

## اولویت‌بندی مخاطرات استخراج مکانیزه زغال‌سنگ در روش جبهه‌کار بلند، مطالعه موردی معدن زغال‌سنگ طبس

محمد جوادی<sup>۱</sup>، غلامرضا سعیدی<sup>۲\*</sup>، کوروش شه‌ریار<sup>۳</sup>

۱- دانشجوی دکتری، بخش مهندسی معدن، دانشگاه شهید باهنر کرمان

۲- استادیار، بخش مهندسی معدن، دانشگاه شهید باهنر کرمان

۳- استاد، دانشکده مهندسی معدن و متالورژی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

(دریافت: مهر ۱۳۹۴، پذیرش: خرداد ۱۳۹۵)

### چکیده

استخراج زیرزمینی زغال‌سنگ همواره به عنوان یکی از پرمخاطره‌ترین فعالیت‌های معدنی شناخته می‌شود. خطرات ناشی از وقوع حوادث احتمالی در این معادن می‌تواند باعث صدمات جبران‌ناپذیر جانی، خرابی و از بین رفتن تجهیزات و همچنین ایجاد وقفه در فرآیند تولید معدن شود. به همین دلیل تحلیل ریسک در معادن زغال‌سنگ از اهمیت بالایی برخوردار است. اولین مرحله از یک فرآیند آنالیز ریسک، شناسایی مخاطرات است. در این پژوهش ابتدا مهمترین مخاطرات استخراج مکانیزه زغال‌سنگ، با استفاده از ترکیب روش‌های کتابخانه‌ای و قضاوت متخصصان شناسایی شد. اولویت‌بندی مخاطرات شناسایی شده با استفاده از فازی‌سازی روش تصمیم‌گیری *TOPSIS* با کاربرد معیارهای اصلی احتمال وقوع، شدت پی‌آمد و واکنش و همچنین زیرمعیارهای آسیب‌پذیری و قابلیت شناسایی انجام گرفت. نتایج نشان می‌دهد شدت پی‌آمد با وزن ۰/۴۱۶ و واکنش با وزن ۰/۲۹۳ به ترتیب دارای بیشترین و کمترین میزان تأثیر در رتبه‌بندی مخاطرات استخراج مکانیزه زغال‌سنگ است. کاربرد مدل ارایه شده در معدن طبس نشان می‌دهد ریزش در سقف کارگاه استخراج و ریزش در راهروهای پهنه‌های استخراجی با شاخص شباهت ۰/۸۳۲ و ۰/۸۲۳ به عنوان مهمترین مخاطرات این معدن شناخته می‌شوند. همچنین نشست سطح زمین و هجوم آب‌های زیرزمینی با شاخص شباهت ۰/۴۹۲ و ۰/۴۸۲ دارای کمترین شاخص شباهت در میان مخاطرات شناسایی شده است. به منظور بررسی حساسیت رتبه‌بندی گزینه‌ها به تغییرات وزن شاخص‌ها، یک تحلیل حساسیت نیز انجام شد. نتایج نشان دهنده‌ی عدم حساسیت مدل ارایه شده نسبت به وزن معیارهای تصمیم‌گیری مورد استفاده است.

### کلید واژه‌ها

استخراج زغال‌سنگ، مخاطره، *Fuzzy TOPSIS*، تحلیل حساسیت، معدن زغال‌سنگ طبس

ارجاع به این مقاله:

جوادی، م.، سعیدی، غ.، شه‌ریار، ک.، (۱۳۹۵)، اولویت‌بندی مخاطرات استخراج مکانیزه زغال‌سنگ در روش جبهه‌کار بلند، مطالعه موردی معدن زغال‌سنگ طبس، روش‌های تحلیلی و عددی در مهندسی معدن، ۶(۱۱)، ۳۹-۵۱.

## ۱- مقدمه

دادند. در این پژوهش تکنولوژی کاهش تنش با استفاده از حفاری گمانه جهت کاهش ریسک ریزش ناگهانی زغال در هنگام استخراج یک پهنه جبهه‌کار طولانی ارایه شده است [۶]. قاسمی و همکاران در سال ۲۰۱۲ با تاکید بر روی موضوع کنترل زمین، مهمترین پارامترهای مؤثر بر روی موضوع بازیابی پایه‌ها در معدنکاری زغال را تعیین کرده‌اند. در این تحقیق یک روش جدید جهت تعیین ریسک ناشی از بازیابی پایه ارایه شده است [۷]. در یک پژوهش انجام گرفته توسط عادل بدری<sup>۷</sup> و همکاران در سال ۲۰۱۳، یک رویکرد کاربردی جدید برای مدیریت ریسک در معدنکاری زیرزمینی ارایه شد. این رویکرد بر اساس یک مفهوم جدید تحت عنوان تمرکز مخاطره و *AHP* بنا نهاده شده است [۸]. در سال ۲۰۱۴ پژوهشی با موضوع آنالیز ریسک توسط اوزلم<sup>۸</sup> انجام گرفت. یکی از اهداف اصلی این پژوهش، توسعه مدلی برای پیش بینی شدت پی‌آمد یک مخاطره با استفاده از سه روش مختلف رگرسیون، شبکه عصبی و منطق فازی بود. این روش‌ها در سه معدن زیرزمینی زغال سنگ به کار گرفته شد و با مقایسه نتایج مناسب‌ترین تکنیک بدین منظور انتخاب شد [۹]. علی‌رغم مطالعات زیادی که در طول دهه‌های گذشته بر روی پدیده انفجار سنگ انجام گرفته است، منبع و مکانیزم ایجاد این پدیده کاملاً شناخته شده نیست و به همین دلیل پیش‌بینی آن کار سختی است. به همین دلیل در سال ۲۰۱۵ یک مطالعه توسط کریستوفر<sup>۹</sup> و میکائیل<sup>۱۰</sup> بر روی مسأله انفجار سنگ به انجام رسید. در این پژوهش مهمترین فاکتورهای مؤثر بر روی این پدیده تشریح شده و یک چهارچوب که می‌تواند به منظور ارزیابی ریسک انفجار سنگ مورد استفاده قرار گیرد، ارایه شد [۱۰]. در سال ۲۰۱۵ یک مطالعه بر روی رخدادهای بحرانی در یک عملیات گاززدایی معادن زیرزمینی زغال سنگ<sup>۱۱</sup> به وسیله کروس<sup>۱۲</sup> و همکاران به انجام گرفت. هدف اصلی از انجام این پژوهش تحلیل مکانیزم‌های مؤثر بر روی گاز زدایی به منظور تشخیص خطاهای سیستمی برای جلوگیری و یا کاهش احتمال وقوع مخاطرات احتمالی موجود در عملیات گاز زدایی است [۱۱].

بررسی مطالعات انجام گرفته نشان می‌دهد که در اغلب این پژوهش‌ها، از دو شاخص احتمال وقوع<sup>۱۳</sup> و شدت پی‌آمد<sup>۱۴</sup> استفاده شده است. در اولویت‌بندی مخاطرات یک

در سرتاسر دنیا معدنکاری زیرزمینی یکی از پرمخاطره‌ترین فعالیت‌ها است. وقوع حوادث احتمالی در معادن زیرزمینی زغال سنگ و خطرات ناشی از آن، محیط کاری نا امنی برای کارگران و تجهیزات عملیاتی ایجاد می‌کند. بر اثر این حوادث ممکن است آسیب‌های قابل ملاحظه‌ای شامل مرگ و میر، آسیب‌های جسمانی، خرابی و از بین رفتن تجهیزات و ایجاد وقفه در فرآیند تولید معدن ایجاد شود. این موضوع سبب شده است که مسأله‌ی مربوط به ایمنی در معادن زغال سنگ بیشتر از سایر معادن مورد پژوهش قرار گیرد. ساری<sup>۱</sup> در سال ۲۰۰۲ با استفاده از آنالیزهای آماری که روی اطلاعات مربوط به حوادث معادن زغال سنگ *ELI* و *GLI* کشور ترکیه انجام داد، ریسک‌های معدنکاری را تعیین نمود. وی با استفاده از اطلاعات مربوط به حوادث معادن مزبور در طول سال‌های ۱۹۹۶ تا ۲۰۰۰ میلادی یک روش ارزیابی ریسک طراحی کرد [۱]. جوی<sup>۲</sup> در سال ۲۰۰۴، روش‌های ارزیابی ریسک را در مورد تجهیزات مورد استفاده در استخراج و عملیات معدنکاری مورد بحث قرار داد [۲]. دوزگان و انیشتین<sup>۳</sup> در سال ۲۰۰۴ برای ارزیابی و مدیریت ریسک ریزش سقف در معادن زیرزمینی زغال سنگ در کشور ترکیه، اقدام به محاسبه احتمال وقوع حوادث و نتایج حاصل از آن به روش آماری نمودند. در این تحقیق، ریسک و روش تجزیه و تحلیل تصمیم‌گیری که قبلاً برای سازه‌های مهندسی عمران و ایمنی سد استفاده می‌شد، برای ارزیابی و مدیریت ریسک در ارتباط با ریزش سقف در معادن زغال سنگ زیرزمینی پیشنهاد شد [۳]. کومار<sup>۴</sup> در سال ۲۰۰۹ برای ارزیابی ریسک ریزش سقف معادن زغال سنگ در کشور هندوستان از مدل لجستیک استفاده کرده است. در پژوهش انجام گرفته تلاش شده است تا شدت حوادث ناشی از ریزش سقف بر اساس برخی از پارامترهای کمکی با استفاده از مدل رگرسیون لجستیک باینری پیش‌بینی شود [۴]. ویوک<sup>۵</sup> و همکاران در سال ۲۰۱۱ یک روش برای ارزیابی و مونیتورینگ مخاطرات تکرار شونده در معادن زیرزمینی زغال ارایه کردند [۵]. یائودینگ<sup>۶</sup> و همکاران در سال ۲۰۱۱ یک مطالعه با ترکیب دو رویکرد آزمایش‌های محلی و بررسی‌های عددی برای ارزیابی ریسک ریزش ناگهانی انجام

قطعی و کلاسیک به مجموعه‌های فازی، تعمیم مجموعه مشخصه  $\{0, 1\}$  به تمام اعداد موجود در بازه  $[0, 1]$  است [۱۲]. بدین ترتیب شکل تابع مشخصه به تابع عضویت تغییر یافته و با  $\mu_{\tilde{A}}(x)$  نمایش داده می‌شود. مجموعه فازی  $A$  را میتوان به شکل رابطه ۱ نمایش داد.

$$A = \left\{ \frac{\mu_A(x_1)}{x_1}, \frac{\mu_A(x_2)}{x_2}, \dots, \frac{\mu_A(x_n)}{x_n} \right\} \quad (1)$$

## ۲-۲- اعداد فازی

هنگامیکه مجموعه‌ی مرجع نامحدود باشد، لیست کردن همه اعضا با مقدار عضویت مربوطه غیرممکن است. این‌گونه مجموعه‌های فازی را اعداد فازی می‌نامند. به طور معمول اعداد فازی به صورت مثلثی<sup>۱۶</sup> یا دوزنقه‌ای<sup>۱۷</sup> بیان می‌شوند. یک عدد فازی مثلثی (TFN) به صورت  $\tilde{A} = (a, b, c)$  نمایش داده می‌شود. در این عدد فازی پارامترهای  $a$ ،  $b$  و  $c$  به ترتیب بیانگر کمترین مقدار ممکن، محتمل‌ترین مقدار و بیشترین مقدار ممکن برای عدد مورد نظر هستند و عدد مورد نظر می‌تواند بین  $a$  تا  $c$  تغییر کند. اگر  $a$ ،  $b$  و  $c$  اعدادی قطعی و  $a < b < c$  باشد، مهمترین عملیات جبری بر روی دو عدد فازی مثلثی  $\tilde{A}_1 = (a_1, b_1, c_1)$  و  $\tilde{A}_2 = (a_2, b_2, c_2)$  از روابط ۲ تا ۷ قابل محاسبه است.

$$\tilde{A}_1 + \tilde{A}_2 = (a_1, b_1, c_1) + (a_2, b_2, c_2) = (a_1 + a_2, b_1 + b_2, c_1 + c_2) \quad (2)$$

$$\tilde{A}_1 - \tilde{A}_2 = (a_1, b_1, c_1) - (a_2, b_2, c_2) = (a_1 - a_2, b_1 - b_2, c_1 - c_2) \quad (3)$$

$$\tilde{A}_1 \cdot \tilde{A}_2 = (a_1, b_1, c_1) \cdot (a_2, b_2, c_2) = \begin{cases} (a_1 \cdot a_2, b_1 \cdot b_2, c_1 \cdot c_2) \text{ if } \tilde{A}_1 > 0, \tilde{A}_2 > 0 \\ (a_1 \cdot c_2, b_1 \cdot b_2, c_1 \cdot a_2) \text{ if } \tilde{A}_1 < 0, \tilde{A}_2 > 0 \\ (c_1 \cdot c_2, b_1 \cdot b_2, a_1 \cdot a_2) \text{ if } \tilde{A}_1 < 0, \tilde{A}_2 < 0 \end{cases} \quad (4)$$

$$\frac{\tilde{A}_1}{\tilde{A}_2} = \begin{cases} \left( \frac{a_1}{c_2}, \frac{b_1}{b_2}, \frac{c_1}{a_2} \right) \text{ if } \tilde{A}_1 > 0, \tilde{A}_2 > 0 \\ \left( \frac{c_1}{c_2}, \frac{b_1}{b_2}, \frac{a_1}{a_2} \right) \text{ if } \tilde{A}_1 < 0, \tilde{A}_2 > 0 \\ \left( \frac{c_1}{a_2}, \frac{b_1}{b_2}, \frac{a_1}{c_2} \right) \text{ if } \tilde{A}_1 < 0, \tilde{A}_2 < 0 \end{cases} \quad (5)$$

$$\tilde{A}_1^{-1} = \left( \frac{1}{c_1}, \frac{1}{b_1}, \frac{1}{a_1} \right) \quad (6)$$

عملیات معدنکاری، توانایی و امکانات معدن به منظور واکنش مناسب به مخاطرات پیش رو از اهمیت زیادی برخوردار است و باید مورد توجه جدی قرار گیرد. از طرف دیگر، در مواردی که نیاز به اولویت‌بندی واحدهای تصمیم‌گیری بر اساس اهمیت نسبی آنها وجود داشته باشد، تکنیک‌های تصمیم‌گیری چند شاخصه<sup>۱۵</sup> ابزار مناسبی است. در تحقیق حاضر یک رویکرد جدید به منظور اولویت‌بندی مخاطرات استخراج مکانیزه زغال‌سنگ در روش جبهه‌کار بلند ارایه شده است. در این راستا، ابتدا وزن معیارها و زیرمعیارهای تصمیم‌گیری با استفاده از دانش افراد خبره و با به کارگیری منطق فازی تعیین شد. در نهایت اولویت‌بندی مخاطرات استخراج در معدن زغال‌سنگ مکانیزه طبس به عنوان بزرگترین معدن زغال‌سنگ کشور با به کارگیری مدل تصمیم‌گیری مبتنی بر فازی‌سازی روش TOPSIS انجام گرفته است.

## ۲- مجموعه‌های فازی

### ۲-۱- تئوری فازی

مجموعه فازی به مجموعه‌ای گفته می‌شود که عناصر آن به صورت نسبی عضو این مجموعه‌ها هستند. درجه‌ی عضویت صفر به این معنا است که پارامتر یا عضو مورد نظر در این مجموعه هیچ عضویتی ندارد و اگر این پارامتر صد درصد عضو مجموعه مورد نظر باشد، درجه‌ی عضویت آن یک خواهد بود. در واقع نقطه‌ی عزیمت از مجموعه‌های

$$d_v(\tilde{A}_1, \tilde{A}_2) = \sqrt{\frac{1}{3}[(a_1 - a_2)^2 + (b_1 - b_2)^2 + (c_1 - c_2)^2]} \quad (7)$$

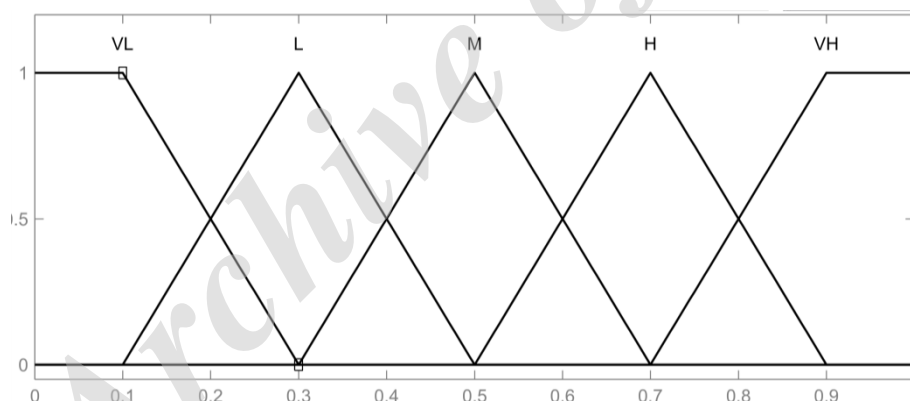
عامیانه بیان می‌شوند. طیف لیکرت<sup>۱۹</sup> یک مقیاس سنجش است که می‌تواند به منظور بیان میزان موافقت با یک شرایط یا وضعیت را بیان کند. در جدول ۱ طیف لیکرت با ۵ سطح همراه با عدد فازی معادل نشان داده شده است. در شکل ۱ و ۲ نمودار سطح عضویت فازی متغیرهای کلامی مورد اشاره نشان داده شده است.

### ۳-۲- متغیرهای کلامی فازی<sup>۱۸</sup>

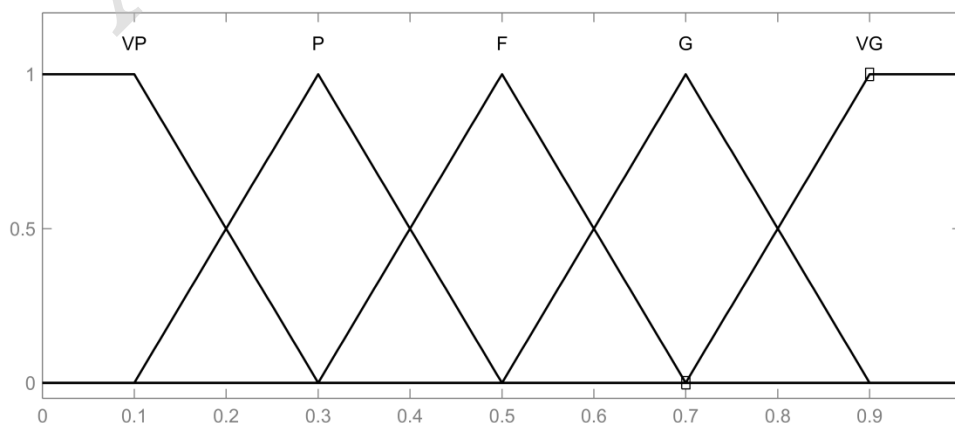
به علت طبیعت فازی تعیین اهمیت معیارهای تصمیم و وزن گزینه‌ها نسبت به معیارهای مختلف، تصمیم‌گیرندگان اغلب قادر نیستند به صراحت نظرشان را با اعداد قطعی اعلام کنند. به همین دلیل در قضاوت‌هایشان استفاده از متغیرهای کلامی را به جای یک عدد ثابت ترجیح می‌دهند. متغیرهای کلامی فازی متغیرهایی هستند که با زبان

جدول ۱: تابع عضویت متغیرهای کلامی طیف ۵ نقطه‌ای لیکرت

اهمیت		رتبه (وضعیت)	
عدد فازی	متغیر کلامی	عدد فازی	متغیر کلامی
(۰/۳، ۰/۱، ۰)	خیلی کم	(۰/۳، ۰/۱، ۰)	خیلی ضعیف
(۰/۵، ۰/۳، ۰/۱)	کم	(۰/۵، ۰/۳، ۰/۱)	ضعیف
(۰/۷، ۰/۵، ۰/۳)	متوسط	(۰/۷، ۰/۵، ۰/۳)	متوسط
(۰/۹، ۰/۷، ۰/۵)	زیاد	(۰/۹، ۰/۷، ۰/۵)	خوب
(۱، ۰/۹، ۰/۷)	خیلی زیاد	(۱، ۰/۹، ۰/۷)	خیلی خوب



شکل ۱: متغیرهای کلامی برای تعیین وزن معیارهای تصمیم‌گیری



شکل ۲: متغیرهای کلامی برای تعیین رتبه‌ی گزینه‌های تصمیم‌گیری

گزینه‌ها، باید در اولین گام، ماتریس تصمیم‌گیری فازای به صورت زیر تشکیل شود.

$$\begin{bmatrix} C_1 & C_2 & \dots & C_n \\ \tilde{x}_{11} & \tilde{x}_{12} & \dots & \tilde{x}_{1n} \\ \tilde{x}_{21} & \tilde{x}_{22} & \dots & \tilde{x}_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \tilde{x}_{m1} & \tilde{x}_{m2} & \dots & \tilde{x}_{mn} \end{bmatrix} \begin{matrix} A_1 \\ A_2 \\ \vdots \\ A_m \end{matrix}$$

با توجه به استفاده از اعداد فازای مثلثی،  
 $\tilde{x}_{ij} = (a_{ij}, b_{ij}, c_{ij})$  عملکرد گزینه  $i$ ام در رابطه با معیار  $j$  ام است.

برخلاف روش شباهت به گزینه ایده‌ال کلاسیک که از روش‌های پیچیده برای قابل مقایسه کردن معیارهای مختلف استفاده می‌شود، در این روش از تغییر مقیاس خطی به منظور بی‌مقیاس کردن معیارها استفاده می‌شود. بدین ترتیب اگر از اعداد فازای مثلثی استفاده شود، درایه‌های ماتریس تصمیم‌بی‌مقیاس برای معیارهای مثبت و منفی به ترتیب از روابط ۸ و ۹ به دست خواهد آمد.

$$\tilde{r}_{ij}^+ = \left( \frac{a_{ij}}{c_j^+}, \frac{b_{ij}}{c_j^+}, \frac{c_{ij}}{c_j^+} \right) \quad (8)$$

$$\tilde{r}_{ij}^- = \left( \frac{a_j^-}{c_{ij}}, \frac{a_j^-}{b_{ij}}, \frac{a_j^-}{a_{ij}} \right) \quad (9)$$

به گونه‌ایی که در این روابط  $c_j^+$  حداکثر مقدار در میان مقادیر  $c_{ij}$  و  $a_j^+$  کمترین مقدار در میان مقادیر  $a_{ij}$  است. بنابراین ماتریس بی‌مقیاس شده که با  $\tilde{R}$  نمایش داده می‌شود، از رابطه‌ی ۱۰ به دست می‌آید.

$$\tilde{R} = [\tilde{r}_{ij}]_{m \times n} \quad (10)$$

وزن معیارهای مورد استفاده در فرآیند تصمیم‌گیری از رابطه‌ی ۱۱ به دست می‌آید.

$$W = (\tilde{W}_1, \tilde{W}_2, \dots, \tilde{W}_n) \quad (11)$$

به گونه‌ایی که در این رابطه  $\tilde{W}_j$  وزن معیار  $j$ ام است. همانگونه که پیش‌تر اشاره شد معیارهای مختلف دارای میزان اهمیت متفاوتی در فرآیند تصمیم‌گیری هستند. به منظور لحاظ نمودن وزن معیارهای مورد استفاده در فرآیند تصمیم‌گیری، ماتریس تصمیم‌گیری فازای وزن‌دار ایجاد می‌شود. این ماتریس از حاصلضرب ضریب اهمیت هر معیار در ماتریس بی‌مقیاس شده فازای به صورت رابطه‌ی ۱۲ به دست می‌آید.

$$\tilde{V}_{ij} = \tilde{r}_{ij} \cdot \tilde{W}_{ij} \quad (12)$$

### ۳- تصمیم‌گیری با فازای‌سازی روش TOPSIS

به طور کلی مسایل تصمیم‌گیری چند معیاره به دو دسته روش‌های کلاسیک و فازای دسته‌بندی می‌شوند. در روش‌های تصمیم‌گیری چند معیاره کلاسیک، میزان تأثیر معیارهای مختلف بر فرآیند تصمیم‌گیری با استفاده از مفاهیم ریاضی محاسبه می‌شود [۱۳]. همانگونه که در بخش قبل نیز اشاره شد، بسیاری از پارامترها را نمی‌توان با منطق ریاضی کلاسیک بیان نمود. همچنین در بعضی شرایط در مورد کمیت‌های مورد استفاده در تصمیم‌گیری، ابهام به معنای عدم اطلاع کافی در مورد کمیت‌ها و عدم قطعیت به معنای عدم اطمینان کافی در مورد مسایل وجود دارد. در این‌گونه موارد در صورتی که تصمیم‌گیری با استفاده از داده‌های قطعی صورت گیرد، احتمالاً نتایج به دست آمده چندان دقیق نبوده و احتمال وجود خطا در تصمیم‌گیری وجود خواهد داشت. بنابراین در مدل‌های تصمیم‌گیری که داده‌های آن دارای ابهام و عدم قطعیت هستند، می‌توان عدم قطعیت موجود در فرآیند تصمیم‌گیری را با کاربرد تئوری فازای مدیریت کرد [۱۲-۱۴].

روش تصمیم‌گیری TOPSIS اولین بار در سال ۱۹۸۱ توسط هوانگ و یون<sup>۲۰</sup> ارائه شده است [۱۳]. این مدل یکی از بهترین روش‌های تصمیم‌گیری چند شاخصه است. در این روش  $m$  گزینه به وسیله  $n$  شاخص مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. اساس این روش بر این نکته استوار است که گزینه انتخابی، باید کمترین فاصله را با راه حل ایده‌آل مثبت (بهترین حالت ممکن) و بیشترین فاصله را با راه حل ایده‌آل منفی (بدترین حالت ممکن) داشته باشد [۱۴، ۱۵]. در سال‌های اخیر با بهره‌گیری از نظریه‌ی مجموعه‌های فازای، مدل‌های TOPSIS فازای زیادی توسعه داده شده است. برای حل مدل‌های TOPSIS فازای می‌توان از انواع اعداد فازای استفاده کرد که با توجه به نوع عدد فازای مورد نظر، محاسبات مدل تغییر می‌یابد. در ادامه روش حل مدل TOPSIS فازای که توسط چن<sup>۲۱</sup> در سال ۲۰۰۰ ارائه شد، توضیح داده شده است [۱۸].

همانند سایر روش‌های تصمیم‌گیری چند شاخصه، در این روش تصمیم‌گیری نیز با توجه به تعداد معیارها و

بنابراین ماتریس تصمیم‌فازی وزن دار به صورت زیر خواهد بود:

$$\tilde{V} = \begin{bmatrix} \tilde{v}_{11} & \tilde{v}_{12} & \cdots & \tilde{v}_{1n} \\ \tilde{v}_{21} & \tilde{v}_{22} & \cdots & \tilde{v}_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \tilde{v}_{m1} & \tilde{v}_{m2} & \cdots & \tilde{v}_{mn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} w_1 \tilde{r}_{11} & w_2 \tilde{r}_{12} & \cdots & w_n \tilde{r}_{1n} \\ w_1 \tilde{r}_{21} & w_2 \tilde{r}_{22} & \cdots & w_n \tilde{r}_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ w_1 \tilde{r}_{m1} & w_2 \tilde{r}_{m2} & \cdots & w_n \tilde{r}_{mn} \end{bmatrix}$$

خواهند می‌گیرند. شاخص شباهت از رابطه ۱۹ قابل محاسبه است.

$$CC_i = \frac{d_i^-}{d_i^+ + d_i^-}, i=1,2,\dots,m \quad (19)$$

#### ۴- کاربرد مدل پیشنهادی

##### ۴-۱- معدن زغال‌سنگ طبس

ناحیه پروده با وسعتی در حدود ۱۲۰۰ کیلومتر مربع در ۷۵ کیلومتری جنوب شهرستان طبس قرار گرفته است. معدن شماره طبس در ناحیه پروده و بر روی لایه CI طراحی شده است. ضخامت روباره در این معدن از ۱۰۰ تا ۶۰۰ متر متغیر است و لایه مورد اشاره با روش جبهه‌کار بلند مکانیزه استخراج می‌شود. بر اساس طراحی انجام شده، طول کارگاه در اولین پهنه ۲۰۰ متر و در بقیه پهنه‌ها ۲۲۰ متر است. طول پهنه‌های استخراجی نیز در حدود یک کیلومتر و گاهی بیشتر است که به شیوه پسرو استخراج می‌شوند. شکل ۴ نمایی از طرح پهنه‌های معدن زغال‌سنگ طبس را نشان می‌دهد [۱۹].

گام بعدی در حل یک مسأله با استفاده از این روش تصمیم‌گیری، یافتن حل ایده‌آل فازی<sup>۲۲</sup> و حل ضد ایده‌آل فازی<sup>۲۳</sup> است. این دو پارامتر با استفاده از روابط شماره ۱۳ و ۱۴ به دست می‌آیند.

$$A^+ = \{\tilde{v}_1^+, \tilde{v}_2^+, \dots, \tilde{v}_n^+\} \quad (13)$$

$$A^- = \{\tilde{v}_1^-, \tilde{v}_2^-, \dots, \tilde{v}_n^-\} \quad (14)$$

مقادیر  $\tilde{v}_i^+$  و  $\tilde{v}_i^-$  که به ترتیب معرف بهترین و بدترین مقادیر  $i$  از بین تمام گزینه‌ها هستند از روابط ۱۵ و ۱۶ به دست می‌آیند.

$$\tilde{v}_j^+ = \max \{\tilde{v}_{ij}^+, i=1,2,\dots,m, j=1,2,\dots,n\} \quad (15)$$

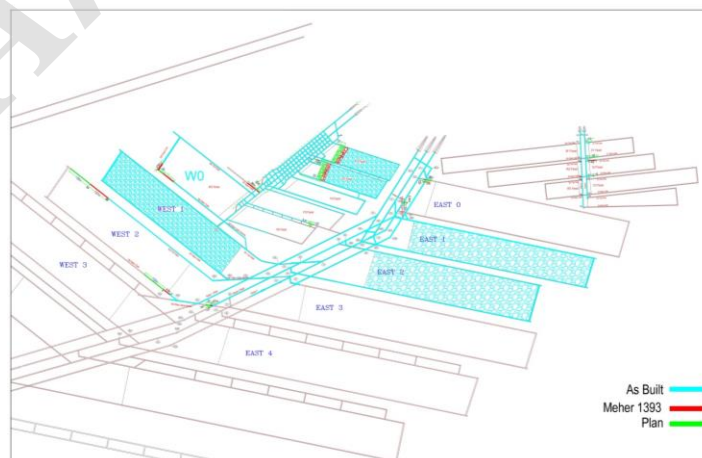
$$\tilde{v}_j^- = \min \{\tilde{v}_{ij}^-, i=1,2,\dots,m, j=1,2,\dots,n\} \quad (16)$$

فاصله‌ی گزینه‌های مختلف از حل ایده‌آل و ضد ایده‌آل فازی نیز با استفاده از روابط ۱۷ و ۱۸ قابل محاسبه است.

$$d_i^+ = \sum_{j=1}^n d(\tilde{v}_{ij}, \tilde{v}_j^+), i=1,2,\dots,m \quad (17)$$

$$d_i^- = \sum_{j=1}^n d(\tilde{v}_{ij}, \tilde{v}_j^-), i=1,2,\dots,m \quad (18)$$

در نهایت به منظور رتبه‌بندی نهایی گزینه‌ها باید شاخص شباهت محاسبه شود. پس از محاسبه‌ی این شاخص، گزینه‌های با شاخص شباهت بیشتر در اولویت قرار



شکل ۳: نمایی از طرح پهنه‌های معدن زغال‌سنگ طبس [۱۹]

۴-۲- شناسایی مخاطرات معدن زغال‌سنگ طبس

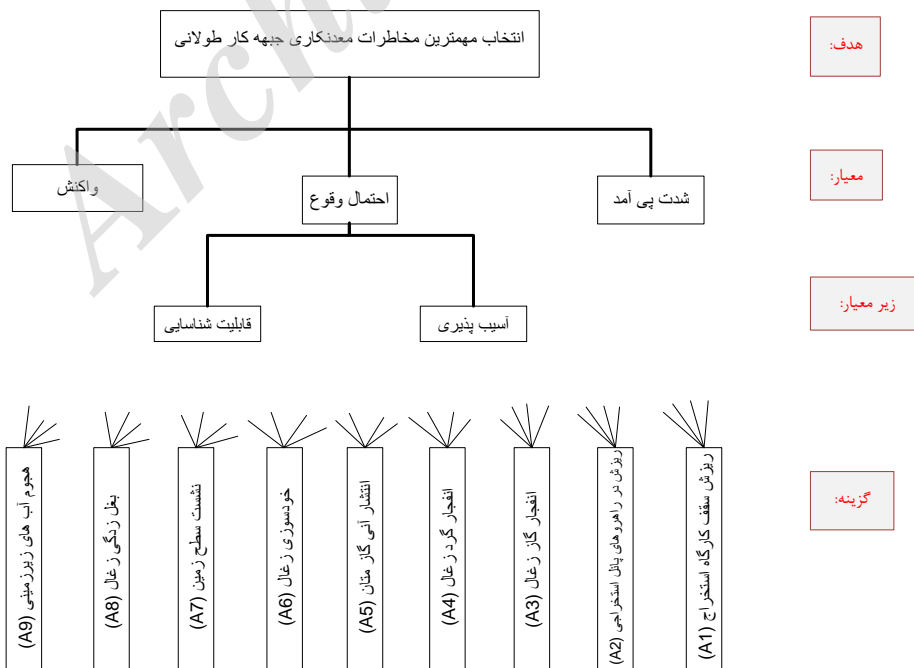
در فرآیند آنالیز ریسک گام اول شناسایی مخاطرات است. بدین معنا که مخاطرات با احتمال وقوع و پی‌آمد بالا، باید شناسایی شوند. عدم شناسایی صحیح مخاطرات می‌تواند منجر به وقوع حوادث در آینده فعالیت معدنکاری شود. با توجه به پیچیده بودن فرآیند شناسایی ریسک باید تلاش کرد در این زمینه تا حد امکان ساده‌سازی صورت گیرد. برای شناسایی ریسک‌های یک پروژه روش‌های گوناگونی مانند ساختار شکست ریسک‌ها<sup>۲۴</sup>، نمودار علت و معلول یا استخوان ماهی<sup>۲۵</sup>، استفاده از چک لیست‌ها<sup>۲۶</sup>، استفاده از قضاوت متخصصان و کارکنان درگیر پروژه، استفاده از روش کتابخانه‌ای و روش‌های ایده‌پردازی گروهی (طوفان فکری، تکنیک دلفی و ...) وجود دارد [۲۰].

در یک نگاه کلی مخاطرات مربوط به معدنکاری به سه دسته مخاطرات عملیاتی روزانه، مخاطرات مربوط به شرایط محیطی معدن و مخاطرات مربوط به روش معدنکاری تقسیم‌بندی می‌شود [۲۱]. در این تحقیق هدف رتبه‌بندی مهمترین مخاطرات معدن زیرزمینی زغال‌سنگ طبس که با استفاده از روش جبهه‌کار بلند مکانیزه استخراج می‌شود، است. به منظور شناسایی مهمترین مخاطرات از ترکیب روش‌های مطالعات کتابخانه‌ای و قضاوت متخصصین و کارکنان درگیر پروژه استفاده شده است. مهمترین

مخاطرات مربوط به شرایط محیطی معدن روش معدنکاری معدن زیرزمینی طبس که در این تحقیق مورد استفاده قرار گرفته است، شامل ریزش سقف جبهه‌کار استخراج، اشتعال خود به خود زغال، انتشار آبی گاز متان، هجوم آب‌های زیرزمینی، انفجار گرد و گاز زغال، ریزش در راهروهای پهنه استخراجی، ریزش ناگهانی زغال در گوشه‌های جبهه‌کار (بغل‌زدگی زغال) و نشست سطح زمین می‌شود.

۴-۳- ساختار سلسله مراتبی حل مسأله

به منظور اولویت‌بندی مخاطرات استخراج مکانیزه زغال‌سنگ، ابتدا ساختار سلسله مراتبی حل مسأله تعریف شده است. عناصر تصمیم شامل شاخص‌های تصمیم‌گیری و گزینه‌های تصمیم است. در واقع فرآیند تحلیل مورد نظر، نیازمند شکستن مسأله با چندین شاخص به سلسله مراتبی از سطوح است. به عبارت دیگر ساختار سلسله مراتبی یک نمایش گرافیکی از یک مسأله‌ی پیچیده واقعی است. در رأس یک ساختار سلسله مراتبی، هدف کلی مسأله و در سطوح بعدی، معیارها و گزینه‌ها قرار دارند. بطور کلی می‌توان این‌گونه بیان نمود که روش ساختن یک سلسله مراتبی به نوع تصمیمی که باید اتخاذ شود، بستگی دارد. ساختار سلسله مراتبی ارائه شده به منظور اولویت‌بندی مخاطرات در شکل ۴ نشان داده شده است.



شکل ۴: ساختار سلسله مراتبی مورد استفاده در فرآیند اولویت‌بندی مخاطرات استخراج مکانیزه زغال‌سنگ

تعریف می‌شود. در این پژوهش معیارهای احتمال وقوع، شدت پی‌آمد و آسیب‌پذیری به عنوان معیارهای منفی در نظر گرفته شده است. همچنین فاکتورهای واکنش و قابلیت شناسایی به عنوان معیارهای مثبت تعریف شده است. در پایین‌ترین سطح مدل ارزیابی شده، مهمترین مخاطرات شناسایی شده که در بخش ۴-۲ به آن اشاره شد، آورده شده است.

#### ۴-۴- رتبه‌بندی مخاطرات

بعد از تشکیل ساختار سلسله مراتبی حل مسئله (شکل ۴)، نوبت به حل مدل با استفاده از دانش افراد خبره است. در این مرحله سعی شده است از دانش اساتید دانشگاه و تجربه‌ی مدیران و کارکنان فعال بخش معدنکاری جبهه‌کار طولانی استفاده شود. در ادامه، مراحل رتبه‌بندی مخاطرات شناسایی شده، تشریح شده است.

گام اول تعیین وزن معیارهای مورد استفاده است. بدین منظور پرسشنامه‌ای تهیه و در اختیار افراد خبره قرار گرفت. افراد خبره نیز نظرات خود را بر اساس متغیرهای کلامی ارزیابی شده در جدول ۱ و کل ۱ بیان کردند. نظرات افراد خبره در خصوص اهمیت معیارها و زیرمعیارها در جدول ۲ ارزیابی شده است.

جدول ۲: نظرات افراد خبره در خصوص اهمیت معیارها و زیرمعیارهای تصمیم‌گیری

معیار و زیرمعیار تصمیم‌گیرنده	احتمال وقوع (C <sub>1</sub> )	قابلیت شناسایی (C <sub>3</sub> )	آسیب‌پذیری (C <sub>4</sub> )	شدت پی‌آمد (C <sub>2</sub> )	واکنش (C <sub>5</sub> )
DM <sub>1</sub>	M	H	H	VH	H
DM <sub>2</sub>	M	M	VH	VH	H
DM <sub>3</sub>	H	H	M	VH	M
DM <sub>4</sub>	VH	H	M	VH	M
DM <sub>5</sub>	M	H	M	VH	H
DM <sub>6</sub>	M	H	H	VH	H
DM <sub>7</sub>	M	H	H	VH	H
DM <sub>8</sub>	H	H	H	VH	L
DM <sub>9</sub>	H	H	H	VH	H

تئوری مجموعه‌های فازی مفید است. در یک محیط تصمیم‌گیری گروهی با  $K$  نفر عضو، میزان اهمیت معیارهای مورد نظر را می‌توان با استفاده از رابطه‌ی ۲۰ محاسبه نمود.

ساختار حل مسئله دارای ۴ سطح است. هدف اصلی مسئله که در بالاترین بخش از ساختار نشان داده شده، انتخاب مهمترین مخاطرات در استخراج مکانیزه‌ی زغال‌سنگ است. بدین منظور، علاوه بر معیارهای احتمال وقوع<sup>۲۷</sup> و شدت پی‌آمد<sup>۲۸</sup> از معیار واکنش نیز استفاده شده است. احتمال به وقوع پیوستن یک رخداد که می‌تواند سبب ایجاد پیامدهای ناگوار شود، احتمال وقوع نامیده می‌شود. این معیار تابعی از دو فاکتور آسیب‌پذیری<sup>۲۹</sup> و قابلیت شناسایی<sup>۳۰</sup> است، یعنی:

$$Probability = f(Vulnerability, Detectability)$$

آسیب‌پذیری به هر وضعی که باعث تبدیل یک مخاطره‌ی بالقوه به یک حادثه شود، اطلاق می‌شود. آسیب‌پذیری می‌تواند ناشی از ضعف‌های طراحی، مدیریت، در نظر نگرفتن قوانین و مقررات و ... باشد. فاکتور قابلیت شناسایی به عنوان توانایی شناسایی و حذف مخاطرات احتمالی تعریف می‌شود. این دو فاکتور در سطح سوم ساختار و به عنوان زیر معیارهای حل مسئله در نظر گرفته شده است. شدت پی‌آمد نیز به عنوان نتایج محتمل یک رویداد تعریف می‌شود. واکنش نیز در مقابل یک مخاطره به عنوان توانایی اعمال یک پاسخ مناسب به منظور کاهش و یا محدود نمودن اثرات منفی یک مخاطره بعد از وقوع آن

همانگونه که پیش‌تر نیز اشاره شد، در مواقعی که در رابطه‌ی میان معیارهای موجود و یا گزینه‌های مختلف، عدم قطعیت وجود دارد و این روابط در قالب اعداد قطعی قابل بیان نیستند، استفاده از تصمیم‌گیری گروهی با کاربرد



عدد فازی مثلثی  $\tilde{R}_i$  را می‌توان از رابطه‌ی ۲۱ به دست آورد.

$$BNP_i = \frac{[(UR_i - LR_i) + (MR_i - LR_i)]}{3} + LR_i \quad (21)$$

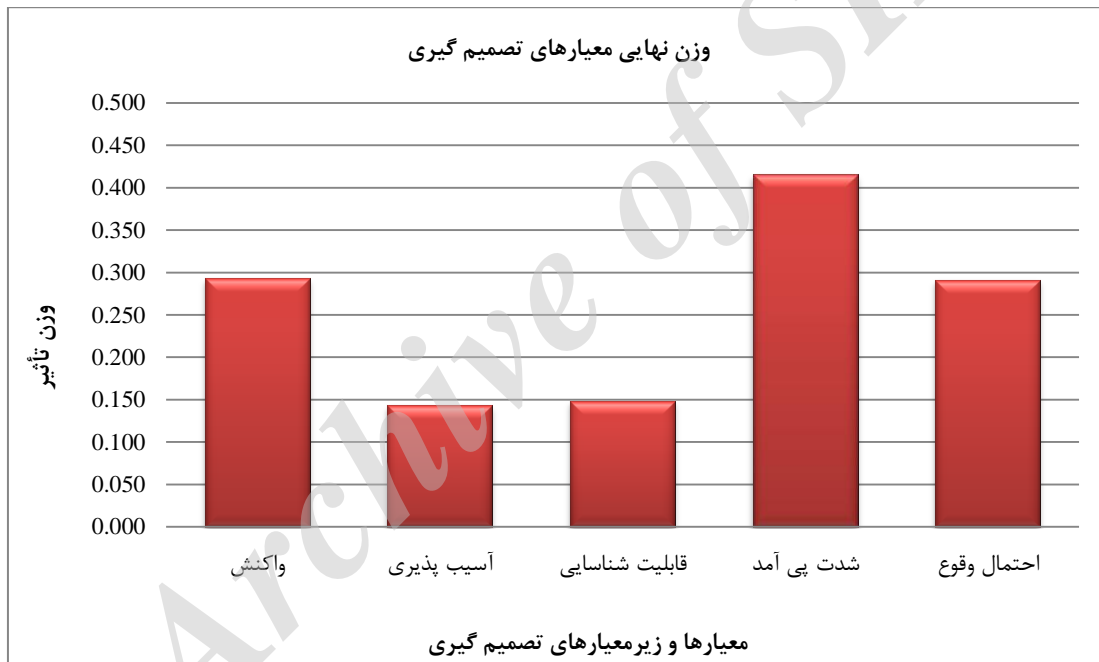
وزن نهایی معیارها و زیرمعیارهای فرآیند تصمیم‌گیری در جدول ۳ و شمای گرافیکی آن نیز در شکل ۵ نشان داده شده است.

$$\tilde{W}_{ij} = \frac{1}{k} [\tilde{W}_{ij}^1 + \tilde{W}_{ij}^2 + \dots + \tilde{W}_{ij}^k] \quad (20)$$

در این پژوهش به منظور تبدیل اعداد فازی به اعداد غیرفازی (قطعی) از روش مرکز سطح<sup>۳۱</sup> استفاده شده است. این روش یک روش ساده و بسیار فراگیر است که بدین منظور مورد استفاده قرار می‌گیرد و بهترین مقدار غیر فازی ساخته شده<sup>۳۲</sup> (BNP) اعداد فازی را تولید می‌کند. مقدار

جدول ۳: وزن معیارها و زیرمعیارهای مورد استفاده در فرآیند تصمیم‌گیری

معیار	وزن کلی	زیرمعیار	وزن محلی	وزن نهایی
احتمال وقوع	۰/۲۹۱	قابلیت شناسایی	۰/۵۰۳	۰/۱۴۸
شدت پی آمد	۰/۴۱۶	آسیب‌پذیری	۰/۴۹۷	۰/۱۴۳
واکنش	۰/۲۹۳	-	-	۰/۴۱۶
		-	-	۰/۲۹۳



شکل ۵: وزن معیارها و زیرمعیارهای مورد استفاده در فرآیند تصمیم‌گیری

با استفاده از رابطه‌ی ۲۲ محاسبه کرد. بدین ترتیب ماتریس تصمیم فازی اولیه (جدول ۴) تشکیل می‌شود.

$$\tilde{x}_{ij} = \frac{1}{k} [x_{ij}^1 + x_{ij}^2 + \dots + x_{ij}^k] \quad (22)$$

پس از تشکیل ماتریس تصمیم فازی، بی‌مقیاس‌سازی آن با استفاده از رابطه‌های ۸ و ۹ انجام می‌شود. در حل این مدل تصمیم‌گیری، واکنش و قابلیت شناسایی به عنوان معیارهای مثبت در نظر گرفته شده‌اند. معیارهای مثبت به معیارهایی اطلاق می‌شود که افزایش مقدار آنها بهتر است.

همانگونه که نتایج نیز نشان می‌دهد، شدت پی‌آمد با وزن ۰/۴۱۶ دارای بیشترین میزان تأثیر و واکنش با وزن ۰/۲۹۳ دارای کمترین وزن در رتبه‌بندی مخاطرات استخراج مکانیزه زغال سنگ است. بعد از تعیین وزن معیارهای تصمیم‌گیری، افراد خبره با استفاده از متغیرهای کلامی آرایه شده در جدول ۱ و شکل ۲ نظر خود را در خصوص رتبه‌ی گزینه‌های تصمیم‌ی اعلام کردند. با توجه به استفاده از نظرات افراد مختلف و تصمیم‌گیری در محیط گروهی، رتبه‌ی گزینه‌ها را می‌توان

ضرب وزن نهایی معیارهای تصمیم در ماتریس بی‌مقیاس شده، ماتریس تصمیم بی‌مقیاس شده‌ی وزن‌دار به دست می‌آید (جدول ۵).

از طرف دیگر شدت پی‌آمد و آسیب‌پذیری به عنوان معیارهای منفی در نظر گرفته شده‌اند، به گونه‌ای که کم بودن مقدار معیارهای منفی برای یک گزینه بهتر است. با

جدول ۴: ماتریس تصمیم فازی مورد استفاده جهت اولویت‌بندی مخاطرات استخراج مکانیزه زغال‌سنگ

معیار	احتمال وقوع	شدت پی‌آمد	قابلیت شناسایی	آسیب‌پذیری	واکنش	گزینه
ریزش سقف کارگاه	۰/۶۰۰	۰/۸۰۰	۰/۹۳۳	۰/۴۰۰	۰/۶۰۰	۰/۱۸۶۷
ریزش راهروهای پانل	۰/۲۳۳	۰/۴۰۰	۰/۶۰۰	۰/۳۶۷	۰/۴۶۷	۰/۱۸۶۷
انفجار گاز زغال سنگ	۰/۱۳۳	۰/۳۳۳	۰/۵۳۳	۰/۵۶۷	۰/۳۶۷	۰/۱۷۶۷
انفجار گرد زغال سنگ	۰/۱۶۷	۰/۳۶۷	۰/۵۶۷	۰/۴۶۷	۰/۳۶۷	۰/۱۸۱۷
انتشار آبی گاز متان	۰/۵۳۳	۰/۷۳۳	۰/۹۰۰	۰/۴۶۷	۰/۳۶۷	۰/۱۷۶۷
خود سوزی زغالسنگ	۰/۱۵۰	۰/۳۳۳	۰/۵۳۳	۰/۵۰۰	۰/۷۰۰	۰/۱۴۰۰
نشست سطح زمین	۰/۴۳۳	۰/۶۶۳	۰/۸۱۷	۰/۲۵۰	۰/۴۳۳	۰/۱۶۶۳
بغل زدگی	۰/۲۰۰	۰/۴۰۰	۰/۶۰۰	۰/۱۸۳	۰/۳۶۷	۰/۱۵۶۷
هجوم آب‌های زیرزمینی	۰/۲۳۳	۰/۴۳۳	۰/۶۳۳	۰/۳۶۷	۰/۵۶۷	۰/۱۵۳۳

جدول ۵: ماتریس تصمیم فازی بی‌مقیاس شده وزن‌دار جهت اولویت‌بندی مخاطرات استخراج مکانیزه زغال‌سنگ

معیار	احتمال وقوع	شدت پی‌آمد	قابلیت شناسایی	آسیب‌پذیری	واکنش	گزینه
ریزش سقف کارگاه	۰/۰۴۲	۰/۰۴۹	۰/۰۶۵	۰/۰۷۹	۰/۰۲۲۵	۰/۲۹۳
ریزش راهروهای پانل	۰/۰۶۵	۰/۰۹۷	۰/۱۶۶	۰/۰۸۹	۰/۰۲۲۵	۰/۲۹۳
انفجار گاز زغال	۰/۰۷۳	۰/۱۱۷	۰/۲۹۱	۰/۰۴۰	۰/۱۹۲	۰/۲۵۹
انفجار گرد زغال	۰/۰۶۹	۰/۱۰۶	۰/۲۳۳	۰/۰۴۲	۰/۰۲۱۴	۰/۲۷۶
انتشار آبی گاز متان	۰/۰۴۳	۰/۰۷۳	۰/۱۵۳	۰/۰۴۲	۰/۰۱۹۲	۰/۲۵۹
خود سوزی زغالسنگ	۰/۰۷۳	۰/۱۱۷	۰/۲۵۹	۰/۰۳۶	۰/۰۱۷	۰/۱۳۵
نشست سطح زمین	۰/۰۴۸	۰/۰۶۱	۰/۰۹۰	۰/۰۴۵	۰/۰۱۴۷	۰/۲۱۴
بغل زدگی	۰/۰۶۵	۰/۰۹۷	۰/۲۰۳	۰/۰۴۰	۰/۰۱۲۴	۰/۱۹۲
هجوم آب‌های زیرزمینی	۰/۰۶۱	۰/۰۹۰	۰/۱۶۶	۰/۰۴۲	۰/۰۱۱۳	۰/۱۸۰

جدول ۶: فاصله از حل ایده‌آل و ضد ایده‌آل گزینه‌های تصمیم‌گیری

گزینه	فاصله	$d_i^+$	$d_i^-$
ریزش سقف کارگاه	۰/۰۴۵	۰/۲۲۴	
ریزش راهروهای پانل	۰/۰۳۹	۰/۱۸۲	
انفجار گاز زغال	۰/۱۲۵	۰/۱۸۹	
انفجار گرد زغال	۰/۱۲۷	۰/۱۸۴	
انتشار آبی گاز متان	۰/۱۲۱	۰/۲۱۸	
خود سوزی زغالسنگ	۰/۱۵۷	۰/۱۸۱	
نشست سطح زمین	۰/۱۲۳	۰/۱۱۹	
بغل زدگی	۰/۱۵۸	۰/۱۶۳	
هجوم آب‌های زیرزمینی	۰/۱۷۳	۰/۱۶۱	

در حل مدل ارایه شده، بهترین مقادیر برای معیارهای مثبت، بزرگ‌ترین مقادیر و برای معیارهای منفی، کوچک‌ترین مقادیر است و برای بدترین‌ها بر عکس، یعنی برای معیارهای مثبت، کوچک‌ترین مقادیر و برای معیارهای منفی بزرگ‌ترین مقادیر است. فاصله‌ی هر مخاطره از حل ایده‌آل و ضد ایده‌آل با توجه به هر کدام از معیارهای تصمیم با استفاده از روابط ۱۹ و ۲۰ قابل محاسبه است. نتایج در جدول ۶ نشان داده شده است.

در نهایت مقدار شاخص شباهت با استفاده از رابطه‌ی ۲۱ محاسبه می‌شود. گزینه‌های مورد بررسی با توجه به شاخص شباهت رتبه‌بندی می‌شوند. گزینه‌های دارای شاخص شباهت بیش تر در رتبه بالاتری قرار می‌گیرند. نتایج رتبه‌بندی گزینه‌ها در جدول ۷ نشان داده شده است.

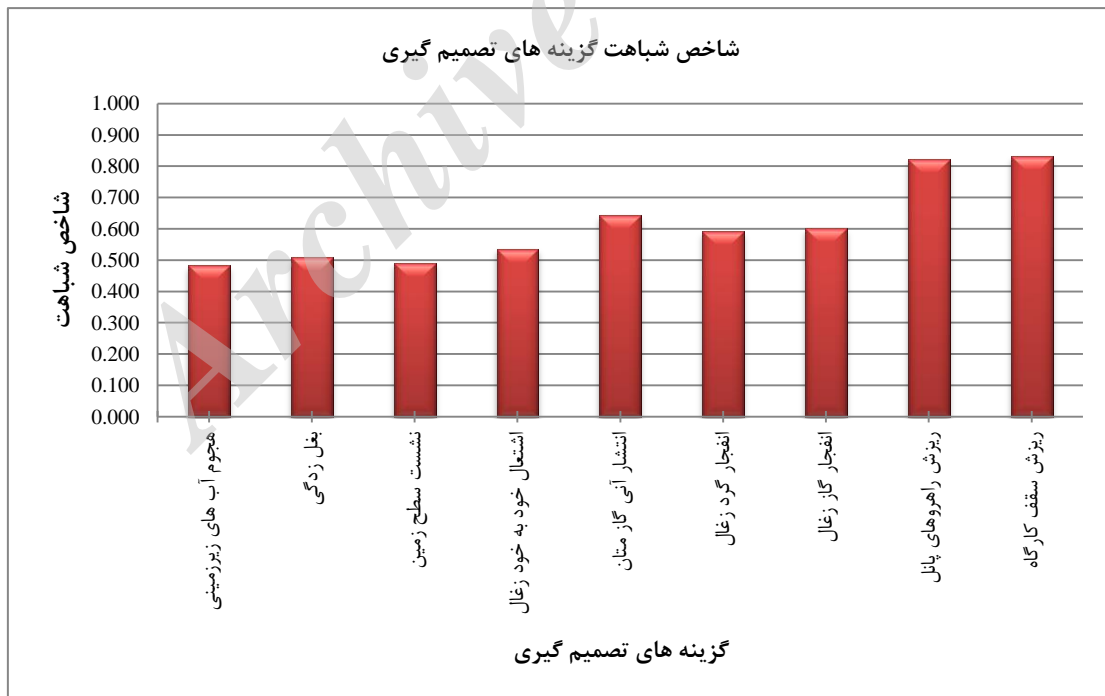
جدول ۷: شاخص شباهت و مخاطرات معدنکاری در استخراج مکانیزه در معدن زغال سنگ طبس

رتبه	شاخص شباهت	گزینه
۱	۰/۸۳۲	ریزش سقف کارگاه
۲	۰/۸۲۳	ریزش راهروهای پانل
۴	۰/۶۰۲	انفجار گاز زغال
۵	۰/۵۹۲	انفجار گرد زغال
۳	۰/۶۴۳	انتشار آبی گاز متان
۶	۰/۵۳۶	خود سوزی زغالسنگ
۸	۰/۴۹۲	نشست سطح زمین
۷	۰/۵۰۸	بغل زدگی
۹	۰/۴۸۲	هجوم آب‌های زیرزمینی

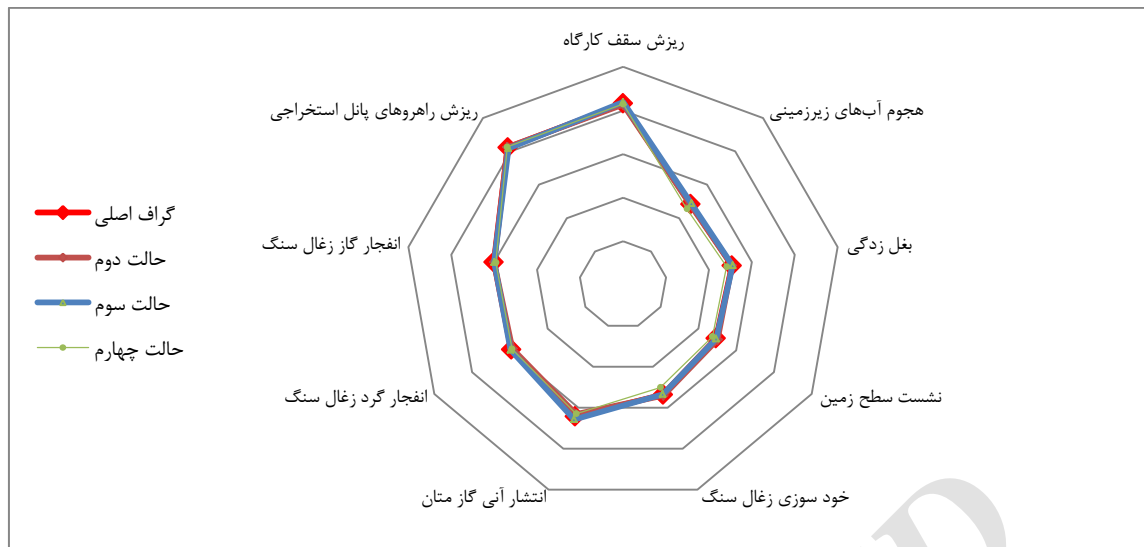
همانگونه که مشاهده می‌شود ریزش در سقف کارگاه استخراج و ریزش در راهروهای پهنه‌های استخراجی دارای بیشترین مقدار شاخص شباهت هستند و به عنوان مهمترین مخاطرات معدنکاری مکانیزه در معدن طبس شناخته می‌شوند. رتبه‌بندی گزینه‌های مورد بررسی به صورت گرافیکی در شکل ۶ نشان داده شده است.

## ۴-۵- آنالیز حساسیت

به منظور بررسی حساسیت رتبه‌بندی گزینه‌ها به تغییرات وزن شاخص‌ها، یک تحلیل حساسیت نیز انجام گرفته است. بدین منظور حالت‌های مختلفی در نظر گرفته شده که ممکن است باعث تغییر در اولویت‌بندی گزینه‌های محتمل شود. برای انجام تحلیل حساسیت مورد نظر، علاوه بر حالت اصلی، ۴ حالت مختلف دیگر نیز در نظر گرفته شده است. بدین ترتیب که در هر حالت ضمن ثابت در نظر گرفتن وزن ۴ معیار، وزن معیار دیگر به اندازه یک متغیر کلامی برای هر فرد تصمیم‌گیرنده افزایش یافته است. به عنوان مثال در اولین مرحله تنها وزن معیار احتمال وقوع افزایش یافته و رتبه‌بندی مجدد گزینه‌ها انجام گرفته است. اگر رتبه‌ی گزینه‌ها با کاهش و یا افزایش معیارها تغییر کند، می‌توان نتیجه گرفت که مدل نسبت به وزن معیارها حساس است و در غیر این صورت نشان داده شده است که نتایج مدل ارایه شده نسبت به وزن معیارها دارای حساسیت نیست. نتایج به صورت ترسیمی در شکل ۷ نشان داده شده است. همان گونه که مشاهده می‌شود مدل تصمیم‌گیری ارایه شده نسبت به وزن معیارهای تصمیم‌گیری حساس نیست.



شکل ۶: رتبه بندی مخاطرات معدنکاری در استخراج مکانیزه در معدن زغال سنگ طبس



شکل ۷: تحلیل حساسیت نتایج مدل به تغییر وزن شاخص‌ها

مخاطرات شناسایی شده است. انجام تحلیل حساسیت نتایج نشان دهنده‌ی عدم حساسیت مدل ارایه شده نسبت به وزن معیارهای تصمیم‌گیری است.

#### مراجع

- [1] Sarı, M. (2002), Risk assessment approach on underground coal mine safety analysis, (Doctoral dissertation, Middle East Technical University, Department of Mining Engineering.
- [2] Joy, J. (2004), Occupational safety risk management in Australian mining, *Occup. Med.* (Chic. Ill), vol. 54, no. 5, pp. 311–315.
- [3] Duzgun, H. S. B. and Einstein, H. H. (2004), Assessment and management of roof fall risks in underground coal mines, *Saf. Sci.*, vol. 42, no. 1, pp. 23–41.
- [4] Palei, S. K. and Das, S. K. (2009), Logistic regression model for prediction of roof fall risks in bord and pillar workings in coal mines: an approach, *Saf. Sci.*, vol. 47, no. 1, pp. 88–96.
- [5] Khanzode, V. V., Maiti, J. and Ray, P. K (2011), A methodology for evaluation and monitoring of recurring hazards in underground coal mining, *Saf. Sci.*, vol. 49, no. 8, pp. 1172–1179.
- [6] Jiang, Y., Wang, H., Xue, S., Zhao, Y., Zhu, J and X. Pang (2012), Assessment and mitigation of coal bump risk during extraction of an island longwall panel, *Int. J. Coal Geol.*, vol. 95, pp. 20–33.
- [7] Ghasemi, E., Shahriar, K and Sharifzadeh, M. (2010), A new method for risk assessment of pillar recovery operation, *Saf. Sci.*, vol. 48, no. 10, pp. 1304–1312.

#### ۵- نتیجه گیری

یکی از پرمخاطره‌ترین فعالیت‌های معدنی، استخراج زیرزمینی زغال‌سنگ است. وقوع حوادث احتمالی در این معادن باعث خسارت‌های جبران‌ناپذیری به سلامت پرسنل و تجهیزات معدن می‌شود. همچنین رخ دادن حوادث در یک فعالیت معدنی می‌تواند باعث مختل شدن فرآیند تولید شود. بنابراین انجام یک فرآیند تحلیل ریسک در معادن زیرزمینی زغال‌سنگ می‌تواند باعث افزایش ایمنی عملیات اجرایی و راندمان تولید شود.

در این پژوهش به منظور شناسایی مهمترین مخاطرات استخراج مکانیزه زغال‌سنگ از ترکیب روش‌های کتابخانه‌ای و قضاوت متخصصین معدنکاری زیرزمینی زغال‌سنگ استفاده شد. همچنین سه معیار احتمال وقوع، شدت پی‌آمد و واکنش و دو زیر معیار آسیب‌پذیری و قابلیت شناسایی جهت اولویت‌بندی مخاطرات شناسایی شده با استفاده از روش تصمیم‌گیری فازی *TOPSIS* مورد توجه قرار گرفت. نتایج بررسی‌های انجام گرفته نشان می‌دهد شدت پی‌آمد و احتمال وقوع به ترتیب دارای بیشترین میزان تأثیر در رتبه‌بندی مخاطرات استخراج زغال‌سنگ به روش جبهه‌کار طولانی است. کاربرد مدل پیشنهاد شده نشان می‌دهد ریزش در سقف کارگاه استخراج و ریزش در راهروهای پهنه‌های استخراجی مهم‌ترین مخاطرات در معدن مکانیزه زغال‌سنگ طبرس است. همچنین نشست سطح زمین دارای کمترین شاخص شباهت در میان

- 
- 1- Sari
  - 2- Joy
  - 3- Duzgun and Einstein
  - 4- Kumar
  - 5- Vivek
  - 6- Yaodong
  - 7- Adel Badri
  - 8- Ozlem
  - 9- Christopher
  - 10- Michael
  - 11- Underground Coal Gasification
  - 12- Krause
  - 13- Probability
  - 14- Consequence
  - 15- Multi Criteria Decision Making Tools
  - 16- Triangular Fuzzy Number
  - 17- Trapezoidal Fuzzy Number
  - 18- Fuzzy Linguistic Variable
  - 19- Likert Scale
  - 20- Hwang and Yoon
  - 21- Chen
  - 22- Fuzzy Positive Ideal Solution
  - 23- Fuzzy Negative Ideal Solution
  - 24- Risk Breakdown Structure
  - 25- Cause & Effect or Fish Bone Diagram
  - 26- Checklists
  - 27- Probability or Likelihood
  - 28- Consequence or Severity
  - 29- Vulnerability
  - 30- Detectability
  - 31- Center of Area Method
  - 32- Best Nonfuzzy Performance

[8] Badri, A., Nadeau, S and Gbodossou, A (2013), A new practical approach to risk management for underground mining project in Quebec, *J. Loss Prev. Process Ind.*, vol. 26, no. 6, pp. 1145–1158.

[9] Eratak, O. D (2014), Analysis and Modelling for Risk Management for Underground Coal Mines Safety, Middle East Technical University.

[10] Mark, C. and Gauna, M (2016), Evaluating the risk of coal bursts in underground coal mines, *Int. J. Min. Sci. Technol.*, vol. 26, no. 1, pp. 47–52.

[11] Krause, E., Krzemien, A and Smolinski, A (2015), Analysis and assessment of a critical event during an underground coal gasification experiment, *J. Loss Prev. Process Ind.*, vol. 33, pp. 173–182.

[12] Zadeh, L. A (1965) ,Fuzzy sets, *Inf. Control*, vol. 8, no. 3, pp. 338–353.

[13] Hwang, C. L and Yoon, K (2012), Multiple attribute decision making: methods and applications a state-of-the-art survey , vol. 186. Springer Science & Business Media.

[14] Zimmermann, H. J (2011), Fuzzy set theory and its applications, Springer Science & Business Media.

[15] Dubois, D. J (1980), Fuzzy sets and systems: theory and applications, vol. 144, Academic press.

[16] Chen, T. Y. and Tsao, C. Y (2008), The interval-valued fuzzy TOPSIS method and experimental analysis, *Fuzzy Sets Syst.*, vol. 159, no. 11, pp. 1410–1428.

[17] Ashtiani, B., Haghighirad, F. Makui, A. Makui, and Montazer, G. ali (2009), Extension of fuzzy TOPSIS method based on interval-valued fuzzy sets, *Appl. Soft Comput.*, vol. 9, no. 2, pp. 457–461.

[18] Ataei, M. (2010), Fuzzy multi criteria decision making, Shahrood University of Technology, (in Persian).

[19] Technical office of Tabas coal mine (1996), Geology report of Tabas coalfield, (in Persian).

[20] Sun, L (2004), A Guide to the Project Management Body of Knowledge, (PMBOK Guide), Project Management Institute, Incorporated.

[21] Hebblewhite, B. K (2007), Management of geotechnical risks in mining projects, Sch. Min. Eng. University of New South Wales, Sydney NSW, Aust.