

توسعه یک سیستم طبقه‌بندی فازی به منظور ارزیابی کیفیت سقف معادن زغالی (مطالعه موردی: معادن زغال‌سنگ حوضه البرز شرقی)

رضا میکائیل^{۱*}، محمد عطایی^۲، محمد جوانشیر گیو^۳، صالح قادرنژاد^۴، امیر جعفرپور^۵

۱- دانشیار، گروه مهندسی معدن، دانشکده مهندسی معدن و مواد، دانشگاه صنعتی ارومیه

۲- استاد، دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود

۳- استادیار، گروه مهندسی معدن، دانشکده مهندسی، دانشگاه بیرجند

۴- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه تهران

۵- دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی معدن و متالورژی، دانشگاه یزد

(دریافت: تیر ۱۳۹۵، پذیرش: آذر ۱۳۹۷)

چکیده

شبیه‌سازی روش جبهه‌کار طولانی، یکی از متداول‌ترین روش‌های استخراج لایه‌های زغالی محسوب می‌شود. بررسی گذشته معدنکاری، گویای این واقعیت است که عمده خطرات ناشی از استخراج زیرزمینی زغال‌سنگ، مربوط به ریزش‌های ناگهانی و کنترل‌نشده سقف در کارگاه‌های استخراج است. پیش‌بینی رفتار سنگ سقف و قابلیت تخریب آن، در اجرای موفقیت‌آمیز این روش و کاهش خطرات ناشی از آن، از اهمیت بالایی برخوردار است. در این پژوهش، سعی شده است تا با استفاده از تئوری مجموعه‌های فازی و رویکرد فازی چندمعیاره، سیستم طبقه‌بندی فازی جدیدی به منظور ارزیابی کیفیت سقف معادن زغالی ارائه شود. در گام نخست، پس از بررسی پارامترهای تأثیرگذار بر کیفیت سقف، هشت پارامتر مشتمل بر مقاومت فشاری تک‌محوری، مقاومت کششی، حساسیت در مقابل رطوبت، فاصله‌داری و تداوم ناپیوستگی‌ها، ضخامت لایه‌بندی، شیب درزه‌ها و در نهایت اختلاف امتداد کارگاه و درزه‌های بحرانی، به‌عنوان پارامترهای مؤثر در سیستم طبقه‌بندی انتخاب شدند. در ادامه، پس از تعیین وزن پارامترها، سیستم طبقه‌بندی فازی ارائه شده است. این سیستم طبقه‌بندی فازی، قادر است تا کیفیت سقف معادن زغالی را در سه رده و به‌صورت کیفی در رده‌های خوب، متوسط و ضعیف مورد ارزیابی و طبقه‌بندی قرار دهد. به منظور بررسی عملکرد سیستم طبقه‌بندی فازی، داده‌های مربوط به ۱۵ کارگاه استخراج زغال‌سنگ در حوضه البرز شرقی با توجه به میزان گام پیشروی در هر کارگاه، مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج حاصل از این بررسی‌ها نشان داده است که می‌توان با قابلیت بالایی کیفیت سنگ سقف را با سیستم طبقه‌بندی فازی مورد ارزیابی قرار داد.

کلمات کلیدی

زغال‌سنگ، جبهه‌کار طولانی، کیفیت سنگ سقف، سیستم طبقه‌بندی

*عهده‌دار مکاتبات: reza.mikaeil@gmail.com

۱- مقدمه

در رابطه با ارزیابی کیفیت سقف در معادن زغالی که به روش جبهه کار طولانی استخراج می‌شوند، تحقیقات ارزنده‌ای صورت گرفته است. دب، در قالب یک گزارش فنی به بررسی نرخ ریزش سقف در معادن زغالسنگ با استفاده از روش‌های استدلال فازی پرداخت. وی با استفاده از روابط فازی ارائه شده، نرخ ریزش سقف معادن زغالسنگ را در پنج رده خیلی بالا، بالا، متوسط و پایین و خیلی پایین طبقه‌بندی کرده است [۱]. دوزگون و اینستین، به ارزیابی و مدیریت ریسک‌های ناشی از ریزش سقف معادن زغالسنگ زیرزمینی پرداخته و با ارائه مدلی نشان داده‌اند که برای هر معدن زیرزمینی با توجه به شرایط زمین‌شناسی و عملیاتی، لازم است که مدل محلی ارائه شود [۲]. در پژوهشی دیگر، دوزگون، به تجزیه و تحلیل خطرات سقوط سقف پرداخته و برای معادن زیرزمینی حوضه زغالسنگ زنگولک ارزیابی ریسک را انجام داده است. در این پژوهش، از روش‌های غیرفازی استفاده شده است [۳]. مارک و مولیندا، در تحقیق دیگری به طبقه‌بندی سقف معادن زغالسنگ با استفاده از داده‌های تجربی پرداختند [۴]. پالئی و داس، با تحلیل حساسیت ضریب ایمنی سیستم نگهداری به پیش‌بینی اثرات پارامترهای مؤثر بر ریزش سقف در معادن زغالسنگ زیرزمینی پرداختند و مشخص شد که عرض کارگاه، نخستین پارامتر مهم در کنترل ضریب ایمنی نگهداری‌ها محسوب می‌شود [۵]. فیلیپسن، به ارزیابی پارامترهایی نظیر بافت، کانی‌شناسی و مقاومت تک‌محوری سنگ و اثرات آنها در ریزش سقف معدن زغالسنگ ناشی از تنش‌های افقی پرداختند. تأثیر این عوامل در ریسک‌های مرتبط با ریزش سقف معادن زغالی قابل توجه بوده و نیاز به محاسبات و تحلیل‌های دقیق‌تری دارد [۶]. مائیتی و خانزوده، به توسعه مدلی برای تحلیل ریسک نسبی ناشی از ریزش سقف و دیواره و سوانح معدنی که منجر به مرگ شده‌اند، پرداخته و به‌عنوان مطالعه موردی، معدن‌های زغالسنگ زیرزمینی هند را بررسی کردند [۷]. پالئی و داس در تحقیق دیگر خود، رهیافتی مبنی بر یک مدل رگرسیون برای پیش‌بینی ریسک‌های ریزش سقف برای روش استخراج برد و پایه در معادن زغالسنگ ارائه کردند و بر اساس مطالعه این پژوهشگران مشخص شد که سقف‌های بدون نگهداری، توأم

با ریسک‌های فراوانی هستند و با افزایش عمق کارگاه‌ها، حوادث بزرگی رخ خواهد داد [۸]. قاسمی و همکاران نیز ریسک ناشی از ریزش سقف در معادن زغالسنگ را مورد ارزیابی قرار داده‌اند که به روش اتاق و پایه استخراج می‌شوند. آنها با استفاده از پارامترهای مختلف اثرگذار، به بررسی معادن زغالسنگ پهنه طبس، با استفاده از روش‌های نیمه‌کمی پرداخته‌اند [۹]. در مطالعه‌ای دیگر، وینی و همکاران، با شناسایی کمی پارامترهای مختلف و تحلیل منابع خطر با به کارگیری تئوری فازی، ریزش سقف در معدن زغالسنگ را مورد ارزیابی قرار دادند. بر اساس پژوهش آنها، مشخص شد که فضای بزرگ بدون نگهداری در معادن زیرزمینی ریسک بیش‌تری به همراه دارند [۱۰]. رزنی و همکاران، یک سیستم استنتاج فازی (FIS) برای پیش‌بینی نرخ تخریب سقف در معادن زغالسنگ زیرزمینی ارائه کردند. مدلی که این پژوهشگران ارائه کرده‌اند، با بهره‌گیری از روش خوشه‌بندی کاهشی برای تولید قوانین فازی بر اساس داده‌های ۱۰۹ معدن زغال‌سنگ در ایالات متحده آمریکا، عملکرد سقف را مورد بررسی قرار دادند. نتایج آنها نشان دهنده شباهت بسیار مدل ارائه شده با شرایط واقعی است [۱۱]. قاسمی و عطایی در پژوهشی دیگر، کاربرد منطق فازی را در پیش‌بینی نرخ ریزش سقف معادن زغالسنگ ارائه کرده‌اند. آنها در مطالعه خود نشان داده‌اند که مدل فازی ارائه شده، قابلیت پیش‌بینی نرخ ریزش سقف را دارد و با شرایط واقعی بسیار سازگار است [۱۲]. همچنین اصولی و شفيعی، به بررسی خواص توده‌سنگ سقف‌های معادن زغالسنگ ایلینویز پرداختند و پارامترهای مهم مهندسی سنگ و اثرگذاری آنها بر ریزش سقف را مورد بررسی قرار دادند [۱۳].

در پژوهش حاضر سعی شده است تا به ارزیابی کیفیت سقف در معادن زغالسنگ با استفاده از یک سیستم طبقه‌بندی جدید پرداخته شود. با توجه به سازگاری بهتر سیستم‌های طبقه‌بندی فازی با شرایط واقعی محیطی و عملیاتی، در مقایسه با سیستم‌های کلاسیک، در این پژوهش با به کارگیری تئوری فازی و با استفاده از عملگرهایی که کارکرد بهتری با این تئوری و پارامترهای انتخاب شده دارند، سیستم طبقه‌بندی فازی متناسب با شرایط معدنکاری جبهه کار طولانی ارائه می‌شود.

ساختار مقاله نیز بدین شرح است که بخش دوم مروری اجمالی بر تئوری فازی و اصول بنیادین این نظریه است و

$$A = \sum_{i=1}^n \frac{x_i}{\mu_A(x_i)} \quad (3)$$

در صورتی که مجموعه U شامل بی‌نهایت عضو باشد، معمولاً به صورت رابطه (۴) نمایش داده می‌شود:

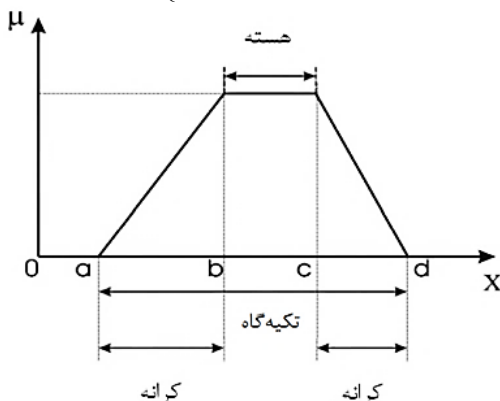
$$A = \int_x \frac{x}{\mu_A(x)} \quad (4)$$

توابع عضویت، تمامی اطلاعات موجود در یک مجموعه فازی مشخص را بیان می‌کند. توابع عضویت مجموعه‌های فازی باید به صورت دقیق در ارتباط با نوع تابع و نوع پارامترهای آن تعریف شوند. پارامترها و شکل توابع عضویت، به میزان زیادی بر صحت نتایج تأثیرگذار خواهند بود [۱۸]. در میان انبوه توابع عضویت موجود، توابع مثلثی، دوزنقه‌ای، تسمه‌ای^۱ و گاوسی^۲ پرکاربردترین توابع شناخته شده هستند.

در پژوهش حاضر، به دلیل سادگی در به کارگیری و حجم کم اطلاعات مورد نیاز برای تعریف تابع عضویت دوزنقه‌ای، این تابع به عنوان تابع اصلی عضویت انتخاب شد. همچنین این نوع عضویت برای کارهای مبتنی بر سیستم بازه‌ای بسیار مناسب است [۱۹، ۲۰].

شکل ۱، اجزای اصلی تابع عضویت دوزنقه‌ای را نمایش می‌دهد. تابع مورد نظر توسط چهار پارامتر به صورت $A = \text{trapezoid}(x, a, b, c, d)$ تعریف می‌شود که به صورت رابطه (۵) تعریف می‌شود [۲۲]:

$$\mu_A(x; a, b, c, d) = \begin{cases} (x-a)/(b-a) & a \leq x \leq b \\ 1 & b \leq x \leq c \\ (d-x)/(d-c) & c \leq x \leq d \\ 0 & x > d \text{ \& } x < a \end{cases} \quad (5)$$



شکل ۱: تابع عضویت دوزنقه‌ای [۲۱]

در بخش سوم، روش ارزیابی چندمعیاره مورد بررسی و تحلیل قرار می‌گیرد. در بخش چهارم، نحوه جمع‌آوری داده‌های مورد استفاده در پژوهش شرح داده می‌شود. تحلیل داده‌های پژوهش در بخش پنجم انجام شده و در نهایت، در بخش ششم، به تجزیه و تحلیل نتایج پرداخته و اعتبارسنجی نتایج مورد بررسی قرار گرفته است.

۲- تئوری فازی

پایه و اساس مجموعه‌ها و منطق فازی توسط لطفی‌زاده، به منظور تحلیل سیستم‌های پیچیده مطرح شد [۱۴]. مجموعه‌های فازی در ریاضیات جدید به مجموعه‌هایی اطلاق می‌شوند که عضویت بعضی یا تمام اعضا کاملاً روشن و مشخص نیست و عناصر آن، به طور نسبی متعلق به آن مجموعه هستند (یا نیستند). یک مجموعه فازی، تعمیم یک مجموعه کلاسیک است که اجازه می‌دهد تا تعلق هر مقداری را در بازه $[0,1]$ اختیار کند [۱۵]. در واقع، در مجموعه‌های فازی بر خلاف مجموعه‌های قطعی، عناصر به دو دسته عضو و غیرعضو تقسیم نمی‌شوند؛ بلکه بر اساس توابع تعریف شده، میزان عضویت عناصر مختلف در مجموعه‌های فازی بین بازه صفر و یک متغیر است [۱۶]. فرض کنید A یک زیرمجموعه فازی از مجموعه مرجع X باشد. تابع عضویت A در مجموعه مرجع X به صورت رابطه (۱) تعریف شده و نشان داده می‌شود:

$$\mu_A : X \rightarrow [0,1] \quad (1)$$

که در آن، μ_A میزان درجه عضویت هر عضو از مجموعه A را در فاصله پیوسته $[0,1]$ نمایش می‌دهد. در رابطه (۱)، مقدار صفر برای نمایش عدم عضویت کامل و مقدار یک برای نمایش عضویت کامل به کار می‌رود و تمامی مقادیر بین این دو مقدار، برای نمایش میزان عضویت میانی هر عضو مجموعه A به کار می‌رود. معمولاً یک مجموعه فازی با مجموعه‌ای از زوج مرتب‌ها به صورت رابطه (۲) نمایش داده می‌شود:

$$A = \{(x, \mu_A(x)), x \in U\} \quad (2)$$

که در آن، پارامتر U شامل یک مجموعه متناهی از X_i ها است. همچنین مجموعه متناهی فازی را می‌توان به صورت رابطه (۳) نمایش داد [۱۷]:

۳- روش ارزیابی چندمعیاره

$$Q_j^{(1)}(x) = \begin{cases} 1, & a_{j0} \leq x \leq a_{j1} \\ \frac{a_{j2} - x}{a_{j2} - a_{j1}}, & a_{j1} \leq x \leq a_{j2} \\ 0, & a_{j2} \leq x < a_{jm} \end{cases} \quad j=1,2,\dots,m \quad (۶)$$

$$Q_j^{(k)}(x) = \begin{cases} 0, & a_{j0} \leq x \leq a_{jk-2} \\ \frac{x - a_{jk-2}}{a_{jk-1} - a_{jk-2}}, & a_{jk-2} < x \leq a_{jk-1} \\ 1, & a_{jk-1} \leq x < a_{jk} \\ \frac{a_{jk+1} - x}{a_{jk+1} - a_{jk}}, & a_{jk} \leq x < a_{jk+1} \\ 0, & a_{jk+1} \leq x \leq a_{j-p} \end{cases} \quad (۷)$$

$$j=1,2,\dots,m$$

$$k=2,\dots,p-1$$

$$Q_j^{(p)}(x) = \begin{cases} 0, & a_{j0} \leq x \leq a_{jp-2} \\ \frac{x - a_{jp-2}}{a_{jp-1} - a_{jp-2}}, & a_{jp-2} \leq x < a_{jp-1} \\ 1, & a_{jp-1} \leq x < a_{jp} \end{cases} \quad j=1,2,\dots,m \quad (۸)$$

یک سیستم ارزیابی چندمعیاره به سه پارامتر کلیدی زیر نیاز دارد [۲۲]:

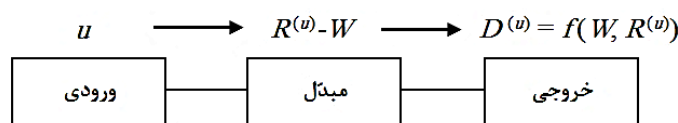
- مجموعه‌ای از پارامترها $\prod = \{f_1, f_2, \dots, f_m\}$
- مجموعه‌ای از کلاس‌های کیفی
- به ازای هر عنصر $u \in U$ ، یک ماتریس ارزیابی تک‌عاملی. می‌توان به این نکته اشاره کرد که تعداد رده‌های کیفی برای تمامی پارامترها f_j یکسان است. با قبول سه عنصر برای مجموعه $u \in U$ ، نتایج ارزیابی $D^{(u)} \in F(E)$ را می‌توان همانند شکل ۲ به دست آورد.

برای ارائه سیستم طبقه‌بندی فازی به منظور تحلیل وضعیت سقف در روش جبهه‌کار طولانی در معادن زیرزمینی زغالسنگ، باید ابتدا با ارائه تئوری روش‌شناسی مورد نظر، مسأله به چالش کشده شده و سپس، با انجام محاسبات و تحلیل نتایج خروجی حاصل از روش ارائه شده مورد ارزیابی قرار می‌گیرند. در ادامه، روش پژوهش به تفصیل تشریح شده و پس از آن، کاربرد روش ارائه شده در قالب مطالعه موردی ارائه می‌شود.

۳-۱- بیان تئوری مسأله

فرض کنید V یک مجموعه از عناصر به منظور ارزیابی باشد؛ $\prod = \{f_1, f_2, \dots, f_m\}$ مجموعه‌ای از پارامترهایی است که کیفیت عنصرهای تحت ارزیابی را مشخص می‌کنند و همچنین مجموعه $E = \{e_1, e_2, \dots, e_p\}$ را به عنوان مجموعه‌ای از نتایج کلامی در نظر بگیرید که در آن e_k کیفیت رده k را مشخص می‌کند. برای هر یک از پارامترهای f_j به ازای هر مقدار k از مجموعه $\{1, 2, \dots, p\}$ یک رده فازی e_k ایجاد می‌شود. به دلیل اینکه رده فازی e_k یک مجموعه فازی است که توسط f_j کنترل می‌شود، مجموعه فازی توسط A_{jk} طراحی می‌شود [۲۲].

اگر رده‌های کیفی توسط اندیس فاصله‌ای به کار گرفته شوند، تابع هدف $Q^{(k)}(x)$ به عنوان تابع عضویت تعریف می‌شود. $Q^{(k)}(x) = A_{jk}(x)$ به روش زیر و با استفاده از رابطه‌های (۶) تا (۸) محاسبه می‌شود:



شکل ۲: فرآیند ارزیابی چندمعیاره [۲۱]

۳-۲- انتخاب عملگر تجمیع کننده

در این مرحله، انتخاب عملگر تجمیع کننده بسیار مهم است. تعداد زیادی توابع انتقال مانند توابع انتقال حداقل (حداکثر) و حداکثر (حداقل) در مقالات معرفی شده‌اند. با این حال امروزه به طور گسترده‌ای این مسأله پذیرفته شده است که از هر تجمیع کننده مجموعه‌های فازی می‌توان در روش ارزیابی چندمعیاره فازی استفاده کرد. عملگرهای تجمیع کننده برای ارزیابی انواع مختلف حالت تصمیم که برای قضاوت نیازمند توابع متفاوتی هستند، استفاده

شکل ۲ یک نگاهت از روش ارزیابی چندمعیاره شامل وزن پارامترهای و ماتریس مربوطه که با یک تابع تصمیم گیرنده به صورت رابطه‌های (۹) و (۱۰) ترکیب شده است را نشان می‌دهد:

$$\xi: U \rightarrow F(E) \quad (۹)$$

$$u \rightarrow \xi(u) \quad D^{(u)} = f(W, R^{(u)}) \quad (۱۰)$$

در رابطه‌های (۹) و (۱۰)، f معیار تصمیم‌گیری است که برای ارزیابی گزینه به کار گرفته شده است.

۴- جمع‌آوری داده‌ها

برای جمع‌آوری داده‌ها از معادن زغالسنگ، طی حضور در دفعات متعدد در کارگاه‌های استخراج معادن مختلف منطقه شامل معادن کلاریز، طزره، رزمجا، اولنگ، قشلاق و تخت، نسبت به برداشت داده‌های لازم برای اندازه‌گیری پارامترهای سیستم طبقه‌بندی اقدام شد. داده‌های مربوط به بعضی از پارامترها مانند شیب، امتداد، فاصله‌داری و تداوم درزه‌ها و ضخامت لایه‌های تشکیل‌دهنده سقف بلاواسطه به صورت برج‌برداری و در فرم مخصوص طراحی شده برای جمع‌آوری اطلاعات ثبت شد. برای اندازه‌گیری سایر پارامترها مانند مقاومت کششی، حساسیت به رطوبت و زبری سطح درزه‌ها، نمونه‌های مورد نیاز برداشت و به آزمایشگاه منتقل شدند. در آزمایشگاه، اندازه‌گیری مقاومت کششی با استفاده از آزمایش جک فشاری و اندیس بار نقطه‌ای، میزان حساسیت به رطوبت با دو روش آزمایش اندیس دوام و ارتگی و غوطه‌وری و برای تعیین ضریب زبری سطح درزه‌ها آزمایش کجی و سطح شیب‌دار انجام شد. پس از انجام مطالعات آزمایشگاهی و میدانی، پارامترهای مقاومت فشاری تک‌محوری، مقاومت کششی (آزمون برزیلی)، حساسیت در برابر رطوبت، فاصله‌داری و تداوم درزه‌ها، ضخامت لایه‌بندی، شیب درزه‌ها و اختلاف امتداد کارگاه و درزه بحرانی، که به عنوان تأثیرگذارترین پارامترها در کیفیت سقف در معادن زغالی انتخاب شده بودند، برای ۱۵ کارگاه مختلف استخراج زغالسنگ در حوضه البرز شرقی اندازه‌گیری و ثبت شدند. مشخصات ژئومکانیکی توده‌سنگ و سنگ بکر سقف معادن مذکور به همراه تحلیل‌های آماری به ترتیب در جدول‌های ۱ و ۲ نشان داده شده است. مطابق جدول ۲، سه پارامتر تأثیرگذار شامل مقاومت فشاری، زاویه بین امتداد کارگاه و درزه بحرانی و حساسیت در مقابل رطوبت به ترتیب بیش‌ترین مقادیر واریانس و انحراف معیار را دارند که نشانگر تغییرات این پارامترها در معادن مورد مطالعه در حوضه البرز شرقی است.

می‌شوند. بنابراین تصمیم‌گیرنده‌ها ممکن است یک تابع تصمیم‌گیرنده را انتخاب کنند که بهترین عملکرد در تصمیم‌گیری را داشته باشد. سه تجمیع‌کننده زیر، به تعداد دفعات بیش‌تری در مدل‌های ارزیابی چندمعیاره فازی به کار گرفته شده‌اند [۲۳]:

- تجمیع‌کننده عطفی معیارها
- تجمیع‌کننده انفصالی معیارها
- تجمیع‌کننده جبرانی معیارها.

با استفاده از تجمیع‌کننده عطفی، همه معیارهای تصمیم‌گیری به صورت هم‌زمان ارضا خواهند شد. از طرف دیگر، تجمیع‌کننده انفصالی باعث جبران کامل در بین معیارها می‌شود. تجمیع جبرانی برای رویارویی با معیارهای متناقض یا با رفتار تجمع انسانی مطلوب‌تر است. رفتار تجمیع‌کننده جبرانی را می‌توان با استفاده از عملگر T-norm شبیه‌سازی کرد. T-normها بخشی از مجموعه‌های فازی هستند که بر روی هم‌پوشانی مجموعه‌ها عمل می‌کنند؛ به این مفهوم که آنها برای اجتماع نوع عطفی به کار می‌روند. در ادامه، عملگرهای مبتنی بر T-norm برای اجتماع معیارها استفاده خواهند شد. توابع زیر به عنوان پرکاربردترین و مشهورترین توابع تصمیم‌گیرنده در روش ارزیابی چندمعیاره فازی به کار رفته‌اند [۲۴].

یکی از مهم‌ترین توابع تصمیم‌گیرنده، توسط یاگر در سال ۱۹۷۸ برای اجتماع معیارهای وزن‌دار با وزن‌های متفاوت، به صورت رابطه (۱۱) معرفی شد [۲۵].

$$D_Y^W(\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_m) = \bigwedge_{i=1}^m \mu_i^{w_i} \quad (11)$$

دابویس و پرید نیز در سال ۱۹۹۴ یک تابع تصمیم‌گیری برای کاربرد در تئوری احتمالات معرفی کردند که به صورت رابطه (۱۲) است [۲۶]:

$$D^W(\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_m) = \bigwedge_{i=1}^m [(1 - w_i) \vee \mu_i] \quad (12)$$

لازم به ذکر است که در این پژوهش، از تابع معرفی شده توسط دابویس و پرید با حداقل وزن استفاده شد.

جدول ۱: مشخصات ژئومکانیکی توده سنگ و سنگ بکر سقف معادن زغالسنگ حوضه البرز شرقی [۲۷]

معدن	UCS (MPa)	BTS (MPa)	M (%)	S (m)	C (m)	AA (°)	K (m)	Dip (°)
قشلاق K5	۸۲	۳/۴	۷۵	۰/۴	۰/۴	۳	۰/۲	۴۰
قشلاق K3	۱۲۵/۵	۹/۵	۹۳	۱/۲	۲/۵	۸۳	۰/۷۵	۷۵
قشلاق K60	۷۴/۵	۴/۴	۷۸	۰/۴	۰/۳	۳۰	۰/۳	۸۰
قشلاق K67	۵۲/۵	۲/۴	۲۸	۰/۲۵	۰/۴	۵۰	۰/۱۵	۵۰
رضی K30	۱۴۴	۱۲/۵	۹۸	۱/۵	۲/۵	۷۵	۰/۸	۸۴
رضی K31	۷۸	۴/۵	۸۷	۰/۴	۰/۵	۶۰	۰/۴	۸۰
ملج آرام K13	۴۰	۲/۲۵	۵۰	۰/۱۵	۰/۲۵	۰	۰/۰۵	۶۱
تخت K19	۱۶	۱/۴	۲۶	۰/۲	۰/۳	۸	۰/۱	۸۲
تخت K19	۶۳/۵	۳/۵	۶۳	۰/۳	۰/۴	۶۰	۰/۶	۸۵
کلاریز K10	۱۱۸	۵	۹۷	۱	۲	۰	۰/۷	۷۳
کلاریز P10	۸۰	۴/۶	۹۰	۰/۶	۰/۸	۰	۰/۴	۷۸
طرزه K19	۴۵	۵/۳	۵۳	۰/۳	۰/۳	۶۰	۰/۲۵	۵۸
طرزه P10	۷۲/۵	۴/۵	۷۰	۰/۴	۰/۴۵	۰	۰/۳	۷۱
رزمجا K10	۱۱۴/۵	۵	۹۸	۰/۸	۱/۲	۷۳	۰/۶	۷۳
رزمجا P15	۶۳	۶/۵	۶۵	۰/۵	۰/۷۵	۸۳	۰/۴	۸۳

UCS: مقاومت فشاری تک‌محوری BTS: مقاومت کششی (آزمون برزیلی) M: حساسیت در مقابل رطوبت S: فاصله‌داری درزه‌ها C: تداوم ناپیوستگی AA: زاویه بین امتداد کارگاه و درزه بحرانی K: ضخامت لایه‌بندی Dip: شیب درزه

جدول ۲: مشخصات آماری داده‌های برداشت‌شده از معادن زغال سنگ مورد مطالعه در حوضه البرز شرقی

شاخص آماری	پارامترهای مهندسی							
	Dip	K	AA	C	S	M	BTS	UCS
دامنه داده‌ها (R)	۴۵	۰/۷۵	۸۳	۲/۲۵	۱/۳۵	۷۲	۱۱/۱۰	۱۲۸
میانه (M)	۷۵	۰/۴	۵۰	۰/۴۵	۰/۴	۷۵	۴/۵	۷۴/۵
میانگین (\bar{X})	۷۱/۵۳	۰/۴	۳۹	۰/۸۷	۰/۵۶	۷۱/۴	۴/۹۸	۷۷/۹۳
واریانس (σ^2)	۱۶۸/۷۸	۰/۰۵	۱۰۷۹/۳۳	۰/۶۰	۰/۱۴	۵۳۵/۸۴	۷/۴۶	۱۱۳۷/۹۶
انحراف معیار (σ)	۱۲/۹۹	۰/۲۳	۳۲/۸۵	۰/۷۷	۰/۳۸	۲۳/۱۴	۲/۷۳	۳۳/۷۳

۳ نمونه تکمیل‌شده‌ای از فرم پرسش‌نامه ارسالی به کارشناسان خبره را نشان می‌دهد. در ادامه، ماتریس مقایسه زوجی بر اساس نظرات کارشناسان خبره تشکیل شد. ماتریس مقایسه زوجی بر اساس نظر کارشناس اول در جدول ۴ درج شده است.

پس از تشکیل ماتریس‌های مقایسه زوجی، ماتریس مقایسه زوجی فازی تشکیل می‌شود. در این پژوهش برای محاسبه اعداد فازی Y_{ij} ، از توابع عضویت مثلثی استفاده شده است. شکل ۳ تابع عضویت مثلثی به کار گرفته شده در این پژوهش را نشان می‌دهد.

۵- تحلیل داده‌ها

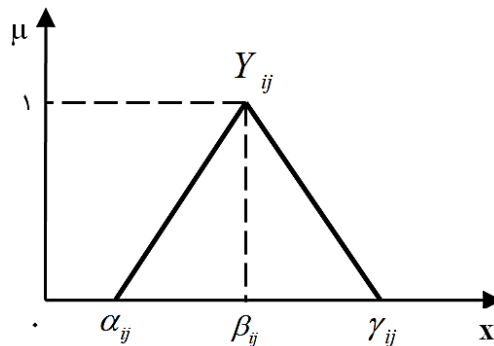
تعیین درجه اهمیت (وزن) پارامترها، گام بعدی برای ایجاد سیستم طبقه‌بندی است. میزان اهمیت هر یک از پارامترهای ذکرشده با استناد به نظر خبرگان و دانش نویسندگان تعیین شد. در این مرحله، ابتدا فرم پرسش‌نامه برای کارشناسان خبره در زمینه معادن زغالسنگ ارسال شد و در ادامه، پس از جمع‌آوری فرم‌های پرسش‌نامه، درجه اهمیت هر یک از پارامترها با استفاده از تحلیل سلسله مراتبی فازی دلفی (FDAHP) محاسبه شد. جدول

جدول ۳: نمونه تکمیل شده از فرم پرسش‌نامه

معیارها	درجه اهمیت پارامترها			
	خیلی کم	کم	متوسط	زیاد
C ₁ مقاومت فشاری تک محوری	•			
C ₂ مقاومت کششی برزیلی		•		
C ₃ حساسیت در مقابل رطوبت		•		
C ₄ فاصله داری درزه‌ها			•	
C ₅ تداوم ناپوستگی‌ها			•	
C ₆ زاویه بین امتداد کارگاه و درزه بحرانی	•			
C ₇ ضخامت لایه‌بندی		•		
C ₈ شیب درزه			•	

جدول ۴: ماتریس مقایسه زوجی بر اساس نظر کارشناس اول

	C ₁	C ₂	C ₃	C ₄	C ₅	C ₆	C ₇	C ₈
C ₁	1.00	1.80	1.80	1.29	1.29	1.00	1.80	1.29
C ₂	0.56	1.00	1.00	0.71	0.71	0.56	1.00	0.71
C ₃	0.56	1.00	1.00	0.71	0.71	0.56	1.00	0.71
C ₄	0.78	1.40	1.40	1.00	1.00	0.78	1.40	1.00
C ₅	0.78	1.40	1.40	1.00	1.00	0.78	1.40	1.00
C ₆	1.00	1.80	1.80	1.29	1.29	1.00	1.80	1.29
C ₇	0.56	1.00	4.00	0.71	0.71	0.56	1.00	0.71
C ₈	0.78	1.40	1.43	1.00	1.00	0.78	1.40	1.00



شکل ۳: اعداد فازی مثلثی [۲۸]

در ادامه، وزن فازی متعلق به هر پارامتر با استفاده از رابطه‌های (۱۷) و (۱۸) تعیین می‌شود [۲۸]:

$$\tilde{Z}_i = [\tilde{Y}_{ij} \otimes \dots \otimes \tilde{Y}_{in}]^{1/n} \quad (17)$$

$$\tilde{W}_i = \tilde{Z}_i \otimes (\tilde{Z}_i \oplus \dots \oplus \tilde{Z}_n)^{-1} \quad (18)$$

در رابطه‌های بالا، \otimes علامت ضرب اعداد فازی و \oplus علامت جمع اعداد فازی است. در نهایت، پارامتر \tilde{W}_i که یک بردار سطری است، معرف وزن فازی پارامتر i است. پس از یافتن وزن‌های فازی مربوط به هر یک از پارامترها، تمامی اعداد با استفاده از رابطه (۱۹) به صورت غیرفازی تبدیل می‌شوند [۲۸]:

اعداد مثلثی فازی با سه پارامتر به صورت رابطه‌های (۱۳) تا (۱۶) تعریف می‌شوند [۲۸]. در این رابطه‌ها، χ_{ijk} نشان‌دهنده برتری پارامتر i بر پارامتر j از نظر نویسنده k ام است. همچنین α_{ij} و β_{ij} و γ_{ij} به ترتیب معرف حد پایین، متوسط و بالا از نظر افراد متخصص هستند. ماتریس مقایسه زوجی در جدول (۵) نشان داده شده است.

$$Y_{ij} = (\alpha_{ij}, \beta_{ij}, \gamma_{ij}) \quad (13)$$

$$\alpha_{ij} = \text{Min}(\chi_{ijk}) \quad , \quad k = 1, 2, \dots, n \quad (14)$$

$$\beta_{ij} = \left(\prod_{k=1}^n \chi_{ijk} \right) \quad (15)$$

$$\gamma_{ij} = \text{Max}(\chi_{ijk}) \quad , \quad k = 1, 2, \dots, n \quad (16)$$

جدول ۵: ماتریس مقایسه زوجی فازی

	C ₁	C ₂	C ₃	C ₄	C ₅	C ₆	C ₇	C ₈
C ₁	(1.00, 1.00, 1.00)	(1.00, 1.48, 3.00)	(0.71, 1.33, 2.33)	(0.71, 1.10, 1.40)	(0.71, 1.10, 1.40)	(0.56, 0.85, 1.00)	(1.00, 1.45, 3.00)	(0.71, 1.05, 1.29)
C ₂	(0.33, 0.68, 1.00)	(1.00, 1.00, 1.00)	(0.43, 0.90, 1.67)	(0.43, 0.74, 1.40)	(0.43, 0.74, 1.00)	(0.33, 0.57, 0.78)	(0.60, 0.98, 2.33)	(0.43, 0.71, 1.00)
C ₃	(0.43, 0.75, 1.40)	(0.6, 1.11, 2.33)	(1.00, 1.00, 1.00)	(0.43, 0.83, 1.00)	(0.60, 0.83, 1.00)	(0.33, 0.64, 0.78)	(0.60, 1.09, 2.33)	(0.43, 0.79, 1.00)
C ₄	(0.71, 0.91, 1.40)	(0.71, 1.34, 2.33)	(1.00, 1.21, 2.33)	(1.00, 1.00, 1.00)	(0.71, 1.00, 1.40)	(0.56, 0.77, 0.78)	(0.71, 1.32, 2.33)	(0.71, 0.96, 1.00)
C ₅	(0.71, 0.91, 1.40)	(1.00, 1.34, 2.33)	(1.00, 1.21, 1.67)	(0.71, 1.00, 1.40)	(1.00, 1.00, 1.00)	(0.56, 0.77, 0.78)	(1.00, 1.32, 2.33)	(0.71, 0.96, 1.00)
C ₆	(1.00, 1.18, 1.80)	(1.29, 1.75, 3.00)	(1.29, 1.57, 3.00)	(1.29, 1.30, 1.80)	(1.29, 1.30, 1.80)	(1.00, 1.00, 1.00)	(1.29, 1.71, 3.00)	(1.29, 1.32, 2.00)
C ₇	(0.33, 0.69, 1.00)	(0.43, 1.02, 1.67)	(0.43, 0.92, 1.67)	(0.43, 0.76, 1.40)	(0.43, 0.76, 1.00)	(0.33, 0.59, 0.78)	(1.00, 1.00, 1.00)	(0.43, 0.73, 1.00)
C ₈	(0.78, 0.95, 1.40)	(1.00, 1.40, 2.33)	(1.00, 1.26, 2.33)	(1.00, 1.04, 1.40)	(1.00, 1.04, 1.40)	(0.50, 0.76, 0.78)	(1.00, 1.37, 2.33)	(1.00, 1.00, 1.00)

گام بعدی پس از تعیین درجه اهمیت پارامترها، طبقه‌بندی پارامترها در سه رده متفاوت شامل خوب، متوسط و ضعیف است. نتایج مربوط به طبقه‌بندی پارامترها در جدول ۶ ارائه شده است.

$$\tilde{W}_i = (\prod_{j=1}^3 \omega_j)^{1/3} \quad (19)$$

بدین ترتیب، مقادیر وزنی هر یک از پارامترها به صورت زیر تعیین شدند:

$$W = (UCS, BTS, M, S, C, AA, K, Dip) = (0.139, 0.092, 0.101, 0.127, 0.129, 0.183, 0.091, 0.138)$$

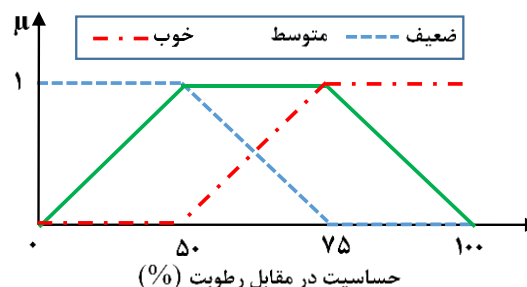
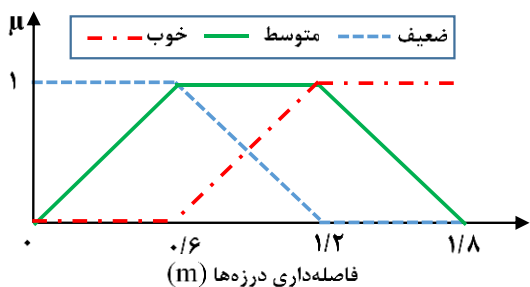
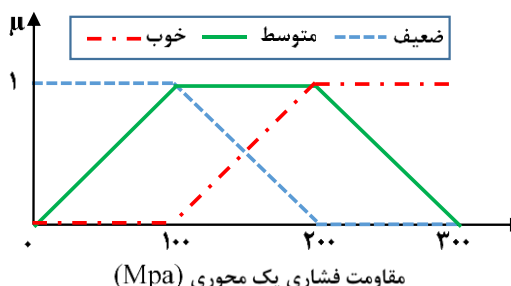
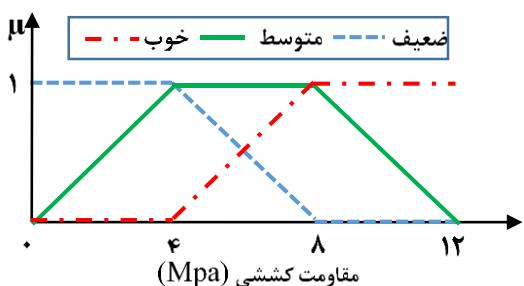
جدول ۶: طبقه‌بندی پارامترهای تأثیرگذار بر کیفیت سنگ سقف

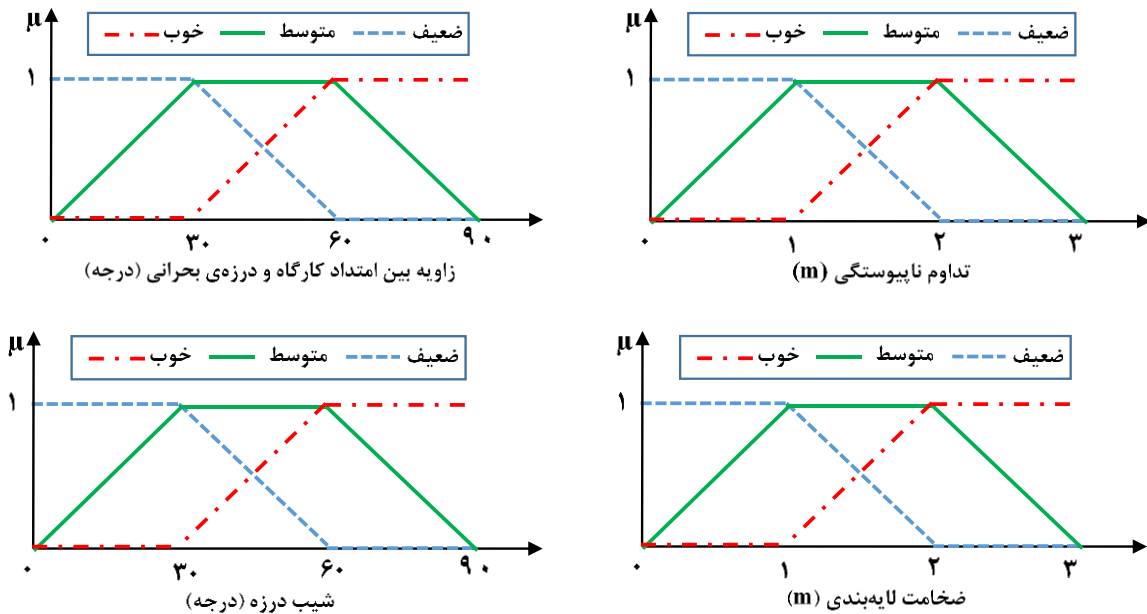
معیارها								رده
Dip (°)	K (m)	AA (°)	C (m)	S (m)	M (%)	BTS (MPa)	UCS (MPa)	
۰ - ۳۰	۰ - ۱	۰ - ۳۰	۰ - ۱	۰ - ۰/۶	۰ - ۵۰	۰ - ۴	۰ - ۱۰۰	ضعیف
۳۰ - ۶۰	۱ - ۲	۳۰ - ۶۰	۱ - ۲	۰/۶ - ۱/۲	۵۰ - ۷۵	۴ - ۸	۱۰۰ - ۲۰۰	متوسط
۶۰ - ۹۰	۲ - ۳	۶۰ - ۹۰	۲ - ۳	۱/۲ - ۲	۷۵ - ۱۰۰	۸ - ۱۲	۲۰۰ - ۳۰۰	خوب

UCS: مقاومت فشاری تک محوری BTS: مقاومت کششی (آزمون برزیلی) M: حساسیت در مقابل رطوبت S: فاصله‌داری درزه‌ها C: تداوم ناپوستگی AA: زاویه بین امتداد کارگاه و درزه بحرانی K: ضخامت لایه Dip: شیب درزه

انجام مراحل بالا، توابع عضویت سه رده‌ای برای تمامی پارامترها بر اساس جدول ۶ تعریف شدند. توابع تعیین شده در جدول ۷ ارائه شده‌اند.

پس از تعیین رده‌های مربوط به هر پارامتر، برای هر یک از رده‌ها، یک تابع عضویت دوزنقه‌ای تعریف شد. در شکل ۴ تابع‌های عضویت دوزنقه‌ای تعریف شده برای تمامی پارامترهای مسأله نشان داده شده است. پس از





شکل ۴: نمودار توابع دوزنقه‌ای ارائه شده برای پارمترهای طراحی

جدول ۷: توابع ارائه شده برای تعیین کیفیت سنگ سقف معادن

فاصله‌داری	حساسیت در مقابل رطوبت	مقاومت کششی	مقاومت فشاری تک‌محوری
$\mu_{(4)}^{(1)}(x) = \begin{cases} \frac{1}{0.6} & 0 \leq x \leq 0.6 \\ \frac{1.2-x}{0.6} & 0.6 \leq x \leq 1.2 \\ 0 & 1.2 \leq x \end{cases}$	$\mu_{(3)}^{(1)}(x) = \begin{cases} \frac{1}{75} & 0 \leq x \leq 50 \\ \frac{75-x}{25} & 50 \leq x \leq 75 \\ 0 & 75 \leq x \leq 100 \end{cases}$	$\mu_{(2)}^{(1)}(x) = \begin{cases} \frac{1}{8} & 0 \leq x \leq 4 \\ \frac{8-x}{4} & 4 \leq x \leq 8 \\ 0 & 8 \leq x \end{cases}$	$\mu_{(1)}^{(1)}(x) = \begin{cases} \frac{1}{200} & 0 \leq x \leq 100 \\ \frac{200-x}{100} & 100 \leq x \leq 200 \\ 0 & 200 \leq x \end{cases}$
$\mu_{(4)}^{(2)}(x) = \begin{cases} \frac{x}{0.6} & 0 \leq x \leq 0.6 \\ \frac{1}{0.6} & 0.6 \leq x \leq 1.2 \\ \frac{1.8-x}{0.6} & 1.2 \leq x \leq 1.8 \\ 0 & 1.8 \leq x \end{cases}$	$\mu_{(3)}^{(2)}(x) = \begin{cases} \frac{x}{50} & 0 \leq x \leq 50 \\ \frac{1}{25} & 50 \leq x \leq 75 \\ \frac{100-x}{25} & 75 \leq x \leq 100 \end{cases}$	$\mu_{(2)}^{(2)}(x) = \begin{cases} \frac{x}{4} & 0 \leq x \leq 4 \\ \frac{1}{4} & 4 \leq x \leq 8 \\ \frac{12-x}{4} & 8 \leq x \leq 12 \\ 0 & 12 \leq x \end{cases}$	$\mu_{(1)}^{(2)}(x) = \begin{cases} \frac{x}{100} & 0 \leq x \leq 100 \\ \frac{1}{100} & 100 \leq x \leq 200 \\ \frac{300-x}{100} & 200 \leq x \leq 300 \\ 0 & 300 \leq x \end{cases}$
$\mu_{(4)}^{(3)}(x) = \begin{cases} 0 & 0 \leq x \leq 0.6 \\ \frac{x-0.6}{0.6} & 0.6 \leq x \leq 1.2 \\ \frac{1}{0.6} & 1.2 \leq x \end{cases}$	$\mu_{(3)}^{(3)}(x) = \begin{cases} 0 & 0 \leq x \leq 50 \\ \frac{x-50}{25} & 50 \leq x \leq 75 \\ \frac{1}{25} & 75 \leq x \leq 100 \end{cases}$	$\mu_{(2)}^{(3)}(x) = \begin{cases} 0 & 0 \leq x \leq 4 \\ \frac{x-4}{4} & 4 \leq x \leq 8 \\ \frac{1}{4} & 8 \leq x \end{cases}$	$\mu_{(1)}^{(3)}(x) = \begin{cases} 0 & 0 \leq x \leq 100 \\ \frac{x-100}{100} & 100 \leq x \leq 200 \\ \frac{1}{100} & 200 \leq x \end{cases}$
شیب درزه	ضخامت لایه‌بندی	اختلاف امتداد کارگاه و درزه بحرانی	تداوم
$\mu_{(8)}^{(1)}(x) = \begin{cases} \frac{1}{30} & 0 \leq x \leq 30 \\ \frac{60-x}{30} & 30 \leq x \leq 60 \\ 0 & 60 \leq x \leq 90 \end{cases}$	$\mu_{(7)}^{(1)}(x) = \begin{cases} \frac{1}{2} & 0 \leq x \leq 1 \\ \frac{2-x}{1} & 1 \leq x \leq 2 \\ 0 & 2 \leq x \end{cases}$	$\mu_{(6)}^{(1)}(x) = \begin{cases} \frac{1}{30} & 0 \leq x \leq 30 \\ \frac{60-x}{30} & 30 \leq x \leq 60 \\ 0 & 60 \leq x \leq 90 \end{cases}$	$\mu_{(5)}^{(1)}(x) = \begin{cases} \frac{1}{2} & 0 \leq x \leq 1 \\ \frac{2-x}{1} & 1 \leq x \leq 2 \\ 0 & 2 \leq x \end{cases}$
$\mu_{(8)}^{(2)}(x) = \begin{cases} \frac{x}{30} & 0 \leq x \leq 30 \\ \frac{1}{30} & 30 \leq x \leq 60 \\ \frac{90-x}{30} & 60 \leq x \leq 90 \end{cases}$	$\mu_{(7)}^{(2)}(x) = \begin{cases} \frac{x}{1} & 0 \leq x \leq 1 \\ \frac{1}{1} & 1 \leq x \leq 2 \\ \frac{3-x}{1} & 2 \leq x \leq 3 \\ 0 & 3 \leq x \end{cases}$	$\mu_{(6)}^{(2)}(x) = \begin{cases} \frac{x}{30} & 0 \leq x \leq 30 \\ \frac{1}{30} & 30 \leq x \leq 60 \\ \frac{90-x}{30} & 60 \leq x \leq 90 \end{cases}$	$\mu_{(5)}^{(2)}(x) = \begin{cases} \frac{x}{1} & 0 \leq x \leq 1 \\ \frac{1}{1} & 1 \leq x \leq 2 \\ \frac{3-x}{1} & 2 \leq x \leq 3 \\ 0 & 3 \leq x \end{cases}$
$\mu_{(8)}^{(3)}(x) = \begin{cases} 0 & 0 \leq x \leq 30 \\ \frac{x-30}{30} & 30 \leq x \leq 60 \\ \frac{1}{30} & 60 \leq x \leq 90 \end{cases}$	$\mu_{(7)}^{(3)}(x) = \begin{cases} 0 & 0 \leq x \leq 1 \\ \frac{x-1}{1} & 1 \leq x \leq 2 \\ \frac{1}{1} & 2 \leq x \end{cases}$	$\mu_{(6)}^{(3)}(x) = \begin{cases} 0 & 0 \leq x \leq 30 \\ \frac{x-30}{30} & 30 \leq x \leq 60 \\ \frac{1}{30} & 60 \leq x \leq 90 \end{cases}$	$\mu_{(5)}^{(3)}(x) = \begin{cases} 0 & 0 \leq x \leq 1 \\ \frac{x-1}{1} & 1 \leq x \leq 2 \\ \frac{1}{1} & 2 \leq x \end{cases}$

به صورت α_{ij} نمایش داده می‌شوند که هر درایه، نشان دهنده درجه عضویت معیار متناظر با i در رده j از درایه مذکور است. نمونه ماتریس فازی جهت تعیین کیفیت سنگ سقف معدن قشلاق K5 با مشخصات مقاومت فشاری تک‌محوری معادل ۸۵ مگاپاسکال، مقاومت کششی برابر با ۳/۴ مگاپاسکال، حساسیت در مقابل رطوبت معادل ۷۵

آخرین مرحله پس از ایجاد سیستم طبقه‌بندی، ارزیابی سیستم با استفاده از داده‌های به دست آمده از معادن است. به همین منظور و با استفاده از اطلاعات به دست آمده برای معدن قشلاق K5، سیستم طبقه‌بندی مورد ارزیابی قرار گرفت. اولین مرحله برای تعیین کیفیت سقف معدن قشلاق K5، تشکیل ماتریس فازی است. درایه‌های ماتریس فازی

درصد، فاصله‌داری و تداوم معادل ۰/۴ متر، اختلاف امتداد کارگاه و درزه بحرانی برابر ۳ درجه، شیب ۴۰ درجه درزه‌ها و ضخامت لایه‌بندی معادل ۰/۲ متر، در جدول ۸ نشان داده شده است.

جدول ۸: ماتریس فازی مربوط به معدن قشلاق K₅

اجزای ماتریس فازی			داده‌های معدن	پارامتر
r ₁₁ = 1	r ₁₂ = 0.82	r ₁₃ = 0	۸۵	مقاومت فشاری تک‌محوری
r ₂₁ = 1	r ₂₂ = 0.85	r ₂₃ = 0	۳/۴	مقاومت کششی
r ₃₁ = 0	r ₃₂ = 1	r ₃₃ = 1	۷۵	حساسیت در مقابل رطوبت
r ₄₁ = 1	r ₄₂ = 0.67	r ₄₃ = 0	۰/۴	فاصله‌داری
r ₅₁ = 1	r ₅₂ = 0.4	r ₅₃ = 0	۰/۴	تداوم
r ₆₁ = 1	r ₆₂ = 0.1	r ₆₃ = 0	۳	اختلاف امتداد کارگاه و درزه بحرانی
r ₇₁ = 1	r ₇₂ = 0.33	r ₇₃ = 0	۴۰	شیب درزه‌ها
r ₈₁ = 0.67	r ₈₂ = 1	r ₈₃ = 0.33	۰/۲	ضخامت لایه‌بندی

برای عملگرهای دابویس-پرید (عملگر ۱) و عملگر یاگر (عملگر ۲) و دو سیستم طبقه‌بندی کلاسیک به منظور ارزیابی نتایج سیستم طبقه‌بندی فازی ارائه شده است. اولین سیستم طبقه‌بندی کلاسیک، سیستم امتیازدهی سقف معادن زغالی (CMRR^۳) است که برای اولین بار در سال ۱۹۹۴ توسط مولیندا و مارک ارائه شد [۲۹].

پس از تشکیل ماتریس فازی، با استفاده از عملگر دابویس-پرید و با انجام محاسبات زیر، کیفیت سنگ سقف معدن قشلاق K₅ با توجه به برتری عددی رده متوسط (۰/۱۸۳) نسبت به رده‌های ضعیف (۰/۱۰۱) و قوی (۰/۰۹)، معادل کیفیت متوسط تعیین شد. نتایج به دست آمده برای ۱۵ کارگاه زغالسنگ مورد مطالعه با شرایط متفاوت ژئومکانیکی در جدول ۹ به ترتیب

	Poor	Medium	Good
1	0.82	0	
1	0.85	0	
0	1	1	
1	0.67	0	
1	0.4	0	
1	0.1	0	
1	0.33	0	
0.67	1	0.33	

$$D = f(W, R) \dots [0.139, 0.092, 0.101, 0.127, 0.129, 0.183, 0.091, 0.138]$$

$$d_1(u) = ((1-w_1) \vee r_{11}(u)) \wedge \dots \wedge ((1-w_8) \vee r_{81}(u)) = 0.101$$

$$d_2(u) = ((1-w_1) \vee r_{12}(u)) \wedge \dots \wedge ((1-w_8) \vee r_{82}(u)) = 0.183$$

$$d_3(u) = ((1-w_1) \vee r_{13}(u)) \wedge \dots \wedge ((1-w_8) \vee r_{83}(u)) = 0.091$$

$$D = f(w, R) = (0.101, 0.183, 0.09)$$

نتایج سیستم‌های طبقه‌بندی کلاسیک و میزان گام تخریب برداشت شده در هر کارگاه، می‌توان استنباط کرد که سازگاری قابل قبولی میان نتایج واقعی حاصل از گام‌های تخریب و سیستم طبقه‌بندی فازی برقرار است. به طوری که بیش از ۸۰ درصد (۱۲ مورد از ۱۵ مورد مطالعه) نتایج مشاهده شده از گام‌های تخریب، سیستم طبقه‌بندی فازی به درستی رفتار سنگ سقف را مورد ارزیابی و پیش‌بینی قرار داده است. به طوری که کارگاه‌هایی با گام‌های تخریب

مجموع امتیازات حاصل از پارامترهای مؤثر در این سیستم طبقه‌بندی شامل مقاومت فشاری تک‌محوری، حساسیت در مقابل رطوبت و شرایط ناپیوستگی‌ها برای کارگاه‌های مورد مطالعه، محاسبه و نتایج برای ارزیابی سیستم طبقه‌بندی فازی در جدول ۹ درج شد. دومین سیستم طبقه‌بندی کلاسیک، سیستم امتیاز رده‌بندی سقف معادن زغالی است که توسط جوانشیر ارائه شده است [۲۷]. با مقایسه نتایج به دست آمده از سیستم طبقه‌بندی فازی با

امتیازات کسب شده به سه دسته خوب با امتیاز بالای ۷۰ (> 70)، متوسط با امتیاز بین ۳۵ تا ۷۰ ($35 < 70$) و ضعیف با امتیاز کمتر از ۳۵ (< 35) می‌توان صحت و سقم سیستم طبقه‌بندی فازی را در خصوص ارزیابی و پیش‌بینی کیفیت سنگ مورد تایید قرار داد.

کم‌تر از ۲ متر، مابین ۲ و ۱۰ متر و بیشتر از ۱۰ متر را به ترتیب در کلاس‌های ضعیف، متوسط و خوب تقسیم‌بندی کرده است. همچنین با بررسی نتایج میان سیستم‌های طبقه‌بندی کلاسیک و فازی می‌توان تطابق خوب نتایج رده‌بندی سیستم طبقه‌بندی فازی با سیستم‌های طبقه‌بندی کلاسیک را مشاهده کرد. به طوری که با تقسیم

جدول ۹: نتایج طبقه‌بندی فازی برای ۱۵ کارگاه مورد مطالعه با میزان گام تخریب واقعی و سیستم‌های طبقه‌بندی کلاسیک

معدن	عملگر فازی		گام تخریب	سیستم طبقه‌بندی کلاسیک	
	۱	۲		۱	۲
قشلاق K5	متوسط	متوسط	۲ تا ۳ متر	۴۴	۴۲
قشلاق K3	خوب	خوب	۲۰ تا ۳۰ متر	۶۹	۸۱
قشلاق K60	متوسط	متوسط	۶ متر	۴۳	۳۴
قشلاق K67	متوسط	ضعیف	۱۰ متر	۲۷	۴۶
رضی K30	خوب	خوب	۳۰ متر	۷۷	۸۴
رضی K31	متوسط	متوسط	۸ متر	۵۲	۵۴
ملچ‌آرام K13	ضعیف	ضعیف	۱ تا ۲ متر	۳۲	۲۸
تخت K19	متوسط	متوسط	۳ متر	۲۹	۱۸/۵
تخت K19	متوسط	متوسط	۶ تا ۸ متر	۴۰	۵۰
کلاریز K10	ضعیف	خوب	۱۰ متر	۶۷	۷۸
کلاریز P10	ضعیف	متوسط	۱۰ متر	۵۴	۵۹
طرزه K19	متوسط	متوسط	۴ متر	۳۷	۳۵
طرزه P10	ضعیف	متوسط	۸ متر	۴۳	۴۸
رزمجا K10	متوسط	ضعیف	۱۰ متر	۶۸	۶۹
رزمجا P15	متوسط	متوسط	۱۰ متر	۴۳	۵۳

می‌شوند، امری لازم و ضروری محسوب می‌شود. در این پژوهش، به منظور ارائه یک سیستم طبقه‌بندی برای ارزیابی کیفیت سنگ سقف معادن زغالی، تئوری مجموعه-های فازی و رویکرد فازی چندمعیاره به کار گرفته شده است. از میان پارامترهای تأثیرگذار بر رفتار و کیفیت سنگ سقف معادن، پارامترهایی نظیر مقاومت فشاری تک‌محوری، مقاومت کششی (آزمون برزیلی)، حساسیت در مقابل رطوبت، ضخامت لایه‌بندی، شیب درزه‌ها، تداوم و فاصله-داری ناپیوستگی‌ها و همچنین اختلاف امتداد کارگاه با امتداد درزه‌ی بحرانی به عنوان معیارهای ارزیابی در سیستم طبقه‌بندی انتخاب شدند. سیستم طبقه‌بندی جدید، قادر خواهد بود تا کیفیت سنگ سقف معادن زغالسنگ را در سه دسته و به صورت کیفی شامل رده‌های خوب، متوسط و ضعیف طبقه‌بندی کند. به منظور ارزیابی و بررسی عملکرد این سیستم طبقه‌بندی، مطالعات در بخش‌هایی از معادن زغالی حوضه‌ی البرز شرقی انجام شد.

۶- نتیجه‌گیری

امروزه روش جبهه‌کار طولانی یکی از رایج‌ترین روش‌های استخراج زیرزمینی در معادن زغالسنگ محسوب می‌شود. این روش، یک روش تخریبی است که از جمله فاکتورهای مؤثر برای موفقیت در آن، کنترل و تخریب مناسب طبقات سقف است. یکی از خطرات عمده ناشی از معدنکاری زیرزمینی لایه‌های زغالسنگ، پدیده ریزش ناگهانی سقف در کارگاه استخراج است. به منظور کنترل سقف کارگاه‌های استخراج و نیز برای کاهش ریسک‌های عملیاتی، لازم است که بررسی‌های دقیق مهندسی برای ارزیابی سقف‌ها و دسته‌بندی ریسک‌های مرتبط با شرایط هر کدام از آنها صورت گیرد. بدین منظور، ارائه طبقه‌بندی‌های مختلف برای سقف معادن زیرزمینی زغالسنگ که با روش‌هایی نظیر جبهه‌کار طولانی استخراج

- [7] Maiti, J., & Khanzode, V. V. (2009). Development of a relative risk model for roof and side fall fatal accidents in underground coal mines in India. *Safety science*, 47(8), 1068-1076.
- [8] Palei, S. K., & Das, S. K. (2009). Logistic regression model for prediction of roof fall risks in bord and pillar workings in coal mines: an approach. *Safety science*, 47(1), 88-96.
- [9] Ghasemi, E., Ataei, M., Shahriar, K., Sereshki, F., Jalali, S. E., & Ramazan-zadeh, A. (2012). Assessment of roof fall risk during retreat mining in room and pillar coal mines. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 54, 80-89.
- [10] Wenbi, J., Qu, E., & Zhang, L. (2012). Quantitative identification and analysis on hazard sources of roof fall accident in coal mine. *Procedia Engineering* 45 (2012): 83-88.
- [11] Razani, M., Yazdani-Chamzini, A., & Yakhchali, S. H. (2013). A novel fuzzy inference system for predicting roof fall rate in underground coal mines. *Safety science*, 55, 26-33.
- [12] Ghasemi, E., & Ataei, M. (2013). Application of fuzzy logic for predicting roof fall rate in coal mines. *Neural Computing and Applications*, 22(1), 311-321.
- [13] Osouli, A., & Shafii, I. (2016). Roof Rockmass Characterization in an Illinois Underground Coal Mine. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 1-21.
- [14] Zadeh, L. A. (1965). Fuzzy sets. *Information and control*, 8(3), 338-353.
- [15] Bellman, R. E., & Zadeh, L. A. (1970). Decision-making in a fuzzy environment. *Management science*, 17(4), B-141.
- [16] Zadeh, L. A. (1978). Fuzzy sets as a basis for a theory of possibility. *Fuzzy sets and systems*, 1(1), 3-28.
- [17] Dubois, D., & Prade, H. (1980). New results about properties and semantics of fuzzy set-theoretic operators. In *Fuzzy Sets* (pp. 59-75). Springer US.
- [18] Baglio, S., Fortuna, L., Graziani, S., & Muscato, G. (1994). Membership function shape and the dynamic behaviour of fuzzy systems. *International journal of adaptive control and signal processing*, 8(4), 369-377.
- [19] Piegat, A. (2001). *Fuzzy Modeling and Control (Studies in Fuzziness and Soft Computing)*. Physica, 742.

بدین منظور، داده‌های به دست آمده از معادن این حوضه شامل اطلاعات مربوط به ۱۵ کارگاه استخراج جمع‌آوری شده و سپس کیفیت سقف توسط سیستم طبقه‌بندی جدید مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج به دست‌آمده از سیستم طبقه‌بندی، با رفتار واقعی سقف و میزان گام تخریب و دو سیستم طبقه‌بندی کلاسیک، مورد بررسی و مقایسه قرار گرفت. نتایج حاصل از بررسی‌ها نشان داده است که ارتباط خوبی میان رده‌های تعیین شده توسط سیستم طبقه‌بندی و سیستم‌های طبقه‌بندی کلاسیک و میزان گام تخریب برقرار است. به طوری که سیستم طبقه‌بندی فازی در بیش‌تر موارد (۸۰ درصد معادل با ۱۲ مورد از ۱۵ مورد مطالعاتی) از پیش‌بینی‌های خود توانسته است به خوبی کیفیت سقف را مورد ارزیابی قرار دهد. بدین ترتیب، می‌توان با در نظر گرفتن شرایط ژئومکانیکی و زمین‌شناسی و با در دست داشتن پارامترهای ورودی این سیستم طبقه‌بندی ارائه‌شده، کیفیت سنگ سقف معادن زغالی را مورد ارزیابی قرار داد.

مراجع

- [1] Deb, D. (2003). Analysis of coal mine roof fall rate using fuzzy reasoning techniques. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 40(2), 251-257.
- [2] Duzgun, H. S. B., & Einstein, H. H. (2004). Assessment and management of roof fall risks in underground coal mines. *Safety Science*, 42(1), 23-41.
- [3] Düzgün, H. S. B. (2005). Analysis of roof fall hazards and risk assessment for Zonguldak coal basin underground mines. *International Journal of Coal Geology*, 64(1), 104-115.
- [4] Mark, C., & Molinda, G. M. (2005). The coal mine roof rating (CMRR)—a decade of experience. *International Journal of Coal Geology*, 64(1), 85-103.
- [5] Palei, S. K., & Das, S. K. (2008). Sensitivity analysis of support safety factor for predicting the effects of contributing parameters on roof falls in underground coal mines. *International Journal of Coal Geology*, 75(4), 241-247.
- [6] Phillipson, S. E. (2008). Texture, mineralogy, and rock strength in horizontal stress-related coal mine roof falls. *International Journal of Coal Geology*, 75(3), 175-184.

- [25] Yager, R. R. (1978). Fuzzy decision making including unequal objectives. *Fuzzy sets and systems*, 1(2), 87-95.
- [26] Dubois, D., & Prade, H. (1994). Possibility theory and data fusion in poorly informed environments. *Control Engineering Practice*, 2(5), 811-823.
- [27] Javanshir, G. M. (2008). Develop a New Classification System for Evaluating the Behavior of Roof in Coal Mine (Eastern Alborz Coal Mines). PhD Thesis, Shahrood University of Technology (In Persian).
- [28] Liu Y.C. & Chen C.S. (2007). A new approach for application of rock mass classification on rock slope stability assessment, *Engineering Geology* 89, 129-143.
- [29] Molinda, G. & Mark, C. (1994). Coal mine roof rating (CMRR): a practical rock mass classification for coal mines. Pittsburgh, PA: U.S. Department of the Interior, Bureau of Mines, IC 9387.
- [20] Bárdossy, G., & Fodor, J. (2005). Assessment of the completeness of mineral exploration by the application of fuzzy arithmetic and prior information. *Acta Polytechnica Hungarica*, 2(1), 15-31.
- [21] Tutmez, B., Kahraman, S., & Gunaydin, O. (2007). Multifactorial fuzzy approach to the sawability classification of building stones. *Construction and Building Materials*, 21(8), 1672-1679.
- [22] Li, H., & Yen, V. C. (1995). Fuzzy sets and fuzzy decision-making. CRC press.
- [23] Sousa, J. M., & Kaymak, U. (2002). Fuzzy decision making in modeling and control (Vol. 27). Singapore: World Scientific.
- [24] Mikaeil, R., Naghadehi, M. Z., & Sereshki, F. (2009). Multifactorial fuzzy approach to the penetrability classification of TBM in hard rock conditions. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 24(5), 500-505.

¹. Belt

². Gaussian

³. Coal Mine Roof Rating