

ارزیابی و طبقه‌بندی قابلیت مکانیزاسیون لایه‌های زغال‌سنگ تحت شرایط زمین‌شناسی

(مطالعه موردی: حوضه البرز شرقی و طبس)

رضا میکائیل^{*۱}، احسان جعفرنژاد قراحسنلو^۲، امیر جعفرپور^۳

پذیرش مقاله: ۹۸/۰۴/۱۶

دریافت مقاله: ۹۷/۱۲/۱۳

چکیده

امروزه به موازات استخراج مواد معدنی به‌ویژه زغال‌سنگ، اهدافی همچون دستیابی به بهره‌وری و نرخ تولید بالا، بهبود شرایط کاری و کاهش هزینه‌های معدنکاری دنبال می‌شود. یکی از مناسب‌ترین گزینه‌ها برای رسیدن به این اهداف، جایگزینی روش‌های استخراج سنتی با استخراج تمام‌مکانیزه است. مکانیزه کردن فرآیند استخراج لایه‌های زغالی، برخلاف روش‌های سنتی امری زمان‌بر و نیازمند صرف هزینه‌های سرمایه‌گذاری بالا می‌باشد. لذا توجه به این امر حساسیت ویژه‌ای در تمامی مراحل طراحی و اجرا را موجب می‌شود. بنابراین لازم است تا در مرحله نخست از طراحی، بررسی و شناسایی قابلیت مکانیزاسیون لایه‌های زغالی مورد توجه قرار گیرد. قابلیت مکانیزاسیون لایه‌های زغالی متأثر از عوامل عمده‌ای نظیر شیب لایه، ضخامت لایه، یکنواختی لایه، کیفیت سنگ سقف، کیفیت سنگ کف و دبی آب موجود در سینه‌کار است. در پژوهش حاضر، سعی شده است یک سیستم طبقه‌بندی فازی چندفاکتوره با استفاده از تلفیق رویکرد فازی چندمعیاره و روش تحلیل سلسله مراتبی فازی دلفی (FDAHP)، به منظور ارزیابی و شناسایی قابلیت مکانیزاسیون لایه‌های زغالی ارائه شود. بدین منظور، قابلیت مکانیزاسیون ۱۷ کارگاه استخراجی مربوط به لایه‌های زغالی در حوضه البرز شرقی و طبس مورد ارزیابی قرار گرفت. مطابق نتایج به‌دست‌آمده از سیستم طبقه‌بندی فازی ارائه‌شده، تنها دو لایه زغالی T پروده طبس، با رده کیفی خوب و لایه زغالی K11 معدن تخت، با رده کیفی متوسط شرایط اجرای استخراج مکانیزه را دارا بوده و سایر لایه‌ها رده کیفی مناسبی برای مکانیزاسیون به‌دست نیاموردند. در ادامه، نتایج حاصل از بررسی قابلیت مکانیزاسیون لایه‌های مورد مطالعه با شرایط اجرایی فعلی آنها مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج بررسی‌ها نشان داد که می‌توان با قابلیت اطمینان بالایی و با توجه به شرایط زمین‌شناسی موصوف به ارزیابی قابلیت مکانیزاسیون لایه‌های زغالی با استفاده از سیستم طبقه‌بندی فازی چندفاکتوره ارائه‌شده پرداخت.

کلیدواژه‌ها: مکانیزاسیون، طبقه‌بندی، تئوری فازی، البرز شرقی، طبس.

۱. عضو هیئت علمی دانشکده مهندسی معدن و متالورژی، دانشگاه صنعتی ارومیه reza.mikaeil@gmail.com

۲. دانش‌آموخته کارشناسی‌ارشد مهندسی معدن، دانشکده مهندسی معدن و متالورژی، دانشگاه صنعتی ارومیه

۳. دانشجوی دکتری مهندسی معدن، دانشکده مهندسی معدن و متالورژی، دانشگاه یزد

* مسئول مکاتبات

۱. مقدمه

در سال‌های اخیر، همگام با استخراج مواد معدنی به‌ویژه زغال‌سنگ، اهدافی نظیر افزایش نرخ تولید، کاهش هزینه‌ها، بهبود شرایط کاری و افزایش بهره‌وری استخراج در دستور کار طراحان و مهندسان معدن قرار گرفته است و آنها مؤظف به ارائه راهکارهایی برای دستیابی به اهداف تعیین‌شده هستند (Ataei et al., 2009). استخراج مکانیزه کارگاه‌های استخراج می‌تواند گزینه مطلوبی برای نیل به این اهداف باشد. مکانیزه کردن، به‌کارگیری ماشین‌آلات و تجهیزات پیشرفته برای انجام فعالیت‌هایی است که در گذشته از انسان یا حیوان استفاده می‌شده است (قادرنژاد و همکاران، ۱۳۹۵). در صنعت معدنکاری، استفاده از ماشین‌آلات و تجهیزات پیشرفته به منظور بهبود شرایط کاری، افزایش بهره‌وری و نیز افزایش ایمنی، از بدو استخراج تا تولید محصول نهایی انجام می‌گیرد. تجربه‌های به‌دست‌آمده از مکانیزاسیون معدن، حاکی از آن است که علاوه بر شرایط زمین‌شناسی و تکنولوژی فیزیکی - مکانیکی، سایر عوامل نظیر تغییر کارگروه مدیریتی، ساختارهای سازمانی، صنایع حمایت‌کننده، دسترسی به دانش فنی روز، برنامه‌ریزی کاری و نحوه اجرای عملیات معدنکاری در فرایند مکانیزاسیون تأثیرگذار هستند (Hattingh et al., 2010).

مکانیزاسیون فرایند استخراج بر خلاف روش استخراج سنتی، امری زمان‌بر و مستلزم صرف هزینه‌های سرمایه‌گذاری بالا و انجام مطالعات گسترده پیش از مکانیزاسیون است. به‌طور کلی، می‌توان اهداف مکانیزه کردن معدن را به‌صورت افزایش ایمنی (کاهش تعداد افراد مشغول در بخش‌های خطرناک)، افزایش نرخ تولید، تمرکز فعالیت‌های معدنی و در نتیجه کاهش هزینه‌های معدنکاری بیان کرد (Ataei et al., 2009).

از آنجایی که مکانیزاسیون معدن زغال‌سنگ نقشی اساسی را در بهبود شرایط معدنکاری و افزایش تولید تحت شرایط پایدار ایمنی ایفا می‌کند؛ از این‌رو امروزه مطالعه، بررسی و شناسایی لایه‌های زغال‌سنگ با قابلیت بالای مکانیزاسیون امری ضروری و غیرقابل اجتناب برای مهندسان معدن است.

تا کنون مطالعات ارزشمندی توسط پژوهشگران بر روی قابلیت مکانیزاسیون معدن زغال‌سنگ انجام گرفته است. عطایی و همکاران (۲۰۰۹)، با استفاده از منطق فازی و در نظر گرفتن پارامترهایی نظیر شیب لایه، ضخامت لایه، شرایط زمین‌شناختی و کیفیت کمربالا و کمربایین، به ارزیابی و طبقه‌بندی قابلیت مکانیزاسیون لایه‌های زغالی معدن تخت پرداختند. وانگ و همکاران (۲۰۱۱)، قابلیت استخراج تمام-مکانیزه لایه‌های زغالی نازک تحت شرایط نامناسب زمین‌شناسی را مورد بررسی قرار دادند. حسینی و همکاران (۱۳۹۱)، شاخص جدیدی را به منظور ارزیابی قابلیت مکانیزاسیون لایه‌های زغالی معدن زغال‌سنگ طزره ارائه داده و در پژوهشی دیگر، حسینی و همکاران (۲۰۱۲) با بهره‌گیری از منطق فازی، همین موضوع را بررسی کردند. اُزفیرات (۲۰۱۲)، با استفاده از روش تحلیل سلسله مراتبی (AHP) و در نظر گرفتن معیارهای اصلی و زیرمعیارهای مؤثر، قابلیت مکانیزاسیون معدن زیرزمینی زغال‌سنگ آماسرا را مورد بررسی و مطالعه قرار داد. همچنین، حسینی و همکاران (۲۰۱۳) نیز یک سیستم طبقه‌بندی جدیدی را بر اساس معیارهای مهم شیب لایه، ضخامت لایه، شرایط زمین‌شناختی، کیفیت سنگ‌های سقف و کف کارگاه ارائه دادند. قادرنژاد و همکاران (۲۰۱۹)، در پژوهش خود با رویکرد ترکیبی روش‌های تحلیل سلسله مراتبی فازی دلفی (FDAHP) و پرومیتی (PROMETHEE) به بررسی قابلیت مکانیزاسیون لایه‌های معدن طزره پرداخته‌اند.

در پژوهش حاضر نیز یک سیستم طبقه‌بندی فازی چندفاکتوره به منظور شناسایی و انتخاب لایه‌های زغال‌سنگ با قابلیت بالای استخراج مکانیزه ارائه شده است. از جمله دلایل کاربرد این روش ترکیبی، سازگاری آن با شرایط مختلف مسائل مهندسی و نیز سازگاری نتایج آن با شرایط واقعی است. به‌طوری که امروزه می‌توان شاهد استفاده طیف گسترده‌ای از روش‌های ترکیبی فازی در علوم مهندسی بود که ناشی از بهینه بودن نتایج، سهولت مدل‌سازی مسائل مهندسی و نیز نتایج قابل قبول حاصل از آنها است.

۲. روش‌شناسی

در این پژوهش، به منظور ارائه یک سیستم طبقه‌بندی برای ارزیابی قابلیت مکانیزاسیون لایه‌های زغال‌سنگ حوضه البرز شرقی و طبس که مجموعاً شامل ۱۷ کارگاه می‌شود، تئوری مجموعه‌های فازی و رویکرد فازی چندمعیاره به کار گرفته شد. برای ارائه سیستم طبقه‌بندی فازی به منظور تحلیل وضعیت لایه‌های زغال‌سنگ حوضه البرز شرقی و طبس از نظر قابلیت مکانیزاسیون این لایه‌ها، ابتدا با ارائه تئوری روش‌شناسی مورد نظر، مسأله به چالش کشیده شده و سپس با انجام محاسبات و تحلیل نتایج خروجی حاصل از روش ارائه‌شده مورد ارزیابی قرار می‌گیرند.

اولین گام از تحلیل داده‌ها، تعیین درجه اهمیت معیارها برای ایجاد سیستم طبقه‌بندی جدید بود. میزان اهمیت هر یک از معیارهای ذکر شده با استناد به نظر خبرگان و متخصصان تعیین شد. در این مرحله، ابتدا فرم پرسش‌نامه برای کارشناسان خبره در زمینه معادن زغالی ارسال و پس از جمع‌آوری فرم‌های پرسش‌نامه، درجه اهمیت هر یک از معیارها با استفاده از روش تحلیل سلسله مراتبی فازی دلفی (FDAHP) و همچنین روش پیشنهادی ساعتی محاسبه شد. گام بعدی پس از تعیین درجه اهمیت معیارها، طبقه‌بندی معیارها در پنج رده کیفی متفاوت (خیلی خوب، خوب، متوسط، ضعیف و خیلی ضعیف) بود. پس از تعیین رده‌های کیفی مربوط به هر معیار، برای هر یک از معیارها، یک تابع عضویت گائوسی یا سیگموئیدالی تعریف شده و سپس توابع عضویت پنج رده‌ای برای تمامی معیارها ارائه شدند. در ادامه، روش پژوهش به تفصیل تشریح شده و پس از آن، کاربرد روش ارائه‌شده در قالب مطالعه موردی ارائه می‌شود.

۱-۲. تئوری فازی و اصول بنیادین

تئوری فازی و مجموعه‌های فازی را اولین بار لطفعلی عسگرزاده در رساله‌ای به نام «مجموعه‌های فازی» در سال ۱۹۶۵ به منظور تحلیل سامانه‌های پیچیده معرفی کرد (Zadeh, 1965). در تئوری مجموعه‌های کلاسیک، عضویت

اعضا در یک مجموعه به صورت جملات دودویی (باینری) و بر اساس شرط دودویی تعیین می‌شوند که یک عضو یا به مجموعه تعلق دارد یا ندارد و مرزهای یک مجموعه کاملاً مشخص و تیز هستند و به همین علت به آن‌ها مجموعه کاملاً مشخص نیز گفته می‌شود. در حالی که در تئوری فازی، درجات نسبی عضویت اعضا در مجموعه مجاز است و در آن‌ها مرزها نامشخص و نرم هستند. مجموعه‌های فازی تعمیم مشخصه $\{0,1\}$ به تمام اعداد موجود در بازه $[0,1]$ است (Bellman and Zadeh, 1970).

در واقع، در مجموعه‌های فازی بر خلاف مجموعه‌های کلاسیک، عناصر به دو دسته عضو و غیرعضو تقسیم نمی‌شوند؛ بلکه بر اساس توابع تعریف‌شده، میزان عضویت عناصر مختلف در مجموعه‌های فازی بین بازه $[0,1]$ متغیر است. 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 (Zadeh, 1978):

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

که در آن، μ_A میزان درجه عضویت هر عضو از مجموعه A را در بازه $[0,1]$ 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 (Zadeh, 1978):

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

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 (Dubois and Prade, 1980):

سیگموئیدال استفاده شد. یک تابع عضویت سیگموئیدال به- صورت رابطه (۶) تعریف می شود (Jang and Sun, 1997):

$$\text{sig}(x; c, d) = \frac{1}{1 + \exp[-c \times (x - d)]} \quad (6)$$

که در آن، c شیب را در نقطه $x=d$ کنترل می کند. بسته به علامت پارامتر c ، منحنی یک تابع عضویت سیگموئیدال به طور ذاتی به سمت چپ یا راست باز شده و در نتیجه، برای نمایش مفاهیمی همچون «بسیار خوب» و «بسیار ضعیف» مناسب است.

۲-۲. روش ارزیابی چندمعیاره

فرض کنید U یک مجموعه از عناصر به منظور ارزیابی باشد. $\Pi = \{f_1, f_2, \dots, f_m\}$ مجموعه ای از پارامترهایی است که کیفیت عنصرهای تحت ارزیابی را مشخص می کنند و همچنین مجموعه $E = \{e_1, e_2, \dots, e_p\}$ را به عنوان مجموعه ای از نتایج کلامی در نظر بگیرید که در آن کیفیت کلاس k را مشخص می کند. برای هر یک از پارامترهای f_j به ازای هر مقدار k از مجموعه $\{1, 2, \dots, p\}$ یک رده فازی e_k ایجاد می شود. به دلیل این که رده فازی e_k یک مجموعه فازی است که توسط f_j کنترل می شود، مجموعه فازی توسط A_{jk} طراحی می شود (Li and Yen, 1995). اگر رده های کیفی توسط اندیس فاصله ای به کار گرفته شوند، تابع هدف $Q^{(k)}(x)$ به عنوان تابع عضویت تعریف می شود.

$Q^{(k)}(x) = A_{jk}(x)$ با روابط (۷) تا (۹) محاسبه می شود:

$$Q_j^{(1)}(x) = \frac{1}{1 + \exp[-c_j \times (x - d_j)]} \quad (7)$$

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

$$Q_j^{(k)}(x) = \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{x - a_j}{b_j}\right)^2\right) \quad (8)$$

$j = 1, 2, \dots, m, \quad k = 1, 2, \dots, p - 1$

$$Q_j^{(p)}(x) = \frac{1}{1 + \exp[-c_j \times (x - d_j)]} \quad (9)$$

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

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

در صورتی که مجموعه U شامل بی نهایت عضو باشد، معمولاً به صورت رابطه (۴) نمایش داده می شود (Dubois and Prade, 1980):

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

توابع عضویت، تمامی اطلاعات موجود در یک مجموعه فازی مشخص را بیان می کند. توابع عضویت مجموعه های 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 (Baglio et al., 1994).

در میان انبوه توابع عضویت موجود، توابع مثلثی، دوزنقه ای، تسمه ای و گائوسی به عنوان پرکاربردترین توابع شناخته شده اند. با توجه با سادگی فرمول و بازدهی مناسب محاسباتی، هر دو تابع عضویت مثلثی و دوزنقه ای به صورت گسترده استفاده شده است (Piegat, 2001; Bárdossy and Fodor, 2005). با این حال، به دلیل این که توابع عضویت مثلثی و دوزنقه ای از خطوط مستقیم تشکیل می شوند، نقاط گوشه خطوط تیز بوده و فاقد نرمی مورد انتظار هستند. در پژوهش حاضر، توابع عضویت غیرخطی گائوسی و سیگموئیدال که صاف و نرم هستند، ترجیح داده شدند. یک تابع عضویت گائوسی به طور کامل توسط b تعیین می شود. a نشان دهنده مرکز تابع عضویت و b عرض تابع عضویت را تعیین می کند. تابع عضویت گائوسی توسط رابطه (۵) تعریف می شود (Jang and Sun, 1997):

$$\text{Gaussian}(x; a, b) = \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{x - a}{b}\right)^2\right] \quad (5)$$

اگر چه انتهای منحنی توابع عضویت گائوسی و زنگوله ای صاف و نرم است، ولی این توابع فاقد توانایی در تعیین توابع عضویت نامتقارن هستند. برای حل این ناتوانی، از تابع

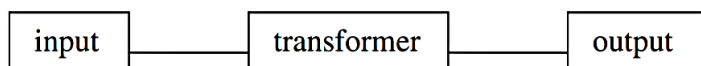
وجود دارد.

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 $R^u = (r_{jk}(u))_{m \times p}$ را می‌توان همانند شکل (۱) به دست آورد.

یک سیستم ارزیابی چندمعیاره به سه پارامتر کلیدی زیر نیاز دارد (Ataei et al., 2009):

- مجموعه‌ای از پارامترها $\Pi = \{f_1, f_2, \dots, f_m\}$
- مجموعه‌ای از کلاس‌های کیفی $E = \{e_1, e_2, \dots, e_p\}$
- به ازای هر عنصر $u \in U$ ، یک ماتریس ارزیابی تک‌عاملی

$$u \longrightarrow R^u - W \longrightarrow D^u = f(W, R^u)$$



شکل ۱. فرآیند ارزیابی چندمعیاره (Tutmez et al., 2007)

باشد. سه تجمیع‌کننده زیر، بیش‌ترین کاربرد را در مدل‌های ارزیابی چندمعیاره فازی داشته‌اند (Tutmez et al., 2007):

- اجتماع عطفی معیارها
- اجتماع انفصالی معیارها
- اجتماع جبرانی معیارها.

با استفاده از تجمیع‌کننده عطفی، تمامی معیارهای تصمیم‌گیری به‌صورت هم‌زمان ارضا خواهند شد. از طرفی دیگر، تجمیع‌کننده انفصالی باعث جبران کامل در بین معیارها می‌شود. تجمع 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، از یکی از عملگرهای مبتنی بر T-norm برای اجتماع معیارها استفاده خواهد شد. توابع زیر به‌عنوان پرکاربردترین و مشهورترین توابع تصمیم‌گیرنده در روش ارزیابی چندمعیاره فازی به کار رفته‌اند. یکی از مهم‌ترین توابع تصمیم‌گیرنده، توسط یاگر برای اجتماع معیارهای وزن‌دار با وزن‌های متفاوت معرفی شده است (Yager, 1978; Sousa and Kaymak, 2002):

شکل (۱)، یک نگاهت از روش ارزیابی چندمعیاره شامل وزن پارامترها و ماتریس مربوطه که با یک تابع تصمیم‌گیرنده به‌صورت روابط (۱۰) و (۱۱) ترکیب شده است را نشان می‌دهد (Tutmez et al., 2007):

$$\xi: U \rightarrow F(E) \quad (10)$$

$$u \rightarrow \xi(u) \quad , \quad D^u = f(W, R^u) \quad (11)$$

در روابط (۱۰) و (۱۱)، f معیار تصمیم‌گیری است که برای ارزیابی گزینه به کار گرفته شده است.

۳-۲. انتخاب عملگر (اجتماع)

در این مرحله، انتخاب عملگر تجمیع‌گیرنده بسیار مهم است. تعداد زیادی توابع انتقال مانند توابع انتقال حداقل (حداکثر) و حداکثر (حداقل) در مطالعات بسیاری از پژوهشگران معرفی شده‌اند. با این حال، امروزه به‌طور گسترده‌ای این مسأله پذیرفته شده است که از هر تجمیع‌کننده مجموعه‌های فازی می‌توان در روش ارزیابی چندمعیاره استفاده کرد. عملگرهای تجمیع‌کننده برای ارزیابی انواع مختلف حالت تصمیم که برای قضاوت نیازمند توابع متفاوتی هستند، استفاده می‌شوند. بنابراین تصمیم‌گیرنده‌ها ممکن است یک تابع تصمیم‌گیرنده را انتخاب کنند که بهترین عملکرد در تصمیم‌گیری را داشته

در رابطه فوق، γ یک مقدار مشخص بوده که معرف خوش بینی فرد تصمیم گیرنده است. در این پژوهش، از تابع معرفی شده توسط دابویس و پرید با حداقل وزن استفاده شده است.

۳. معیارهای مؤثر بر قابلیت مکانیزاسیون

با توجه به مطالعات انجام شده، از عمده ترین عوامل مؤثر بر قابلیت مکانیزاسیون لایه های زغال سنگ در قالب دو گروه کلی مشخصات لایه های زغالی و شرایط محیطی، می توان به معیارهایی نظیر شیب، ضخامت، یکنواختی، شرایط سنگ سقف (مقاومت سنگ)، شرایط سنگ کف (ظرفیت باربری سنگ)، آب موجود در سینه کار و گستردگی لایه اشاره کرد (شکل ۲).

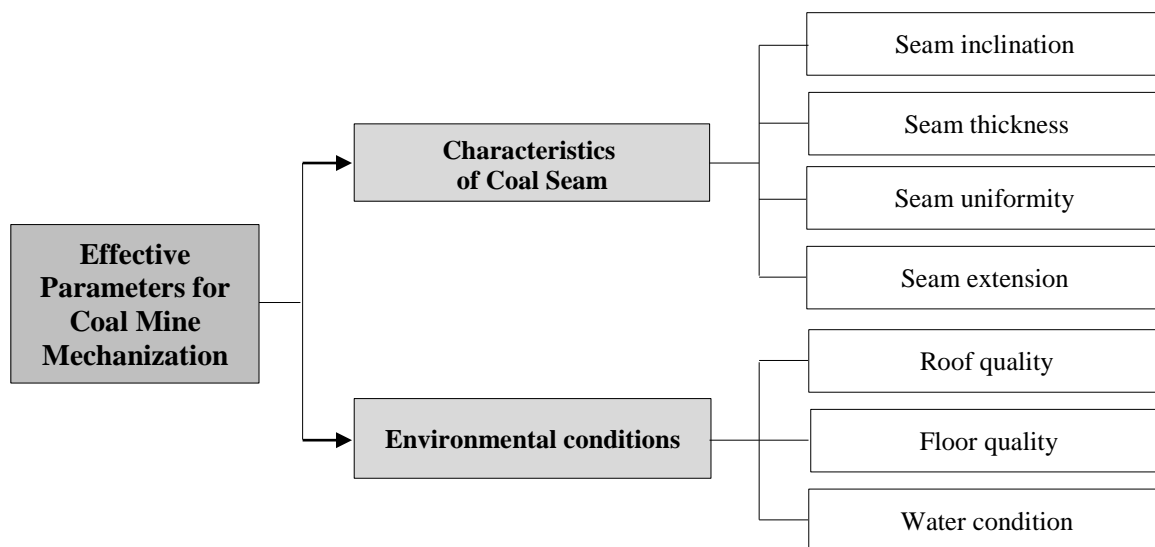
$$D^W(\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_m) = \bigwedge_{i=1}^m \mu_i^{w_i} \quad (12)$$

دابویس و پرید، یک تابع تصمیم گیری برای کاربرد در تئوری احتمالات معرفی کردند (Dubois and Prade, 1980):

$$D^W(\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_m) = \bigwedge_{i=1}^m [(1 - w_i) \vee \mu_i] \quad (13)$$

علاوه بر این عملگرها، کایماک نیز T-norm توسعه یافته وزن داری را پیشنهاد کرد که می تواند برای تجمیع قضاوت ها مورد استفاد قرار گیرد (Kaymak, 1998). این متد می تواند در توسعه هر T-norm ارشمیدسی به معادل وزن خود استفاده شود. به عنوان مثال، معادل وزنی T-norm یاگر با توجه به رابطه (۱۴) برابر است با (Yager, 1980):

$$D^W = \text{Max} \left[0.1 - \left(\sum_{i=1}^m W_i \times (1 - \mu_i)^\gamma \right)^{\frac{1}{\gamma}} \right], \quad \gamma > 0 \quad (14)$$



شکل ۲. پارامترهای مؤثر بر مکانیزاسیون لایه های زغال سنگ

مکانیزه در شیب های کم تر از ۳۰ درجه به خوبی مورد استفاده قرار می گیرند. هر چند که امروزه در بعضی از نقاط اروپا در شیب های ۴۰ تا ۷۰ درجه، استخراج به صورت مکانیزه صورت می گیرد. به طور کلی، با افزایش شیب یک لایه، قابلیت مکانیزاسیون لایه کاهش پیدا می کند (عطایی، ۱۳۹۰).

۳-۱. شیب لایه

شیب لایه یکی از پارامترهای مهمی است که نقش عمده ای در پایداری و قابلیت مکانیزاسیون لایه های زغالی ایفا می کند. هر چه شیب لایه های زغال کم تر باشد، استخراج مکانیزه آن نیز راحت تر خواهد بود. به طوری که تجهیزات و سیستم های

۲-۳. ضخامت لایه

بارهای وارده به سیستم نگهداری قدرتی و توزیع متناسب بار به سینه‌کار، نیاز است تا سقف پس از حرکت سیستم نگهداری به‌طور طبیعی تخریب (ریزش) شود (Unrug and Szwilski, 1982). شاخص‌های مختلفی را برای ارزیابی کیفیت سنگ‌های سقف لایه‌های زغالی ارائه کرده‌اند. شاخص کیفیت سنگ سقف به پارامترهایی از قبیل مقاومت فشاری سنگ سقف در حالت برجا و ضخامت سقف بلافاصله بستگی دارد. مقدار عددی این شاخص از رابطه (۱۶) محاسبه می‌شود:

$$Q_r = 0.015 \times \sigma_M \times d \quad (16)$$

که در آن، σ_M مقاومت فشاری سنگ سقف در حالت برجا (برحسب کیلوگرم بر سانتی‌مترمربع)، d ضخامت سقف بلافاصله (بر حسب سانتی‌متر) و Q_r شاخص کیفیت سنگ سقف (بر حسب کیلوگرم بر سانتی‌متر) است. اندازه‌گیری مقدار σ_M در محل، نسبتاً سخت است. بنابراین، می‌توان از رابطه (۱۷) برای محاسبه این پارامتر استفاده کرد:

$$\sigma_M = \sigma_c \times k_1 \times k_2 \times k_3 \quad (17)$$

که در آن، σ_c مقاومت فشاری تک‌محوری سنگ سقف (بر حسب کیلوگرم بر سانتی‌مترمربع)، k_1 ضریب مقاومت برجا، k_2 ضریب خزش و k_3 ضریب رطوبت است. ضرایب k_1 ، k_2 و k_3 به جنس سنگ سقف و خصوصیات آن بستگی داشته و بر اساس جدول (۱) تعیین می‌شوند (Unrug and Szwilski, 1982).

جدول ۱. ضرایب مؤثر بر مقاومت فشاری سنگ سقف

Rock type	k_1	k_2	k_3
Sandstone	0.33	0.7	0.6
mudstone	0.42	0.6	0.4
Siltstone & Claystone	0.5	0.6	0.4

ضخامت سقف بلافاصله نیز از رابطه (۱۸) محاسبه می‌شود:

$$d = \frac{M}{k-1} \quad (18)$$

ضخامت لایه زغال‌سنگ، از دیگر پارامترهای مؤثر در تعیین قابلیت مکانیزه کردن استخراج لایه بوده و نقش عمده‌ای در انتخاب ماشین‌آلات استخراجی و باربری ایفا می‌کند. برای یک کارگاه استخراج مکانیزه، تغییرات ضخامت مناسب بین ۰/۶ تا ۵/۸ متر است که ضخامت اغلب لایه‌های زغالی بین ۱ تا ۳ متر است. در لایه‌های با ضخامت بیش از ۳ متر و کم‌تر از ۰/۶ متر، قابلیت مکانیزاسیون کاهش می‌یابد. در ضخامت‌های بیش از ۵/۸ متر استفاده از جبهه‌کار طولانی دو یا سه طبقه پیشنهاد می‌شود (عطایی، ۱۳۹۰).

۳-۳. یکنواختی لایه

گسل‌ها، یکی از عمده‌ترین ساختارهای زمین‌شناسی در معادن زیرزمینی زغال‌سنگ است. میزان جابه‌جایی لایه زغال‌سنگ از گسل و تعداد گسل‌های موجود در طول لایه از مهم‌ترین عوامل تأثیرگذار بر چگونگی عبور جبهه‌کار زغال‌سنگ از گسل و قابلیت مکانیزاسیون لایه است. قابلیت مکانیزاسیون لایه زغال‌سنگ با میزان یکنواختی آن رابطه مستقیم دارد. میزان یکنواختی لایه بر حسب تغییرات شاخص جابه‌جایی (نسبت جابه‌جایی لایه به ضخامت آن) مشخص می‌شود (Walsh and Watterson, 1994):

$$I_t = \frac{t}{m} \quad (15)$$

که در آن، t میزان جابه‌جایی لایه توسط گسل (بر حسب متر)، m ضخامت لایه (بر حسب متر) است. در این طبقه‌بندی، شاخص جابه‌جایی لایه به صورت کسری از ضخامت لایه نشان داده شده است. میزان یکنواختی لایه با توجه به شاخص جابه‌جایی آن به صورت یک امتیاز به لایه اختصاص می‌یابد.

۴-۳. کیفیت سنگ سقف

یکی از پارامترهای مهم در استخراج لایه‌های زغالی با استفاده از روش استخراج جبهه‌کار طولانی، کیفیت سنگ سقف است. این روش برای لایه‌های زغالی با پایداری بالا (مقاومت بالا) قابل استفاده نیست؛ زیرا در این روش برای کاهش

توسط حفاری خشک شود. همچنین می‌توان از نگهدارنده ضدزنگ مخصوص استفاده کرد. حضور آب همواره به‌عنوان یک مانع برای معدنکاری زغال‌سنگ مطرح بوده و معدنکاران نیز از کار کردن در شرایط محیطی خیس، بیزار هستند (Hosseini et al., 2013).

۳-۷. گستردگی لایه

نگهدارنده‌های قدرتی در پانل‌های بزرگ قابلیت به‌کارگیری دارند. نصب این تجهیزات ۱۵ الی ۲۰ روز زمان می‌برد که به ارزش زغال‌سنگ افزوده می‌شود. هزینه نصب و راه‌اندازی سیستم نگهدارنده قدرتی در پهنه‌های بزرگ‌تر نسبت به پهنه‌های کوچک‌تر در هر تن استخراج زغال‌سنگ پایین‌تر است. با این حال، ممکن است هزینه نگهداری از این سیستم‌ها در پانل‌های بسیار بزرگ، بسیار زیاد باشد که این مشکل، لاینحل نخواهد بود. پهنای بهینه لایه‌های زغالی بین ۸۰۰ تا ۱۰۰۰ متر تخمین زده می‌شود (Ataei et al., 2009). مشخصات ژئومکانیکی لایه‌های زغال‌سنگ و توده‌سنگ دربرگیرنده معادن مورد مطالعه در جدول (۲) نشان داده شده است.

۴. مطالعه موردی: معادن زغال‌سنگ حوضه البرز شرقی و

طبس

در این پژوهش، لایه‌های مختلف معادن فعال زغال‌سنگ واقع در حوضه البرز شرقی به منظور ارزیابی قابلیت مکانیزاسون مورد بررسی قرار گرفته‌اند. حوضه زغال‌سنگ البرز شرقی یکی از مهم‌ترین حوضه‌های زغال‌سنگ ایران است که در شمال این کشور واقع شده است. این حوضه، شامل تمامی رسوبات زغال‌دار محدوده جاده فیروزکوه، جاده بجنورد-اسفراین، حاشیه کویر مرکزی ایران مانند چاه‌شیرین-جم و لارستان و منطقه سرخس را شامل می‌شود. معادن زغال‌سنگ تخت و طزره جزو معادن حوضه البرز شرقی هستند. همچنین یکی از لایه‌های معدن زغال‌سنگ پروده طبس به‌عنوان یکی از مهم‌ترین معادن حوضه زغالی ایران مرکزی، در این پژوهش مورد بررسی قرار گرفته است. در ادامه، شرح مختصری از وضعیت معادن مذکور ارائه می‌شود.

که در آن، M ارتفاع معدنکاری (بر حسب متر) و k ضریب تورم سنگ سقف بلافصل (معمولاً $1/5$) است. سقف‌هایی که شاخص کیفیت آن‌ها بین ۳۵ تا ۱۳۰ کیلوگرم بر سانتی‌متر است، به‌عنوان مناسب‌ترین سقف برای انجام عملیات استخراج جبهه‌کار طولانی انتخاب می‌شوند (Unrug and Szwilski, 1982).

۳-۵. کیفیت سنگ کف

در روش جبهه‌کار طولانی، سنگ کف باید به‌گونه‌ای باشد که وقتی نگهدارنده قدرتی روی آن قرار می‌گیرد و بار قائم سقف از طریق نگهدارنده به آن وارد می‌شود، پایه‌های نگهدارنده در آن فرو نرود و پیشروی جبهه‌کار مختل نشود. عوامل اصلی که برای پیش‌بینی کیفیت سنگ کف باید مورد توجه قرار گیرند، عبارتند از (Stefanko and Bise, 1983):

- ظرفیت باربری سنگ کف: ظرفیت باربری سنگ کف، معرف حداکثر باری است که سنگ کف می‌تواند تحمل کند، بدون این که در آن شکستگی روی دهد (Unrug and Szwilski, 1982).

- بار قائم ناشی از وزن لایه‌های سقف که توسط پایه‌های نگهدارنده به سنگ کف اعمال می‌شود.

توان باربری در سنگ‌های شکننده و کشسان (نظیر: شیل و ماسه‌سنگ) بر اساس تئوری مقاومت کیفیت از رابطه (۱۹) محاسبه می‌شود:

$$\delta_b = 3C_0 \quad (19)$$

که در آن، δ_b توان باربری سنگ کف (بر حسب مگاپاسکال) و C_0 مقاومت فشاری تک‌محوری (بر حسب مگاپاسکال) است. توان باربری سنگ کف با مقاومت سنگ رابطه مستقیم دارد. بنابراین هر چه مقاومت سنگ کف بیشتر باشد، قابلیت مکانیزاسیون لایه نیز بیشتر خواهد بود.

۳-۶. حضور آب در سینه‌کار

حضور آب در سینه‌کار بسیار مضر بوده و باعث خوردگی نگهدارنده می‌شود. تحت این شرایط، باید پهنه استخراجی

۴-۱. معادن زغال‌سنگ تخت

معادن زغال‌سنگ تخت یکی از معادن زغال‌سنگ حوضه البرز شرقی است که در جنوب‌شرق شهرستان مینودشت در استان گلستان واقع شده است (شکل ۵). طول جغرافیایی منطقه تخت بین $55^{\circ}, 22', 30''$ تا $55^{\circ}, 27', 40''$ شرقی و عرض جغرافیایی آن بین $37^{\circ}, 02', 10''$ تا $37^{\circ}, 10', 35''$ شمالی می‌باشد. عملیات اجرای این معدن، از سال ۱۳۷۸ آغاز شده است و در مرحله اکتشاف با گمانه‌زنی، جاده‌سازی و نمونه‌برداری، ۲۰۰۰ مترمربع حفاری گمانه‌زنی ژئوفیزیک و ۲۵۰۰ هکتار نقشه‌های زمین‌شناسی انجام شده است. مطالعات زمین‌شناسی نشان می‌دهد که این معدن در میان سازندهای الیکا، شمشک، دلپچای و لار به سن تریاس فوقانی تا ژوراسیک برونزد یافته است (خرقانی و همکاران، ۱۳۸۹). ذخیره منطقه تخت، چندان قابلیت کک‌دهی ندارد، ولی گوگرد کم‌تر از یک درصد، خاکستر پایین و ذخیره بالغ بر ۸۰ میلیون تنی منطقه، بهره‌برداری از این ذخیره را توجیه‌پذیر کرده است. منطقه تخت دربرگیرنده سه منطقه تخت، امام عبدالله و ساسنگ است که در منطقه تخت، عملیات بهره‌برداری آغاز شده و مناطق دیگر اکتشافی هستند. توان تولید این معدن ۵۰ هزار تن در سال است که زغال‌سنگ تولیدی معدن، برای فرآوری به کارخانه زغال‌شویی در مجاورت مجموعه طزره حمل می‌شود (Hosseini et al., 2012).

۴-۲. معادن زغال‌سنگ طزره

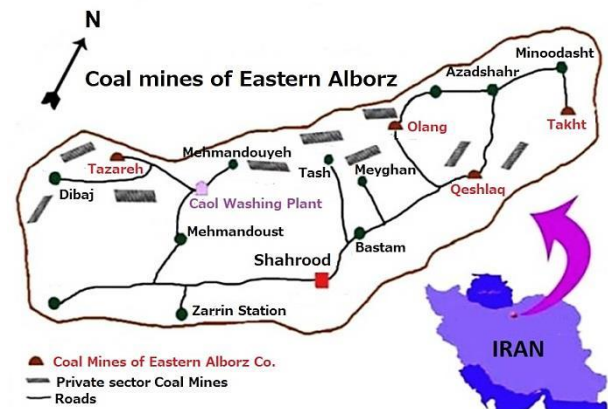
منطقه طزره در شمال‌شرقی ایران و به ترتیب در فواصل ۷۰ و ۴۰ کیلومتری شمال‌غربی شاهرود و شرق دامغان، بین طول‌های $54^{\circ}, 18', 48''$ و $54^{\circ}, 30', 45''$ شرقی و عرض‌های $36^{\circ}, 22', 30''$ و $36^{\circ}, 25', 50''$ شمالی واقع شده است (شکل ۶). منطقه گسترده طزره به چند بخش کوچک‌تر شامل مناطق دهملا، ممدویه، رزمجا، پشتکلات و کلاریز (از شرق به غرب) می‌شود. این منطقه توسط سازندهای الیکا-شمشک-دلپچای و لار احاطه شده است. سازند زغال‌دار در این ناحیه، بخشی از سازند شمشک بوده و وسعتی در حدود ۴۰ کیلومترمربع و با تناوبی از لایه‌های زغالی، ماسه‌سنگ و شیل

است. محدوده معدنی طزره متعلق به یک ناودیس بزرگ با امتداد شرقی-غربی، تحت عنوان ناودیس میاناب می‌باشد. رسوبات زغال‌دار این منطقه بخشی از سازند شمشک به سن تریاس فوقانی-ژوراسیک تحتانی هستند که از پایین به سنگ آهک‌های دولومیتی الیکا و از بالا به سنگ‌های آهکی سازند دلپچای محدود می‌شوند. در منطقه طزره، سازند شمشک به سه زیربخش به نام‌های پشتکلات، آسیاب و کلاریز تقسیم می‌شود که از نظر چینه‌شناسی رسوبات زغال‌دار متعلق به زیربخش‌های کلاریز و پشتکلات می‌باشند. ماسه‌سنگ‌های دربرگیرنده لایه‌های زغال‌سنگی دارای کوارتز، پلاژیوکلاز، میکروکلین، مسکوویت، زیرکن، تورمالین و آناتاز و شیل‌ها دارای کوارتز، پلاژیوکلاز و کانی‌های رسی هستند که بر اساس نامگذاری فولک، ماسه‌سنگ‌ها در محدوده سابلایت آرنایت تا لیت‌آرنایت و شیل‌های منطقه تحت عنوان شیل‌های سیلتی و شیل‌های ماسه‌ای نامگذاری شده‌اند. پیریت، کالکوپیریت، کائولینیت و کوارتز کانی‌های موجود در زغال‌سنگ طزره هستند که در این میان، کوارتز و کانی‌های رسی فراوانی بیش‌تری دارند. بر اساس مطالعات پتروگرافی بر روی زغال‌سنگ‌ها، گروه‌های ویتربینیت، اینترتینیت و لیپتینیت به ترتیب دارای بیش‌ترین، متوسط و کم‌ترین فراوانی در این زغال‌سنگ‌ها می‌باشند. بر پایه داده‌های ژئوشیمیایی سنگ‌های دربردارنده زغال‌سنگ در حوضه‌های کششی پشت کمان و در محیط زمین‌ساختی فعال تشکیل شده‌اند (سرشکی و همکاران، ۱۳۹۵). زغال‌سنگ موجود در منطقه، درون سنگ‌های ژوراسیک قرار دارد و به شکل لایه‌های ورقه‌ای دیده می‌شود. زغال‌های این منطقه از نوع گازهای چرب و کک‌شوی چرب است. میزان ذخیره کانسار ۵۶۱۰ هزار تن و استخراج سالانه ۲۰۸۸۰ تن است. زغال‌های منطقه طزره مربوط به دوران دوم زمین‌شناسی و حد فاصل تریاس فوقانی تا ژوراسیک میانی قرار دارد. تشکیلات شمشک در طزره بین ۳۰۰۰ تا ۹۰۰۰ متر ضخامت داشته و دارای ۸۲ لایه زغالی است. تونل‌های پیشروی در این معدن با روش انفجاری بوده و سیستم استخراج در لایه‌های کم‌شیب به روش جبهه‌کار

سنگ‌های رسوبی منطقه، در محدوده سازند نای‌بند با سن تریاس پسین قرار می‌گیرند. واحدهای سنگ‌چینه‌ای رخنمون-یافته در گستره این منطقه اساساً شامل رسوبات محیط‌های ساحلی و کم‌عمق است که لایه‌هایی از رسوبات نواحی عمیق‌تر و یا رودخانه‌ای نیز در آن دیده می‌شود. عمده این نهشته‌ها شامل ماسه‌سنگ، شیل و مارن و سنگ آهک‌های اوولیتی و پرفسیل است که لایه‌های نازک تا ضخیم زغال‌سنگ نیز در آن یافت می‌شود. از نظر زمانی از تریاس بالایی تا ژوراسیک میانی برجای گذاشته شده شده‌اند. رسوباتی که در ناحیه پروده دارای رخنمون هستند از قدیم به جدید عبارتند از: سازندهای نای‌بند، آب حاجی، پروده و بغشا (Shariat Nia, 1993). ضخامت سازند نای‌بند در برش چینه‌شناسی پروده ۱۴۱۰ متر اندازه‌گیری شده است. سازند نای‌بند در این برش از نظر سنگ‌شناسی یکنواخت بوده و در مقایسه با برش الگو از اختلاف سنگ‌شناسی کم‌تری برخوردار است. از سوی دیگر، مرز میان دولومیت‌های تریاس میانی (سازند شتری) و قاعده سازند نای‌بند دیده نمی‌شود. ضخامت زون زغال اصلی حدود ۱۰۰ متر است و شامل: ماسه‌سنگ، سنگ آهک، سیلت، شیل و زغال‌سنگ است. لایه‌های این زون دارای امتداد جنوب‌شرقی-شمال‌غربی هستند (رجب‌زاده و همکاران، ۱۳۹۴).

زغال‌سنگ‌های معدن پروده از نوع کک‌شو است که اولین معدن تمام‌مکانیزه کشور با ظرفیت استخراج ۱/۲ میلیون تن در سال در آن طراحی و در حال حاضر استخراج می‌شود. زغال‌سنگ‌های پروده طبس، اغلب از نوع بیتومینه با مواد فرار کم و میزان خاکستر آن بالا و به طور متوسط ۴۰ درصد است (دفتر فنی معدن پروده طبس، ۱۳۷۶). شکل (۴) موقعیت جغرافیایی معدن زغال‌سنگ پروده طبس را نشان می‌دهد. جدول (۲)، مشخصات ژئومکانیکی لایه‌های زغال‌سنگ معدن البرز شرقی و طبس و نیز خصوصیات توده‌سنگ دربرگیرنده آن‌ها را نشان می‌دهد.

طولانی و در لایه‌های پرشیب، با روش پلکانی معکوس انجام می‌شود (دفتر فنی شرکت البرز شرقی، ۱۳۸۰). شکل (۳) موقعیت جغرافیایی معدن زغال‌سنگ طزره و تخت را نشان می‌دهد.

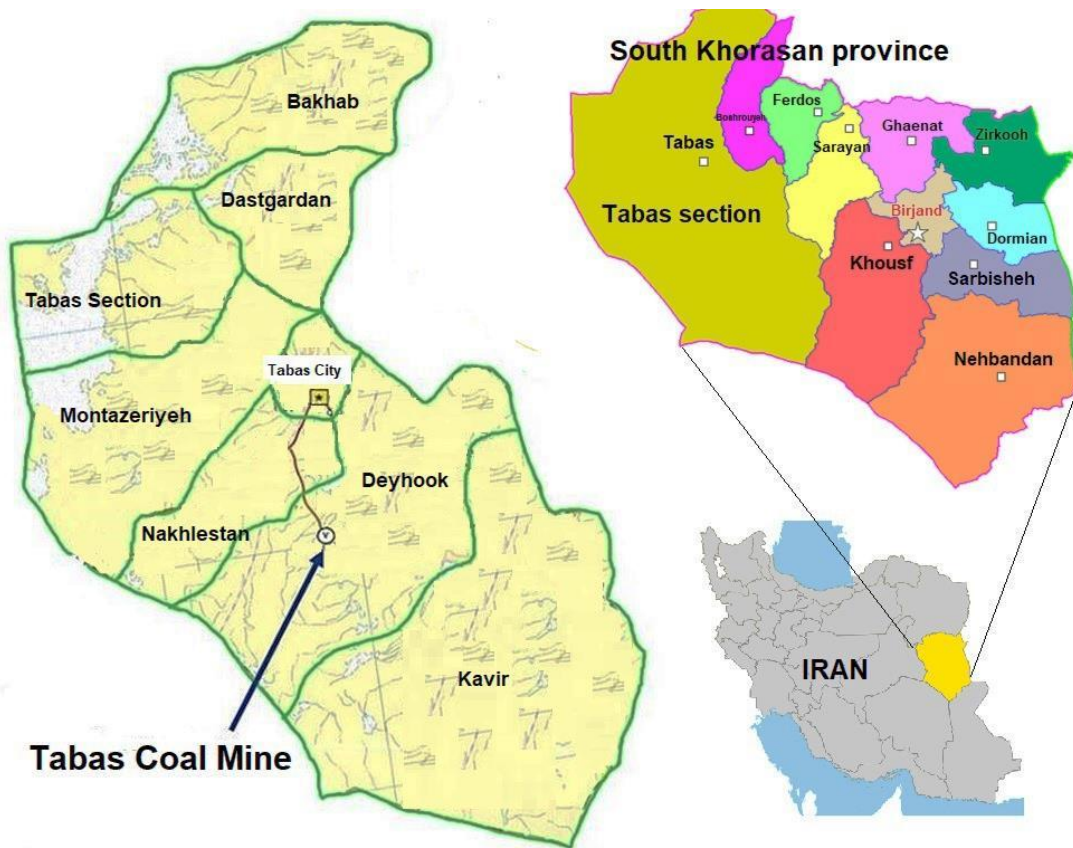


شکل ۳. موقعیت جغرافیایی معدن طزره و تخت

(عرب عامری و همکاران، ۱۳۹۵)

۳-۴. معدن زغال‌سنگ پروده طبس

معدن زغال‌سنگ پروده طبس در شمال استان یزد و جنوب استان خراسان رضوی و در فاصله ۷۵ کیلومتری غرب طبس، در مسیر جاده آسفالت طبس-یزد و در رسوبات زغال‌دار ایران مرکزی قرار دارد (معین‌السادات و رضوی ارمغانی، ۱۳۷۲). این منطقه در تقسیمات زمین‌شناسی ایران در محدوده ایران مرکزی و به طور خاص در ورقه زمین‌شناسی ۱:۲۵۰۰۰۰ طبس و ۱:۱۰۰۰۰۰ کریت قرار گرفته است (آقانباتی، ۱۳۸۳). منطقه پروده با گسترش ۱۲۰۰ کیلومتر میان طول‌های جغرافیایی $56^{\circ}16'$ تا $56^{\circ}45'$ و عرض‌های جغرافیایی $32^{\circ}50'$ تا $33^{\circ}5'$ در قرار گرفته است (شکل ۷). این ناحیه از دید زمین‌شناسی ساختاری، یک تاقدیس نامتقارن و کشیده با محور شرقی-غربی است که از شمال به دشت رسی کهن کاملاً هموار کویری، از جنوب به ارتفاعات نه-چندان مرتفع ژوراسیک (آب حاجی)، از شرق به رشته‌کوه شتری و از غرب به ارتفاعات ناحیه کلمرد (کمر مهدی) محدود می‌شود (رجب‌زاده و همکاران، ۱۳۹۴). مهم‌ترین



شکل ۴. موقعیت معدن پروده طبس بر روی نقشه

جدول ۲. مشخصات ژئومکانیکی لایه‌های زغال‌سنگ و توده‌سنگ دربرگیرنده معادن مورد مطالعه

Mine	Seam	Seam inclination (Degree)	Seam thickness (m)	Seam uniformity -	Extension of seam (m)	Roof quality (kg/cm ²)	Floor quality (MPa)	Water condition (m ³ /min)
Takht	K8	32.5	1	0.8	6500	140.4	112.5	5
	K10	30	1.6	0.8	10580	226	112.5	6
	K11	26	1.2	0.8	7000	417.7	83.4	4
	K17	30	0.9	0.8	3500	128	258.7	5
	K19	30	1.6	0.8	4500	219.6	258.7	3
	K20	29	0.6	0.8	5250	65.3	112.5	5
Tazareh	P1	51	0.4	2.5	6300	54.4	27.8	6
	P3	36	0.5	2	5680	244	86.32	4
	P10	43	0.88	1.14	4435	119.8	27.8	3
	K5	48	0.82	1.21	3670	400.2	86.32	5
	K6	33	0.59	1.69	7500	80.3	27.8	9
	K8b	38	0.82	1.21	6200	111.6	27.8	6
	K10b	31	0.8	1.25	5900	108.9	27.8	4
	K14	32	0.58	1.72	4100	78.9	27.8	7
	K19U	35	0.53	1.88	8200	278	27.8	4
K19L	35	0.66	1.51	5000	89.8	27.8	8	
Tabas	T	16	1.8	0.75	2700	95	80	100

۵. بحث و تحلیل

اولین گام از تحلیل داده‌ها، تعیین درجه اهمیت معیارها برای ایجاد سیستم طبقه‌بندی جدید است. میزان اهمیت هر یک از معیارهای ذکر شده با اسناد به نظر خبرگان و متخصصان تعیین شد. در این مرحله، ابتدا فرم پرسش‌نامه برای کارشناسان خبره در زمینه معادن زغالی ارسال شد. در ادامه، پس از جمع‌آوری فرم‌های پرسش‌نامه، درجه اهمیت هر یک از معیارها با استفاده از روش تحلیل سلسله مراتبی فازی دلفی (FDAHP) محاسبه شد. در ادامه، برخی از پژوهش‌های مرتبط با این روش به اختصار تشریح می‌شود.

حسینی و همکاران (۲۰۰۹)، با استفاده از روش FDAHP یک سیستم طبقه‌بندی نوین برای ارزیابی قابلیت نفوذپذیری ارائه کردند. میکائیل و همکاران (۲۰۱۳) نیز با به‌کارگیری روش FDAHP، قابلیت برش سنگ‌های زیتتی را مورد رده‌بندی قرار دادند. در پژوهشی دیگر، حیاتی و همکاران (۲۰۱۴)، ارزیابی ریسک و رتبه‌بندی فلزات را با استفاده از روش ترکیبی FDAHP و TOPSIS بررسی کردند.

کیو و همکاران (۲۰۱۶) نیز ریسک آلودگی آب در یک معدن زغال‌سنگ واقع در چین را با روش ترکیبی FDAHP و تحلیل وابستگی خاکستری ارزیابی کردند. نتایج حاصل از پژوهش‌های مذکور، نشان‌دهنده قابلیت روش FDAHP در

طبقه‌بندی‌های مربوط به مسائل مختلف است. بر اساس نتایج پژوهش‌های انجام‌گرفته با این روش، مشخص است که از آن می‌توان در تحلیل‌ها و رده‌بندی‌های مرتبط با مسائل مهندسی معدن بهره گرفت. دلیل سازگاری این روش و نتایج حاصل از کاربردهای آن که با شرایط واقعی سازگاری بسیاری دارد، این است که این روش ترکیبی، تمامی مزایای روش‌های AHP، تئوری فازی و روش دلفی را داشته و معایب یکایک این روش‌ها، زمانی که با هم ترکیب می‌شوند، به حداقل ممکن می‌رسد. از سوی دیگر، استفاده از تجمیع مزایای روش‌های سه‌گانه فوق در قالب روش ترکیبی FDAHP موجب می‌شود که نه تنها نتایج حاصل از به‌کارگیری آن برای داده‌های شبیه سازی شده نتایج قابل قبولی در پی داشته باشد، بلکه نتایج روش مذکور با شرایط واقعی نیز مشابهت قابل توجهی داشته و برای کاربردهای اجرایی و عملیاتی نیز می‌توان از نتایج آن بهره‌مند شد. بنابراین، به منظور اجرای روش فوق در طبقه بندی قابلیت مکانیزاسون لایه‌های زغالی معادن زغال‌سنگ مختلف کشور، لازم است که ابتدا میزان اهمیت معیارهای اثرگذار بر اساس نظرات خبرگان مشخص شوند. جدول (۳) نمونه‌ای از فرم پرسش‌نامه ارسالی به کارشناسان خبره را نشان می‌دهد.

جدول ۳. نمونه فرم پرسش‌نامه پاسخ‌داده‌شده توسط کارشناس اول

Degree of importance	Effective Criteria for the Mechanization of Coal Mines						
	Seam inclination	Seam thickness	Seam uniformity	Seam extension	Roof quality	Floor quality	Water condition
Very weak importance (VW)							
Weak importance (W)						•	•
Moderate importance (M)				•	•		
Strength importance (S)		•	•				
Very strength importance (VS)	•						

در ادامه، ماتریس مقایسه زوجی بر اساس نظرات کارشناسان خبره با بهره‌گیری از روش پیشنهادی ساعتی (۱۹۹۴) تشکیل شد. در این مرحله، عناصر هر سطح نسبت به سایر عناصر موجود خود در سطح بالاتر به صورت زوجی مقایسه شده و ماتریس‌های مقایسه زوجی تشکیل شدند. تخصیص امتیازات

عددی مربوط به مقایسه زوجی اهمیت دو شاخص بر اساس جدول (۴) صورت گرفت.

جدول ۴. طبقه‌بندی کمی و کیفی برای مقایسه زوجی معیارها

Relative criteria comparison (verbal judgment)	Numerical score
--	-----------------

بر اساس مقایسه‌های زوجی تعیین شوند. درایه‌های قرینه نسبت به قطر، معکوس همدیگر هستند. ماتریس مقایسه زوجی با استفاده از رابطه (۲۰) قابل محاسبه است. ماتریس مقایسه زوجی بر اساس نظر کارشناس اول در جدول (۵) درج شده است.

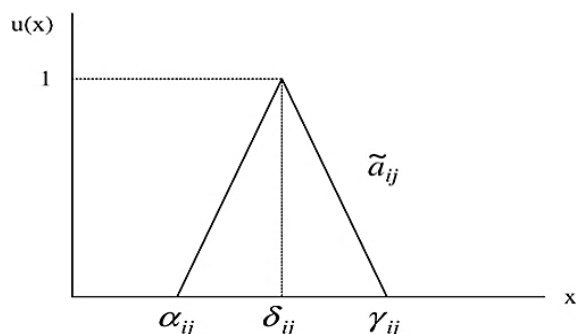
$$A = [a_{ij}] = \begin{bmatrix} 1 & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ 1/a_{12} & 1 & \dots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1/a_{1n} & 1/a_{2n} & \dots & 1 \end{bmatrix} \quad (20)$$

Absolute Importance	9
Very strong importance	7
Strong importance	5
Poor importance	3
Equally importance	1
Preferences between distances	2,4,6,8

ماتریس مقایسه زوجی، یک ماتریس $n \times n$ بوده که n تعداد عناصری است مورد مقایسه قرار گرفته‌اند. برای هر ماتریس مقایسه زوجی $n \times n$ ، عناصر روی قطر مساوی یک بوده و نیازی به ارزیابی نیست، ولی در سایر درایه‌های ماتریس باید

جدول ۵. ماتریس مقایسه زوجی بر اساس نظر کارشناس اول

Criteria		C ₁	C ₂	C ₃	C ₄	C ₅	C ₆	C ₇
C ₁ : Seam inclination	C ₁	1	3	4	5	6	7	7
C ₂ : Seam thickness	C ₂	0.33	1	2	3	4	5	5
C ₃ : Seam uniformity	C ₃	0.25	0.5	1	2	3	4	4
C ₄ : Seam extension	C ₄	0.2	0.33	0.5	1	2	3	3
C ₅ : Roof quality	C ₅	0.16	0.25	0.33	0.5	1	2	2
C ₆ : Floor quality	C ₆	0.14	0.2	0.25	0.33	0.5	1	1
C ₇ : Water condition	C ₇	0.14	0.2	0.25	0.33	0.5	1	1



شکل ۵. تابع عضویت مثلثی در روش فازی دلفی

(Liu & Chen, 2007)

$$\delta_{ij} = \left(\prod_{k=1}^n \beta_{ijk} \right)^{\frac{1}{n}}, \quad k = 1, 2, \dots, n \quad (23)$$

$$\gamma_{ij} = \text{Max}(\beta_{ijk}), \quad k = 1, 2, \dots, n \quad (24)$$

در روابط فوق، α_{ij} و γ_{ij} به ترتیب معرف حد بالا و حد پایین نظرات متخصصان می‌باشند. پارامتر β_{ijk} نیز معرف اهمیت نسبی پارامتر i نسبت به پارامتر j از دیدگاه متخصص k -ام است (Liu and Chen, 2007).

پس از تشکیل ماتریس‌های مقایسه زوجی، نتایج حاصل برای تشکیل ماتریس مقایسه زوجی فازی مورد استفاده قرار گرفتند. در تشکیل این ماتریس از تابع عضویت مثلثی و در نتیجه، اعداد فازی مثلثی استفاده شده است. محاسبات مربوط به این روش شامل مراحل زیر است:

• **محاسبه اعداد فازی:** برای محاسبه اعداد فازی (a_{ij}) ، نظرات حاصل از نظرسنجی از متخصصان به طور مستقیم مدنظر قرار می‌گیرد. در این پژوهش، اعداد فازی بر اساس تابع عضویت مثلثی محاسبه شدند. شکل (۵) محاسبه اعداد فازی با روش مثلثی را نشان می‌دهد. مطابق شکل (۵) در روش فازی دلفی، یک عدد فازی با استفاده از رابطه‌های (۲۱) تا (۲۴) قابل محاسبه هستند:

$$a_{ij} = (\alpha_{ij}, \delta_{ij}, \gamma_{ij}) \quad (21)$$

$$a_{ij} = \text{Min}(\beta_{ijk}), \quad k = 1, 2, \dots, n \quad (22)$$

یا به صورت:

$$\bar{A} = \begin{bmatrix} (1, 1, 1) & (\alpha_{12}, \delta_{12}, \gamma_{12}) & (\alpha_{13}, \delta_{13}, \gamma_{13}) \\ (1/\gamma_{12}, 1/\delta_{12}, 1/\alpha_{12}) & (1,1,1) & (\alpha_{23}, \delta_{23}, \gamma_{23}) \\ (1/\gamma_{13}, 1/\delta_{13}, 1/\alpha_{13}) & (1/\gamma_{23}, 1/\delta_{23}, 1/\alpha_{23}) & (1,1,1) \end{bmatrix}$$

ماتریس مقایسه زوجی فازای محاسبه شده در جدول (۶) نشان داده شده است.

• تشکیل ماتریس مقایسه زوجی فازای: در این مرحله با استفاده از اعداد فازای که از مرحله قبل به دست آمده ماتریس مقایسه زوجی فازای بین پارامترهای مختلف با کمک رابطه (۲۵) تشکیل می شود:

$$\begin{aligned} \tilde{A} &= [\tilde{a}_{ij}] \\ \tilde{a}_{ij} \times \tilde{a}_{ji} &\approx 1, \quad \forall i, j = 1, 2, \dots, n \end{aligned} \quad (25)$$

جدول ۶. ماتریس مقایسه زوجی فازای

	Seam inclination	Seam thickness	Seam uniformity	Seam extension	Roof quality	Floor quality	Water condition
Seam inclination	(1,1,1)	(0.33,1.071,5)	(1,2.84,9)	(1,3.15,9)	(3,4.4,7)	(1,3.04,9)	(3,5.19,7)
Seam thickness	(0.2,0.93,3)	(1,1,1)	(2,3.19,5)	(1,3.11,5)	(3,4.26,7)	(3,3.63,5)	(1,5.45,7)
Seam uniformity	(0.11,0.35,1)	(0.2,0.31,0.5)	(1,1,1)	(0.33,1.09,3)	(0.33,1.69,5)	(1,1.21,4)	(0.2,2.22,5)
Seam extension	(0.11,0.31,1)	(0.2,0.31,1)	(0.33,0.9,3)	(1,1,1)	(0.33,1.48,5)	(0.33,1.63,3)	(0.2,2.08,7)
Roof quality	(0.14,0.2,0.33)	(0.14,0.2,0.33)	(0.2,0.54,3)	(0.2,0.57,3)	(1,1,1)	(0.2,0.7,3)	(0.33,1.28,3)
Floor quality	(0.11,0.32,1)	(0.2,0.27,0.33)	(0.25,0.82,1)	(0.33,0.85,3)	(0.33,0.32,5)	(1,1,1)	(0.2,1.83,5)
Water condition	(0.14,0.19,0.3)	(0.14,0.22,1)	(0.2,0.44,5)	(0.14,0.47,5)	(0.33,0.66,3)	(0.2,0.54,5)	(1,1,1)

در روابط فوق، \otimes علامت ضرب اعداد فازای و \oplus علامت جمع اعداد فازای می باشد. در نهایت، پارامتر \tilde{W}_i که یک بردار سطری است، معرف وزن فازای پارامتر i -ام است.

در این مرحله، وزن فازای متعلق به هر پارامتر را می توان با استفاده از رابطه های (۲۶) و (۲۷) تعیین کرد [۳۷]:

$$\tilde{Z}_i = [\tilde{a}_{ij} \otimes \dots \otimes \tilde{a}_{in}]^{\frac{1}{n}} \quad (26)$$

$$\tilde{W}_i = \tilde{Z}_i \otimes (\tilde{Z}_i \oplus \dots \oplus \tilde{Z}_n) \quad (27)$$

$$\tilde{Z}_1 = [\tilde{a}_{11} \otimes \tilde{a}_{12} \otimes \dots \otimes \tilde{a}_{17}]^{\frac{1}{7}} = [1.16, 2.48, 5.43]$$

$$\tilde{Z}_2 = [\tilde{a}_{21} \otimes \tilde{a}_{22} \otimes \dots \otimes \tilde{a}_{27}]^{\frac{1}{7}} = [1.19, 0.92, 2.01]$$

$$\tilde{Z}_3 = [\tilde{a}_{31} \otimes \tilde{a}_{32} \otimes \dots \otimes \tilde{a}_{37}]^{\frac{1}{7}} = [0.34, 0.92, 2.01]$$

$$\tilde{Z}_4 = [\tilde{a}_{41} \otimes \tilde{a}_{42} \otimes \dots \otimes \tilde{a}_{47}]^{\frac{1}{7}} = [0.29, 0.85, 2.23]$$

$$\tilde{Z}_5 = [\tilde{a}_{51} \otimes \tilde{a}_{52} \otimes \dots \otimes \tilde{a}_{57}]^{\frac{1}{7}} = [0.25, 0.54, 1.35]$$

$$\tilde{Z}_6 = [\tilde{a}_{61} \otimes \tilde{a}_{62} \otimes \dots \otimes \tilde{a}_{67}]^{\frac{1}{7}} = [0.28, 0.76, 1.56]$$

$$\tilde{Z}_7 = [\tilde{a}_{71} \otimes \tilde{a}_{72} \otimes \dots \otimes \tilde{a}_{77}]^{\frac{1}{7}} = [0.23, 0.44, 1.96]$$

$$\sum \tilde{Z}_i = [3.77, 8.49, 18.53]$$

$$\tilde{W}_i = \left(\prod_{j=1}^3 \omega_j \right)^{\frac{1}{3}} \quad (28)$$

$$\tilde{W}_1 = 0.30, \quad \tilde{W}_2 = 0.27, \quad \tilde{W}_3 = 0.1, \quad \dots$$

$$\tilde{W}_1 = \tilde{Z}_1 \otimes (\tilde{Z}_1 \oplus \tilde{Z}_2 \oplus \tilde{Z}_3)^{-1} = [0.3, 0.292, 0.293]$$

$$\tilde{W}_2 = \tilde{Z}_2 \otimes (\tilde{Z}_1 \oplus \tilde{Z}_2 \oplus \tilde{Z}_3)^{-1} = [0.31, 0.29, 0.21]$$

$$\tilde{W}_3 = \tilde{Z}_3 \otimes (\tilde{Z}_1 \oplus \tilde{Z}_2 \oplus \tilde{Z}_3)^{-1} = [0.09, 0.1, 0.01]$$

$$\tilde{W}_4 = \tilde{Z}_4 \otimes (\tilde{Z}_1 \oplus \tilde{Z}_2 \oplus \tilde{Z}_3)^{-1} = [0.07, 0.1, 0.12]$$

$$\tilde{W}_5 = \tilde{Z}_5 \otimes (\tilde{Z}_1 \oplus \tilde{Z}_2 \oplus \tilde{Z}_3)^{-1} = [0.067, 0.064, 0.07]$$

$$\tilde{W}_6 = \tilde{Z}_6 \otimes (\tilde{Z}_1 \oplus \tilde{Z}_2 \oplus \tilde{Z}_3)^{-1} = [0.075, 0.09, 0.08]$$

$$\tilde{W}_7 = \tilde{Z}_7 \otimes (\tilde{Z}_1 \oplus \tilde{Z}_2 \oplus \tilde{Z}_3)^{-1} = [0.06, 0.05, 0.1]$$

• غیرفازی کردن وزن اعداد فازای: پس از یافتن وزن های فازای مربوط به هر یک از پارامترها، تمامی اعداد با استفاده از رابطه (۲۸) به صورت غیرفازی تبدیل می شوند (Liu and Chen, 2007):

جدول ۷. درجه اهمیت معیارهای مؤثر بر قابلیت مکانیزاسیون

لایه‌های زغال‌سنگ

Criteria	Degree of importance
Seam inclination	0.3
Seam thickness	0.27
Seam uniformity	0.1
Seam extension	0.1
Roof quality	0.07
Floor quality	0.08
Water condition	0.07

$$\bar{W}_4 = 0.1, \bar{W}_5 = 0.07, \bar{W}_6 = 0.08, \bar{W}_7 = 0.07$$

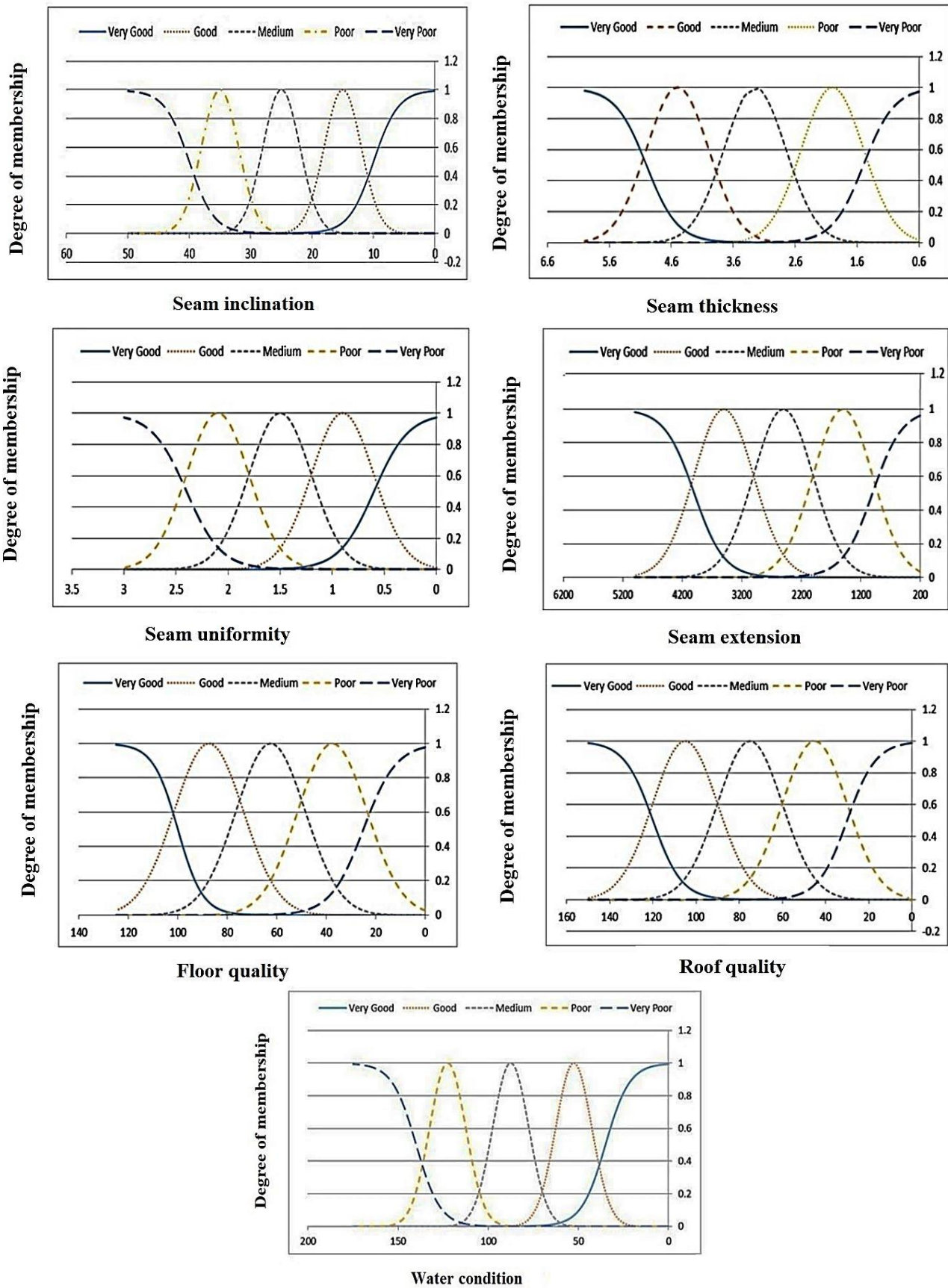
جدول (۷)، درجه اهمیت معیارهای مؤثر بر قابلیت مکانیزاسیون معادن زغال با استفاده از روش تحلیل سلسله مراتبی فازی دلفی نشان می‌دهد. گام بعدی، پس از تعیین درجه اهمیت معیارها، طبقه‌بندی معیارها در پنج رده متفاوت شامل خیلی خوب، خوب، متوسط، ضعیف و خیلی ضعیف است. نتایج مربوط به طبقه‌بندی معیارها در جدول (۸) ارائه شده است.

جدول ۸. طبقه‌بندی کمی و کیفی معیارهای مؤثر بر قابلیت مکانیزاسیون

Criteria	Quantitative and qualitative categories of criteria				
	0-10	10-20	20-30	30-40	40-50
Seam inclination	Flat	Low slope	Relatively inclined	Inclined	High slope
Seam thickness	0.6-1.5 Very thick	1.5-2.5 thick	2.5-4 thickly	4-5 Thin	5-6 Very thin
Seam uniformity	0-0.6 Totally uniform	0.6-1.2 Uniform	1.2-1.8 Relatively uniform	1.8-2.4 Non-uniform	2.4-3 Totally non-uniform
Seam extension	200-1000 Very small	1000-2000 Small	2000-3000 Medium	3000-4000 Large	4000 < Very large
Roof quality	0-30 Very poor Stability	30-60 Poor Stability	60-90 Medium Stability	90-120 Strong Stability	120 < Very strong Stability
Floor quality	0-25 Very poor	25-50 Poor	50-75 Relatively Stable	75-100 Stable	100 < Very Stable
Water condition	0-35 Dry	35-70 Wet	70-105 Very wet	105-140 With water content	140 < High water content

انجام مراحل فوق، توابع عضویت پنج رده‌ای برای تمامی معیارها بر اساس جدول (۸) تعریف شدند. توابع تعیین شده در جدول (۹) ارائه شده‌اند.

پس از تعیین رده‌های مربوط به هر معیار، برای هر یک از معیارها، یک تابع عضویت گائوسی یا سیگموئیدال تعریف شد. در شکل (۶) توابع عضویت گائوسی و سیگموئیدالی تعریف‌شده برای تمامی معیارها نشان داده شده است. پس از



شکل ۶. نمودار توابع عضویت معیارها

جدول ۹. توابع ارائه‌شده برای ارزیابی قابلیت مکانیزاسیون لایه‌های زغال

Qualitative category	Seam thickness	Seam inclination
Very weak	$Q_1^{(1)}(x) = \frac{1}{1 + \exp((4) \times (x - 1.5))}$	$Q_1^{(1)}(x) = \frac{1}{1 + \exp((-0.15) \times (x - 140))}$
Weak	$Q_1^{(2)}(x) = \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{x - 2}{0.5}\right)^2\right)$	$Q_1^{(2)}(x) = \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{x - 122.5}{10}\right)^2\right)$
Moderate	$Q_1^{(3)}(x) = \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{x - 3.25}{0.5}\right)^2\right)$	$Q_1^{(3)}(x) = \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{x - 87.5}{10}\right)^2\right)$
Strength	$Q_1^{(4)}(x) = \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{x - 4.5}{0.5}\right)^2\right)$	$Q_1^{(4)}(x) = \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{x - 52.5}{10}\right)^2\right)$
Very Strength	$Q_1^{(5)}(x) = \frac{1}{1 + \exp((-4) \times (x - 5))}$	$Q_1^{(5)}(x) = \frac{1}{1 + \exp((-0.15) \times (x - 35))}$

Qualitative category	Seam extension	Seam uniformity
Very weak	$Q_1^{(1)}(x) = \frac{1}{1 + \exp((0.004) \times (x - 1000))}$	$Q_1^{(1)}(x) = \frac{1}{1 + \exp((-6) \times (x - 2.4))}$
Weak	$Q_1^{(2)}(x) = \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{x - 1500}{500}\right)^2\right)$	$Q_1^{(2)}(x) = \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{x - 2.1}{0.3}\right)^2\right)$
Moderate	$Q_1^{(3)}(x) = \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{x - 2500}{500}\right)^2\right)$	$Q_1^{(3)}(x) = \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{x - 1.5}{0.3}\right)^2\right)$
Strength	$Q_1^{(4)}(x) = \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{x - 3500}{500}\right)^2\right)$	$Q_1^{(4)}(x) = \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{x - 0.9}{0.3}\right)^2\right)$
Very Strength	$Q_1^{(5)}(x) = \frac{1}{1 + \exp((-0.004) \times (x - 4000))}$	$Q_1^{(5)}(x) = \frac{1}{1 + \exp((6) \times (x - 0.6))}$

Qualitative category	Floor quality	Roof quality
Very weak	$Q_1^{(1)}(x) = \frac{1}{1 + \exp((0.15) \times (x - 25))}$	$Q_1^{(1)}(x) = \frac{1}{1 + \exp((-0.15) \times (x - 30))}$
Weak	$Q_1^{(2)}(x) = \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{x - 37.5}{14}\right)^2\right)$	$Q_1^{(2)}(x) = \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{x - 45}{15}\right)^2\right)$
Moderate	$Q_1^{(3)}(x) = \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{x - 62.5}{14}\right)^2\right)$	$Q_1^{(3)}(x) = \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{x - 75}{15}\right)^2\right)$
Strength	$Q_1^{(4)}(x) = \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{x - 87.5}{14}\right)^2\right)$	$Q_1^{(4)}(x) = \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{x - 105}{15}\right)^2\right)$
Very Strength	$Q_1^{(5)}(x) = \frac{1}{1 + \exp((-0.2) \times (x - 100))}$	$Q_1^{(5)}(x) = \frac{1}{1 + \exp((-0.15) \times (x - 120))}$

Qualitative category	Water condition
Very weak	$Q_1^{(1)}(x) = \frac{1}{1 + \exp((-0.15) \times (x - 140))}$
Weak	$Q_1^{(2)}(x) = \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{x - 122.5}{10}\right)^2\right)$
Moderate	$Q_1^{(3)}(x) = \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{x - 87.5}{10}\right)^2\right)$
Strength	$Q_1^{(4)}(x) = \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{x - 52.5}{10}\right)^2\right)$
Very Strength	$Q_1^{(5)}(x) = \frac{1}{1 + \exp((-0.15) \times (x - 35))}$

۱۲) و همچنین استفاده از عملگر دابویس و پرید به منظور ارزیابی قابلیت مکانیزاسیون لایه K11 معدن تخت، K5 معدن طزره و T معدن پروده طبس آورده شده‌اند. مطابق نتایج به‌دست‌آمده، لایه K11 معدن تخت، K5 معدن طزره و T معدن پروده طبس به ترتیب در رده کیفی متوسط، خیلی ضعیف و خوب از نظر قابلیت مکانیزاسیون قرار گرفتند.

گام بعدی پس از ایجاد سیستم طبقه‌بندی، ارزیابی این سیستم با استفاده از داده‌های به‌دست‌آمده از لایه‌های زغال‌سنگ طبس و حوضه البرز شرقی خواهد بود. اولین مرحله، تشکیل ماتریس فازی برای هر یک از لایه‌ها است. درایه‌های ماتریس فازی به‌صورت نمایش داده می‌شوند که هر درایه، نشان‌دهنده درجه عضویت معیار متناظر با در رده از درایه مذکور است. در ادامه، نمونه ماتریس‌های فازی (جدول ۱۰ تا

جدول ۱۰. ماتریس فازی لایه K11

Criteria	Mine data	Fuzzy matrix components				
		Very Poor (VP)	Poor (P)	Moderate (M)	Good (G)	Very Good (VG)
Seam inclination	26	0.0009	0.0111	0.9459	0.0012	0.0003
Seam thickness	1.2	0.7685	0.2780	0.0002	0	0
Seam uniformity	0.8	0	0	0.0657	0.9459	0.2314
Seam extension	7000	0	0	0	0	0.9999
Roof quality	417.7	0	0	0	0	1
Floor quality	83.4	0.0001	0.0046	0.3281	0.9580	0.0348
Water condition	4	0	0	0	0	0.9905

$$D = f(W, R) \dots [0.3, 0.27, 0.1, 0.07, 0.08, 0.1, 0.07] \begin{bmatrix} VP & P & M & G & VG \\ 0.0009 & 0.0111 & 0.9459 & 0.0012 & 0.0003 \\ 0.7685 & 0.2780 & 0.0002 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.0657 & 0.9459 & 0.2314 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0.0001 & 0.0046 & 0.3281 & 0.9580 & 0.0348 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0.9999 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0.9905 \end{bmatrix}$$

$$d_1(u) = ((1 - w_1)vr_{11}(u)) \wedge \dots \wedge ((1 - w_7)vr_{71}(u)) = 0.7$$

$$d_2(u) = ((1 - w_1)vr_{12}(u)) \wedge \dots \wedge ((1 - w_7)vr_{72}(u)) = 0.7$$

$$d_3(u) = ((1 - w_1)vr_{13}(u)) \wedge \dots \wedge ((1 - w_7)vr_{73}(u)) = 0.73$$

$$d_4(u) = ((1 - w_1)vr_{14}(u)) \wedge \dots \wedge ((1 - w_7)vr_{74}(u)) = 0.7$$

$$d_5(u) = ((1 - w_1)vr_{15}(u)) \wedge \dots \wedge ((1 - w_7)vr_{75}(u)) = 0.7$$

$$D = f(W, R) = (0.7, 0.7, \underline{0.73}, 0.7, 0.7)$$

جدول ۱۱. ماتریس فازی لایه K5

Criteria	Mine data	Fuzzy matrix components				
		Very Poor (VP)	Poor (P)	Moderate (M)	Good (G)	Very Good (VG)
Seam inclination	48	0.9820	0	0	0	0
Seam thickness	0.82	0.9381	0.0617	0	0	0
Seam uniformity	1.21	0.0007	0.0122	0.6267	0.5863	0.0250
Seam extension	3670	0	0	0	0.0647	0.2108
Roof quality	400.2	0	0	0	0	1
Floor quality	86.32	0.0001	0.0022	0.2351	0.9964	0.0608
Water condition	5	0	0	0	0	0.9890

$$D = f(W,R) \dots [0.3, 0.27, 0.1, 0.07, 0.08, 0.1, 0.07] O \begin{bmatrix} VP & P & M & G & VG \\ 0.9820 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0.9381 & 0.0617 & 0 & 0 & 0 \\ 0.0007 & 0.0122 & 0.6267 & 0.5863 & 0.0250 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0.0001 & 0.0022 & 0.2351 & 0.9964 & 0.0608 \\ 0 & 0 & 0.0647 & 0.9438 & 0.2108 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0.9890 \end{bmatrix}$$

$$d_1(u) = ((1 - w_1)vr_{11}(u)) \wedge \dots \wedge ((1 - w_7)vr_{71}(u)) = 0.9$$

$$d_2(u) = ((1 - w_1)vr_{12}(u)) \wedge \dots \wedge ((1 - w_7)vr_{72}(u)) = 0.7$$

$$d_3(u) = ((1 - w_1)vr_{13}(u)) \wedge \dots \wedge ((1 - w_7)vr_{73}(u)) = 0.7$$

$$d_4(u) = ((1 - w_1)vr_{14}(u)) \wedge \dots \wedge ((1 - w_7)vr_{74}(u)) = 0.7$$

$$d_5(u) = ((1 - w_1)vr_{15}(u)) \wedge \dots \wedge ((1 - w_7)vr_{75}(u)) = 0.7$$

$$D = f(W,R) = (\underline{0.9}, 0.7, 0.7, 0.7, 0.7)$$

جدول ۱۲. ماتریس فازی لایه T

Criteria	Mine data	Fuzzy matrix components				
		Very Poor (VP)	Poor (P)	Moderate (M)	Good (G)	Very Good (VG)
Seam inclination	16	0	0	0.0111	0.9459	0.0474
Seam thickness	1.8	0.2314	0.9231	0.0149	0	0
Seam uniformity	0.75	0	0	0.0439	0.8824	0.2890
Seam extension	2700	0.0011	0.0561	0.9231	0.2780	0.0054
Roof quality	95	0	0.0038	0.4111	0.8007	0.0229
Floor quality	80	0.0002	0.0099	0.4578	0.8663	0.0179
Water condition	100	0.0024	0.0795	0.4578	0	0

$$D = f(W,R) \dots [0.3, 0.27, 0.1, 0.07, 0.08, 0.1, 0.07] O \begin{bmatrix} VP & P & M & G & VG \\ 0 & 0 & 0.0111 & 0.9459 & 0.0474 \\ 0.2314 & 0.9231 & 0.0149 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.0439 & 0.8824 & 0.2890 \\ 0 & 0.0038 & 0.4111 & 0.8007 & 0.0229 \\ 0.0002 & 0.0099 & 0.4578 & 0.8663 & 0.0179 \\ 0.0011 & 0.0561 & 0.9231 & 0.2780 & 0.0054 \\ 0.0024 & 0.0795 & 0.4578 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$d_1(u) = ((1 - w_1)vr_{11}(u)) \wedge \dots \wedge ((1 - w_7)vr_{71}(u)) = 0.7$$

$$d_2(u) = ((1 - w_1)vr_{12}(u)) \wedge \dots \wedge ((1 - w_7)vr_{72}(u)) = 0.7$$

$$d_3(u) = ((1 - w_1)vr_{13}(u)) \wedge \dots \wedge ((1 - w_7)vr_{73}(u)) = 0.7$$

$$d_4(u) = ((1 - w_1)vr_{14}(u)) \wedge \dots \wedge ((1 - w_7)vr_{74}(u)) = 0.73$$

$$d_5(u) = ((1 - w_1)vr_{15}(u)) \wedge \dots \wedge ((1 - w_7)vr_{75}(u)) = 0.7$$

$$D = f(W,R) = (0.7, 0.7, 0.7, \underline{0.73}, 0.7)$$

لایه‌های مورد مطالعه با لحاظ کردن درجه اهمیت این شاخص‌های ژئومکانیکی است، ولی سایر لایه‌های زغالی که شامل تمامی لایه‌های منطقه طزره و دیگر لایه‌های معدن تخت هستند، رده‌های کیفی ضعیف و خیلی ضعیف را به خود اختصاص دادند. تمامی لایه‌های مورد مطالعه در حال استخراج هستند. از بین این لایه‌ها، لایه T معدن پروده طبس به‌صورت تماماً مکانیزه و سایر لایه‌ها به‌صورت سنتی استخراج می‌شوند که این امر، نشان‌دهنده تطابق نتایج حاصل

نتایج به‌دست‌آمده برای ۱۷ کارگاه زغال‌سنگ مورد مطالعه با شرایط متفاوت ژئومکانیکی، با استفاده از عملگر دابویس و پرید، به منظور ارزیابی نتایج سیستم طبقه‌بندی فازی در جدول (۱۳) ارائه شده است.

مطابق این نتایج، لایه T معدن پروده طبس رده کیفی خوب و K11 معدن تخت، رده کیفی متوسط از نظر قابلیت مکانیزاسیون را به خود اختصاص دادند. دلیل این امر پایین بودن شیب و ضخامت نسبتاً بالای این لایه‌ها نسبت به سایر

از این سیستم طبقه‌بندی با رفتار واقعی لایه‌های مورد مطالعه است.

جدول ۱۳. نتایج طبقه‌بندی فازی برای لایه‌های مورد مطالعه

Mine	Seam	Qualitative Index	
Tabas	T	Good	
	Takht	K8	Poor
		K10	Very Poor
		K11	Moderate
		K17	Very Poor
		K19	Very Poor
	Tazareh	K20	Very Poor
		P1	Very Poor
		P3	Poor
		P10	Very Poor
K5		Very Poor	
Tazareh	K6	Poor	
	K8b	Very Poor	
	K10b	Very Poor	
	K14	Very Poor	
	K19U	Poor	
Tazareh	K19L	Poor	

۶. نتیجه‌گیری

در این پژوهش، پس از ایجاد سیستم طبقه‌بندی، قابلیت مکانیزاسیون لایه‌های زغالی با استفاده از داده‌های به‌دست‌آمده از لایه‌های زغال‌سنگ طبس و معادن حوضه البرز شرقی با تشکیل ماتریس فازی و با بهره‌گیری از عملگر فازی دابویس و پرید مورد ارزیابی قرار گرفتند. مطابق نتایج به‌دست‌آمده، لایه T معدن پروده طبس، رده کیفی خوب و K11 معدن تخت، رده کیفی متوسط از نظر قابلیت مکانیزاسیون را به خود

منابع

- آقاباتی، س.ع. ۱۳۸۳. زمین‌شناسی ایران. تهران: سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور. ۶۴۰ص.
- حسینی، ه.، میکائیل، ر.، حسینی، ع.، ا.، عطایی، م. ۱۳۹۱. ارائه یک اندیس جدید به منظور ارزیابی قابلیت مکانیزاسیون لایه‌های زغالی معدن زغال‌سنگ طزره. فصلنامه زمین‌شناسی کاربردی، ۸(۱): ۱۹-۲۵.
- خرقانی، م.، دهرآزما، ب.، سرقینی، ج.، رحیمی، م. ۱۳۸۹. ارزیابی مقایسه‌ای تأثیرگذاری معادن زغال‌سنگ طزره و تخت بر کسفیت و توزیع غلظت عناصر B و Br در منابع آبی منطقه. کنگره بین‌المللی معدن. تهران. خانه معدن ایران.
- دفتر فنی شرکت البرز شرقی. ۱۳۸۰. طرح اکتشاف و تجهیز معادن زغال‌سنگ.
- دفتر فنی معدن پروده طبس. ۱۳۷۶. گزارش عملیات اکتشاف ناحیه‌ی زغال‌دار پروده (اطلاعات کلی).

اختصاص دادند. سایر لایه‌های زغالی که شامل تمامی لایه‌های منطقه طزره و دیگر لایه‌های معدن تخت هستند، رده‌های کیفی ضعیف و خیلی ضعیف را به خود اختصاص دادند. تمامی لایه‌های مورد مطالعه در حال استخراج هستند. از میان لایه‌های مورد مطالعه، لایه T معدن پروده طبس به صورت تماماً مکانیزه و سایر لایه‌ها به صورت سنتی استخراج می‌شوند که این امر، نشان‌دهنده تطابق نتایج حاصل از این سیستم طبقه‌بندی با رفتار واقعی لایه‌های مورد مطالعه است. در مورد لایه K11 منطقه تخت که رده کیفی متوسط را به خود اختصاص داده، بهتر است به جای روش سنتی، از روش نیمه‌مکانیزه و از رنده به‌عنوان ابزار برنده به منظور استخراج زغال‌سنگ استفاده شود. سیستم طبقه‌بندی ارائه‌شده فقط با توجه به پارامترهای فنی به دست آمده است و عوامل اقتصادی در این سیستم طبقه‌بندی در نظر گرفته نشده‌اند. بنابراین لازم است که پس از محاسبه قابلیت مکانیزاسیون لایه‌های زغال‌سنگ، لایه‌هایی که با توجه به سیستم طبقه‌بندی ارائه‌شده قابلیت مکانیزاسیون قابل قبولی دارند، از نظر اقتصادی نیز مورد مطالعه و ارزیابی قرار گیرند.

- رجب‌زاده، م.ع، قربانی، ز.، جلالی‌فرد، م.، محمدزاده، م. ۱۳۹۶. ژئوشیمی و ارزیابی فرآوری عناصر سمی در زغال‌سنگ پروده، طیس. علوم زمین، ۲۴(۹۶): ۱۷۷-۱۸۸.
- رضوی ارمغانی، م.ب.، معین‌السادات، ح. ۱۳۷۲. زمین‌شناسی ایران (زغال‌سنگ). تهران: انتشارات سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور. ۲۸۶ص.
- سرشکی، ف.، واعظیان، ا.، صفاری، ا. ۱۳۹۵. بررسی تأثیر ماسرال‌ها در نفوذپذیری زغال‌سنگ‌های معادن پروده و طزره. پژوهش‌های چینه‌نگاری و رسوب‌شناسی، ۳۲(۶۳): ۲۳-۳۴.
- عطایی، م. ۱۳۹۰. معدن‌کاری زیرزمینی. شاهرود: دانشگاه صنعتی شاهرود. جلد دوم. ۳۶۷ص.
- عرب عامری، م.، میرزایی، ح.، مزرعه‌لی، م. ۱۳۹۵. بررسی تأثیر مقیاس بر مقاومت توده سنگ درزه دار - مطالعه موردی معدن زغال سنگ طزره. سومین کنگره ملی زغال سنگ ایران.
- قادرنژاد، ص.، لله‌گانی، س.، رجعتی، م.ح. ۱۳۹۵. رده‌بندی و قابلیت مکانیزاسیون کارگاه‌های معدن زغال‌سنگ طزره با استفاده از روش تحلیل سلسله مراتبی. سومین کنگره ملی زغال‌سنگ ایران. دانشگاه صنعتی شاهرود. شاهرود. ایران.
- Ataei, M., Khalokakaei, R., Hossieni, M. 2009. Determination of coal mine mechanization using fuzzy logic. *Mining Science and Technology (China)*, 19(2): 149–154.
- 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.
- 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.
- Bellman, R.E., Zadeh, L.A. 1970. Decision-making in a fuzzy environment. *Management science*, 17(4): B-141.
- Dubois, D., Prade, H. 1980. New results about properties and semantics of fuzzy set-theoretic operators. In *Fuzzy Sets*. Boston, MA: Springer. 59-75pp.
- Ghadernejad, S., Jafarpour, A., Ahmadi, P. 2019. Application of an integrated decision-making approach based on FDAHP and PROMETHEE for selection of optimal coal seam for mechanization; A case study of the Tazareh coal mine complex, Iran. *International Journal of Mining and Geo-Engineering*, (53)1: 15-23. DOI: 10.22059/ijmge.2018.255070.594727.
- Hattingh, T., S., Sheer, T., J., Du Plessis, A., G. 2010. Human factors in mine mechanization. In *The 4th International Platinum Conference, Platinum in transition 'Boom or Bust'*. The Southern African Institute of Mining and Metallurgy. 255-258.
- Hayaty, M., Tavakoli Mohammadi, M.R., Rezaei, A., Shayestehfar, M.R. 2014. Risk assessment and the ranking of metals using FDAHP and TOPSIS. *Mine Water and the Environment*, 33(2):157–164. DOI: 10.1007/s10230-014-0263-y.
- Hoseinie, S., Ataei, M., Osanloo, M. 2009. A new classification system for evaluating rock penetrability. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences* 46(8): 1329-1340. Doi: 10.1016/j.ijrmmms.2009.07.002.
- Hosseini, S.M., Mikaeil, R., Ataei, M., Khalokakaei, R., Akhyani, M. 2013. Development a new classification for assessing the coal mine mechanization. *Archives of Mining Sciences* 58(1): 217–226. DOI: 10.2478/amsc-2013-0015.
- Hosseini, S., A., Ataei, M., Hosseini, M., Akhani, M. 2012. Application of fuzzy logic for determining of coal mine mechanization”, *Journal of Coal Science & Engineering*, 18(3): 225-231.
- Jang, J.S.R, Sun, C.T. 1997. *Neuro-Fuzzy and soft computing, a computational approach to learning and machine intelligence*. Prentice-Hall. Inc. pp. 24-30.

- Kaymak, U. 1998. Fuzzy decision making with control applications. PhD Thesis, Delft University of Technology, Netherlands.
- Li, H.X., Yen, V.C. 1995. Fuzzy sets and fuzzy decision making. CRC Press. 347pp.
- Liu, Y.C., Chen, C.S. 2007. A new approach for application of rock mass classification on rock slope stability assessment. *Engineering geology*. 89(1-2): 129-43. Doi:10.1016/j.enggeo.2006.09.017.
- Mikaeil, R., Ozcelik, Y., Ataei, M., Yousefi, R. 2013. Ranking the sawability of ornamental stone using Fuzzy Delphi and multi-criteria decision-making techniques. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences* 58: 118-126. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2012.09.002.
- Ozfirat., M., K. 2012. A fuzzy Method for selection Underground Coal Mining Method Considering Mechanization Criteria. *Journal of Mining Science*. 48(3): 533-544.
- Piegat, A. 2001. Fuzzy Modeling and Control (Studies in Fuzziness and Soft Computing). Physica. 742pp.
- Qiu, M., Shi, L., Teng, C., Zhou, Y. 2016. Assessment of water inrush risk using the Fuzzy Delphi Analytic Hierarchy Process and Grey Relational Analysis in the Liangzhuang coal mine-China. *Mine Water and the Environment*. 48(3): 533-544. DOI: 10.1007/s10230-016-0391-7.
- Saaty, T.L. 1994. How to make a decision: The analytic Hierarchy process. *Institute of Operation Research and the Management Sciences*. 24(6): 19-43. DOI: 10.1287/inte.24.6.19.
- Shariat Nia, H. 1993. Geological characteristics of the Parvadeh region of the Tabas coal – bearing basine, Central, Iran. Unpublished Text. 22pp.
- Sousa, J.M., Kaymak, U., 2002. Fuzzy decision making in modeling and control. World Scientific. Vol. 27. 315pp.
- Stefanko, R., Bise, C. 1983. Coal mining technology: Theory and Practice. Society for Mining Metallurgy. 410 pp.
- 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.
- Unrug, K., Szwilski, T.B. 1982. Method of Roof quality prediction. *State-of-the-Art of Ground Control in Longwall Mining and Mining Subsidence*. 17pp.
- Walsh., J.J., Watterson, J., 1994, New methods of fault projection for coalmine planning. *Proceedings of the Yorkshire Geological Society*. 48(2): 209-219.
- Wang., J., Jiao., S., Cheng., G. 2011. Fully mechanized coal mining technology for thin coal seam under complicated geological conditions. *Energy Exploration & Exploitation*. 29(2): 169-177.
- Yager, R.R. 1978. Fuzzy decision making including unequal objectives. *Fuzzy Sets and Systems*. 1(2): 87-95.
- Yager, R.R., 1980. On a general class of fuzzy connectives. *Fuzzy Sets and Systems*. 4(3): 235-242.
- Zadeh, L.A. 1965. Fuzzy Sets. *Inform and Control* 8(3)338-353. DOI: 10.1016/S0019-9958(65)90241-X.
- Zadeh, L.A. 1978. Fuzzy sets as a basis for a theory of possibility. *Fuzzy sets and systems*. 1(1): 3-28.