نشریه مهندسی عمران امیرکبیر

نشریه مهندسی عمران امیرکبیر، دوره ۵۵، شماره ۱۰، سال ۱۴۰۲، صفحات ۲۱۳۵ تا ۲۱۴۸
DOI: 10.22060/ceej.2023.22268.7941

بررسی روابط میان مولفه‌های ژئومکانیکی تاثیرگذار بر انتخاب روش‌های استخراج زیرزمینی با رویکرد دیمتل فازی

زینب جهانبانی[۱]، مجید عطایی‌پور[۱*]، علی مرتضوی[۲]

۱. دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران
۲. استاد دانشکده معدن و علوم زمین، دانشگاه نظربایف، آستانا، قزاقستان

خلاصه: در وقوع ریسک‌های ژئومکانیکی در معادن زیرزمینی نه یک فاکتور به‌تنهایی، بلکه مجموعه‌ای از فاکتورها در ارتباط با یکدیگر عمل می‌کنند. لذا انتخاب یک روش استخراج زیرزمینی مناسب و مطالعه ارتباط و اندرکنش موجود میان فاکتورهای ژئومکانیکی و زمین‌شناسی موثر در آن، قبل از شروع معدنکاری، می‌تواند در بیشینه‌سازی سود و بازیابی از منابع معدنی، افزایش بهره‌وری و کاهش هزینه‌های تولید و افت ماده معدنی و در نهایت ایجاد یک محیط ایمن برای معدنکاران در زیر زمین بسیار مفید باشد. لذا با توجه به اهمیت موضوع، در این تحقیق با کاربرد روش دیمتل فازی به تحلیل ساختار حاکم بر پارامترها از دیدگاه اثرگذاری و چگونگی روابط آنها با یکدیگر و همچنین بررسی اهمیت هر یک از آنها پرداخته شد. برای اجرای این تکنیک، ابتدا پرسشنامه‌هایی طراحی و در میان متخصصان توزیع و سپس ۱۸ پرسشنامه برای ارزیابی پارامترها دریافت شد. در نهایت با اجرای این روش، بردارهای برتری (R+C) و ارتباط (R-C) و درنتیجه میزان اهمیت، اثرگذاری و اثرپذیری برای هر یک از پارامترها محاسبه شد. نتایج حاصل از تحقیق نشان می‌دهند که شاخص‌های مقاومت کششی توده‌سنگ، فاصله‌داری ناپیوستگی‌ها و سپس ساختارهای اصلی زمین‌شناسی کانسار (درزه‌ها و ناپیوستگی‌ها، گسل‌ها، صفحات ضعیف و دایک‌ها)، تاثیرگذارترین و مدول تغییر شکل‌پذیری توده‌سنگ نیز تاثیرپذیرترین فاکتورها هستند. نمودار علّی ترسیم شده برای پارامترهای مؤثر در فرآیند انتخاب روش‌های استخراج زیرزمینی و وقوع ریسک‌های ژئومکانیکی در معادن زیرزمینی نیز نشان می‌دهد که پارامتر مقاومت برشی ناپیوستگی‌های اصلی دارای بیشترین مقدار برتری است و از این‌رو دارای بیشترین اهمیت در بین سایر پارامترها می‌باشد.

تاریخچه داوری:
دریافت: ۱۴۰۱/۱۲/۲۰
بازنگری: ۱۴۰۲/۰۴/۲۵
پذیرش: ۱۴۰۲/۰۵/۱۳
ارائه آنلاین: ۱۴۰۲/۰۶/۱۲

کلمات کلیدی:
معیارهای تاثیرگذار
انتخاب روش استخراج زیرزمینی
ریسک‌های ژئومکانیکی
دیمتل فازی
مدل‌سازی ساختاری

۱- مقدمه

پایداری و عملکرد حفاری‌ها در معادن زیرزمینی به اندرکنش بین توده‌سنگ و حفریه بستگی دارد. در اثر معدنکاری و افزایش عمق در روش‌های استخراج زیرزمینی، وضعیت اصلی توده‌سنگ اطراف حفاری مختل شده و ممکن است منجر به شکست یا ناپایداری در حفریه و وقوع ریسک‌های ناشی از عدم قطعیت‌های ژئومکانیکی شود که تهدیدی برای ایمنی پرسنل و تجهیزات به‌شمار می‌رود. از آنجا که بخش‌های مختلف یک کانسار معمولاً از نظر زمین‌شناسی، فیزیکی، شیمیایی و ساختاری بسیار متفاوت است، بنابراین فاکتورهای بسیاری می‌توانند در وقوع ریسک و ناپایداری در معادن زیرزمینی تاثیرگذار باشند. در وقوع ریسک‌های ژئومکانیکی در معادن زیرزمینی نه یک فاکتور به‌تنهایی، بلکه مجموعه‌ای از فاکتورها در ارتباط با یکدیگر بوده و می‌تواند منجر به ایجاد حوادث ژئوتکنیکی در قالب ریزش سقف، نشست، انفجار سنگ[1] و غیره شود. لذا انتخاب یک روش استخراج زیرزمینی مناسب می‌تواند در بیشینه‌سازی سود و بازیابی از منابع معدنی، افزایش بهره‌وری و کاهش هزینه‌های تولید و افت ماده معدنی و در نهایت ایجاد یک محیط ایمن برای معدنکاران در زیر زمین بسیار مفید باشد. از طرفی دیگر، فرآیند انتخاب بهترین روش برای استخراج یک کانسار به دلیل مطابقت آن با مجموعه‌ای از معیارها، مساله‌ای بسیار مهم و چالش‌برانگیز 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 درنظر گرفته شود. پارامترهای ایمنی، اقتصادی و زیست‌محیطی نیز فاکتورهای مهمی هستند و در انتخاب ایمن‌ترین و سودآورترین روش استخراج باید به آن‌ها توجه شود [۱، ۲]. بنابراین شناسایی فاکتورهای ژئومکانیکی موثر در انتخاب روش‌های

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

1 Rock burst

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.

استخراج زیرزمینی و همچنین مطالعه اندرکنش میان آنها قبل از شروع یک عملیات معدنکاری ایمن، از اهمیت بالایی برخوردار است. تکنیک دیمتل فازی[1]، یکی از روش‌هایی است که به بررسی و تحلیل ساختار حاکم بر معیارها از نقطه‌نظر روابط علت/ معلولی و تعامل آنها با یکدیگر می‌پردازد. از این‌رو، در این مقاله با کاربرد روش دیمتل فازی به تحلیل ساختار مولفه‌های ژئومکانیکی و زمین‌شناسی موثر در انتخاب روش‌های استخراج زیرزمینی از دیدگاه اثرگذاری/ اثرپذیری و بررسی اهمیت هریک از آنها پرداخته شده است.

۲- پیشینه تحقیق

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[2] در سال ۱۹۴۱ ارائه کرده است. پس از وی نیز محققان مختلفی ازجمله بشکوف و رایت[3] (۱۹۷۳)، موریسون[4] (۱۹۷۶)، لابشر[5] (۱۹۸۱)، نیکلاس[6] (۱۹۸۱)، هارتمن[7] (۱۹۸۷)، پاکالنیز و همکاران[8] (۱۹۹۵) و میچ و همکاران[9] (۲۰۰۲) در مطالعات خود به منظور تصمیم‌گیری برای انتخاب روش استخراج از فاکتورهای مختلف بهره برده‌اند [۳]. آلپای و یاووز[10] در مطالعه خود (۲۰۰۷)، مشخصات مکانی کانسار، شرایط زمین‌شناسی و هیدرولوژیکی، ویژگی‌های ژئوتکنیکی (سنگ و خاک)، ملاحظات اقتصادی، فاکتورهای فنی و مسائل زیست‌محیطی را به‌عنوان فاکتورهای تاثیرگذار درنظر گرفته‌اند [۴]. گوپتا و کومار[11] (۲۰۱۳)، فاکتورهای ذاتی و فاکتورهای خارجی (بیرونی) را در مطالعه خود استفاده کرده‌اند [۲]. بالوسا و سینگام[12] 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 [۵]. فو و همکاران[13] (۲۰۱۸) در تحقیق خود پارامترهای بازده اقتصادی، پارامترهای فنی، مدیریت، شرایط ایمنی و امنیت و مسائل زیست‌محیطی و بالوسا و گورای[14] (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, ۷]. باجی و همکاران[15] نیز در سال ۲۰۲۰ برای انجام مطالعه خود با هدف انتخاب روش مناسب استخراج از فاکتورهای فنی، تولید و اقتصادی بهره برده‌اند [۸]. غزدالی[16] 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 [۹]. ماهروس[17] و جانگ-گووان[18] 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[19] در مکزیک استفاده کردند (سال ۲۰۲۱) [۱۰]. صمیمی‌نمین[20] و همکاران نیز در سال ۲۰۲۲ مطالعه‌ای مروری بر کاربرد روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره[21] برای انتخاب روش استخراج انجام دادند [۱۱].

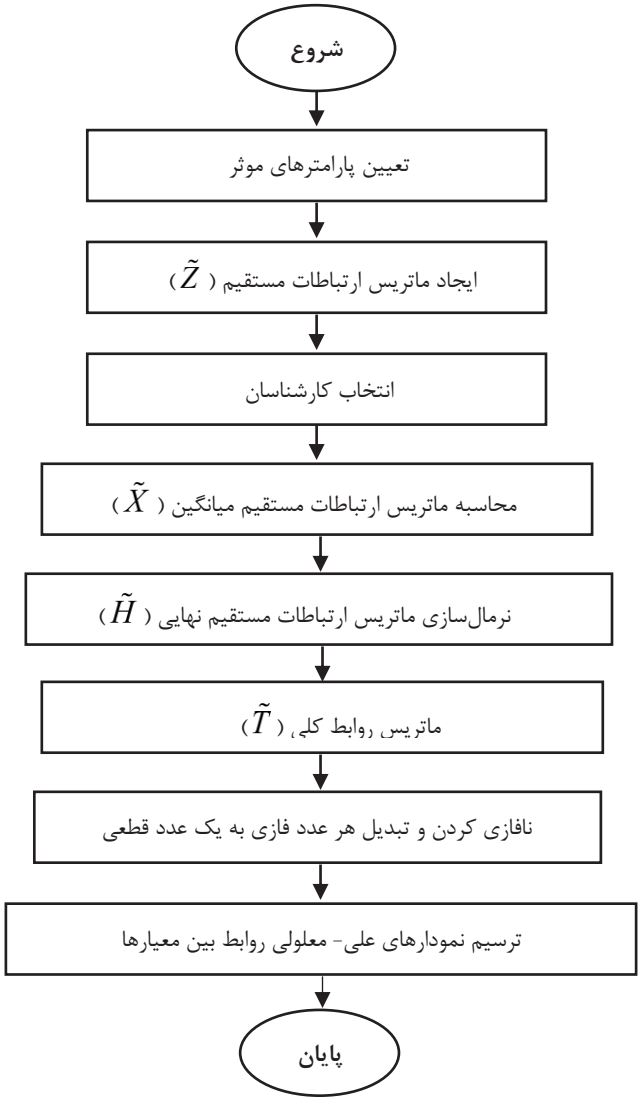
همانطور که اشاره شد با افزایش عمق در روش‌های استخراج زیرزمینی، وقوع ریسک‌های ژئومکانیکی نیز افزایش می‌یابد. در ایجاد ریسک‌های ژئومکانیکی، پایداری حفریه‌های زیرزمینی و انتخاب یک روش استخراج زیرزمینی مناسب و ایمن، فاکتورهای زیادی تاثیرگذار بوده و در ارتباط تنگاتنگ با یکدیگر هستند. از طرف دیگر، با وجود مطالعاتی که در زمینه انتخاب روش‌های استخراج زیرزمینی انجام‌شده است، تاکنون پژوهشی به شناسایی روابط میان مولفه‌های موثر در انتخاب روش‌های استخراج زیرزمینی نپرداخته است و این امر نیز بر ضرورت و اهمیت مطالعه حاضر می‌افزاید. بنابراین بررسی و مطالعه ارتباط و اندرکنش موجود میان این فاکتورها، قبل از شروع معدنکاری، نه تنها امکان انتخاب بهترین و سودآورترین روش

1 Fuzzy DEMATEL
2 Peele
3 Boshkov and Wright
4 Morison
5 Lubscher
6 Nicholas
7 Hartman
8 Pakalnis et al.
9 Meech et al.
10 Alpay &Yavuz
11 Gupta & Kumar
12 Balusa & Singam
13 Fu et al.
14 Balusa & Gorai,
15 Baji´c et al.
16 Ghazdali
17 Mahrous
18 Jong-Gwan
19 Boleo mine
20 Samimi Namin
21 Multi Criteria Decision-Making (MCDM)

استخراج را فراهم خواهد کرد، بلکه به شناسایی خطرها و ریسک‌های بالقوه زیرزمینی و پیشگیری از حوادث نیز کمک بسیاری کرده و درنتیجه منجر به انتخاب ایمن‌ترین روش استخراج زیرزمینی نیز خواهد شد. از این‌رو در تحقیق حاضر، به مطالعه میزان روابط تاثیرگذاری و تاثیرپذیری فاکتورهای موردنظر با استفاده از تکنیک دیمتل فازی پرداخته شده است. به‌عبارت دیگر، انجام این تحقیق نشان خواهد داد که کدام یک از مولفه‌ها دارای بیشترین تاثیرگذاری و کدام یک با بیشترین تاثیرپذیری همراه هستند.

۳- روش دیمتل فازی

در بررسی یک فرآیند یا سیستم، قدم اول تعیین پارامترهای موثر در آن و سپس شناخت، بررسی و تحلیل ساختار حاکم بر آنها از نقطه نظر چگونگی روابط آنها با یکدیگر و ساختار کلی آنها است. اما زمانی که تعداد و تنوع فاکتورها افزایش یابد، بررسی ساختار و تعامل آنها با یکدیگر به سادگی صورت نمی‌پذیرد و به روش‌هایی علمی در این زمینه نیاز خواهد بود. از این‌رو در این تحقیق به تحلیل ساختار مولفه‌های ژئومکانیکی و زمین‌شناسی موثر در انتخاب روش‌های استخراج زیرزمینی از دیدگاه اثرگذاری بر روی یکدیگر و بررسی اهمیت هریک از آنها پرداخته شد. برای این منظور، پس از شناسایی پارامترها برای شناسایی و تشریح ساختار آنها از روش دیمتل فازی استفاده شد. در شکل ۱ مراحل اجرای این روش ارائه شده است و در ادامه به تشریح آن پرداخته می‌شود. شایان ذکر است که برای پیاده‌سازی و انجام محاسبات، از نرم‌افزار Excel 2016 استفاده شد.



شکل ۱. مدل اجرایی پژوهش

Fig. 1. The framework of the research

روش دیمتل یکی از روش‌های تصمیم‌گیری چند معیاره بر مبنای تئوری گراف است که برای اولین بار در اواخر سال ۱۹۷۱ میلادی در مرکز تحقیقات ژنو[1] توسط فونتلا[2] و گابوس[3] برای بررسی و حل مسائل بسیار پیچیده جهانی معرفی شد. این روش به عنوان نوعی رویکرد مدل‌سازی ساختاری، به ویژه در تحلیل روابط علت و معلولی بین اجزای یک سیستم بسیار مفید است. دیمتل با استفاده از اصول تئوری گراف و ماتریس روابط علی بر اساس نظر خبرگان مسائل مختلف را به صورت گراف‌های جهت‌دار نشان می‌دهد و ساختار سلسله مراتبی از روابط اثرپذیری و اثرگذاری معیارها بر یکدیگر (وابستگی متقابل بین فاکتورها) را مورد بررسی قرار می‌دهد. بر این اساس نمودارهای علت و معلولی ساختار شبکه‌ای آنها ترسیم می‌شود. از این طریق می‌توان به درک علمی از چگونگی تاثیرگذاری پارامترها در این فرآیند رسید و نقش هر یک از آنها را مورد ارزیابی قرار داد [۱۲-۱۸]:

در این روش، ابتدا مولفه‌های اصلی و عوامل (پارامتر یا متغیر) موثر بر آنها شناسایی می‌شوند. برای این منظور می‌توان از روش طوفان ذهنی و مرور ادبیات استفاده کرد. سپس یک ماتریس مربعی با عوامل موثر در ردیف و ستون (ماتریس $\tilde{Z}$) تهیه (رابطه ۱) و در اختیار متخصصان قرار داده می‌شود تا میزان تأثیر مستقیم هر عامل بر سایر عوامل (شدت اثرها) با استفاده از متغیرهای زبانی امتیازدهی شود. در این ماتریس هر درایه به صورت یک عدد فازی مثلثی در نظر گرفته شده است (در تحقیق حاضر).

$$M_{\max} \propto D_{pile}^{\kappa} \qquad (۱)$$

در این ماتریس، $\tilde{Z}_{ij} = (z_{ij\,l}, z_{ij\,m}, z_{ij\,u})$ میزان تاثیر معیار C_i بر معیار C_j را نشان می‌دهد.

در گام بعد ماتریس میانگین ($\tilde{X}$) برای نشان دادن تأثیرات اولیه مستقیم یک معیار بر روی خود و سایر معیارها، محاسبه می‌شود (رابطه ۲).

$$\tilde{X} = \frac{\tilde{z}^1 + \tilde{z}^2 + \tilde{z}^3 + \ldots + \tilde{z}^p}{p} \qquad (۲)$$

در این رابطه، p تعداد خبرگان و $\tilde{z}^1$، $\tilde{z}^2$ و $\tilde{z}^p$ به ترتیب ماتریس مقایسه زوجی کارشناس ۱، ۲ و p است. هر درایه ماتریس میانگین ($\tilde{x}$) نیز یک عدد فازی مثلثی و به صورت $\tilde{x}_{ij} = (x'_{ij\,l}, x'_{ij\,m}, x'_{ij\,u})$ است.

ماتریس ($\tilde{H}$) با نرمال‌سازی ماتریس ارتباطات مستقیم نهایی/ میانگین ($\tilde{X}$) به دست می‌آید. رابطه ۳، ماتریس $\tilde{H}$ را نشان می‌دهد. نحوه محاسبه ریاضیاتی این ماتریس به صورت رابطه (۴) است.

$$\tilde{H} = \begin{bmatrix} \tilde{h}_{11} & \tilde{h}_{12} & \cdots & \tilde{h}_{1n} \\ \tilde{h}_{21} & \tilde{h}_{22} & \cdots & \tilde{h}_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \tilde{h}_{n1} & \tilde{h}_{n2} & \cdots & \tilde{h}_{nn} \end{bmatrix} \qquad (۳)$$

$$\tilde{h}_{ij} = \frac{\tilde{x}_{ij}}{r} = \left(\frac{x_{ij,l}}{r}, \frac{x_{ij,m}}{r}, \frac{x_{ij,u}}{r}\right) \qquad (۴)$$

که در این رابطه $\tilde{x}_{ij}$ هر درایه ماتریس میانگین و r بیشینه مقدار جمع سطرها بوده و به صورت زیر تعریف می‌شود (رابطه ۵):

$$r = \max_{1 \le i \le n} \left(\sum_{j=1}^{n} x_{ij,u}\right) \qquad (۵)$$

در مرحله بعد، ماتریس روابط کلی ($\tilde{T}$) محاسبه شده و اثر نسبی حاکم بر روابط مستقیم و غیرمستقیم به دست می‌آید (رابطه ۶). $\tilde{T}$ یک ماتریس $n \times n$ بوده و به صورت رابطه (۷) تعریف می‌شود.

$$\tilde{T} = \tilde{H}(1 - \tilde{H})^{-1} \qquad (۶)$$

$$\tilde{T} = \begin{bmatrix} \tilde{t}_{11} & \tilde{t}_{12} & \cdots & \tilde{t}_{1n} \\ \tilde{t}_{21} & \tilde{t}_{22} & \cdots & \tilde{t}_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \tilde{t}_{n1} & \tilde{t}_{n2} & \cdots & \tilde{t}_{nn} \end{bmatrix} \qquad (۷)$$

1 Geneva Research Center
2 Fontela
3 Gabus

هر درایه این ماتریس به صورت $\tilde{t}_{ij}=(t_{ijl},t_{ij\ m},t_{ij\ u})$ است و با استفاده از فرمول‌های ۸ تا ۱۰ محاسبه می‌شوند.

$$\left[t_{ij,l}\right]=H_l\times(I-H_l)^{-1} \quad (۸)$$

$$\left[t_{ij,m}\right]=H_m\times(I-H_m)^{-1} \quad (۹)$$

$$\left[t_{ij,u}\right]=H_u\times(I-H_u)^{-1} \quad (۱۰)$$

در این فرمول‌ها I ماتریس یکه و H_l، H_m و H_u هر کدام ماتریس $n\times n$ هستند که درایه‌های آن را به ترتیب عدد پایین، عدد میانی و عدد بالایی اعداد فازی مثلثی ماتریس $\tilde{H}$ تشکیل می‌دهد.

اگر درایه‌های ماتریس روابط کلی به صورت $\tilde{t}_{ij}$ باشد، مجموع سطرها و ستون‌های ماتریس $\tilde{T}$ به صورت بردارهای $\tilde{R}_i$ و $\tilde{C}_j$ محاسبه می‌شوند (روابط ۱۱ و ۱۲).

$$\tilde{R}=\left[\tilde{R}_i\right]_{n\times1}=\sum_{j=1}^{n}\tilde{t}_{ij} \qquad (i=1,2,...,n) \quad (۱۱)$$

$$\tilde{C}=\left[\tilde{C}_j\right]_{n\times1}=\sum_{i=1}^{n}\tilde{t}_{ij} \qquad (j=1,2,...,n) \quad (۱۲)$$

جمع عناصر هر سطر $(\tilde{R}_i)$ برای هر عامل نشانگر میزان اثرگذاری آن عامل بر سایر عامل‌های سیستم است. جمع عناصر ستون $(\tilde{C}_j)$ برای هر عامل نیز نشانگر میزان اثرپذیری آن عامل از سایر عامل‌های سیستم است. بنابراین زمانی که $i=j$ است، مقدار $(\tilde{R}_i+\tilde{C}_j)$ شاخصی است که مجموع تأثیر گذاشته و گرفته شده توسط پارامتر i را نشان می‌دهد. این مقدار بیانگر مجموع تأثیر گذاشته شده و گرفته شده پارامتر i است و هر چه مقدار آن برای پارامتری بیشتر باشد، آن عامل تعامل بیشتری با سایر عوامل سیستم دارد. این مقدار را برتری[1] می‌نامند. مقدار $(\tilde{R}_i-\tilde{C}_j)$ نشان‌دهنده تأثیری است که پارامتر i در سیستم به اشتراک گذاشته و با آن در تعامل است و ارتباط[2] نامیده می‌شود. اگر مقدار $(\tilde{R}_i-\tilde{C}_j)$ مثبت باشد، پارامتر i به عنوان متغیر علت (فاکتور اثرگذار) بوده و زمانی که این مقدار منفی باشد، متغیر به عنوان معلول (فاکتور اثرپذیر) است. در این مرحله نمودارهای علی- معلولی نیز برای بیان روابط بین معیارها ترسیم می‌شوند.

در نهایت نیز اعداد فازی مثلثی به‌دست آمده از مراحل قبلی با استفاده از روش مرکز گرانیگاه که دقیق‌ترین روش غیرفازی کردن است، نافازی می‌شوند (رابطه ۱۳) [۱۹, ۲۰].

$$X^*=\frac{\int_{a_1}^{a_2}\frac{x-a}{a_2-a_1}xdx+\int_{a_2}^{a_3}\frac{a_3-x}{a_3-a_2}xdx}{\int_{a_1}^{a_2}\frac{x-a}{a_2-a_1}dx+\int_{a_2}^{a_3}\frac{a_3-x}{a_3-a_2}dx}=\frac{1}{3}(a_1+a_2+a_3) \quad (۱۳)$$

X^* مقدار نافازی شده هر عدد فازی مثلثی $\tilde{A}=(a_{\text{ü}},a\ ,a\ )$ است.

٤- معیارهای تاثیرگذار در انتخاب روش‌های استخراج زیرزمینی

با افزایش عمق معادن و درنتیجه افزایش تعداد فاکتورهای دارای عدم قطعیت، فعالیت‌های معدنکاری زیرزمینی می‌تواند با خطرها و ریسک‌های دارای پیامدهای فاجعه‌بار همراه باشند. فاکتورهای بسیاری مانند «خصوصیات مکانیکی توده‌های سنگی»، «جهت‌گیری و خواص ناپیوستگی‌ها»، «شرایط هیدرولوژیکی» و «شرایط تنش‌های القایی و برجا» ازجمله فاکتورهای تأثیرگذار بر پایداری حفاری‌ها و معادن زیرزمینی و از پارامترهای موثر در انتخاب یک روش استخراج زیرزمینی ایمن هستند. مطالعات زیادی در زمینه انتخاب روش‌های استخراج زیرزمینی نیز نشان می‌دهند که این فرآیند به معیارهای بیشماری بستگی دارد. تحقیقات مختلف همچنین نشان می‌دهند که در وقوع ریسک‌های ژئومکانیکی در معادن زیرزمینی نه یک فاکتور به‌تنهایی، بلکه مجموعه‌ای از فاکتورها در ارتباط با یکدیگر بوده و منجر به ایجاد حوادث ژئوتکنیکی خواهند شد.

در تحقیق حاضر با هدف شناسایی روابط و اندرکنش میان مولفه‌های تاثیرگذار در انتخاب روش‌های استخراج زیرزمینی، منابع موجود در این زمینه مورد مطالعه قرار گرفت و فاکتورهای موثر در آن‌ها بررسی شد. سپس با توجه

1 Prominence

2 Relation

به هدف مطالعه، معیارهای ژئومکانیکی و زمین‌شناسی مهم و تاثیرگذار در فرآیند انتخاب روش‌های استخراج زیرزمینی و وقوع ریسک‌های ژئومکانیکی در معادن زیرزمینی، شناسایی شدند (جدول ۱) [۱, ۲, ۴–۸, ۲۱–۴۶].

۵- اجرای روش دیمتل فازی و تحلیل نتایج

در این تحقیق به تحلیل ساختار حاکم بر پارامترهای ژئومکانیکی و زمین‌شناسی مهم و تاثیرگذار در فرآیند انتخاب روش‌های استخراج زیرزمینی و وقوع ریسک‌های ژئومکانیکی در معادن زیرزمینی از نقطه نظر اثرگذاری و چگونگی روابط آنها با یکدیگر و همچنین بررسی اهمیت هر یک از آنها پرداخته شد. برای اجرای روش، ابتدا پرسشنامه‌هایی طراحی و در میان متخصصان توزیع و در نهایت ۱۸ پرسشنامه برای ارزیابی پارامترها دریافت شد. برای امتیازدهی از کارشناسان خواسته شد تا میزان تأثیر مستقیم هر عامل بر سایر عوامل را براساس مقادیر قطعی معادل با متغیرهای زبانی مندرج در جدول ۲ (امتیازهای ۰ تا ۴) امتیازدهی کنند. در مرحله بعد برای پیاده‌سازی روش و انجام محاسبات، به‌جای کاربرد مقادیر قطعی متغیرهای زبانی درج شده توسط کارشناسان در پرسشنامه‌های مربوطه، از معادل فازی این اعداد در ستون سمت راست جدول ۲، استفاده شد. به عنوان مثال در انجام محاسبات و وارد کردن این امتیازات در نرم‌افزار، به جای عدد ۱ از معادل فازی آن به صورت (۰/۵، ۰/۳، ۰/۱) استفاده شد. سپس روش دیمتل فازی مورد استفاده قرار گرفت.

جدول ۱. معیارهای ژئومکانیکی تاثیرگذار در انتخاب روش‌های استخراج زیرزمینی در مطالعه حاضر

Table1. Geomechanical criteria influencing the underground mining method selection in the present study

معیار	ردیف	زیرمعیار	نماد
فاکتورهای ژئومکانیکی و زمین‌شناسی (ماده معدنی، کمربالا و کمرپایین)	۱	مقاومت برشی ناپیوستگی‌های اصلی (گسله‌ها و درزه‌های بزرگ)	SSMD
	۲	شیب/جهت شیب یا شیب/امتداد ناپیوستگی اصلی	DDMD
	۳	فاصله‌داری ناپیوستگی‌ها	DS
	۴	تنش‌های برجا	ISS
	۵	مقاومت کششی توده‌سنگ	RMTS
	۶	مدول تغییر شکل‌پذیری توده‌سنگ	RMDM
	۷	زاویه اصطکاک داخلی توده‌سنگ	RMFA
	۸	چسبندگی توده‌سنگ	RMC
	۹	شرایط هیدرولوژی (آب‌های سطحی و زیرزمینی)	HC
	۱۰	ساختارهای اصلی زمین‌شناسی کانسار (درزه‌ها و ناپیوستگی‌ها، گسل‌ها، صفحات ضعیف و دایک‌ها)	GSD

جدول ۲. متغیرهای زبانی به‌کار رفته در تحقیق و مقادیر قطعی و فازی معادل آنها

Table 2. Linguistic terms used in the research, and their fuzzy and crisp equivalent values

مقدار فازی ترم‌های زبانی	متغیر زبانی	معادل قطعی
(۰، ۰/۱، ۰/۳)	بدون تاثیر	۰
(۰/۱، ۰/۳، ۰/۵)	تاثیر خیلی کم (VL)	۱
(۰/۳، ۰/۵، ۰/۷)	تاثیر کم (L)	۲
(۰/۵، ۰/۷، ۰/۹)	تاثیر زیاد (H)	۳
(۰/۷، ۰/۹، ۱/۰)	تاثیر خیلی زیاد (VH)	۴

جدول ۳. نتایج تحلیل ماتریس روابط کلی پارامترهای مهم و تاثیرگذار در فرآیند انتخاب روش‌های استخراج زیرزمینی و وقوع ریسک‌های ژئومکانیکی در معادن زیرزمینی

Table 3. Results of total-relation matrix for geomechanical criteria influencing the underground mining method selection and occurrence of geotechnical accidents in underground mines

ردیف	معیار	نماد	R	C	$(R+C)$	$(R-C)$	نتیجه
۱	مقاومت برشی ناپیوستگی‌های اصلی (گسله‌ها و درزه‌های بزرگ)	SSMD	5.715	6.034	11.750	-0.319	اثرپذیر
۲	شیب/جهت شیب یا شیب/امتداد ناپیوستگی اصلی	DDMD	5.297	4.715	10.012	0.583	اثرگذار
۳	فاصله‌داری ناپیوستگی‌ها	DS	5.706	4.880	10.586	0.826	اثرگذار
۴	تنش‌های برجا	ISS	5.502	5.056	10.558	0.446	اثرگذار
۵	مقاومت کششی توده‌سنگ	RMTS	5.787	4.846	10.632	0.941	اثرگذار
۶	مدول تغییر شکل‌پذیری توده‌سنگ	RMDM	5.115	6.095	11.210	-0.979	اثرپذیر
۷	زاویه اصطکاک داخلی توده‌سنگ	RMFA	5.274	5.600	10.874	-0.325	اثرپذیر
۸	چسبندگی توده‌سنگ	RMC	5.387	5.816	11.204	-0.429	اثرپذیر
۹	شرایط هیدرولوژی (آب‌های سطحی و زیرزمینی)	HC	5.566	5.116	10.682	0.449	اثرگذار
۱۰	ساختارهای اصلی زمین‌شناسی کانسار (درزه‌ها و ناپیوستگی‌ها، گسل‌ها، صفحات ضعیف و دایک‌ها)	GSD	5.855	5.166	11.021	0.689	اثرگذار

۵- ۱- نتایج تحلیل ماتریس روابط کلی معیارها

با اجرای هر گام از روش، در نهایت بردارهای برتری $(R+C)$ و ارتباط $(R-C)$ و درنتیجه میزان اهمیت، اثرگذاری و اثرپذیری برای هریک از پارامترها محاسبه شد. نتایج حاصل در جدول ۳ نشان داده شده است.

نتایج حاصل از محاسبات نشان می‌دهد که پارامترهای مقاومت کششی توده‌سنگ، فاصله‌داری ناپیوستگی‌ها، ساختارهای اصلی زمین‌شناسی کانسار (درزه‌ها و ناپیوستگی‌ها، گسل‌ها، صفحات ضعیف و دایک‌ها)، شیب/جهت شیب یا شیب/امتداد ناپیوستگی اصلی، شرایط هیدرولوژی (آب‌های سطحی و زیرزمینی) و تنش‌های برجا از فاکتورهای تاثیرگذار و پارامترهای مقاومت برشی ناپیوستگی‌های اصلی (گسله‌ها و درزه‌های بزرگ)، مدول تغییر شکل‌پذیری توده‌سنگ، زاویه اصطکاک داخلی توده‌سنگ و چسبندگی توده‌سنگ نیز از معیارهای تاثیرپذیر در فرآیند انتخاب روش‌های استخراج زیرزمینی و وقوع ریسک‌های ژئومکانیکی در معادن زیرزمینی هستند. در این میان، شاخص‌های مقاومت کششی توده‌سنگ، فاصله‌داری ناپیوستگی‌ها و سپس ساختارهای اصلی زمین‌شناسی کانسار (درزه‌ها و ناپیوستگی‌ها، گسل‌ها، صفحات ضعیف و دایک‌ها)، تاثیرگذارترین و مدول تغییر شکل‌پذیری توده‌سنگ نیز تاثیرپذیرترین فاکتورها هستند. به دلیل وجود روابط داخلی بین پارامترها، مقادیر اثرگذاری و اثرپذیری مربوط به آنها نزدیک به هم هستند. در ادامه این بخش، پارامترهای مورد مطالعه در تحقیق از نقطه‌نظر چگونگی تاثیرگذاری و تاثیرپذیری و وجود روابط میان آنها مورد تحلیل و بررسی بیشتر قرار گرفته شده است.

هوک و براون[1] در سال ۱۹۸۰ و هادسون[2] در سال ۱۹۸۹، مدهای شکست را به دو گروه شامل ۱) شکست ناشی از بلوک‌ها یا قطعاتی که به وسیله ناپیوستگی‌ها کنترل می‌شوند و ۲) شکست ناشی از تنش‌های القایی، تقسیم کردند. شکست ناشی از تنش‌های القایی زمانی رخ می‌دهد که تنش‌های توسعه‌یافته بیش از حد مقاومت سنگ باشد. به عبارت دیگر،

1 Brown
2 Hudson

ناپایداری توده‌سنگ در اطراف حفاری‌های زیرزمینی به دلیل اختلال در رژیم تنش‌های درجا رخ می‌دهد. بزرگی و جهت‌گیری تنش درجا، پارامترهای مهم مهندسی برای ارزیابی رفتار کوتاه‌مدت و بلندمدت حفاری‌های زیرزمینی هستند. این پارامترها نه تنها تعیین کننده تنش‌های القایی در اطراف حفریه هستند، بلکه تأثیر به‌سزایی در مشخصات توده‌سنگ و ایجاد مکانیزم‌های شکست احتمالی دارند. شرایط تنش‌های برجا با حفاری معدن تغییر کرده و آرایش جدید به خود می‌گیرد. از این‌رو، دانش در زمینه تنش درجا در طراحی حفریه‌های زیرزمینی به منظور پیش‌بینی و جلوگیری از وقوع ریسک‌های ژئومکانیکی ضروری است. از طرف دیگر، با افزایش تنش وارده بر توده‌سنگ و یا ایجاد فضاهای زیرزمینی، میزان تغییرشکل یا مدول تغییر شکل‌پذیری توده‌سنگ نیز افزایش می‌یابد. تغییرشکل متداول‌ترین واکنش توده‌سنگ به ایجاد حفاری‌ها بوده و می‌تواند پیشرو در ناپایداری باشد.

ساختارهای زمین‌شناسی نیز یکی از فاکتورهای مهمی هستند که پایداری فضاها و حفریه‌های زیرزمینی را تحت تأثیر قرار می‌دهند. حضور ساختارهای زمین‌شناسی مانند تقاطع گسل‌ها یا شکستگی‌ها، علت اصلی ریزش در کارگاه استخراج در نظر گرفته شده است. درزه‌ها و ناپیوستگی‌ها در بزرگ مقیاس مکانیزمی متفاوت با مقیاس کوچک از خود نشان می‌دهند. درزه‌ها می‌توانند باعث ایجاد ناپایداری محلی شوند؛ قادرند سبب تضعیف سنگ شده و زون جابه‌جایی ناشی از حفاری را افزایش دهند؛ درزه‌ها هم‌چنین سیستم جریان آب را در مجاورت حفاری تغییر می‌دهند. بنابراین می‌توانند محیط‌هایی با عدم قطعیت بالا ایجاد کرده و پتانسیل وقوع ریسک و خطرات ناشی از ناپایداری را افزایش دهند. ناپیوستگی‌ها دارای مقاومت کششی بسیار کم می‌باشند که این امر در زون‌های تنش‌زدایی شده باعث کاهش مقاومت و گسیختگی توده‌سنگ می‌شوند. با افزایش تعداد ناپیوستگی‌ها در یک توده‌سنگ، مقاومت کششی آن کاهش پیدا کرده و احتمال وقوع ناپایداری نیز بیشتر می‌شود. ناپیوستگی‌ها مهم‌ترین ویژگی توده‌سنگ برای کنترل نفوذپذیری و مقاومت آن هستند. وجود گسل نیز باعث کاهش قابل ملاحظه مقاومت توده‌سنگ و ناپایداری شده و مناطقی با مقاومت کم و با پتانسیل ریزشی بالا به وجود می‌آورند. به طور کلی، کاهش نیروی چسبندگی مصالح، کاهش زاویه اصطکاک داخلی مواد، کاهش مقاومت برشی و افزایش نفوذپذیری (در نتیجه افزایش ناپایداری) از تأثیرات جابجایی ناشی از گسل هستند. برخی از اثرات مشاهده شده ناشی از گسل‌ها در حفاری‌های معدنکاری زیرزمینی شامل موارد زیر است:

- لغزش بر روی گسل که می‌تواند منجر به توزیع مجدد تنش در اطراف حفاری شود
- فرسایش و دودکش شدن گسل‌های شکننده[1] و مواد اطراف کمربالا
- جدا شدن بلوک‌ها یا گوه‌های بزرگ در فضای حفاری که به صورت لغزش یا ریزش آزاد می‌شوند
- سستی ناشی از برداشته شدن تنش یا آزاد شدن سنگ که می‌تواند منجر به پدیده اختلاط در معدن شود
- عدم امکان تکمیل نصب عناصر تقویت‌کننده مانند مهارسنگ و پیچ‌سنگ
- ایجاد مجرایی برای نفوذ جریان آب به داخل حفاری‌ها

عامل دیگر ایجاد ناپایداری در توده‌سنگ به علت تشکیل بلوک‌ها یا قطعاتی با ابعاد و هندسه متفاوت است که به وسیله ناپیوستگی‌ها ایجاد می‌شوند. اطلاع از هندسه توده‌سنگ و بلوک‌های آن در زمینه‌های مختلف مهندسی سنگ نظیر طراحی سیستم نگهداری فضاهای زیرزمینی احداث‌شده در توده‌سنگ درزه‌دار (به‌طور مثال در دیواره تونل‌ها و کارگاه‌های معادن زیرزمینی)، طراحی الگوی آتشباری توده‌های سنگی، بهینه‌سازی خردایش توده‌سنگ، بررسی رقیق‌شدگی ماده معدنی در روش‌های استخراج تخریبی وغیره، ضروری است. طبق گزارش انجمن بین‌المللی مکانیک سنگ، پارامترهایی همچون فاصله‌داری، جهت‌داری (شیب/جهت شیب یا شیب/امتداد)، تعداد دسته‌درزه‌ها و اندازه بلوک‌ها برای شرح ناپیوستگی‌ها استفاده می‌شود. پارامترهای فاصله‌داری و جهت‌داری ناپیوستگی‌ها از پارامترهای مورد استفاده در طبقه‌بندی ژئومکانیکی یا امتیاز رده‌بندی توده‌سنگ (RMR) هستند.

هرچه میزان فاصله‌داری ناپیوستگی‌ها بیشتر باشد، تعداد ناپیوستگی‌ها کمتر، کیفیت توده‌سنگ بیشتر و امکان تشکیل بلوک‌های ناشی از وجود ناپیوستگی‌ها و درنتیجه وقوع ناپایداری در توده‌سنگ کاهش می‌یابد. از طرف دیگر، وجود مجموعه درزه‌ها با فاصله‌داری کم باعث پدید آمدن فشارهای متعدد آب و کاهش مقاومت توده‌سنگ و ایجاد ناپایداری خواهد شد. میزان شیب و امتداد ناپیوستگی‌ها نیز فاکتورهای مهمی دیگری هستند که در تعدیل امتیاز RMR مورد استفاده قرار می‌گیرند. علاوه بر این، پارامترهای مذکور در یک فعالیت معدنکاری یا حفر تونل نیز از اهمیت بالایی برخوردار هستند. به عنوان مثال اگر درزه‌ها عمود بر امتداد یا محور یک تونل

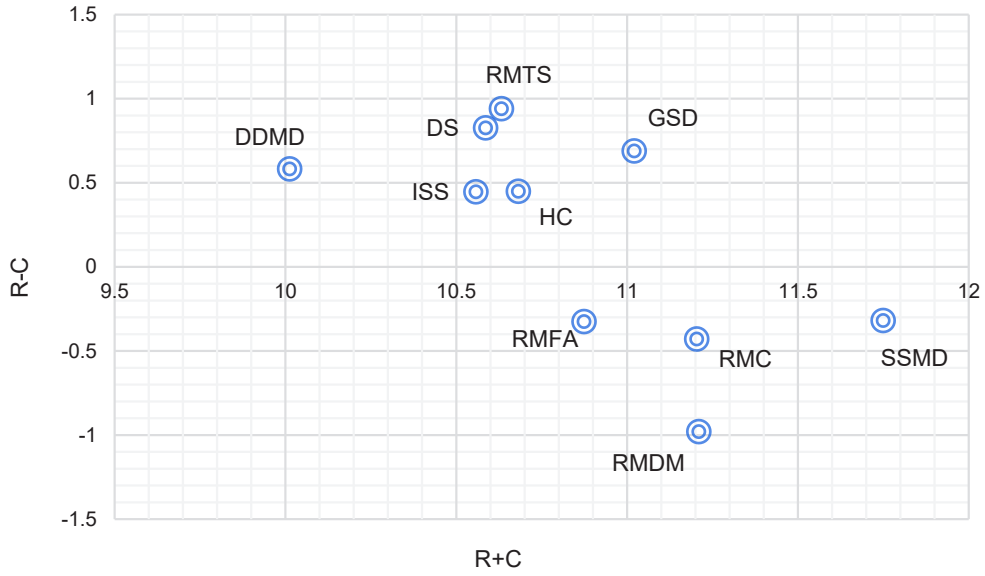
1 Fretting or chimneying of friable fault

باشند، حفاری در جهت شیب درزه و با میزان شیب بیشتر، از حفاری در جهت مقابل شیب و با شیب کمتر (به دلیل امکان وقوع لغزش) مطلوب‌تر و در نتیجه پایداری نیز بیشتر است. اما اگر امتداد درزه‌ها موازی با محور تونل/ جهت پیشروی باشد، هرچه شیب کمتر باشد، شرایط مطلوب‌تر و احتمال وقوع شکست نیز کمتر خواهد بود. به این ترتیب پارامترهای فاصله‌داری و جهت‌داری ناپیوستگی‌ها از فاکتورهای اثرگذار در تعیین امتیاز RMR و وقوع ریسک‌های ژئومکانیکی در معادن زیرزمینی خواهند بود.

یکی از فاکتورهای مهم دیگری که بر ناپایداری حفاری‌ها در معادن زیرزمینی تاثیرگذار است، شرایط هیدرولوژی می‌باشد. شکست‌های ناشی از آب زیرزمینی ممکن است سبب جاری شدن آب و ایجاد شرایط ناپایدار (مانند تورم) در برخی سنگ‌های خاص شود. آب هم‌چنین ممکن است باعث حل شدن بعضی مواد مانند کلسیت در سنگ آهک شود. از آنجا که این امکان وجود دارد تا رفتار سنگ با توجه به محیط ژئوهیدرولوژیکی آن تعیین شود، در برخی موارد ممکن است کنترل شرایط آب زیرزمینی در منطقه معدنی ضروری باشد. هم‌چنین، از آنجا که پر کردن کارگاه یک عنصر مهم در بسیاری از عملیات معدنکاری است، لیتولوژی منطقه در شرایط آب زیرزمینی متغیر باید از نقطه نظر ویژگی‌های مقاومتی با دقت بررسی شود. آب زیرزمینی از دو طریق عملکرد مکانیکی یک سنگ را تحت تأثیر قرار می‌دهد. اولین و بدیهی‌ترین مورد، از طریق تنش مؤثر است. آب تحت فشار در درزه‌هایی که بلوک‌های سنگی را محدود می‌کنند، سبب کاهش تنش مؤثر نرمال بین سطوح سنگ و در نتیجه کاهش مقاومت برشی آن می‌شود. آب هم‌چنین، از طریق کاهش اصطکاک درزه‌ها یا افزایش فشار آب منفذی، به ضعیف شدن سنگ کمک می‌کند. اثر دقیق‌تر آب زیرزمینی بر خصوصیات مکانیکی سنگ، از طریق تأثیر آن در سنگ‌هایی خاص ناشی می‌شود. به عنوان مثال، لایه‌های رسی ممکن است در حضور آب زیرزمینی نرم شده و به دنبال آن مقاومت کاهش و تغییر شکل توده‌سنگ افزایش یابد. در نتیجه آب زیرزمینی از طریق کاهش مقاومت توده‌سنگ و مدول یانگ و افزایش ضریب پواسون، احتمال ایجاد ناپایداری و ریسک را افزایش می‌دهد.

۵- ۲- نمودار علّی معیارها

در شکل ۲، نمودار علّی و به‌دنبال آن میزان اهمیت/ برتری و مقادیر تاثیرگذاری و تاثیرپذیری معیارها نشان داده شده است (با توجه به نتایج حاصل از جدول ۳). محور افقی نمودار اهمیت معیارها و محور عمودی نیز بیانگر اثرگذاری و اثرپذیری معیارهای مذکور است. شایان ذکر است که پارامترهای تاثیرگذار به عنوان علت و پارامترهای تاثیرپذیر به عنوان معلول محسوب می‌شوند. همانطور که ملاحظه می‌شود، پارامتر مقاومت برشی ناپیوستگی‌های اصلی (گسله‌ها و درزه‌های بزرگ) دارای بیشترین مقدار برتری است و از این‌رو دارای بیشترین اهمیت در بین سایر پارامترها



شکل ۲. نمودار علّی معیارها

Fig. 2. The cause-effect diagram of the criteria

می‌باشد. در سمت مقابل پارامتر شیب/جهت شیب یا شیب/امتداد ناپیوستگی اصلی دارای کمترین مقدار برتری بوده و درنتیجه از اهمیت کمتری نسبت به سایر پارامترها برخوردار است. همچنین مشاهده می‌شود که مقاومت کششی توده‌سنگ دارای بیشترین تعامل و مدول تغییر شکل‌پذیری توده‌سنگ دارای کمترین مقدار تعامل هستند.

۵- ۳- ماتریس روابط معیارها

در نهایت نیز براساس اطلاعات ماتریس روابط کلی، حد آستانه از طریق میانگین حسابی درایه‌های این ماتریس محاسبه و ماتریس روابط معیارها به دست آمد. بنابراین در این ماتریس تنها روابطی نمایش داده می‌شود که مقدار آنها در ماتریس $\tilde{T}$ بیش از مقدار میانگین به‌دست آمده باشد. شکل ۳، ماتریس روابط پارامترهای ژئومکانیکی و زمین‌شناسی مورد مطالعه در تحقیق را نشان می‌دهد.

٦- نتیجه‌گیری

با افزایش عمق در روش‌های استخراج زیرزمینی، وقوع ریسک‌های ژئومکانیکی نیز افزایش می‌یابد. در ایجاد ریسک‌های ژئومکانیکی، پایداری حفریه‌های زیرزمینی و انتخاب یک روش استخراج زیرزمینی مناسب و ایمن، فاکتورهای زیادی تاثیرگذار بوده و در ارتباط تنگاتنگ با یکدیگر هستند. از طرف دیگر، با وجود مطالعاتی که در زمینه انتخاب روش‌های استخراج زیرزمینی انجام‌شده است، تاکنون پژوهشی به شناسایی روابط میان مولفه‌های موثر در انتخاب روش‌های استخراج زیرزمینی نپرداخته است و این امر نیز بر ضرورت و اهمیت مطالعه حاضر می‌افزاید. درواقع هدف از نگارش این مقاله، مطالعه ارتباط و وابستگی متقابل موجود میان پارامترهای ژئومکانیکی و زمین‌شناسی موثر در انتخاب روش مناسب استخراج زیرزمینی است. بررسی ارتباط و اندرکنش موجود میان این فاکتورها، قبل از شروع معدنکاری، نه تنها امکان انتخاب بهترین و سودآورترین روش استخراج را فراهم خواهد کرد، بلکه به شناسایی خطرها و ریسک‌های بالقوه زیرزمینی و پیشگیری از حوادث نیز کمک بسیاری کرده و درنتیجه منجر به انتخاب ایمن‌ترین روش استخراج زیرزمینی نیز خواهد شد. از این‌رو در تحقیق حاضر، به مطالعه میزان روابط تاثیرگذاری و تاثیرپذیری فاکتورهای موردنظر و هم‌چنین بررسی اهمیت هر یک از آنها با استفاده از تکنیک دیمتل فازی پرداخته شد. برای اجرای این تکنیک، ابتدا پرسشنامه‌هایی طراحی و در میان متخصصان توزیع و سپس ۱۸ پرسشنامه برای ارزیابی پارامترها دریافت شد. در نهایت با اجرای این روش، بردارهای برتری $(R+C)$ و ارتباط $(R-C)$ و درنتیجه میزان اهمیت، اثرگذاری و اثرپذیری برای پارامترها محاسبه شد. نتایج حاصل از تحقیق نشان می‌دهند که شاخص‌های مقاومت کششی توده‌سنگ، فاصله‌داری ناپیوستگی‌ها و سپس ساختارهای اصلی زمین‌شناسی کانسار (درزه‌ها و ناپیوستگی‌ها، گسل‌ها، صفحات ضعیف و دایک‌ها)، تاثیرگذارترین و مدول تغییر شکل‌پذیری توده‌سنگ نیز تاثیرپذیرترین فاکتورها هستند. نمودار علّی ترسیم شده برای پارامترهای مؤثر در فرآیند انتخاب روش‌های استخراج زیرزمینی و وقوع ریسک‌های ژئومکانیکی در معادن زیرزمینی نیز نشان می‌دهد که پارامتر مقاومت برشی ناپیوستگی‌های اصلی (گسله‌ها و درزه‌های بزرگ) دارای بیشترین مقدار برتری است و از این‌رو دارای بیشترین اهمیت در بین سایر پارامترها می‌باشد.

symbol	SSMD	DDMD	DS	ISS	RMTS	RMDM	RMFA	RMC	HC	GSD
SSMD	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
DDMD	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1
DS	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
ISS	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
RMTS	1	0	0	0	1	1	1	1	1	1
RMDM	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1
RMFA	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
RMC	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
HC	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
GSD	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

شکل ۳. ماتریس روابط معیارها

Fig. 3. The cause-effect relationship matrix of the criteria

منابع

[1] M.A. Idris, Probabilistic stability analysis of underground mine excavations, Luleå tekniska universitet, Ph. D Thesis, 2014.

[2] 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.

[3] 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.

[4] 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.

[5] 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.

[6] 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.

[7] 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.

[8] 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.

[9] 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.

[10] 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).

[11] 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.

[12] M. Kiani, S.H. Hosseini, M. Taji, M. Gholinejad, Mining of Mineral Deposits, (2021).

[13] E. Selerio Jr, J.A. Caladcad, M.R. Catamco, E.M. Capinpin, L. Ocampo, Emergency preparedness during the COVID-19 pandemic: Modelling the roles of social media with fuzzy DEMATEL and analytic network process, Socio-economic planning sciences, 82 (2022) 101217.

[14] A. Muhafidzah, K. Ramli, Interdependency and Priority of Critical Infrastructure Information (Case Study: Indonesia Payment System), Jurnal RESTI (Rekayasa Sistem dan Teknologi Informasi), 6(3) (2022) 403-411.

[15] H. Hamedi, A. Mehdiabadi, Entrepreneurship resilience and Iranian organizations: application of the fuzzy DANP technique, Asia Pacific Journal of Innovation and Entrepreneurship, 14(3) (2020) 231-247.

[16] C. Valmohammadi, M.M. Khaki, Determinants for selection of projects for exploitation of mines in Iran, Resources Policy, 63 (2019) 101424.

[17] A. Baykasoğlu, V. Kaplanoğlu, Z.D. Durmuşoğlu, C. Şahin, Integrating fuzzy DEMATEL and fuzzy hierarchical TOPSIS methods for truck selection, Expert systems with applications, 40(3) (2013) 899-907.

[18] C.-J. Lin, W.-W. Wu, A causal analytical method for group decision-making under fuzzy environment, Expert Systems with Applications, 34(1) (2008) 205-213.

[19] 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.

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

selection of the optimum underground mining method, Archives of Mining Sciences, 54(2) (2009) 341-368.

[31] 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.

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

[33] 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.

[34] 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.

[35] S. Heidarzadeh, A. Saeidi, A. Rouleau, Use of probabilistic numerical modeling to evaluate the effect of geomechanical parameter variability on the probability of open-stope failure: a case Study of the Niobec Mine, Quebec (Canada), Rock Mechanics and Rock Engineering, 53(3) (2020) 1411-1431.

[36] M. Cai, Rock mass characterization and rock property variability considerations for tunnel and cavern design, Rock mechanics and rock engineering, 44 (2011) 379-399.

[37] J.C. Langford, Application of reliability methods to the design of underground structures, Queen's University (Canada), 2013.

[38] B.H. Brady, E.T. Brown, Rock mechanics: for underground mining, Springer science & business media, 2006.

[39] D.M. Milne, Underground design and deformation based on surface geometry, University of British Columbia, 1997.

[40] A. Palmstrom, H. Stille, Ground behaviour and rock engineering tools for underground excavations, (2011).

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

[22] 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.

[23] 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.

[24] 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.

[25] 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.

[26] 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.

[27] 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.

[28] 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.

[29] 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.

[30] R. Mikaeil, M.Z. Naghadehi, M. Ataei, R. Khalokakaie, A decision support system using fuzzy analytical hierarchy process (FAHP) and TOPSIS approaches for

Tunnelling and Underground Space Technology, 22(4) (2007) 363-376.

[41] R. Rafiee, M. Ataei, R. Khalokakaie, S.M.E. Jalali, F. Sereshki, Determination and assessment of parameters influencing rock mass cavability in block caving mines using the probabilistic rock engineering system, Rock Mechanics and Rock Engineering, 48 (2015) 1207-1220.

[42] R. Mishra, R. Kiuru, L. Uotinen, M. Janiszewski, M. Rinne, Combining expert opinion and instrumentation data using Bayesian networks to carry out stope collapse risk assessment, in: MGR 2019: Proceedings of the First International Conference on Mining Geomechanical Risk, Australian Centre for Geomechanics, 2019, pp. 85-96.

[43] A.A. Antoniou, E. Lekkas, Rockfall susceptibility map for Athinios port, Santorini island, Greece, Geomorphology, 118(1-2) (2010) 152-166.

[44] M. Pender, M. Free, Stability assessment of slopes in closely jointed rock masses, in: ISRM International Symposium-EUROCK 93, OnePetro, 1993.

[45] E.T. Brown, Risk assessment and management in underground rock engineering—an overview, Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 4(3) (2012) 193-204.

[46] E.T. Brown, Block caving geomechanics, (2002).

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

Z. Jahanbani, M. Ataee-pour, A. Mortazavi , Investigating the interaction of geomechanical factors influencing the underground mining method selection using fuzzy DEMATEL method , Amirkabir J. Civil Eng., 55(10) (2024) 2135-2148.

DOI: 10.22060/ceej.2023.22268.7941

این صفحه عمداً خالی است