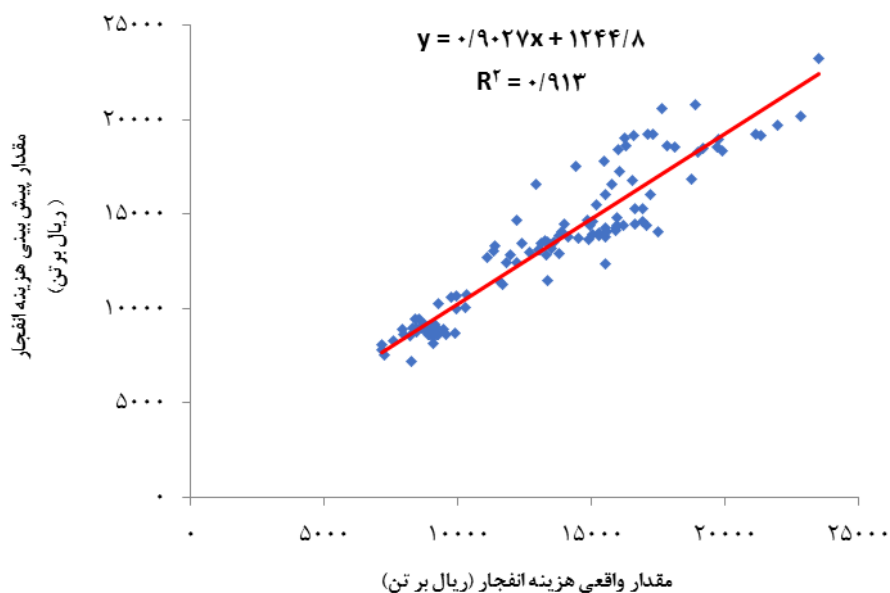
$O_i$  امین مقدار واقعی

$T_i$  امین مقدار پیش‌بینی شده

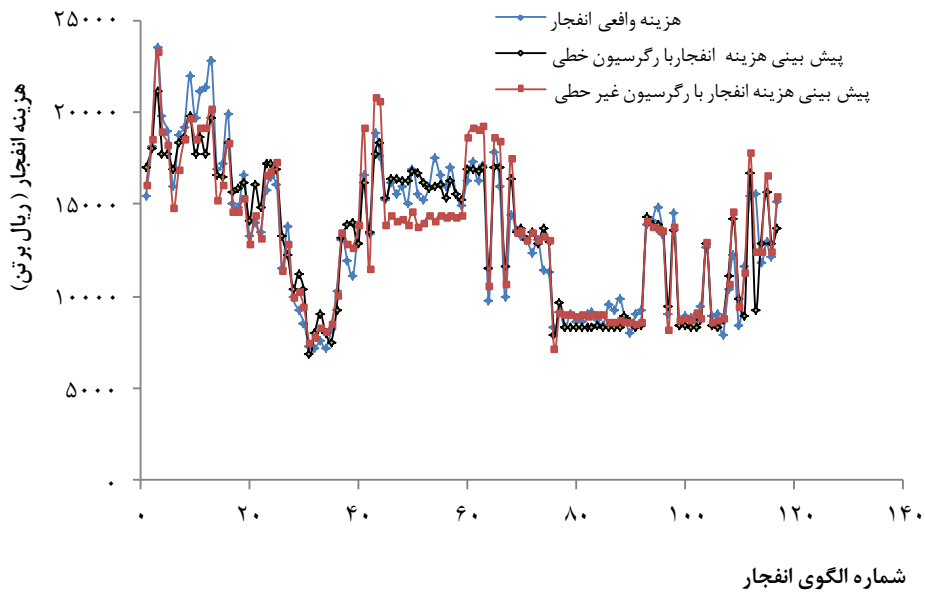
$\bar{O}_i$  میانگین مقدار واقعی



شکل ۲- رابطه بین مقدار پیش‌بینی شده و اندازه‌گیری شده هزینه انفجار با رگرسیون چند متغیره خطی.



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



شکل ۴- مقایسه هزینه پیش‌بینی شده دو مدل با هزینه واقعی.

به ترتیب بیشترین و کمترین تاثیر را بر تابع هدف (هزینه آتشباری) دارد. تعداد چال پارامتری است که با تابع هزینه آتشباری همبستگی مثبت و طول چال و فاصله‌داری با تابع هدف همبستگی منفی دارند.

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<sup>۱</sup> که در این تحقیق از روش ضریب ارتباط<sup>۲</sup> بهره گرفته شد، می‌توان تاثیر نسبی پارامترهای ورودی را روی تابع هزینه آتشباری با استفاده از مقادیر واقعی و مدل توسعه داده شده رگرسیون چند متغیره غیرخطی از رابطه ۱۱ تعیین کرد [۲۰-۲۲].

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

که در آن:

$P_{k,i}$  امین مقدار مربوط به  $k$  امین پارامتر ورودی

$\bar{P}_k$  مقدار متوسط مربوط به  $k$  امین پارامتر ورودی

$\mu_i$  امین مقدار برای پارامتر خروجی

$\bar{\mu}$  مقدار متوسط برای پارامتر خروجی

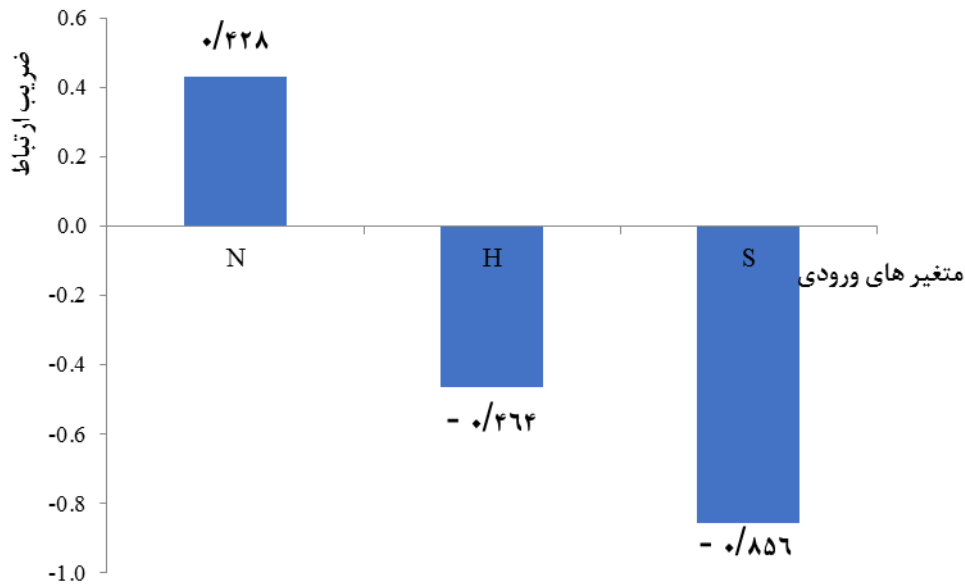
$n$  تعداد متغیرهای ورودی

نتایج حاصل از آنالیز حساسیت مدل رگرسیون چند متغیره غیرخطی با استفاده از رابطه ۱۱ در شکل ۵ نمایش داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود فاصله‌داری و تعداد چال

<sup>۱</sup>- Sensitivity analysis

<sup>۲</sup>- Relevancy factor (RF)





شکل ۵- آنالیز حساسیت هزینه انفجار نسبت به متغیرهای ورودی.

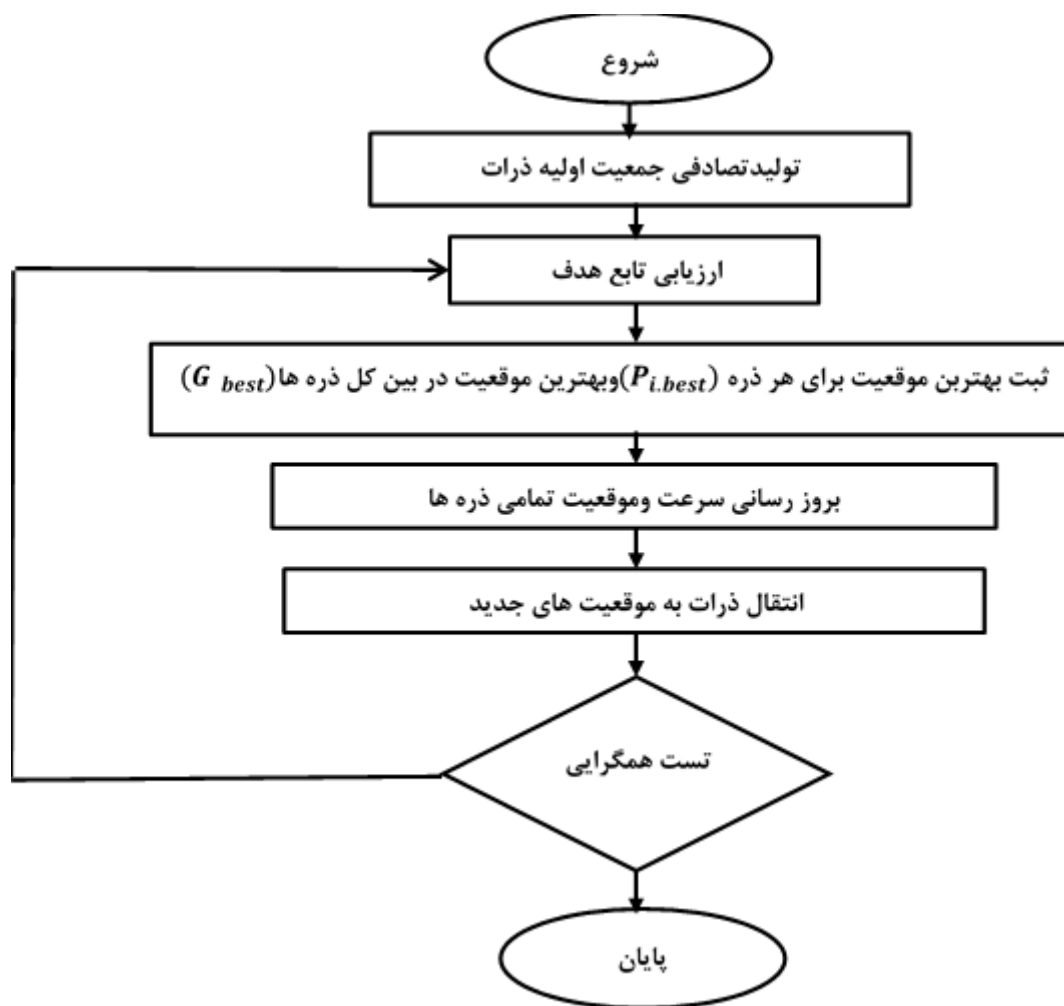
تعداد متغیرهای تصمیم که شامل طول چال، تعداد چال، فاصله‌داری است برابر با ۳ انتخاب شد [۲۳ و ۲۴]. پس از کد نویسی مدل با الگوریتم PSO در متلب و با اعمال تابع هزینه آتشیاری و توابع محدودیت‌های خردایش، پرتاب سنگ، عقب‌زدگی، نسبت فاصله‌داری به ضخامت بارسنگ ( $S \geq B$ ) و رابطه طول چال به ضخامت بارسنگ ( $H = (3-4)B$ ) در مدل مربوطه، با تغییر دادن وزن اینرسی و آهنگ تعدیل آن، ضریب یادگیری شخصی و ضریب یادگیری جمعی در خروجی مدل نتایج مختلفی به دست آمد [۲۳ و ۲۴]. نتیجه بهینه زمانی حاصل شد که این پارامترها مطابق جدول ۵ انتخاب شدند.

مدل ارایه شده با تعداد تکرارهای مختلف از جمله ۲۰۰، ۵۰۰، ۱۰۰۰، ۲۰۰۰ تکرار و حتی بالاتر اجرا شده و مشاهده شد که حدوداً بعد از تکرار یکصد و سی‌ام مقدار تابع هدف ثابت می‌ماند. شکل ۷ کمترین مقدار به دست آمده برای تابع هزینه آتشیاری از آغاز اجرای برنامه تا پایان تعداد تکرار را نشان می‌دهد.

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

الگوریتم PSO از دسته الگوریتم‌های بهینه‌سازی است که بر مبنای تولید تصادفی جمعیت اولیه عمل می‌کند. هر عضو در این گروه با بردار سرعت و بردار موقعیت در فضای جستجو تعریف می‌شود. هر ذره مقدار تابع هدف را در موقعیتی از فضا که قرار گرفته است، محاسبه می‌کند. سپس با استفاده از ترکیب اطلاعات محل فعلی و بهترین محلی که قبلاً در آن بوده است و همچنین اطلاعات یک یا چند ذره از بهترین ذرات موجود در جمع، جهتی را برای حرکت انتخاب می‌کند. پس از انجام حرکت جمعی، یک مرحله از الگوریتم به پایان می‌رسد. این مراحل چندین بار تکرار می‌شود تا آن که جواب مورد نظر حاصل شود [۱۷ و ۱۸]. فرآیند بهینه‌سازی به وسیله الگوریتم PSO در شکل ۶ نشان داده شده است.

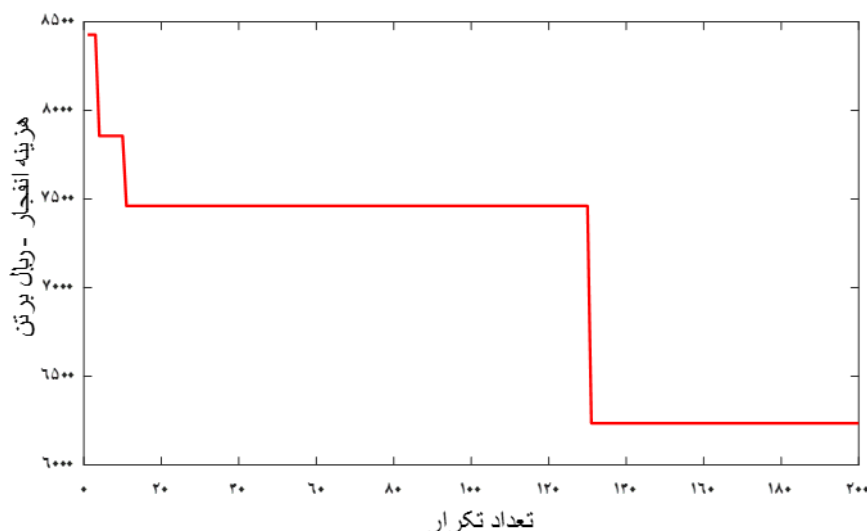
وزن اینرسی و آهنگ تعدیل آن، ضریب یادگیری شخصی، ضریب یادگیری جمعی پارامترهای الگوریتم PSO اند. اندازه ذرات بر اساس تعداد نمونه‌های استفاده شده در پژوهش ۱۴۶ و



شکل ۶- فرآیند بهینه‌سازی با استفاده از الگوریتم PSO [۱۸].

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

مقدار	علامت	پارامتر
۲۰۰	MaxIt	بیشینه تعداد تکرار
۱۴۶	Npop	اندازه جمعیت (ذرات)
۳	Nvar	تعداد متغیرهای تصمیم (ورودی)
۱	W	وزن اینرسی
۰٫۹۹	Wdamp	آهنگ تعدیل وزن اینرسی
۲	C <sub>1</sub>	ضریب یادگیری شخصی
۲	C <sub>2</sub>	ضریب یادگیری جمعی



شکل ۷- کمترین مقدار به دست آمده برای تابع هزینه انفجار حاصل از رگرسیون چند متغیره غیرخطی.

جدول ۶- پارامترهای الگوی بهینه‌سازی شده با استفاده از الگوریتم PSO.

نوع	پارامتر	واحد	مقدار بهینه
الگوی پیشنهادی	S	متر	۳/۶
	N	حلقه	۴۶۲
	H	متر	۱۳
محدودیت‌ها	Fr	سانتی‌متر	۴۴
	FL	متر	۸۴/۵
	BB	متر	۳/۶
هزینه انفجار	BC	ریال بر تن	۶۲۳۵

تن با متوسط دانه‌بندی ۴۰ سانتی‌متر، پرتاب سنگ ۱۱۰ متر و عقب‌زدگی ۵ متر است. مقایسه بین مقادیر به دست آمده از روش رگرسیون چند متغیره غیرخطی- الگوریتم بهینه‌سازی تراکم ذرات (NLMP - PSO) و میانگین مقادیر داده‌ها با کمینه داده‌ها در جدول ۷ نشان داده شده است.

مطابق جدول ۷، بر اساس بهینه‌سازی انجام شده با PSO الگوی پیشنهادی با این الگوریتم، کاهش ۱۲/۹ درصدی هزینه آتشباری را از ۷۱۵۷ به ۶۲۳۵ ریال بر تن نشان می‌دهد. افزایش سایز خردایش حاصل از آتشباری از ۴۰ به ۴۴ سانتی‌متر با توجه به وجود سنگ‌شکن‌های فکی با دهانه ورودی حداقل ۹۰×۱۱۰ در کارخانه‌های فرآوری برای روند تولید مشکل‌ساز نیست. کاهش ۲۸ درصدی عقب‌زدگی از ۵ به ۳/۶ متر و کاهش ۲۳/۲ درصدی پرتاب سنگ از ۱۱۰ به ۸۴/۵ متر که از مهم‌ترین پیامدهای نامطلوب ناشی از آتشباری است و از نقاط قوت این پژوهش به شمار می‌روند.

پارامترهای الگوی آتشباری با استفاده از روش بهینه‌سازی PSO در جدول ۶ پیشنهاد شده است. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود، بهترین مقدار به دست آمده برای هزینه آتشباری ۶۲۳۵ ریال بر هر تن است.

#### ۵- بحث و بررسی

چنان‌که در شکل‌های ۲ و ۳ مشخص است، برای مدل رگرسیون چند متغیره خطی و غیرخطی مقدار  $R^2$  به ترتیب برابر ۰/۸۸۵ و ۰/۹۱۳ به دست آمد. در همین حال مطابق جدول ۴ مقادیر RMSE نیز برای دو مدل به ترتیب ۱۲۱۰ و ۱۰۸۹ محاسبه شد که حکایت از برتری مدل رگرسیون چند متغیره غیرخطی دارد. این در حالی است که در طول روند استخراج در این معادن میانگین هزینه آتشباری، متوسط دانه‌بندی، پرتاب سنگ و عقب‌زدگی به ترتیب ۱۳۴۶۸ ریال بر تن، ۳۶ سانتی‌متر، ۹۷ متر و ۳ متر است. در ۱۴۶ الگوی آتشباری این پژوهش پایین‌ترین هزینه آتشباری ۷۱۵۷ ریال بر

جدول ۷- مقایسه بین مقادیر به دست آمده از روش NLMR-PSO با میانگین و کمینه مقادیر واقعی.

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

## منابع

1. Singh, T; Singh, V; 2005; "An intelligent approach to prediction and control ground vibration in mines", *Geotechnical & Geological Engineering*, 23 (3), 249-262.
2. Nielsen, K; "Model studies of loading capacity as a function of fragmentation from blasting"; In: *Proceedings of 3rd Mini-Symposium on Explosives and Blasting Research*, 1987, pp 71-80.
3. Jimeno, CL; Jimeno, EL; Ayala Carcedo, FJ; 1995; "Drilling and blasting of rocks". A.A Balkema, Rotterdam.
4. Eloranta, J; "The effect of fragmentation on downstream processing costs"; In: *Proceedings of Explo95 Conference*, Brisbane, Qld, Australia, 1995, pp 25-28.
5. Kanchibotla, SS; 2003; "Optimum blasting? Is it minimum cost per broken rock or maximum value per broken rock?", *Fragblast*, 7 (1), 35-48.
6. Rajpot, M; 2009; "The effect of fragmentation specification on blasting cost", Queen's university Kingston, Ontario, Canada.
7. Usman, T; Muhammad, K; 2013; "Modeling of blasting cost at Deewan Cement Quarry, Hattar using Multivariate Regression", *Journal of Engineering and Applied Sciences*, 32 (1), 77-82.
8. Afum, B; Temeng, V; 2015; "Reducing Drill and Blast Cost through Blast Optimisation—A Case Study", *Ghana Mining Journal*, 15 (2), 50-57.
9. Adebayo, B; Mutandwa, B; 2015; "Correlation of blast-hole deviation and area of block with fragment size and fragmentation cost", *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*, 2 (7), 402-406.

در نهایت با مقایسه نتایج به دست آمده برای BB, FL, Fr, BC در جدول ۷ از رضایت‌بخش بودن نتیجه حاصل از مدل NLMR-PSO حکایت دارد.

## ۶- نتیجه‌گیری

در این تحقیق پس از جمع‌آوری داده‌ها و تعیین پارامترهای ورودی و محدودیت‌های آتشیاری از مدل‌های رگرسیون چندمتغیری خطی و غیرخطی برای پیش‌بینی هزینه آتشیاری استفاده شد. در مدل ارائه شده با رگرسیون چند متغیره 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 بر اساس داده‌های واقعی نشان داد که مدل غیرخطی تطابق بهتری نسبت به مدل خطی با هزینه‌های واقعی آتشیاری دارد.

بر اساس آنالیز حساسیت انجام شده با استفاده از روش RF بر روی مدل هزینه آتشیاری به روش رگرسیون چند متغیره غیرخطی نشان داد که فاصله‌داری و تعداد چال به ترتیب بیشترین و کمترین تاثیر را بر تابع هدف دارند. تعداد چال با تابع هزینه آتشیاری همبستگی مثبت و پارامترهای طول چال و فاصله‌داری با این تابع همبستگی منفی داشتند.

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

- using particle swarm theory"; In: MHS'95. Proceedings of the Sixth International Symposium on Micro Machine and Human Science, Nagoya, Japan, 1995, Ieee, pp 39-43.
18. Eberhart, R; Kennedy, J; "Particle swarm optimization"; In: Proceedings of the IEEE international conference on neural networks, 1995, Citeseer, pp 1942-1948.
  19. SPLITENGINEERING; 2010; "Split-Desktop Version3.0",
  20. [http://www.splitting.com/company, asp](http://www.splitting.com/company.asp).
  21. Saltelli, A; Ratto, M; Andres, T; Campolongo, F; Cariboni, J; Gatelli, D; Saisana, M; Tarantola, S; 2008; "Global sensitivity analysis: the primer", John Wiley & Sons.
  22. Sebastian, H; Wenger, R; Renner, T; 1985; "Correlation of minimum miscibility pressure for impure CO<sub>2</sub> streams", Journal of Petroleum Technology, 37 (11), 2076-2082.
  23. Yuan, H; Johns, RT; Ekwuenu, A; Dindoruk, B; "Improved MMP correlations for CO<sub>2</sub> floods using analytical gas flooding theory"; In: SPE/DOE symposium on improved oil recovery, 2004, Society of Petroleum Engineers.
  24. Jiang, M; Luo, YP; Yang, SY; 2007; "Stochastic convergence analysis and parameter selection of the standard particle swarm optimization algorithm", Information Processing Letters, 102 (1), 8-16 doi:<https://doi.org/10.1016/j.ipl.2006.10.005>
  25. Shi, Y; Eberhart, RC; "Parameter selection in particle swarm optimization"; In: International conference on evolutionary programming, 1998, Springer, pp 591-600.
  10. Jackson, BC; 2015; "Total Cost Optimization for Contour Blasting in the Appalachia Region", These Of mining Engineering.
  11. Ghanizadeh Zarghami, A; Shahriar, K; Goshtasbi, K; Akbari, A; 2018; "A model to calculate blasting costs using hole diameter, uniaxial compressive strength, and joint set orientation", Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy, 118 (8), 869-877.
  12. Miranda, V; Leite, F; Frank, G; 2019; "A numerical approach blast pattern expansion", O-Pitblast Lda, Porto, Portugal.
  13. Majdi, A; Rezaei, M; 2013; "Prediction of unconfined compressive strength of rock surrounding a roadway using artificial neural network", Neural Computing and Applications, 23 (2), 381-389.
  14. Rezaei, M; Majdi, A; Monjezi, M; 2014; "An intelligent approach to predict unconfined compressive strength of rock surrounding access tunnels in longwall coal mining", Neural Computing and Applications, 24 (1), 233-241.
  15. Hasanipanah, M; Naderi, R; Kashir, J; Noorani, SA; Qaleh, AZA; 2017; "Prediction of blast-produced ground vibration using particle swarm optimization", Engineering with Computers, 33 (2), 173-179.
  16. Tian, H; Shu, J; Han, L; 2019; "The effect of ICA and PSO on ANN results in approximating elasticity modulus of rock material", Engineering with Computers, 35 (1), 305-314.
  17. Eberhart, R; Kennedy, J; "A new optimizer