

## کاربرد مدل‌های تصمیم‌گیری چند معیاره در طراحی الگوی

### انفجار در معدن گل‌گهر

اشکان مختاری<sup>۱</sup>، مسعود منجزی<sup>۲\*</sup>، امیرحسین مهردادش<sup>۳</sup>

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد دانشگاه تربیت مدرس؛ A.mokhtari@modares.ac.ir

۲- دانشیار دانشگاه تربیت مدرس؛ Monjezi@modares.ac.ir

۳- دانشجوی دکتری استخراج معدن دانشگاه تربیت مدرس؛ A.mehrdanesh@modares.ac.ir

(دریافت ۲۲ اردیبهشت ۱۳۹۲، پذیرش ۴ بهمن ۱۳۹۳)

#### چکیده

عملیات انفجار با توجه به تأثیرگذاری بر سایر بخش‌های فرآیند استخراج مواد معدنی (بارگیری، باربری و سنگ شکنی) بسیار مهم است. در این عملیات ملاک ارزیابی علاوه بر دست‌یابی به خردایش مورد نظر، کاهش پدیده‌های نامطلوب از جمله عقب‌زدگی و پرتاب سنگ است. پارامترهای متعددی مانند مشخصات هندسی شبکه انفجار، خصوصیات توده‌سنگ و خصوصیات ماده منفجره در طراحی الگوی انفجار تأثیرگذار هستند. با توجه به چند شاخصه بودن مسأله طراحی الگوی مناسب انفجاری و عدم دقت کافی روش‌های تجربی، استفاده از مدل‌های تصمیم‌گیری چند معیاره به عنوان تأمین‌کننده اهداف عملیات (خردایش مطلوب، کاهش عقب‌زدگی و پرتاب سنگ)، می‌تواند مفید باشد. در این تحقیق، که در آن معدن شماره یک سنگ آهن گل‌گهر به عنوان مطالعه موردی در نظر گرفته شده، اطلاعات مربوط به هفتاد و پنج الگوی انفجاری در معدن گل‌گهر سیرجان جمع‌آوری می‌شود. سپس اوزان مربوط به اهداف موردنظر با بهره‌گیری از نظر کارشناسان، مقایسات زوجی مشخص شده و رتبه‌بندی بین الگوها با در نظر گرفتن اوزان اهداف، توسط روش TOPSIS صورت می‌گیرد. در مرحله بعد سعی می‌شود با به‌کارگیری روش برنامه‌ریزی آرمانی (GP) هندسه انفجار طوری طراحی شود تا مقادیر اهداف الگوی موردنظر بهبود یابند. نتایج مقادیر اهداف الگوی طراحی شده، نشان‌دهنده بهبود خردایش سنگ به میزان ۱۶/۸۶ درصد، کاهش عقب‌زدگی به میزان ۰/۱۷ متر و افزایش پرتاب سنگ به میزان ۴/۲۶ متر است.

#### کلمات کلیدی

الگوی انفجار، معدن گل‌گهر سیرجان، روش تصمیم‌گیری چندشاخصه TOPSIS، روش برنامه‌ریزی آرمانی (GP)

## ۱- مقدمه

کیفیت انفجار یکی از مسائل کلیدی در معادن است و خردشدگی مناسب ماده معدنی استخراجی بسیر مهم است. ابعاد سنگ‌های منفجر شده باید از یک طرف به اندازه‌ای باشد تا حمل و نقل آن‌ها به آسانی انجام شود و از طرف دیگر از تولید سنگ‌های بسیار ریز به منظور جلوگیری از گرد و غبار نیز اجتناب شود. هر چند اندازه جام سیستم بارگیری، حد بالایی اندازه سنگ‌های منفجر شده را تعیین می‌کند اما تعیین حد پایینی اندازه سنگ‌های خرد شده در اثر انفجار مشکل است و چنانچه اندازه سنگ‌های منفجر شده کوچک‌تر از اندازه مورد نظر باشد موجب به هدر رفتن ماده منفجره و افزایش هزینه‌ها می‌شود. به همین دلیل با توجه به نوع ماشین بارگیری و اندازه ورودی سنگ‌شکن اولیه، در هر معدن متوسط اندازه خرده‌های انفجاری باید بهینه باشد [۴-۱].

بدین ترتیب کیفیت خردایش سنگ در عملیات انفجار یکی از پارامترهای مهم تأثیرگذار بر اقتصاد معادن روباز است [۵]. انجام یک انفجار مطلوب باعث کاهش هزینه‌های کلی خردایش سنگ، بهبود بازدهی چرخه تولید (عملیات حفاری، بارگیری، باربری) و بهبود عملیات بعد از استخراج مواد معدنی (ورود مواد به سنگ شکنهای اولیه، ثانویه) می‌شود [۶].

محققین زیادی در گذشته روابطی را برای طراحی الگوی انفجار ارائه داده‌اند [۳، ۷، ۸، ۹، ۱۰، ۱۱، ۱۲، ۱۳، ۱۴، ۱۵]. اما با توجه به در نظر نگرفتن هم‌زمان اغلب پارامترهای مؤثر و با توجه به شرایط پیچیده حاکم بر عملیات انفجار، نتایج چندان مطلوب نبوده است [۱۶ و ۳].

طراحی الگوی انفجار مناسب، مهم‌ترین مرحله در تأمین خردایش مطلوب است. برای تأمین خردایش مطلوب، محدودیت‌های اجرایی مانند عقب‌زدگی ناشی از انفجار، پرتاب سنگ و محدودیت شرایط زمین‌شناسی وجود دارند [۱۷ و ۲].

از بین این محدودیت‌ها، عقب‌زدگی و پرتاب سنگ از بزرگ‌ترین و مهم‌ترین معضلات عملیات انفجار در معدن گل-گهر سیرجان می‌باشند. در یک ارزیابی جامع از عملیات انفجار لازم است تا تمامی این معیارها در نظر گرفته شوند. در کتب و مقالات انتشار یافته اغلب به اصلاح و بهینه‌سازی یک شاخص (به‌طور مثال خردایش) پرداخته می‌شود، در حالی که بررسی هم‌زمان چند معیار، در طراحی مناسب‌ترین الگوی انفجار ضروری است. در علم تصمیم‌گیری که در آن انتخاب یک

راهکار از بین راهکارهای موجود و یا اولویت‌بندی راهکارها مطرح است، چند سالی است که روش‌های تصمیم‌گیری با شاخص‌های چندگانه جای خود را باز کرده‌اند. در این میان روش تحلیل سلسله مراتبی AHP و روش تصمیم‌گیری چند-شاخصه TOPSIS بیش از سایر روش‌ها در علم مدیریت استفاده شده است. در روش AHP، وابستگی‌ها از بالا به پایین و برعکس، باید به صورت خطی باشد. چنانچه وابستگی دو طرفه باشد، یعنی وزن معیارها به وزن گزینه‌ها و وزن گزینه‌ها نیز به وزن معیارها وابسته باشد، مسئله از حالت سلسله مراتبی خارج شده و تشکیل یک شبکه یا سیستم غیرخطی یا سیستم با بازخور را می‌دهد. در این صورت برای محاسبه وزن عناصر نمی‌توان از قوانین و فرمول‌های سلسله مراتبی استفاده کرد و چون وابستگی بین شاخص‌ها وجود دارد باید از روش TOPSIS استفاده کرد [۱۸]. در این تحقیق سعی می‌شود تا با استفاده از روش تصمیم‌گیری چندشاخصه TOPSIS مناسب‌ترین الگو از بین الگوهای انفجاری انجام گرفته در معدن گل‌گهر سیرجان برای رسیدن به اهداف (خردایش مورد نظر، کاهش عقب‌زدگی و کاهش پرتاب سنگ) انتخاب شود. سپس با استفاده از روش برنامه‌ریزی آرمانی، الگویی کارا با بهینه کردن مقادیر هدف الگوی انتخاب شده توسط روش TOPSIS، طراحی می‌شود.

## ۲- مدل تصمیم‌گیری TOPSIS

این مدل تصمیم‌گیری توسط هوانگ و یون در سال ۱۹۸۱ ارائه شد. این مدل در رتبه‌بندی بین گزینه‌ها و کارهای موجود در مسائل مختلف کاربرد دارد و از جمله مدل‌های مطرح تصمیم‌گیری چند شاخصه است [۱۹]. در این روش  $m$  گزینه توسط  $n$  شاخص ارزیابی می‌شوند. این تکنیک بر این مفهوم بنا می‌شود که گزینه‌های انتخابی باید کمترین فاصله را با راه‌حل ایده‌آل مثبت (بهترین حالت ممکن) و بیشترین فاصله را با راه‌حل ایده‌آل منفی (بدترین حالت ممکن) داشته باشند. علت استفاده از این مدل در مقایسه با روش‌های دیگر مانند AHP کارایی این تکنیک در اولویت‌بندی با منطق شباهت به جواب ایده‌آل و قابلیت وزن‌دهی تمام معیارها و دقت این نرم‌افزار است [۱۹]. حل مسئله با این روش مستلزم طی شش گام زیر است:

## گام ۱: کمی کردن و بی‌مقیاس‌سازی ماتریس تصمیم

در این مرحله در صورت وجود شاخص‌های کیفی، ابتدا این شاخص‌ها توسط تکنیک‌های کمی‌سازی مانند مقیاس دو قطبی فاصله‌ای، به‌صورت اعداد کمی در می‌آیند و سپس توسط نرم اقلیدسی به ماتریس بی‌مقیاس تبدیل می‌شوند.

این روش یکی از قدیمی ترین روش های تصمیم گیری چندهدفه است. چارنر و کوپر [۲۰] اولین مقاله را درباره برنامه ریزی آرمانی در سال ۱۹۵۵ منتشر کردند به طوری که آن ها حداقل کردن مجموع قدرمطلق انحرافات از مقصد مشخصی را بررسی کردند. بعدها این روش توسط لی و ایگنیز توسعه داده شد [۲۱-۲۲]. در این روش برای هر یک از اهداف، عددی مشخص به عنوان آرمان تعیین می شود و سپس تابع هدف مربوط به آن تشکیل می شود. سپس پاسخی جستجو می شود که علاوه بر قرار گرفتن در محدودیت ها، مجموع وزنی انحراف هر هدف را نسبت به آرمان تعیین شده برای همان هدف، حداقل کند [۲۳-۲۵].

### ۳-۱- مدل سازی برنامه ریزی آرمانی

مرحله ابتدایی در ساخت مدل برنامه ریزی آرمانی مانند هر مدل برنامه ریزی ریاضی دیگر ایجاد چهار چوب های اصلی مدل شامل "تعریف متغیرهای تصمیم" و "فرموله کردن تمامی اهداف مربوطه" است. سپس مدل سازی برنامه ریزی آرمانی طی چهار مرحله زیر صورت می گیرد [۲۴-۲۵].

#### گام اول: تعیین سطح تمایل برای تمامی اهداف و تبدیل آن ها به آرمان

سطح تمایل عبارت از یک مقدار عددی خاص همراه با یک سطح توفیق قابل قبول یا مطلوب برای هدف معین است.

#### گام دوم: قرار دادن متغیرهای انحراف از آرمان مثبت یا منفی برای هر آرمان

در بسیاری از موارد ممکن است بین آرزوها، تمایلات و خواسته های تصمیم گیرنده و آنچه که در عمل می توان به آن دست یافت، تفاوت و اختلاف وجود داشته باشد. این میزان تفاوت در مدل های برنامه ریزی آرمانی توسط متغیری که به آن متغیرهای انحراف از آرمان گفته می شود اندازه گیری می شود. به عبارت دیگر تفاوت بین اکتسابات و خواسته ها را انحراف از آرمان می نامند. متغیرهای انحراف از آرمان با  $d_i^+$  و  $d_i^-$  نمایش داده می شوند که  $d_i^+$  معرف یک متغیر مازاد و  $d_i^-$  معرف یک متغیر کمبود است. در ارتباط با  $d_i^+$  و  $d_i^-$  چهار حالت را می توان تصور شد که سه حالت امکان پذیر و حالت چهارم امکان ناپذیر است. جدول شماره ۱ این چهار حالت مختلف را نمایش می دهد [۲۶].

#### گام ۲: به دست آوردن ماتریس بی مقیاس موزون (V)

ماتریس بی مقیاس شده (N) را در ماتریس قطری وزن ها ضرب می کنیم، یعنی:

$$V = N \times W_{n \times n} \quad (1)$$

#### گام ۳: تعیین راه حل ایده آل مثبت و راه حل ایده آل منفی که به صورت زیر تعریف می شوند:

گزینه ایده آل مثبت  $V_j^+ =$  بردار بهترین مقادیر هر شاخص V

گزینه ایده آل منفی  $V_j^- =$  بردار بدترین مقادیر هر شاخص V

#### گام ۴: به دست آوردن میزان فاصله هر گزینه تا ایده آل-های مثبت و منفی

فاصله اقلیدسی هر گزینه تا ایده آل مثبت ( $d_j^+$ ) و فاصله هر گزینه تا ایده آل منفی ( $d_j^-$ ) بر اساس فرمول های زیر محاسبه می شود.

$$d_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^n (v_{ij} - v_j^+)^2} \quad i=1,2,\dots,m$$

$$d_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^n (v_{ij} - v_j^-)^2} \quad i=1,2,\dots,m$$

#### گام ۵: تعیین نزدیکی نسبی ( $CL^*$ ) یک گزینه به راه حل ایده آل:

چنان چه  $V_i = V_i^+$  باشد، آنگاه  $d_i^+ = 0$  و  $CL_i = 1$  می شود و در صورتی که  $V_i = V_i^-$  باشد، آنگاه  $d_i^- = 0$  و  $CL_i = 0$  خواهد شد. بنابراین هر گزینه  $V_i$  به راه حل ایده آل نزدیک تر باشد، مقدار  $CL_i$  آن به یک نزدیک تر است.

$$cl_i^* = \frac{d_i^-}{d_i^- + d_i^+} \quad i=1,2,\dots,n$$

#### گام ۶: رتبه بندی گزینه ها:

هر گزینه که  $CL^*$  آن بزرگ تر باشد بهتر است. بدین وسیله مدل TOPSIS در انتخاب گزینه ارجح ما را یاری می کند. در خصوص مسائلی که ناگزیر به انتخاب بین تعداد زیادی گزینه با شاخصه های متعدد باشیم مدل های تصمیم گیری چند شاخصه به یاری ذهن تصمیم گیرنده آمده و او را در انتخاب یک گزینه مناسب و متناسب با شیوه علمی و مورد قبول یاری می رساند.

#### ۳-۲- مدل برنامه ریزی آرمانی!

نظر بیشترین اهمیت را دارد و انحراف نامطلوب از آن در ابتدا باید حداقل شود.

- **رتبه‌بندی اصلی:** در این روش وزن مشخصی به هر یک از انحرافات داده می‌شود. این وزن‌ها اهمیت نسبی هر انحراف را نشان می‌دهند.
- **رتبه‌بندی ترکیبی:** در این روش رتبه‌بندی به صورت ترکیبی از ترتیبی و اصلی صورت می‌گیرد

**گام چهارم: ایجاد تابع (Z) از تمامی آرمان‌های بند قبل به‌عنوان تابع هدف مدل برنامه‌ریزی آرمانی**

در نهایت شکل کلی مدل برنامه‌ریزی آرمانی به صورت زیر تشکیل می‌شود:

$$\begin{aligned} \text{Min } Z &= \sum_{k=1}^q \sum_{i=1}^m p_k (d_i^- + d_i^+) \\ \text{Subject to} \\ o: \sum_{j=1}^n C_{ij} X_j + d_i^- - d_i^+ &= b_i \quad (i = 1, 2, \dots, m) \\ \sum_{j=1}^n a_{rj} X_j &\leq b_r \quad (i = 0, 1, \dots, s) \\ X_j, d_i^+, d_i^- &\geq 0 \quad (i = 1, 2, \dots, m), (j = 1, 2, \dots, n) \end{aligned}$$

### ۳-۲- الگوریتم‌های موجود در حل برنامه‌ریزی آرمانی

روش‌های مختلف حل برنامه‌ریزی آرمانی عبارتند از روش‌های ترسیمی، لکسیکوگراف، انتقالات متوالی و روش سیمپلکس که در ادامه روش انتقالات متوالی به دلیل استفاده در این تحقیق تشریح می‌شود.

#### ۳-۲-۱- روش انتقالات متوالی

مراحل مختلف الگوریتم انتقالات متوالی در حل برنامه‌ریزی آرمانی به شرح زیر می‌باشند [۲۴، ۲۷]:

**قدم اول-** مساله به I مساله تک‌هدفه به ترتیب رتبه‌های  $w_j$  تبدیل می‌شود، به طوری که اولین مساله شامل هدف در رتبه یکم اهمیت بوده و آخرین مساله شامل هدف در آخرین رتبه اهمیت باشد.

(مساله یکم)

$$\begin{aligned} \text{Min : } & h_1(d, d') \\ \text{s.t : } & g_i(x) + d_i - d'_i = b_i \quad ; \quad i = 1, 2, \dots, m \\ & d, d' \geq 0 \end{aligned}$$

ارجحیت یکم ( $w_1$ ) همیشه به تأمین محدودیت‌های اصلی مساله داده می‌شود که مجموعه عملی آن تهی نباشد.

جدول ۱: رابطه بین متغیرهای انحراف از آرمان مثبت و منفی [۲۶]

حالت	وضعیت متغیرهای انحراف	توضیح
اول	$d^+ = 0, d^- = 0$	دستیابی کامل به آرمان تعیین شده
دوم	$d^+ \neq 0, d^- = 0$	پیشی گرفتن از آرمان تعیین شده
سوم	$d^+ = 0, d^- \neq 0$	عدم دستیابی به آرمان تعیین شده
چهارم	$d^+ \neq 0, d^- \neq 0$	امکان‌پذیر نیست

در صورتی که نمایش ریاضی تأمین تابع هدف با متغیرهای تصمیم  $X_j$  به صورت زیر باشد:

$$Z_i = (X_j) \quad x_j = (x_1, x_2, \dots, x_n) \\ b_i: \text{میزان سطح تمایل هدف}$$

در این صورت سه شکل مختلف زیر را برای آرمان می‌توان در نظر گرفت:

الف:  $Z_i(x_j) \leq b_i$ ؛ بدین معنا که تصمیم‌گیرنده حداکثر مایل به کسب ارزشی معادل  $b_i$  است.

ب:  $Z_i(x_j) \geq b_i$ ؛ بدین معنا که تصمیم‌گیرنده حداقل مایل به کسب ارزشی معادل  $b_i$  است.

ج:  $Z_i(x_j) = b_i$ ؛ بدین معنا که تصمیم‌گیرنده دقیقاً مایل به کسب ارزشی معادل  $b_i$  است.

در صورتی که متغیرهای انحراف از آرمان  $d^+$  و  $d^-$  اعمال شوند، شکل محدودیت‌های آرمان‌های ذکر شده در بالا، مطابق با جدول شماره ۲ می‌شود [۲۹-۲۷].

جدول ۲: فرموله کردن آرمان در GP [۲۷]

متغیر انحراف از آرمان	شکل محدودیت آرمان	نوع آرمان
$d_i^+$	$Z_i(x_j) - d_i^+ + d_i^- = b_i$	$Z_i(x_j) \leq b_i$
$d_i^-$	$Z_i(x_j) - d_i^+ + d_i^- = b_i$	$Z_i(x_j) \geq b_i$
$d_i^+, d_i^-$	$Z_i(x_j) - d_i^+ + d_i^- = b_i$	$Z_i(x_j) = b_i$

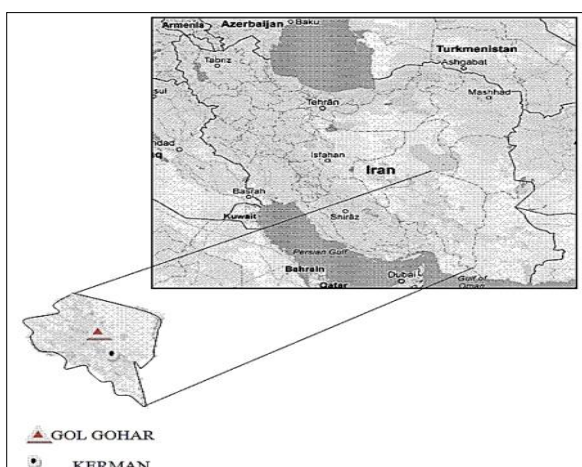
**گام سوم: رتبه‌بندی آرمان‌ها برحسب اهمیت**

در روش GP آرمان‌ها را به سه روش متفاوت می‌توان اولویت‌بندی کرد- [۲۴].

- **رتبه‌بندی ترتیبی:** در این روش آرمان‌ها برحسب اهمیت‌شان فهرست می‌شوند، از  $P_i$  (حرف اول priority) برای نشان دادن شماره‌ی اولویت استفاده می‌کنیم. برای مثال  $p_1$  نشان می‌دهد که آرمان مورد

برای تعیین توزیع اندازه قطعات خرد شده از آنالیز تصویری، به علت دقت و سرعت بالا و همچنین اقتصادی بودن آن استفاده می شود و همچنین پرتاب سنگ و عقب زدگی پله بعد از انفجار اندازه گیری و ثبت می شوند [۳۳].

به منظور تهیه مدل، از نتایج الگوهای انفجاری صورت گرفته در معدن گل گهر استفاده می شود. برای این کار پارامترهای مربوط به ۷۵ انفجار و نتایج این انفجارها برداشت و ثبت شد. جداول ۳ و ۴ پارامترهای طراحی الگوها و نتایج حاصل از انفجارها را نشان می دهند.



شکل ۱: موقعیت جغرافیایی معدن سنگ آهن گل گهر

جدول ۳- پارامترهای ورودی در طراحی مدل

مقدار حداقل	مقدار حداکثر	نماد	پارامتر ورودی
۲	۶,۵	B	بار سنگ (m)
۳	۸	S	فاصله چالها در یک ردیف (m)
۵	۷,۵	K	عمق چال (m)
۰,۰۱۹	۰,۰۶۱	SD	حفاری ویژه (m/m <sup>3</sup> )
1	۳	T	گل گذاری (m)
۰,۱۳	۰,۳۵	PF	خرج ویژه (Kg/Ton)

اگر  $\text{Min } h_1(d, d') = h_1^* = 0$  باشد، آنگاه GP دارای جواب است و چنانچه  $h_1^* \neq 0$  باشد، ناحیه تشکیل شده توسط محدودیتها تهی بوده و مسأله جواب ندارد. بنابراین در صورتی که  $h_1^* = 0$  باشد به مسأله دوم می رویم:

(مساله دوم)

$$\text{Min} : h_2(d, d \neq)$$

$$\text{s.t} : g_i(x) + d_i - d \neq_i = b_i \quad ; \quad i = 1, 2, \dots, m$$

$$h_1(d, d \neq) \leq h_1^*$$

$$f_1(x) + d_{m+1} - d \neq_{m+1} = b_1 \quad \text{اولین تابع هدف در ارجحیت دوم}$$

$$d, d' \geq 0$$

ملاحظه می شود که کمینه کردن انحراف از مقصد موجود برای مهم ترین هدف از اهداف مسأله همواره در رتبه دوم ( $W_2$ ) اهمیت نسبت به محدودیت های اصلی مسأله واقع می شود که در نتیجه دومین مسأله از I مسأله را به وجود می آورد.

**قدم دوم** - حل هر مسأله از I مسأله به گونه ای انجام می پذیرد که توابع هدف مسأله حل شده قبل از آن هرگز از بهینه یافت شده برای آن تجاوز نکند، یعنی بهینه شدن یک هدف از رتبه پائین تر، نمی تواند به ضرر یک هدف از رتبه بالاتر شود. این پروسه تا حل مسأله I ادامه می یابد.

#### ۴- معرفی اجمالی معدن سنگ آهن گل گهر سیرجان

ناحیه معدنی سنگ آهن گل گهر مطابق شکل شماره ۱ در ۵۵ کیلومتری جنوب غربی سیرجان در استان کرمان واقع شده است. این معدن با ارتفاع ۱۷۵۰ متر از سطح دریا در بین مثلثی به رئوس کرمان، شیراز و بندرعباس قرار گرفته است [۲۹]. معدن سنگ آهن گل گهر سیرجان از شش آنومالی در محدوده ای به طول ۱۰ کیلومتر و عرض ۴ کیلومتر واقع شده است. این معدن با برخورداری از ۱/۱ میلیارد تن ذخیره از مهمترین ذخایر سنگ آهن کشور به حساب می آید. ماده منفجره مورد استفاده در عملیات انفجار آنفو بوده و از مواد به دست آمده از چالزنی برای گل حفاری استفاده می شود است. زمان تأخیر بین ردیف های اول و دوم ۸۰ms و در سایر ردیفها ۵۰ ms است. تعداد ردیفها و چالها به ترتیب بین ۲-۷ و ۲۰-۱۰ و ارتفاع چالها مابین ۱۵-۵ متر متغیر است. قطر چالها نیز ۲۵۱mm می باشد که به صورت عمودی و با دقت بالا حفر می شود [۳۱، ۳۲].

در تصمیم‌گیری چندهدفه فرآیند بهینه‌سازی بر روی توابع هدف صورت می‌پذیرد. بنابراین برای طراحی الگوی مورد نظر که هدف آن بهینه کردن خردایش سنگ، پرتاب سنگ و غیره عقب‌زدگی است نیاز به روابط داریم که رابطه بین پارامترهای الگوی انفجار و اهداف مورد نظر را نشان دهد. برای این کار رگرسیون چند متغیره بین پارامترهای طراحی نسبت به هر یک از اهداف جدول شماره ۴ گرفته می‌شود.

$$\text{Fragmentation} = 103.01 - 15.12B + 4.391S + 0.3232K - 1019SD - 2.7053T + 276.7PF$$

$$\text{Back Break} = -7.21 + 1.467B + 0.112S + 0.05907K - 47.28SD - 0.3328T + 3.105PF$$

$$\text{Fly Rock} = -39.52 - 37.442B + 30.581S + 2.614K - 119.335S - 6.4T + 303.787PF$$

برای ارزیابی عملکرد مدل‌های به‌دست آمده از رگرسیون چندمتغیره، از شاخص‌های عملکرد ضریب تصمیم‌گیری جذر متوسط مربعات خطا<sup>۱۱</sup> (RMSE) و<sup>۱</sup> (R<sup>2</sup>) استفاده می‌شود که نتایج در جدول شماره ۷ نشان داده می‌شود.

جدول ۷: عملکرد مدل‌های به دست آمده از رگرسیون چند متغیره

شاخص‌ها	مدل خردایش سنگ	مدل عقب‌زدگی	مدل پرتاب سنگ
R <sup>2</sup>	٪۹۱,۳۱۴۳	٪۸۴,۶۶۸۳	٪۸۶,۲۴۴۷
RMSE	۳,۲۶۱۳	۱,۶۳۱۳۴۵	۳,۸۷۴۸

برای به‌دست آوردن محدودیت‌های مدل، از هر پارامتر نسبت به سایر پارامترها رگرسیون چند متغیره گرفته و رابطه به‌دست آمده در بازه حداکثر و حداقل مقدار آن پارامتر قرار داده می‌شود. نتایج در زیر نشان داده می‌شود:

جدول ۴: مقادیر اهداف در مدل‌سازی

اهداف	نماد	مقدار حداکثر	مقدار حداقل
خردایش (درصد نسبت به حالت ایده‌آل)	Frag	۱۰۰	۳۰
عقب‌زدگی (m)	B.B	۱۰	۰
پرتاب سنگ (m)	F.R	۷۰	۱۰

برای حل مسئله با مدل TOPSIS، لازم است تا جدول تصمیم‌گیری تشکیل شود. این جدول از چهار ستون و هفتاد و پنج ردیف تشکیل می‌شود. ستون نخست، ستون مربوط به گزینه‌ها یا در واقع شماره انفجارهای صورت گرفته است که قرار است رتبه‌بندی بین آن‌ها انجام شود. بقیه ستون‌ها مربوط به شاخص‌ها هستند که در واقع همان اهداف موردنظر هستند که قرار است الگوها بر اساس آن‌ها رتبه‌بندی شوند. برای به‌دست آوردن وزن‌های مربوط به هر شاخص در این تحقیق، از روش بردار ویژه یا AHP استفاده شده که با بهره‌گیری از نظر کارشناسان و خبرگان و مقایسات زوجی بین شاخص‌ها اوزان مربوط به هر شاخص به صورت جدول شماره ۵ مشخص می‌شود.

جدول ۵: اوزان محاسبه شده برای شاخص‌ها

شاخص‌ها	خردایش	عقب‌زدگی	پرتاب سنگ
نماد	Frag	B.B	F.R
وزن شاخص‌ها	۰,۴۳	۰,۳۱	۰,۲۶

پس از حل مدل مسئله با مدل TOPSIS طبق گام‌های ذکر شده، الگوهای انفجاری انجام شده در معدن بر اساس نزدیکی نسبی به راه‌حل ایده‌آل (CL\*) رتبه‌بندی می‌شوند که الگوی شماره چهل و سه به عنوان مناسب‌ترین الگو معرفی می‌شود. پارامترهای طراحی این الگو در جدول شماره ۶ نشان داده می‌شود.

جدول شماره ۶: پارامترهای الگوی شماره چهل‌وسه معدن گل‌گهر

B	S	Frag	B.B	F.R
بارسنگ	فاصله ردیفی	خردایش	عقب‌زدگی	پرتاب سنگ
۵,۵	۷	۷۵	۱	۲۰

B:  $2 \leq 0.999+0.705S+0.036K-15.803SD-0.046T+0.493PF \leq 6.5$   
 S:  $3 \leq 3.170-0.042K-28.893SD+0.073T+0.231PF+0.84B \leq 8$   
 K:  $5 \leq 6.274-130.626SD+0.98T+13.449PF+4.15B-4.016S \leq 7.5$   
 T:  $0.019 \leq -8.231+89.228SD+-2.049B+2.745S+0.384K-8.287PF \leq 0.061$   
 SD:  $2 \leq 0.082-0.003B-0.005S+0.001K+0.009PF+0.001T \leq 10$   
 PF:  $0.13 \leq -0.174+0.032B+0.012S+0.007K-0.012T+2.785SD \leq 0.35$

$p(1) F_{frag} > p(2) F_{back\ break} > p(3) F_{fly\ rock}$

جدول ۹: متغیرهای انحرافی و شکل محدودیت آرمانها

آرمانها	شکل محدودیت آرمانها	متغیر انحرافی که حداقل می-شود
$F_{frag} \Rightarrow 75$	$F_{frag} - d_i^+ + d_i^- = 75$	$d_i^-$
$F_{back\ break} \leq 1$	$F_{back\ break} - d_i^+ + d_i^- = 1$	$d_i^+$
$F_{fly\ rock} \leq 20$	$F_{fly\ rock} - d_i^+ + d_i^- = 20$	$d_i^+$

در نهایت بعد از وارد کردن متغیرهای انحراف، شکل کلی مدل برنامه‌ریزی آرمانی به شکل زیر ساخته می‌شود. برای حل مدل، در این تحقیق از روش حل برنامه‌ریزی آرمانی با شیوه انتقالات متوالی استفاده می‌شود. دقت شود که در روش انتقالات متوالی اولویت اول به محدودیت‌ها داده می‌شود:

$$\text{Min}D = \{w_1(d_1^- + d_2^+ + d_3^- + d_4^+ + d_5^- + d_6^+ + d_7^- + d_8^+ + d_9^- + d_{10}^+ + d_{11}^- + d_{12}^+), w_2(d_{13}^-), w_3(d_{14}^+), w_4(d_{15}^+)\}$$

$$F_{Frag}: 103.01-15.12B+4.391S+0.3232K-1019SD-2.7053T+276.7PF+d_{13}^+ - d_{13}^- = 75 \} w_2$$

$$F_{bb}: -7.21+1.467B+0.112S+0.05907K-47.28SD-0.3328T+3.105PF+d_{14}^+ - d_{14}^- = 1 \} w_3$$

$$F_{fr}: -39.52-37.442B+30.581S+2.614K-119.335SD-6.4T+303.787PF+d_{15}^+ - d_{15}^- = 20 \} w_4 -$$

$$1.001+0.705S+0.036K-15.803SD-0.046T+0.493PF+d_1^+ - d_1^-$$

$$-5.501+0.705S+0.036K-15.803SD-0.046T+0.493PF+d_2^+ - d_2^-$$

$$0.170-0.042K-28.893SD+0.073T+0.231PF+0.84B+d_3^+ - d_3^-$$

$$-4.83-0.042K-28.893SD+0.073T+0.231PF+0.84B+d_4^+ - d_4^-$$

$$1.274-130.626SD+0.98T+13.449PF+4.15B-4.016S+d_5^+ - d_5^-$$

$$-1.226-130.626SD+0.98T+13.449PF+4.15B-4.016S+d_6^+ - d_6^-$$

$$-10.231+89.228SD-2.049B+2.745S+0.384K-8.287PF+d_7^+ - d_7^-$$

$$-18.231+89.228SD-2.049B+2.745S+0.384K-8.287PF+d_8^+ - d_8^-$$

$$0.063-0.003B-0.005S+0.001K+0.009PF+0.001T+d_9^+ - d_9^-$$

$$0.021-0.003B-0.005S+0.001K+0.009PF+0.001T+d_{10}^+ - d_{10}^-$$

$$-0.304+0.032B+0.012S+0.007K-0.012T+2.785SD+d_{11}^+ - d_{11}^-$$

$$-0.524+0.032B+0.012S+0.007K-0.012T+2.785SD+d_{12}^+ - d_{12}^-$$

w1

پس از ایجاد چهارچوب‌های اصلی مدل شامل "تعریف متغیرهای تصمیم"، "فرموله کردن تمامی اهداف مربوطه" و "محدودیت‌ها"، مدل برنامه‌ریزی آرمانی طبق مراحل زیر ساخته می‌شود.

ابتدا سطوح تمایلات اهداف به نحوی که مقادیر اهداف الگوی انتخابی مدل TOPSIS بهبود یابند، طبق جدول شماره ۸ مشخص می‌شود.

جدول ۸: سطح تمایلات در نظر گرفته شده برای آرمانها

اهداف	خردایش	عقب‌زدگی	پرتاب سنگ
سطح تمایل	$F_{frag} \Rightarrow 75$	$F_{B,B} \leq 1$	$F_{F,R} \leq 20$

بعد از مشخص کردن سطح تمایلات برای آرمانها، متغیرهای انحراف به صورت جدول شماره ۹ وارد مدل می‌شوند.

در این مرحله آرمانها برحسب اولویت و اهمیت به شکل زیر رتبه‌بندی می‌شوند.

کاهش عقب‌زدگی و پرتاب سنگ است. با توجه به امکان اولویت‌بندی اهداف در این روش می‌توان با توجه به شرایط موجود در هر معدن اهداف مهم‌تر را در اولویت بالاتری قرار داد.

### مراجع

- [1] N. V. MELNIOV; 1987; "Blasting methods to improve rock Fragmentation", Pergamo, PP. 102-112.
- [2] Lopez jimeno, C; 2005; "Drilling and Blasting of Rocks", Balkema.
- [3] Hustrulid. W; 2000; "Blasting Principles for open pit mining", Vol.1, Balkema.
- [4] Mario A. Morin; Francesco Ficarazzo; 2006; "Monte Carlo simulation as a tool to predict blasting fragmentation based on the Kuz-Ram model", Computers & Geosciences, PP. 352-359.
- [5] Ostvar., R. 2002; *Mine blasting*, Amirkabir University of Technology Jahad Daneshgahi Publication.
- [6] SHI Xiu-zhi; ZHOU Jian; WU Bang-biao; HUANG Dan; WEI Wei1; 2012; "Support vector machines approach to mean particle size of rock fragmentation due to bench blasting prediction" Transactions of Nonferrous Metals Society of China, PP. 432-441.
- [7]. Anderson, O; 1952; "Blast hole burden design, Introducing a new formula", No166-167; PP. 115-130.
- [8]. Fraenkel, K.H; 1954; "Handbook in rock blasting technique", Part-1, Esselte AB, Stockholm.
- [9]. Pearse, G.E; 1955; "Rock blasting: Some aspects on the theory and practice", Mine quarry engineering; 21(1). 25-30.
- [10]. Allsman, P.L; 1960; "Analysis of explosive action in breaking rocks" Am. Inst. Mining Metal Petroleum Engineering. V.217, PP. 469-478.
- [11]. Ash, R. L. 1963, "The mechanics of rock breakage (Part 2) – Standards for blasting design", Pit and Quarry Vol. 56 No. 3, PP. 126-131.
- [12]. Lagefors, A; 1962; "Bench blasting with an explosive" Proceeding, Int symp on mining research (G. B. Clark, ed) Pergamon Press, New York, PP. 249-271.

مدل برنامه‌ریزی آرمانی بالا در ۴ مرحله و با توجه به اولویت‌های تعیین شده با استفاده از نرم افزار Lingo حل می‌شود که در نهایت مقادیر بهینه برای پارامترهای طراحی الگوی انفجار و مقادیر اهداف به صورت جداول شماره ۱۰ و ۱۱ تعیین می‌شوند.

جدول ۱۰: مقادیر پارامترهای به دست آمده از روش برنامه‌ریزی

#### آرمانی

پارامترها	B	S	K	T	SD	PF
مقادیر	۵,۳۳	۶,۸۴	۱۷,۱۱	۷,۳۴	۰,۰۳۱	۰,۲۱

جدول ۱۱: مقادیر به دست آمده برای اهداف در برنامه‌ریزی آرمانی

اهداف	Frag	B.B	F.R
مقادیر	۹۱,۸۶	۰,۸۳	۲۴,۲۶

### ۴- نتیجه‌گیری

در این تحقیق برای طراحی الگوی مناسب انفجار در معدن شماره یک سنگ آهن گل‌گهر با استفاده از روش برنامه‌ریزی آرمانی چندهدفه، اطلاعات مربوط به هفتاد و پنج الگوی انفجاری معدن جمع‌آوری شد. برای به‌دست آوردن توابع هدف، از اهداف موردنظر نسبت به پارامترهای الگوهای انجام شده رگرسیون چند متغیره صورت گرفت و در نهایت توابع هدف به‌دست آمده با روش برنامه‌ریزی آرمانی همزمان بهینه شدند. نتایج مقادیر اهداف الگوی طراحی شده نشان می‌دهد که خردایش سنگ به میزان ۱۶/۸۶ درصد بهتر شده، عقب‌زدگی ۰/۱۷ متر کاهش یافته و پرتاب سنگ ۴/۲۶ متر افزایش می‌یابد. مقادیر به‌دست آمده از روش برنامه‌ریزی آرمانی نیز برای پارامترهای ضخامت بارسنگ، فاصله چال‌ها در یک ردیف، عمق چال، طول گل‌گذاری، حفاری ویژه و خرج ویژه به ترتیب ۵/۳۳، ۶/۸۴، ۱۷/۱۱، ۷/۳۴، ۰/۳۱ و ۰/۲۱ است. با توجه به مقادیر به‌دست آمده برای اهداف در برنامه‌ریزی آرمانی و مقایسه آن با الگوهای صورت گرفته، به نظر می‌رسد این روش نیز در کنار روش‌های دیگر بتواند در طراحی الگوی انفجار کمک نماید. با توجه به اهمیت خردایش مناسب در معدن گل‌گهر، اولویت اول به خردایش سنگ اختصاص داده می‌شود. بنابراین نتایج این طراحی الگو، خردایش بهینه سنگ در کنار



- [۲۶]. Fulop, Janos; "Introduction to Decision Making Methods", Laboratory of Operations Research and Decision Systems, Computer and Automation Institute, Hungarian Academy of Sciences.
- [27] Asgharpur, M., 2010; *Multi criteria decision making*, Tehran University publication.
- [28] Ghodsipur, Seyed H. 2010; *Multi objective programming*, Amirkabir University of Technology Publication.
- [29] Momeni, M., 2006; *New subjects in operation research*, University of Tehran (Faculty of Management) Publication.
- [30] Kusha Madan Engineering Consultant Company, 2004; *Gol-E-Gohar geology report*.
- [31] Kusha Madan Engineering Consultant Company, 2006; *Gol-E-Gohar tectonic and geostructure report*.
- [32] Kusha Madan Engineering Consultant Company, 2003; *Gol-E-Gohar Exploitation project*, Vol. 1..
- [33] Kusha Madan Engineering Consultant Company, 1997; *Gol-E-Gohar slope stability study preliminary report*.
- [13]. Hansen D. W; 1968; "Drilling and Blasting Techniques for Morrow Point Power Plant", Proceedings. Ninth Symposium of Rock Mechanics, Golden, Colorado, pp347-360.
- [14]. Konya, C. J; 1972; "The Use of Shaped Explosive Charges to Investigate Permeability, Penetration, and Fracture Formation in Coal, Dolomite, and Plexiglas", Ph.D. Dissertation Department of Mining and Petroleum Engineering, University of Missouri at Rolla.
- [15]. Berta. G; 1985; "L, Explosivo strumento di Lavoro" Milano, Italesplosivi.
- [16]. Wilkinson, W.A; Kecojevic, V.J; 2005; "Element of drill-and-blast design and three-dimensional visualization in surface coal mines", Mining engineering 57, PP. 77-82.
- [17] Osanlu, M., 2007; *Surface mining methods*, Amirkabir University of Technology Publication, Vol. 1.
- [18]. Francisco Rodrigues; Lima Juniora; Lauro Osirob; Luiz Cesar; Ribeiro Carpinettia; 2014; "A comparison between Fuzzy AHP and Fuzzy TOPSIS methods to supplier selection", Applied Soft Computing, Volume 21,P.P 194-209.
- [1۹]. Hwang, C.L, Yoon, K; 1981; "Multiple attribute decision making: Method and applications", Springer-Verlag, New York.
- [۲۰]. Charnes, A. Cooper, W. Ferguson, R; 1955; "Optimal estimation of executive compensation by linear programming", Management Science, 1, PP. 138-151.
- [۲۱]. Lee, S.M; 1972; "Goal programming for decision analysis", Auerback, Philadelphia.
- [۲۲]. Ignizio, J.P; 1976; "Goal programming and extensions", Lexington Books, Lexington, MA.
- [23] Azar, A., Rajabalizadeh, A.; 2002; *Applied decision making*, Negah Danesh Publishing.
- [24] Mehregan, M.R.;2007; *Decision making with multiple objectives*; Tehran University publication..
- [۲۵]. Hwang, C. L; Masud, A. S; 1979; "Multiple Objective Decision Making Methods And Applications: A State-of-The Art Survey" Springer-verlag, Berlin.

## پی نوشت

<sup>1</sup> Goal Programming<sup>2</sup> Root Mean Square Error