

DOI: 10.30479/jmre.2019.10201.1238

ارزیابی معیارهای اثرگذار بر متان‌زدایی معادن زیرزمینی زغال‌سنگ با مدلسازی ساختاری تفسیری

امیر جعفرپور^۱، مهدی نجفی^{۲*}

۱- دانشجوی دکترا، دانشکده مهندسی معدن و متالورژی، دانشگاه یزد، یزد

۲- دانشیار، دانشکده مهندسی معدن و متالورژی، دانشگاه یزد، یزد

(دریافت ۱۳۹۷/۱۲/۱۱، پذیرش ۱۳۹۸/۰۶/۱۶)

چکیده

متان‌زدایی پیش از عملیات استخراج و در حین استخراج معدن، راهبرد زیست‌سازگاری است که جایگاه ویژه‌ای در صنعت زغال‌سنگ یافته است. عوامل و معیارهای مختلفی بر بازدهی عملیات متان‌زدایی اثرگذارند. بررسی رابطه میان این عوامل و نحوه اثرگذاری آن‌ها بر روند فرآیند گاززدایی متان، امر بسیار مهمی است که تاکنون کمتر مورد توجه قرار گرفته است. در این پژوهش، معیارهایی که بیشترین تاثیر را بر بازدهی عملیات گاززدایی دارند، مشخص شدند. سپس با به‌کارگیری روش مدلسازی ساختاری تفسیری (ISM)، این معیارها در سطوح مختلفی رتبه‌بندی شدند. نتایج این پژوهش حاکی از آن است که رتبه زغال‌سنگ و پارامترهای ژئومکانیکی، معیارهای فنی مربوط به حفاری چال‌ها و نیز ساختار زمین‌شناسی روباره لایه با داشتن حداکثر میزان اثرگذاری بر فرآیند گاززدایی متان معادن زیرزمینی زغال‌سنگ در سطح اول قرار گرفته‌اند. هزینه‌های سرمایه‌ای و عملیاتی مربوط به فرآیند متان‌زدایی نیز با قرارگیری در سطح پنجم مدل، کمترین اثرگذاری را بر متان‌زدایی دارند. در نهایت، با ترسیم نمودار تجزیه و تحلیل قدرت نفوذ و وابستگی (MICMAC) و بررسی آن، دسته‌بندی هر یک از معیارها بر اساس میزان نفوذ و وابستگی انجام شده است. با توجه به نظرات خبرگان در خصوص نتایج حاصل از پژوهش و سازگاری نتایج با شرایط واقعی، صحت نتایج پس از اعتبارسنجی توسط خبرگان و قابلیت رویکرد ISM مورد تایید بوده است و می‌توان از نتایج این پژوهش در راستای اهداف مدیریتی و بهینه‌سازی فرآیند متان‌زدایی معادن زیرزمینی زغال‌سنگ بهره گرفت.

کلمات کلیدی

متان‌زدایی از معادن زغال‌سنگ (CMM)، مدلسازی ساختاری تفسیری، متان معادن زغال‌سنگ (CBM).

* نویسنده مسئول و عهده دار مکاتبات Email: mehdinajafi@yazd.ac.ir

۱- مقدمه

و همچنین تولید گاز متان افزایش می‌یابد. بنابراین تولید موثر از لایه‌های زغالی به پایش تغییرات تخلخل، نفوذپذیری و تراکم‌پذیری زغال‌سنگ در طول زمان تولید نیاز دارد [۴]. شرایط زمین‌شناسی و استخراجی مختلف در حوضه‌های زغالی سراسر دنیا باعث ایجاد روش‌های متان‌زدایی متعددی شده است. به طور معمول، این روش‌ها به دو دسته کلی متان‌زدایی قبل از استخراج (CBM) و متان‌زدایی حین استخراج (CMM) تقسیم می‌شوند. هر کدام از این روش‌ها، مزایا و معایب مربوط به خود را دارند. در انجام یک پروژه گاززدایی، با بررسی تمامی پارامترهای موثر و ارزیابی فنی-اقتصادی باید یکی از روش‌های گاززدایی یا ترکیبی از آن‌ها را به کار برد [۱۱،۱۰]. همچنین پارامترها و عوامل مختلفی بر کارایی فرآیند متان‌زدایی اثرگذار است و تاکنون پژوهش‌چندانی در راستای ارزیابی و سطح‌بندی معیارهای مختلف اثرگذار بر کارایی فرآیند گاززدایی متان از معادن زغال‌سنگ انجام نگرفته است. در این پژوهش، با توجه به تحقیقات انجام شده و نیز با در نظر گرفتن شرایط واقعی اجرای عملیات متان‌زدایی، تاثیر پارامترهای مختلف زمین‌شناسی، ژئومکانیکی و اجرایی-عملیاتی بر یکدیگر و نیز طبقه‌بندی آن‌ها بر اساس ارتباطات داخلی موجود فیما بین معیارهای مختلف مورد تحلیل و ارزیابی قرار گرفته است.

ساختار مقاله بدین شرح است که در بخش دوم، پیشینه پژوهش مورد بررسی قرار گرفته و در بخش سوم، روش‌شناسی پژوهش حاضر تشریح شده است که اصول بنیادین مدلسازی ساختاری تفسیری و مراحل اجرای محاسبات مربوط به آن را شامل می‌شود. عوامل اثرگذار در فرآیند متان‌زدایی در بخش چهارم مورد بررسی قرار گرفته و سطح‌بندی معیارهای اثرگذار با رویکرد مدلسازی ساختاری تفسیری در بخش پنجم انجام شده است. بحث و تحلیل در بخش ششم و نتیجه‌گیری پژوهش در بخش هفتم ارائه شده است.

۲- پیشینه پژوهش

در سال‌های اخیر، تحقیقات ارزنده‌ای در خصوص متان‌زدایی معادن زغال‌سنگ انجام شده است که در ادامه برخی از آن‌ها به اختصار مورد بررسی قرار می‌گیرد. لوباک و همکاران، ویژگی‌ها و منشا کلیت‌های زغال‌سنگ را به عنوان مهم‌ترین پارامتر اثرگذار در گاززدایی متان مورد ارزیابی قرار دادند [۱۲]. لاکسمینرایانا و کراسدال نیز نقش نوع زغال‌سنگ و رتبه‌بندی آن بر ویژگی‌های جذب متان

متان، مهم‌ترین گاز آلاینده در معادن زیرزمینی زغال‌سنگ محسوب می‌شود. اگر چه این گاز در زغال‌سنگ یا سایر سنگ‌های کربن‌دار یافت می‌شود ولی در برخی معادن غیرزغالی (پتاس، آهک و نمک) نیز وجود دارد. همچنین مقدار جزئی از متان در برخی از معادن فلزی (آهن، مس، طلا و نقره) نیز گزارش شده است [۱]. انفجار گاز متان از خطرات بالقوه در معادن زغال‌سنگ است که هر سال تلفات جانی زیادی در معادن زغال‌سنگ سراسر دنیا به همراه دارد [۳،۲]. با توجه به حجم بالای گاز آزاد شده در بعضی از لایه‌های زغال‌سنگ، تهویه معدن به تنهایی نمی‌تواند محیطی ایمن برای استخراج زغال‌سنگ ایجاد کند؛ بنابراین متان‌زدایی قبل از استخراج یا حین استخراج امری ضروری است [۴]. از سوی دیگر، افزایش تقاضای انرژی و کاهش سریع منابع آن در جهان، باعث شده است تا تولید انرژی از مخازن هیدروکربنی غیرمتعارف (مانند مخازن زغال‌سنگ) از نظر اقتصادی مقرون به صرفه باشد [۵]. افزایش قیمت گاز در دهه‌های اخیر نیز از دیگر عوامل تاثیرگذار در جلب توجه کشورهای توسعه یافته برای گاززدایی از مخازن زغال‌سنگ بوده است. در حال حاضر نیز گاز متان به عنوان سوختی پاک نسبت به منابع انرژی هیدروکربنی مطرح است؛ بنابراین تولید گاز از نظر زیست‌محیطی نیز نسبت به نفت و زغال‌سنگ برتری دارد. از این رو، اکتشاف و زهکشی متان از مخازن زغال‌سنگ از چندین دهه پیش در برخی از کشورها (به ویژه در ایالات متحده و استرالیا) شروع شده است [۶].

متان‌زدایی به عمل اکتشاف، استخراج، انتقال و بیرون کشیدن گاز موجود در لایه‌های زغالی و لایه‌های اطراف آن از طریق چاه و خطوط لوله انتقال گفته می‌شود [۸،۷]. گاز متان موجود در لایه‌های زغال‌سنگ در روش‌های سنتی استخراج زغال‌سنگ هدر می‌رود که با استفاده از روش‌های گاززدایی می‌توان آن را بازیابی کرد. با این کار، علاوه بر کاهش خطرات ناشی از استخراج زیرزمینی زغال‌سنگ، می‌توان هزینه‌های مربوط به تهویه معدن را کاهش داد و اثرات مخرب زیست‌محیطی استخراج زغال‌سنگ (مانند انتشار گازهای گلخانه‌ای و آلودگی آب‌های سطحی) را نیز از بین برد [۹]. در زمان تولید گاز و آگیری از لایه‌های زغال‌سنگ، خواص پتروفیزیکی آن با تغییر فشار داخل خلل و فرج تغییر می‌کند، به نحوی که بر خلاف مخازن هیدروکربنی متعارف، تا مدت زمانی با افزایش تولید، میزان تولید آب کمتر می‌شود

که شامل شرایط زمین‌شناسی، شرایط منبع گاز، عمق لایه زغال، نفوذپذیری لایه، گرادیان فشار منبع و درجه گازخیزی است [۲۳]. رودریگز و همکاران، سیستم کلیت زغال‌سنگ را با رویکردی جدید و نگرشی بر فرآیند گاززدایی متان مورد مطالعه قرار دادند [۲۴]. کاراکان و همکاران، به شبیه‌سازی ذخیره زغال‌سنگ با تحقق ویژگی‌های زمین‌آماری برای هماهنگ‌سازی تولید هم‌زمان چند ساله گاز متان پرداختند. این پژوهشگران در قالب یک مطالعه موردی، حوضه ایلینویز (واقع در ایندیانا ایالات متحده) را بررسی کردند و الگوی مناسب آرایش چال‌ها را برای افزایش کارایی گاززدایی متان مورد تحلیل قرار دادند [۲۵]. همچنین گانگ و همکاران در پژوهشی دیگر، رویکردی نوین در مدلسازی گاززدایی متان ارائه کردند که ویژگی‌های شکستگی‌های گسسته مورد بررسی قرار گرفته و شبیه‌سازی ژئوشیمیایی در این خصوص انجام شده است [۲۶]. ژانگ و همکاران نیز یک مدل تحلیلی از پایداری چال‌های زغال‌سنگ ارائه کردند که بر مبنای تعادل حد بلوک و با توجه به توزیع نامنظم کلیت‌ها بود [۲۷]. تانگ و همکاران مشخصات و مکانیزم‌های کنترل تغییر نفوذپذیری گاززدایی متان را در مراحل مختلف تولید گاز بررسی کردند. این پژوهشگران با در نظر گرفتن پارامترهای مختلفی، اثرگذاری آن‌ها را در فرآیند گاززدایی تحلیل کردند. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که قابلیت کنترل تغییر نفوذپذیری در مراحل مختلف تولید بر اساس پنج معیار تنوع روند نفوذپذیری، مکانیزم کنترل، انرژی سیستم، ترکیبات حالت فاز و عملکرد تولید گاز متان به دست می‌آید [۲۸]. ژائو و همکاران نیز شاخص‌های تولید بالا و عوامل کلیدی در تولید گاز متان از معادن زغال‌سنگ را مورد ارزیابی قرار دادند. این شاخص‌ها شامل عمق لایه، ضخامت، فشار داخلی منبع گاز، محتوای گاز، نفوذپذیری و شکستگی هیدرولیکی است [۲۹]. در مطالعه‌ای دیگر، ژین و همکاران با استفاده از پارامترهای تاثیرگذار در فرآیند گاززدایی متان، به طراحی الگوی چال و بهینه‌سازی گسترش آن‌ها پرداختند. این پژوهشگران با در نظر گرفتن ساختار فرآیند گاززدایی، عمق و ضخامت لایه، ساختار سنگ‌شناسی سقف و کف، محتوای گاز و شرایط هیدرولوژی و هیدروژئولوژی، اقدام به طراحی بهینه الگوی چال‌های زهکشی گاز متان کردند [۳۰]. همچنین لی و ژانگ به بهینه‌سازی نوع چال زهکشی گاز متان بر اساس هزینه‌های فنی واحد پرداختند و پارامترهای اثرگذار بر میزان گاز تولید شده را بررسی کردند [۳۱]. ژو و همکاران نیز طراحی بهینه‌سازی شبیه‌سازی شبکه

در لایه زغال‌سنگ حوضه زغالی بوئن (واقع در استرالیا) را بررسی کردند [۱۳]. در پژوهشی دیگر، کاراکان به پیش‌بینی عملکرد تولید چاه تهویه در گاززدایی متان پرداخته است و با استفاده از محاسبات هوشمند، بهینه‌سازی کنترل متان را در معادنی که به روش جبهه‌کار بلند استخراج می‌شوند، انجام داد [۱۴]. گنتزیس نیز به تجزیه و تحلیل ثبات چال‌های زهکشی متان در محدوده بریتیش کلمبیا (واقع در کانادا) پرداخت. در این پژوهش، پارامترهای زمین‌شناسی و ژئومکانیکی، وضعیت تنش‌های منطقه و مشخصات مکانیکی لایه‌ها به عنوان عوامل اثرگذار در متان‌زدایی در نظر گرفته شده است [۱۵]. حمزه و همکاران نیز عوامل موثر بر میزان گاز متان در زهکشی‌های مربوط به بخش چک در بالای حوضه سیلسیا (واقع در جمهوری چک) را مورد ارزیابی قرار دادند [۱۶].

سانگ و همکاران به بررسی اثرگذاری پارامترهای زمین‌شناسی بر میزان تولید گاز متان در معادن زغال‌سنگ پرداختند [۱۷]. هانگ و همکاران، مکان بهینه چال‌های سطحی برای گاززدایی متان در مناطق معدنی را بررسی کردند. این محققان، پارامترهای مرتبط با چال‌زنی، الگوی حفاری و مشخصات چال‌ها را به عنوان مهم‌ترین پارامترهای فرآیند گاززدایی در نظر گرفته و به بهینه‌سازی مکان مناسب حفاری چال‌های زهکشی متان پرداختند [۱۸]. کاراکان و همکاران به بررسی گاززدایی متان از معادن زغال‌سنگ پرداخته و مطالعات پیشین را با دیدگاه ایمنی و کاهش گازهای گلخانه‌ای مضر مورد ارزیابی قرار دادند [۱۹]. پائول و چاترچی نیز با تعیین جهت تنش در جهت‌یافتگی کلیت‌ها، اقدام به اکتشاف منابع متان در یک معدن زغال‌سنگ واقع در هند کردند [۱۹]. همچنین کایم و همکاران یک مطالعه عددی در مورد بهینه‌سازی الگوهای گاززدایی برای تولید متان در یک معدن زغال‌سنگ در چین انجام دادند. این پژوهشگران با استفاده از پارامترهایی مانند عمق، ضخامت لایه زغال‌سنگ، اشباع آب، تخلخل شکستگی‌ها، محتوای گاز و فاصله‌داری کلیت‌ها به بهینه‌سازی فرآیند گاززدایی پرداختند [۲۰]. لیو و همکاران نیز تاثیر شرایط زمین‌شناسی بر توزیع گاز متان و اقدامات کنترلی را مورد تحلیل قرار دادند [۲۱]. مور نیز مروری بر گاز متان لایه‌های زغالی داشته و پارامترهای اثرگذار در تولید و حجم آن را مورد بررسی قرار داده است [۲۲].

چین و همکاران با در نظر گرفتن معیارهای اثرگذار بر فرآیند گاززدایی متان، به بهینه‌سازی شاخص‌های ارزیابی متان‌زدایی در یک حوضه زغالی واقع در چین پرداختند

این روش در هفت گام زیر خلاصه شده است:

- تعیین نوع رابطه محتوایی بین معیارها

رابطه محتوایی (زمینه‌ای) بین معیارها ممکن است از نوع تقدم، تاخر و یا تاثیرگذاری باشد. هر یک از معیارهای شناسایی شده ممکن است بر معیارهای دیگر اثرگذار باشد. بدین منظور باید پرسش‌نامه‌هایی تهیه شده و برای اعلام نظر در اختیار خبرگان قرار گیرد.

- ایجاد ماتریس خودتعاملی ساختاری (SSIM)

خبرگان شرکت‌کننده در فرآیند ISM، در پاسخ به پرسش‌نامه‌ها برای تعیین روابط بین معیارها و برای تهیه خودتعاملی ساختاری لازم است، وابستگی تمام عناصر را شناسایی کنند و به صورت دو به دو مورد بررسی قرار دهند. بدین منظور، از چهار نماد به شرح زیر استفاده می‌شود:

V برای نشان دادن تاثیر یک طرفه (معیار i به معیار j منجر می‌شود).

A برای نشان دادن تاثیر یک طرفه (معیار j به معیار i منجر می‌شود).

X برای نشان دادن تاثیر دو طرفه

O برای نشان دادن عدم رابطه میان دو معیار

- به دست آوردن ماتریس دست‌یابی

با تبدیل نمادهای روابط ماتریس SSIM و برای به دست آوردن ماتریس دست‌یابی باید نمادهای فوق به صفر و یک تبدیل شوند. بر حسب قواعد زیر می‌توان به ماتریس مورد نظر دست پیدا کرد [۳۵]:

الف- اگر درایه (i,j) در ماتریس خودتعاملی ساختاری نماد V گرفته است، درایه مربوطه در ماتریس دست‌یابی عدد یک می‌گیرد و درایه قرینه آن یعنی (j,i) عدد صفر می‌گیرد.

ب- اگر درایه (i,j) در ماتریس خودتعاملی ساختاری نماد A گرفته است، درایه مربوطه در ماتریس دست‌یابی عدد صفر می‌گیرد و درایه قرینه آن یعنی (j,i) عدد یک می‌گیرد.

پ- اگر درایه (i,j) در ماتریس خودتعاملی ساختاری نماد X گرفته است، درایه مربوطه در ماتریس دست‌یابی عدد یک می‌گیرد و درایه قرینه آن یعنی (j,i) هم عدد یک می‌گیرد.

ت- اگر درایه (i,j) در ماتریس خودتعاملی ساختاری نماد O گرفته است، درایه مربوطه در ماتریس دست‌یابی عدد صفر می‌گیرد و درایه قرینه آن یعنی (j,i) هم عدد صفر می‌گیرد.

پس از به دست آوردن ماتریس دست‌یابی اولیه با در نظر گرفتن خاصیت انتقال‌پذیری، اگر چنانچه (j,i) با هم در ارتباط باشد و نیز (j,k) با هم ارتباط داشته باشند؛ آنگاه (i,k) با هم

انتقال گاز متان از معدن را بر اساس پارامترهای مختلف فنی و مهندسی انجام دادند [۳۲]. با توجه به مطالب فوق، مشخص است که تاکنون در خصوص ارزیابی و سطح‌بندی عوامل اثرگذار بر فرآیند متان‌زدایی، پژوهش‌چندانی انجام نگرفته است. بنابراین ضرورت انجام پژوهشی در این خصوص بسیار روشن بوده و پژوهش در این راستا انجام شده است.

۳- روش‌شناسی پژوهش

همان‌طور که بیان شد، تاکنون تحقیقی در مورد رتبه‌بندی معیارهای مختلف اثرگذار بر فرآیند گاززدایی از معادن زغال‌سنگ انجام نشده است. در این پژوهش، از رویکرد مدلسازی ساختاری تفسیری (ISM) برای بررسی اثرگذاری معیارهای مختلف طبیعی و محیطی بر کارایی فرآیند متان‌زدایی بهره گرفته شده است. بدین منظور، در گام نخست، مطالعات پیشین انجام شده در خصوص شناسایی عوامل موثر در متان‌زدایی معادن زیرزمینی زغال‌سنگ مورد بررسی قرار گرفته و سپس پرسش‌نامه‌هایی تهیه شده و در اختیار خبرگان قرار داده شده است. آرا و نظرات خبرگان، پس از بررسی‌های اولیه منجر به انتخاب معیارهایی شد که بیشترین اثرگذاری را در عملیات گاززدایی متان دارند. ارتباط داخلی بین این معیارها توسط خبرگان مشخص شده و نتایج حاصل از آن‌ها، با به‌کارگیری رویکرد ISM مورد تحلیل قرار گرفت که در ادامه تشریح می‌شود.

مدلسازی ساختاری تفسیری که توسط وارفیلد ارائه شده است، یک روش‌شناسی برای ایجاد و فهم روابط بین عناصر یک سیستم محسوب می‌شود. این روش تفسیری است؛ بدین معنا که بر اساس قضاوت خبرگان تصمیم گرفته می‌شود که کدام متغیرها، چگونه با هم ارتباط داشته باشند [۳۳، ۳۴]. همچنین ساختاری است، به این معنا که ساختاری کلی از یک مجموعه پیچیده از متغیرها را بر اساس ارتباطات، استخراج می‌کند و هم یک روش مدلسازی است؛ به این معنا که روابط ویژه متغیرها و همچنین ساختار کلی را در یک مدل گرافیکی نشان می‌دهد [۳۵]. مدلسازی ساختاری تفسیری، روشی مناسب برای تحلیل تاثیر یک عنصر بر دیگر عناصر است. این روش‌شناسی، ترتیب و جهت روابط پیچیده میان عناصر یک سیستم را بررسی می‌کند. به بیان دیگر، ابزاری است که به وسیله آن، سیستم می‌تواند بر پیچیدگی بین عناصر غلبه کند [۳۶-۳۷]. با تجزیه معیارها در چند سطح مختلف به تحلیل ارتباط میان معیارها می‌پردازد [۳۸].

در ارتباط است و ماتریس دست‌یابی نهایی به دست می‌آید.

- سازگار کردن ماتریس دست‌یابی

ماتریس دست‌یابی اولیه باید دارای سازگاری درونی باشد؛ به عبارت بهتر، اگر عامل a منجر به عامل b شود و عامل b نیز منجر به عامل c شود باید عامل a نیز منجر به عامل c شود. از جمله روش‌های سازگاری می‌توان به جمع‌آوری مجدد نظرات خبرگان و تکرار این فرآیند تا حصول سازگاری و یا استفاده از قوانین ریاضی (مطابق قاعده بولین) اشاره کرد. بدین منظور، ماتریس دست‌یابی به توان رسانده می‌شود و این عمل تا زمانی ادامه می‌یابد که ماتریس حاصل از توان n ام با ماتریس حاصل از توان $n-1$ ام برابر باشد.

- تعیین سطح و ماتریس استاندارد

برای تعیین سطح با استفاده از ماتریس دست‌یابی مجموعه قابل دست‌یابی (خروجی) و مجموعه پیش‌نیاز (ورودی) برای هر متغیر تعیین می‌شود [۳۹]. مجموعه قابل دست‌یابی هر متغیر شامل متغیرهایی می‌شود که از طریق این متغیر می‌توان به آن‌ها رسید و مجموعه پیش‌نیاز شامل متغیرهایی می‌شود که از طریق آن‌ها می‌توان به این متغیر رسید. پس از تعیین مجموعه قابل دست‌یابی و پیش‌نیاز برای هر متغیر، عناصر مشترک در دو مجموعه قابل دست‌یابی و پیش‌نیاز برای هر متغیر شناسایی می‌شود. در اولین جدول تکرار، متغیری دارای بالاترین سطح است که مجموعه دست‌یابی و عناصر مشترک آن کاملاً یکسان باشند. پس از تعیین این متغیرها باید آن‌ها را از جدول حذف کرد و باید با سایر متغیرهای باقی‌مانده، جدول بعدی را تشکیل داد. در جدول دوم نیز همانند جدول اول، متغیر سطح دوم مشخص شده است و این کار تا تعیین سطح تمامی متغیرها ادامه می‌یابد [۴۰].

- تشکیل مدل ساختاری تفسیری و ترسیم شبکه تعاملات

با توجه به سطوح هر یک از معیارها و همچنین ماتریس دست‌یابی نهایی، مدل اولیه ساختاری تفسیری با در نظر گرفتن انتقال‌پذیری‌ها در قالب نمودار رسم می‌شود. نمودار نهایی پس از حذف روابط گذار، در اختیار خبرگان قرار می‌گیرد و سپس مدل نهایی ساختاری تفسیری با حذف انتقال‌پذیری‌ها امکان‌پذیر می‌شود.

- تجزیه و تحلیل قدرت نفوذ و میزان وابستگی

هدف از تجزیه و تحلیل تاثیر متقابل ماتریس اعمال شده برای دسته‌بندی قدرت نفوذ و میزان وابستگی (MICMAC)، تشخیص و تحلیل قدرت نفوذ و وابستگی متغیرها است. در

این گام، از طریق جمع کردن ورودی‌های مقادیر یک در هر سطر، قدرت نفوذ و همچنین از جمع کردن ورودی‌های مقادیر یک در هر ستون، میزان وابستگی متغیرها به دست می‌آید. بر همین اساس، نمودار قدرت نفوذ-میزان وابستگی ترسیم می‌شود [۴۱]. در این تحلیل، متغیرها بر حسب قدرت نفوذ و میزان وابستگی به چهار گروه تقسیم زیر می‌شوند [۳۹]:

الف- متغیرهای خودگردان (خودمختار) که دارای قدرت نفوذ و وابستگی ضعیف‌اند. این متغیرها تا حدودی از سایر متغیرها مجزا و دارای ارتباطات کم و ضعیف با سامانه‌اند.

ب- متغیرهای وابسته که قدرت نفوذ ضعیف ولی وابستگی بالایی دارند.

پ- متغیرهای پیوندی که قدرت نفوذ و وابستگی بالایی دارند. این متغیرها غیرایستا هستند زیرا هر نوع تغییر در آن‌ها می‌تواند سامانه را تحت تاثیر قرار دهد و در نهایت، بازخورد سامانه نیز می‌تواند این متغیرها را دوباره تغییر دهد. در واقع، هرگونه عملی بر روی این متغیرها منجر به تغییر سایر متغیرها می‌شود [۴۰].

ت- متغیرهای مستقل که قدرت نفوذ بالا و وابستگی پایینی دارند.

۴- عوامل اثرگذار در فرآیند متان‌زدایی

عوامل بسیاری در فرآیند متان‌زدایی معادن زیرزمینی زغال‌سنگ موثرند. این معیارها شامل پارامترهای مربوط به زغال‌سنگ، پارامترهای زمین‌شناختی-ژئومکانیکی و پارامترهای عملیاتی‌اند. بر اساس مرور تحقیقات انجام شده و با توجه به نظر خبرگان، معیارهای موثر بر عملیات متان‌زدایی مشخص شد که در جدول ۱ ارائه شده است.

سیستم نفوذپذیری نسبی شکستگی‌های طبیعی موجود در لایه زغال‌سنگ و سنگ دربرگیرنده آن، تاثیر زیادی در میزان گاز قابل استحصال دارد. بر اساس مطالعات پیشین، مشخص شده است که بین متان و آب زهکشی شده یک نسبت بهینه وجود دارد؛ یعنی با افزایش فاصله از گمانه، میزان گاز زهکشی شده کمتر می‌شود. این امر در ارتباط مستقیم با نفوذپذیری نسبی است. با توجه به پژوهش‌های متعدد انجام‌شده در خصوص متان‌زدایی، این نتیجه حاصل شده است که میزان نفوذپذیری مناسب برای فرآیند گازکشی ۳۰ تا ۵۰ میلی‌داری است. امروزه با ورود فناوری‌های نوین، امکان انجام فرآیند گاززدایی از زغال‌سنگ‌های با نفوذپذیری اندک

جدول ۱: عوامل موثر بر کارایی عملیات متان زدایی معادن زغال سنگ

نماد	زیرمعیارها	معیارهای اصلی
C ₁	محتوای رطوبت زغال سنگ	معیارهای طبیعی زغال سنگ
C ₂	نفوذپذیری زغال سنگ	
C ₃	سیستم درزه داری (کلیت‌ها)	
C ₄	میزان خاکستر موجود در زغال سنگ	
C ₅	درجه اشباع گاز	
C ₆	ضخامت لایه زغال سنگ	
C ₇	رتبه زغال سنگ	
C ₈	شرایط آب‌های زیرزمینی	
C ₉	گاز محتوی	
C ₁₀	ساختار زمین‌شناسی روباره لایه	معیارهای زمین‌شناسی و ژئومکانیکی
C ₁₁	تنش‌های موثر (القایی)	
C ₁₂	تنش‌های برجا	
C ₁₃	طول چال	معیارهای اجرایی و عملیاتی
C ₁₄	قطر چال	
C ₁₅	جهت یافتگی چال‌ها	
C ₁₆	پایداری چال‌ها	
C ₁₇	چگالی حفاری	
C ₁₈	هزینه‌های عملیاتی و سرمایه‌ای	
C ₁₉	فشار زهکشی گاز	

برجای می‌مانند [۴۷]. با افزایش میزان خاکستر زغال سنگ، ظرفیت جذب آن کاهش می‌یابد [۴۸]. لایه‌های زغال سنگ که خاکستر محتوی آن کمتر از ۳۰ درصد است، قابلیت تولید گاز بیشتری دارند. خاکستر زغال سنگ به طور قابل توجهی بر گاز محتوی آن اثرگذار است [۴۹]. با افزایش ضخامت لایه زغال سنگ نیز طولی از گمانه زهکشی که در داخل لایه قرار می‌گیرد، افزایش می‌یابد. بر این اساس میزان گاز زهکشی از لایه زغال سنگ افزایش خواهد یافت. مطالعات بلک روی ۵۳ گمانه زهکشی گاز متان نشان داده است که با افزایش لایه زغال سنگ تولید به شدت افزایش یافته است [۵۰]. از سوی دیگر، نقش ارتفاع لایه زغال سنگ را می‌توان به افزایش زون تخریب در سقف لایه نیز مرتبط دانست که با افزایش ارتفاع لایه، ارتفاع تخریب افزایش یافته و درزه و شکستگی‌ها در سقف افزایش می‌یابد [۵۱].

هر چه ضخامت لایه زغال سنگ بیشتر باشد، میزان گاز بیشتری قابل گازکشی است. در متان‌زدایی با گمانه‌های قائم، این موضوع اهمیت بیشتری دارد زیرا طولی از گمانه که در داخل لایه زغال سنگ قرار می‌گیرد، بیشتر است و نیز

نیز مهیا شده است. پژوهش‌ها نشان می‌دهند که کمترین میزان نفوذپذیری لازم برای عمل گاززدایی، یک میلی‌داری است. سیستم نفوذپذیری نسبی شکستگی‌های طبیعی موجود در لایه زغال سنگ و سنگ دربرگیرنده آن تاثیر زیادی در میزان گاز قابل استحصال دارد. بین متان و آب زهکشی شده یک نسبت بهینه وجود دارد؛ یعنی با افزایش فاصله از گمانه زهکش، میزان گاز زهکشی شده کمتر می‌شود. این امر در ارتباط مستقیم با نفوذپذیری نسبی است [۴۵].

زغال سنگ به طور طبیعی دارای ناپیوستگی‌هایی است که این ناپیوستگی‌ها تاثیر بسیار قابل توجهی بر نفوذپذیری آن دارد. این ناپیوستگی‌ها شامل کلیت‌ها، درزه‌ها و صفحات ناپیوستگی بزرگ است. طول کلیت‌ها کمتر از یک متر و فراوانی آن‌ها بین ۵ تا ۲۰ درزه در هر متر است. گاز متان معمولا در لایه‌های زغال سنگ به همراه آب و در داخل کلیت‌ها وجود دارد [۴۶]. با افزایش مقدار خاکستر در زغال سنگ نیز میزان گاز متان موجود در آن کاهش می‌یابد. زغال سنگ‌ها حاوی مواد غیرآلی و مواد زایدی مانند رس‌ها، سولفیدها، سولفات‌ها، کربنات‌ها و نظایر آن‌اند که پس از سوزاندن زغال سنگ به صورت خاکستر

وزن روباره لایه زغال‌سنگ است. با افزایش عمق روباره میزان گاز محتوی لایه زغال‌سنگ افزایش و نفوذپذیری آن‌ها کاهش می‌یابد [۵۷]. از این رو، می‌توان گفت که لایه‌های زغال‌سنگی که در اعماق زیاد قرار گرفته‌اند، گاز قابل استحصال بیشتری دارند. افزایش عمق روباره از طرفی مانعی در اجرای اقتصادی روش‌های گاززدایی است زیرا هزینه‌های مرتبط با حفاری گمانه‌ها افزایش می‌یابد و از طرف دیگر مسایل ناپایداری چاه بیشتر می‌شود که می‌تواند بازدهی گمانه‌ها را کاهش دهد [۵۸].

با افزایش طول و قطر چال‌های زهکشی متان، می‌توان حجم بیشتری از گاز را استحصال کرد. البته طول و قطر چال وابسته به دستگاه‌های حفاری، سطح مقطع تونل‌ها و کارگاه‌های استخراج و نیز راندمان تجهیزات مکنده گاز است [۵۹]. جهت‌یافتگی چال‌ها به دلیل تعدد نقاط تقاطع کلیت‌ها، درزه‌ها و شکستگی‌ها با مقطع داخلی چال‌های زهکش اهمیت فراوانی دارد. استفاده از چال‌های زهکش زاویه‌دار در دیواره‌ها و به ویژه سقف حفاریات زیرزمینی نیز مستلزم به‌کارگیری دستگاه‌های حفاری خاصی است که قابلیت حفاری چال‌های زاویه‌دار را دارند. معمولاً حجم گاز متان زهکشی شده از چال‌های زاویه‌دار اندکی بیشتر از چال‌های افقی یا قائم است [۶۰]. پایداری چال‌ها نیز به نوع زغال‌سنگ، ضخامت لایه زغال‌سنگ و روباره آن، جنس سنگ‌های کمربالا و کمرپایین لایه، مقدار تنش‌های برجا و القایی و قطر چال وابسته است. در صورتی‌که پایداری چال‌ها اندک باشد، امکان استحصال میزان بهینه متان از آن‌ها وجود نخواهد داشت [۵۳]. چگالی حفاری نیز وابسته به طراحی شبکه چال‌های زهکش است. در صورت استفاده از چال‌های با قطر بزرگ‌تر، تعداد آن‌ها در هر مترمربع از سطح کاهش می‌یابد و چنانچه از چال‌های با قطر کمتر استفاده شود، چگالی حفاری افزایش خواهد یافت. در طراحی شبکه چال‌های زهکش برای معادن زغال‌سنگ باید حالت بهینه شبکه توسط طراحان محاسبه شود تا علاوه بر کاهش هزینه‌های عملیات حفاری، حداکثر میزان گاز متان از لایه زغال‌سنگ استخراج شود [۶۱].

یکی از مهم‌ترین عوامل اثرگذار بر کارایی عملیات متان‌زدایی، هزینه‌های عملیاتی و سرمایه‌ای است. به عبارت بهتر، بهینه‌سازی طراحی شبکه گمانه‌های زهکش موجب کاهش قابل توجه هزینه‌های عملیات متان‌زدایی خواهد شد. همچنین استفاده از تجهیزات مناسب در طول عملیات،

در صورتی‌که زغال دارای نفوذپذیری کمتری باشد، انجام آزمایش‌های شکافت هیدرولیکی و آتشاری کنترل شده با موفقیت بیشتری همراه است [۵۲، ۴۶]. همچنین مقدار گاز در هر لایه زغالی، به ظرفیت ذخیره ذاتی زغال‌سنگ و شرایط فیزیکی لایه زغال‌سنگ بستگی دارد. ظرفیت ذخیره زغال‌سنگ اصولاً تابع رتبه آن است و همچنین نمی‌تواند از وجود گمانه زهکشی متان تاثیر بپذیرد. رتبه زغال‌سنگ تاثیر زیادی بر میزان گاز محتوی لایه زغال‌سنگ دارد. رتبه‌های خاص زغال‌سنگ برای متان‌زدایی مناسب‌اند. اکثر پروژه‌های متان‌زدایی، گاز متان را از زغال‌های بیتومینس تولید می‌کنند ولی تولید متان از زغال‌سنگ‌های آنتراسیت هم ممکن است. تولید متان تابعی از ماسرال‌ها (موجودات آلی میکروسکوپی) و نیز فرآیندهای حرارتی است. با افزایش فشار و حرارت، رتبه زغال‌سنگ به سمت تولید و ذخیره بیشتر متان پیش می‌رود. هر یک از ماسرال‌ها قادرند حجم‌های متفاوت متان را جذب کنند و با افزایش رتبه زغال‌سنگ، متان ذخیره شده در آن بیشتر می‌شود [۵۳].

گاز محتوی برابر است با میزان گاز بر واحد وزن زغال‌سنگ یا سنگ که واحد آن معمولاً بر حسب فوت مکعب استاندارد بر تن است. محاسبه گاز محتوی زغال‌سنگ خالص برای ارزیابی گاز محتوی زغال‌سنگ در موقعیت‌های مختلف زمین‌شناسی و جغرافیایی مورد استفاده قرار می‌گیرد. یک رابطه خطی بین گاز محتوی کل و جزو غیرزغالی به وسیله رگرسیون قابل دستیابی است و می‌تواند به عنوان معیاری برای میزان خاکستر در تشکیلات مورد استفاده قرار گیرد [۵۴]. همچنین در این پژوهش، تمامی عوامل زمین‌شناسی و ژئوتکنیکی با عنوان معیار ساختار زمین‌شناسی روباره لایه قرار گرفته‌اند. گسل‌خوردگی، درزه‌داری، چین‌خوردگی و سایر ساختارهای زمین‌شناسی بر میزان گاز قابل استحصال از معدن و نیز کارایی عملیات متان‌زدایی اثرگذارند [۵۵]. تنش‌های ناشی از آماده‌سازی‌ها، حفر فضاهای زیرزمینی، ایجاد کارگاه‌ها و تونل‌های دسترسی و باربری نیز با عنوان تنش‌های القایی (موثر) مورد بررسی قرار گرفته‌اند. این تنش‌ها که در واقع تنش‌های ثانویه ناشی از فعالیت‌های معدنکاری زیرزمینی‌اند، بر میزان متان آزاد شده و عملیات متان‌زدایی اثرگذارند [۵۶]. همچنین وجود تنش‌های اولیه (پیش از استخراج) در منطقه (تنش‌های برجا) نیز از عوامل مهم اثرگذار بر فرآیند متان‌زدایی محسوب می‌شوند. بخش مهمی از تنش‌های برجا، ناشی از

برقرار نیست [۴۴].

گام دوم- ماتریس خودتعاملی ساختاری، یک ماتریس به ابعاد متغیرها است که در سطر و ستون اول آن متغیرها به ترتیب ذکر شدند. آنگاه روابط دو به دو متغیرها با نمادهای V, A, X و O مشخص شد و ماتریس خودتعاملی ساختاری، بر اساس بحث و نظرات متخصصان صنعت و معدن (معادن زغال سنگ البرز شرقی)، سازمان نظام مهندسی معدن (آذربایجان شرقی، آذربایجان غربی و سمنان) و اعضای هیات علمی دانشگاه‌های ارومیه، صنعتی سهند و صنعتی ارومیه تشکیل شدند. برای تعیین نوع روابط، از نظر خبرگان و کارشناسان بر اساس روش‌های مختلف مدیریتی از جمله طوفان مغزی و روش گروه اسمی استفاده شد که در قالب پاسخ به پرسش‌نامه‌هایی در اختیار پژوهشگران پژوهش حاضر قرار گرفت. ماتریس خودتعاملی ساختاری این پژوهش در جدول ۲ نشان داده شده است.

طوفان مغزی یک روش خلاقیت فردی یا گروهی است که در طی آن با جمع‌آوری فهرستی از ایده‌ها که خود به خود توسط خبرگان تولید می‌شود برای رسیدن به یک جمع‌بندی در مورد یک مساله تلاش می‌شود. هر چند که کاربرد این روش، بیشتر برای تولید ایده و بهبود مدیریت بین اعضای هر سازمان محسوب می‌شود ولی با توجه به کارکردها و نتایج حاصل از به کارگیری این روش، می‌توان گفت که طوفان مغزی موثرتر از کار کردن افراد به طور مستقل است. چهار قاعده اساسی که باید در طوفان فکری رعایت شود، تمرکز بر کمیت،

تعمیر و نگهداری دوره‌ای آن‌ها و آموزش کاربران و متصدیان دستگاه‌های زهکش، در کاهش هزینه‌های متان‌زدایی نقش اساسی دارند [۶۲]. در صورت استفاده از پمپ‌های مکنده قوی‌تر که فشار زهکشی بیشتری دارند، می‌توان حجم بیشتری از گاز متان را زهکشی کرد. با افزایش فشار زهکشی گاز، علاوه بر تامین ایمنی لازم برای عملیات استخراج زغال سنگ، مدت زمان کمتری صرف متان‌زدایی خواهد شد [۶۳].

۵- سطح‌بندی معیارها با رویکرد ISM

پس از تعیین معیارهای اثرگذار نهایی برای استخراج ساختار روابط بین این معیارها، مدل‌سازی تفسیری ساختاری به شرح گام‌های زیر به کار گرفته شد. به منظور سهولت انجام محاسبات، معیارهای مورد نظر با نمادهای C_j نام‌گذاری شدند. گام اول- مدل‌سازی ساختاری تفسیری با تهیه فهرستی از متغیرهایی شروع می‌شود که مربوط به مساله یا موضوع‌اند [۴۳، ۴۲، ۳۵]. این متغیرها از مطالعه ادبیات موضوع، مصاحبه با خبرگان و یا از طریق پرسش‌نامه با استفاده از روش‌های مدیریتی مانند طوفان مغزی و گروه اسمی به دست آمدند. در گام نخست، روابط محتوایی (زمینه‌ای) X_{ij} بین متغیرهای (i, j) تعیین شدند. بر اساس روش ISM، شناسایی روابط زمینه‌ای بین عناصر از نتایج مقایسات زوجی حاصل می‌شود. بدین صورت که اگر رای اکثریت گروه خبره یعنی تعداد $(N/2)+1$ رای مبتنی بر وجود رابطه مابین دو معیار باشد، آنگاه لحاظ می‌شود و در غیر این صورت ارتباطی بین دو مولفه

جدول ۲: ماتریس خودتعاملی ساختاری عوامل اثرگذار بر فرآیند گاززدایی متان

	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5	C_6	C_7	C_8	C_9	C_{10}	C_{11}	C_{12}	C_{13}	C_{14}	C_{15}	C_{16}	C_{17}	C_{18}	C_{19}
C_1		O	O	O	X	O	O	V	X	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O
C_2			V	O	O	O	O	O	O	O	O	V	O	O	O	A	O	O	O
C_3				O	A	O	O	O	A	O	V	V	O	O	O	O	O	O	A
C_4					A	O	V	O	A	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O
C_5						O	V	V	X	O	O	O	O	O	O	O	A	A	A
C_6							O	O	O	O	O	V	V	O	O	O	O	A	O
C_7								O	A	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O
C_8									A	V	O	O	O	O	O	O	O	O	O
C_9										O	O	O	V	V	V	O	A	A	X
C_{10}											X	X	O	O	O	A	O	O	O
C_{11}												X	O	O	O	A	O	O	O
C_{12}													O	O	O	A	O	O	O
C_{13}														X	O	O	O	A	O
C_{14}															O	A	O	A	A
C_{15}																O	O	O	O
C_{16}																	O	O	O
C_{17}																		A	O
C_{18}																			V

محدود می‌سازد و از یک برگ رای مخفی برای انتخاب ایده‌ها از بین ایده‌های حاصل از توفان فکری، استفاده می‌کند، بهترین نتیجه را در خصوص وزن‌دهی به معیارها و عوامل مختلف مهندسی حاصل می‌کند [۶۶،۶۵]. گام‌های به کارگیری این روش در پژوهش حاضر، شامل مراحل زیر است:

- خلق روابط فیما بین معیارهای اثرگذار
- ثبت روابط فیما بین معیارها
- تصریح روابط فیما بین معیارها
- رای‌گیری محرمانه درباره روابط ارایه شده
- محاسبه امتیاز کسب شده به وسیله هر رابطه
- رتبه‌بندی روابط ارایه شده بر اساس امتیازها
- انتخاب بهترین روابط و ترسیم این آن‌ها به صورت شماتیک [۶۶].

گام سوم- با تبدیل نمادهای روابط ماتریس SSIM به اعداد صفر و یک می‌توان به ماتریس دست‌یابی رسید. با پیروی از قوانین خاص خود که در بالا اشاره شد، ماتریس دست‌یابی اولیه آماده شد. ماتریس دست‌یابی این پژوهش در جدول ۳ نشان داده شده است.

گام چهارم- در این گام، حالت تریایی بین عوامل بررسی شد و پس از به توان رساندن ماتریس دست‌یابی (مطابق قاعده بولین) مشخص شد که ماتریس دست‌یابی، سازگار است. نتایج حاصل از به توان رساندن ماتریس دست‌یابی در جدول ۴ نشان داده شده است. برای به توان رساندن ماتریس، رابطه مورد

اجتناب از انتقاد، استقبال از ایده‌های غیرمعمول و ترکیب و بهبود ایده‌ها است. شیوه اجرای طوفان مغزی از سوی خبرگان در این پژوهش، شامل مراحل زیر است:

- ثبت موضوع مورد نظر بر روی تخته و توضیح در مورد آن برای خبرگان توسط تسهیل‌کننده
- یادآوری قواعد و اصول اجرای کار برای شرکت‌کنندگان توسط تسهیل‌کننده
- ارایه آرا و نظرات به صورت گردشی (در هر نوبت فقط یک ایده باید بیان شود و در صورت عدم وجود ایده‌ای با گفتن واژه «بعدی» نوبت به دیگری واگذار می‌شود).
- ثبت تمامی آرا توسط دبیر جلسه
- اتمام مرحله ثبت عقاید در صورت گفتن کلمه «بعدی» توسط تمام افراد

- دسته‌بندی و جمع‌بندی نتایج [۶۴]

از سوی دیگر با توجه به اهمیت نقش نظرات و آرای خبرگان در پژوهش حاضر، از روش گروه اسمی نیز به صورت مجزا و به موازات به کارگیری طوفان مغزی، استفاده شد. روش گروه اسمی، فرآیند گروهی سازمان یافته‌ای برای خلق ایده‌ها است که در آن، خبرگان مجاز نیستند که لفظی و شفاهی با یکدیگر تماس برقرار کنند. از این روش تصمیم‌گیری برای از بین بردن تاثیر و نفوذ یک شخص مقتدر بر نتایج فرآیند خلق ایده گروه استفاده می‌شود. روش گروه اسمی از طریق فرآیندی که اظهارنظرهای هر کدام از خبرگان را به توضیحات مختصر

جدول ۳: ماتریس دست‌یابی عوامل اثرگذار بر فرآیند گاززدایی متان

	C ₁	C ₂	C ₃	C ₄	C ₅	C ₆	C ₇	C ₈	C ₉	C ₁₀	C ₁₁	C ₁₂	C ₁₃	C ₁₄	C ₁₅	C ₁₆	C ₁₇	C ₁₈	C ₁₉
C ₁	1	0	0	0	1	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
C ₂	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
C ₃	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0
C ₄	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
C ₅	1	0	1	1	1	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
C ₆	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0
C ₇	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
C ₈	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
C ₉	1	0	1	1	1	0	1	1	1	0	0	0	1	1	1	0	0	0	1
C ₁₀	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0
C ₁₁	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0
C ₁₂	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0
C ₁₃	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0
C ₁₄	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0
C ₁₅	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
C ₁₆	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	1	0	1	0	0	0
C ₁₇	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
C ₁₈	0	0	0	0	1	1	0	0	1	0	0	0	1	1	0	0	1	1	1
C ₁₉	0	0	1	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1

داده می‌شوند:

- ارتباط بین C_1 و C_5 (ارتباط دو طرفه): محتوای رطوبت زغال سنگ (C_1) و درجه اشباع گاز (C_5) به صورت متقابل بر روی همدیگر اثرگذارند. بدین معنی که با افزایش محتوای رطوبت زغال سنگ، درجه اشباع گاز موجود در زغال سنگ نیز به دلیل قابلیت انحلال متان در آب، افزایش می‌یابد. از سوی دیگر، فشار ناشی از میزان اشباع گاز در لایه زغال سنگ و فضای بین کلیت‌ها و شکستگی‌ها، در میزان رطوبت موجود در زغال سنگ اثرگذار است.

- ارتباط بین C_5 و C_{19} (ارتباط یک طرفه از نوع A): فشار زهکشی گاز متان، بر روی درجه اشباع متان در لایه زغال سنگ و شکستگی‌های موجود در آن اثرگذار است. با افزایش فشار زهکشی متان، درجه اشباع گاز کاهش می‌یابد.

- ارتباط بین C_9 و C_{14} (ارتباط یک طرفه از نوع V): با توجه به این که در طراحی سامانه متان‌زدایی معادن زغال سنگ، یکی از مهم‌ترین عوامل در تعیین قطر چال‌های زهکش، گاز محتوای لایه زغال سنگ و لایه‌های روباره آن است، بنابراین قطر چال متاثر از میزان گاز موجود در لایه است.

- ارتباط بین C_{13} و C_{18} (ارتباط یک طرفه از نوع A): طول چال‌های زهکش به دلایل مدیریتی و محدودیت در بودجه‌ها، متاثر از هزینه‌های عملیاتی و سرمایه‌ای است. نقش مدیران معادن زیرزمینی در خصوص بهینه‌سازی هزینه‌های حفاری چال‌های زهکش گاز متان، بسیار حیاتی است. از سوی دیگر،

نیاز در نرم‌افزار متلب کدنویسی شده و با اجرای آن، ماتریس ارایه‌شده در جدول ۴ در توان سوم ماتریس دست‌یابی حاصل شد. الگوریتم مورد استفاده در کدهای مربوط به این گام از پژوهش، در شکل ۱ نشان داده شده است.

در جدول ۲، روابط مستقیم بین عوامل اثرگذار بر عملیات متان‌زدایی در نظر گرفته شده‌اند. برای اطلاع از روابط بین عوامل، علاوه بر بررسی پژوهش‌های پیشین، از نظرات خبرگان موضوع نیز بهره گرفته شد. در ادامه، برخی از این روابط توضیح



شکل ۱: گام‌های الگوریتم مورد استفاده در به توان رساندن ماتریس دست‌یابی

جدول ۴: ماتریس حاصل از به توان رساندن ماتریس دست‌یابی

	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5	C_6	C_7	C_8	C_9	C_{10}	C_{11}	C_{12}	C_{13}	C_{14}	C_{15}	C_{16}	C_{17}	C_{18}	C_{19}
C_1	1	0	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	1
C_2	0	1	1	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0
C_3	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0
C_4	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
C_5	1	0	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	1
C_6	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0
C_7	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
C_8	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0
C_9	1	0	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	1
C_{10}	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0
C_{11}	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0
C_{12}	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0
C_{13}	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0
C_{14}	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0
C_{15}	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
C_{16}	0	1	1	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	0	1	0	0	0
C_{17}	1	0	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	0	1
C_{18}	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1
C_{19}	1	0	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	1

سطر و هر ستون جمع شدند. سپس بر اساس داده‌های یاد شده، نمودار تجزیه و تحلیل قدرت نفوذ و میزان وابستگی (MICMAC) ترسیم شد که در شکل ۲ نشان داده شده است.

۶- بحث و تحلیل

با توجه به سطح‌بندی انجام شده به روش ISM و شکل ۲، مشخص است که رتبه زغال‌سنگ و پارامترهای ژئومکانیکی (تنش‌های برجا و القایی)، معیارهای فنی مربوط به حفاری چال‌ها (طول، قطر و جهت‌یافتگی) و نیز ساختار زمین‌شناسی روباره لایه با داشتن حداکثر میزان اثرگذاری بر فرایند گاززدایی متان معادن زیرزمینی زغال‌سنگ در سطح اول قرار گرفته‌اند. دلیل این امر، اهمیت قابل توجه این معیارها از دیدگاه پژوهشگران و خبرگان است. قرارگیری این معیارها در بالاترین سطح عوامل موثر بر فرایند متان‌زدایی حین استخراج با مطالعات گنتریس [۱۵]، سانگ و همکاران [۱۷]، هانگ و همکاران [۱۸] و پائول و چاترجی [۱۹] همخوانی دارد.

طراحان سامانه‌های متان‌زدایی باید علاوه بر بهینه‌سازی طول چال‌ها، در خصوص بهینه‌سازی هزینه‌های مربوط به عملیات حفاری نیز محاسبات لازم را انجام دهند.

گام پنجم- برای تعیین سطح و اولویت معیارها، مجموعه دستیابی و مجموعه پیش‌نیاز برای هر معیار و اشتراکات این دو مجموعه تعیین شدند (جدول ۵). سپس فرآیند سطح‌بندی معیارها آغاز شد. در این پژوهش، پس از ۵ تکرار، تمامی عناصر تعیین سطح شدند که نتایج سطح‌بندی در جدول ۶ نشان داده شده است (بنا به محدودیت، از درج تکرارهای بعدی خودداری شد).

گام ششم- پس از تعیین روابط و سطح معیارها، ترسیم شبکه مدل آن‌ها انجام گرفت. در این مرحله، با توجه به سطوح به دست آمده از معیارها و ماتریس نهایی، یک مدل اولیه رسم شد و از طریق حذف انتقال‌پذیری‌ها در مدل اولیه، مدل نهایی به دست آمد. مدل نهایی نیز پس از بازبینی خبرگان، به عنوان مدل کارآمد که دارای صحت و دقت کافی است، در شکل ۱ نشان داده شده است.

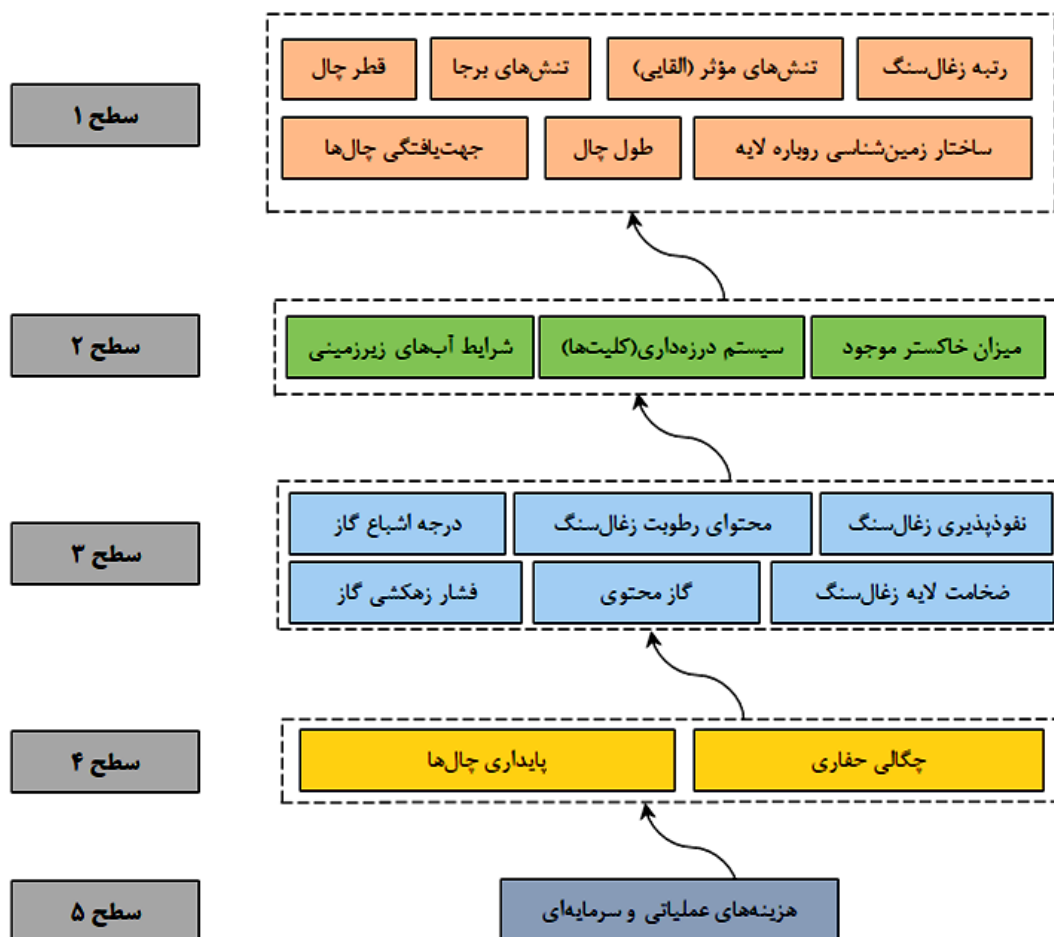
گام هفتم- در این مرحله، ورودی‌های مقادیر یک هر

جدول ۵: مجموعه‌های دستیابی، پیش‌نیاز و اشتراک اولیه در تکرار اول

معیار	مجموعه دستیابی اولیه	مجموعه پیش‌نیاز اولیه	مجموعه اشتراک اولیه
C ₁	{C ₁ , C ₃ , C ₄ , C ₅ , C ₇ , C ₈ , C ₉ , C ₁₀ , C ₁₁ , C ₁₂ , C ₁₃ , C ₁₄ , C ₁₅ , C ₁₉ }	{C ₁ , C ₅ , C ₉ , C ₁₇ , C ₁₈ , C ₁₉ }	{C ₁ , C ₅ , C ₉ , C ₁₉ }
C ₂	{C ₂ , C ₃ , C ₁₀ , C ₁₁ , C ₁₂ }	{C ₂ , C ₁₆ }	{C ₂ }
C ₃	{C ₃ , C ₁₀ , C ₁₁ , C ₁₂ }	{C ₁ , C ₂ , C ₃ , C ₅ , C ₉ , C ₁₆ , C ₁₇ , C ₁₈ , C ₁₉ }	{C ₃ }
C ₄	{C ₄ , C ₇ }	{C ₁ , C ₄ , C ₅ , C ₉ , C ₁₇ , C ₁₈ , C ₁₉ }	{C ₄ }
C ₅	{C ₁ , C ₃ , C ₄ , C ₅ , C ₇ , C ₈ , C ₉ , C ₁₀ , C ₁₁ , C ₁₂ , C ₁₃ , C ₁₄ , C ₁₅ , C ₁₉ }	{C ₁ , C ₅ , C ₉ , C ₁₇ , C ₁₈ , C ₁₉ }	{C ₁ , C ₅ , C ₉ , C ₁₉ }
C ₆	{C ₆ , C ₁₀ , C ₁₁ , C ₁₂ , C ₁₃ , C ₁₄ }	{C ₆ , C ₁₈ }	{C ₆ }
C ₇	{C ₇ }	{C ₁ , C ₄ , C ₅ , C ₇ , C ₉ , C ₁₇ , C ₁₈ , C ₁₉ }	{C ₇ }
C ₈	{C ₈ , C ₁₀ , C ₁₁ , C ₁₂ }	{C ₁ , C ₅ , C ₈ , C ₉ , C ₁₇ , C ₁₈ , C ₁₉ }	{C ₈ }
C ₉	{C ₁ , C ₃ , C ₄ , C ₅ , C ₇ , C ₈ , C ₉ , C ₁₀ , C ₁₁ , C ₁₂ , C ₁₃ , C ₁₄ , C ₁₅ , C ₁₉ }	{C ₁ , C ₅ , C ₉ , C ₁₇ , C ₁₈ , C ₁₉ }	{C ₁ , C ₅ , C ₉ , C ₁₉ }
C ₁₀	{C ₁₀ , C ₁₁ , C ₁₂ }	{C ₁ , C ₂ , C ₃ , C ₅ , C ₆ , C ₈ , C ₉ , C ₁₀ , C ₁₁ , C ₁₂ , C ₁₆ , C ₁₇ , C ₁₈ , C ₁₉ }	{C ₁₀ , C ₁₁ , C ₁₂ }
C ₁₁	{C ₁₀ , C ₁₁ , C ₁₂ }	{C ₁ , C ₂ , C ₃ , C ₅ , C ₆ , C ₈ , C ₉ , C ₁₀ , C ₁₁ , C ₁₂ , C ₁₆ , C ₁₇ , C ₁₈ , C ₁₉ }	{C ₁₀ , C ₁₁ , C ₁₂ }
C ₁₂	{C ₁₀ , C ₁₁ , C ₁₂ }	{C ₁ , C ₂ , C ₃ , C ₅ , C ₆ , C ₈ , C ₉ , C ₁₀ , C ₁₁ , C ₁₂ , C ₁₆ , C ₁₇ , C ₁₈ , C ₁₉ }	{C ₁₀ , C ₁₁ , C ₁₂ }
C ₁₃	{C ₁₃ , C ₁₄ }	{C ₁ , C ₅ , C ₆ , C ₉ , C ₁₃ , C ₁₄ , C ₁₆ , C ₁₇ , C ₁₈ , C ₁₉ }	{C ₁₃ , C ₁₄ }
C ₁₄	{C ₁₃ , C ₁₄ }	{C ₁ , C ₅ , C ₆ , C ₉ , C ₁₃ , C ₁₄ , C ₁₆ , C ₁₇ , C ₁₈ , C ₁₉ }	{C ₁₃ , C ₁₄ }
C ₁₅	{C ₁₅ }	{C ₁ , C ₅ , C ₉ , C ₁₅ , C ₁₇ , C ₁₈ , C ₁₉ }	{C ₁₅ }
C ₁₆	{C ₂ , C ₃ , C ₁₀ , C ₁₁ , C ₁₂ , C ₁₃ , C ₁₄ , C ₁₆ }	{C ₁₆ }	{C ₁₆ }
C ₁₇	{C ₁ , C ₃ , C ₄ , C ₅ , C ₇ , C ₈ , C ₉ , C ₁₀ , C ₁₁ , C ₁₂ , C ₁₃ , C ₁₄ , C ₁₅ , C ₁₇ , C ₁₉ }	{C ₁₇ , C ₁₈ }	{C ₁₇ }
C ₁₈	{C ₁ , C ₃ , C ₄ , C ₅ , C ₆ , C ₇ , C ₈ , C ₉ , C ₁₀ , C ₁₁ , C ₁₂ , C ₁₃ , C ₁₄ , C ₁₅ , C ₁₇ , C ₁₈ , C ₁₉ }	{C ₁₈ }	{C ₁₈ }
C ₁₉	{C ₁ , C ₃ , C ₄ , C ₅ , C ₇ , C ₈ , C ₉ , C ₁₀ , C ₁₁ , C ₁₂ , C ₁₃ , C ₁₄ , C ₁₅ , C ₁₉ }	{C ₁ , C ₅ , C ₉ , C ₁₇ , C ₁₈ , C ₁₉ }	{C ₁ , C ₅ , C ₉ , C ₁₉ }

جدول ۶: نتایج تعیین سطح معیارهای اثرگذار بر فرآیند متان زدایی

سطح	معیار	سطح	معیار
۱	تنش‌های مؤثر (القایی) (C ₁₁)	۳	محتوای رطوبت زغال سنگ (C ₁)
۱	تنش‌های برجا (C ₁₂)	۳	نفوذپذیری زغال سنگ (C ₂)
۱	طول چال (C ₁₃)	۲	سیستم درزه‌داری (کلیت‌ها) (C ₃)
۱	قطر چال (C ₁₄)	۲	میزان خاکستر موجود در زغال سنگ (C ₄)
۱	جهت‌یافتگی چال‌ها (C ₁₅)	۳	درجه اشباع گاز (C ₅)
۴	پایداری چال‌ها (C ₁₆)	۳	ضخامت لایه زغال سنگ (C ₆)
۴	چگالی حفاری (C ₁₇)	۱	رتبه زغال سنگ (C ₇)
۵	هزینه‌های عملیاتی و سرمایه‌ای (C ₁₈)	۲	شرایط آب‌های زیرزمینی (C ₈)
۳	فشار زهکشی گاز (C ₁₉)	۳	گاز محتوی (C ₉)
		۱	ساختار زمین‌شناسی روباره لایه (C ₁₀)

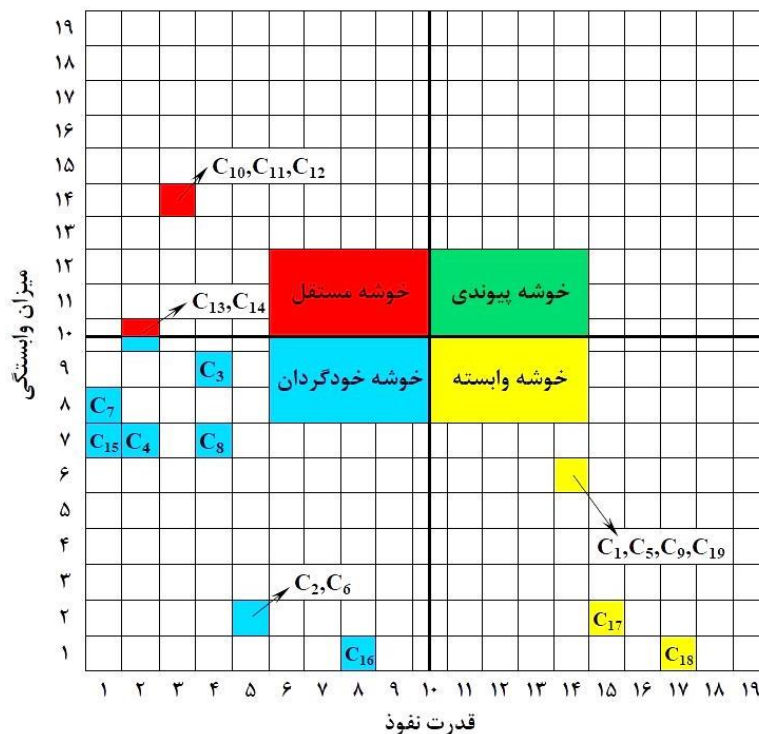


شکل ۲: مدل نهایی سطح‌بندی عوامل اثرگذار بر فرآیند متان زدایی معادن زغال سنگ

فرایند متان‌زدایی در سطح پنجم و پایین‌ترین سطح مدل قرار گرفتند که نشانگر این واقعیت است که اهمیت مسایل ایمنی، زیست‌محیطی و ریسک‌های احتمالی ناشی از وجود متان در معادن زیرزمینی زغال‌سنگ (کارگاه‌ها و پهنه‌های استخراج) بسیار بیشتر از مسایل اقتصادی فعالیت‌های معادن است. این موضوع را می‌توان در پژوهش‌های کاراکان و همکاران [۹] و لی و ژانگ [۳۱] نیز مشاهده کرد که نشان‌دهنده صحت نتایج پژوهش حاضر است.

با توجه به شکل ۳، مشخص می‌شود که معیارهای C_2 ، C_3 ، C_4 ، C_6 ، C_7 ، C_8 ، C_{15} و C_{16} از نوع معیارهای خودگردان (خودمختار) اند زیرا با وجود میزان اثرگذاری‌های مختلفی که بر بازدهی عملیات گاززدایی دارند، بر اساس نمودار MICMAC قدرت نفوذ و وابستگی ضعیفی دارند. معیارهای C_{13} و C_{14} هم در خوشه مربوط به معیارهای خودگردان (خودمختار) قرار دارند و هم جزو معیارهای مستقل محسوب می‌شوند. این بدان معناست که این دو معیار، با توجه به محاسبات انجام گرفته بر مبنای نظرات خبرگان، هر چند که قدرت نفوذ کمتری دارند ولی میزان وابستگی متوسطی دارند و در مرز خوشه‌های مستقل و خودگردان قرار گرفته‌اند. معیارهای C_{10} ، C_{11} و

از سوی دیگر، سیستم درزه‌داری (یعنی کلیت‌های موجود در ساختار زغال‌سنگ)، میزان خاکستر موجود در آن و نیز شرایط آب‌های زیرزمینی با توجه به اثراتی که بر میزان گاز متان موجود دارند و به دلیل اثرگذاری بر فرآیند CMM، در سطح دوم قرار گرفتند که مشابهت قابل توجهی با نتایج پژوهش‌های لاوباک و همکاران [۱۲]، رودریگز و همکاران [۲۴] و گانگ و همکاران [۲۶] دارد. همچنین معیارهای مربوط به میزان گاز موجود در لایه زغال‌سنگ شامل درجه اشباع گاز و گاز محتوی، به موازات معیار فشار زهکشی گاز که جزو معیارهای مهم عملیاتی محسوب می‌شود و نیز مشخصات ذاتی لایه زغال‌سنگ مانند محتوای رطوبت آن و ضخامت لایه، در سطح سوم رده‌بندی شدند. این معیارها هم اثرگذار بر روی معیارهای فنی طراحی حفاری چال‌ها شامل چگالی حفاری و پایداری چال‌های زهکشی‌اند که در سطح چهارم قرار دارند و هم از معیارهای سطح دوم تاثیر می‌پذیرند. قرارگیری معیارهای یاد شده در سطح چهارم مدل ارائه شده نیز نشانگر صحت و دقت نتایج پژوهش بر اساس نتایج مطالعات هانگ و همکاران [۱۸]، کاراکان و همکاران [۲۵] و ژانگ و همکاران [۲۷] است. در نهایت، هزینه‌های سرمایه‌ای و عملیاتی مربوط به



شکل ۳: نمودار تجزیه و تحلیل MICMAC برای معیارهای اثرگذار بر فرایند گاززدایی متان

۷- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، با به‌کارگیری رویکرد مدلسازی ساختاری تفسیری (ISM)، معیارهای اثرگذار بر عملیات متان‌زدایی معادن زیرزمینی زغال‌سنگ مورد بررسی قرار گرفت. سطح‌بندی معیارهای مختلف که با رویکرد ISM انجام شد، نشان می‌دهد که پارامترهای مربوط به ویژگی‌های ژئومکانیکی روباره لایه زغال‌سنگ و پارامترهای عملیاتی چال‌های زهکشی متان در بالاترین سطح قرار گرفتند. این بدان معنی است که اثرگذاری این معیارها بر عملیات متان‌زدایی بیشتر از سایر عوامل است. از سوی دیگر، معیارهای مربوط به سیستم درزه‌داری (کلیت‌ها)، مشخصه‌های مربوط به لایه زغال‌سنگ و پارامترهای مربوط به گاز موجود در آن، با توجه به قرارگیری در سطوح بالاتر مدل (سطوح ۲ و ۳)، تاثیر بسیاری بر کارایی عملیات متان‌زدایی داشته و وابستگی بسیار زیادی با سایر معیارهای اثرگذار دارند. هزینه‌های عملیاتی و سرمایه‌ای با قرار گرفتن در پایین‌ترین سطح مدل (سطح ۵)، کمترین اثرگذاری را بر عملیات متان‌زدایی دارد. دلیل این امر نیز توجه بیشتر خبرگان بر مسایل ایمنی معدن، ریسک‌های احتمالی و خطرات بالقوه ناشی از وجود گاز متان در محدوده معدن و نیز لزوم پیشبرد اهداف استخراجی معادن زیرزمینی است. با انجام تحلیل MICMAC و بررسی نتایج حاصل از آن نیز مشخص شد که عوامل مختلف مورد بررسی در این پژوهش، دارای نقش‌های متفاوتی در راستای کل سامانه (عملیات متان‌زدایی) بوده‌اند و بخش اعظمی از معیارها، در سه خوشه وابسته، خودگردان و مستقل قرار گرفتند و هیچ‌کدام از معیارها، جزو خوشه معیارهای پیوندی نبودند. نتایج پژوهش نشان می‌دهد که مدیران و طراحان معادن زیرزمینی زغال‌سنگ که با مشکل انباشت گاز متان در محدوده معدن مواجه‌اند باید با توجه به معیارهای اثرگذار که در سطوح مختلف مدل ساختاری تفسیری ارائه شده قرار گرفتند، سامانه لازم برای متان‌زدایی را طراحی کرده و با به‌کارگیری روش‌های صحیح و مهندسی سامانه‌های یاد شده، گاز متان موجود در معادن زیرزمینی زغال‌سنگ را برای افزایش ایمنی و کاهش ریسک‌های احتمالی تخلیه کنند.

۸- مراجع

- [1] Hartman, H. L., Mutmansky, J. M., Ramani, R. V., and Wang, Y. J. (2012). "Mine ventilation and air conditioning". 3rd edition. John Wiley & Sons, pp. 752.

C_{12} که در بالاترین سطح اثرگذاری بر کل سامانه (عملیات متان‌زدایی) قرار دارند، جزو معیارهای خوشه مستقل محسوب می‌شوند. دلیل این امر آن است که این معیارها مستقل از سایر عوامل اند و تاثیر قابل ملاحظه‌ای بر کل سامانه ندارند. مشخص است که این معیارها جزو شرایط محیطی معادن زغال‌سنگ است و لایه‌های زغالی تحت تاثیر این معیارها قرار دارند. از سوی دیگر، هر چند که اکثر معیارهای C_1 ، C_5 ، C_9 ، C_{17} ، C_{18} و C_{19} در سطح سوم مدل قرار دارند ولی جزو خوشه معیارهای وابسته‌اند. این معیارها قدرت نفوذ ضعیف و وابستگی بالایی دارند و به نوعی، تضمین‌کننده رشد کل سامانه در بلندمدت محسوب می‌شوند. بنابراین توجه بیشتر به آن‌ها به دلیل الزامات فنی و اجرایی، بسیار ضروری است. نتایج پژوهش نشان می‌دهد که هیچ‌کدام از معیارها جزو معیارهای پیوندی (ارتباطی) نیستند زیرا بر اساس نظرات خبرگان، معیارهای مورد بررسی در این پژوهش غیرایستا نبودند. دلیل این امر نیز نبود تاثیر متقابل سامانه (فرآیند متان‌زدایی) بر معیارها است. چنانچه با دیدگاه مهندسی معدن و زمین‌شناسی به تحلیل نمودار MICMAC حاصل از پژوهش حاضر پرداخته شود، باید یادآور شد که معیارهای طبیعی زغال‌سنگ مانند نفوذپذیری، سیستم کلیت‌ها و شکستگی‌ها، میزان خاکستر، ضخامت لایه، رتبه و شرایط آب‌های زیرزمینی محدوده معدن، با توجه به این که جزو مشخصه‌های ذاتی زغال‌سنگ محسوب می‌شوند، هم دارای قدرت نفوذ کمتر و هم دارای میزان وابستگی کمتری به دیگر معیارها است؛ به عبارت بهتر، این معیارها به صورت مجزا از سایر معیارها، فرآیند متان‌زدایی را تحت‌الشعاع قرار می‌دهند و بیشترین تاثیر را بر کل سیستم دارند. معیارهای واقع در چارک مستقل نمودار یاد شده (ساختار زمین‌شناسی، تنش‌های موثر و برجا، طول و قطر چال)، هر چند که قدرت نفوذ کمتری بر کارایی متان‌زدایی دارند ولی میزان وابستگی آن‌ها به سایر معیارها دارای مقادیر بالایی است. معیارهایی که در این خوشه قرار گرفته‌اند، اکثراً معیارهای محیطی‌اند که عملیات گاززدایی متاثر از آن‌هاست. معیارهای واقع در چارک وابسته نیز معیارهای اجرایی- عملیاتی‌اند که در طول فرآیند متان‌زدایی از معادن زغال‌سنگ، این فرآیند را تحت تاثیر خود قرار می‌دهند. در مورد این معیارها نیز باید اشاره کرد که وابستگی این معیارها به معیارهای ذاتی و محیطی (واقع در چارک‌های دیگر) موجب می‌شود که میزان اثرگذاری آن‌ها در کل سیستم دارای مقادیر اندکی باشد.

- methods for optimum methane control in longwall coal mines*". International Journal of Coal Geology, 79(4): 131-144.
- [15] Gentzis, T. (2009). "Stability analysis of a horizontal coalbed methane well in the Rocky Mountain Front Ranges of southeast British Columbia, Canada". International Journal of Coal Geology, 77(3-4): 328-337.
- [16] Hemza, P., Sivek, M., and Jirásek, J. (2009). "Factors influencing the methane content of coal beds of the Czech part of the Upper Silesian Coal Basin, Czech Republic". International Journal of Coal Geology, 79(1-2): 29-39.
- [17] Sang, S. X., Liu, H. H., Li, Y. M., Li, M. X., and Li, L. (2009). "Geological controls over coal-bed methane well production in southern Qinshui basin". Procedia Earth and Planetary Science, 1(1): 917-922.
- [18] Huang, H., Shuxun, S. A. N. G., Liangcai, F. A. N. G., Guojun, L. I., Hongjie, X. U., and Bo, R. E. N. (2010). "Optimum location of surface wells for remote pressure relief coalbed methane drainage in mining areas". Mining Science and Technology (China), 20(2): 230-237.
- [19] Paul, S., and Chatterjee, R. (2011). "Determination of in-situ stress direction from cleat orientation mapping for coal bed methane exploration in south-eastern part of Jharia coalfield, India". International Journal of Coal Geology, 87(2): 87-96.
- [20] Keim, S. A., Luxbacher, K. D., and Karmis, M. (2011). "A numerical study on optimization of multilateral horizontal wellbore patterns for coalbed methane production in Southern Shanxi Province, China". International Journal of Coal Geology, 86(4): 306-317.
- [21] Liu, H., Yu, F., Yin, R., and Liu, R. (2011). "Effects of Geologic Condition to Mine Gas Distribution and Control Measures". Procedia Earth and Planetary Science, 3: 355-363.
- [22] Moore, T. A. (2012). "Coalbed methane: a review". International Journal of Coal Geology, 101: 36-81.
- [23] Jin, X., Li, J., Yang, Z., and Zhang, P. (2012). "The Optimization of the Coalbed Methane Assessment Indexes in the High Abundance Coalbed Methane Enrichment Area in the Case of the Southern Part of the Qinshui Basin, China". Procedia Earth and Planetary Science, 3: 175-182.
- [24] Rodrigues, C. F., Laiginhas, C., Fernandes, M., De Sousa, M. L., and Dinis, M. A. P. (2014). "The coal cleat system: A new approach to its study". Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 6(3): 208-218.
- [25] Karacan, C. Ö., Drobnik, A., and Mastalerz, M. (2014). [2] Howard, L., Hartman, H. I. (1992). "Methane Drainage". In: Gerald/ L. Finger and Michael/A., Trivets, Handbook of Mining Engineering, Inc. Littleton Colorado, Society for Mining, Metallurgy and Exploration, 896-937.
- [3] Chen, H., Qi, H., Long, R., and Zhang, M. (2012). "Research on 10-year tendency of China coal mine accidents and the characteristics of human factors". Safety Science, 50(4): 745-750.
- [4] Gayer, R., and Harris, I. (Eds.). (1996). "Coalbed methane and coal geology". Geological Society, London, 109: 103-120.
- [5] Su, X., Liu, X., Song, Y., and Zhao, M. (2004). "The classification of coal bed methane reservoirs". Acta Geologica Sinica-English Edition, 78(3): 662-666.
- [6] Solomon, G. (2006). "A major alternative energy opportunity". Eden Energy Ltd., pp. 46.
- [7] Yanbin, Y., Dameng, L., Dazhen, T., Wenhui, H., Shuheng, T., and Yao, C. (2008). "A comprehensive model for evaluating coalbed methane reservoirs in China". Acta Geologica Sinica-English Edition, 82(6): 1253-1270.
- [8] Chen, K. C., Irawan, S., Sum, C. W., and Tunio, S. Q. (2011). "Preliminary study on gas storage capacity and gas-in-place for CBM potential in Balingian coalfield, Sarawak Malaysia". In National Postgraduate Conference (NPC), IEEE, 1-12.
- [9] Karacan, C. Ö., Ruiz, F. A., Cotè, M., and Phipps, S. (2011). "Coal mine methane: a review of capture and utilization practices with benefits to mining safety and to greenhouse gas reduction". International Journal of Coal Geology, 86(2-3): 121-156.
- [10] Crosdale, P. J., Beamish, B. B., and Valix, M. (1998). "Coalbed methane sorption related to coal composition". International Journal of Coal Geology, 35(1-4): 147-158.
- [11] Fox, D. (2009). "Coal bed natural gas development". Natural Resource Specialist, 406: 233-236.
- [12] Laubach, S. E., Marrett, R. A., Olson, J. E., and Scott, A. R. (1998). "Characteristics and origins of coal cleat: a review". International Journal of Coal Geology, 35(1-4): 175-207.
- [13] Laxminarayana, C., and Crosdale, P. J. (1999). "Role of coal type and rank on methane sorption characteristics of Bowen Basin, Australia coals". International Journal of Coal Geology, 40(4): 309-325.
- [14] Karacan, C. Ö. (2009). "Forecasting gob gas venthole production performances using intelligent computing

- of Supply Chains Using Graph Theory and Matrix Methods". European Journal of Industrial Engineering, 1(1): 29-39.
- [36] Huang, J., Tzeng, G., and Ong, Ch. (2005). "Multidimensional data in multi-dimensional scaling using the analytic network process". Pattern Recognition Letters, 26: 755-767.
- [37] Thakkar, J., Deshmukh, S. G., Gupta, A. D., and Shankar, R. (2006). "Development of a balanced scorecard: an integrated approach of interpretive structural modeling (ISM) and analytic network process (ANP)". International Journal of Productivity and Performance Management, 56(1): 25-59.
- [38] Kannan, G., Haq, A. N., Sasikumar, P., and Arunachalam, S. (2008). "Analysis and selection of green suppliers using interpretative structural modeling and analytic hierarchy process". International Journal of Management and Decision Making, 9(2): 163-82.
- [39] Mandal, A., and Deshmukh, S. G. (1994). "Vendor selection using interpretive structural modeling (ISM)". International Journal of Operation & Production Management, 14(6): 52-59.
- [40] Agarwal, A., Shankar, R., and Tiwari, M. K. (2007). "Modeling agility of supply chain". Industrial Marketing Management, 36(4): 443-457.
- [41] Ravi, V., and Shankar, R. (2005). "Analysis of interactions among the barriers of reverse logistics". Technological Forecasting and Social Change, 72(8): 1011-1029.
- [42] Faisal M. N., Banwat D. K. and Shankar R. (2006). "Supply Chain Risk Mitigation: Modeling the Enablers". Business Process Management Journal, 12(4): 532-552.
- [43] Kannan, G., and Haq, A. N. (2007). "Analysis of interactions of criteria and sub-criteria for the selection of supplier in the built-in-order supply chain environment". International Journal of Production Research, 45(17): 3831-3852.
- [44] Thakkar, J., Kanda, A., and Deshmukh, S. G. (2008). "Evaluation of buyer supplier relationships using an integrated mathematical approach of interpretive structural modeling (ISM) and graph theoretic matrix: The case study of Indian automotive SMEs". Journal of Manufacturing Technology Management, 19(1): 92-124.
- [45] Lambert, S. W., Trevits, M. A., and Steidl, P. F. (1980). "Vertical borehole design and completion practices used to remove methane gas from mineable coalbeds". (No. DOE/CMTC/TR-80/2). Department of Energy, Carbondale, IL (USA). Carbondale Mining Technology Center; Bureau of Mines, Pittsburgh, PA (USA).
- "Coal bed reservoir simulation with geostatistical property realizations for simultaneous multi-well production history matching: a case study from Illinois Basin, Indiana, USA". International Journal of Coal Geology, 131: 71-89.
- [26] Gong, B., Zhang, Y., Fan, Y., and Qin, G. (2014). "A novel approach to model enhanced coal bed methane recovery with discrete fracture characterizations in a geochemical simulator". Journal of Petroleum Science and Engineering, 124: 198-208.
- [27] Zhang, L., Yan, X., Yang, X., and Zhao, X. (2015). "An analytical model of coal wellbore stability based on block limit equilibrium considering irregular distribution of cleats". International Journal of Coal Geology, 152: 147-158.
- [28] Tang, D. Z., Deng, C. M., Meng, Y. J., Li, Z. P., Xu, H., Tao, S., and Li, S. (2015). "Characteristics and control mechanisms of coalbed permeability change in various gas production stages". Petroleum Science, 12(4): 684-691.
- [29] Zhao, J., Tang, D., Xu, H., Lv, Y., and Tao, S. (2015). "High production indexes and the key factors in coalbed methane production: A case in the Hancheng block, southeastern Ordos Basin, China". Journal of Petroleum Science and Engineering, 130: 55-67.
- [30] Xin, Z. H. A. O., JIANG, B., Qiang, X. U., Jiegang, L. I. U., Yue, Z. H. A. O., and Piao, D. U. A. N. (2016). "Well pattern design and optimal deployment for coalbed methane development". Petroleum Exploration and Development, 43(1): 89-96.
- [31] Li, S., and Zhang, B. (2016). "Research of Coalbed Methane Development Well-Type Optimization Method Based on Unit Technical Cost". Sustainability, 8(9): pp. 843.
- [32] Zhou, J., Liang, G., Deng, T., and Zhou, S. (2017). "Optimization design of coalbed methane pipeline network-coupled wellbore/reservoir simulation". Advances in Mechanical Engineering, 9(6): 7-8. DOI: 1687814017708905.
- [33] Rezaee, M. J., Yousefi, S., and Hayati, J. (2019). "Root barriers management in development of renewable energy resources in Iran: An interpretative structural modeling approach". Energy Policy, 129: 292-306.
- [34] Yousefi, S., Hayati, J., and Yousefi, S. (2017). "Identification and Management of the Main Challenges in Saffron Industry in Iran". Journal of Industrial Strategic Management (PAJOUHESHGAR), 2(2): 97-114.
- [35] Faisal, M. N., Banwet, D. K., and Shankar, R. (2007). "Quantification of Risk Mitigation Environment

- The Open Petroleum Engineering Journal, 9(1): 289-298.
- [57] Moore, T. A. (2012). "Coalbed methane: a review". International Journal of Coal Geology, 101: 36-81.
- [58] Paul, S., and Chatterjee, R. (2011). "Determination of in-situ stress direction from cleat orientation mapping for coal bed methane exploration in south-eastern part of Jharia coalfield, India". International Journal of Coal Geology, 87(2): 87-96.
- [59] Liu, B., Ao, W. H., Huang, W. H., Xu, Q. L., and Teng, J. (2014). "Comprehensive Analysis of Factors Affecting Coalbed Methane Productivity: A Case Study of Southern Qinshui Basin". In Advanced Materials Research, Trans Tech Publications, 962: 21-28.
- [60] Xie, Z., Zhang, D., Song, Z., Li, M., Liu, C., and Sun, D. (2017). "Optimization of drilling layouts based on controlled presplitting blasting through strata for gas drainage in coal roadway strips". Energies, 10(8): 1228.
- [61] Zhou, J., Liang, G., Deng, T., Zhou, S., and Gong, J. (2017). "Coalbed Methane Production System Simulation and Deliverability Forecasting: Coupled Surface Network/Wellbore/Reservoir Calculation". International Journal of Chemical Engineering, pp. 13.
- [62] Kumar, H., Udayakumar, D. L., Stojcevski, A., and Maung Than Oo, A. M. (2014). "Underground Coal Gasification: An alternate, Economical, and Viable Solution for future Sustainability". International Journal of Engineering Science Invention, 3(1): 56-67.
- [63] Durucan, S., Korre, A., Shi, J. Q., Idiensi, M., Stańczyk, K., Kapusta, K., Rogut-Dabrowska, A., Kempka, T., Wolf, K. H., Younger, P., and Zavsek, S. (2014). "TOPS: Technology options for coupled underground coal gasification and CO₂ capture and storage". Energy Procedia, 63: 5827-5835.
- [64] Rich, J. (2003). "Brain storm: Tap into your creativity to generate awesome ideas and remarkable results". Career Press, pp. 187.
- [۶۵] آقای فیثانی، ت؛ ۱۳۷۷؛ "خلاقیت و نوآوری در انسان‌ها و سازمان‌ها". ترمه، تهران، ۳۵۶ صفحه.
- [۶۶] هیگینز، ج. م؛ ۱۳۸۱؛ "کارآفرینی: ۱۰۱ تکنیک حل خلاق مسئله". ترجمه: محمود احمدپور داریانی، امیرکبیر، تهران، ۲۴۸ صفحه.
- Pittsburgh Mining and Safety Research Center, pp. 163.
- [۴۶] نجفی، م؛ ۱۳۹۳؛ "بررسی تأثیر پارامترهای زمین‌شناسی بر عملیات زهکشی گاز متان از لایه‌های زغال‌سنگ". همایش ملی زمین‌شناسی و اکتشاف منابع، شیراز، ص ۹۴-۱۰۱.
- [۴۷] یزدی، م؛ ۱۳۸۲؛ "زغال سنگ (از منشأ تا اثرات زیست‌محیطی)". انتشارات جهاد دانشگاهی واحد صنعتی امیرکبیر، تهران، ۲۸۰ صفحه.
- [48] Laxminarayana, C., and Crosdale, P. J. (1999). "Role of coal type and rank on methane sorption characteristics of Bowen Basin, Australia coals". International Journal of Coal Geology, 40(4): 309-325.
- [49] Hemza, P., Sivek, M., and Jirásek, J. (2009). "Factors influencing the methane content of coal beds of the Czech part of the Upper Silesian Coal Basin, Czech Republic". International Journal of Coal Geology, 79(1-2): 29-39.
- [50] Black, D. J. (2011). "Factors affecting the drainage of gas from coal and methods to improve drainage effectiveness". (Ph.D. Thesis) University of Wollongong. pp. 149.
- [51] Peng, S. S. (2006). "Longwall mining". 2nd Edition, Morgantown, West Virginia University, pp. 621.
- [52] Meng, S., Li, Y., Wang, L., Wang, K., and Pan, Z. (2018). "A mathematical model for gas and water production from overlapping fractured coalbed methane and tight gas reservoirs". Journal of Petroleum Science and Engineering, 171: 959-973.
- [۵۳] محمدی، ح، آقاجانی، ح، نجفی، م؛ ۱۳۹۰؛ "اولویت‌بندی مناطق مستعد زهکشی گاز متان در حوضه زغالی البرز شرقی با استفاده از فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی". فصلنامه زمین‌شناسی کاربردی، سال هفتم، شماره ۲، ص ۱۶۷-۱۶۷.
- [54] Clarkson, C. R., and Bustin, R. M. (1997). "Variation in permeability with lithotype and maceral composition of Cretaceous coals of the Canadian Cordillera". International Journal of Coal Geology, 33(2): 135-151.
- [55] Lu, T., Guo, Y., and Yang, X. (2016). "Coal seam fracturing by a high-pressure waterjet technique to increase efficiency of coal mine gas drainage". Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy, 116(1): 79-84.
- [56] Likai, Z., Youjun, J., Tianhong, Y., and Xiaoyu, L. (2016). "Analysis on production of coal bed methane considering the change in permeability of coal rock".



Evaluating the Criteria affecting Methane Drainage in Underground Coal Mines Using Interpretive Structural Modeling

Jafarpour A.¹, Najafi M.^{2*}

1- Ph.D Student, Dept. of Mining and Metallurgical Engineering, Yazd University, Yazd, Iran
amir.jafarpour@stu.yazd.ac.ir

2- Associate Professor, Dept. of Mining and Metallurgical Engineering, Yazd University, Yazd, Iran
mehdinajafi@yazd.ac.ir

(Received: 02 Mar. 2019, Accepted: 07 Sep. 2019)

Abstract: The Coal Mine Methane (CMM) process involves: exploration, extraction and drainage of methane gas in underground mining during extraction process. Various factors affect the CMM operation efficiency. Investigating the relationship between these factors and their effect on the process of CMM is very important which has been less attractive to researchers so far. In this research, the effective criteria on the efficiency of CMM were identified using previous studies and expert opinions. Then, the criteria were classified in different levels using the Interpretive Structural Modeling (ISM) method. Then, the underlying relationships between the variables were determined using the experience and practical knowledge of the experts. Finally, a multi-level structural model was created. The results of this study indicated that the coal rank, geomechanical parameters and technical specifications of drilling holes of gas drainage are in the first level with the maximum impact on the process of CMM of underground coal mines. The capital and operational costs related to the CMM process are also at the fifth level of the model and have the least effect on CMM operation. Eventually, by charting the “Matrice d’Impacts Croises-Multiplication Appliquée an Classment” (MICMAC) and its review, the categorization was done for each criterion based on the degree of influence and dependency. The results of this research can be used for management purposes and methane optimization of underground coal mines.

Keywords: Coal Mine Methane (CMM), Interpretive Structural Modeling (ISM), Coal Bed Methane (CBM).

INTRODUCTION

Methane is the most important pollutant gas in underground coal mines. The methane gas explosion is one of the potential hazards in the coal mines that causes many deaths every year around the world [1,2]. On the other hand, increasing energy demand and rapid depletion of its global resources have made it economically viable to produce energy from non-conventional hydrocarbon reservoirs (such as coal resources) [3]. In order to extract the methane gas from coal mines, methane derainage methods are proposed and used. The methane discharge refers to the operation of exploration, extraction, transfer of the gas from the coal seams/mines and the surrounding layers through holes/wells and pipelines [4,5]. Typically, these methods

are divided into two general categories, Coal-Bed Methane (CBM) and Coal Mine Methane (CMM) [6]. There are many factors involved in the CBM and CMM processes. The various geological and extractive conditions in coal basins around the world have led to many methane drainage methods [7]. Also, various parameters and factors affect on the efficiency of methane derainage process and so far little research has been done to evaluate and classify different criteria affecting the efficiency of the methane derainage process from the coal mines. In this study, the influence of different geological parameters, effects of geomechanical and operational factors on each other and the criteria classification based on the internal relationships between different factors have been analyzed and evaluated based on the research conducted and considering the actual conditions of performing the disassembly operation.

METHODS

In this study, the Interpretive Structural Modeling (ISM) approach is used to investigate the effect of different natural and operational criteria on the efficiency of CMM process. In the first step, previous studies on identifying factors affecting the CMM process have been studied. Therefore, the internal relationship of coal has been investigated and then questionnaires have been prepared and provided to experts. Then, the opinions were determined by the experts among these criteria and the ensuing results were analyzed using the ISM approach [8]. The ISM method provided by Warfield is a methodology for establishing and understanding the relationships between elements of a complex system. This method is interpretive, which means that it is up to the experts to decide what variables are related to each other [9]. Also, It is a structural method and it extracts a general structure of a complex set of variables based on communication [10]. On the other hand, it is a modeling method and shows the special relationships of variables as well as the overall structure of a graphical model.

The ISM method is a good way to analyze the impact of one element on another. This methodology examines the order and direction of the complex relationships between elements of a system. In other words, it is a tool by which the system can overcome the complexity between elements [11,12]. By analyzing the criteria at several different levels, its analyzes the relationship between the criteria [13]. This procedure is summarized in the following seven steps [10]:

- 1) Determine the type of content relationship between the criteria;
- 2) Structural Self-Interaction Matrix (SSIM);
- 3) Obtain access matrix;
- 4) Compatibility of the access matrix;
- 5) Determine the level and standard matrix;
- 6) Creating an interpretive structural model and drawing a network of interactions;
- 7) Charting and Analysis of Matrice d'Impacts Croises-Multiplication Appliquée an Classment (MICMAC).

FINDINGS AND ARGUMENT

According to ISM classification (Figure 1), it was found that the coal rank and geomechanical parameters (in-situ and induced stresses), technical criteria related to the drilling of holes (length, diameter and orientation) and the geological structure of overburden of the coal seam have the highest level of impact on the CMM process in the underground coal mines. This is because the significant importance of these criteria from the perspective of researchers and experts. On the other hand, the coal cleats system, the ash content of coal, and the groundwater conditions were on the second level, due to their effects on the amount of methane gas present and its effect on the CMM process. Also the criteria for the amount of gas present in the coal seam, including degree of gas saturation, gas content and the gas drainage pressure are in third level. In addition, the intrinsic characteristics of the coal seam (such as: coal moisture content and coal seam thickness) were ranked in third level. These criteria affect the technical aspects of designing borehole drilling patterns (i.e. the drilling boreholes density and the stability of the drainage boreholes) which are at the fourth level and are influenced by the second level criteria. Finally, the capital and operating costs related to the CMM process were at the fifth and lowest levels of the model and it reflects the fact that the importance of safety, environmental and potential methane risks in underground coal mines (stopes and

extraction panels) is far greater than the economic issues of mining activities.

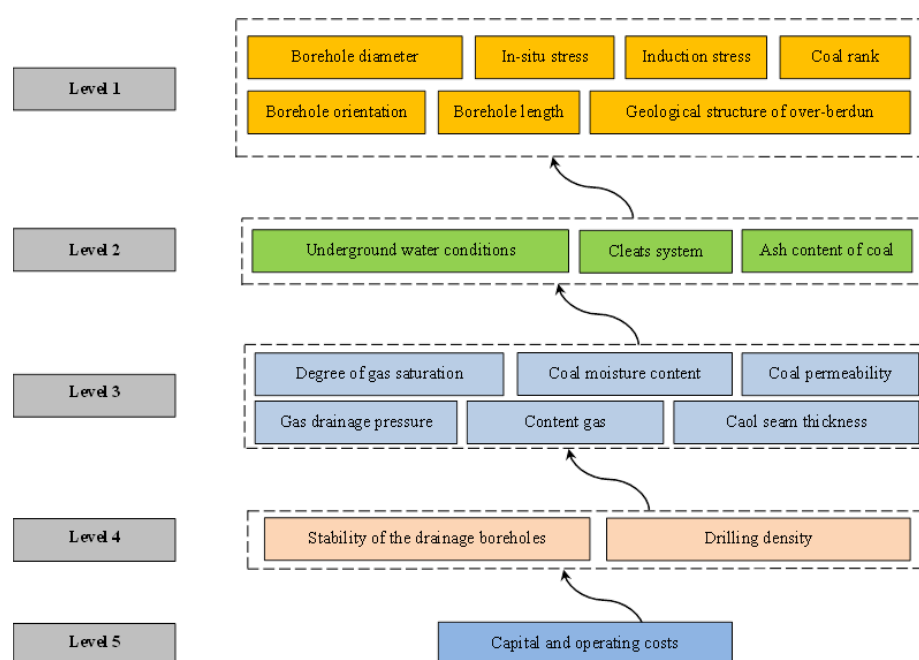


Figure 1. Final modeling of criteria affecting CMM process

CONCLUSIONS

In this study, the criteria affecting the CMM operations of underground coal mines were investigated using the Interpretive Structural Modeling (ISM) approach. The leveling process on the various criteria with ISM approach resulted in five levels of criteria. The results showed that the parameters related to the geomechanical properties of the coal seam and the operating parameters of the methane drainage boreholes were at the highest level. This means that the impact of these criteria on CMM operations is greater than other factors. On the other hand, the criteria for the cleats and joints systems, the characteristics of the coal seam, and the parameters related to the gas contained in the coal have a great impacts on the efficiency of the CMM operation (levels 2 and 3) and is highly depended on other influencing criteria. Operating and capital costs have the least impact on disassembly operations by being at the lowest level of the model (level 5). This is due to the increased attention of experts on mine safety issues, potential risks and potential dangers of methane gas in the mining area, as well as the need to advance underground mining objectives. The results showed that managers and designers of underground coal mines facing with the problem of methane gas accumulation in the mining area should design the necessary degasification systems according to the effective criteria and by using the correct engineering techniques of these systems, drainage methane gas in underground coal mines to increase safety and reduce potential risks.

REFERENCES

- [1] Howard, L., and Hartman, H. I. (1992). "Methane Drainage". In: Gerald/ L. Finger and Michael/A., Trivets, Handbook of Mining Engineering, Inc. Littleton Colorado. Society for Mining, Metallurgy and Exploration, 896-937.
- [2] Chen, H., Qi, H., Long, R., and Zhang, M. (2012). "Research on 10-year tendency of China coal mine accidents and the characteristics of human factors". Safety Science, 50(4): 745-750.
- [3] Su, X., Liu, X., Song, Y., and Zhao, M. (2004). "The classification of coal bed methane reservoirs". Acta Geologica Sinica (English edition), 78(3): 662-666.

- [4] Yanbin, Y., Dameng, L., Dazhen, T., Wenhui, H., Shuheng, T., and Yao, C. (2008). "A comprehensive model for evaluating coalbed methane reservoirs in China". *Acta Geologica Sinica (English Edition)*, 82(6): 1253-1270.
- [5] Chen, K. C., Irawan, S., Sum, C. W., and Tunio, S. Q. (2011). "Preliminary study on gas storage capacity and gas-in-place for CBM potential in Balingian coalfield, Sarawak Malaysia". In National Postgraduate Conference (NPC), IEEE, 1-12.
- [6] Crosdale, P. J., Beamish, B. B., and Valix, M. (1998). "Coalbed methane sorption related to coal composition". *International Journal of Coal Geology*, 35: 147-158.
- [7] Fox, D. (2009). "Coal bed natural gas development". *Natural Resource Specialist*, 406: 233-236.
- [8] Rezaee, M. J., Yousefi, S., and Hayati, J. (2019). "Root barriers management in development of renewable energy resources in Iran: An interpretative structural modeling approach". *Energy Policy*, 129: 292-306.
- [9] Yousefi, S., Hayati, J., and Yousefi, S. (2017). "Identification and Management of the Main Challenges in Saffron Industry in Iran". *Journal of Industrial Strategic Management (PAJOUHESHGAR)*, 2 (2): 97-114.
- [10] Faisal, M. N., Banwet, D. K., and Shankar, R. (2007). "Quantification of Risk Mitigation Environment of Supply Chains Using Graph Theory and Matrix Methods". *European Journal of Industrial Engineering*, 1(1): 29-39.
- [11] Huang, J., Tzeng, G., and Ong, Ch. (2005). "Multidimensional data in multi-dimensional scaling using the analytic network process". *Pattern Recognition Letters*, 26: 755-767.
- [12] Thakkar, J., Deshmukh, S. G., Gupta, A. D., and Shankar, R. (2006). "Development of a balanced scorecard: an integrated approach of interpretive structural modeling (ISM) and analytic network process (ANP)". *International Journal of Productivity and Performance Management*, 56(1): 25-59.
- [13] Kannan, G., Haq, A. N., Sasikumar, P., and Arunachalam, S. (2008). "Analysis and selection of green suppliers using interpretative structural modeling and analytic hierarchy process". *International Journal of Management and Decision Making*, 9(2): 163-82.