نشریه مهندسی عمران امیرکبیر

نشریه مهندسی عمران امیرکبیر، دوره ۵۴، شماره ۱۲، سال ۱۴۰۱، صفحات ۴۶۳۹ تا ۴۶۵۶
DOI: 10.22060/ceej.2022.20885.7562

کاربرد تئوری اعداد Z در رتبه‌بندی معیارهای تاثیرگذار در انتخاب روش‌های استخراج زیرزمینی

زینب جهانبانی، مجید عطایی‌پور*، علی مرتضوی

دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران.

خلاصه: عملیات معدن کاری با توجه به ماهیت آن با عدم قطعیت‌های زیادی همراه است و فاکتورهای موثر در انتخاب روش مناسب استخراج برای معادن زیرزمینی نیز با عدم قطعیت همراه هستند. عدم قطعیت همراه با این پارامترها می‌تواند سبب به وجود آمدن ریسک‌های مختلف جانی و مالی شود. در نظر گرفتن ریسک و عدم قطعیت موجود در پارامترها، رتبه‌بندی و تعیین میزان اهمیت آن‌ها، علاوه بر کمک به انتخاب بهترین (ایمن‌ترین و سودآورترین) روش استخراج قبل از شروع فرآیند معدن کاری، می‌تواند به طراحی بهتر و ایمن‌تر معدن نیز کمک کرده و باعث کاهش ریسک‌های متعاقب شود. برآورد پارامترهای فازی عموما بر اساس دانش خبرگان صورت می‌گیرد، اما میزان اطمینان به نظر کارشناسان مختلف تفاوت دارد و نمی‌توان عدم قطعیت و تفاوت در اعتبار نظر آنان را نادیده گرفت. برای حل چالش ذکر شده، در این تحقیق از تئوری اعداد Z استفاده شد. برای انجام مطالعه حاضر، ابتدا فاکتورهای موثر در انتخاب روش‌های استخراج زیرزمینی مطالعه و در ۴ گروه اصلی، ۱۳ زیرمعیار–۱ و ۷۸ زیرمعیار–۲ دسته‌بندی شدند. سپس به منظور بررسی و تعیین میزان اهمیت آن‌ها از تئوری اعداد Z استفاده شد. پس از محاسبه وزن نهایی هر پارامتر، به منظور بررسی اعتبار و سنجش صحت یافته‌ها، نتایج حاصل از مطالعه با پارامترهای در نظر گرفته شده برای انتخاب روش استخراج زیرزمینی در معدن سرب و روی انگوران مقایسه شد. بررسی‌ها نشان می‌دهد که در هر گروه از پارامترها، فاکتورهایی که وزن بیشتری را دارا بودند (نتایج حاصل از تحقیق حاضر)، با پارامترهای در نظر گرفته شده برای انتخاب روش استخراج در معدن انگوران مطابقت دارند.

تاریخچه داوری:
دریافت: ۱۴۰۰/۰۹/۲۴
بازنگری: ۱۴۰۱/۰۶/۲۳
پذیرش: ۱۴۰۱/۰۸/۰۱
ارائه آنلاین: ۱۴۰۱/۰۸/۱۴

کلمات کلیدی:
معیارهای تاثیرگذار
انتخاب روش استخراج زیرزمینی
عدم قطعیت
اعداد فازی
تئوری اعداد Z

۱- مقدمه

انتخاب روش استخراج زیرزمینی مناسب برای استخراج مواد معدنی از یک کانسار، یکی از اولین و مهم‌ترین تصمیم‌ها در فعالیت‌های مهندسی معدن از دیدگاه مسائل اقتصادی، ایمنی و بهره‌وری است. هدف نهایی از انتخاب روش استخراج از میان چندین روش ممکن، بیشینه‌سازی سود و بازیابی از منابع معدنی، افزایش بهره‌وری و کاهش هزینه‌های تولید و افت ماده معدنی و ایجاد محیط ایمن برای معدن کاران در زیر زمین است. بخش‌های مختلف یک کانسار معمولاً از نظر زمین‌شناسی، فیزیکی، شیمیایی و ساختاری بسیار متفاوت است. بسته به میزان پارامترهایی مانند شیب، عمق، اندازه و شکل کانسار، و هم‌چنین مقاومت ماده معدنی و سنگ میزبان، ممکن است چندین روش برای استخراج یک کانسار خاص در نظر گرفته شود. از طرفی دیگر، پارامترهای ایمنی، اقتصادی و زیست‌محیطی نیز فاکتورهای مهمی هستند و در انتخاب ایمن‌ترین و سودآورترین روش استخراج باید به آن‌ها توجه شود. بنابراین، فرآیند انتخاب بهترین روش برای استخراج یک کانسار به دلیل مطابقت آن با مجموعه‌ای از معیارها، مسئله‌ای بسیار مهم و چالش‌برانگیز است [۱].

در راستای مطالعه پارامترهای مهم و موثر در انتخاب روش مناسب برای استخراج معادن، از دیرباز مطالعات فراوانی انجام شده است. اولین الگو یا راهنمای روش استخراج، روشی است که پیل[1] در سال ۱۹۴۱ ارائه کرده است. پس از وی نیز محققان مختلفی از جمله بشکوف و رایت[2] (۱۹۷۳)، موریسون[3] (۱۹۷۶)، لابشر[4] (۱۹۸۱)، نیکلاس[5] (۱۹۸۱)، هارتمن[6] (۱۹۸۷)، پاکالنیز و همکاران[7] (۱۹۹۵) و میچ و همکاران[8] (۲۰۰۲) در مطالعات خود به

1 Peele
2 Boshkov and Wright
3 Morison
4 Lubscher
5 Nicholas
6 Hartman
7 Pakalnis et al.
8 Meech et al.

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: map60@aut.ac.ir

حقوق مؤلفین به نویسندگان و حقوق ناشر به انتشارات دانشگاه امیرکبیر داده شده است. این مقاله تحت لیسانس آفرینندگی مردمی (Creative Commons License) در دسترس شما قرار گرفته است. برای جزئیات این لیسانس، از آدرس https://www.creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode دیدن فرمائید.

منظور تصمیم‌گیری برای انتخاب روش استخراج از فاکتورهای مختلف بهره برده‌اند [۲]. آلپای و یاووز[1] در مطالعه خود (۲۰۰۷)، مشخصات مکانی کانسار، شرایط زمین‌شناسی و هیدرولوژیکی، ویژگی‌های ژئوتکنیکی (سنگ و خاک)، ملاحظات اقتصادی، فاکتورهای فنی و مسائل زیست‌محیطی را به عنوان فاکتورهای تاثیرگذار در نظر گرفته‌اند [۳]. گوپتا و کومار[2] (۲۰۱۳)، فاکتورهای ذاتی و فاکتورهای خارجی (بیرونی) را در مطالعه خود استفاده کرده‌اند [۱]. بالوسا و سینگام[3] نیز در سال ۲۰۱۷ برای انتخاب روش مناسب استخراج، از فاکتورهای ضخامت کانسار، RMR کمربالا، شیب کانسار، شکل کانسار، RMR ماده معدنی، عیار ماده معدنی، یکنواختی ماده معدنی، بازیابی، تولید، RMR کمرپایین، تکنولوژی، عمق و اختلاط استفاده کرده‌اند [۴]. فو و همکاران[4] (۲۰۱۸) در تحقیق خود پارامترهای بازده اقتصادی، پارامترهای فنی، مدیریت، شرایط ایمنی و امنیت و مسائل زیست‌محیطی و بالوسا و گورای[5] (۲۰۱۹) نیز فاکتورهای شیب، شکل، ضخامت، عمق، توزیع عیار، RMR ماده معدنی، RMR کمربالا، RMR کمرپایین، تولید، ترقیق، RSS ماده معدنی، RSS کمربالا، RSS کمرپایین، انعطاف‌پذیری و ایمنی را مهم‌ترین پارامترها در نظر گرفته‌اند [۶ و ۵]. باجی و همکاران[6] نیز در سال ۲۰۲۰ برای انجام مطالعه خود با هدف انتخاب روش مناسب استخراج از فاکتورهای فنی، تولید و اقتصادی بهره برده‌اند [۷]. غزدالی[7] و همکاران در سال ۲۰۲۱، برای انتخاب روش استخراج با استفاده از روش UBC و ارزیابی پایداری کارگاه استخراج از پارامترهای هندسی، زمین‌شناسی، ژئومکانیکی و ژئوتکنیکی کانسار استفاده کردند [۸]. ماهروس[8] و جانگ–گووان[9] در تحقیق خود از معیارهای شکل کانسار، ضخامت ماده معدنی، شیب، عمق، توزیع عیار، RQD (ماده معدنی، کمربالا و کمرپایین) و RSS (ماده معدنی، کمربالا و کمرپایین) برای انتخاب روش استخراج در معدن بولئو[10] در مکزیک استفاده کردند (سال ۲۰۲۱) [۹]. صمیمی‌نمین[11] و همکاران نیز در سال ۲۰۲۲ مطالعه‌ای مروری بر کاربرد روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره[12] برای انتخاب روش استخراج انجام دادند [۱۰].

1 Alpay &Yavuz
2 Gupta & Kumar
3 Balusa & Singam
4 Fu et al.
5 Balusa & Gorai,
6 Baji´c et al.
7 Ghazdali
8 Mahrous
9 Jong-Gwan
10 Boleo mine
11 Samimi Namin
12 Multi Criteria Decision-Making (MCDM)

معیارهای موثر در انتخاب روش‌های استخراج زیرزمینی با عدم قطعیت همراه بوده و کمی‌سازی آن‌ها دشوار است [۱]. نظریه‌های فازی تا حدودی می‌توانند این عدم قطعیت را به طور کامل در محاسبات منظور کنند. برآورد پارامترهای فازی عموما از طریق دانش خبرگان صورت می‌گیرد؛ اما میزان اطمینان به نظر کارشناسان مختلف تفاوت دارد و نمی‌توان عدم قطعیت و تفاوت در اعتبار نظر آنان را نادیده گرفت. در این رابطه لطفی‌زاده[13] (۲۰۱۱) مفهومی به نام تئوری اعداد Z[14] را مطرح کرد. اعداد Z درصدد انجام محاسبات بر اساس اعدادی است که به طور کامل قابل اتکا نیستند. بر این اساس هر عدد Z براساس یک جفت عدد فازی $(\widetilde{A},\widetilde{R})$ بیان می‌شود. عامل اول $(\widetilde{A})$، یک محدودیت برای مقدار حقیقی متغیر مورد نظر است. عامل دوم $(\widetilde{R})$ نیز میزان اعتبار عامل اول را نشان می‌دهد. البته مفهوم اعداد Z اولین اقدام برای نشان دادن عدم قطعیت در اعداد فازی نبود. بلکه نظریه مجموعه‌های فازی نوع دوم نیز که در آن درجه عضویت یک مجموعه فازی، خود فازی است، قبل از نظریه اعداد Z بیان شد. اما با این وجود این نظریه برخلاف نظریه اعداد Z قادر به نشان دادن میزان اعتبار در غالب جملات نیست [۱۳–۱۱].

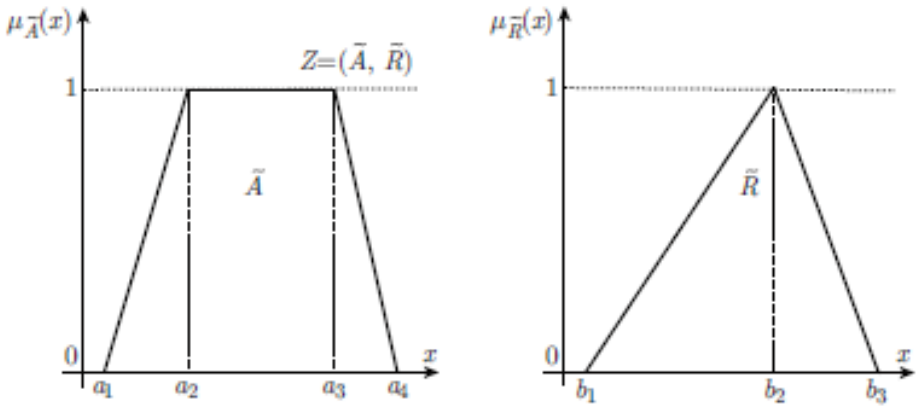
پس از ارائه نظریه اعداد Z توسط لطفی‌زاده در سال ۲۰۱۱، این نظریه به سرعت در علوم مختلف مانند اقتصاد، بازرگانی، برنامه‌ریزی و فرآیند تصمیم‌گیری و تحلیل آن مورد استفاده قرار گرفت [۱۲ و ۱۱]. در صنعت معدن کاری نیز با توجه به ماهیت آن، وجود عدم قطعیت و تغییرپذیری در پارامترهای موثر بر انتخاب روش‌های استخراج زیرزمینی نقشی مهم و تاثیرگذار در طراحی معادن زیرزمینی ایفا می‌کند [۱۴]. عدم قطعیت و عدم اطمینان در این فاکتورها را می‌توان به صورت اعداد $Z=(\widetilde{A},\widetilde{R})$ بیان کرد. به عنوان مثال پارامتر "عیار کانسار" از عدد فازی $\widetilde{A}$ پیروی می‌کند؛ در حالی که میزان اعتبار این پیش‌بینی توسط کارشناس، را می‌توان به وسیله یک عدد فازی دیگر مانند $\widetilde{R}$ نشان داد.

در تحقیق حاضر، به دلیل ماهیت معدن کاری و وجود عدم قطعیت در فاکتورهای تاثیرگذار در انتخاب روش استخراج زیرزمینی، از نظریه اعداد Z برای مطالعه و رتبه‌بندی این فاکتورها استفاده شده است.

۲- اعداد Z

یک عدد Z از یک جفت عدد فازی به شکل $Z=(\widetilde{A},\widetilde{R})$ تشکیل شده است (شکل ۱). عامل اول این اعداد $(\widetilde{A})$ یک محدودیت

13 Zadeh
14 Z-numbers Theory



شکل ۱. نمایش ترسیمی عدد Z ($\tilde{A}$ یک عدد فازی ذوزنقه‌ای و $\tilde{R}$ یک عدد فازی مثلثی) [۱۲]

Fig. 1. Graphical display of A Z-number ($\tilde{A}$ is a trapezoid fuzzy number and $\tilde{R}$ is a triangular fuzzy number)

روی مقدار حقیقی غیرقطعی X و عامل دوم $(\tilde{R})$ نیز اندازه‌ای از میزان قابل اعتماد بودن عامل اول است. اعداد $\tilde{A}$ و $\tilde{R}$ نیز نشان دهنده دو عدد فازی به صورت رابطه (۱) هستند [۱۵، ۱۲ و ۱۱].

$$A=\left\{\left\langle x,\mu_A(x)\right\rangle|x\in X\right\} \qquad (۱)$$

در این رابطه، A: یک مجموعه فازی روی مجموعه جهانی X ، $\mu_A:X\to[0,1]$ تابع عضویت مجموعه A و $\mu_A(x)$: میزان عضویت و بیان کننده درجه تعلق $x\in X$ در مجموعه A است.

۳- تبدیل اعداد Z به اعداد فازی کلاسیک

محاسبات مستقیم به وسیله اعداد Z، محاسباتی سخت و طولانی بوده و دارای شرایطی محدود شونده است [۱۳]. از این رو برای استفاده از این اعداد، ابتدا آن‌ها را به اعداد فازی کلاسیک تبدیل و سپس محاسبات به وسیله اعداد فازی انجام می‌شود. این روند موجب ساده‌تر شدن محاسبات خواهد شد [۱۵ و ۱۲].

اگر $Z=(\tilde{A},\tilde{R})$ یک عدد Z و اعداد فازی $\tilde{A}$ و $\tilde{R}$ به ترتیب به صورت روابط (۲) و (۳) تعریف شوند، در این روابط $u_{\tilde{A}}(x)$ یک تابع عضویت ذوزنقه‌ای و $u_{\tilde{R}}(x)$ یک تابع عضویت مثلثی است. در این صورت برای تبدیل عدد Z به یک عدد فازی کلاسیک مراحل زیر انجام می‌شود:

$$A=\left\{\left\langle x,u_A(x)\right\rangle|x\in[0,1]\right\} \qquad (۲)$$

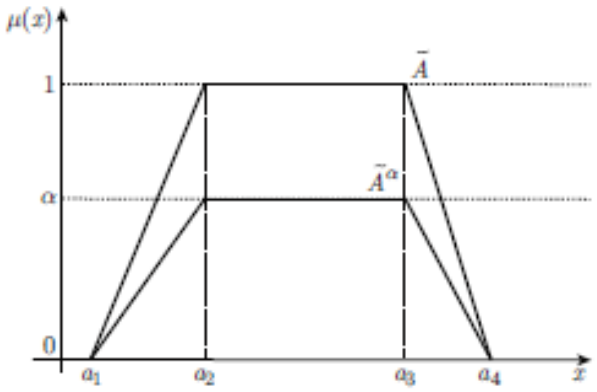
$$R=\left\{\left\langle x,u_R(x)\right\rangle|x\in X\right\} \qquad (۳)$$

۱) ابتدا جزء دوم عدد Z (مقدار قابلیت اطمینان) به یک حالت عددی تبدیل می‌شود (رابطه ۴).

$$\alpha=\frac{\int x\mu_R(x)\,dx}{\int\mu_R(x)\,dx} \qquad (۴)$$

۲) وزن جزء دوم (مقدار قابلیت اطمینان) با جزء اول (محدودیت) ترکیب می‌شود. عدد Z وزنی[1] به شکل رابطه (۵) خواهد بود (رابطه ۶ و ۷).

1 The weighted Z-number



شکل ۲. عدد Z بعد از ضرب مقدار قابلیت اطمینان [۱۲]

Fig. 2. Z-number after multiplying the reliability

$$Z^{\alpha}=\left\{\left\langle x,\mu_{A^{\alpha}}(x)\right\rangle\middle|\begin{matrix}\mu_{A^{\alpha}}(x)=\\ \alpha\mu_{A^{\alpha}}(x),x\in[0,1]\end{matrix}\right\} \quad (۵)$$

$$E_{A^{\alpha}}(x)=\alpha E_{A}(x),x\in X \quad (۶)$$

$$s.t.\mu_{A^{\alpha}}(x)=\alpha\mu_{A}(x),x\in X \quad (۷)$$

در رابطه (۶)، $E_A(x)$ انتظار فازی از یک مجموعه فازی مانند A است و از طریق رابطه (۸) تعریف می‌شود [۱۳]. این مفهوم با مقدار مورد انتظار در محیط‌های احتمالاتی متفاوت است.

$$E_A(x)=\int_X x\mu_A(x)dx \quad (۸)$$

عدد Z بعد از ضرب مقدار قابلیت اطمینان را می‌توان در شکل ۲ نشان داد.

۳) حال عدد فازی غیرمعمول (محدودیت وزنی) به اعداد فازی معمول تبدیل می‌شود (رابطه ۱۰ و ۱۱). مجموعه فازی به دست آمده را می‌توان به صورت رابطه (۹) نشان داد و از طریق رابطه (۱۲) بیان می‌شود که $\widetilde{Z}'$ دارای انتظار فازی یکسانی با $\widetilde{Z}^{\alpha}$ است.

$$Z'=\left\{\left\langle x,\mu_{Z'}(x)\right\rangle\middle|\begin{matrix}\mu_{Z'}(x)=\\ \mu_A\left(\frac{x}{\sqrt{\alpha}}\right),x\in[0,1]\end{matrix}\right\} \quad (۹)$$

$$E_{Z'}(x)=\alpha E_A(x),x\in\sqrt{\alpha}X \quad (۱۰)$$

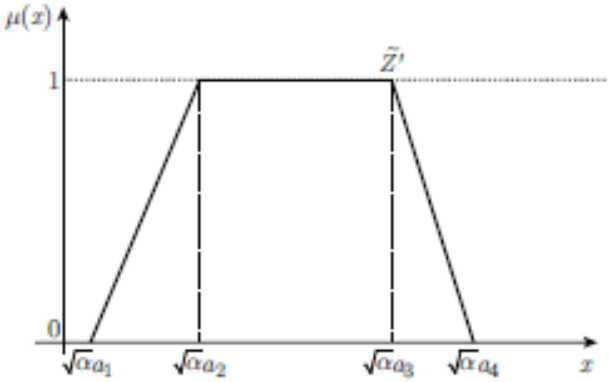
$$s.t.\mu_{Z'}(x)=\mu_A\left(\frac{x}{\sqrt{\alpha}}\right),x\in\sqrt{\alpha}X \quad (۱۱)$$

عدد فازی به وجود آمده از عدد Z را می‌توان در شکل ۳ مشاهده کرد. از روابط (۶) و (۱۰) می‌توان رابطه (۱۲) را نتیجه گرفت.

$$E_{Z'}(x)=E_{A^{\alpha}}(x) \quad (۱۲)$$

۴- مطالعه و دسته‌بندی معیارهای تاثیرگذار در انتخاب روش‌های استخراج زیرزمینی

انتخاب روش استخراج یکی از مهم‌ترین مراحل در طراحی معدن است. هر کانسار با ویژگی‌های خاص خود همراه است. مطالعات زیادی در زمینه انتخاب روش‌های استخراج زیرزمینی نشان می‌دهند که این فرآیند به معیارهای بی‌شماری بستگی دارد و به طور کلی به صورت زیر دسته‌بندی شده‌اند [۱۷ و ۱۶].



شکل ۳. عدد فازی تولید شده از عدد Z [۱۲]

Fig. 3. The regular fuzzy number transformed from Z-number

– مشخصات فیزیکی و مکانیکی کانسار شامل شرایط زمین‌شناسی محلی، مقاومت کمربالا و کمرپایین، ضخامت ماده معدنی، شکل کلی کانسار، شیب، عمق، ضخامت روباره، توزیع عیار و کیفیت. شرایط زمین‌شناسی نیز شامل مقاومت برشی سنگ بکر، شکستگی‌های طبیعی، مقاومت برشی ناپیوستگی‌ها، جهت‌داری، طول، فاصله‌داری و ساختارهای زمین‌شناسی محلی، تنش‌های برجا و شرایط هیدرولوژیکی است

– فاکتورهای فنی شامل تولید سالیانه، انعطاف‌پذیری روش، تجهیزات به کار رفته، ملاحظات زیست‌محیطی، بازیابی معدن، نرخ استخراج و ماشین‌آلات

– فاکتورهای اقتصادی شامل هزینه سرمایه‌ای، هزینه عملیاتی، تناژ قابل استخراج ماده معدنی، عیارهای کانسار و ارزش ماده معدنی

– فاکتورهای استخراجی و عملیاتی شامل استخراج سالیانه، تجهیزات، بازدهی و جنبه‌های زیست‌محیطی

در تحقیق حاضر با هدف رتبه‌بندی پارامترهای موثر در انتخاب روش‌های استخراج زیرزمینی، منابع موجود در این زمینه مورد مطالعه قرار گرفت و فاکتورهای موثر در آن‌ها بررسی شد. هر کدام از این تحقیق‌ها دسته‌بندی خود را برای انتخاب بهترین روش استخراج ارائه داده‌اند. در این مقاله نیز با بررسی تحقیقات مختلف، دسته‌بندی جامعی از معیارهای مهم و تاثیرگذار در فرآیند انتخاب روش‌های استخراج زیرزمینی انجام شد. همانطور که در جدول ۱ دیده می‌شود، معیارهای مورد نظر شامل ۴ گروه اصلی، ۱۳ زیرمعیار–۱ و ۷۸ زیرمعیار–۲ هستند [۲۹–۱۶، ۷–۳ و ۱].

۵– روش بررسی

در این تحقیق با استفاده از تئوری اعداد Z، اقدام به رتبه‌بندی معیارهای موثر در انتخاب روش‌های استخراج زیرزمینی شد. در شکل ۴ مراحل اجرای تحقیق ارائه شده است. شایان ذکر است که برای پیاده‌سازی و انجام محاسبات، از نرم‌افزار Excel 2016 استفاده شد.

۵– ۱– انتخاب و تعیین وزن کارشناسان

هنگامی که اطلاعات کافی وجود نداشته باشد، از نظر کارشناسان استفاده می‌شود. کارشناس به کسی گفته می‌شود که دارای اطلاعات کافی از سیستم مورد ارزیابی است. در این تحقیق ۱۵ کارشناس برای تعیین وزن انتخاب شد. از آنجایی که این کارشناسان اهمیّت وزنی یکسانی ندارند، از معیارهای عنوان، تجربه کاری، تحصیلات و سن در تعیین وزن اهمیّت آن‌ها، استفاده شد. نحوه امتیازدهی به کارشناسان در جدول ۲ نشان داده شده است.

بعد از مشخص شدن معیارهای ارزیابی کارشناسان، وزن آن‌ها تعیین شد. نمره وزن نهایی هر کارشناس از تقسیم مجموع نمرات کسب شده توسط وی بر مجموع نمرات کسب شده توسط کلیه کارشناسان شرکت کننده در مطالعه به دست آمده است. نمره وزن هر کارشناس بر اساس معیارهای تعیین شده، در جدول ۳ نشان داده شده است [۳۲–۳۰].

جدول ۱. دسته‌بندی معیارهای تاثیرگذار در انتخاب روش‌های استخراج زیرزمینی در مطالعه حاضر [۲۹-۱۶، ۷-۳ و ۱](ادامه دارد)

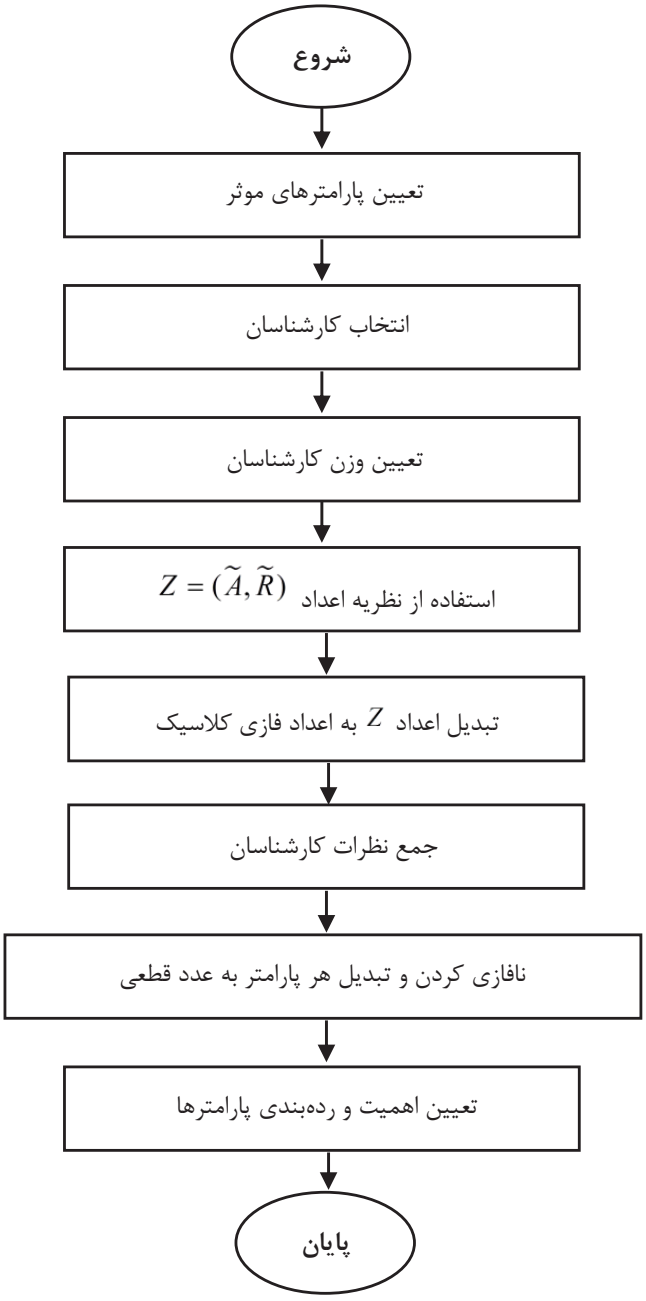
Table 1. Classification of influencing criteria in underground mining method selection in the present study(Continued)

ردیف	معیارهای اصلی	ردیف	زیرمعیارهای ۱	ردیف	زیرمعیارهای ۲	نماد
۱	فاکتورهای فنی	۱	شرایط و مشخصات هندسی، فیزیکی و مکانی کانسار	۱	اندازه کانسار	DSI
				۲	شکل کانسار	DSH
				۳	ضخامت کانسار	DTH
				۴	عمق کانسار	DDE
				۵	شیب کانسار	DDI
				۶	حجم ماده معدنی	OV
				۷	ضخامت روباره	OTH
				۸	منظم بودن مرزهای ماده معدنی	ROB
				۹	یکنواختی ماده معدنی	OU
		۲	شرایط ژئومکانیکی	۱۰	خواص الاستیک	EP
				۱۱	امتیاز RMR برای کانسار، کمربالا و کمرپایین آن	RMR
				۱۲	مقاومت ماده سنگ (RSS) برای کانسار، کمربالا و کمرپایین آن	RSS
				۱۳	مشخصات ساختارهای اصلی زمین‌شناسی در ناحیه ماده معدنی، کمربالا و کمرپایین	GSP
				۱۴	مقاومت برشی سنگ بکر در ناحیه ماده معدنی، کمربالا و کمرپایین	IRSS
				۱۵	تنش‌های برجا و القایی	ISS
		۳	شرایط زمین‌شناسی	۱۶	کانی‌شناسی و سنگ‌شناسی	MP
				۱۷	ترکیب شیمیایی ماده معدنی	MCCO
				۱۸	ساختار کانسار	DST
				۱۹	ساختارهای زمین‌شناسی کانسار (درزه‌ها و ناپیوستگی‌ها، گسل‌ها، صفحات ضعیف و دایک‌ها)	GSD
				۲۰	آلتراسیون و نواحی هوازده	AWZ
				۲۱	وجود گاز در لایه‌ها	ESG
۲	فاکتورهای محیطی	۴	شرایط جغرافیایی	۲۲	شرایط هیدرولوژیکی و آب زیرزمینی	UW
				۲۳	اقلیم منطقه	CA
		۵	بارگذاری دینامیکی و استاتیکی	۲۴	لرزش‌های کنترل نشده و مخرب ناشی از انفجار	EX
				۲۵	لرزه‌خیز بودن منطقه	SA
۳	فاکتورهای عملیاتی و معدن کاری	۶	فاکتورهای تکنولوژیکی	۲۶	انعطاف‌پذیری روش	FM
				۲۷	قابلیت استخراج انتخابی روش	SM
				۲۸	تمرکز یا پراکندگی کارهای معدنی	CDW
				۲۹	توانایی مکانیزاسیون و اتوماسیون‌سازی	M
				۳۰	نیاز به تکنولوژی‌های خاص	NST
				۳۱	برنامه‌ریزی سیستم تهویه	PVS
				۳۲	توسعه پانل‌های معدن کاری جدید	DNMP
				۳۳	بازدهی حفاری ماده معدنی	OEE
		۷	فاکتورهای تولید و بهره‌وری	۳۴	بازیابی	R
				۳۵	نرخ تولید	PR

جدول ۱. دسته‌بندی معیارهای تاثیرگذار در انتخاب روش‌های استخراج زیرزمینی در مطالعه حاضر [۲۹-۱۶، ۷-۳ و ۱]

Table 1. Classification of influencing criteria in underground mining method selection in the present study

		۳۶	نرخ پیشروی	DR
		۳۷	نرخ استخراج	MR
		۳۸	تجهیزات مورد استفاده	AE
		۳۹	تهیه برنامه تولید زیرزمینی	PUPS
		۴۰	در دسترس بودن نیروی کار یا معدن کار ماهر	EL
		۴۱	میزان تولید و استخراج در هر شیفت به ازای هر نفر	EA
		۴۲	تولید و بهره‌وری در هر روش استخراج	MMP
		۴۳	نرخ افت ماده معدنی	OI
		۴۴	نرخ اختلاط ماده معدنی استخراج شده	DEO
		۴۵	تولید در مرحله توسعه و باز کردن معدن	DP
		۴۶	میزان ذخیره قابل استخراج	MR
		۴۷	ظرفیت تولید	PC
		۴۸	قابلیت استخراج ماده معدنی	EO
		۴۹	تناژ قابل استخراج ماده معدنی	MOT
		۵۰	عیارهای کانسار و نوع ماده معدنی	OG
		۵۱	عمر معدن	ML
۸	مسائل و ملاحظات زیست محیطی	۵۲	کنترل زمین در مناطق معدن کاری	GCMA
		۵۳	شرایط سطح (مانند نشست یا تاثیرات تخریب)	SC
		۵۴	کنترل جو و اتمسفر	AC
		۵۵	تصفیه آب معدن	WWT
		۵۶	بازسازی معدن و محیط اطراف آن	MR
		۵۷	تاثیرات زیست‌محیطی نامطلوب	AEI
		۵۸	حفظ سطح زمین	TSP
۹	مدیریت تولید	۵۹	میزان تولید نیروی کار	LP
		۶۰	پیچیدگی فرآیند معدن کاری	CMP
		۶۱	خرید و بهره‌برداری از تجهیزات	AOE
		۶۲	دشواری و انعطاف‌پذیری مدیریت سازمان	DFOM
۱۰	وضعیت ایمنی و امنیت در تولید معدن	۶۳	تهویه و شرایط ضد گرد و غبار	VDC
		۶۴	احداث تاسیسات حفاظتی ایمنی	CSPF
		۶۵	ایمنی نیروی کار	W
		۶۶	بهداشت و ایمنی در محل کار	HSW
۱۱	هزینه‌ها	۶۷	هزینه‌های استخراجی و عملیاتی	OC
		۶۸	هزینه‌های سرمایه‌ای	CC
		۶۹	هزینه‌های تعمیر و نگهداری	MC
		۷۰	هزینه بازسازی	RC
		۷۱	هزینه حفاری	EC
۱۲	درآمد	۷۲	تولید و بهره‌وری	P
		۷۳	بازدهی	E
		۷۴	ارزش ماده معدنی	MV
		۷۵	بازار	M
		۷۶	میزان درآمد به ازای هر تن ماده معدنی	I
		۷۷	ارزش تجهیزات	EW
۱۳	نرخ بازگشت سرمایه	۷۸	نرخ بازگشت سرمایه	IRR



شکل ۴. مراحل اجرای تحقیق

Fig. 4. The research implementation steps

جدول ۲. امتیازدهی بر اساس ویژگی‌های کارشناسان [۳۲-۳۰]

Table 2. Scores assigned to different experts based on their characteristics

ردیف	وضعیت	طبقه‌بندی	امتیاز
۱	عنوان شغلی	مدیر معدن	۴
		بازرس، کنترل کننده	۳
		سرپرست کارگاه، سرکارگر	۲
		اپراتور	۱
۲	تجربه (سال)	> ۲۵	۴
		۱۵-۲۵	۳
		۵-۱۵	۲
		< ۵	۱
۳	تحصیلات	دکترای معدن	۵
		کارشناس و کارشناس ارشد معدن	۴
		دیپلم	۳
		دارای مدرک فنی	۲
		زیر دیپلم	۱
۴	سن (سال)	> ۵۰	۴
		۴۰-۵۰	۳
		۳۰-۴۰	۲
		< ۳۰	۱

جدول ۳. نمرات وزنی کارشناسان

Table 3. Weighting factors of experts

شماره کارشناس	نمره وزنی هر کارشناس	شماره کارشناس	نمره وزنی هر کارشناس	شماره کارشناس	نمره وزنی هر کارشناس
۱	۰/۰۷۹	۶	۰/۰۵۶	۱۱	۰/۰۶۷
۲	۰/۰۸۴	۷	۰/۰۶۲	۱۲	۰/۰۶۲
۳	۰/۰۶۷	۸	۰/۰۵۶	۱۳	۰/۰۷۳
۴	۰/۰۵۱	۹	۰/۰۷۳	۱۴	۰/۰۶۷
۵	۰/۰۷۹	۱۰	۰/۰۶۲	۱۵	۰/۰۶۲

۵- ۲- استفاده از رویکرد اعداد $Z=(\widetilde{A},\widetilde{R})$

۵- ۲- ۱- کمی‌سازی پیش‌بینی کارشناسان در مورد هر پارامتر $(\widetilde{A})$

برای کمی‌سازی نظرات کارشناسان یا تعیین وزن نظرات آن‌ها در خصوص هر پارامتر، از متغیرهای زبانی استفاده شده است. پنج متغیر زبانی به کار رفته شامل خیلی کم، کم، متوسط، زیاد و خیلی زیاد هستند که به طور خلاصه به صورت {VL، L، M، H، VH} است. برای فازی کردن این بخش از عدد فازی ذوزنقه‌ای استفاده شده است [۳۳-۳۰].

برای استفاده از نظرات کارشناسان فرم‌هایی برای آن‌ها ارسال شد که در این فرم از کارشناسان خواسته شده بود بسته به نظر شخصی خویش و میزان اهمیّت هر یک از پارامترها، امتیاز خیلی کم، کم، متوسط، زیاد و خیلی زیاد را به آن‌ها اختصاص دهند. وزن متغیرهای زبانی کارشناسان که در کمّی‌سازی نظر آن‌ها در رابطه با هر پارامتر مورد استفاده قرار گرفت، در جدول ۴ نشان داده است.

۵- ۲- ۲- کمی‌سازی میزان اعتبار عامل اول $(\widetilde{R})$

برآورد پارامترهای فازی عموما از طریق دانش خبرگان صورت می‌گیرد؛ اما میزان اطمینان به نظر کارشناسان مختلف تفاوت دارد و نمی‌توان عدم قطعیت و تفاوت در اعتبار نظر آنان را نادیده گرفت. اعداد Z از توانایی حل این مشکل برخوردار هستند. عامل دوم این اعداد $(\widetilde{R})$ قادر به نشان دادن میزان اعتماد به پیش‌بینی هر کارشناس در مورد هر پارامتر هستند. در این صورت می‌توان با کمک اعداد Z میزان اعتبار عامل اول را کمی‌سازی کرد.

در این مقاله برای کمی‌سازی میزان اعتبار عامل اول در مورد هر پارامتر، از متغیرهای زبانی خیلی‌کم (VL)، کم (L)، متوسط (M)، زیاد (H) و خیلی زیاد (VH) استفاده شده است. برای فازی کردن این بخش نیز از عدد فازی مثلثی استفاده شده است. وزن متغیرهای زبانی مورد استفاده در کمّی کردن میزان $\widetilde{R}$ نیز در جدول ۵ نشان داده شده است [۱۱].

جدول ۴. وزن متغیرهای زبانی در کمّی کردن نظر کارشناسان در رابطه با هر پارامتر [۳۴ و ۳۲]

Table 4. Fuzzy numbers in quantifying experts´ opinions in relation to each factor

متغیر زبانی	وزن ترم‌های زبانی			
خیلی کم (VL)	۰	۰	۰/۱	**۰/۲**
کم (L)	۰/۱	۰/۲۵	۰/۲۵	**۰/۴**
متوسط (M)	۰/۳	۰/۵	۰/۵	**۰/۷**
زیاد (H)	۰/۶	۰/۷۵	۰/۷۵	**۰/۹**
خیلی زیاد (VH)	۰/۸	۰/۹	۱	**۱**

جدول ۵. وزن متغیرهای زبانی در کمی‌سازی میزان $\widetilde{R}$ [۱۱]

Table 5. Fuzzy numbers used to quantify $\widetilde{R}$

متغیر زبانی	وزن ترم‌های زبانی		
خیلی کم (VL)	۰	۰	**۰/۲۵**
کم (L)	۰	۰/۲۵	**۰/۵**
متوسط (M)	۰/۲۵	۰/۵	**۰/۷۵**
زیاد (H)	۰/۵	۰/۷۵	**۱**
خیلی زیاد (VH)	۰/۷۵	۱	**۱**

۵- ۳- تبدیل اعداد Z به اعداد فازی کلاسیک

در این بخش با توجه به مطالب تشریح شده در بخش سوم تحقیق، اعداد Z به اعداد فازی کلاسیک تبدیل می‌شوند. بدین ترتیب در ابتدا با استفاده از رابطه (۴) میزان α برای عامل دوم عدد Z (عدد فازی $\widetilde{R}$) در هر پارامتر تعیین و سپس برای تبدیل اعداد Z به اعداد فازی کلاسیک، میزان جذر ($\sqrt{\alpha}$) به دست آمده از مرحله قبل در هر یک از پارامترهای عامل اول عدد Z یعنی $\widetilde{A}$ ضرب شد.

۵- ۴- جمع نظرات کارشناسان

برای جمع نظرات کارشناسان، نمره وزن هر کارشناس در نمره متغیرهای زبانی او ضرب شده است. این کار طبق رابطه (۱۳) و بر اساس مطالعه کلمن و وینکلر[1] و رنجیت و همکارانش[2]، انجام شده است [۳۵ و ۳۲].

$$M_i = \sum_{j=1}^{n} W_j A_{ij} \qquad (i = 1,2,3,...,m) \qquad (۱۳)$$

که در این رابطه، A_{ij} : متغیر زبانی در رابطه با هر پارامتر i توسط کارشناس j، W_j : وزن کارشناس j، m : تعداد پارامترها، n : تعداد کارشناسان و M_i : عدد فازی جمع نظرات کارشناسان در رابطه با هر پارامتر i است.

۵- ۵- نافازی کردن و تبدیل هر پارامتر به عدد قطعی

نافازی کردن اعداد فازی روش مهمی برای تصمیم‌گیری در محیط فازی است. در این تحقیق روش مرکز گرانیگاه برای نافازی کردن انتخاب شده است. این روش توسط سوگنو[3] در سال ۱۹۸۵ توسعه یافته است و دقیق‌ترین روش نافازی کردن است. نافازی کردن عدد فازی ذوزنقه‌ای $\widetilde{A} = (a_1, a_2, a_3, a_4)$ با استفاده از رابطه (۱۴) به دست می‌آید [۳۱ و ۳۰].

$$X^* = \frac{\int_{a_1}^{a_2} \frac{x-a}{a_2-a_1} x dx + \int_{a_2}^{a_3} x dx + \int_{a_3}^{a_4} \frac{a_4-x}{a_4-a_3} x dx}{\int_{a_1}^{a_2} \frac{x-a}{a_2-a_1} dx + \int_{a_2}^{a_3} x dx + \int_{a_3}^{a_4} \frac{a_4-x}{a_4-a_3} dx} = \frac{1}{3} \frac{(a_4+a_3)^2 - a_4 a_3 - (a_1+a_2)^2 + a_1 a_2}{(a_4+a_3-a_2-a_1)} \qquad (۱۴)$$

عدد به دست آمده از مرحله قبل در رابطه با هر پارامتر، معادل نظر کارشناسان بوده و هنوز به صورت "امکانی" است. در این مرحله با استفاده از مدل مرکز گرانیگاه و فرمول ذوزنقه‌ای (رابطه ۱۴)، این اعداد نافازی شده است.

۵- ۶- تعیین اهمیت و رتبه‌بندی معیارهای تاثیرگذار در انتخاب روش‌های استخراج زیرزمینی

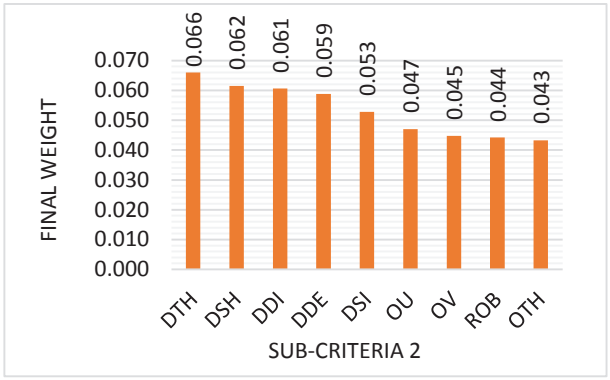
در این بخش پس از محاسبه وزن نهایی هر پارامتر، میزان اهمیت هر یک از فاکتورها تعیین و بر اساس وزن‌های به دست آمده، رتبه‌بندی شدند. طبق نتایج حاصل از محاسبات و کمی‌سازی پارامترهای دارای عدم قطعیت با استفاده از نظریه اعداد Z، در میان گروه معیارهای فنی و در زیرگروه شرایط هندسی کانسار، پارامترهای ضخامت (۰/۰۶۶)، شکل (۰/۰۶۲)، شیب (۰/۰۶۱) و عمق کانسار (۰/۰۵۹)، در زیرگروه شرایط ژئومکانیکی، امتیاز RMR برای کانسار، کمربالا و کمرپایین آن (۰/۰۵۵)، مقاومت ماده سنگ (RSS) برای کانسار، کمربالا و کمرپایین آن (۰/۰۵۵) و مشخصات ساختارهای اصلی زمین‌شناسی در ناحیه ماده معدنی، کمربالا و کمرپایین (۰/۰۵۰) و در زیرگروه شرایط زمین‌شناسی نیز پارامترهای ساختارهای زمین‌شناسی کانسار (۰/۰۵۲) و ساختار کانسار (۰/۰۵۱) به ترتیب از بیشترین اهمیت برخوردار هستند (شکل ۵).

در گروه معیارهای محیطی و در زیرگروه شرایط جغرافیایی، فاکتور شرایط هیدرولوژیکی و آب زیرزمینی (۰/۲۸۰) و در زیرگروه بارگذاری دینامیکی و استاتیکی نیز لرزش‌های کنترل نشده و مخرب ناشی از انفجار (۰/۲۷۹) دارای بالاترین رتبه هستند (شکل ۶).

در دسته معیارهای عملیاتی و معدن کاری و در زیرگروه فاکتورهای تکنولوژیکی، پارامترهای انعطاف‌پذیری روش (۰/۰۲۹)، قابلیت استخراج انتخابی روش (۰/۰۲۷) و توانایی مکانیزاسیون و اتوماسیون‌سازی (۰/۰۲۶)، در زیرگروه فاکتورهای تولید و بهره‌وری، پارامترهای تناژ قابل استخراج ماده معدنی (۰/۰۳۰)، نرخ تولید (۰/۰۳۰)، قابلیت استخراج ماده معدنی، میزان ذخیره قابل استخراج و ظرفیت تولید (۰/۰۲۹)، در گروه مسائل و ملاحظات زیست‌محیطی شرایط سطح (مانند نشست یا تاثیرات تخریب) (۰/۰۲۶)، تاثیرات زیست‌محیطی نامطلوب (۰/۰۲۵) و کنترل زمین در مناطق معدن کاری (۰/۰۲۴)، در زیرگروه مدیریت تولید، فاکتورهای پیچیدگی فرآیند معدن کاری (۰/۰۲۲) و خرید و بهره‌برداری از تجهیزات (۰/۰۲۲) و در زیرگروه وضعیت ایمنی و امنیت در تولید معدن نیز پارامتر ایمنی نیروی کار با وزن ۰/۰۳۰ به ترتیب از بیشترین اهمیت در بین سایر فاکتورهای تاثیرگذار در انتخاب روش‌های استخراج زیرزمینی برخوردار هستند (شکل ۷).

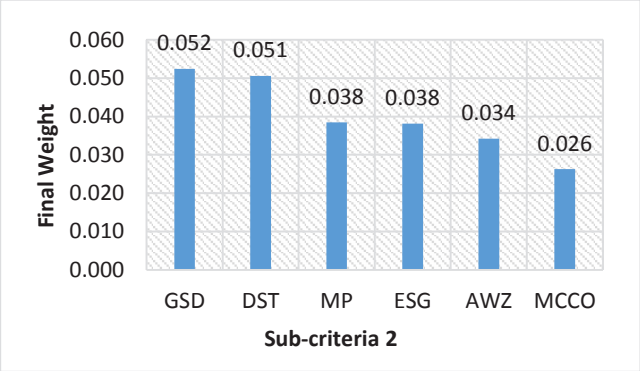
در دسته معیارهای اقتصادی و در زیرگروه فاکتورهای هزینه، پارامترهای

1 Clemen and Winkler
2 Renjith et al.
3 Sugeno



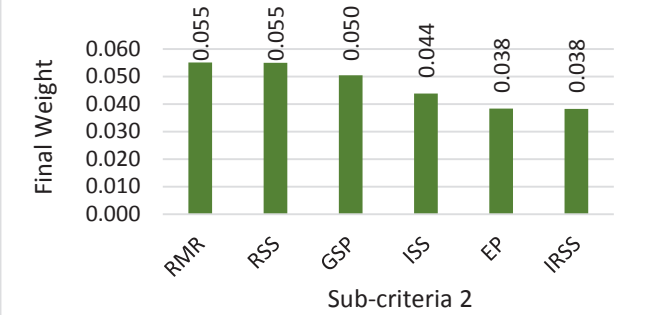
الف- فاکتورهای شرایط و مشخصات هندسی، فیزیکی و مکانی کانسار

a) Geometry conditions



ب- فاکتورهای شرایط زمین‌شناسی کانسار

b) Geological conditions

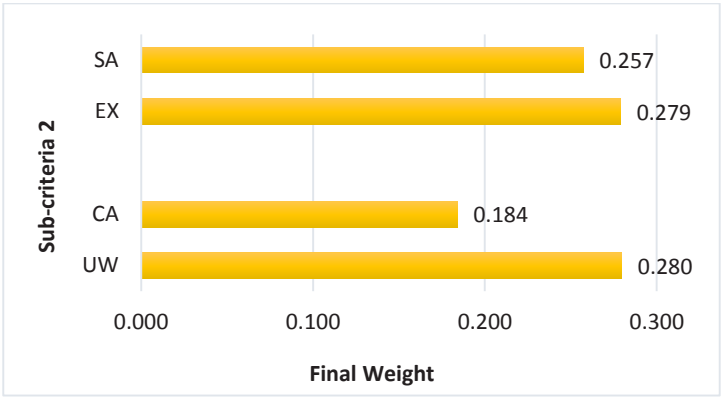


ج- فاکتورهای شرایط ژئومکانیکی کانسار

c) Geomechanical conditions

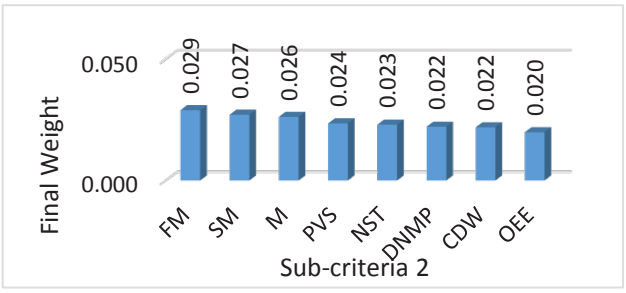
شکل ۵. نتایج حاصل از نافازی کردن پیش‌بینی کارشناسان در رابطه با هر پارامتر و رده‌بندی آن‌ها در دسته معیارهای فنی

Fig. 5. The final weightings determined for technical factors



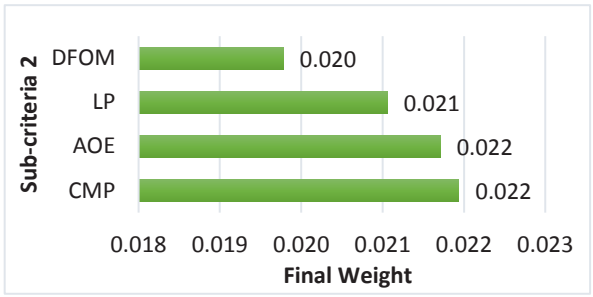
شکل ۶. نتایج حاصل از نافازی کردن پیش‌بینی کارشناسان در رابطه با هر پارامتر و رده‌بندی آن‌ها در دسته معیارهای محیطی

Fig. 6. The final weightings determined for ambient factors



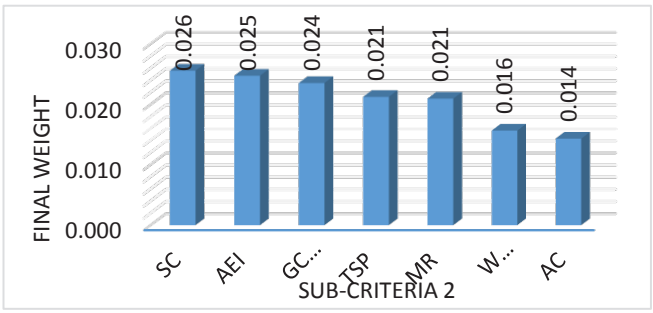
الف- فاکتورهای تکنولوژیکی

a) Technological factors



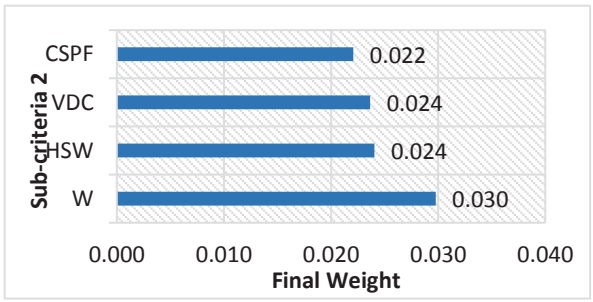
ب- فاکتورهای مدیریت تولید

b) Production management



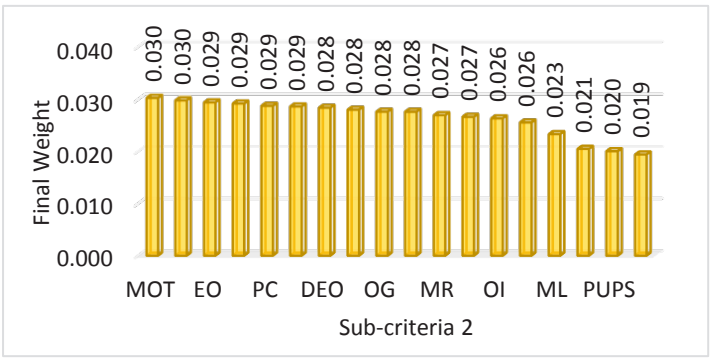
ج- فاکتورهای مسائل و ملاحظات زیست‌محیطی

c) Environmental concerns



د- فاکتورهای وضعیت ایمنی و امنیت در تولید معدن

d) Safety of production

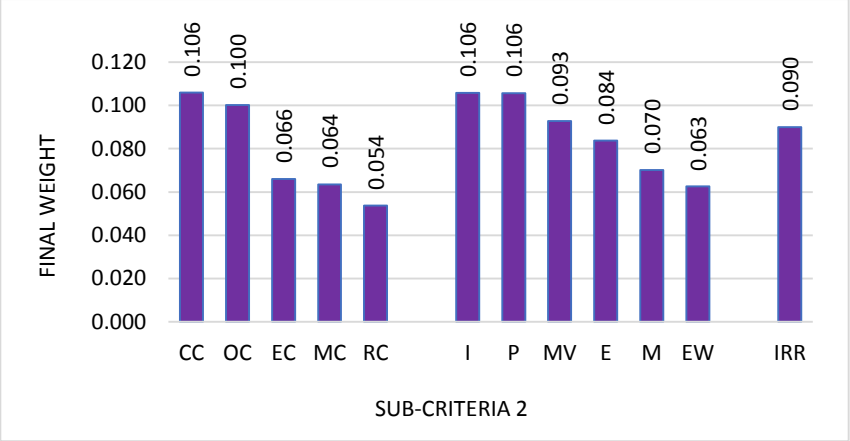


ه- فاکتورهای تولید و بهره‌وری

e) Productivity factors

شکل ۷. نتایج حاصل از نافازی کردن پیش‌بینی کارشناسان در رابطه با هر پارامتر و رده‌بندی آن‌ها در دسته معیارهای عملیاتی و معدن کاری

Fig. 7. The final weightings determined for mining and operational factors



شکل ۸. نتایج حاصل از نافازی کردن پیش‌بینی کارشناسان در رابطه با هر پارامتر و رده‌بندی آن‌ها در دسته معیارهای اقتصادی

Fig. 8. The final weightings determined for economic factors

هزینه‌های سرمایه‌ای (۰/۱۰۶) و هزینه‌های استخراجی و عملیاتی (۰/۱۰۰)، در زیرگروه فاکتورهای درآمد، پارامترهای درآمد به ازای هر تن ماده معدنی (۰/۱۰۶) و تولید و بهره‌وری (۰/۱۰۶) و نرخ بازگشت سرمایه (۰/۰۹۰) به ترتیب دارای اهمیت هستند (شکل ۸).

به منظور صحت‌سنجی مطالعه حاضر، نتایج حاصل از این تحقیق با پارامترهای موثر در انتخاب روش استخراج زیرزمینی مناسب برای بخش سولفوره معدن سرب و روی انگوران مقایسه شده است. در این معدن برای انتخاب روش مناسب استخراج زیرزمینی از روش نیکلاس اصلاح شده استفاده شده است. انتخاب روش استخراج در معدن انگوران در دو مرحله انجام شده است. در مرحله اول، روش‌های مختلف استخراج با در نظر گرفتن عوامل و مشخصه‌های مختلف امتیازبندی و بر اساس حداکثر امتیاز مرتب شده‌اند. پارامترهای تعیین کننده در این روش مشخصات هندسی شامل شکل، ضخامت و شیب کانسار، توزیع عیار در کانسار و همچنین مشخصات مکانیکی ماده معدنی و سنگ‌های دربرگیرنده آن هستند. در مرحله دوم به منظور کاهش تعداد روش‌های مناسب و محدود کردن دامنه انتخاب، با مطالعات تفصیلی بر اساس پارامترهای هزینه معدن کاری، سرمایه‌گذاری مورد نیاز، مقدار استخراج، در دسترس بودن نیروی کار، ملاحظات زیست محیطی از قبیل نشست سطح زمین، میزان بازیابی و قابلیت تخریب ماده معدنی، مناسب‌ترین روش استخراج مشخص و ارزیابی شده است [۳۶].

با بررسی نمودار وزن‌های به دست آمده برای هر دسته از پارامترها و رتبه‌بندی آن‌ها در تحقیق حاضر (شامل نتایج مشخص شده در شکل‌های ۵ تا ۸)، می‌توان دریافت که در هر گروه از پارامترها، فاکتورهایی که وزن بیشتری را دارا هستند، با پارامترهای در نظر گرفته شده برای انتخاب روش استخراج در معدن سرب و روی انگوران مطابقت دارند.

۶- بحث و نتیجه‌گیری

هدف از نگارش این مقاله در نظر گرفتن عدم قطعیت موجود در پارامترهای موثر در انتخاب روش مناسب استخراج زیرزمینی است. عدم قطعیت موجود در این پارامترها می‌تواند باعث به وجود آمدن ریسک‌های مختلف جانی و مالی شود. با رتبه‌بندی و تعیین میزان اهمیت پارامترها ضمن در نظر گرفتن ریسک و عدم قطعیت همراه با آن‌ها، می‌توان ایمن‌ترین و سودآورترین روش استخراج زیرزمینی را انتخاب کرد. برای انجام تحقیق، ابتدا فاکتورهای تاثیرگذار در انتخاب روش مناسب برای استخراج زیرزمینی مطالعه و در ۴ گروه اصلی، ۱۳ زیرمعیار-۱ و ۷۸ زیرمعیار-۲، دسته‌بندی شدند. سپس به منظور بررسی و تعیین میزان اهمیت آن‌ها از تئوری اعداد Z استفاده شد. پس از محاسبه وزن نهایی هر پارامتر، به منظور بررسی اعتبار و سنجش صحت یافته‌ها، نتایج حاصل از مطالعه با پارامترهای در نظر گرفته شده برای انتخاب روش استخراج زیرزمینی در معدن انگوران مقایسه شد. بررسی‌ها نشان می‌دهد که در هر گروه از پارامترها، فاکتورهایی که وزن بیشتری را دارا بودند (نتایج حاصل از تحقیق حاضر)، با پارامترهای در

نظر گرفته شده برای انتخاب روش استخراج در معدن سرب و روی انگوران مطابقت دارند.

نظریه اعداد Z از مباحث نوین در حوزه منطق فازی است. هر عدد Z که از یک جفت عدد فازی تشکیل شده است، علاوه بر در نظر گرفتن یک متغیر به شکل فازی، میزان محتمل بودن و یا قابلیت اطمینان این برآورد را نیز به شکل یک عدد فازی دیگر در نظر می‌گیرد. استفاده از این نظریه در مسئله رتبه‌بندی و تعیین اهمیت فاکتورهای تاثیرگذار در انتخاب روش‌های استخراج، سبب می‌شود تا علاوه بر تخصیص عدم قطعیت بر پارامترها به صورت مستقیم، میزان اعتبار پیش‌بینی کارشناسان نیز لحاظ شود. در واقع با استفاده از نظریه اعداد Z می‌توان عدم قطعیت در تخمین پارامترهای فازی را نیز در نظر گرفت. با توجه به ماهیت معدن کاری و وجود عدم قطعیت در پارامترهای آن، استفاده از این نظریه می‌تواند به کمی‌سازی عدم قطعیت‌های موجود در این فاکتورها کمک به‌سزایی کند. در واقع با استفاده از روش استفاده شده در مقاله حاضر، می‌توان ریسک موجود در پارامترهای موثر در انتخاب روش استخراج را قبل از شروع عملیات معدن کاری در نظر گرفت و با رتبه‌بندی پارامترها و یافتن مهم‌ترین آن‌ها می‌توان علاوه بر انتخاب سودآورترین روش استخراج زیرزمینی، طراحی معدن را نیز به گونه‌ای انجام داد که شرایط کاری ایمن برای پرسنل درگیر در این صنعت مهم فراهم و از وارد آمدن خسارت‌های جانی و مالی جلوگیری شود.

منابع

[1] S. Gupta, U. Kumar, An analytical hierarchy process (AHP)-guided decision model for underground mining method selection, International journal of mining, reclamation and environment, 26(4) (2012) 324-336.

[2] F.S. Namin, K. Shahriar, A. Bascetin, S. Ghodsypour, Practical applications from decision-making techniques for selection of suitable mining method in Iran, Gospodarka Surowcami Mineralnymi, 25 (2009) 57-77.

[3] S. Alpay, M. Yavuz, A decision support system for underground mining method selection, in: International Conference on Industrial, Engineering and Other Applications of Applied Intelligent Systems, Springer, 2007, pp. 334-343.

[4] B.C. Balusa, J. Singam, Underground mining method selection using WPM and PROMETHEE, Journal of the Institution of Engineers (India): Series D, 99(1) (2018) 165-171.

[5] Z. Fu, X. Wu, H. Liao, F. Herrera, Underground mining method selection with the hesitant fuzzy linguistic gained and lost dominance score method, IEEE Access, 6 (2018) 66442-66458.

[6] B.C. Balusa, A.K. Gorai, Sensitivity analysis of fuzzy-analytic hierarchical process (FAHP) decision-making model in selection of underground metal mining method, Journal of Sustainable Mining, 18(1) (2019) 8-17.

[7] S. Bajić, D. Bajić, B. Gluščević, V. Ristić Vakanjac, Application of fuzzy analytic hierarchy process to underground mining method selection, Symmetry, 12(2) (2020) 192.

[8] O. Ghazdali, J. Moustadraf, T. Tagma, B. Alabjah, F. Amraoui, Study and evaluation of the stability of underground mining method used in shallow-dip vein deposits hosted in poor quality rock, Mining of Mineral Deposits, 15(3) (2021) 31-38.

[9] M.A. Ali, J.-G. Kim, Selection mining methods via multiple criteria decision analysis using TOPSIS and modification of the UBC method, Journal of Sustainable Mining, 20 (2021).

[10] F.S. Namin, A. Ghadi, F. Saki, A literature review of Multi Criteria Decision-Making (MCDM) towards mining method selection (MMS), Resources Policy, 77 (2022) 102676.

[11] B. Kang, D. Wei, Y. Li, Y. Deng, Decision making using Z-numbers under uncertain environment, Journal of computational Information systems, 8(7) (2012) 2807-2814.

[12] B. Kang, D. Wei, Y. Li, Y. Deng, A method of converting Z-number to classical fuzzy number, Journal of Information &computational Science, 9(3) (2012) 703-709.

[13] L.A. Zadeh, A note on Z-numbers, Information Sciences, 181(14) (2011) 2923-2932.

[14] S. Heidarzadeh, A. Saeidi, A. Rouleau, Use of probabilistic numerical modeling to evaluate the effect of geomechanical parameter variability on the probability

[24] A. Karadogan, A. Kahriman, U. Ozer, Application of fuzzy set theory in the selection of underground mining method, Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy, 108(2) (2008) 73-79.

[25] R. Mikaeil, M.Z. Naghadehi, M. Ataei, R. Khalokakaie, A decision support system using fuzzy analytical hierarchy process (FAHP) and TOPSIS approaches for selection of the optimum underground mining method, Archives of Mining Sciences, 54(2) (2009) 341-368.

[26] M.Z. Naghadehi, R. Mikaeil, M. Ataei, The application of fuzzy analytic hierarchy process (FAHP) approach to selection of optimum underground mining method for Jajarm Bauxite Mine, Iran, Expert Systems with Applications, 36(4) (2009) 8218-8226.

[27] G. Popovic, B. Djordjevic, D. Milanovic, Multiple criteria approach in the mining method selection, Industrija, 47(4) (2019).

[28] M. Yavuz, The application of the analytic hierarchy process (AHP) and Yager's method in underground mining method selection problem, International Journal of Mining, Reclamation and Environment, 29(6) (2015) 453-475.

[29] A. Yazdani-Chamzini, S. Haji Yakchali, E. Kazimieras Zavadskas, Using a integrated MCDM model for mining method selection in presence of uncertainty, Economic research-Ekonomska istraživanja, 25(4) (2012) 869-904.

[30] S.M. Lavasani, A. Zendegani, M. Celik, An extension to Fuzzy Fault Tree Analysis (FFTA) application in petrochemical process industry, Process Safety and Environmental Protection, 93 (2015) 75-88.

[31] L.M. MIRI, J. Wang, Z. Yang, J. Finlay, Application of fuzzy fault tree analysis on oil and gas offshore pipelines, (2011).

[32] V. Renjith, G. Madhu, V.L.G. Nayagam, A. Bhasi, Two-dimensional fuzzy fault tree analysis for chlorine release from a chlor-alkali industry using expert elicitation, Journal of hazardous materials, 183(1-3) (2010) 103-110.

[33] C.-L.H. Shu-Jen Chen, Fuzzy Multiple Attribute Decision Making, Springer Berlin, Heidelberg, Berlin, 1992.

of open-stope failure: a case Study of the Niobec Mine, Quebec (Canada), Rock Mechanics and Rock Engineering, 53(3) (2020) 1411-1431.

[15] A. Azadeh, M. Saberi, N.Z. Atashbar, E. Chang, P. Pazhoheshfar, Z-AHP: A Z-number extension of fuzzy analytical hierarchy process, in: 2013 7th IEEE International Conference on Digital Ecosystems and Technologies (DEST), IEEE, 2013, pp. 141-147.

[16] D. Bogdanovic, D. Nikolic, I. Ilic, Mining method selection by integrated AHP and PROMETHEE method, Anais da Academia Brasileira de Ciências, 84 (2012) 219-233.

[17] H. Karimnia, H. Bagloo, Optimum mining method selection using fuzzy analytical hierarchy process–Qapiliq salt mine, Iran, International Journal of Mining Science and Technology, 25(2) (2015) 225-230.

[18] S. Alpay, M. Yavuz, Underground mining method selection by decision making tools, Tunnelling and Underground Space Technology, 24(2) (2009) 173-184.

[19] M. Ataei, M. Jamshidi, F. Sereshki, S. Jalali, Mining method selection by AHP approach, Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy, 108(12) (2008) 741-749.

[20] M. Ataei, H. Shahsavany, R. Mikaeil, Monte Carlo Analytic Hierarchy Process (MAHP) approach to selection of optimum mining method, International Journal of Mining Science and Technology, 23(4) (2013) 573-578.

[21] B.C. Balusa, A.K. Gorai, A comparative study of various multi-criteria decision-making models in underground mining method selection, Journal of The Institution of Engineers (India): Series D, 100(1) (2019) 105-121.

[22] H. Dehghani, A. Siami, P. Haghi, A new model for mining method selection based on grey and TODIM methods, Journal of Mining and Environment, 8(1) (2017) 49-60.

[23] M. Iphar, S. Alpay, A mobile application based on multi-criteria decision-making methods for underground mining method selection, International Journal of Mining, Reclamation and Environment, 33(7) (2019) 480-504.

[34] A. Mottahedi, M. Ataei, Fuzzy fault tree analysis for coal burst occurrence probability in underground coal mining, Tunnelling and Underground Space Technology, 83 (2019) 165-174.

[35] R.T. Clemen, R.L. Winkler, Combining probability distributions from experts in risk analysis, Risk analysis, 19(2) (1999) 187-203.

[36] K. Consultant, Final technical report of Angouran mine planning and design (the sulphur section of the mine), 2008.

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

Z. Jahanbani, M. Ataee-pour , A. Mortazavi, Ranking criteria used for underground mining method selection applying Z-numbers Theory, Amirkabir J. Civil Eng., 54(12) (2023) 4639-4656.

DOI: 10.22060/ceej.2022.20885.7562

این صفحه عمداً خالی است