

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ
الْحَمْدُ لِلَّهِ الَّذِي
خَلَقَ الْمَوَدَّعَةَ
وَالْحَمْدُ لِلَّهِ الَّذِي
خَلَقَ الْمَوَدَّعَةَ
وَالْحَمْدُ لِلَّهِ الَّذِي
خَلَقَ الْمَوَدَّعَةَ



پردیس خوارزمی
گروه استخراج

پایان نامه کارشناسی ارشد

امکان سنجی انجام عملیات گاز زدایی در معادن زغال سنگ البرز شرقی، مطالعه موردی معدن رضی

کرامت قنبری تیلمی

اساتید راهنما

دکتر فرهنگ سرشکی

دکتر محمد عطائی

استاد مشاور

مهندس امیر صفاری

پایان نامه دوره‌ی کارشناسی ارشد به منظور اخذ درجه کارشناسی ارشد

بهمن ۱۳۹۴



مدیریت تحصیلات تکمیلی
فرم شماره (۶)

باسمه تعالی

شماره: ۳/ ۱۸۵۱
تاریخ: ۹۴، ۱۲، ۱۰
ویرایش: —

فرم صورت جلسه دفاع از پایان نامه تحصیلی دوره کارشناسی ارشد

با تأییدات خداوند متعال و با استعانت از حضرت ولی عصر (عج) نتیجه ارزیابی جلسه دفاع از پایان نامه کارشناسی ارشد خانم / آقای کرامت قنبری نیلمی به شماره دانشجویی ۹۲۳۸۷۸۴ رشته مهندسی معدن گرایش استخراج تحت عنوان " امکان سنجی انجام عملیات گاززدایی در معادن زغال سنگ البرز شرقی. مطالعه موردی معدن رضی " که در تاریخ ۱۳۹۴/۱۱/۲۹ با حضور هیأت محترم داوران در دانشگاه شاهرود برگزار گردید به شرح ذیل اعلام می گردد:

قبول (با درجه : عالی - امتیاز ۱۹.۵) دفاع مجدد مردود

۱- عالی (۲۰ - ۱۹)

۲- بسیار خوب (۱۸/۹۹ - ۱۸)

۳- خوب (۱۶ - ۱۷/۹۹)

۴- قابل قبول (۱۵/۹۹ - ۱۴)

۵- نمره کمتر از ۱۴ غیر قابل قبول

عضو هیأت داوران	نام و نام خانوادگی	مرتبه علمی	امضاء
۱- استاد راهنما	فرهنگ سرشکی		
	محمد عطائی		
۲- استاد مشاور	امیر صفاری		
۳- نماینده شورای تحصیلات تکمیلی	علی عباس نژاد		
۴- استاد ممتحن	رضا خالو کاکایی		
۵- استاد ممتحن	حمید آقاجانی		

امضاء



تقدیم بہ

ہمسرم، کہ صبورا نہ مشوق و ہمراہم بود

و بہ دل بندانم، نیایش و نیلسا، امید بخش جانم کہ آسایش آن ہا آرامش من است.

تقدیر و تشکر

نخستین سپاس و ستایش از آن خداوندی است که بنده کوچکش را در دریای بیکران اندیشه، قطره‌ای ساخت تا وسعت آن را از دریچه اندیشه‌های ناب آموزگارانی بزرگ به تماشا نشیند. لذا اکنون که در سایه‌سار بنده‌نوازی‌هایش پایان‌نامه حاضر به انجام رسیده است، بر خود لازم می‌دانم تا مراتب سپاس را از بزرگوارانی به‌جا آورم که اگر دست یاری‌گیشان نبود، هرگز این پایان‌نامه به اتمام نمی‌رسید.

بدون شک جایگاه معلّم، اجّل از آن است که در مقام قدردانی از زحمات بی‌شائبه‌ی او، با زبان قاصر و دست ناتوان، چیزی بنگاریم، اما از آنجایی که تجلیل از معلّم، سپاس از انسانی است که هدف و غایت آفرینش را تأمین می‌کند و سلامت امانت‌هایی را که به دستش سپرده‌اند تضمین، برحسب وظیفه:

از زحمات اساتید گران‌قدم آقایان **دکتر فرهنگ سرشکی** و **دکتر محمد عطایی** که در کمال سعه-صدر، با حسن خلق و فروتنی، از هیچ کمکی در این عرصه بر من دریغ ننمودند و زحمت راهنمایی این پایان‌نامه را بر عهده داشتند صمیمانه سپاس‌گزارم و برایشان سلامتی، طول عمر و موفقیت در تمام مراحل زندگی را آرزومندم.

هم‌چنین از زحمات استاد مشاورم جناب آقای **مهندس امیر صفاری** به خاطر همکاری بی‌دریغشان در این عرصه صمیمانه سپاس‌گزارم و برایشان سلامتی، طول عمر و موفقیت در تمام مراحل زندگی را آرزومندم. از جناب آقایان **دکتر رضا خالوکاکائی** و **دکتر حمید آقاجانی** که زحمت داوری این پایان‌نامه را بر عهده داشتند صمیمانه کمال تشکر را دارم.

سپاس آخر را از مهربان‌ترین همراهان زندگی‌ام، همسر و دل‌بندانم نیایش و نیلسا دارم که حضورشان در فضای زندگی‌ام مصداق بی‌ریای سخاوت بوده است.

باشد که این خردترین، بخشی از زحمات آنان را سپاس گوید.

تعهدنامه

این جانب کرامت قنبری تیلیمی دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته مهندسی استخراج معدن دانشکده پردیس خوارزمی، دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه امکان سنجی انجام عملیات گاز زدایی در معادن زغال سنگ البرز شرقی، مطالعه موردی معدن رضی تحت راهنمایی آقایان دکتر فرهنگ سرشکی و دکتر محمد عطائی متعهد می شوم:

- تحقیقات در این پایان نامه توسط این جانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است.
- در استفاده از نتایج پژوهش های محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است.
- مطالب مندرج در پایان نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است.
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد و مقالات مستخرج با نام «دانشگاه صنعتی شاهرود» و یا «Shahrood University of Technology» به چاپ خواهد رسید.
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان نامه تأثیرگذار بوده اند در مقالات مستخرج از پایان نامه رعایت می گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که از موجود زنده (یا بافت های آنها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است.

امضای دانشجو

تاریخ

مالکیت نتایج و حق نشر

- کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج، کتاب، برنامه های رایانه ای، نرم افزارها و تجهیزات ساخته شده) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد. این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود.

چکیده

زغال سنگ به عنوان یکی از منابع اصلی انرژی در دنیا قرن‌هاست که مورد استفاده قرار می‌گیرد. حضور گاز متان در معادن زغال سنگ یکی از مهم‌ترین مشکلات عمده در معادن زیرزمینی زغال سنگ است که هر ساله تلفات جانی زیادی در معادن دنیا به وجود می‌آورد. وجود این گاز در معادن نه تنها کار در معدن را سخت و خطرناک می‌کند، بلکه آن را پرهزینه‌تر نیز می‌سازد، زیرا معدن کاران به‌منظور تهویه این گاز از معدن و رهاسازی آن در اتمسفر متحمل هزینه‌های اضافی زیادی می‌شوند. همچنین رهاسازی این گاز در هوا سبب آلودگی بیشتر اتمسفر و افزایش گازهای گلخانه‌ای در هوا می‌شود. با توجه به حجم بالای گاز آزاد شده در بعضی از لایه‌های زغال سنگ، تهویه معدن در مورد چنین لایه‌هایی به تنهایی نمی‌تواند محیطی ایمن برای استخراج زغال سنگ ایجاد کند، بنابراین گاز زدایی قبل از استخراج یا حین استخراج یا پس از استخراج لازم به نظر می‌رسد. بر این اساس با گاز زدایی متان می‌توان میزان خطرهای موجود در این معادن را کاهش داد. لذا در این تحقیق پس از طرح کلیات و بیان تاریخچه مطالعات انجام شده در این زمینه به بررسی فرآیند گاز زدایی و روش‌های گاز زدایی در معادن زغال سنگ پرداخته شده است. در ادامه به بررسی عوامل زمین‌شناسی مؤثر بر فرآیند متان زدایی پرداخته شد و به بررسی قابلیت گاز زدایی در معادن کلاریز شرقی، رزمجای غربی، برناکی، بزرگ، رضی و تخت از مجموعه معادن زغال سنگ البرز شرقی با استفاده از روش سیستم‌های مهندسی سنگ پرداخته شد. مشخص شد معدن زغال سنگ رضی دارای قابلیت مناسبی برای انجام عملیات گاز زدایی است که شواهد و اتفاقات رخ داده در این معدن نیز شاهدی بر این ادعا است. سپس با استفاده از روش تحلیل سلسله مراتبی فازی به انتخاب روش مناسب پیش زهکشی در این معدن پرداخته شد که مشخص شد روش پیش زهکشی با استفاده از گمانه‌های قائم مناسب‌ترین روش زهکشی در این معدن است و در انتها به بررسی فنی و اقتصادی در این معدن پرداخته شده است. محاسبات انجام گرفته حاکی از غیر اقتصادی بودن گازکشی متان از معدن زغال سنگ رضی است. از آنجایی که قیمت گاز مصرفی در ایران رو به افزایش است، با حذف یارانه‌ها از حامل‌های انرژی و در نظر گرفتن کاهش هزینه پس از انجام

عملیات گازکشی برای استخراج زغال سنگ، همچنین مزایای مربوط به ایمنی کارکنان در این معدن می توان آن را به سمت اقتصادی بودن پیش برد.

کلمات کلیدی: زغال سنگ، معادن زغال سنگ البرز شرقی، معدن زغال سنگ رضی، گاز زدایی، سیستم مهندسی سنگ، تحلیل سلسله مراتبی فازی.

مقالات مستخرج از پایان نامه

مقاله کنفرانسی

قنبری تیلمی ک.، سرشکی ف.، عطائی م و صفاری ا. (۱۳۹۴). "بررسی پتانسیل گاز زدایی معادن زغال سنگ به روش سیستم مهندسی سنگ، مطالعه موردی معادن زغال سنگ البرز شرقی"، اولین کنفرانس مدیریت مخاطرات در معادن و فضاهاى زیرزمینی، ۲۷ تا ۲۹ بهمن ۱۳۹۴، دانشگاه صنعتی امیر کبیر.

فهرست مطالب

صفحه	عنوان
۱	فصل ۱: کلیات تحقیق
۲	۱-۱- مقدمه
۲	۲-۱- بیان مسئله
۴	۳-۱- ضرورت تحقیق
۵	۴-۱- اهداف تحقیق
۶	۵-۱- ساختار تحقیق
۷	فصل ۲: بررسی سابقه علمی موضوع
۸	۱-۲- مقدمه.
۸	۲-۲- بررسی سابقه علمی موضوع
۱۱	۳-۲- نتیجه گیری
۱۳	فصل ۳: فرآیند گاز زدایی و روش های گاز زدایی در معادن زغال سنگ
۱۴	۱-۳- مقدمه
۱۴	۲-۳- طبقه بندی زغال سنگ ها از نظر تصاعد گاز
۱۴	۱-۲-۳- معادن طبقه یک
۱۴	۲-۲-۳- معادن طبقه دو
۱۴	۳-۲-۳- معادن طبقه سه
۱۵	۴-۲-۳- معادن ماوراء طبقه
۱۵	۳-۳- گازهای موجود در زغال سنگ
۱۶	۴-۳- جریان گاز و نشر آن از زغال سنگ
۱۷	۵-۳- فرآیند متان زدایی
۱۸	۱-۵-۳- زهکشی متان از لایه های زغال سنگ (CBM)
۲۰	۲-۵-۳- زهکشی متان از داخل معدن (CMM)
۲۲	۳-۵-۳- روش بهبود یافته متان زدایی از لایه های زغال سنگ (ECBM)
۲۴	۶-۳- مزایای روش زهکشی متان
۲۴	۱-۶-۳- کاهش زمان های توقف
۲۴	۲-۶-۳- کاهش هزینه های مربوط به تهویه
۲۴	۳-۶-۳- کاهش هزینه سرمایه گذاری اولیه
۲۵	۴-۶-۳- افزایش ذخایر زغال سنگ قابل استخراج
۲۵	۵-۶-۳- افزایش ایمنی
۲۵	۶-۶-۳- کاهش مسائل مربوط به انتشار ذرات ریز و گردوغبار

فهرست مطالب

صفحه	عنوان
۲۶	۳-۶-۷- کاهش مسائل مربوط به آب
۲۶	۳-۶-۸- شرایط کاری ایمن تر و راحت تر
۲۶	۳-۶-۹- تأمین برق مورد نیاز معدن
۲۶	۳-۷-۷- مقایسه گاز CBM با گاز طبیعی
۲۷	۳-۸-۸- موارد استفاده از گاز CBM برحسب نوع گاز
۲۷	۳-۸-۱- گاز با ارزش حرارتی بالا
۲۸	۳-۸-۲- گاز با ارزش حرارتی متوسط
۲۹	۳-۸-۳- گاز با ارزش حرارتی پایین
۲۹	۳-۹-۹- راهکارهای مدیریتی به منظور افزایش نرخ گاز کشی
۲۹	۳-۹-۱- تعیین فاصله بهینه گمانه‌ها
۲۹	۳-۹-۲- تعیین فاصله بهینه گمانه‌ها
۳۱	۳-۹-۳- افزایش زمان گاز کشی
۳۱	۳-۹-۴- بهبود کیفیت گاز خروجی
۳۱	۳-۹-۵- بهبود سیستم پایش گاز
۳۱	۳-۱۰-۱- مسائل زیست‌محیطی و مشکلات موجود در اجرای یک پروژه
۳۲	۳-۱۰-۱-۱- میزان آب استحصال شده
۳۲	۳-۱۰-۲- میزان گاز متان رهاشده در هوا
۳۳	۳-۱۰-۳- آلودگی صوتی و هوا ناشی از کمپرسورها و سایر تجهیزات
۳۳	۳-۱۰-۴- برهم زدن منظره طبیعی سطح زمین
۳۳	۳-۱۰-۵- در دسترس نبودن خطوط انتقال گاز
۳۳	۳-۱۰-۶- دسترسی به زمین
۳۴	۳-۱۰-۷- پایین بودن نرخ گاز کشی
۳۴	۳-۱۰-۸- قیمت گاز طبیعی
۳۴	۳-۱۱-۱۱- روش‌های مختلف متان زدایی
۳۴	۳-۱۱-۱۱-۱- مقدمه
۳۴	۳-۱۱-۱۱-۲- متان زدایی پیش از معدنکاری
۳۵	۳-۱۱-۱۱-۳- متان زدایی با حفر گمانه قائم از سطح زمین
۳۹	۳-۱۱-۱۱-۳-۲- متان زدایی با گمانه عمودی از داخل معدن
۴۱	۳-۱۱-۱۱-۳-۳- زهکشی متان با گمانه افقی

فهرست مطالب

صفحه	عنوان
۴۸	۳-۱۱-۲-۴- زهکشی با گمانه جهت‌دار
۴۹	۳-۱۱-۳- زهکشی همراه با معدنکاری
۵۰	۳-۱۱-۳-۱- زهکشی متان از لایه استخراجی و لایه‌های مجاور
۵۳	۳-۱۱-۲- زهکشی متان از منطقه تخریب‌شده
۵۸	۳-۱۲- انواع روش‌های حفاری گمانه‌های CBM
۵۸	۳-۱۲-۱- حفاری قائم
۵۹	۳-۱۲-۲- حفاری افقی
۶۱	۳-۱۲-۳- حفاری جهت‌دار
۶۳	۳-۱۳- مقایسه روش‌های مختلف زهکشی متان و شرایط قابل کار آن‌ها
۶۷	۳-۱۴- تأثیر روش زهکشی متان بر کمیت و کیفیت گاز خروجی
۶۸	۳-۱۵- افزایش نفوذپذیری لایه زغال‌سنگ
۶۹	۳-۱۵-۱- عمل‌آوری شیمیایی لایه‌های زغال‌سنگ
۷۰	۳-۱۵-۲- شکست الکتروهیدرولیکی
۷۱	۳-۱۵-۳- شکست هیدرولیکی در زیرزمین
۷۱	۳-۱۵-۴- پمپاژ آب تحت فشار بالا
۷۲	۳-۱۵-۵- شکاف‌زنی
۷۳	۳-۱۵-۶- آتشکاری
۷۴	۳-۱۵-۷- تزریق آب
۷۵	۳-۱۶- فرآیند تصمیم‌گیری در اجرای یک پروژه CBM در یک منطقه معدنی
۸۱	فصل ۴: بررسی عوامل زمین‌شناسی مؤثر بر فرایند متان زدایی
۸۲	۴-۱- مقدمه
۸۲	۴-۲- فرآیند زغالی شدن
۸۲	۴-۳- گاز زغال‌سنگ
۸۵	۴-۳-۱- نحوه تشکیل گاز متان
۸۵	۴-۴- پارامترهای زمین‌شناسی مؤثر بر عملیات تولید متان از لایه‌های زغال‌سنگ
۸۷	۴-۴-۱- ناپیوستگی‌های لایه زغال‌سنگ
۹۰	۴-۴-۲- رگه‌های رس
۹۰	۴-۴-۳- کانال‌های ماسه‌سنگی
۹۱	۴-۴-۴- گسل
۹۴	۴-۴-۵- ضخامت لایه زغال‌سنگ

فهرست مطالب

صفحه	عنوان
۹۴	۴-۴-۶- رتبه زغال سنگ
۹۶	۴-۴-۷- نفوذپذیری
۱۰۰	۴-۴-۸- عمق
۱۰۱	۴-۴-۹- گاز محتوی
۱۰۲	۴-۴-۱۰- حجم ذخیره
۱۰۲	۴-۵- اطلاعات اولیه لازم در پروژه متان زدایی
۱۰۴	۴-۶- اطلاعات اولیه لازم در پروژه متان زدایی
۱۰۵	۴-۷- جمع بندی
۱۰۷	فصل ۵: امکان سنجی انجام عملیات گاز زدایی در معادن زغال سنگ البرز شرقی
۱۰۸	۵-۱- مقدمه
۱۱۰	۵-۲- تعیین پارامترهای مؤثر
۱۱۰	۵-۳- روش سیستم‌های مهندسی سنگ (RES)
۱۱۱	۵-۳-۱- مفهوم سیستم و تفکر سیستمی
۱۱۲	۵-۳-۲- ماتریس‌های اندر کنش
۱۱۳	۵-۳-۳- کدگذاری ماتریس‌های اندر کنش
۱۱۴	۵-۳-۳-۱- روش نیمه عددی خیره
۱۱۴	۵-۳-۳-۴- نمودار علت-اثر
۱۱۷	۵-۴- الویت بندی پتانسیل بهره‌برداری از مناطق زغالی البرز شرقی با استفاده از روش سیستم‌های مهندسی سنگ (RES)
۱۲۰	۵-۵- تشکیل فهرست‌های رده‌بندی سیستم طبقه‌بندی
۱۲۲	۵-۶- تعریف اندیس پتانسیل گازکشی زغالسنگ (CBMPi)
۱۲۳	۵-۷- حوضه زغالی البرز شرقی
۱۲۵	۵-۷-۱- منطقه طزره
۱۲۵	۵-۷-۱-۱- منطقه پشکلات
۱۲۸	۵-۷-۱-۲- منطقه کلاریز
۱۲۹	۵-۷-۱-۳- منطقه رزمجا
۱۲۹	۵-۷-۲- منطقه طزره
۱۳۰	۵-۷-۲-۱- منطقه قشلاق
۱۳۰	۵-۷-۲-۲- منطقه تخت
۱۳۱	۵-۷-۲-۳- منطقه اولنگ

فهرست مطالب

صفحه	عنوان
۱۳۲	۵-۸- رده بندی معادن البرز شرقی از نظر پتانسیل گازکشی
۱۳۳	۵-۹- روش تحلیل سلسله مراتبی فازی (FAHP)
۱۳۵	۵-۹-۱- مراحل روش تحلیل سلسله مراتبی فازی
۱۳۹	۵-۱۰- تعیین روش مناسب گازکشی معدن رضی با استفاده از روش تحلیل سلسله مراتبی فازی
۱۵۹	۵-۱۱- نتیجه گیری
۱۶۱	فصل ۶: بررسی فنی اقتصادی گاززدایی از معدن زغال سنگ رضی
۱۶۲	۶-۱- مقدمه
۱۶۲	۶-۲- گازکشی متان به عنوان یک درآمد
۱۶۳	۶-۳- هزینه های فرآیند CBM
۱۶۹	۶-۴- بررسی فنی و اقتصادی گاززدایی از معدن زغال سنگ رضی
۱۷۲	۶-۵- نتیجه گیری
۱۷۳	فصل ۷: نتیجه گیری و پیشنهادها
۱۷۴	۷-۱- نتیجه گیری
۱۷۵	۷-۲- پیشنهادها
۱۷۶	منابع و مراجع

فهرست شکل‌ها

صفحه

عنوان شکل

- شکل ۱-۱: سهم گاز زدایی متان در مقایسه با مجموع گازهای طبیعی در ایالات متحده آمریکا، (گذشته، حال و آینده) ۴
- شکل ۱-۳: شمایی از گمانه‌ی زهکشی گاز ۱۹
- شکل ۲-۳: شمایی از جانمایی تأسیسات CBM ۲۰
- شکل ۳-۳: شمایی سه‌بعدی از روش متان زدایی جبهه کار طولانی به همراه تأسیسات سطحی آن ۲۱
- شکل ۴-۳: فرایند CMM ۲۲
- شکل ۵-۳: فرایند ECBM ۲۳
- شکل ۶-۳: میزان ذرات گردوغبار ناشی از عملکرد دستگاه شیر نسبت به متوسط سرعت هوا در سینه کار ۲۵
- شکل ۷-۳: مقایسه بین گاز طبیعی و گاز CBM از نقطه نظر تولید ۲۷
- شکل ۸-۳: تأثیر زهکشی آب در فرایند CBM بر روی زمین‌های اطراف ۳۲
- شکل ۹-۳: زهکشی متان توسط گمانه قائم ۳۶
- شکل ۱۰-۳: تأسیسات سر چاهی در روش شکافت هیدرولیکی ۳۸
- شکل ۱۱-۳: روش شکافت هیدرولیکی و ایجاد حفره در گمانه‌های قائم ۳۸
- شکل ۱۲-۳: گمانه‌های عمودی به داخل طبقات سقف پیش از معدنکاری ۴۰
- شکل ۱۳-۳: تأسیسات سر چاهی گمانه‌های عمودی در معادن ۴۰
- شکل ۱۴-۳: شمایی از زهکشی متان در یک معدن با استفاده از گمانه‌های افقی ۴۱
- شکل ۱۵-۳: تصویر افقی از حفر گمانه‌های افقی در جهت عمود بر کلیت‌ها ۴۲
- شکل ۱۶-۳: زهکشی متان پیش از معدنکاری از انتهای چاه قائم با استفاده از گمانه‌های افقی ۴۳
- شکل ۱۷-۳: زهکشی متان با استفاده از گمانه‌های افقی از داخل معدن متروکه در یوتا ۴۴
- شکل ۱۸-۳: حفاری گمانه‌های افقی با طول بلند پیش از معدنکاری روش جبهه کار طولانی ۴۵
- شکل ۱۹-۳: گمانه‌های افقی با طول کوتاه پیش از معدنکاری عمود بر پهنه استخراجی در روش جبهه کار طولانی ۴۶
- شکل ۲۰-۳: حفاری گمانه‌های زهکشی افقی از داخل راهرو اصلی به داخل لایه زغال‌سنگ ۴۷
- شکل ۲۱-۳: حفاری گمانه‌های زهکشی افقی از داخل میان‌برها به داخل لایه زغال‌سنگ ۴۷
- شکل ۲۲-۳: حفاری گمانه‌های زهکشی افقی از داخل میان‌برها به داخل پهنه روش جبهه کار طولانی ۴۸
- شکل ۲۳-۳: شمایی از انواع گمانه‌های جهت‌دار ۴۹
- شکل ۲۴-۳: روش نصب پمپ آبکشی در حفاری جهت‌دار با شعاع کم ۴۹
- شکل ۲۵-۳: گاز کشی همراه با معدنکاری از لایه استخراجی و لایه‌های مجاور ۵۰
- شکل ۲۶-۳: زهکشی متان با استفاده از گمانه‌های افقی با طول کوتاه در روش جبهه کار طولانی با پیشروی سینه کار ۵۱

فهرست شکل‌ها

- شکل ۳-۲۷: حفاری گمانه‌های زهکشی افقی با طول بلند از داخل میان‌برها به داخل پهنه روش جبهه کار طولانی
۵۲
- شکل ۳-۲۸: شمایی از زهکشی متان از لایه‌های زیرین
۵۲
- شکل ۳-۲۹: روش‌های مختلف زهکشی همراه با معدنکاری از مواد تخریب‌شده
۵۳
- شکل ۳-۳۰: متان زدایی از روش جبهه کار طولانی توسط گمانه‌های قائم و سایر روش‌های مرسوم
۵۴
- شکل ۳-۳۱: انواع روش‌های آزمایشی از حفر گمانه‌های قائم در منطقه تخریب
۵۵
- شکل ۳-۳۲: شمایی از یک گمانه قائم حفاری شده در مواد تخریب‌شده
۵۵
- شکل ۳-۳۳: متان زدایی از منطقه تخریب و لایه زغال سنگ
۵۶
- شکل ۳-۳۴: نحوه گاز کشی از داخل منطقه تخریب‌شده به همراه آرایش گمانه‌ها
۵۷
- شکل ۳-۳۵: نحوه‌ی حفر گمانه‌های تقاطعی
۵۷
- شکل ۳-۳۶: جانمایی گمانه‌ها (با روش زهکشی از گمانه قائم)
۵۸
- شکل ۳-۳۷: شمایی از استفاده دستگاه حفاری برای حفر گمانه به صورت افقی در داخل لایه زغال سنگ
۵۹
- شکل ۳-۳۸: آرایش انشعاب گمانه‌ها در روش حفاری افقی
۶۰
- شکل ۳-۳۹: نمای سه‌بعدی از حفاری افقی با سه انشعاب
۶۰
- شکل ۳-۴۰: حفاری قائم و جهت‌دار
۶۲
- شکل ۳-۴۱: تأثیر تزریق آب پرفشار بر لایه‌های زغال سنگ و نرخ گازخیزی
۷۲
- شکل ۳-۴۲: مدل تصمیم‌گیری برای یک پروژه CBM
۷۸
- شکل ۴-۱: مراحل تشکیل زغال
۸۳
- شکل ۴-۲: فرایند تشکیل زغال سنگ و انواع آن
۸۴
- شکل ۴-۳: روش قرارگیری گاز در سطح زغال سنگ
۸۶
- شکل ۴-۴: کلیت‌ها و شبکه شکستگی‌ها در زغال سنگ
۸۷
- شکل ۴-۵: حرکت گاز متان از داخل کلیت‌ها و سطح زغال سنگ
۸۸
- شکل ۴-۶: الگوی زهکشی بیضوی در نتیجه تغییرات نفوذپذیری
۸۹
- شکل ۴-۷: وجود رگه‌های رس در لایه زغال سنگ و جهت حرکت متان در داخل آن
۹۰
- شکل ۴-۸: کانال‌های ماسه‌سنگی و تأثیر آن‌ها بر حرکت متان
۹۱
- شکل ۴-۹: روش متان زدایی از کانال ماسه‌سنگی در صورتی که به صورت مانع عمل کند
۹۱
- شکل ۴-۱۰: روش متان زدایی از کمرباطین گسل نرمال
۹۲
- شکل ۴-۱۱: روش متان زدایی از کمرباطی گسل نرمال
۹۳

فهرست شکل‌ها

صفحه	عنوان شکل
۹۳	شکل ۴-۱۲: روش متان زدایی از کمربالای گسل معکوس
۹۴	شکل ۴-۱۳: روش متان زدایی از کمربالای گسل معکوس
۹۵	شکل ۴-۱۴: گاز محتوی زغال سنگ با توجه به رتبه آن
۹۶	شکل ۴-۱۵: تأثیر رتبه زغال سنگ بر میزان گاز زهکشی
۱۰۰	شکل ۴-۱۶: ارتباط بین نفوذپذیری با عمق
۱۰۰	شکل ۴-۱۷: ارتباط حجم گاز ذخیره شده در لایه زغال سنگ نسبت به نوع زغال سنگ و عمق قرارگیری لایه
۱۰۱	شکل ۴-۱۸: رابطه بین نفوذپذیری و گاز محتوی نسبت به عمق
۱۰۲	شکل ۴-۱۹: ارتباط پارامترهای تأثیرگذار بر تولید گاز از لایه زغال سنگ
۱۱۲	شکل ۵-۱: مفهوم ساختار رویکرد سیستم‌ها
۱۱۳	شکل ۵-۲: مفهوم ماتریس اندرکنش در RES برای سیستمی شامل دو پارامتر A و B
۱۱۵	شکل ۵-۳: کدگذاری ماتریس اندرکنش و شکل گیری محورهای علت و اثر در ماتریس اندرکنش
۱۱۶	شکل ۵-۴: نمودار علت-اثر تعمیم داده شده به N پارامتر
۱۱۸	شکل ۵-۵: نمودار علت-اثر برای مسأله پتانسیل گاز کشی معادن البرز شرقی
۱۱۹	شکل ۵-۶: هیستوگرام شدت اندرکنش پارامترها
۱۲۰	شکل ۵-۷: وزن نهایی پارامترهای مؤثر در گاز کشی زغال سنگ با روش سیستم‌های مهندسی سنگ
	شکل ۵-۸: الف) موقعیت جغرافیایی و راه‌های دسترسی به برش چینه‌شناسی ناحیه طزره که در آن گسترش سازند شمشک در البرز مرکزی و شرقی مشخص شده است ب) نقشه شماتیک مناطق زغال دار شرکت البرز شرقی
۱۳۵	شکل ۵-۹: تابع عضویت فازی برای متغیرهای زبانی
۱۳۶	شکل ۵-۱۰: درجه بزرگی دو عدد فازی نسبت به هم
۱۴۰	شکل ۵-۱۱: نمودار سلسله مراتبی انتخاب روش مناسب گاز کشی معدن رضی با ۹ پارامتر و ۴ گزینه
۱۴۱	شکل ۵-۱۲: تابع عضویت فازی برای متغیرهای زبانی در روش تحلیل سلسله مراتبی فازی مسئله گاز کشی معدن رضی
۱۵۹	شکل ۵-۱۳: وزن نهایی گزینه‌های پیش زهکشی در معدن رضی بر اساس بردارهای وزن محاسبه شده
۱۶۷	شکل ۶-۱: تولید برق از گاز متان و مشخص شدن زمان کاهش جریان گاز (شامل ۳ موتور و یک Flare)

فهرست جدول‌ها

صفحه	عنوان جدول
۹	جدول ۱-۲: خلاصه‌ای از مطالعات انجام گرفته شده در ارتباط با موضوع مورد مطالعه
۶۳	جدول ۱-۳: روش‌های زهکشی متان و شرایط قابل کار این روش‌ها
۶۴	جدول ۲-۳: مزایا و معایب روش‌های مختلف زهکشی متان
۶۸	جدول ۳-۳: کمیت و کیفیت گاز خروجی بسته به روش زهکشی متان
۱۰۳	جدول ۱-۴: اطلاعات منابع و داده‌های مورد نیاز برای ذخایر
۱۰۳	جدول ۲-۴: معیارهای زمین‌شناسی مورد انتظار در اجرای CBM
۱۰۳	جدول ۳-۴: تأثیر پارامترهای زمین‌شناسی بر میزان زهکشی گاز در دو حوضه زغالی مختلف در آمریکا
۱۰۴	جدول ۴-۴: طبقه‌بندی لایه‌های زغال‌سنگ از دیدگاه قابلیت گاز کشی
۱۱۴	جدول ۱-۵: کدهای انتخابی در روش کدگذاری نیمه کمی خبره
۱۱۶	جدول ۲-۵: شمای کلی از یک جدول حاصله از یک ماتریس اندرکنش
۱۱۷	جدول ۳-۵: ماتریس اندرکنش کدگذاری شده
۱۲۰	جدول ۴-۵: محاسبه وزن پارامترهای مؤثر بر گاز کشی با روش سیستم‌های مهندسی سنگ
۱۲۱	جدول ۵-۵: منوهای رده‌بندی در نظر گرفته شده برای پارامترها
۱۲۳	جدول ۶-۵: بازه بندی اندیس پتانسیل گاز کشی زغال‌سنگ
۱۳۳	جدول ۷-۵: محاسبه اندیس پتانسیل گاز کشی زغال‌سنگ برای معادن زغال‌سنگ البرز شرقی
۱۳۴	جدول ۸-۵: نمونه‌ای از اعداد فازی تعریف شده در روش تحلیل سلسله مراتبی فازی
۱۴۰	جدول ۹-۵: اعداد فازی تعریف شده در روش تحلیل سلسله مراتبی فازی مسئله گاز کشی معدن رضی
۱۴۱	جدول ۱۰-۵: اهمیت هر یک از معیارها از دیدگاه هدف
۱۴۲	جدول ۱۱-۵: اهمیت هر یک از گزینه‌ها از دیدگاه معیارها
۱۴۲	جدول ۱۲-۵: اهمیت هر یک از معیارها از دیدگاه هدف از دیدگاه متخصص ۱
۱۴۲	جدول ۱۳-۵: اهمیت هر یک از معیارها از دیدگاه هدف از دیدگاه متخصص ۲
۱۴۳	جدول ۱۴-۵: اهمیت هر یک از گزینه‌ها از دیدگاه معیارها از دیدگاه متخصص ۱
۱۴۳	جدول ۱۵-۵: اهمیت هر یک از گزینه‌ها از دیدگاه معیارها از دیدگاه متخصص ۲
۱۴۴	جدول ۱۶-۵: ماتریس مقایسه زوجی اهمیت هر یک از معیارها از دیدگاه هدف از دیدگاه متخصص ۱
۱۴۴	جدول ۱۷-۵: ماتریس مقایسه زوجی اهمیت هر یک از معیارها از دیدگاه هدف از دیدگاه متخصص ۲
۱۴۵	جدول ۱۸-۵: ماتریس مقایسه زوجی اهمیت هر یک از گزینه‌ها از دیدگاه معیار نفوذپذیری از دیدگاه متخصص ۱
۱۴۵	جدول ۱۹-۵: ماتریس مقایسه زوجی اهمیت هر یک از گزینه‌ها از دیدگاه معیار نفوذپذیری از دیدگاه متخصص ۲
۱۴۵	جدول ۲۰-۵: ماتریس مقایسه زوجی اهمیت هر یک از گزینه‌ها از دیدگاه معیار جریان آب (رطوبت) از دیدگاه متخصص ۱
۱۴۵	جدول ۲۱-۵: ماتریس مقایسه زوجی اهمیت هر یک از گزینه‌ها از دیدگاه معیار جریان آب (رطوبت) از دیدگاه متخصص ۲
۱۴۵	جدول ۲۲-۵: ماتریس مقایسه زوجی اهمیت هر یک از گزینه‌ها از دیدگاه معیار ناپیوستگی‌ها (گسل‌ها) از دیدگاه متخصص ۱

فهرست جدول‌ها

صفحه	عنوان جدول
۱۴۵	جدول ۵-۲۳: ماتریس مقایسه زوجی اهمیت هر یک از گزینه‌ها از دیدگاه معیار ناپیوستگی‌ها (گسل‌ها) از دیدگاه متخصص ۲
۱۴۶	جدول ۵-۲۴: ماتریس مقایسه زوجی اهمیت هر یک از گزینه‌ها از دیدگاه معیار گستردگی زغال‌سنگ از دیدگاه متخصص ۱
۱۴۶	جدول ۵-۲۵: ماتریس مقایسه زوجی اهمیت هر یک از گزینه‌ها از دیدگاه معیار گستردگی زغال‌سنگ از دیدگاه متخصص ۲
۱۴۶	جدول ۵-۲۶: ماتریس مقایسه زوجی اهمیت هر یک از گزینه‌ها از دیدگاه معیار نوع زغال‌سنگ از دیدگاه متخصص ۱
۱۴۶	جدول ۵-۲۷: ماتریس مقایسه زوجی اهمیت هر یک از گزینه‌ها از دیدگاه معیار نوع زغال‌سنگ از دیدگاه متخصص ۲
۱۴۶	جدول ۵-۲۸: ماتریس مقایسه زوجی اهمیت هر یک از گزینه‌ها از دیدگاه معیار گاز محتوی از دیدگاه متخصص ۱
۱۴۶	جدول ۵-۲۹: ماتریس مقایسه زوجی اهمیت هر یک از گزینه‌ها از دیدگاه معیار گاز محتوی از دیدگاه متخصص ۲
۱۴۷	جدول ۵-۳۰: ماتریس مقایسه زوجی اهمیت هر یک از گزینه‌ها از دیدگاه معیار عمق قرارگیری از دیدگاه متخصص ۱
۱۴۷	جدول ۵-۳۱: ماتریس مقایسه زوجی اهمیت هر یک از گزینه‌ها از دیدگاه معیار عمق قرارگیری از دیدگاه متخصص ۲
۱۴۷	جدول ۵-۳۲: ماتریس مقایسه زوجی اهمیت هر یک از گزینه‌ها از دیدگاه معیار میزان ذخیره از دیدگاه متخصص ۱
۱۴۷	جدول ۵-۳۳: ماتریس مقایسه زوجی اهمیت هر یک از گزینه‌ها از دیدگاه معیار میزان ذخیره از دیدگاه متخصص ۲
۱۴۷	جدول ۵-۳۴: ماتریس مقایسه زوجی اهمیت هر یک از گزینه‌ها از دیدگاه معیار ضخامت لایه زغال‌سنگ از دیدگاه متخصص ۱
۱۴۷	جدول ۵-۳۵: ماتریس مقایسه زوجی اهمیت هر یک از گزینه‌ها از دیدگاه معیار ضخامت لایه زغال‌سنگ از دیدگاه متخصص ۲
۱۴۸	جدول ۵-۳۶: میانگین هندسی ماتریس مقایسه زوجی اهمیت هر یک از معیارها از دیدگاه هدف از دیدگاه متخصص ۱ و ۲
۱۴۹	جدول ۵-۳۷: وزن نهایی معیارها از دیدگاه هدف
۱۵۰	جدول ۵-۳۸: میانگین هندسی ماتریس مقایسه زوجی اهمیت هر یک از گزینه‌ها از دیدگاه معیار نفوذپذیری از دیدگاه متخصص ۱ و ۲
۱۵۰	جدول ۵-۳۹: وزن نهایی گزینه‌ها از دیدگاه معیار نفوذپذیری
۱۵۱	جدول ۵-۴۰: میانگین هندسی ماتریس مقایسه زوجی اهمیت هر یک از گزینه‌ها از دیدگاه معیار جریان آب (رطوبت) از دیدگاه متخصص ۱ و ۲

فهرست جدول‌ها

صفحه	عنوان جدول
۱۵۱	جدول ۵-۴۱: وزن نهایی گزینه‌ها از دیدگاه معیار جریان آب (رطوبت)
۱۵۲	جدول ۵-۴۲: میانگین هندسی ماتریس مقایسه زوجی اهمیت هر یک از گزینه‌ها از دیدگاه معیار ناپیوستگی‌ها (گسل‌ها) از دیدگاه متخصص ۱ و ۲
۱۵۲	جدول ۵-۴۳: وزن نهایی گزینه‌ها از دیدگاه معیار ناپیوستگی‌ها (گسل‌ها)
۱۵۳	جدول ۵-۴۴: میانگین هندسی ماتریس مقایسه زوجی اهمیت هر یک از گزینه‌ها از دیدگاه معیار گستردگی زغال-سنگ از دیدگاه متخصص ۱ و ۲
۱۵۳	جدول ۵-۴۵: وزن نهایی گزینه‌ها از دیدگاه معیار گستردگی زغال‌سنگ
۱۵۴	جدول ۵-۴۶: میانگین هندسی ماتریس مقایسه زوجی اهمیت هر یک از گزینه‌ها از دیدگاه معیار نوع زغال‌سنگ از دیدگاه متخصص ۱ و ۲
۱۵۴	جدول ۵-۴۷: وزن نهایی گزینه‌ها از دیدگاه معیار نوع زغال‌سنگ
۱۵۵	جدول ۵-۴۸: میانگین هندسی ماتریس مقایسه زوجی اهمیت هر یک از گزینه‌ها از دیدگاه معیار گاز محتوی از دیدگاه متخصص ۱ و ۲
۱۵۵	جدول ۵-۴۹: وزن نهایی گزینه‌ها از دیدگاه معیار گاز محتوی
۱۵۶	جدول ۵-۵۰: میانگین هندسی ماتریس مقایسه زوجی اهمیت هر یک از گزینه‌ها از دیدگاه معیار عمق قرارگیری از دیدگاه متخصص ۱ و ۲
۱۵۶	جدول ۵-۵۱: وزن نهایی گزینه‌ها از دیدگاه معیار عمق قرارگیری
۱۵۷	جدول ۵-۵۲: میانگین هندسی ماتریس مقایسه زوجی اهمیت هر یک از گزینه‌ها از دیدگاه معیار میزان ذخیره از دیدگاه متخصص ۱ و ۲
۱۵۷	جدول ۵-۵۳: وزن نهایی گزینه‌ها از دیدگاه معیار میزان ذخیره
۱۵۸	جدول ۵-۵۴: میانگین هندسی ماتریس مقایسه زوجی اهمیت هر یک از گزینه‌ها از دیدگاه معیار ضخامت لایه زغال‌سنگ از دیدگاه متخصص ۱ و ۲
۱۵۸	جدول ۵-۵۵: وزن نهایی گزینه‌ها از دیدگاه معیار ضخامت لایه زغال‌سنگ
۱۵۹	جدول ۵-۵۶: وزن نهایی گزینه‌ها بر اساس بردارهای وزن محاسبه شده
۱۶۴	جدول ۶-۱: هزینه‌های یک پروژه CBM بر حسب نوع روش زهکشی متان
۱۶۴	جدول ۶-۲: هزینه‌های سرمایه‌گذاری برای گمانه‌های قائم و گمانه‌های تخریب (هزینه یک گمانه)
۱۶۷	جدول ۶-۳: هزینه‌های روش‌های متان زدایی با توجه به تولید زغال‌سنگ
۱۶۸	جدول ۶-۴: هزینه‌های سیستم جمع‌آوری گاز و تولید برق در روش زهکشی گاز متان
۱۶۸	جدول ۶-۵: هزینه‌های مربوط به عملیات دفع و تصفیه آب
۱۶۸	جدول ۶-۶: هزینه‌های مربوط به فناوری‌های مربوط به تصفیه و زهکشی آب از گمانه
۱۷۰	جدول ۶-۷: گاز بهای مصرفی هر مترمکعب در هفت ماهه فصل گرم در بخش خانگی سال ۱۳۹۴
۱۷۱	جدول ۶-۸: گاز بهای مصرفی هر مترمکعب در پنج‌ماهه فصل سرد در بخش خانگی سال ۱۳۹۴
۱۷۱	جدول ۶-۹: گاز بهای مصرفی سایر صنایع سال ۱۳۹۴

فصل اوّل

کلیات تحقیق

استخراج زغال سنگ همواره به عنوان یکی از پرخطرترین مشاغل دنیا مطرح بوده و متخصصین متعددی بر روی افزایش ایمنی این معادن و بهبود شرایط فنی و اقتصادی تحقیق و مطالعه کرده‌اند. احتمال انفجار در معادن زغال سنگ با میزان انتشار گاز متان و گرد زغال ارتباط دارد. به ویژه تصاعد آبی گاز و ترکیب سنگ باعث ایجاد مشکلات فراوان و گاه جبران‌ناپذیری می‌شود.

در این فصل کلیاتی از مسئله‌ی مورد بررسی و هدف از انجام مطالعه‌ی حاضر بیان خواهد شد و همچنین به ضرورت انجام چنین تحقیق‌هایی پرداخته خواهد شد. در انتها نیز به فرآیندهای انجام‌گرفته شده در فصل‌های مختلف این تحقیق پرداخته شده است.

۱-۲- بیان مسئله

زغال سنگ یکی از منابع اصلی انرژی در دنیا است که از قرن‌های پیش، از این انرژی استفاده می‌شود و هم‌اکنون نیز انرژی بر پایه زغال سنگ به‌عنوان منبع اصلی انرژی به علت عدم وجود منابع مشابه دیگر در جهان باقی خواهد ماند.

یکی از موارد حامل انرژی در زغال سنگ، گاز متان موجود در لایه‌های زغالی است. همه لایه‌های زغال سنگ حاوی گاز متان هستند که مقدار آن از ۰/۰۳۱ تا بیش از ۱۸/۷ مترمکعب بر تن تغییر می‌کند. حدود ۱۰ درصد گاز متان در سیستم درزه و شکاف‌های لایه زغال سنگ فشرده می‌شود، حدود ۵ درصد آن در آب محتوی زغال حل می‌شود و مابقی در ساختار میکرو حفره‌های ماتریکس زغال سنگ به صورت شیمیایی جذب می‌شود. متان موجود در لایه‌های زغال سنگ منبع انرژی کم‌کربن و تمیز سوزی است که به‌عنوان سوخت برای مصارف مسکونی، صنعتی و تجاری، تولید الکتریسیته و همچنین سوخت وسایل نقلیه می‌تواند به کار رود (www.edenenergy.com.au, 2007). زمانی که پوشش زغال سنگ در اثر معدنکاری یا فرسایش حذف شود، فشار محبوس کننده لایه زغال سنگ از بین می‌رود و گاز متان انتشار می‌یابد. از این رو یکی از مهم‌ترین مسائل موجود در معادن زغال سنگ، متان آزاد شده در اثر عملیات معدنکاری است که سبب حوادث مرگبار زیادی در سراسر دنیا شده است. از اصلی‌ترین عوامل افزایش بیش‌ازحد متان آزاد شده می‌توان به افزایش

تولید زغال سنگ، استخراج زغال سنگ از اعماق زیاد و استفاده از فناوری‌های پیشرفته استخراجی که زغال سنگ را زیاد خرد می‌کنند، اشاره کرد.

به هر حال تا چند دهه اخیر متان آزاد شده از لایه‌های زغال سنگ به داخل محیط معادن بدون هیچ استفاده‌ای به داخل هوا رهاسازی می‌شد که از مهم‌ترین آثار مخرب آن تغییرات آب و هوایی است. در معدنکاری زیرزمینی زغال سنگ، به منظور افزایش ایمنی در زمان آماده‌سازی و استخراج، کاهش هزینه‌های تهویه و سرمایه‌گذاری اولیه، کاهش زمان‌های توقف، کاهش آلودگی هوا، کاهش گازهای گلخانه‌ای و انتشار ذرات ریز گردوغبار، جمع‌آوری متان موجود در لایه زغال سنگ به عنوان یک منبع گاز و کاهش مقدار تولید دی‌اکسید کربن در اولویت قرار دارد. زهکشی متان یا متان زدایی از لایه زغال سنگ (CBM¹) یک روش جدید نیست. زهکشی متان که گاز زدایی زغال سنگ نیز نامیده می‌شود فرآیند برجایی است که گاز زغال را عموماً از نواحی معدنکاری نشده به دو روش آب‌گیری و کاهش آب در گمانه حفر شده و نیز بدون آب‌گیری توسط مکش گاز از گمانه توسط پمپ مکنده در سطح زمین (لایه‌های خشک یا بالای سطح آب ایستابی)، استخراج می‌کند. گاز متان می‌تواند از فضای معدنکاری توسط گمانه‌های حفر شده قبل از معدنکاری بازیابی شود. وقتی یک گمانه زهکشی متان یا یک بازکننده معدنی در لایه‌ای حفر می‌شود، یک فضای کم‌فشار در لایه ایجاد و گاز از محل حبس یا جذب شده در آن آزاد می‌شود و به سمت گمانه یا بازکننده حرکت می‌کند. با پمپاژ میزان آب و گاز وارد شده به داخل گمانه و جمع‌آوری آن در سطح زمین متان زدایی انجام می‌شود. هم‌اکنون CBM تحت عنوان گاز لایه زغال سنگ² (CSG) یا گاز طبیعی لایه زغال سنگ³ (CSNG) شناخته شده است.

CBM یک تکنولوژی فنی است که منجر می‌شود گاز طبیعی از لایه‌های زغال سنگ بازیافت شود. گاز طبیعی به‌طور معمول از تخریب مواد آلی زغال سنگ تولید می‌شود. اگرچه ممکن است بخشی از اجزاء این گاز از لایه‌های زغال سنگ دیگر نواحی به این نقاط رسیده باشد.⁴ CBG⁴ به‌طور عمده ترکیبی از متان، دی‌کسید

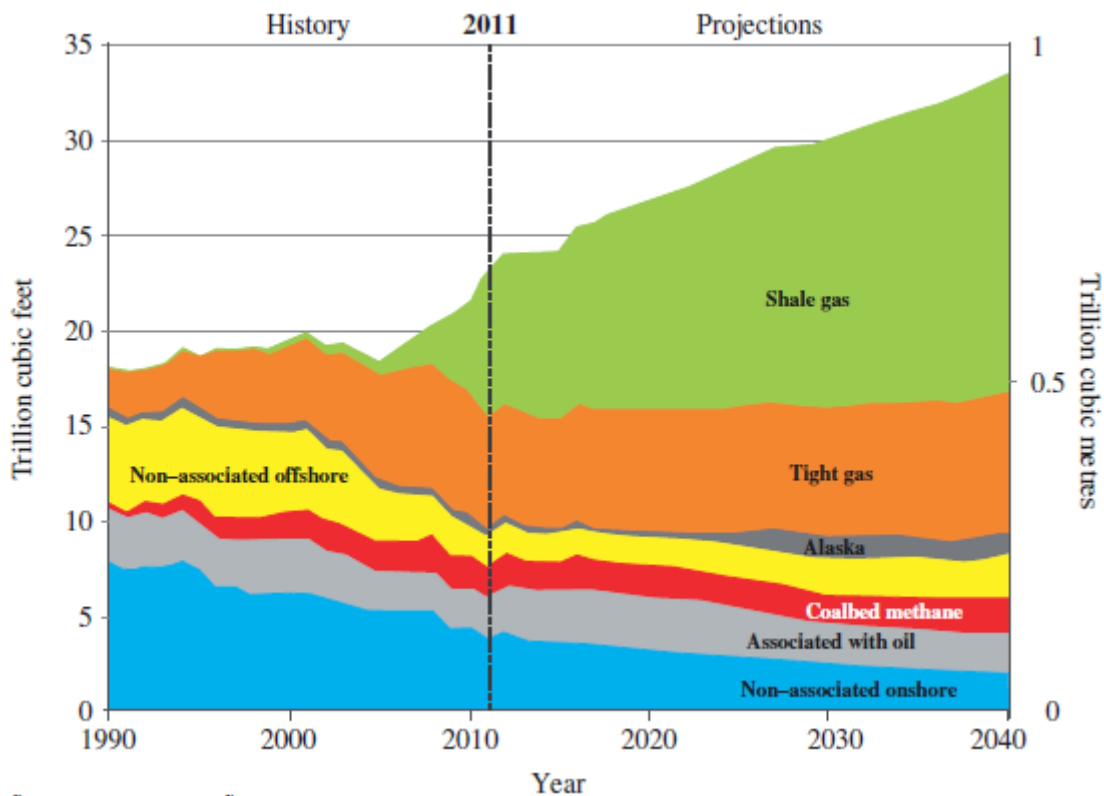
¹ Coal Bed Methane

² Coal Seam Gas

³ Coal Seam Natural Gas

⁴ Coal Bed Gas

کربن CO_2 ، عنصر نیتروژن N_2 و هیدروکربن‌ها مانند اتان (C_2H_6)، پروپان (C_3H_8) و بوتان (C_4H_{10}) است. در گاز زدایی ترکیب غالب گاز متان است. گاز متان می‌تواند برای اهداف استفاده در صنایع داخلی، انرژی الکتریکی، بازرگانی و ... به‌عنوان گاز طبیعی مورد استفاده قرار گیرد. شکل ۱-۱ سهم گاز زدایی متان در مقایسه با مجموع گازهای طبیعی در ایالات متحده آمریکا را نشان می‌دهد.



شکل ۱-۱: سهم گاز زدایی متان در مقایسه با مجموع گازهای طبیعی در ایالات متحده آمریکا، (گذشته، حال و آینده)

(www.edenenergy.com.au)

۱-۳- ضرورت تحقیق

زغال سنگ یکی از منابع مهم انرژی در دنیاست. در سال ۲۰۰۷ میلادی ۲۹ درصد انرژی مورد نیاز در جهان به کمک زغال سنگ تأمین شده است. این امر در حالی است که این سهم برای نفت ۳۶ درصد، گاز طبیعی ۲۴ درصد، انرژی برق آبی ۶ درصد و انرژی هسته‌ای ۵ درصد بوده است. علاوه بر انرژی، زغال سنگ در صنایع لاستیک‌سازی، ذوب فلزات و غیره کارایی زیادی دارد و کلیه موادی که از نفت خام استحصال می‌شوند را می‌توان از زغال سنگ نیز استحصال کرد. تولید جهانی زغال سنگ در سال ۲۰۰۷، ۶۳۹۵/۵ میلیون تن بوده

است که نسبت به سال ۲۰۰۶، ۳/۴ درصد و نسبت به سال ۲۰۰۲، ۳۲ درصد افزایش یافته است. چین با ۲۵۳۶/۷ میلیون تن، بزرگ‌ترین تولیدکننده زغال‌سنگ در دنیاست که تولید آن نسبت به سال ۲۰۰۶ و ۲۰۰۲ به ترتیب ۷ و ۷۴ درصد افزایش یافته است. دومین و سومین تولیدکنندگان بزرگ زغال‌سنگ جهان، آمریکا و هند به ترتیب ۱۰۳۹/۲ و ۴۷۸/۲ میلیون تن هستند (www.bp.com, 2008).

آژانس بین‌المللی انرژی^۱ پیش‌بینی کرده است که تقاضا برای انرژی در سال ۲۰۳۰، ۹۳ درصد افزایش خواهد یافت که بیشترین تقاضا در کشورهای چین و هند خواهد بود. انتظار بر این است که زغال‌سنگ بتواند این افزایش تقاضا را جبران کند. این عوامل سبب می‌شود که تولید زغال‌سنگ از اعماق کم دیگر جواب‌گوی نیاز بازار نباشد و مجبور به استخراج زغال‌سنگ از عمق‌های زیاد باشیم. با افزایش عمق، میزان گاز موجود در زغال‌سنگ افزایش می‌یابد. با توجه به ملاحظات زیست‌محیطی کنونی و شرایط کاری ایمن، شرکت‌های معدنی بهترین راه‌حل به‌منظور کاهش تصاعد ناگهانی گاز متان و استفاده اقتصادی از این گاز، روش متان زدایی را انتخاب کرده‌اند. تجربیات صورت گرفته در کشورهای صنعتی نشان داده است که سرمایه‌گذاری برای یک پروژه موفق متان زدایی باعث کاهش زمان‌های توقف، کاهش هزینه‌های مربوط به تهویه، کاهش هزینه سرمایه‌گذاری اولیه، افزایش ذخایر زغال‌سنگ قابل‌استخراج، افزایش ایمنی، کاهش مسائل مربوط به انتشار ذرات ریز و گردوغبار، کاهش مسائل مربوط به آب، شرایط کاری ایمن‌تر و راحت‌تر، کاهش کمبود الکتریسیته در محل معدن و بهبود کیفیت هوا در سایت معدن می‌شود.

۱-۴- اهداف تحقیق

هدف اصلی این تحقیق امکان‌سنجی گاز زدایی متان از کانسارهای زغال‌سنگ در شرکت زغال‌سنگ البرز شرقی، مطالعه موردی معدن رضی است. در این تحقیق سعی می‌شود کلیه مسائل و عوامل مربوط به گاز زدایی متان شامل پیشینه انجام فعالیت متان زدایی در کشورهای جهان، فرآیند متان زدایی، روش‌های متان زدایی از معادن زغال‌سنگ، فن‌آوری حفاری گمانه‌های گاز زدایی، تأسیسات سطحی و زیرسطحی گمانه‌ها،

¹ International Energy Agency

شرایط زمین‌شناسی تأثیرگذار بر انجام پروژه‌های گاز زدایی و امکان بهره‌برداری از فناوری متان زدایی از داخل زغال‌سنگ در شرکت یادشده به همراه ارزیابی فنی و اقتصادی پروژه، مورد بررسی قرار گیرد.

۱-۵- ساختار تحقیق

تحقیق حاضر مشتمل بر هفت فصل است که در شرح زیر توضیح داده می‌شود:

فصل حاضر شامل بیان کلی مسئله‌ی مورد بررسی، ضرورت و اهداف تحقیق است.

فصل دوم با عنوان بررسی سابقه‌ی علمی موضوع تعریف‌شده است، به علت گستردگی موضوع مورد بحث کارهای متنوعی توسط محققان مختلفی صورت گرفته است، اما به دلیل اقتضای این تحقیق و دسترسی کم تحقیقات مذکور برخی از مهم‌ترین کارهای انجام‌شده در این فصل مختصراً بیان شده است.

در فصل سوم فرآیند متان زدایی و روش‌های متان زدایی مورد بررسی قرار گرفته است.

در فصل چهارم به بررسی عوامل زمین‌شناسی تأثیرگذار بر اجرای فرآیند CBM پرداخته شد.

در فصل پنجم به امکان‌سنجی انجام عملیات CBM در معادن زغال‌سنگ البرز شرقی پرداخته شد.

در فصل ششم بررسی فنی و اقتصادی اجرای پروژه CBM در معدن رضی مورد بررسی قرار گرفته است.

در فصل هفتم، نتایج حاصل از این تحقیق و نیز پیشنهادهایی ارائه شده است.

فصل دوم

بررسی سابقه علمی موضوع

۲-۱- مقدمه

سیر تحول علم در تاریخ نشان می‌دهد که پژوهش‌های اجتماعی بر خرد جمعی، استوار هستند. هر پژوهش ضمن آن که مبتنی بر پژوهش‌های قبلی است، مقدمه و پایه‌ای نیز برای پژوهش‌های بعدی است. هرچه تعداد ارتباطها و پیوندهای ممکن یک پژوهش با پژوهش‌های پیشین و نظریه‌های موجود بیشتر باشد، اهمیت و سهم آن پژوهش در گسترش دانش آدمی بیشتر خواهد بود. معمولاً در پژوهش‌های علمی می‌توان موضوع پژوهش را در سطحی تعریف کرد که نتیجه‌های آن تعمیم‌پذیر باشد، برای این کار باید از همان زمان انتخاب موضوع و مسئله پژوهش، توجه پژوهشگر در اندیشه تعمیم‌پذیری آن باشد. برای این منظور باید تلاش‌هایی را که قبلاً درباره موضوع پژوهش انجام گرفته است بررسی کرد و پژوهش جدید را با پژوهش‌های پیشین ارتباط داد. این امر را می‌توان با شیوه بررسی نظریه‌ها و پیشینه‌های عملی مربوط به موضوع امکان‌پذیر کرد، این نکته از آن رو مهم است که از پیشرفت‌های تازه نظری (نظریه‌های جدید) و پژوهش‌هایی که در این زمینه به عمل آمده آگاه شویم، زیرا بررسی‌های علمی-عملی بخش مهم و لازم فرآیند پژوهشی علمی را تشکیل می‌دهد. (خاکی، ۱۳۹۰)

۲-۲- بررسی سابقه علمی موضوع

زهکشی گاز از لایه‌های زغال‌سنگ (CBM) منبع انرژی کم‌کربن و تمیزسوزی است که به عنوان سوخت برای مصارف مسکونی، صنعتی و تجاری، تولید الکتریسیته و همچنین سوخت وسایل نقلیه می‌تواند به کار رود (www.edenenergy.com.au). هم‌اکنون بسیاری از کشورها انجام مطالعات در زمینه CBM را آغاز کرده و درصدد بهره‌برداری و تولید انرژی از منابع متان موجود در لایه‌های زغال‌سنگ هستند. به همین خاطر با توجه به اقتضای این تحقیق و دسترسی کم منابع معتبر علمی در دسترس سعی شده است برخی از مهم‌ترین مطالعات انجام شده پیشین به دقت مورد مطالعه و بررسی قرار بگیرند و تاریخچه و خلاصه‌ای از کارهای انجام گرفته شده از سال ۱۹۳۴ میلادی تاکنون ذکر شوند. در جدول ۲-۱ لیست و خلاصه‌ای از مطالعات و کارهای انجام شده در زمینه‌ی زهکشی متان از زغال‌سنگ، آورده شده است.

جدول ۱-۲: خلاصه‌ای از مطالعات انجام گرفته شده در ارتباط با موضوع مورد مطالعه

توضیح مختصر	مؤلف (سال انتشار)
<p>لاوال و موریس^۱ از اولین اقدامات در زمینه حفاری گمانه‌های قائم و افقی به طول ۴/۶ تا ۳۱/۱ متر در داخل لایه‌های زغالی شماره ۴ پوکاهونتاس^۲ در ایالت ویرجینیای غربی^۳ آمریکا گزارش کردند. میزان گاز خارج شده از این گمانه‌ها کم و حداکثر میزان گاز اندازه‌گیری شده برابر با ۴۵۳ مترمکعب بر روز از گمانه‌ای افقی به طول ۲۱/۶ متر و قطر ۸/۹ سانتی‌متر گزارش شده است.</p>	<p>Lawall and Morris (1934)</p>
<p>اواخر دهه ۱۸۰۰ به طور موفقیت‌آمیز از گمانه‌های تقاطعی به منظور متان زدایی از لایه‌های دربرگیرنده زغال‌سنگ در ولز شمالی^۴ استفاده شد. اولین موفقیت در زمینه اجرای سیستم کنترل، نصب و حفاری گمانه‌های قائم در سال ۱۹۵۳ و نیز اولین استفاده موفقیت‌آمیز از گمانه‌های تقاطعی در مقیاس بزرگ در اواخر دهه ۱۹۴۰ در منطقه زغالی روهر^۵ آلمان حاصل شده است.</p>	<p>Venter and Stassen (1953)</p>
<p>اولین تلاش‌ها در زمینه متان زدایی به سال ۱۷۳۰ در انگلستان برای بیرون کشیدن متان از لایه‌های زغال‌سنگ برمی‌گردد. به دنبال آتش‌سوزی در سال ۱۸۴۴ در قسمت تخریب شده یک معدن زغال‌سنگ جبهه‌کار طولانی در آمریکا سبب شد تا به متان زدایی از منطقه تخریب توجه بیشتری شود. از این رو مأموران رسیدگی به سوانح در معادن پیشنهاد دادند که لوله‌هایی در منطقه تخریب شده رانده شود تا گاز آزاد شده را به سطح زمین انتقال دهد. این پیشنهاد توسط مجمع مهندسان معدن در آمریکا مورد قبول واقع نشد زیرا در آن زمان یک کار غیر اجرایی به شمار می‌رفت. اولین گمانه قائم در سال ۱۹۰۵ در آمریکا به منظور حذف گاز از طبقات زیرین لایه زغال پترسبورگ در ویرجینیای غربی حفر شد. در سال ۱۹۴۲ در همین لایه زغالی تعداد ۲۲ حلقه گمانه دیگر حفر شد که تولید گاز متان از این گمانه‌ها تا سال ۱۹۸۴، معادل ۳۴ میلیون مترمکعب گزارش شده است. در اوایل دهه ۱۹۳۰ متان زدایی از منطقه شکسته شده قسمت بالایی لایه زغالی شماره ۵ پوکاهونتاس در ایالت ویرجینیای غربی با حفاری گمانه‌ای قائم به طول ۲۶ متر و قطر ۷/۶ سانتی‌متر صورت پذیرفت. این لایه زغالی در ۵۲ متری از سطح زمین واقع شده است و به منظور کاهش متان در معدن تعداد ۴ حلقه گمانه دیگر نیز حفاری گردید که میزان گاز خروجی روزانه از این گمانه‌ها به ۲۵,۰۰۰ مترمکعب در روز رسید. اولین گمانه قائم طراحی شده در آمریکا به منظور حذف مستقیم گازها از داخل لایه زغال‌سنگ در سال ۱۹۵۲ در معدنی در پنسیلوانیای شرقی صورت پذیرفت. بدین منظور دو گمانه قائم یکی در منطقه زغالی سویکلی^۶ به طول ۱۱۳ متر و دیگری در لایه زغالی پترسبورگ به طول ۱۴۰ متر حفاری گردید. به منظور متان زدایی از لایه زغال پترسبورگ از پمپ به منظور تخلیه آب داخل گمانه استفاده گردید و سبب افزایش روزانه ۱۱۰۰ مترمکعب متان شد. در گمانه قائم حفاری شده در منطقه زغالی سویکلی قبل از انجام آب‌کشی از گمانه، زهکشی گاز از گمانه صفر بوده در حالی که با انجام زهکشی آب، میزان گاز متان زهکشی شده روزانه به بیش از ۴۵۳ مترمکعب افزایش یافت. با گذشت ۱۰ ماه از انجام عملیات متان زدایی تولید متان از این گمانه‌ها کاهش یافت از این‌رو استفاده از روش‌هایی که بتواند قابلیت متان زدایی را افزایش دهد مورد استفاده قرار گرفت. در ابتدا به منظور افزایش بازدهی گمانه از انفجار در کف گمانه استفاده گردید که چندان موفقیت‌آمیز نبود. در سال ۱۹۵۹ روش شکافت هیدرولیکی در همین معدن مورد استفاده قرار گرفت. میزان گاز قبل از انجام روش شکافت هیدرولیکی برابر با ۲۸ مترمکعب در روز بوده که با انجام این روش به بیش از ۴۲۰۰ مترمکعب در روز افزایش یافت.</p>	<p>William (1994)</p>

¹ Lawall and Morris

² Pocahontas

³ West Virginia

⁴ North Wales

⁵ Ruhr

⁶ Sewickley

ادامه‌ی جدول ۱-۲: خلاصه‌ای از مطالعات انجام گرفته شده در ارتباط با موضوع مورد مطالعه

مؤلف (سال انتشار)	توضیح مختصر
Schultz (2003)	بیشترین فعالیت‌های متان زدایی در کشور روسیه در حوضه‌های کوزباس ^۱ و پچورا ^۲ در حال انجام است. تولید CBM در این کشور مرحله آزمایشگاهی را می‌گذراند. در این کشور ۷۸ درصد ذخایر CBM در حوضه کوزباس واقع شده است از این رو بیشتر تحقیقات در این حوضه در حال انجام است.
Alekseev et al. (2003)	قزاقستان یکی از اصلی‌ترین تولیدکنندگان زغال سنگ در آسیای مرکزی است. بیشتر از ۷۰ درصد انرژی مورد نیاز در بخش خانگی این کشور از زغال سنگ تأمین می‌شود. بر طبق بررسی‌های انجام شده میزان تولید زغال سنگ در این کشور در بین سال‌های ۱۹۹۹ تا ۲۰۰۲ بین ۵۸ تا ۸۱ میلیون تن بوده است.
Ingelson et al (2006)	در آلبرتا، کانادا شرکت‌های مختلف در مجموع ۹/۱ میلیارد دلار بر روی اکتشافات و تولید CBM در طی دهه گذشته سرمایه‌گذاری کرده‌اند. در سال ۲۰۰۴، تولید CBM در کانادای غربی تنها ۰/۵ درصد از تولید بازار گاز ایالتی را شامل می‌شد، در حالی که پیش‌بینی شده است تا سال ۲۰۱۴، حدود ۱۲ درصد تولیدات و تا سال ۲۰۲۵، تقریباً ۵۰ درصد کل بازار تولید گاز طبیعی به CBM اختصاص یابد.
Fox (2009)	زهکشی متان در سال ۱۹۷۰ میلادی در آمریکا آغاز شد و اولین گمانه‌های پایلوت گاز زغال سنگ (CBM) توسط اداره‌ی معادن ایالات متحده در ۱۱ سایت در آن کشور در سال ۱۹۷۱ حفاری و تکمیل شده است. عملیات اجرایی اولین پروژه‌ی تجاری گاز زغال سنگ در سال ۱۹۷۷ در حوضه‌ی سن‌خوان واقع در غرب ایالات متحده شروع شد.
Haijun (2009)	چین بزرگ‌ترین تولیدکننده و مصرف‌کننده زغال سنگ در دنیا است. میزان ذخایر CBM در این کشور ۳۷ تریلیون مترمکعب برآورد شده است که بیشتر این ذخایر در اعماق ۱۵۰۰ تا ۲۰۰۰ متری سطح زمین واقع شده‌اند. از این میزان ذخایر ۴۰ درصد در شرق، ۱۸ درصد در مرکز، ۲۶ درصد در غرب و ۱۶ درصد در جنوب چین واقع است. چین سومین کشور دارای ذخایر CBM است. از سال ۱۹۹۰ فعالیت‌های اکتشافی CBM آغاز شده است. دولت چین برنامه استخراج ۱۰ میلیارد مترمکعب گاز CBM در سال ۲۰۱۰ و ۴۰ میلیارد مترمکعب در سال ۲۰۲۰ در دستور کار خود دارد.
Sawhney (2010)	به دلیل وجود بعضی از چالش‌ها در هند، توسعه پروژه‌های CBM در این کشور به دلیل کمبود اطلاعات علمی و تکنولوژیکی در زمینه CBM، فقدان زیرساخت‌ها، استفاده از منابع گاز طبیعی، شرایط و استانداردهای سخت‌گیرانه تجاری‌سازی این کشور به تأخیر افتاده است. امروزه با توجه به اهمیت گاز طبیعی، دولت هند سرمایه‌گذاری وسیعی در زمینه گاز CBM انجام داده است. کل مساحت این کشور ۳۵,۴۰۰ کیلومترمربع است که بر این اساس، ۱۶ درصد از مساحت آن اکتشاف شده، ۲۲ درصد در حال اکتشاف و ۶۲ درصد از مساحت آن (۳۵,۰۰۰ کیلومترمربع) اکتشاف نشده است. بر پایه بعضی از پیش‌بینی‌ها انتظار می‌رود که ذخایر CBM به ۱۵ درصد از تولیدات گاز طبیعی در هند برسد و نیز با کشف ذخایر CBM در قسمت مرکزی و شرقی هند تولید روزانه گاز به ۱۰,۰۰۰ مترمکعب گاز افزایش خواهد یافت.
Hu et al (2014)	تا پایان سال ۲۰۱۲، در حدود بیش از ۵۰۰۰ عدد چاه استخراج CBM وجود داشت که به طور تقریبی شامل ۱۰۰ عدد چاه افقی در لایه می‌شوند.

¹ Kuzbass

² Pechora

۲-۳- نتیجه گیری

چنانچه از مطالب این فصل که شامل مروری بر منابع مختلف موجود در CBM است، برمی آید که تاکنون مطالعات بسیار خوب و جامعی در این خصوص انجام گرفته است. در حال حاضر اکثر سیستم‌های متان زدایی در مناطق مختلف دنیا مورد استفاده قرار می‌گیرد.

در ایران منابع زغالی بسیاری وجود دارد که می‌توان انتظار داشت بعضی از آنها برای اجرای متان زدایی مستعد باشند. از طرفی به دلیل روند رو به رشد و افزایش نیاز کشور به انرژی و اهمیت یافتن منابع جایگزین برای نفت و گاز متعارف، ضروری است که به امکان‌سنجی استحصال این منبع بالقوه انرژی در کشور پرداخته شود.

فصل سوم

فرآیند گاززدایی و روش‌های گاززدایی در معادن

زغال سنگ

استخراج زغال سنگ از دیرباز از مسائل پیچیده معدنکاری نه تنها در ایران بلکه در تمام دنیا بوده است زیرا گاز همراه با زغال به هنگام استخراج به علت تغییر وضعیت و به هم خوردن تعادل محیط باعث انفجار شده که از یک طرف خطرات جانی متوجه کارگران معدن می شود و از طرف دیگر زیان های مالی به منابع وارد می کند. لذا کنترل گازهای همراه زغال می تواند راه حل استخراج سریع، راحت، ارزان و از همه مهم تر بی خطر زغال باشد به خصوص زغال منطقه ایران که گاز خیز است. از طرفی اگر امکان استفاده از این گاز باشد به تولید انرژی کمک کرده و به جای ایجاد خرابی در معادن به تأمین انرژی مصرفی آنان نیز کمک می کند و این جز با بکار گیری روش های نوین استخراج گاز زغال ممکن نیست.

۳-۲- طبقه بندی زغال سنگ ها از نظر تصاعد گاز

به دلیل مراحل و شرایط تشکیل مختلف زغال سنگ ها، میزان و نحوه قرارگیری این مواد و گازها در زغال سنگ ها نیز متفاوت است. بنابراین، شناخت مناسب و علمی میزان، ترکیب و مشخصات گازهای موجود در زغال سنگ های یک معدن، اهمیت بسیار زیادی در طراحی سیستم تهویه و بهبود ایمنی در معادن دارد. مهم ترین مرحله برای شناسایی و محاسبه میزان گازخیزی معادن زغال سنگ در مرحله اکتشاف و قبل از آماده سازی معدن است. میزان گازدهی لایه های زغالی به صورت حجم گازهای متصاعد شده به ازای هر تن زغال بر حسب مترمکعب بیان می شود. زغال سنگ ها، بر مبنای حجم گازهای متصاعد شده به چهار طبقه اصلی تقسیم بندی می شوند:

۳-۲-۱- معادن طبقه یک

میزان گازدهی این نوع از زغال سنگ ها کمتر از ۵ مترمکعب به ازای هر تن زغال سنگ است.

۳-۲-۲- معادن طبقه دو

در این زغال سنگ ها میزان گازخیزی بین ۵ تا ۱۰ مترمکعب به ازای هر تن زغال سنگ است.

۳-۲-۳- معادن طبقه سه

میزان گازدهی این نوع از زغال سنگ ها ۱۰ تا ۱۵ مترمکعب به ازای هر تن زغال سنگ است.

۳-۲-۴- معادن ماوراء طبقه

میزان گازدهی این معادن بیش از ۱۵ مترمکعب به ازای هر تن زغال سنگ است. معادن طبقه دو و سه از شرایط بحرانی تری نسبت به معادن طبقه یک دارند و لذا عملیات گاز زدایی در این معادن بیشتر از سایر معادن مورد نیاز و ضروری است (مدنی، ۱۳۸۹).

۳-۳- گازهای موجود در زغال سنگ

ظرفیت زغال سنگ در ذخیره سازی و توانایی آن در رهائش گاز، دو عامل مهم در جذب و ذخیره به وسیله زغال سنگ گاز است. میزان گاز ذخیره شده در زغال به مقدار گاز تولیدی در حین فرآیند تشکیل زغال، فعالیت های بیوژنتیکی و رسوبات محل و فعالیت های بیوژنتیکی ثانویه بستگی دارد (صمدزادگان، ۱۳۸۹). علاوه بر این، میزان ذخیره سازی و مهاجرت گاز در زغال به خصوصیات منبع اولیه زغال سنگ وابسته است. توانایی زغال سنگ در ذخیره سازی گاز به بسیاری از خصوصیات درونی و بیرونی از جمله نوع زغال سنگ، درجه زغال شدگی، تخلخل، نوع گاز، رطوبت، تنش و خصوصیات کانی شناسی آن بستگی دارد. به طور معمول گاز به چهار طریق در زغال ذخیره می شود (Black, 2011):

الف- جذب میکروسکوپی و یا جذب بر سطح خارجی زغال

ب- جذب درون سطوح مولکولی زغال

ج- گازهای آزاد در حفره ها و ریز درزه های زغال

د- گازهای محلول در آب های زیرزمینی مجاور توده های زغالی

بسته به فرآیند تشکیل، زغال سنگ ها گازهایی با ترکیبات مختلف دارند. با توجه به اینکه منشأ اصلی زغال سنگ بقایای گیاهان و موجودات زنده است، لذا بخش عمده ای از مواد فرار و گاز موجود در زغال سنگ را گاز متان تشکیل می دهد. متان گازی است بی رنگ و بی بو که چگالی آن نسبت به هوا ۰/۵۵۴ و بنابراین از هوا سبک تر است. همچنین گازهایی از قبیل SO_2 ، H_2S و یا هیدروکربن های معطر به میزان مختلفی در گاز زغال یافت می شوند. گاز به صورت مایع و یا جامد در لایه های زغال یافت می شود و ممکن است به صورت خالص یا همراه با دی اکسید کربن به صورت رسوبات کربناته رسوب کند. گاز دی اکسید کربن، بدون

رنگ و بدون بو است و اندکی طعم اسیدی دارد. همچنین به طور قابل توجهی سنگین تر از هوا است. این گاز در اثر اکسیداسیون زغال تشکیل می شود. دی اکسید کربن در لایه های سنگی نیز بعضی اوقات به صورت تقریباً خالص و گاه به صورت ترکیب با درصدی از ازت همراه است. غالباً این گاز "گاز سنگ" نامیده می شود (صمدزادگان، ۱۳۸۹).

۳-۴- جریان گاز و نشر آن از زغال سنگ^۱

جریان گاز در لایه های زغال سنگ در دو مرحله انجام می شود:

الف- جریان از میان درزه ها و ریز درزه های زغال

ب- جریان از درون ماتریکس زغال سنگ

مولکول های ساطع شده از ماتریکس زغال سنگ، موجب افزایش غلظت گاز می شوند و گازهای منتشر شده از ریزترک ها و درزه ها، فشار گاز را افزایش می دهند که از قانون داریسی تبعیت می کنند. گازهای آزاد شده از ماتریکس زغال، نسبت به گازهای آزاد شده از دیواره های متخلخل آن، سازوکار پیچیده تری دارند. گازهای موجود در درزه ها و ریز درزه های زغال، نسبت به گازهایی که از ماتریکس زغال آزاد می شوند، با سرعت بیشتری رها می شوند. با توجه به اینکه بیشترین حجم از گاز زغال در خلل و فرج های میکروسکوپی آن ذخیره می شود، انتشار گاز در زغال سنگ های با نفوذپذیری پایین، نرخ رهایش محدودتری است. گامسون^۲ و بیمیش^۳ در سال ۱۹۹۲، چهار مدل برای انتشار گاز از لایه های زغالی به شرح ذیل ارائه کردند (Gamson and Beamish, 1992):

الف- انتشار گاز در سطوح کوچک مقیاس و ریز خلل و فرج های ماتریکس زغال

ب- انتشار غیرخطی گاز از قسمت های باز، ریزترک های کانی سازی نشده و حفره های موجود در ماتریکس زغال

پ- انتشار خطی و یا جریان گاز از ریزترک ها و یا حفره های نیمه باز که تنها بخشی از آن ها مسدود شده است

^۱ Gas Flow and Emission From Coal

^۲ Gamson

^۳ Beamish

ت- جریان خطی گاز در سطوح بزرگتر مانند حفره های بزرگ مقیاس

علاوه بر این، لایه های زغال ممکن است حاوی حجم زیادی از آب باشند. بخشی از این آب ها، تحت فشار هیدرو استاتیک ناشی از گازهای محبوس در خلل و فرج زغال قرار دارند. در حقیقت، این دسته از گازها به هنگام خروج از ریز حفره های موجود در ماتریکس زغال به دام افتاده اند. آبکشی از چنین لایه هایی، موجب کاهش فشار هیدرو استاتیک می شود و به گازهای موجود در ماتریکس زغال اجازه انتشار می دهد. دوترتی و کراکان^۱ در سال ۲۰۱۰ سه مرحله مجزا برای تولید گاز از لایه های زغالی به شرح زیر ارائه دادند (Dougherty and Karacan, 2010):

مرحله اول: تولید آب و کاهش فشار مخزن- در این مرحله همراه با جریان آب همواره حجم بسیار اندکی هم از گاز جریان می یابد.

مرحله دوم: کاهش تولید آب و افزایش آهنگ تولید گاز- تغییر در آهنگ تولید گاز-آب، که به دلیل نفوذپذیری به عنوان تابعی از اشباع شدگی قابل کنترل است. افزایش تولید گاز در این مرحله، تحت عنوان شیب منفی^۲ شناخته می شود. نقطه ای که در آن حداکثر مقدار گاز تولید می شود معرف پایان این مرحله و آغاز مرحله سوم است.

مرحله سوم: در این مرحله، زغال به مرحله بلوغ می رسد و تولید گاز کاهش می یابد. جریان سیال تکفازی است (فقط گاز) و مقدار بسیار اندکی آب هم وجود دارد. طبق اظهار نظر بسیاری از محققان، در این مرحله، چرخه تولید گاز تا زمانی که فشار مخزن به فشار نقطه انتشار بحرانی گاز برسد، به طور پیوسته کاهش می یابد.

۳-۵- فرآیند گاز زدایی

تولید گاز متان از لایه های زغال سنگ در سطح وسیع توسط سه روش قابل اجرا است. هرکدام از روشها استانداردها و تجهیزات خاص خود را دارا هستند. این سه نوع روش عبارتند از متان زدایی از داخل لایه

¹ Dougherty & Kracan

² Negative Decline

زغال سنگ (CBM)، متان زدایی از داخل معدن (CMM¹) و روش بهبودیافته متان زدایی از داخل لایه زغال سنگ (ECBM²). در واقع دو روش CMM و ECBM از زیرمجموعه های روش CBM هستند. در ادامه مجموعه روش های زهکشی زغال سنگ آورده شده است.

۳-۵-۱- زهکشی متان از لایه های زغال سنگ (CBM)

زهکشی متان که گاز زدایی زغال سنگ نیز نامیده می شود به عمل انتقال و بیرون کشیدن گاز موجود در لایه های زغالی و لایه های متصل به آن از طریق چاه، گمانه و خطوط لوله اطلاق می شود. متان موجود در لایه های زغال سنگ منبع انرژی کم کربن و تمیز سوزی است که به عنوان سوخت برای مصارف مسکونی، صنعتی و تجاری، تولید الکتریسیته و همچنین سوخت وسایل نقلیه می تواند به کار رود. هم اکنون CBM تحت عنوان گاز لایه زغال سنگ^۳ (CSG) یا گاز طبیعی لایه زغال سنگ^۴ (CSNG) شناخته شده است (www.edenenergy.com.au, 2007).

در صورت کاربرد این روش می توان گاز متان موجود در لایه های زغال سنگی را که در اثر استخراج سنتی هدر می رود، بازیابی و استفاده کرد و خطرات ناشی از معدنکاری زیرزمینی زغال را کاهش داد، هزینه های مربوط به تهویه هوای معدن را کمتر کرد و همچنین آثار مخرب زیست محیطی استخراج زغال مانند انتشار گازهای گلخانه ای، آلودگی آب سطحی و غیره را از بین برد. از طرفی دیگر، یکی از اهداف معدنکاری زیرزمینی زغال سنگ این است که ابعاد پهنه های جبهه کار طولانی را افزایش دهند. افزایش طول کارگاه، موجب افزایش مشکلات ناشی از تصاعد بیش از حد متان در معدن می شود که ضرورت گاز کشی را ایجاب می کند.

فرآیند CBM بدین صورت است که گاز زغال عموماً از نواحی معدنکاری نشده توسط آب گیری و کاهش آب در گمانه حفر شده یا در اثر مکش گاز موجود در گمانه (لایه های بالای سطح آب ایستابی)، استخراج می شود. گاز متان می تواند از فضای معدنکاری توسط گمانه های حفر شده قبل از معدنکاری بازیابی شود. وقتی یک

¹ Coal Mine methan

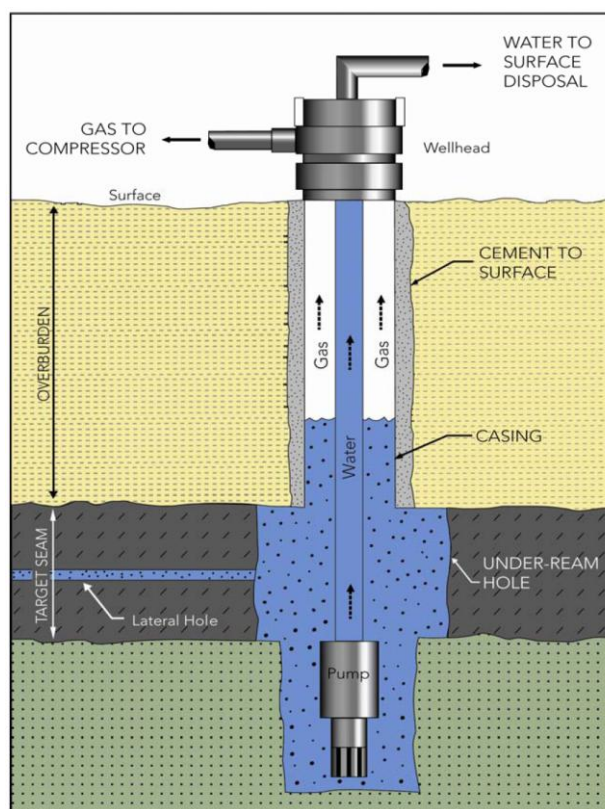
² Enhanced Coal Bed methane

³ Coal Seam Gas

⁴ Coal Seam Natural Gas

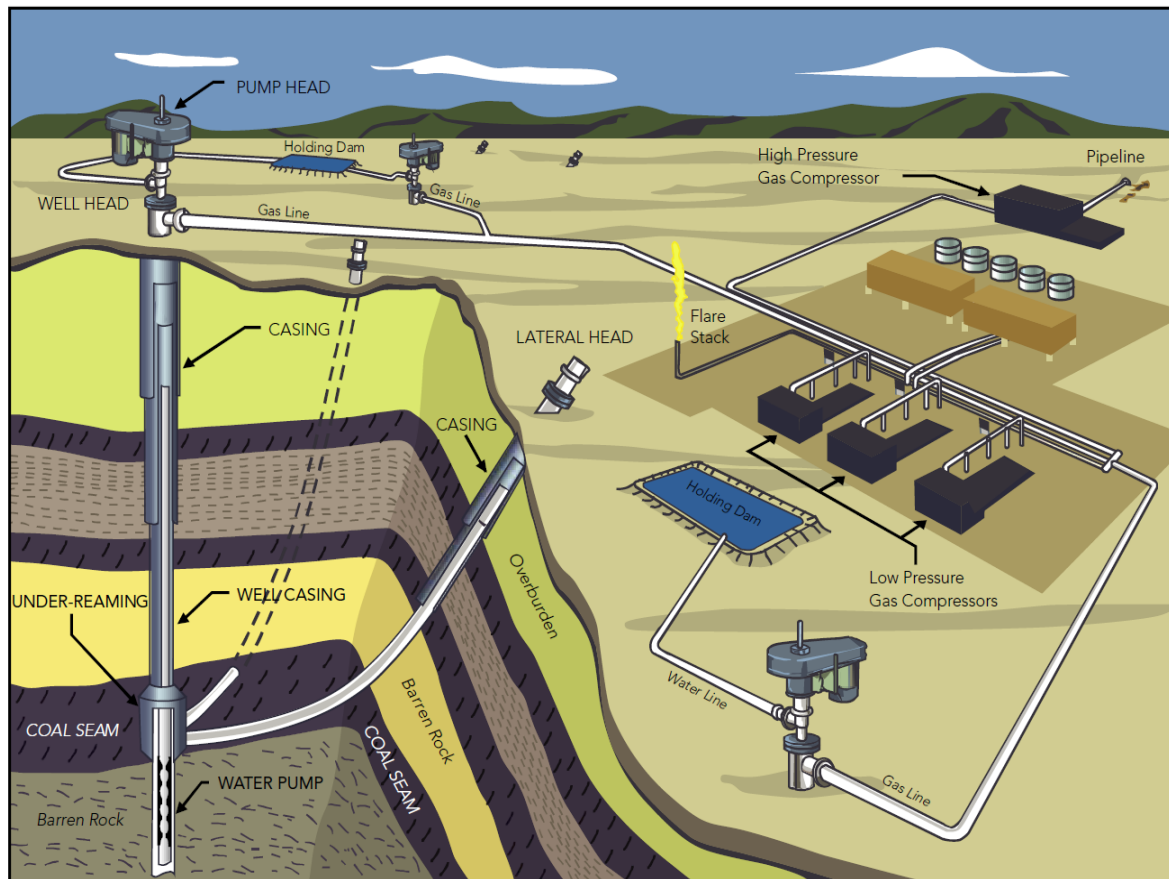
گمانه زهکشی متان یا یک بازکننده معدنی در لایه ای حفر می شود، یک فضای کم فشار در لایه ایجاد و گاز از محل حبس یا جذب شده در آن آزاد می شود و به سمت گمانه یا بازکننده حرکت می کند. شمای کلی گمانه مورد استفاده در این روش در شکل ۱-۳ آورده شده است. در شکل ۲-۳ شمایی از تأسیسات پیاده سازی CBM نشان داده شده است. به منظور جلوگیری از کاهش نفوذپذیری در اثر سیمانه شده که ممکن است سبب بسته شدن کلیت ها^۱ شود مراقبت های ویژه باید در تهیه سیمان به صورت دوغاب صورت پذیرد.

از برخی جهات روش متان زدایی شبیه روش استخراج گمانه ای است، هرچند عملیات می تواند از سطح زمین یا زیرزمین هدایت شود. متان زدایی به میزان زیادی به تولید گاز طبیعی، که بخش عمده آن را متان تشکیل می دهد نیز بستگی دارد. متان زدایی می تواند به صورت مستقل یا همراه و در ارتباط با معدنکاری متعارف انجام شود.



شکل ۱-۳: شمایی از گمانه ی زهکشی گاز (www.ch4.com.au)

^۱ سیستم شکستگی های ریز در سطح زغال سنگ

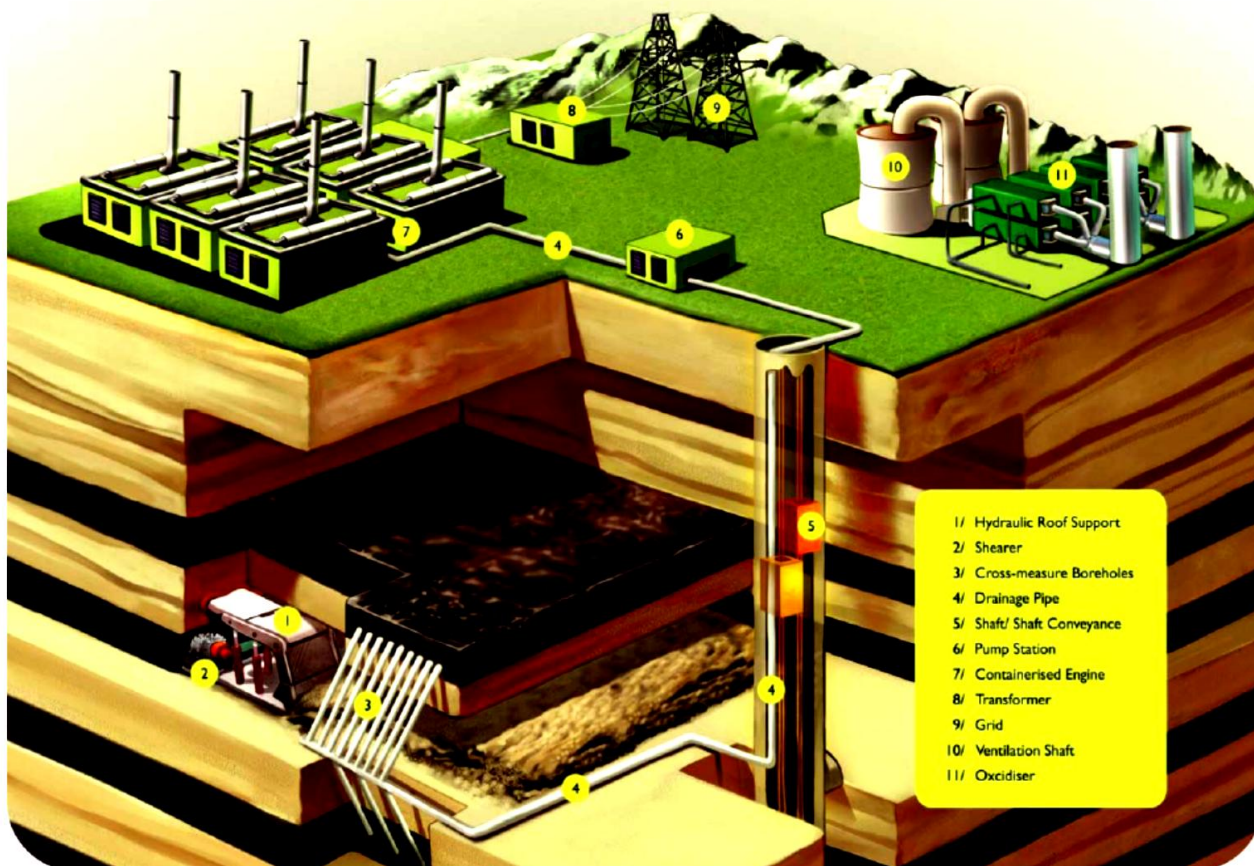


شکل ۳-۲: شمایی از جانمایی تأسیسات CBM (www.ch4.com.au)

۳-۵-۲- زهکشی متان از داخل معدن (CMM)

متان زدایی از داخل معدن یکی از زیرمجموعه‌های متان زدایی از داخل لایه زغال سنگ است. این روش همانند CBM، همزمان با عملیات معدنکاری یا پیش از آن قابل انجام است. این عمل بیشتر به منظور افزایش ایمنی معدن انجام می‌شود. متان استحصال شده معمولاً به منظور تولید برق در محل مورد استفاده قرار می‌گیرد.

شمایی سه‌بعدی از یک روش متان زدایی در روش جبهه کار طولانی در شکل ۳-۳ نشان داده شده است. مشخص است که فرایند زهکشی متان به منظور تولید برق یک فرایند پیچیده است که به دستگاه‌ها و تجهیزات زیرساختی زیادی نیاز دارد.



شکل ۳-۳: شمایی سه بعدی از روش متان زدایی جبهه کار طولانی به همراه تأسیسات سطحی آن (www.ch4.com.au)

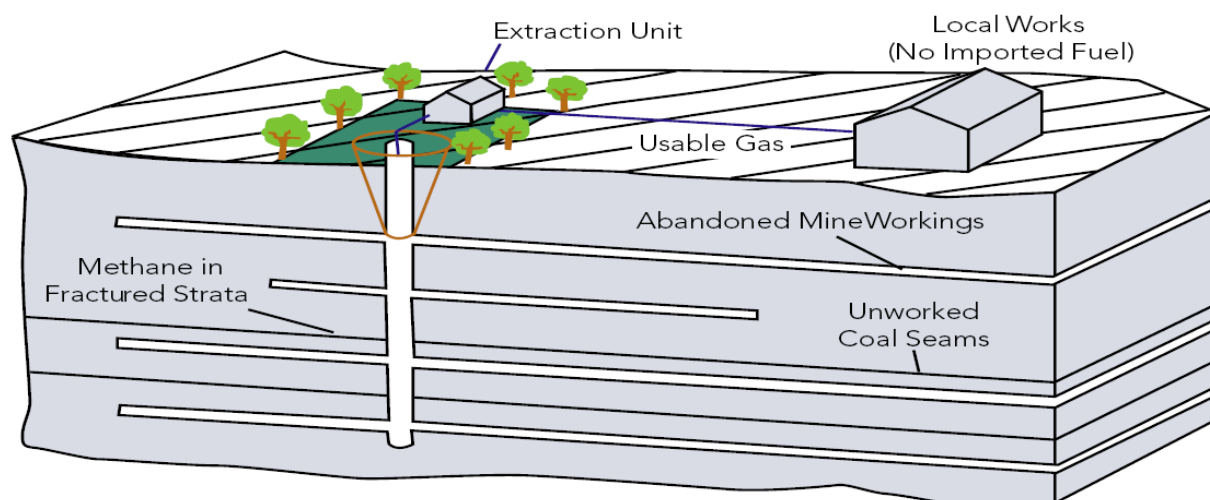
یک روش دیگر متان زدایی از داخل معدن در رابطه با معادن زیرزمینی متروکه یا مناطق متروکه یک معدن است. معادن زیرزمینی متروکه حاوی مقادیر زیادی گاز متان و سایر گازها هستند البته متان موجود در این معادن به دلیل مخلوط شدن با سایر گازها از کیفیت کمتری برخوردار است. نحوه حرکت گازها به این صورت است که با رهاسازی معدن، متان و سایر گازها از قسمت‌های مختلف و طبقات دربرگیرنده به حرکت درآمده و در داخل راهروها، سینه کارها و سایر فضاهای خالی تجمع می‌یابند. تحقیقات تاکور^۱ نشان داده است که میزان گاز قابل استحصال از معادن متروکه در مقایسه با معادن فعال پایین است. به‌رحال از موارد متان زدایی از معادن متروکه می‌توان به نمونه‌هایی در ژاپن، انگلستان و آمریکای شمالی اشاره کرد.

¹ Thakur

(Thakur, 2001; Garratt, 2006). شمایی از متان زدایی از معادن متروکه در شکل ۳-۴ نشان داده شده است.

به منظور گاز زدایی از این مناطق و کاهش آلودگی در سیستم تهویه، لوله های گاز زدایی باید از سدهای مربوطه عبور داده شوند تا گاز بتواند از کارهای معدنی قدیمی خارج شود. هدف اصلی این است که گاز بتواند با همان شدت جریانی که تولید می شود به خارج هدایت شود.

گاهی ممکن است مناطق متروکه در معادن زغال سنگ توسط لایه های منبسط شده و خرد شده در برگرفته شده باشند که این امر باعث تجمع گاز در این قسمت ها می شود. میزان تولید گاز در این مناطق ممکن است فراوان بوده و برای یک دوره طولانی مدت ادامه داشته باشد. برای محدوده خارج مناطق متروکه زغال سنگ گازدار، عملیات گاز زدایی متوقف نشده و همچنان ادامه می یابد. در اینجا نیز لوله های گاز زدایی در سدها، تونل ها یا چاه ها کار گذاشته می شوند (Mcpherson, 1993).



شکل ۳-۴: فرایند CMM (www.iea.org)

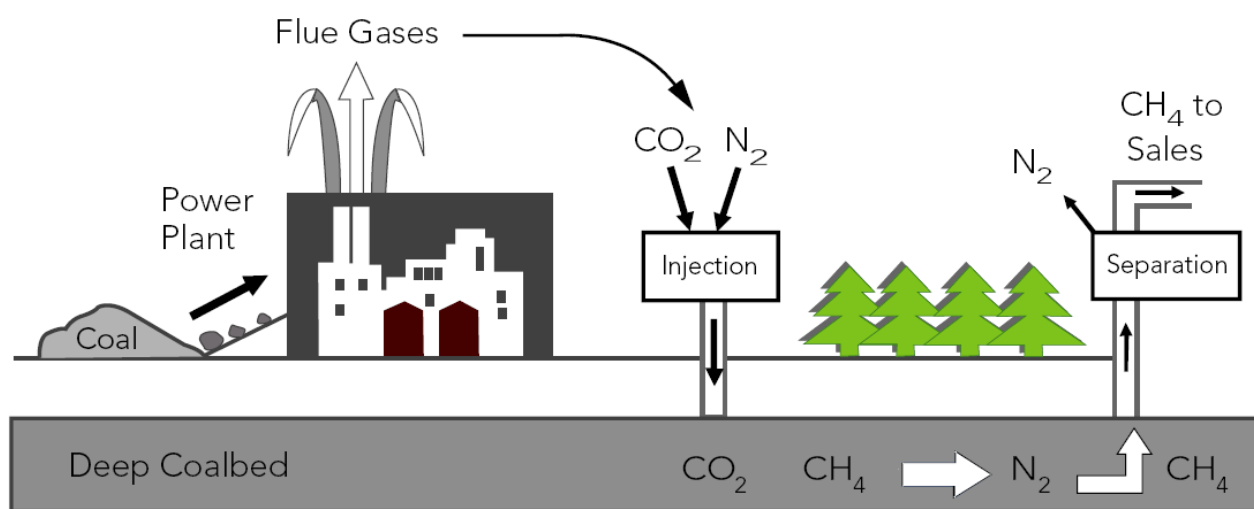
۳-۵-۳- روش بهبود یافته متان زدایی از لایه های زغال سنگ (ECBM)

این روش، بهبود یافته روش CBM است. نحوه ی متان زدایی در این روش در شکل ۳-۵ نشان داده شده است و به این صورت است که از اصل جانشینی مولکول ها به جای یکدیگر در این روش استفاده می شود. زغال سنگ قابلیت جذب دی اکسید کربن را داراست این بدان معنی است که دو مولکول دی اکسید کربن

می تواند جایگزین یک مولکول متان شوند. از این رو ECBM یک مکانیسم برای تولید متان است. در این مورد به جای آب کشی از لایه زغال سنگ، دی اکسید کربن و نیتروژن به طور مستقیم به داخل لایه زغال سنگ تزریق شده و سبب می شود که به جای متان در سطح زغال سنگ جای بگیرد و متان آزاد شود. این عمل دو منفعت کلی دارد:

۱- از این روش می توان به عنوان یک روش ذخیره سازی دی اکسید کربن استفاده کرد. به عنوان مثال در کشور نروژ که به میزان دی اکسید کربن تخلیه شده در فضا مالیات تعلق می گیرد این روش برای کاهش هزینه ها بسیار مؤثر است.

۲- در صورتی که عملیات متان زدایی همراه با آب کشی باشد و در صورت کاهش میزان متان استحصال شده، عملیات تزریق دی اکسید کربن می تواند تا دو سال جلوتر به منظور جلوگیری از کاهش متان استحصال از گمانه های CBM به کار گمارده شود.



شکل ۳-۵: فرآیند ECBM (www.iea.org)

روش های شبیه سازی و نیز پایلوت های اجرا شده نشان داده است که ECBM می تواند سبب افزایش بازیابی متان در لایه های زغالی قابل استخراج و غیر قابل استخراج پیش از استخراج شود. مطالعات آزمایشگاهی نشان داده است که لایه های زغالی قادرند چیزی در حدود دو برابر گاز دی اکسید کربن نسبت به متان را در خود ذخیره کنند. به هر حال ذخیره سازی دی اکسید کربن به صورت تنها در داخل لایه های زغالی قابل استخراج

سبب مشکلات ایمنی در معادن در هنگام استخراج می شود. بدین منظور، دی اکسید کربن را با سایر گازها باید مخلوط کرد و سپس به داخل لایه تزریق کرد. مطالعات انجام شده نشان داده است که به ازای هر مقدار نیتروژن تزریق شده، ۲ برابر گاز متان آزاد می شود. بنابراین تمایل بیشتر به ترکیب نیتروژن با دی اکسید کربن است.

۳-۶- مزایای روش زهکشی متان

در چند دهه اخیر، تولید متان از معادن به دلیل تولید بیش از حد زغال سنگ، خرد کردن زیاد آن و استخراج زغال از اعماق زیاد افزایش یافته است. از این رو استفاده از روش زهکشی متان دارای مزایای زیادی است که عبارتند از (USEPA, 1999):

۳-۶-۱- کاهش زمان های توقف

افزایش تولید زغال سنگ، بیشترین منفعتی است که از متان زدایی لایه های زغال سنگ حاصل شده است. این امر باعث می شود عملیات معدنکاری به دلیل وجود متان بالا متوقف نشود.

۳-۶-۲- کاهش هزینه های مربوط به تهویه

کاهش هزینه های سیستم تهویه دومین منفعت متان زدایی است. در بیشتر معادن، تأمین هوای تمیز به منظور عملیات استخراج پیوسته، گران است. متان زدایی می تواند کمک زیادی به کاهش هزینه های تهویه و کمک به استخراج پیوسته کند.

۳-۶-۳- کاهش هزینه سرمایه گذاری اولیه

از آنجا که متان زدایی باعث کاهش هزینه های تهویه می شود این امر سبب می شود که در هنگام حفر راهروها و ورودی های معدن مشکل تهویه بروز ننماید. این امر دو مزیت دارد:

۱- کاهش تعداد گمانه ها و ورودی های متصل به هم.

۲- پایین آمدن هزینه های استخراج زغال از ورودی ها و راهروها نسبت به پهنه ها.

باید توجه داشت که در روش جبهه کار طولانی مکانیزه، هزینه استخراج زغال سنگ از ورودی ها خیلی بیشتر از هزینه استخراج از پهنه ها است.

۳-۶-۴- افزایش ذخایر زغال سنگ قابل استخراج

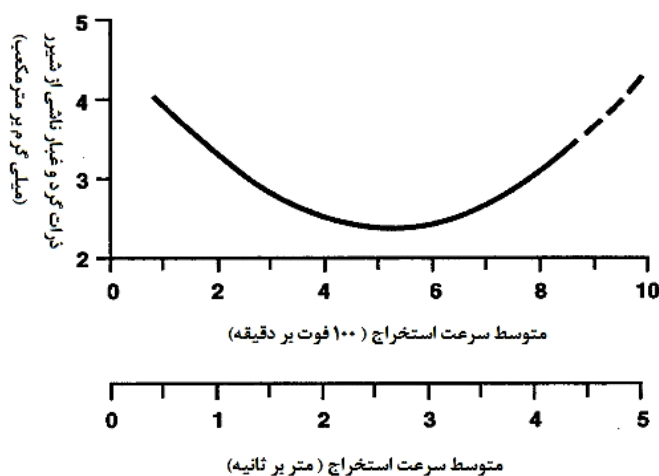
متان زدایی باعث می شود که بتوان در طراحی معدن تعداد ورودی ها و نیز راهروها را کاهش داد. این امر سبب افزایش بازیابی استخراج شده و نیز می توان میزان ذخیره بیشتری را از اعماق بیشتر استخراج کرد.

۳-۶-۵- افزایش ایمنی

وجود متان زیاد در هوای معدن باعث بروز حوادث ناگواری برای کارگران و ایجاد یک محیط ناایمن می شود. از این رو متان زدایی باعث کاهش این مشکلات ناگوار می شود.

۳-۶-۶- کاهش مسائل مربوط به انتشار ذرات ریز و گردوغبار

یک ارتباط مستقیم بین متان زدایی و کنترل هزینه های ذرات گردوغبار وجود دارد. متان زدایی باعث کاهش هزینه های کنترل ذرات گردوغبار می شود. مطالعات انجام شده توسط میندل^۱ نشان داده است که در صورتی که سرعت هوا بالای ۱۸۰ متر بر دقیقه باشد، تمرکز ذرات گردوغبار در سینه کار افزایش می یابد. این موضوع در شکل ۳-۶ در ارتباط با متوسط سرعت هوا در سینه کار و عملکرد دستگاه شیرر نشان داده شده است. اگرچه این شکل برای روش های جبهه کار طولانی امروزه با توجه به پیشرفت فناوری زیاد مناسب نیست اما به دست آوردن یک تخمین قابل اعتماد برای کاهش هزینه های ذرات گردوغبار در اثر متان زدایی اغلب اوقات پیچیده و مشکل است.



شکل ۳-۶: میزان ذرات گردوغبار ناشی از عملکرد دستگاه شیرر نسبت به متوسط سرعت هوا در سینه کار (USEPA, 1999)

¹ Mundel

۳-۶-۷- کاهش مسائل مربوط به آب

وجود آب در کف و سقف لایه زغال سنگ باعث اختلال در عملیات استخراج زغال سنگ می شود. با متان زدایی آب موجود در کمر بالای لایه زغال سنگ حذف شده و مشکلات مربوط به آن به حداقل می رسد.

۳-۶-۸- شرایط کاری ایمن تر و راحت تر

در صورت وجود متان زیاد در داخل معدن و استفاده از دستگاه های تهویه با قدرت بالا، استفاده از سیستم های تنظیمی هوا برای تنظیم شدت جریان هوا الزامی است. سرعت هوای بالای ۱۸۰ متر بر دقیقه مشکلاتی برای کارگران ایجاد می کند. از این رو متان زدایی می تواند به ایجاد شرایط ایمن و راحت تر برای کارگران منتهی شود.

۳-۶-۹- تأمین برق مورد نیاز معدن

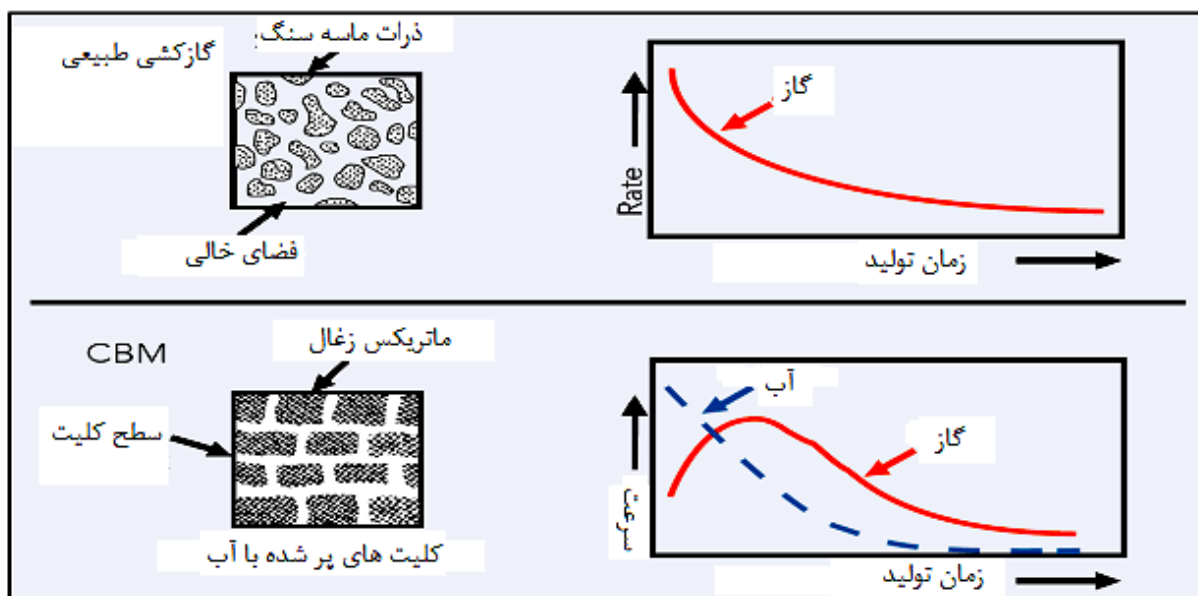
از انرژی گازهای خروجی از معدن می توان برای تولید الکتریسیته، سوخت دستگاه ها، گرم کردن ساختمان ها و سوخت ماشین آلات موجود در محل معدن استفاده کرد.

۳-۷- مقایسه گاز CBM با گاز طبیعی

مقایسه گاز متان با سایر گازهای طبیعی باید از نقطه نظر هزینه تولید، بازاریابی و پارامترهای اقتصادی مدنظر قرار گیرد. گاز طبیعی معمولاً در تشکیلات آهکی و شیلی یافت می شود. این گاز در اثر فعالیت های تکتونیکی، گسل ها و چین خوردگی ها به سمت بالا حرکت می کند. حال آن که گاز متان در سطح زغال سنگ جذب می شود و توسط آب موجود در تشکیلات زغال دار قابل انتقال است. در روش تولید گاز طبیعی، مقدار گاز استحصال با گذشت زمان و افزایش میزان آب خروجی کاهش پیدا می کند و یک رابطه مستقیم از ابتدا تا انتهای تولید بین تولید گاز و آب زهکشی شده برقرار است. در حالی که در روش CBM با کاهش مقدار آب، درصد متان مستقیماً کاهش نمی یابد بلکه در یک بازه زمانی از میزان آب زهکشی شده، درصد متان استحصال شده افزایش می یابد و در ادامه آن با کاهش میزان آب زهکشی شده، درصد متان نیز کاهش می یابد. این ارتباط در شکل ۳-۷ نشان داده شده است. حالت منحنی های نشان داده شده در این شکل

تابعی از فاصله گمانه‌ها، نفوذپذیری و درجه اشباع‌شدگی مخزن است. به‌طور کلی میزان تولید گاز گمانه‌های CBM نسبت به چاه‌های گاز طبیعی کمتر است.

مقایسه هزینه تولید گاز CBM با هزینه تولید گاز طبیعی بیانگر این است که هزینه آب‌کشی گمانه‌های CBM خیلی کمتر از چاه‌های تولید گاز طبیعی است. از آنجا که ذخایر CBM در عمق کمتری نسبت به ذخایر گاز طبیعی واقع شده‌اند هزینه حفاری گمانه‌ها در این روش کمتر است (Law and Rice, 1993).



شکل ۳-۷: مقایسه بین گاز طبیعی و گاز CBM از نقطه نظر تولید (www.energy.gov)

۳-۸- موارد استفاده از گاز CBM برحسب نوع گاز

یکی از تصمیمات پیش روی صاحبان معادن و شرکت‌ها در متان زدایی، برنامه استفاده و فروش این گاز است. در صورتی که معدن نزدیک خطوط لوله گاز طبیعی قرار داشته باشد یک مزیت خوب برای صاحبان معادن به شمار می‌رود از این رو توانایی صاحبان معدن برای فروش گاز اهمیت بالایی در فرآیند متان زدایی دارد. زمینه‌های استفاده از گاز CBM برحسب نوع آن به‌صورت زیر است (USEPA, 1999).

۳-۸-۱- گاز با ارزش حرارتی بالا^۱

گاز با ارزش حرارتی بالا به گازی اطلاق می‌شود که دارای ارزش حرارتی بیشتر از 950 Btu^2 بر فوت مکعب استاندارد است و امکان استفاده از آن در خطوط لوله گاز طبیعی وجود داشته باشد (ارزش حرارتی یک گاز، مقدار حرارتی است که در اثر سوختن یک مترمکعب آن گاز ایجاد می‌شود. ارزش حرارتی هر مترمکعب متان تقریباً معادل ارزش حرارتی یک لیتر نفت سفید است به عبارت دیگر چنانچه یک فوت مکعب از آن سوزانده شود معادل با ۲۵۲ کیلوکالری انرژی حرارتی آزاد می‌کند که از این لحاظ در مقایسه با دیگر سوخت‌ها بسیار قابل توجه است). در صورتی که سیستم متان زدایی در فاصله دوری از خطوط لوله اصلی قرار داشته باشد می‌توان با جمع‌آوری و فشرده‌سازی آن را به فروش رساند. از گازهای با ارزش حرارتی بالا می‌توان در موارد زیر استفاده کرد:

- گاز شهری (متان بالای ۹۷ درصد)

- استفاده در کارخانه‌های مواد خام به‌منظور تولید آمونیاک، متانول و اسید استیک (متان بالای ۸۷ درصد).

- به‌عنوان سوخت اتوبوس‌ها، تانکرها و اتومبیل‌ها. کاربرد گاز CBM به‌عنوان سوخت اتومبیل با موفقیت در اکراین و جمهوری چک استفاده شده است.

۳-۸-۲- گاز با ارزش حرارتی متوسط^۲

این گازها دارای ارزش حرارتی بین ۳۰۰ تا 950 Btu بر فوت مکعب استاندارد هستند. از این گاز

استفاده‌های زیادی می‌شود که در زیر به نمونه‌هایی از آن اشاره شده است.

- به‌عنوان مخلوط با سایر گازها به‌منظور افزایش ارزش حرارتی گاز خط لوله.

- همراه با زغال سنگ به‌عنوان سوخت در بویلرهای صنعتی.

- به‌عنوان سوخت در موتورهای احتراق داخلی (متان بالای ۲۰ درصد).

- کاربرد در تأسیسات شیرین کردن آب‌شور (متان بالای ۵۰ درصد).

¹ High-Btu Gas

² British thermal units

³ Medium-Btu Gas

- به عنوان سوخت در توربین های کوچک (متان بالای ۳۵ درصد).

- به عنوان سوخت برای تأسیسات و گرم کردن مکان های محل معدن.

- استفاده در سلول های سوختی (متان بالای ۳۰ درصد).

۳-۸-۳- گاز با ارزش حرارتی پایین^۱

این گاز دارای ارزش حرارتی کمتر از ۳۰۰ Btu بر فوت مکعب استاندارد است. به دلیل کیفیت پایین این گاز، در اکثر معادن به داخل هوا رهاسازی می شود. از این رو استفاده از این گاز به عنوان یک منبع انرژی اولیه غیرممکن است. هرچند که باگذشت زمان و ورود فناوری های جدید باید به بررسی استفاده از این گازها پرداخت. بعضی از موارد استفاده از این گاز به صورت زیر است:

- تبدیل هوای تهویه به انرژی با استفاده از فناوری های اکسیداسیون (متان زیر ۱ درصد).

- استفاده از هوای تهویه به عنوان یک سوخت قابل احتراق در تولید نیرو (متان زیر ۱ درصد).

- استفاده از هوای تهویه به عنوان یک سوخت قابل احتراق در توربین های گازی (متان زیر ۱ درصد).

۳-۹- راهکارهای مدیریتی به منظور افزایش نرخ گز کشی

در بهینه سازی یک سیستم گاز کشی باید اقدامات خاصی بسته به شرایط لایه زغال سنگ، مورد استفاده قرار گیرد که عبارتند از (Wang and Xue, 2008):

۳-۹-۱- تعیین فاصله بهینه گمانه ها

بهبود سیستم گاز کشی وابسته به موقعیت صحیح گمانه ها و نیز تعمیر و نگهداری آن ها در مدت زمان بهره برداری از آن است. از این رو طراحی شبکه گمانه ها نیازمند دسترسی به اطلاعات زیادی شامل نفوذپذیری و گاز محتوی لایه زغال سنگ، آنومالی های زمین شناسی، تغییر شکل ها و نیز نفوذپذیری القایی ناشی از عملیات معدنکاری است.

۳-۹-۲- بهبود سیستم زهکشی متان

بهبود سیستم زهکشی متان شامل موارد زیر است:

¹ Low-Btu Gas

- ۱- انتخاب پمپ‌های مناسب به طوری که بتواند حجم گاز مورد نیاز شبکه طراحی شده را تأمین کند.
 - ۲- افزایش قطر لوله‌ها، انتخاب قطر و جنس مناسب لوله‌ها بر عملیات زهکشی متان تأثیر زیادی دارد و باید در طول فرایند زهکشی گاز به آن توجه ویژه‌ای شود.
 - ۳- نصب وسایل خودکار به منظور زهکشی آب در سیستم زهکشی متان.
 - ۴- در نظر گرفتن اصول نصب تعمیر و نگهداری سیستم زهکشی متان.
- به منظور افزایش ایمنی و بهره‌وری عملیات زهکشی متان، اداره ایمنی و بهداشت در معادن^۱ آمریکا اصول زیر را به منظور انجام و تعمیر و نگهداری خطوط انتقال گاز متان در معادن زیرزمینی و بر روی سطح زمین مشخص کرده است که این اصول به شرح زیر است (Thakur, 2006).
- جنس خطوط لوله باید از جنس پلاستیک‌های دارای محافظ شیشه‌ای (GRP^۲) و پلی اتیلن یا فولاد باشد. این لوله‌ها باید به راحتی قابل حمل و نقل باشند و در عوض از آسیب تجهیزات معدنی دور باشند. در صورتی که امکان تخریب راهروها وجود داشته باشد باید از لوله‌های فولادی قابل انعطاف در مقابل بارهای وارده استفاده کرد. منبع اصلی خطر برای شبکه لوله‌ها در معدن شامل نوار نقاله، سیستم باربری، لوکوموتیوها و آتشباری است. به هر حال احتمال آسیب دیدن این لوله‌ها در اثر تخریب سقف وجود دارد (ECE, 2010). برای اتصال پلاستیک به فولاد یا پلاستیک به پلاستیک باید از اتصال جوشی مناسب استفاده شود.
 - طول کل خط لوله بین ابتدا و انتهای گمانه تهویه باید در فشار 90 psi مورد آزمایش قرار گیرد.
 - خط لوله انتقال گاز در راهرو برگشت هوا نباید در زیر خاک قرار بگیرد.
 - استفاده از شیلنگ در خط لوله به جز در حین عملیات حفاری یک گمانه ممنوع است. در محل اتصال لوله‌ها به یکدیگر باید از تیوپ‌های لوله‌ای قابل انعطاف استفاده شود.
 - به منظور حذف و جلوگیری از ورود آب به داخل لوله‌گذاری دیواره گمانه، باید از جداکننده آب از گاز استفاده شود. در صورت استفاده از سایر جداکننده‌ها باید مجوزهای لازم آن کسب شود.
 - در صورت استفاده از لوله‌های فولادی، باید ملاحظات لازم در عدم خوردگی لوله انجام شود.

¹ Mine Safety and Health Administration

² Glass-Reinforced Plastic

- باید از شیرهای فشارشکن در سر هر کدام از گمانه‌ها استفاده شود.
- بازرسی هفته‌ای خطوط لوله باید توسط افراد مجرب و آشنا به سیستم‌های تعمیر و نگهداری صورت پذیرد.
- در صورت مشاهده میزان انتشار بالای متان در معدن، به صورتی که علاوه بر خطوط لوله، سیستم تهویه نیز نتواند آن را به حد مجاز برساند، استفاده از ابزارهای پایش ضروری است.
- تمام گمانه‌های حفاری شده زهکشی گاز متان باید در حین عملیات حفاری و بعد از آن به‌طور دقیق توسط ابزارهای خاص مورد بازرسی قرار گیرند.

۳-۹-۳- افزایش زمان گاز کشی

برای لایه‌های زغال‌سنگ با نفوذپذیری کمتر از 10^{-3} میلی داری، مدت زمان گاز کشی باید ۶ تا ۸ ماه افزایش یابد.

۳-۹-۴- بهبود کیفیت گاز خروجی

کیفیت گاز خروجی از اهمیت بالایی برخوردار است. باید تمهیداتی اندیشیده شود تا گاز از کیفیت بالایی برخوردار شود. کیفیت گاز از لحاظ میزان رطوبت، ترکیبات سولفور، ترکیبات هیدروکربنی (شامل اتان و پروپان) باید مورد بررسی قرار گیرد. این عوامل باید در گمانه‌های زهکشی، شبکه لوله‌های سطحی، کارخانه استحصال متان، پمپ خانه و غیره اندازه‌گیری شود (ECE, 2010).

۳-۹-۵- بهبود سیستم پایش گاز

به‌منظور کارایی بیشتر سیستم زهکشی گاز از سیستم‌های کنترل از راه دور استفاده می‌شود. کیفیت پایش به قابلیت اعتماد، موقعیت، تعمیر و نگهداری و کالیبراسیون سنسورها و سایر ابزارهای پایش بستگی دارد.

۳-۱۰- مسائل زیست‌محیطی و مشکلات موجود در اجرای یک پروژه CBM

محیط‌زیست از ارکان توسعه پایدار هر کشوری است. امروزه با توجه به رویکرد جهانی به مسئله حفاظت از محیط‌زیست، تلاش‌های بسیاری در زمینه‌های شناسایی، ارزیابی و مدیریت آثار مخرب بر محیط‌زیست در سطح جهان صورت گرفته است. پروژه‌های CBM علاوه بر داشتن آثار مفید برای محیط‌زیست (کاهش گازهای وارد شده به هوا) دارای یک‌سری آثار مخرب زیست‌محیطی است که باید در حین اجرای پروژه به آن

توجه شود. مهم ترین آثار مخرب زیست محیطی پروژه های CBM و نیز مشکلات اجرایی آن به صورت زیر است:

۳-۱۰-۱- میزان آب استحصال شده

در شرایطی که لایه زغال سنگ آب دار باشد یا زیر سطح آب ایستابی قرار گرفته باشد، مقدار آب زیادی در فرایند CBM تولید می شود که به عوامل زمین شناسی (نفوذپذیری، رتبه زغال سنگ و...) و فاکتورهای دیگر (سختی و میزان تولید) وابسته است، این آب می تواند وارد تشکیلات زمین شناسی نشود و استفاده برای آبیاری شود و یا در تالاب های تبخیر سطحی ذخیره شود، ولی با گذشت زمان میزان آب استحصال شده کاهش می یابد. میزان آب استحصال شده باعث پایین آمدن سطح آب ایستابی نیز می شود و با توجه به شکل ۳-۸ مشخص است که تأثیر منفی بر روی زمین های اطراف دارد به خصوص این که این زمین های دارای کاربری کشاورزی باشند (USEPA, 1999).

از آنجاکه آب زهکشی شده معمولاً شور است نمی توان با جمع آوری آب در سطح زمین از آن در آبیاری مزارع استفاده کرد. اغلب اوقات این آب دوباره به داخل تشکیلات سنگی تزریق می شود اما این عامل منجر به انتقال آلودگی ها به داخل سفره آب زیرزمینی می شود. در کشورهای گرم مانند استرالیا آب به داخل استخرهای تبخیری فرستاده می شود. در کشورهای سرد، با جمع آوری آب در داخل استخرها و یخ زدن آن می توان نمک موجود در آن را جداسازی کرد و آب تمیز را مورد استفاده قرار داد.

به هر حال چنانچه این فرایند به صورت نامناسب ظاهر شوند می تواند به طور مداوم آسیب به محیط زیست برساند، بنابراین اطلاعات کیفی آب برای طراحی میزان حذف آب و دیگر ملاک های تصمیم گیری اساسی خواهد بود.



شکل ۳-۸: تأثیر زهکشی آب در فرایند CBM بر روی زمین های اطراف

۳-۱۰-۲- میزان گاز متان رهانده در هوا

مقداری گاز متان همواره به هوا تخلیه می‌شود. متان ۲۰ برابر بیشتر از دی‌اکسید کربن، باعث گرمای هوا می‌شود. بنابراین تخلیه یا فرار متان خیلی خطرناک است.

۳-۱۰-۳- آلودگی صوتی و هوا ناشی از کمپرسورها و سایر تجهیزات

تجهیزات مورد استفاده در عملیات متان زدایی، میزان زیادی گردوخاک و صدای ناهنجار تولید می‌کنند که باید سعی شود از وسایل و تجهیزات استاندارد در فرآیند استفاده کرد.

۳-۱۰-۴- برهم زدن منظره طبیعی سطح زمین

در اجرای یک پروژه CBM به‌خصوص در هنگامی که متان زدایی از سطح زمین صورت پذیرد به دلیل ایجاد جاده و خطوط لوله در سطح زمین منظره طبیعی زمین به هم می‌خورد که باید تمهیدات لازم در اجرای عملیات سطحی به‌طوری که منظره طبیعی زمین حداقل دستخوش را داشته باشد صورت پذیرد (USEPA, 1999).

۳-۱۰-۵- در دسترس نبودن خطوط انتقال گاز

یکی از مهم‌ترین مزیت‌های برای یک پروژه CBM این است که گاز آن به خطوط لوله اصلی انتقال گاز تحویل داده شود. از این رو بهترین پروژه CBM، پروژه‌ای است که نزدیک خطوط انتقال گاز واقع شده باشد. یکی دیگر از محدودیت‌های انتقال گاز به خطوط لوله اصلی کمیت و کیفیت گاز استحصالی است. این گازها باید حاوی بیشتر از ۹۷ درصد متان و عاری از گازهای خطرناک باشند.

۳-۱۰-۶- دسترسی به زمین^۱

انجام پروژه‌های CBM منطقه وسیعی را تحت پوشش قرار می‌دهد. در صورتی که پروژه در منطقه‌ای واقع شده باشد که زمین‌های آن منطقه دارای کاربری کشاورزی باشد ممکن است چالش‌هایی با صاحبان زمین‌ها ایجاد شود. بنابراین بهتر است قبل از انجام پروژه تمهیدات لازم برای رفع این مشکلات صورت پذیرد.

¹ Land Access

۳-۱۰-۷- پایین بودن نرخ گاز کشی

مشکل اصلی در زمینه گاز کشی، نسبت پایین نرخ گاز کشی است. نسبت کم گاز کشی به دلیل کمبود روش های مؤثر در زمینه گاز کشی از لایه ها با نفوذپذیری کم و ضعیف است. نزدیک به ۹۵ درصد معادن خطر دار در چین دارای لایه هایی با نفوذپذیری 10^{-4} تا 10^{-3} میلی داری هستند. بنابراین از مهم ترین عوامل کاهش نسبت زهکشی می توان به سیستم های نامناسب گاز کشی، سیستم های پایش گاز، کافی نبودن گمانه ها، فرصت ناکافی گاز کشی اشاره کرد (Wang, 2003).

۳-۱۰-۸- قیمت گاز طبیعی

گاز زهکشی شده از گمانه CBM در رقابت مستقیم با گاز طبیعی است و فروش این گاز تحت تأثیر قیمت گاز طبیعی است بنابراین اقتصادی بودن یک پروژه CBM قاعداً باید با بررسی قیمت کمتر گاز طبیعی انجام شود.

۳-۱۱- روش های مختلف متان زدایی

۳-۱۱-۱- مقدمه

تفاوت ساختارهای زمین شناسی و شرایط معدنکاری متفاوت در سراسر جهان منجر به استفاده از روش های مختلف زهکشی متان شده است که به دو صورت کلی متان زدایی پیش از معدنکاری^۱ و متان زدایی همراه با معدنکاری^۲ قابل انجام است. این روش ها هر کدام دارای مزایا و معایبی هستند و در انجام یک پروژه متان زدایی با بررسی کلیه پارامترهای تأثیرگذار در پروژه و بررسی فنی و اقتصادی باید یکی از روش های متان زدایی یا مجموعه ای از این روش ها به صورت ترکیب با یکدیگر مورد بررسی قرار گیرد.

۳-۱۱-۲- متان زدایی پیش از معدنکاری

در این روش قبل از انجام عملیات معدنکاری و نیز با آماده سازی راهروها و ورودی ها، عملیات متان زدایی با حفاری گمانه های قائم و افقی قابل انجام است. این گمانه ها ۲ تا ۷ سال زودتر از شروع معدنکاری ایجاد

^۱ Pre-Drainage

^۲ Post- Drainage

می‌شوند. این روش متان زدایی برای کاهش خطر انفجار در معدن ضروری است زیرا با انجام این روش حجم زیادی از گازها که با انجام معدنکاری پتانسیل ایجاد خطر را دارا می‌باشند، حذف می‌شوند. ارزیابی استفاده از سیستم متان زدایی پیش از معدنکاری با استفاده از روش‌های تجربی و نظری قابل انجام است. در صورتی که در این محدوده معدنی فعال با مشخصات زمین‌شناسی یکسان و خصوصیات مشابه وجود داشته باشد با بررسی مسائل مربوط به گاز موجود در معدن مجاور و نیز گاز محتوی لایه زغال سنگ، می‌توان به یک تصمیم صحیح در مورد پیش زهکشی متان رسید.

۳-۱۱-۲-۱- متان زدایی با حفر گمانه قائم از سطح زمین

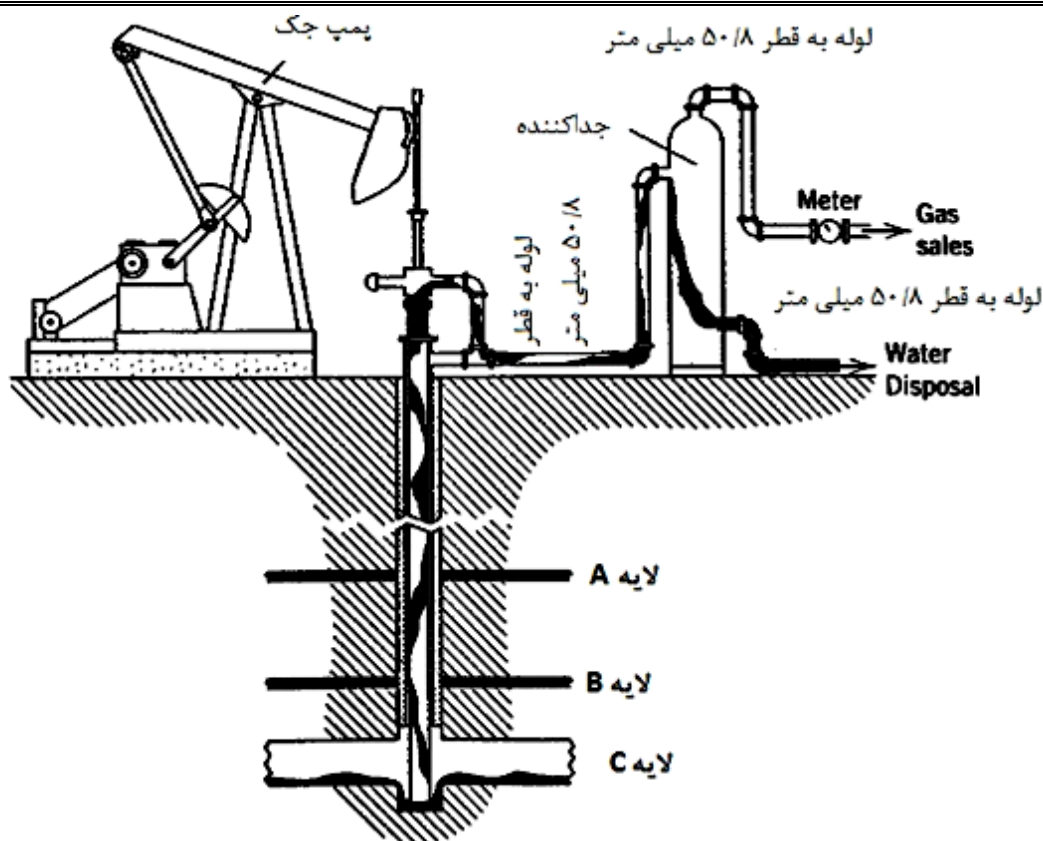
این گمانه‌ها به‌طور قائم تا سطح لایه زغال سنگ حفر می‌شوند. احداث این گمانه‌ها برای زهکشی متان نیاز به روش یا تجهیزات غیرمعمولی ندارد. این گمانه‌ها با قطرهای مختلف قابل حفر هستند ولی معمولاً به نحوی است که جداره خارجی با قطر ۴ اینچ گاز را به سطح زمین منتقل می‌کند و جداره داخلی دارای قطر ۳ اینچ است. شکل ۳-۹ شمایی از یک گمانه قائم با تجهیزات سطحی آن را نشان می‌دهد. تجهیزات سطحی شامل بالابر و جداکننده در سطح زمین واقع شده‌اند. در این گمانه‌ها گاز تولیدشده به دلیل این که با عملیات معدنکاری تداخل پیدا نکرده است از کیفیت بالایی برخوردار است. گمانه‌های قائم قادرند ۵۰ تا ۹۰ درصد گاز موجود در لایه زغال سنگ را زهکشی نمایند (USEPA, 1999).

اگر گاز از چندین لایه زهکشی شود، جدار بندی در تمام طول چال قرار داده می‌شود و سوراخ‌هایی در جدار بندی در هر افق لایه زغال سنگ ایجاد می‌شود. این نوع زهکشی امکان همزمان تولید از چندین افق را ممکن می‌سازد.

دو روش برای ارتباط بین لایه زغال سنگ و گمانه از میان جدار بندی بکار می‌رود (Lambert et al., 1980).

۱- سوراخ کردن جدار بندی با بارهای شکل‌دار توسط روش شکافت هیدرولیکی.

۲- ایجاد سوراخ‌هایی عمود بر جدار بندی با استفاده از تجهیزات خاص.



شکل ۳-۹: زهکشی متان توسط گمانه قائم (William, 1994)

در طراحی شبکه گمانه‌های قائم، تعیین فاصله بهینه گمانه‌ها به صورتی که بتوانند کل سطح لایه را تحت پوشش قرار دهند از اهمیت بالایی برخوردار است. عوامل زیادی بر فاصله گمانه‌های قائم تأثیر می‌گذارند. دو عامل اصلی که باید در ابتدا مورد بررسی قرار گیرند، یکی مدت زمان در اختیار برای زهکشی متان با استفاده از این گمانه‌ها و دیگری بودجه است. واضح است که هر چه مدت زمان برای زهکشی متان بیشتر باشد گمانه‌ها در فاصله دورتری از یکدیگر حفر می‌شوند و این خود عاملی بر کاهش هزینه‌هاست. مدت زمان مناسب برای زهکشی متان از گمانه‌های قائم حداقل ۴ تا ۵ سال قبل از معدنکاری است (William, 1994).

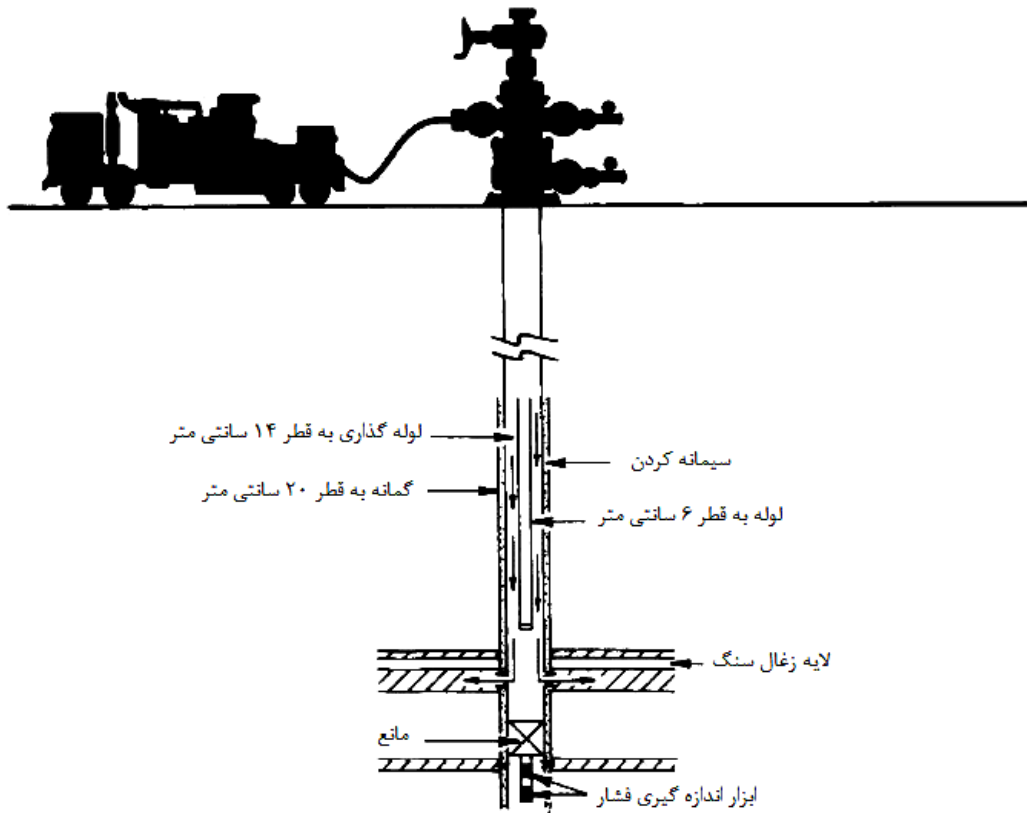
الف- روش شکافت هیدرولیکی و آتشفباری کنترل شده در گمانه‌های قائم

در اعماق زیاد به سبب فشار محصورکننده بیشتر، میزان تراوایی و نفوذپذیری لایه زغال سنگ و سنگ‌های دربرگیرنده کاهش می‌یابد. این عامل باعث می‌شود که گمانه معمولی دیگر مؤثر نباشد. با پیشرفت فناوری

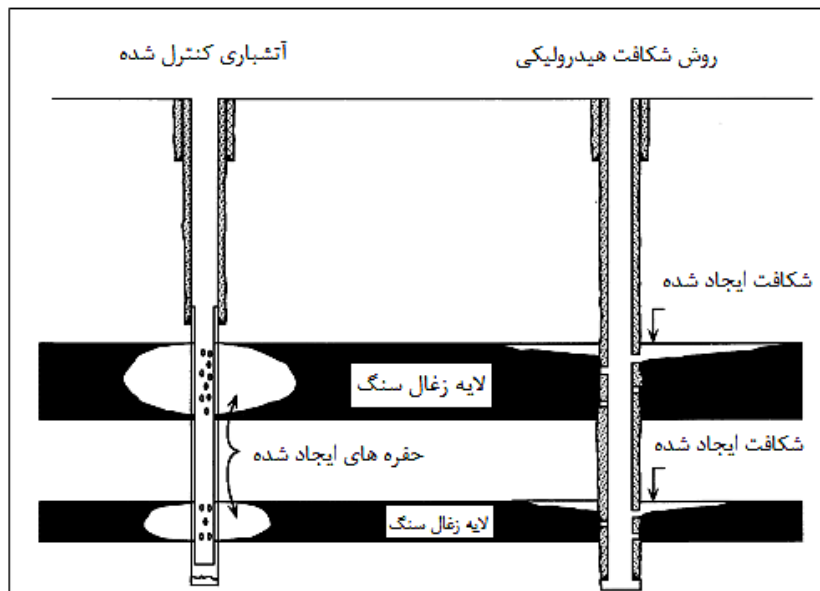
به منظور افزایش نفوذپذیری در لایه های زغال سنگ با نفوذپذیری کم از روش شکافت هیدرولیکی و ایجاد حفره (با استفاده از آتشباری کنترل شده) استفاده می شود.

شکافت هیدرولیکی روش استاندارد قابل کاربرد برای افزایش تولید گمانه در صنعت نفت و گاز است. روش های اصلاح شده شکافت هیدرولیکی مورد استفاده در صنعت نفت و گاز در ایالات متحده در چندین ناحیه برای لایه های زغال سنگ بکار برده شده است (USEPA, 1999). در روش شکافت هیدرولیکی هدف اصلی ایجاد ترک ها و شکستگی هایی به طول ۰/۳ تا ۰/۶ متر در کف گمانه در دو جهت توسط فشار آب است در صورتی که منطقه عملیاتی شرایط لازم برای استفاده از روش شکافت هیدرولیکی را دارا باشد این روش سبب کاهش تعداد گمانه ها و کاهش تجهیزات می شود (Wang and Xue, 2008).

سازوکار اصلی شکافت هیدرولیکی برای زهکشی گاز از لایه های زغال سنگ کاملاً ساده است. در این روش ابتدا گمانه ای به قطر ۲۰۵ میلی متر تا عمق معینی در زیر لایه زغال سنگ با مته حفر می شود. بسته به روش مورد استفاده، یک جداره فولادی ۱۱۴ میلی متری از سطح زمین تا بالای لایه زغال سنگ تحت فشار سیمان کاری می شود. برای شروع گسترش شکستگی، سیال انتخاب شده تحت فشار به داخل لایه زغال سنگ پمپ می شود. در این روش با تلمبه کردن نیتروژن به داخل آبی که حاوی یک فوم ساز است، فوم تولید می شود. این فوم ۷۵ درصد نیتروژن دارد. در طول فرآیند، ذرات ماسه ای با اندازه های مشخص برای غلبه بر تنش های برجا و شکستگی های نزدیکی دیواره به سیال اضافه می شوند تا شکاف های ایجاد شده را پس از کاهش فشار سیال باز نگه دارد. تراوایی این ذرات چنان است که مجرای برای جریان گاز ایجاد کند تا گاز بتواند از چند صد متر دورتر جاری شود. نرخ تولید گاز با استفاده از این روش، ۵ تا ۲۰ برابر نرخ تولید گاز قبل از استفاده است (بایس، ۱۳۶۹). در شکل ۳-۱۰ تأسیسات سر چاهی روش شکافت هیدرولیکی و در شکل ۳-۱۱ روش حفره باز به همراه شکافت هیدرولیکی نشان داده شده است.



شکل ۳-۱۰: تأسیسات سر چاهی در روش شکافت هیدرولیکی (William, 1994)



شکل ۳-۱۱: روش شکافت هیدرولیکی و ایجاد حفره در گمانه های قائم (USEPA, 1999)

در روش آتشباری کنترل شده به منظور کنترل شکستگی ها و افزایش سطح آزاد، تعدادی از گمانه ها با مواد منفجره پر می شوند و تعدادی از گمانه های واقع در بین آن ها خالی می ماند. روش آتشباری کنترل شده در گمانه های قائم سبب کاهش حفر تعداد گمانه ها شده و هر چه طول گمانه افزایش پیدا کند، میزان کارایی و ایمنی روش افزایش می یابد.

نتایج شکافت هیدرولیکی و آتشباری کنترل شده عبارت است از (Wang and Xue, 2008):

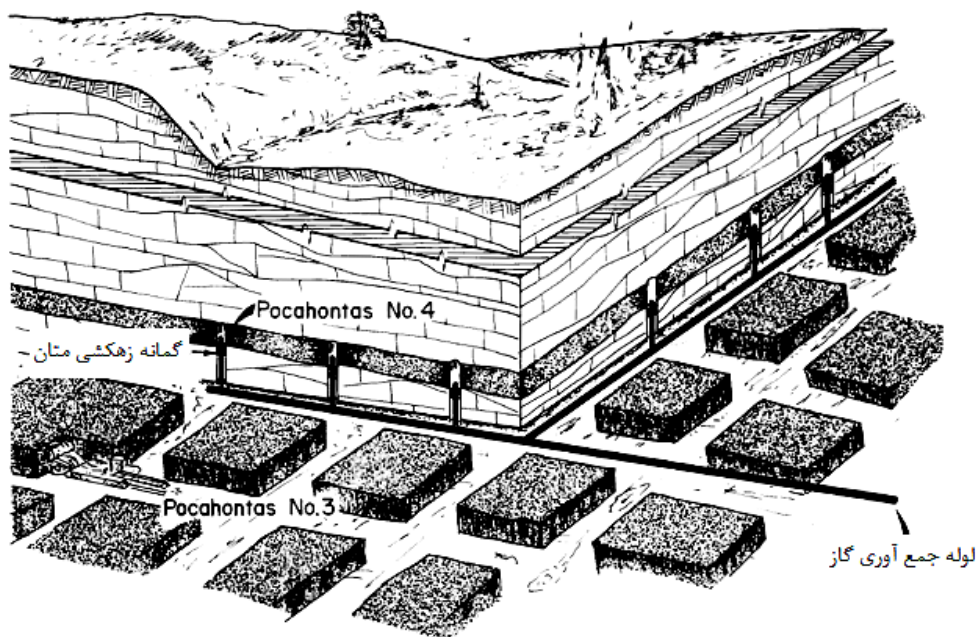
۱- استفاده از آتشباری کنترل شده سبب افزایش نفوذپذیری به میزان ۲ تا ۵ برابر شده و میزان گاز خروجی ۵۰ تا ۹۰ درصد افزایش می یابد.

۲- استفاده از شکافت هیدرولیکی سبب افزایش نفوذپذیری به میزان ۱۰ تا ۱۰۰ برابر شده و میزان گاز خروجی ۱۰۰ تا ۲۰۰ درصد افزایش می یابد.

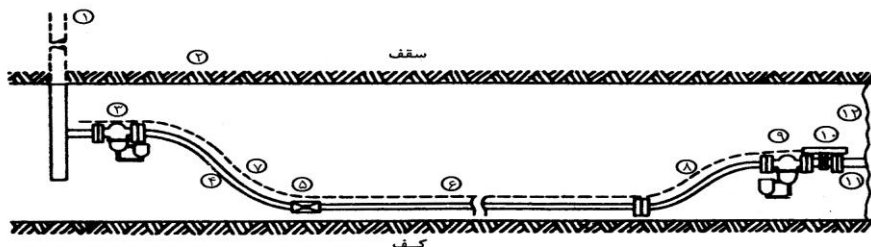
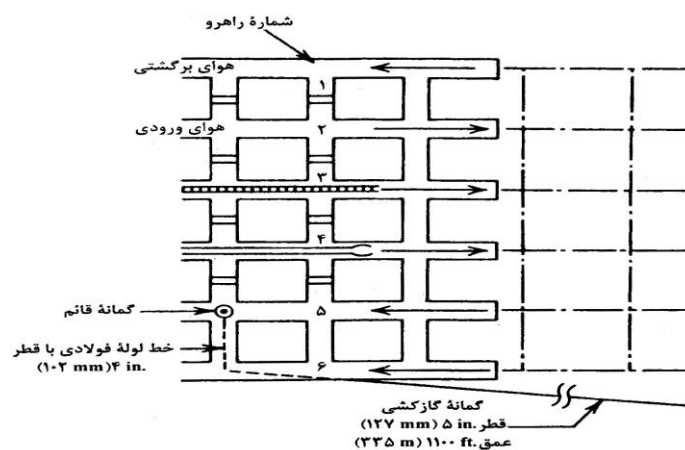
۳-۱۱-۲-۲- متان زدایی با گمانه عمودی از داخل معدن

یکی از مسائل و مشکلاتی که ممکن است در هنگام حفر ورودی ها و راهروهای معدن به وقوع بپیوندد، نفوذ متان از طبقات سقف به داخل راهروها پیش از معدنکاری است. در شکل ۳-۱۲ نمونه ای از حفر این گمانه ها در معدنی در آمریکا و بر روی لایه زغالی شماره ۴ پوچانتاس^۱ که قرار بوده است توسط روش جبهه کار طولانی استخراج شود نشان داده شده است. این گمانه ها در مرکز راهروها به فواصل ۱۵ متر از یکدیگر و قطر ۴/۱ سانتی متر حفاری شده اند و بعد از ۹۶ روز، از ۳۷ حلقه گمانه حفاری شده میزان متان زهکشی شده برابر با ۰/۳۴ میلیون مترمکعب بوده است (William, 1994). تأسیسات زیرزمینی سرچاهی این گمانه ها در شکل ۳-۱۳ نشان داده شده است.

¹ Poachontas



شکل ۳-۱۲: گمانه های عمودی به داخل طبقات سقف پیش از معدنکاری (William, 1994)



- | | |
|--|---|
| <p>(۷) خط لوله نیتروژن $\frac{1}{4}$ in. (۶/۴ mm)</p> <p>(۸) لوله خمیده فولادی ضد زنگ ۳ in. (۷۶ mm)</p> <p>(۹) جدا کننده و سیفون ۳ in. (۷۶ mm)</p> <p>(۱۰) شیر قطع جریان خودکار ۲ in. (۵۱ mm)</p> <p>(۱۱) لوله ایستاده حائل</p> <p>(۱۲) حائل معدن</p> | <p>(۱) گمانه قائم</p> <p>(۲) سقف معدن</p> <p>(۳) جداکننده و سیفون ۴ in. (۱۰۲ mm)</p> <p>(۴) لوله خمیده فولادی ضد زنگ ۴ in. (۱۰۲ mm)</p> <p>(۵) شیر فلکه پروانه ای ۴ in. (۱۰۲ mm)</p> <p>(۶) لوله "A" Aldyl ۴ in. (۱۰۲ mm)</p> |
|--|---|

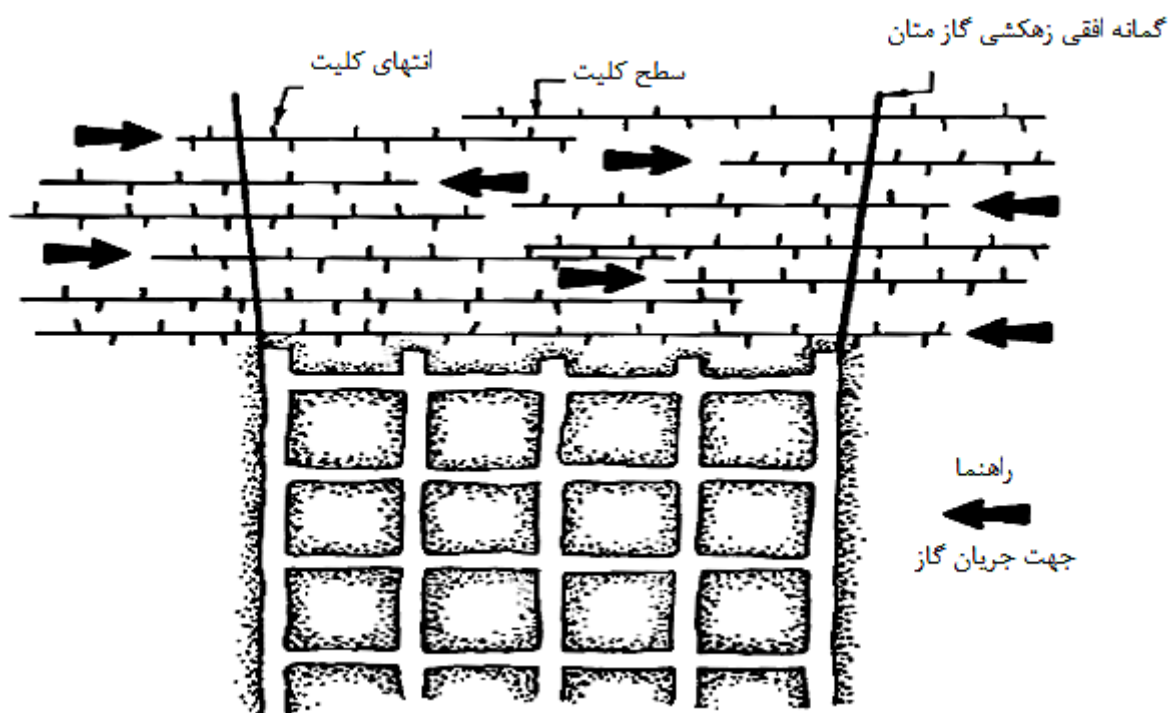
شکل ۳-۱۳: تأسیسات سر چاهی گمانه های عمودی در معادن (هارتمن، ۱۳۸۱)

بیشتر معادن زیرزمینی از روش زهکشی متان با استفاده از گمانه های افقی پیش از معدنکاری استفاده می کنند. از این روش وقتی استفاده می شود که میزان گاز خیزی لایه در روش جبهه کار طولانی بالا باشد. در شکل ۳-۱۴ شمایی از حفاری افقی در داخل معدن نشان داده شده است.



شکل ۳-۱۴: شمایی از زهکشی متان در یک معدن با استفاده از گمانه های افقی

زهکشی با گمانه های افقی یک روش رایج در زهکشی متان از لایه های زغال سنگ در آمریکا است. از مزیت این گمانه ها نسبت به گمانه های قائم این است که تمام طول گمانه در داخل لایه حفر می شود حال آن که در گمانه های قائم طولی از گمانه که از آن زهکشی می شود برابر با ضخامت لایه است. با توجه به شکل ۳-۱۵ دومین مزیت این گمانه ها این است که این گمانه ها می توانند به طور عمود بر کلیت ها حفاری شوند و سبب افزایش زهکشی متان شوند.



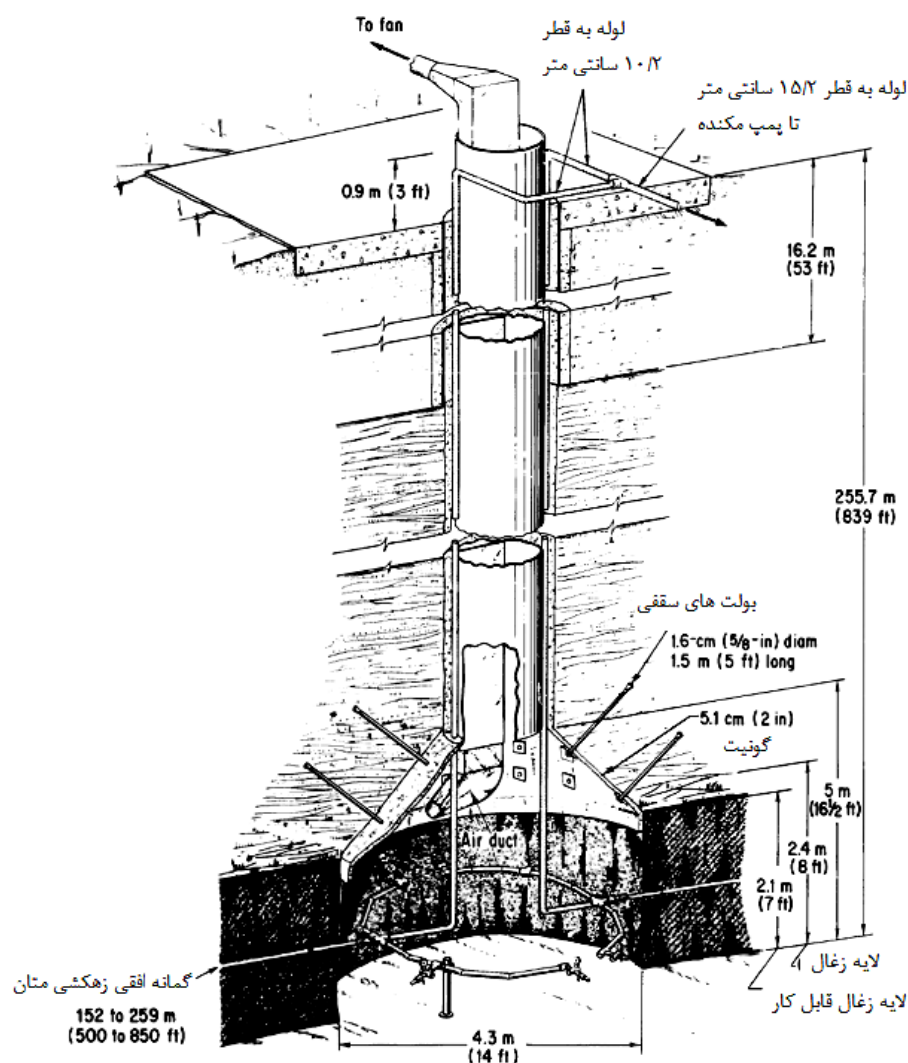
شکل ۳-۱۵: تصویر افقی از حفر گمانه های افقی در جهت عمود بر کلیت ها (William, 1994)

به طور کلی حفاری گمانه های افقی پیش از معدنکاری به روش های زیر انجام می شود.

الف - گمانه های افقی از انتهای چاه قائم

از این روش قبل از احداث ورودی ها و راهروهای معدن استفاده می شود. به منظور امکان استفاده از این روش در زهکشی متان، دو آزمایش در آمریکا در سال ۱۹۷۵ در ویرجینیای شرقی بر روی لایه پترسبورگ انجام شده است. با توجه به شکل ۳-۱۶ ابتدا یک چاه به قطر $4/13$ متر و با لوله گذاری دیواره $1/2$ متر حفاری شده است. سپس از انتهای این چاه تعداد ۷ حلقه گمانه افقی به طول ۱۵۲ تا ۲۵۹ متر در داخل لایه زغال سنگ حفاری شدند. در مدت زمان ۸ سال از حفر و زهکشی متان از این گمانه ها، میزان $33/4$ میلیون مترمکعب متان زهکشی شد که از این میزان متان، $15/2$ میلیون مترمکعب آن به فروش رسید. در آزمایش دوم که در همین معدن انجام پذیرفت چاهی به قطر $5/5$ متر حفاری شده بود و ۵ حلقه گمانه افقی به طول ۲۰۴ تا ۶۴۸ متر از انتهای چاه به داخل لایه حفاری شدند (حفاری گمانه های افقی با طولی بزرگ تر). در

مدت زمان ۳/۷ سال از حفر این گمانه ها، ۲۵/۲ میلیون مترمکعب گاز متان زهکشی شد (William, 1994). در حال حاضر با ورود فناوری های پیشرفته در حفاری، از این روش استفاده زیادی می شود.

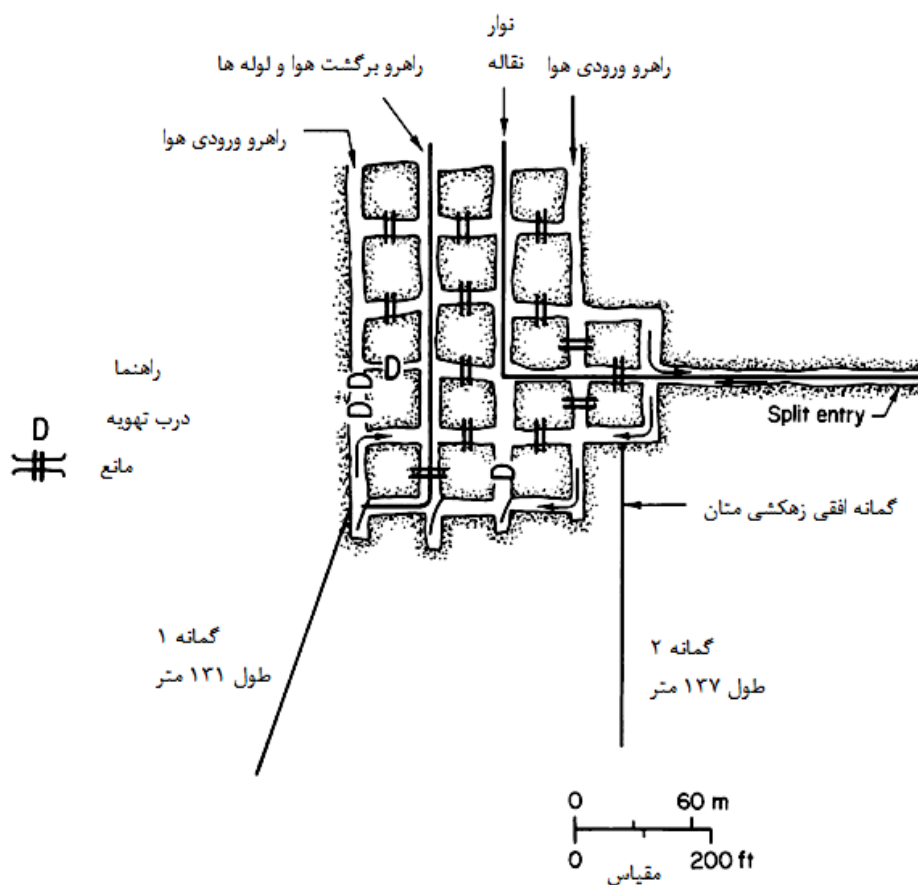


شکل ۳-۱۶: زهکشی متان پیش از معدنکاری از انتهای چاه قائم با استفاده از گمانه های افقی (William, 1994)

ب- گمانه های افقی از داخل معادن متروکه مجاور به داخل لایه زغال سنگ

حفر گمانه های افقی از داخل معادن متروکه مجاور، پیش از استخراج یک لایه زغال سنگ قابل انجام است. از نمونه این روش (شکل ۳-۱۷)، در اواسط سال ۱۹۷۰، ۲ حلقه گمانه افقی به طول ۱۳۱ تا ۱۳۷ متر در لایه

زغال سنگ یوپرسیونیسید^۱ در یوتا^۲ از راهروهای یک معدن متروکه حفاری شدند. بعد از یک سال از حفر این گمانه ها، به طور متوسط روزانه ۴۰۰۰ مترمکعب متان زهکشی شده است (William, 1994).



شکل ۳-۱۷: زهکشی متان با استفاده از گمانه های افقی از داخل معدن متروکه در یوتا (William, 1994)

ج- گمانه های افقی از داخل ورودی ها و راهروها در هنگام عملیات آماده سازی

کاربرد این گمانه ها بیشتر از سایر انواع گمانه های افقی است. به طور کلی این گمانه ها توسط دو روش قابل کارند (USEPA, 1999):

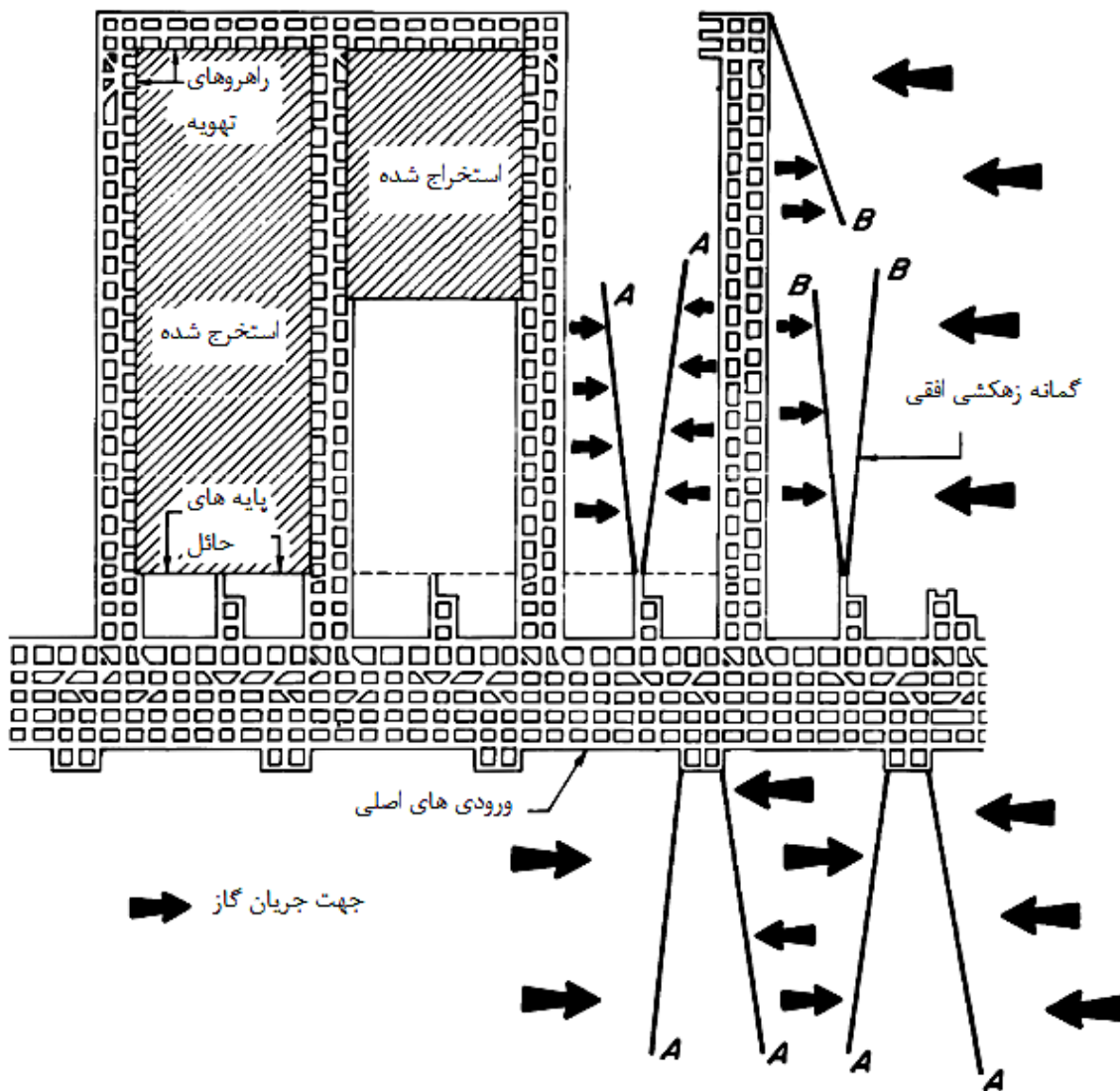
۱- حفاری گمانه های بلند در امتداد سینه کار به قطر ۷/۵ تا ۹ سانتی متر و طول ۳۰۰ تا ۶۰۰ متر (شکل ۳-۱۸).

۲- گمانه های افقی کوتاه به قطر ۵ تا ۷/۵ سانتی متر و طول ۳۰ تا ۱۲۰ متر (شکل ۳-۱۹).

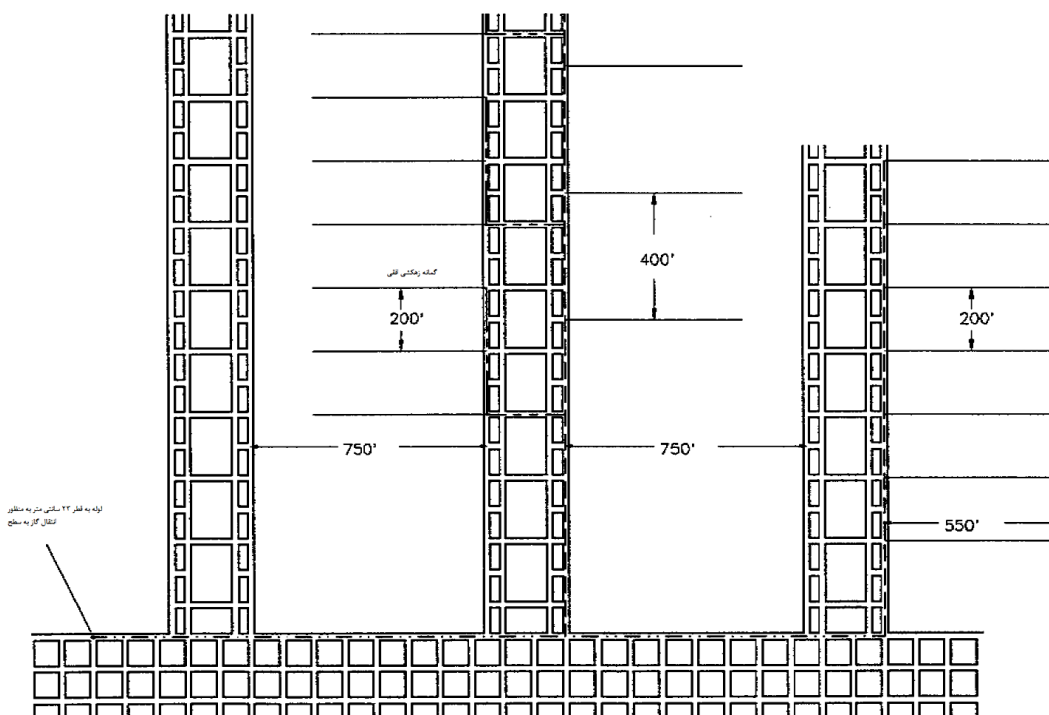
¹ Upper Sunnysid

² Utah

حفاری گمانه های افقی با طول بلند (بیش از ۳۰۰ متر) از داخل راهروها، بر زهکشی متان از لایه زغال سنگ و محیط دربرگیرنده آن تأثیر زیادی دارد.



شکل ۳-۱۸: حفاری گمانه های افقی با طول بلند پیش از معدنکاری روش جبهه کار طولانی (William, 1994).



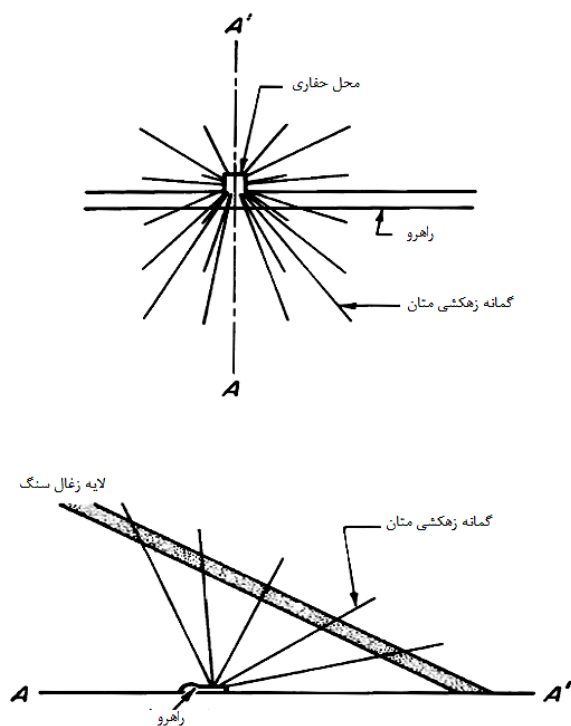
شکل ۳-۱۹: گمانه‌های افقی با طول کوتاه پیش از معدنکاری عمود بر پهنه استخراجی در روش جبهه کار طولانی (USEPA, 1999)

(1999)

د- حفاری گمانه‌های افقی به افق‌های دیگر

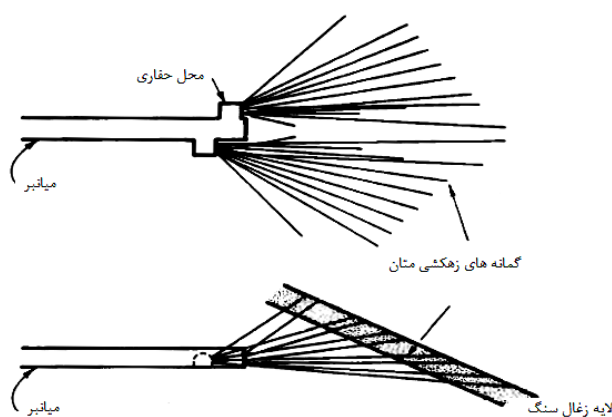
در بیشتر معادن روش جبهه کار طولانی در کشور ژاپن، لایه‌های شیب‌دار تا عمق ۷۰۰ متری امتداد دارند. با افزایش عمق معدنکاری، میزان متان موجود در لایه افزایش می‌یابد و این خود عاملی است تا متان زدایی پیش از معدنکاری از لایه زغال سنگ و سنگ‌های دربرگیرنده آن توسط گمانه‌های افقی صورت پذیرد. در لایه‌های زغال سنگ شیب‌دار به علت مسائل پایداری، راهروهای اصلی معمولاً در کمرباطین لایه زغال سنگ حفر می‌شوند. عملیات زهکشی متان از داخل این راهروها بر روی لایه زغال سنگ شبیه به گمانه‌های تقاطعی است. با توجه به شکل ۳-۲۰، این گمانه‌ها از داخل راهرو اصلی به نحوی حفر می‌شوند که در انتهای آن‌ها در سطح لایه ۱۵ متر از یکدیگر فاصله داشته باشد و معمولاً ۶ تا ۱۲ متر پیش از حفر میان‌برها^۱ حفر شده و متان را زهکشی می‌کنند (William, 1994).

^۱ Cross Cut



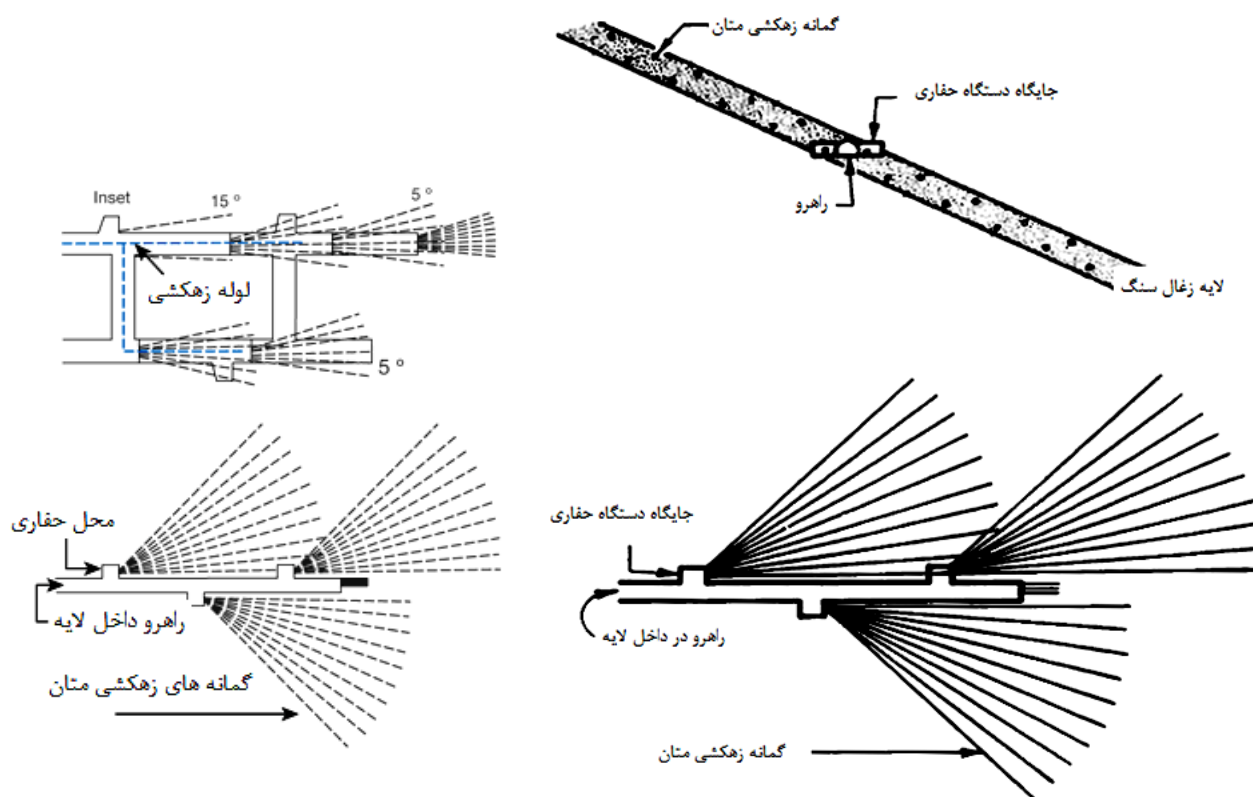
شکل ۳-۲۰: حفاری گمانه های زهکشی افقی از داخل راهرو اصلی به داخل لایه زغال سنگ (William, 1994)

نوع دوم متان زدایی با این روش از داخل میان برها است. میان برها معمولاً عمود بر راهروهای اصلی حفر می شوند. زهکشی متان از داخل این میان برها از محل های مخصوص که برای حفاری گمانه ها مشخص شده است صورت می پذیرد (William, 1994). این موضوع در شکل ۳-۲۱ نشان داده شده است.



شکل ۳-۲۱: حفاری گمانه های زهکشی افقی از داخل میان برها به داخل لایه زغال سنگ (William, 1994)

نوع سوم از این گمانه‌ها مطابق شکل ۳-۲۲، به منظور کاهش میزان متان در اثر استخراج بلوک‌های جبهه کار طولانی حفر می‌شوند. با توجه به این شکل، این گمانه‌ها با ۵ تا ۱۵ درجه حفر می‌شوند.



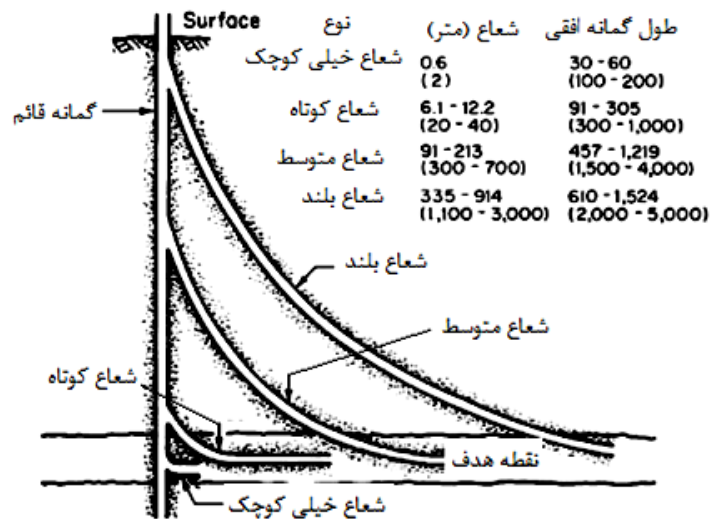
شکل ۳-۲۲: حفاری گمانه‌های زهکشی افقی از داخل میان‌برها به داخل پهنه روش جبهه کار طولانی

(www.undergroundcoal.com.au; William, 1994)

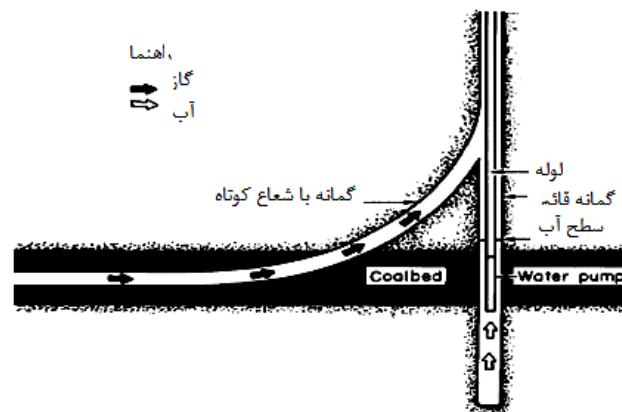
۳-۱۱-۲-۴- زهکشی با گمانه جهت‌دار

این گمانه‌ها با شعاع خیلی کوچک، متوسط و بزرگ حفاری می‌شوند. شمایی از این گمانه‌ها در شکل ۳-۲۳ نشان داده شده است.

استفاده از حفاری جهت‌دار با شعاع کوچک کاربرد گسترده و مهمی در متان زدایی دارد. این گمانه‌ها باعث کاهش طول غیر تولیدی گمانه در لایه‌های دربرگیرنده و کاهش هزینه‌ها می‌شوند و نیز می‌توان با نصب پمپ در انتهای گمانه قائم که در نزدیکی گمانه جهت‌دار و در موقعیت پایین‌تر نسبت به آن قرار دارد، آبکشی به راحتی انجام داد. این موضوع در شکل ۳-۲۴ نشان داده شده است (William, 1994).



شکل ۳-۲۳: شمایی از انواع گمانه های جهت دار (William, 1994)



شکل ۳-۲۴: روش نصب پمپ آبکشی در حفاری جهت دار با شعاع کم (William, 1994)

۳-۱۱-۳- زهکشی همراه با معدنکاری

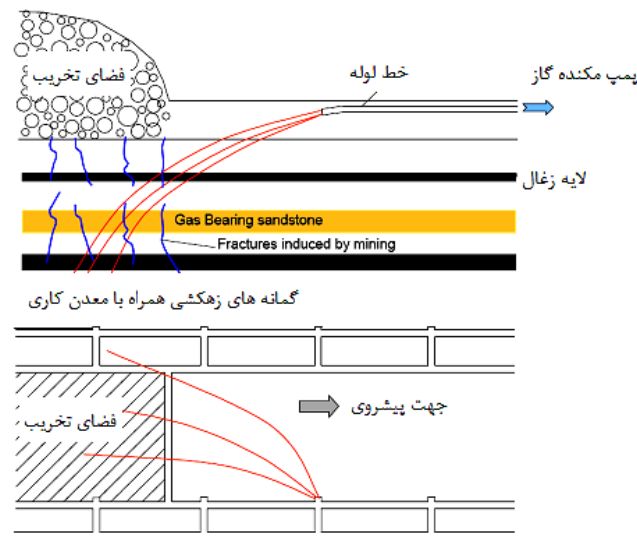
از آنجاکه در بسیاری از حوضه های زغالی جهان، لایه هایی با نفوذپذیری کم (کمتر از ۰/۱ میلی داری) و خصوصیات زمین شناسی متغیر وجود دارد، روش زهکشی پیش از معدنکاری برای همه مناطق مناسب نیست و باید از روش های زهکشی همراه با معدنکاری استفاده شود. این روش به دو صورت قابل اجرا است:

۱- زهکشی متان از لایه استخراجی و لایه های مجاور. در صورتی که چندین لایه زغال سنگ روی هم واقع شده باشند، استفاده از روش متان زدایی همراه با معدنکاری باعث استحصال میزان گاز بیشتری نسبت به روش زهکشی پیش از معدنکاری می شود.

۲- زهکشی متان از داخل منطقه تخریبی روش جبهه کار طولانی مکانیزه.

۳-۱۱-۳-۱- زهکشی متان از لایه استخراجی و لایه های مجاور

در این روش گمانه هایی پیش از معدنکاری و همراه با معدنکاری در داخل لایه زغال سنگ حفر می شود. با این گمانه ها علاوه بر آن که زهکشی متان از لایه معدنکاری انجام می شود به گاز کشی از لایه های بالایی و پایینی نیز پرداخته می شود. شکل ۳-۲۵ نحوه ی گاز کشی از یک لایه زغال سنگ که در قسمت زیرین منطقه استخراجی روش جبهه کار طولانی قرار گرفته است را نشان می دهد. به طور کلی این روش توسط حفر گمانه های افقی و تقاطعی قابل انجام است.

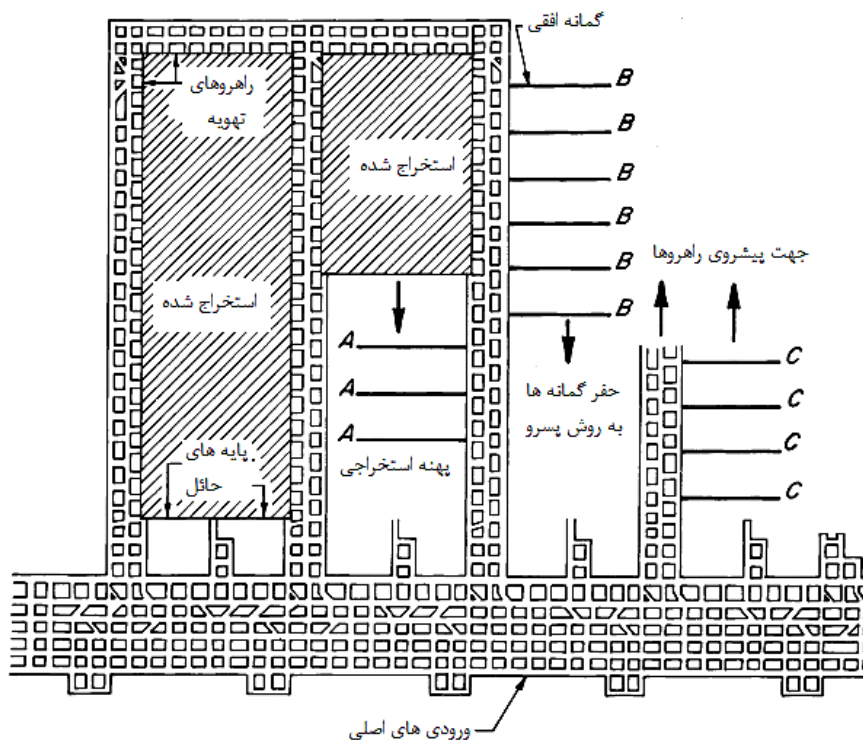


شکل ۳-۲۵: گاز کشی همراه با معدنکاری از لایه استخراجی و لایه های مجاور

الف - گمانه های افقی

زهکشی متان همراه با معدنکاری با استفاده از گمانه های افقی در روش جبهه کار طولانی در اکثر معادن استفاده می شود. این نوع حفاری در شکل ۳-۲۶ (قسمت A) نشان داده شده است. در اولین نوع از روش

متان زدایی، گمانه‌هایی با طول کوتاه از داخل راهروهای سرمیله^۱ به داخل پهنه استخراجی حفر می‌شوند. این روش باعث می‌شود تا انتشار گاز در اثر استخراج پهنه کاهش یابد. روش‌های دیگر حفر این گمانه‌ها این است که قبل از این که استخراج پهنه کناری به اتمام برسد، گمانه‌های افقی از داخل زیرمیله^۲ در جهت عمود بر امتداد پهنه بعدی حفر شوند (شکل ۳-۲۶ (قسمت B و C)) (William, 1994). در این روش، مدت زمان زهکشی گاز خیلی مهم است. بنابراین از گمانه‌های حفرشده در شکل ۳-۲۶، گمانه‌های C به دلیل آن که مدت زمان زهکشی متان در آن‌ها بیشتر است، میزان گاز بیشتری تولید می‌نماید. از معایب این نوع زهکشی این است که احتمال دارد سبب مشکل در حمل و نقل افراد شود یا منطقه استخراجی اجازه حفر گمانه را ندهد. به هر حال در حفاری گمانه‌های افقی باید یک هماهنگی لازم بین عملیات حفر گمانه‌ها و عملیات معدنکاری وجود داشته باشد.



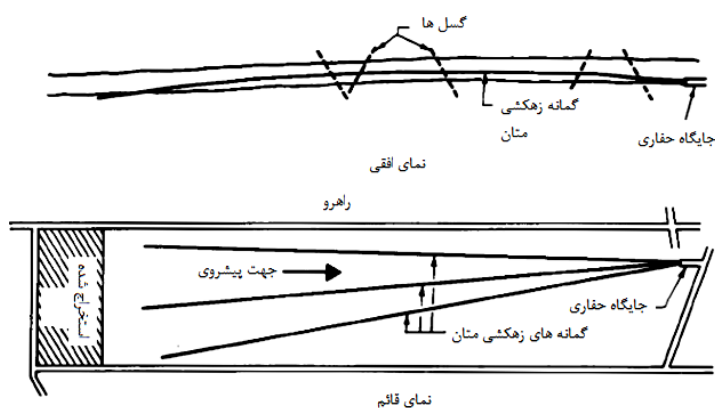
شکل ۳-۲۶: زهکشی متان با استفاده از گمانه‌های افقی با طول کوتاه در روش جبهه کار طولانی با پیشروی سینه کار

(William, 1994)

¹ Headgate

² Tailgate

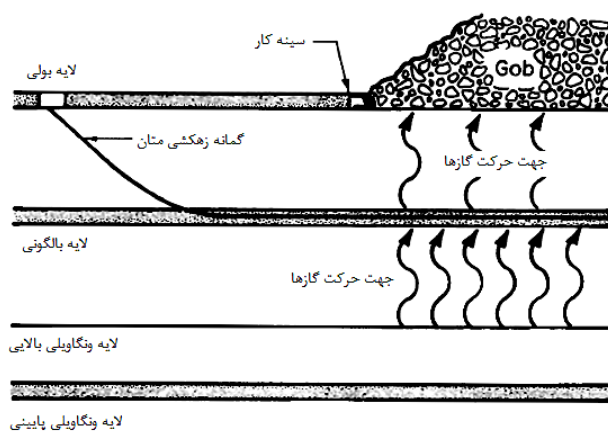
روش دیگر حفاری گمانه های افقی با طول بلند از داخل میان برها با زاویه کمی نسبت به خط قائم به سمت سینه کار استخراجی است. شمایی از این روش در شکل ۳-۲۷ نشان داده شده است. طول این گمانه ها ۵۰۰ تا ۷۰۰ متر است. با استفاده از این روش میزان گاز بیشتری نسبت به سایر گمانه های حفاری شده از داخل میان برها قابل دستیابی است و خود عاملی در کاهش هزینه های حفاری است (William, 1994).



شکل ۳-۲۷: حفاری گمانه های زهکشی افقی با طول بلند از داخل میان برها به داخل پهنه روش جبهه کار طولانی (William, 1994)

ب- گمانه های تقاطعی

در حال حاضر در استرالیا، به منظور زهکشی متان از لایه های زیرین روش جبهه کار طولانی از گمانه های تقاطعی همراه با گمانه های افقی استفاده می شود. این موضوع در شکل ۳-۲۸ نشان داده شده است (William, 1994).



شکل ۳-۲۸: شمایی از زهکشی متان از لایه های زیرین (William, 1994)

۳-۱۱-۳-۲- زهکشی متان از منطقه تخریب شده

هنگامی که روش استخراج، باعث تخریب و نشست روباره استخراجی شود، متان حاصل از منطقه تخریب شده به سمت داخل معدن (به دلیل عملکرد محدوده معدنکاری به صورت یک مخزن کوچک کم فشار طبیعی) جریان می یابد (هارتمن، ۱۳۸۱).

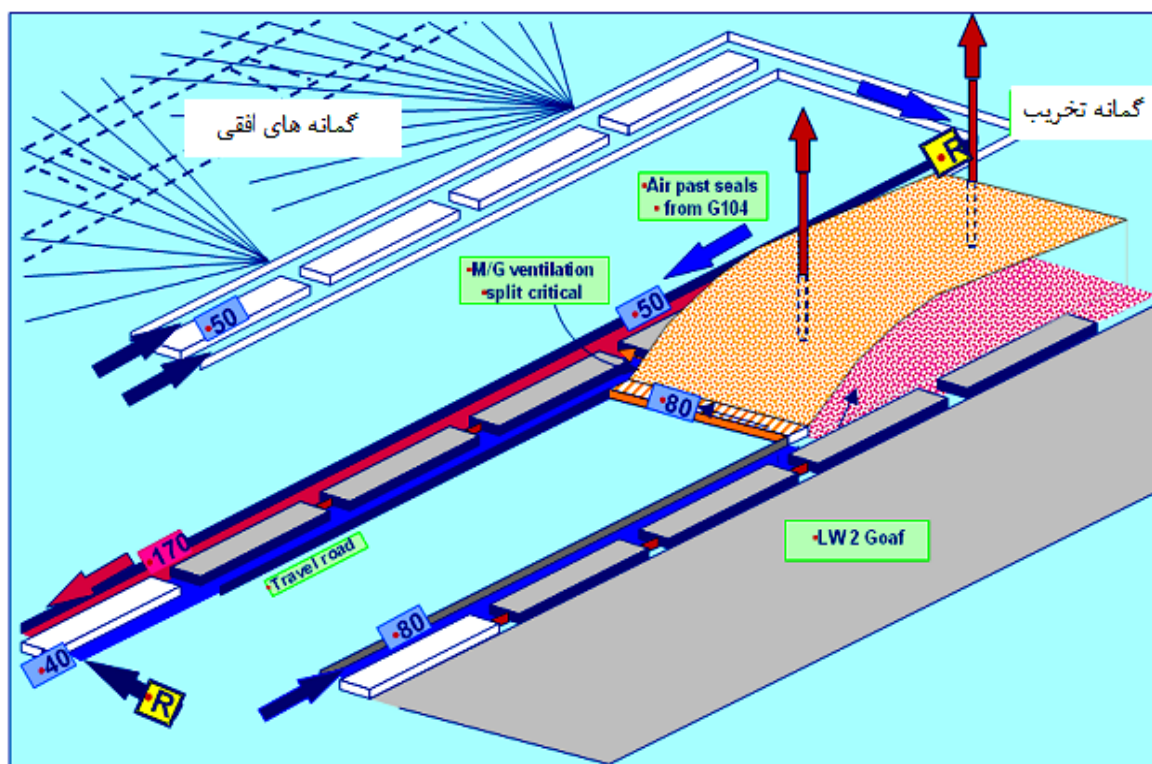
به طور کلی برای متان زدایی از منطقه تخریب شده سه روش کاربرد دارد که عبارت اند از:

- حفر گمانه های قائم از سطح زمین تا بالای منطقه استخراجی مورد نظر.

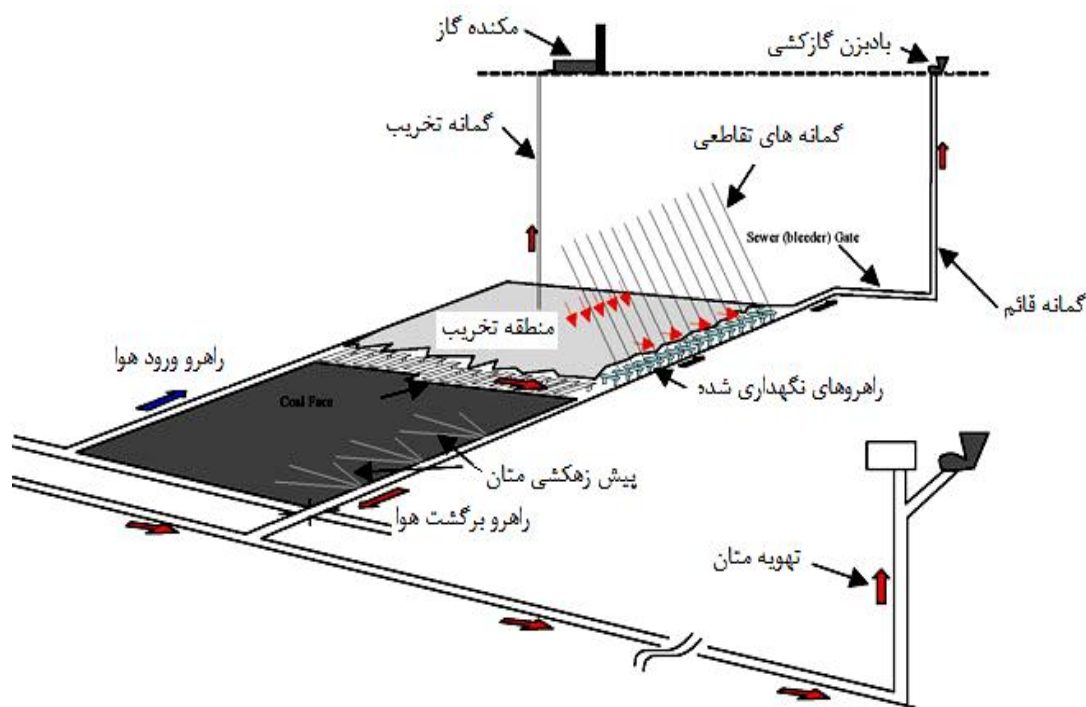
- حفر گمانه های زاویه دار و تقاطعی.

- راندن لوله به داخل منطقه تخریب شده.

در شکل های ۳-۲۹ و ۳-۳۰ شمایی از روش های مختلف زهکشی متان همراه با معدنکاری نشان داده شده است. در صورتی که قرار باشد استخراج به نحوی ایمن ادامه یابد، متان زدایی از منطقه تخریب شده الزامی است (USEPA, 1999).



شکل ۳-۲۹: روش های مختلف زهکشی همراه با معدنکاری از مواد تخریب شده (William, 1994).



شکل ۳-۳۰: متان زدایی از روش جبهه کار طولانی توسط گمانه های قائم و سایر روش های مرسوم (William, 1994).

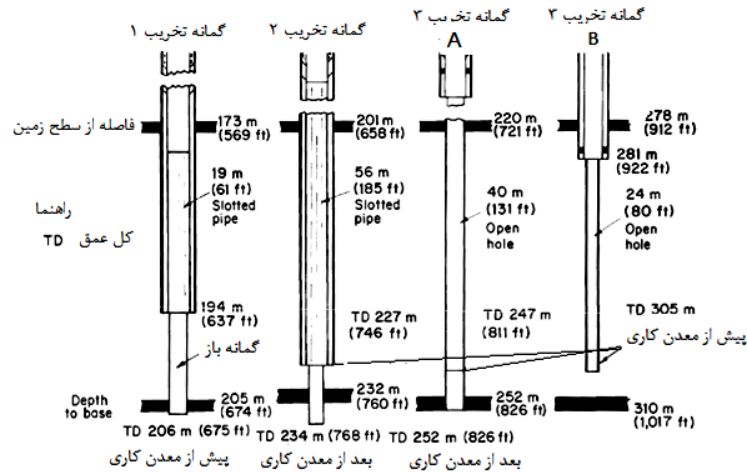
الف - گمانه های قائم در منطقه تخریب

گاز متان می تواند از فضای معدنکاری توسط گمانه های قائم حفر شده پیش از معدنکاری بازیابی شود. استفاده از گمانه های قائم در نواحی تخریب شده روش متداول زهکشی گاز متان است (Skow et al., 1980). این گمانه ها بیشتر در روش جبهه کار طولانی پسرو حفر می شوند. (William, 1994).

عموماً در این گمانه ها قبل از عبور سینه کار از مقابل آن، گاز تولید نمی شود بلکه با تخریب سقف جریان گاز در گمانه آغاز می شود. تولید برای ماه های اولیه بیشترین مقدار است (Deul and Kim, 1988). این گمانه ها گاز کشی حدود ۴۰ درصد از کل گاز پهنه های جبهه کار طولانی را انجام می دهند. مقدار گاز کشی از پهنه های اتاق و پایه به میزان کمتر و حدود ۲۵ درصد است. نکته قابل توجه در این گمانه ها این است که در صورتی که درصد گاز خالص به ۲۵ تا ۳۵ درصد برسد عملیات زهکشی گاز از این گمانه ها متوقف می شود (ECE, 2010).

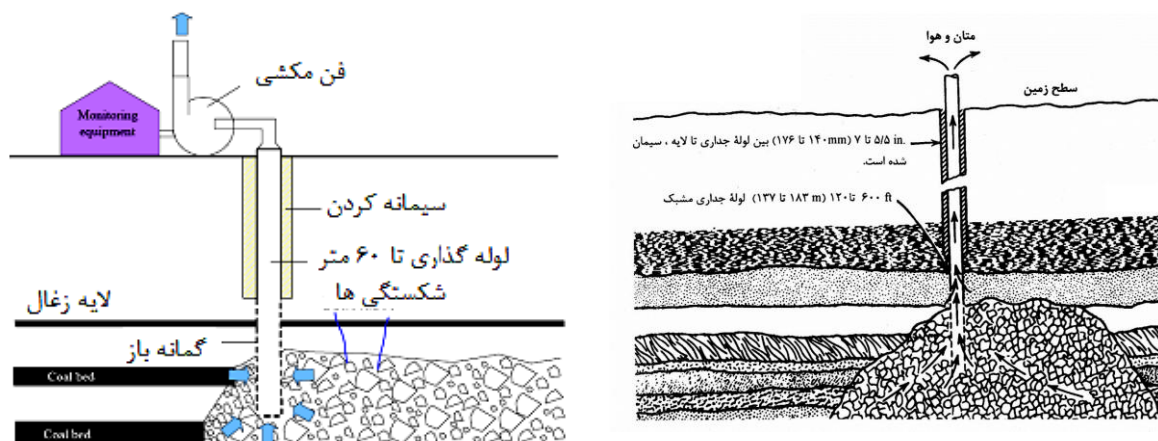
تفاوت این روش با گمانه های قائم پیش از معدنکاری این است که در این گمانه ها نیاز به استفاده از روش شکافت هیدرولیکی و آتشباری کنترل شده نیست و دیگر این که در اکثر موارد، گمانه های تخریب تا فاصله

کمی از لایه زغال سنگ حفاری شده و توسط لوله های فولادی جدار بندی می شوند (شکل ۳-۳۱). در بعضی از موارد گمانه حفاری شده تا ۳۰ متری بالای لایه جدار بندی می شود و مابقی آن با قطر کوچک تر حفاری می شود (گمانه B) (William, 1994; USEPA, 1999).

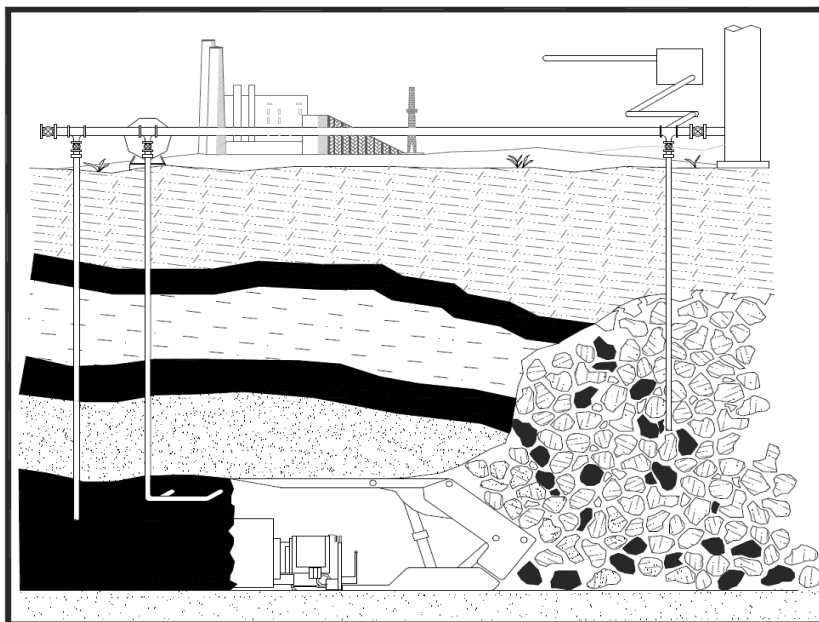


شکل ۳-۳۱: انواع روش های آزمایشی از حفر گمانه های قائم در منطقه تخریب (William, 1994)

شمایی از متان زدایی با حفر گمانه های قائم در منطقه تخریب شده در شکل ۳-۳۲ نشان داده شده است. به منظور مکش گاز از منطقه تخریب از یک مکند در سطح زمین استفاده می شود (William, 1994). گمانه های قائم تخریب در معادن زغال سنگ چند لایه ای کاربرد گسترده ای دارند این موضوع در شکل ۳-۳۳ نشان داده شده است.



شکل ۳-۳۲: شمایی از یک گمانه قائم حفاری شده در مواد تخریب شده (William, 1994)



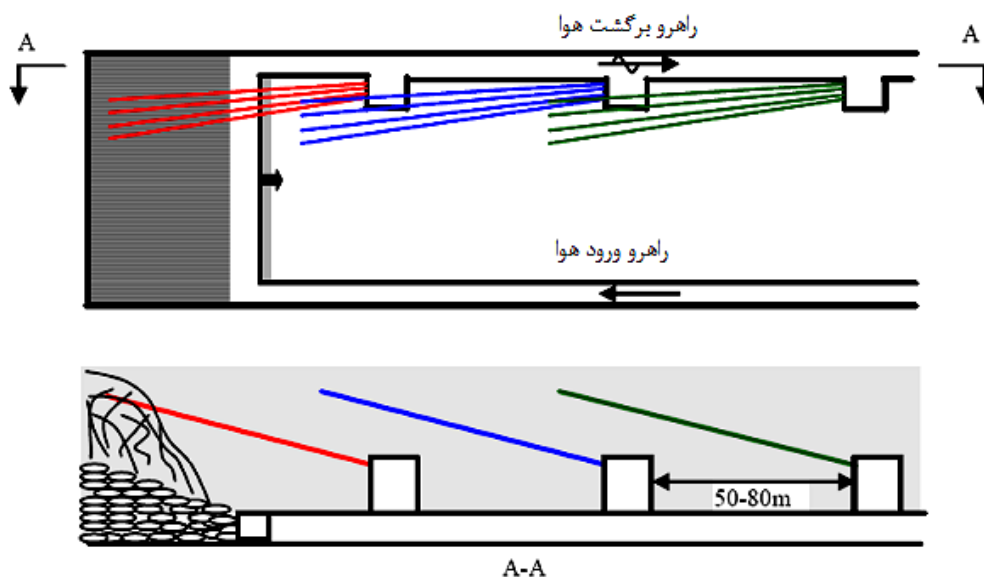
شکل ۳-۳۳: متان زدایی از منطقه تخریب و لایه زغال سنگ (William, 1994)

ب- گاز کشی از داخل منطقه تخریب شده^۱ با گمانه های تقاطعی و زاویه دار

در حال حاضر استفاده از روش جبهه کار طولانی مکانیزه، به دلیل تولید زیاد زغال سنگ علاوه بر آمریکا در تمام جهان گسترش یافته است. در اکثر موارد به دلیل ورود میزان گاز زیاد به داخل منطقه کاری از روش گمانه های تقاطعی و زاویه دار همراه با معدنکاری استفاده می شود.

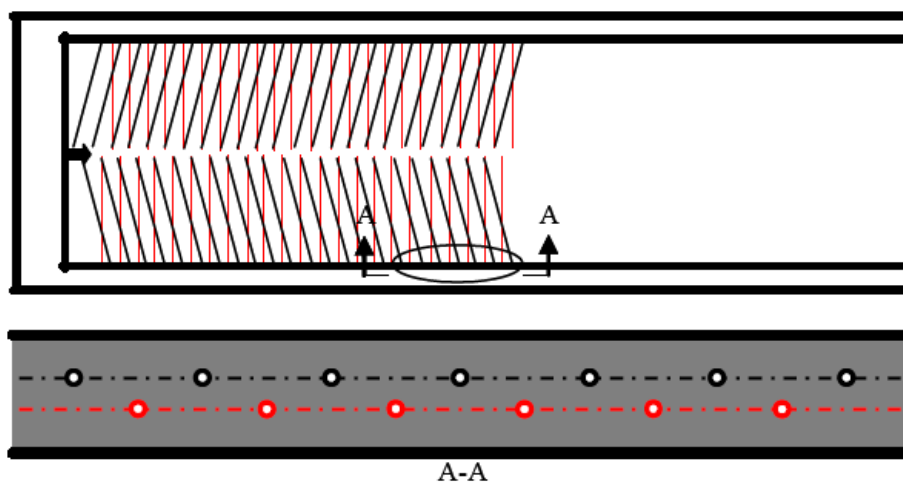
چگونگی حفر گمانه های زاویه دار در شکل ۳-۳۴ نشان داده شده است. زاویه حفر گمانه ها با آرایش زاویه دار تابعی از ارتفاع و عرض زون زمین شناسی قابل گاز کشی و موقعیت راهروها است. معمولاً این گمانه ها از راهروهای اطراف پهنه به سمت سقف پهنه (منطقه ای که قرار است تخریب شود) با زاویه ۱۰ تا ۱۸ درجه یا با زاویه ۱۵ تا ۲۰ درجه به سمت بالا و به طول ۱۸ تا ۱۴۰ متر حفر می شوند (Wang and Xue, 2008).

¹ Goaf drainage



شکل ۳-۳۴: نحوه گاز کشی از داخل منطقه تخریب شده به همراه آرایش گمانه ها (Wang and Xue, 2008)

در اروپا از گمانه های زاویه دار بیشتر در روش جبهه کار طولانی پیشرو استفاده می شود (William, 1994). در حال حاضر گمانه های تقاطعی نسبت گمانه های زاویه دار کاربرد گسترده تری دارند. چگونگی حفر گمانه های تقاطعی در شکل ۳-۳۵ نشان داده شده است. در روش تقاطعی، ۲ گروه از گمانه ها، یک گروه به صورت عمود بر پهنه و گروه دیگر با زاویه نسبت به پهنه به طوری که گمانه های قبلی را قطع نمایند حفاری می شوند.



شکل ۳-۳۵: نحوه حفاری گمانه های تقاطعی (Wang and Xue, 2008)

ج- راندن لوله به داخل منطقه تخریب شده

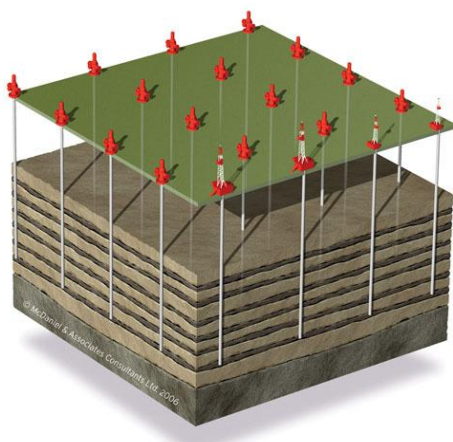
روش دیگر مورد استفاده در گاز کشی از مواد تخریب شده، فرستادن لوله های جداگانه به داخل منطقه تخریب شده است. این روش بیشتر در معادن زغال سنگ چین مورد استفاده قرار می گیرد.

۳-۱۲- انواع روش های حفاری گمانه های CBM

همان طور که پیش تر از این بیان شد، روش های زهکشی متان توسط گمانه های قائم، افقی و جهت دار قابل انجام است. از این رو حفاری این گمانه ها تأثیر زیادی بر فرایند زهکشی گاز متان دارد. در ادامه به تشریح فناوری حفاری این گمانه ها پرداخته شده است.

۳-۱۲-۱- حفاری قائم

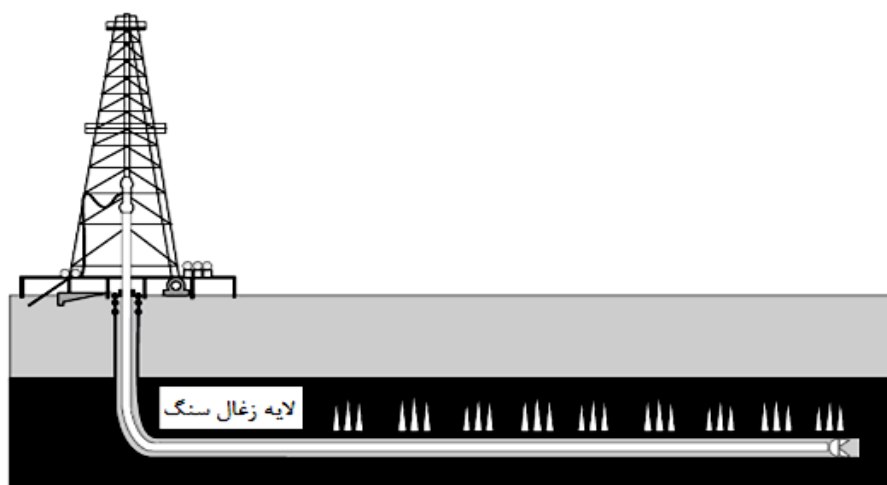
گمانه های قائم به طور معمول به روش چرخشی توسط دکل های حفاری متحرک حفر می شوند. برای حداقل کردن احتمال کاهش نفوذپذیری لایه زغال سنگ به دلیل نفوذ سیال حفاری به داخل آن، باید از کاربرد گل های حفاری به غیر از موارد ضروری اجتناب شود. هوا یا فوم سبک از کاهش نفوذپذیری جلوگیری می کنند و سرعت حفاری را به دلیل کاهش فشار منفذی در سطح تماس سنگ- مته، افزایش می دهند. حفاری قائم ساده ترین روش اجرای حفاری است که در آن گمانه از سطح زمین به صورت قائم تا لایه زغال سنگ (بالا تر یا پایین تر) حفر می شود. در شکل ۳-۳۶ نحوه ی حفر و جانمایی دستگاه حفاری گمانه قائم نشان داده شده است. معمولاً حفاری قائم برای گمانه ها با طول ۱۰۰ تا ۲۰۰ متر به کار گرفته می شود.



شکل ۳-۳۶: جانمایی گمانه ها (با روش زهکشی از گمانه قائم) (James and Cobb, 2003).

۳-۱۲-۲- حفاری افقی

حفاری افقی به دو صورت از سطح زمین و از داخل معدن قابل انجام است. در صورتی که حفاری افقی از سطح زمین صورت پذیرد ابتدا یک گمانه به صورت قائم حفر و سپس از انتهای گمانه با توجه به تجهیزات خاص، گمانه به صورت افقی در داخل لایه زغال سنگ حفر می شود. نکته ای که در این روش مدنظر قرار داد امکان استفاده از این روش در ترکیب با حفاری جهت دار است. در شکل ۳-۳۷ حفاری افقی نشان داده شده است.



شکل ۳-۳۷: شمایی از استفاده دستگاه حفاری برای حفر گمانه به صورت افقی در داخل لایه زغال سنگ

(James and Cobb, 2003)

شعاع حفر گمانه ها در روش حفاری افقی ممکن است یکی از حالات زیر باشد.

۱- شعاع بلند^۱

۲- شعاع متوسط^۲

۳- شعاع کوتاه^۳

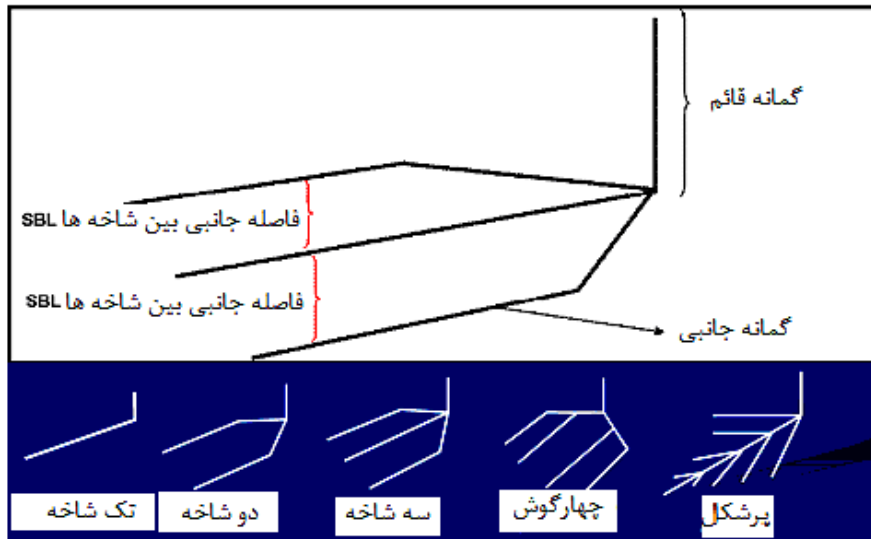
انشعاب گمانه ها در روش حفاری افقی به صورت تک شاخه، دو شاخه، سه شاخه و پرشکل امکان پذیر است.

این موضوع در شکل ۳-۳۸ به صورت دوبعدی و در شکل ۳-۳۹ به صورت سه بعدی نشان داده شده است.

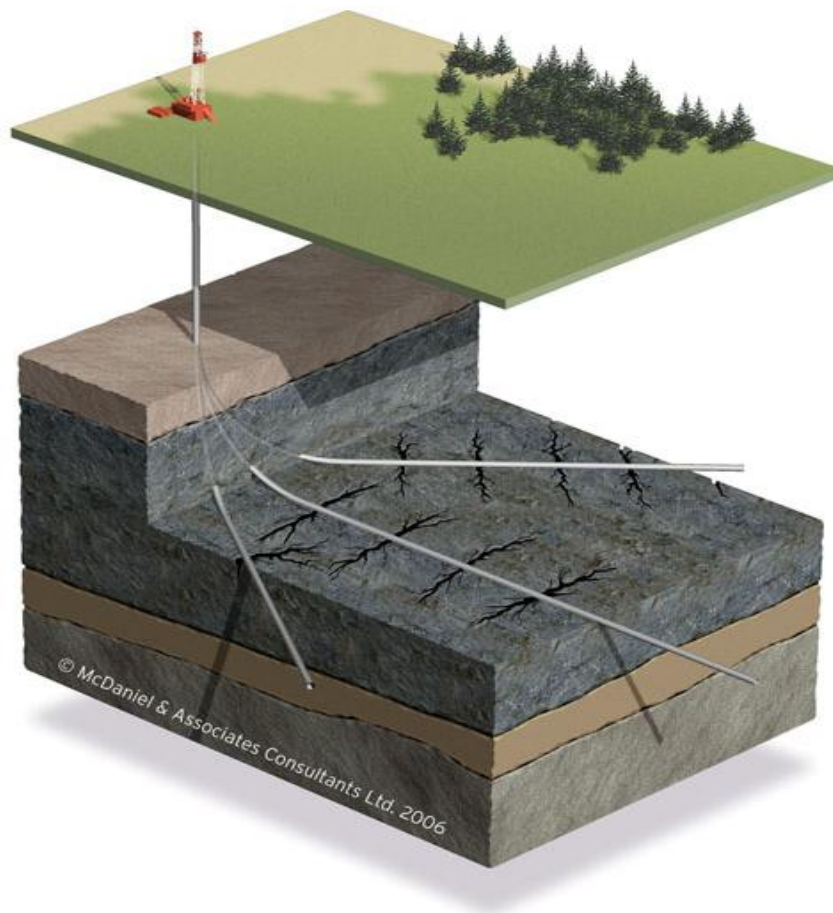
^۱ Long Radius (LR)

^۲ Medium Radius (MR)

^۳ Short Radius (SR)



شکل ۳-۳۸: آرایش انشعاب گمانه ها در روش حفاری افقی (James and Cobb, 2003)



شکل ۳-۳۹: نمای سه بعدی از حفاری افقی با سه انشعاب (James and Cobb, 2003)

۳-۱۲-۳- حفاری جهت دار

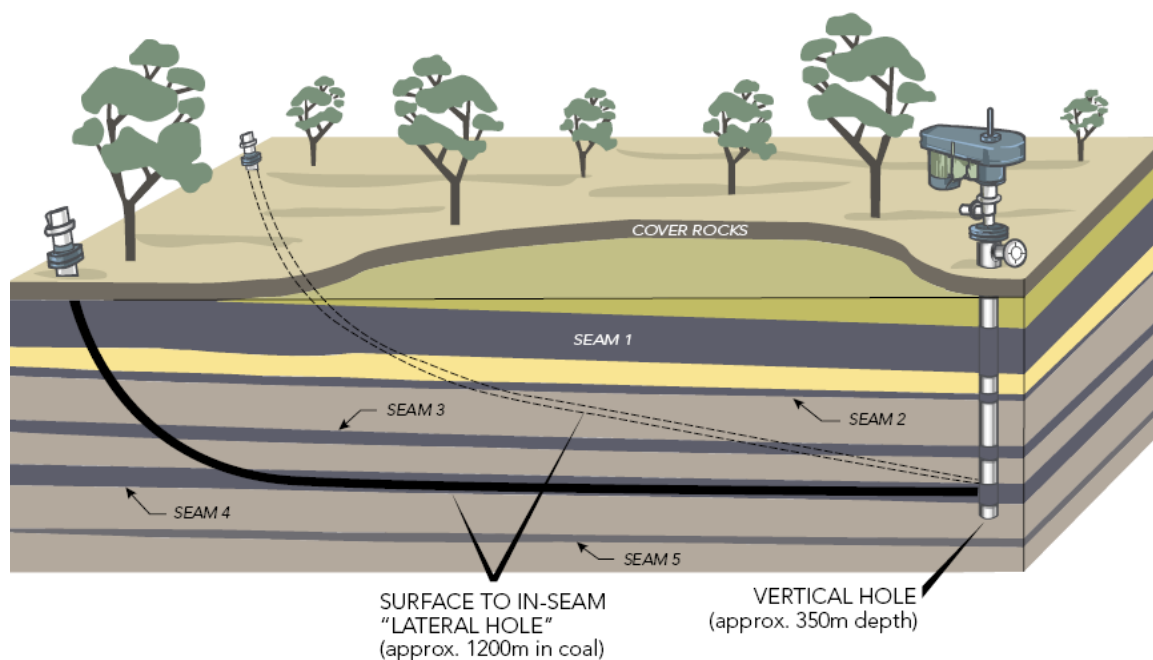
حفاری جهت دار با شعاع کم که در صنعت نفت و گاز توسعه داده شده، روشی است که به طور مؤثر می تواند برای بازیابی متان از گمانه های قائم به کار رود. این سیستم اجازه می دهد که تعدادی گمانه افقی از یک گمانه قائم به داخل لایه زغال سنگ حفر شود. تفاوت های حفاری افقی و جهت دار در این است که در گمانه افقی مشکلات آب کشی وجود ندارد و سیستم گمانه جهت دار با شعاع کم می تواند به آسانی برای زهکشی از چندین افق لایه بندی بکار رود.

امروزه استفاده از حفاری جهت دار جزء لاینفک روش های مرسوم حفاری به شمار می رود. این روش عموماً برای توسعه میادین نفتی مورد استفاده قرار می گیرد. برخلاف حفاری قائم که در آن تنها انتخاب و طراحی طول گمانه مهم است، در روش حفاری جهت دار باید مواردی از قبیل سیستم اندازه گیری، ابزار دقیق، ابزارآلات انحراف^۱، پارامترهای مناسب حفاری، سازگاری معماری گمانه با طول آن، روش سیمان کاری و ... در نظر گرفته شود. این روش بیشتر در ترکیب با حفاری افقی مورد استفاده قرار می گیرد.

برای گمانه های CBM که ذخایر زغال سنگ آنها در مناطق عمیق تر یا در جایی که چندین لایه زغال سنگ موجود است، تکنولوژی های حفاری جهت دار امکان حفاری بیش از یک گمانه از یک نقطه واحد را فراهم می کند. این امر سبب کاهش تعداد گمانه های حفاری شده و در نتیجه باعث کاهش هزینه ها می شود.

در شکل ۳-۴۰ ترکیبی از حفاری قائم و جهت دار نشان داده شده است.

¹ Deflection Tools



شکل ۳-۴۰: حفاری قائم و جهت دار (www.ch4.com.au)

اصولاً برای طول‌های بیشتر (تا ۱۰۰۰ متر) از حفاری جهت‌دار استفاده می‌شود. حفاری جهت‌دار برای گازکشی پیش از معدنکاری لایه‌های زغال‌سنگ دارای نفوذپذیری بین ۰/۵ تا ۱۰ میلی داری مناسب است (ECE, 2010). گزارش‌های موجود در آمریکا نشان داده است که استفاده از تکنولوژی حفاری جهت‌دار باعث

افزایش بازیابی گاز متان به میزان ۵۰ تا ۹۰ درصد می‌شود.

استفاده از حفاری افقی و جهت‌دار دارای مزایایی به شرح زیر است.

۱- افزایش تولید به میزان ۱۰ تا ۲۰ برابر

۲- نرخ آب‌کشی بیشتر

۳- کاهش آثار زیست‌محیطی

۴- تعداد گمانه کمتر

۵- کاهش سیستم جمع‌آوری گاز در سطح زمین

۶- هزینه کمتر

۳-۱۳- مقایسه روش های مختلف زهکشی متان و شرایط قابل کار آن ها

حال که جزئیات مربوط به روش های مختلف زهکشی متان بیان شد لازم است که مزایا و معایب هر کدام از این روش ها و این که در چه شرایطی باید از روش استفاده کرد بیان شود. در جدول ۳-۱ شرایط قابل کاربرد روش های متان زدایی و در جدول ۳-۲ مزایا و معایب روش های مختلف زهکشی متان و مقایسه آن ها بیان شده است.

جدول ۳-۱: روش های زهکشی متان و شرایط قابل کار این روش ها (Wang and Xue, 2008)

شرایط قابل کار روش	روش های زهکشی گاز متان		
	زهکشی بدون رهاسازی تنش	زهکشی همراه با آماده سازی راهروهای اصلی	زهکشی همراه با آماده سازی راهروهای اصلی
لایه گازدار و مستعد انفجار باشد.	گمانه داخل لایه حفر می شود.	گمانه ها به صورت عرضی حفر می شوند.	گمانه ها به صورت عرضی حفر می شوند.
لایه گازدار و مستعد انفجار باشد.	همزمان با گمانه های عرضی از راهروها، از سطح سینه کار هم گمانه ها حفر می شوند.	گمانه ها از سطح زمین حفر می شوند.	گمانه ها از سطح زمین حفر می شوند.
لایه قابل گاز کشی و مستعد انفجار باشد.	گمانه در امتداد پیشروی راهروها حفر می شوند.	گمانه از سطح سینه کار حفر می شود.	گمانه به صورت عرضی از داخل راهروها به موازات پیشروی سینه کار حفر می شود.
لایه گازدار و مستعد انفجار باشد.	گمانه از داخل لایه یا از داخل راهروها یا از سطح زمین حفر می شود.	گمانه به صورت عرضی به داخل لایه مجاور حفر می شود.	گمانه به صورت عرضی به داخل لایه مجاور حفر می شود.
لایه گازدار و مستعد انفجار باشد.	گمانه از داخل لایه یا از داخل راهروها یا از سطح زمین حفر می شود.	گمانه به صورت عرضی به داخل لایه مجاور حفر می شود.	گمانه به صورت عرضی به داخل لایه مجاور حفر می شود.
لایه گازدار یا سخت قابل گاز کشی باشد.	گمانه از داخل لایه یا از داخل راهروها یا از سطح زمین حفر می شود.	گمانه به صورت عرضی به داخل لایه مجاور حفر می شود.	گمانه به صورت عرضی به داخل لایه مجاور حفر می شود.
لایه مجاور دارای قابلیت انتشار گاز بالا باشد.	گمانه به صورت عرضی به داخل لایه مجاور حفر می شود.	گمانه به صورت عرضی به داخل لایه مجاور حفر می شود.	گمانه به صورت عرضی به داخل لایه مجاور حفر می شود.
لایه مجاور دارای قابلیت انتشار گاز بالا باشد و گمانه سطحی از عهده گاز کشی برنیاید.	گمانه از سطح زمین حفر می شود.	گمانه به صورت عرضی به داخل لایه مجاور حفر می شود.	گمانه به صورت عرضی به داخل لایه مجاور حفر می شود.
لایه مجاور دارای قابلیت انتشار گاز بالا باشد و گمانه سطحی از عهده گاز کشی برنیاید.	گمانه از سطح زمین حفر می شود.	گمانه به صورت عرضی به داخل لایه مجاور حفر می شود.	گمانه به صورت عرضی به داخل لایه مجاور حفر می شود.
لایه مستعد خودسوزی نباشد یا بتوان اقدامات پیشگیرانه انجام داد.	لوله در داخل منطقه تخریب شده رانده می شود.	گمانه در داخل منطقه تخریب شده حفر می شود.	گمانه از سطح زمین حفر می شود.

جدول ۳-۲: مزایا و معایب روش های مختلف زهکشی متان (ECE, 2010)

روش زهکشی گاز	توضیح	مزایا	معایب
پیش زهکشی با گمانه قائم از سطح زمین	این روش یک یا چند لایه زغالی را در برمی گیرد. دو روش شکافت هیدرولیکی و آتشباری کنترل شده در این گمانه ها قابل کاربرد است. در روش شکافت هیدرولیکی با استفاده از سیالات تحت فشار به درون لایه زغال سنگ شکافت ایجاد می شود.	<ul style="list-style-type: none"> - حذف گاز پیش از معدنکاری - درصد خالص بودن گاز بالاست و برای مقاصد تجاری مناسب است. - گاز کشی وابسته به عملیات استخراجی نیست. - این گمانه ها قابلیت استفاده برای گاز کشی از منطقه تخریب شده را دارا هستند. - این روش فرصتی برای کاهش انتشار متان در هوا (کاهش گازهای گلخانه ای) از منابع زغال سنگ است. 	<ul style="list-style-type: none"> - هزینه بر است. - به منظور سهولت استفاده، نیاز به شبکه خطوط لوله به منظور جمع آوری است. - مشکل دسترسی به زمین از لحاظ مالکیت اراضی - مشکل دفع آب شور تولید شده. - کاهش نفوذپذیری در لایه های عمیق. - افزایش هزینه های حفاری با افزایش عمق. - لایه باید دارای نفوذپذیری بالا باشد. - مشکل هماهنگی با برنامه عملیات استخراجی. - تکمیل و طراحی گمانه ها یک کار تخصصی است.
پیش زهکشی با گمانه های افقی از داخل لایه	در این روش گمانه های بلند افقی از داخل راهروها یا از داخل گمانه ها به داخل لایه زغال سنگ حفر می شوند و گاز کشی طبق زمان معین انجام می شود. این عمل باعث کاهش جریان گاز در هنگام حفر راهروها و استخراج زغال می شود.	<ul style="list-style-type: none"> - حذف گاز قبل از معدنکاری - درصد خالص بودن گاز بالاست و برای مقاصد تجاری مناسب است. - گاز کشی وابسته به عملیات استخراجی نیست. - هزینه کمتر نسبت به حفاری گمانه ها از سطح زمین - قابل استفاده در معادن عمیق در ارتباط با نفوذپذیری. - کاهش خطر انفجار در لایه های پتانسیل دار خطر. - اجازه به نرخ پیشروی سریع در تشکیلات گاز دار می دهد. - حذف گازهایی که با معدنکاری قابل زهکشی نیست. 	<ul style="list-style-type: none"> - گمانه ها باید پیش از شروع عملیات استخراجی ایجاد شوند. - لایه زغال سنگ باید دارای نفوذپذیری و شکستگی های مناسب باشد. - فقط سبب کاهش انتشار گاز از لایه معدنکاری می شود و تأثیری در کاهش میزان گاز از لایه های مجاور که در اثر عملیات جبهه کار طولانی آسیب دیده اند ندارد. - به دلیل ایجاد آب، پایداری گمانه و کنترل حفاری جهت دار مشکل است. - گروه حفار باید آموزش دیده باشند.

ادامه‌ی جدول ۳-۲: مزایا و معایب روش‌های مختلف زهکشی متان (ECE, 2010)

روش زهکشی گاز	توضیح	مزایا	معایب
پیش زهکشی با استفاده از حفاری جهت‌دار از سطح زمین به داخل لایه	در این روش یک گمانه قائم یا شیب‌دار حفاری شده و توسط حفاری جهت‌دار تا نقطه هدف حفاری می‌شود. از این روش حفاری تا طول ۱۰۰۰ متر و بیشتر می‌توان استفاده کرد. به منظور حداکثر کردن عملکرد حفاری از روش‌های پیشرفته حفاری استفاده می‌شود و سعی می‌شود که در راستای تنش لایه‌ها تغییراتی ایجاد نشود.	<ul style="list-style-type: none"> - حذف گاز قبل از معدنکاری - گاز از کیفیت و خلوص بالایی برخوردار است و برای استفاده مناسب است. - گاز کشی وابسته به عملیات استخراجی نیست. - بازیابی این گاز از زهکشی با گمانه‌های قائم بیشتر است. - امکان استفاده از این گمانه‌ها در بالای منطقه کاری در روش زهکشی همراه با معدنکاری. - قابل تغییر بودن موقعیت دستگاه حفاری و محدود به مشخصات سطح نیست. 	<ul style="list-style-type: none"> - هزینه بالا است. - با این روش همه لایه‌های زغال قابل حفاری نیستند. - نیاز به آبکشی منظم دارد تا گمانه مؤثر و مفید باقی بماند. - لایه زغال باید دارای نفوذپذیری متوسط باشد. - در صورت خرابی و ناپایداری گمانه، تعمیر آن به آسانی قابل انجام نیست. - به مهارت‌ها و تجهیزات خاص حفاری نیاز است.
پیش زهکشی با استفاده از گمانه‌های قائم با طول کوتاه در سقف راهروها	در این روش به منظور جلوگیری از انتشار گازهای قابل احتراق از داخل تشکیلات ماسه‌سنگی گمانه‌های قائم و با طول کوتاه از داخل راهروها به داخل لایه‌های سقف حفر می‌شوند. این عمل باعث می‌شود گاز از داخل این تشکیلات به داخل گمانه حرکت نماید. در این روش در بعضی از موارد به منظور آزاد کردن حجم بیشتر گاز و کاهش ریسک آتش‌سوزی در اثر تماس سر ماشین‌آلات با سینه کار، گمانه‌ها با زاویه کمی نسبت به سقف سینه کار حفر می‌شوند.	<ul style="list-style-type: none"> - روشی کم‌هزینه برای کاهش ریسک آتش‌سوزی و کنترل گازهای قابل احتراق. 	<ul style="list-style-type: none"> - پایین بودن نرخ جریان گاز از داخل این گمانه‌ها. - اتصال سیستم زهکشی گازهای قابل احتراق مشکل است.
زهکشی همراه با معدنکاری با استفاده از گمانه‌ها با آرایش تقاطعی	در این روش گمانه‌ها از داخل راهروهای برگشت هوای روش جبهه کار طولانی با زاویه بالا یا پایین به داخل منطقه تخریب حفر می‌شوند و سپس از این گمانه‌ها گازهای قابل اشتعال زهکشی می‌شود. در روش پسرو بهترین سیستم زهکشی در عقب سینه کار است. البته تعمیر و نگهداری و دسترسی به منطقه حفاری مشکل است.	<ul style="list-style-type: none"> - امکان استحصال زیاد گاز از سینه کار در روش جبهه کار طولانی پیشرو. - قابل کار در معادن عمیق. - فاصله کم حفاری تا ذخایر اولیه گاز. - زهکشی گاز به روش‌های مرسوم و انتقال به سطح توسط شبکه لوله‌ها. - این گاز می‌تواند به مصارف صنعتی برسد یا در محل معدن مورد استفاده قرار گیرد. - قابل کار در لایه‌ها با نفوذپذیری کم. - کاهش خطر انتشار ناگهانی گاز با گمانه‌های کف - شبکه حفاری به آسانی قابل تغییر است. - هزینه آن پایین‌تر از سایر روش‌های گاز کشی. 	<ul style="list-style-type: none"> - در روش پسرو دستیابی به گاز دارای کیفیت بالا مشکل است. - به منظور حداکثر کارایی، نیاز به حفاری در عقب سینه کار در روش پسرو است. - به دلیل عملکرد سیستم تهویه مکشی در هنگام عملیات استخراجی، کیفیت گاز زهکشی کم تا متوسط است. - مدت زمان تولید از یک گمانه پایین است. - نیاز به یک گروه حفار آموزش‌دیده است. - به منظور زهکشی، شبکه لوله‌های زیرزمینی تا سطح مورد نیاز است یا محلی برای تخلیه این گازها در راهرو برگشت هوا در نظر گرفته شود.

ادامه‌ی جدول ۳-۲: مزایا و معایب روش‌های مختلف زهکشی متان (ECE, 2010)

معایب	مزایا	توضیح	روش زهکشی گاز
<ul style="list-style-type: none"> - برای زغال‌های عمیق هزینه‌بر است. - نرخ ریسک ورود آب به محیط کاری در صورت وجود سفره آبدار وجود دارد. - امکان مستقیم گاز کشی از کف لایه وجود ندارد. - تا عبور چند متری سینه کار از این مقابل گمانه، امکان تعمیر گمانه وجود ندارد. - شبکه سطحی لوله‌های جمع‌آوری گاز هزینه‌بر است. - فقط در جایی قابل کار است که محدودیت دسترسی به زمین وجود نداشته باشد. - احتمال انتشار گاز به داخل منطقه کاری 	<ul style="list-style-type: none"> - عملیات زهکشی مستقل از عملیات معدنکاری است. - روشی برای تهویه منطقه تخریب است. - روشی مؤثر و قطعی از لحاظ هزینه برای عمق‌های متوسط است. - اغلب اوقات گاز دارای کیفیت متوسط است و زمان تولید تا چندین ماه قابل تمدید است. - قابل تغییر در مقابل طرح استخراجی معدن 	<p>گمانه‌ها معمولاً به داخل لایه زغال سنگ حفر می‌شوند، البته تحقیقات اخیر نشان داده است که گمانه‌های حفر شده تا ۳۰ متر بالای لایه زغال سنگ نیز می‌توانند مؤثر باشند. گمانه تا پایین‌ترین ناحیه تولیدکننده آب‌بندی و سیمان می‌شود. ۶۰ تا ۹۰ متر پایین چال باز گذاشته می‌شود.</p>	<p>زهکشی همراه با معدنکاری با استفاده از گمانه‌های سطحی واقع در منطقه تخریب</p>
<ul style="list-style-type: none"> - حفاری جهت‌دار هزینه‌بر است. - در سنگ‌های آماسی و زغال‌های نرم مشکل‌ساز است. - تعمیر گمانه‌های آسیب‌دیده و خراب شده مشکل است. - غیرقابل انعطاف در مقابل عملیات استخراجی. - به دقت و سرعت وسایل حفاری وابسته است. - نیاز به تجهیزات خاص چال زنی و مهارت ویژه 	<ul style="list-style-type: none"> - از این روش در زهکشی پیش از معدنکاری می‌توان استفاده کرد. - بازده گاز زهکشی شده با استفاده از این روش از روش زهکشی با گمانه‌های تقاطعی بیشتر است. - سیستم زهکشی گاز مستقل از فعالیت‌های تولید زغال سنگ است. - گاز با کیفیت بالا قابل استحصال است. - امکان زهکشی گاز از محل‌های نزدیک به سینه کار 	<p>در این روش با استفاده از حفاری جهت‌دار، گمانه‌ها تا ۲۰ یا ۳۰ متری بالا یا پایین لایه استخراجی حفاری می‌شوند و سپس زهکشی انجام می‌شود.</p>	<p>زهکشی همراه با معدنکاری با استفاده از حفاری جهت‌دار در بالا و پایین لایه استخراجی</p>
<ul style="list-style-type: none"> - دسترسی از گالری به لایه استخراجی هزینه‌بر است. - در صورت نقص در سیستم تهویه، احتمال آتش‌سوزی در زغال‌های دارای پتانسیل خودسوزی وجود دارد. - هزینه‌بر است مگر آن‌که لایه زغال سنگ دارای ضخامت زیاد باشد. - غیرقابل انعطاف نسبت به عملیات معدنکاری. - در صورت وجود لایه‌های قوی بین گالری و لایه استخراجی این روش کارایی لازم را ندارد. 	<ul style="list-style-type: none"> - این روش با آرایش تقاطعی کامل‌تر می‌شود. - پتانسیل زهکشی گاز با کارایی بیشتر با گمانه‌های ضربدری-مقاطع. - سیستم زهکشی گاز مستقل از فعالیت‌های تولید زغال سنگ است. - به‌منظور کاهش هزینه‌ها از فعالیت‌های معدنکاری قبلی می‌توان کمک گرفت. - به‌طور متوسط گاز با کیفیت بالا قابل دستیابی است. 	<p>در این روش یک راهرو در بالا یا پایین لایه استخراجی قبل از معدنکاری ایجاد می‌شود. سپس عملیات استخراج در راهروها متوقف شده و سیستم زهکشی به شبکه لوله‌ها متصل می‌شود. به‌منظور افزایش محیط تحت تأثیر سیستم زهکشی از چال‌های بادزنی استفاده می‌شود.</p>	<p>زهکشی همراه با معدنکاری با استفاده از گالری‌های بالایی و پایینی لایه استخراجی</p>
<ul style="list-style-type: none"> - هزینه بالا - در صورت استفاده از گمانه‌های پیش زهکشی احتمال آسیب‌پذیر بودن آن‌ها از قبل وجود دارد. - عدم امکان استفاده از گمانه‌ها با آرایش تقاطعی به‌منظور افزایش بازدهی وجود ندارد. 	<ul style="list-style-type: none"> - راه دسترسی زیرزمینی لازم ندارد. - پتانسیل استفاده از گمانه‌های زهکشی پیش از معدنکاری. 	<p>عملیات زهکشی شبیه به روش زهکشی پیش از معدنکاری است.</p>	<p>زهکشی همراه با معدنکاری با استفاده از حفاری جهت‌دار به داخل لایه</p>

ادامه‌ی جدول ۳-۲: مزایا و معایب روش‌های مختلف زهکشی متان (ECE, 2010)

معایب	مزایا	توضیح	روش زهکشی گاز
<ul style="list-style-type: none"> - جذب و انتقال گاز قابل اشتعال، خطرهای خاص خود را دارد. - ظرفیت متان زهکشی شده بالاست ولی از آنجاکه این گاز کیفیت پایینی دارد کافی نیست. - ظرفیت زهکشی گاز پایین است. - حجم کمی از گاز قابل زهکشی است. 	<ul style="list-style-type: none"> - کاهش میزان گاز ناشی از منطقه تخریب در روش پسرو. - کمیت گاز واردشده به ناحیه تخریب بالا است. 	<p>در این روش یک فضای خالی در روش جبهه کار طولانی پسرو ایجاد می‌شود. با انجام معدنکاری و حرکت گاز با داخل این فضا، با قرار دادن لوله‌ها گاز زهکشی می‌شود.</p>	<p>زهکشی همراه با معدنکاری با استفاده از جای‌گذاری لوله‌ها در منطقه تخریب روش جبهه کار طولانی</p>
<ul style="list-style-type: none"> - جذب و انتقال گاز قابل اشتعال، خطرهای خاص خود را دارد. - حجم متان زهکشی شده بالاست ولی از آنجاکه این گاز کیفیت پایینی دارد کافی نیست. - وقتی اجرایی است که یک راهرو مناسب در کنار منطقه تخریب وجود داشته باشد. - ایجاد میان‌برها باعث افزایش هزینه‌ها می‌شود. 	<ul style="list-style-type: none"> - باعث کاهش تعداد گمانه‌ها با آرایش تقاطعی می‌شود. - فعالیت گاز کشی وابسته به عملیات استخراجی نیست. - کاهش میزان متان در قسمت عقب سینه کار جبهه کار طولانی می‌شود. 	<p>در این روش از داخل میان‌برها به داخل منطقه تخریب، شبکه لوله‌ها جای‌گذاری شده و سپس گاز زهکشی به سطح زمین یا داخل محفظه‌ای داخل میان‌برها هدایت می‌شود.</p>	<p>زهکشی همراه با معدنکاری از میان‌برها به داخل منطقه تخریب روش جبهه کار طولانی</p>

۳-۱۴- تأثیر روش زهکشی متان بر کمیت و کیفیت گاز خروجی

سرعت خروج گاز، کیفیت گاز و مقدار گاز زهکشی شده بستگی به شرایط خاص زیر دارد (Xue and Guo, 2009):

۱- گاز محتوی و نفوذپذیری لایه زغال‌سنگ و سنگ‌های دربرگیرنده آن.

۲- مدت زمان گاز کشی.

۳- پارامترهای مربوط به سیستم گاز کشی و زمین‌شناسی.

همچنین درصد متان در گاز خروجی به ترکیب گاز در لایه زغال‌سنگ و لایه‌های دربرگیرنده، روش‌های زهکشی، مشخصات زمین‌شناسی محدوده قابل کار و سایر پارامترهای معدنکاری وابسته است.

در جدول ۳-۳ میزان تأثیر روش‌های متان زدایی بر کمیت و کیفیت گاز خروجی نشان داده شده است.

جدول ۳-۳: کمیت و کیفیت گاز خروجی بسته به روش زهکشی متان (Xue and Guo, 2009)

روش حفاری	کیفیت گاز	کمیت گاز
زهکشی پیش از معدنکاری از داخل معدن	درصد متان بالای ۶۰ تا ۹۰ درصد	بالای ۱۰۰ لیتر بر ثانیه در هر گمانه بالای ۳۰۰۰ لیتر بر ثانیه در معادن استرالیا.
گمانه قائم	بالای ۹۰ درصد متان	۱۰۰ تا ۱۰۰۰ لیتر بر ثانیه در هر گمانه در حال تغییر است.
زهکشی همراه با معدنکاری از داخل معدن	درصد متان بین ۲۰ تا ۸۰ درصد	۱۰ تا ۷۰ لیتر بر ثانیه در هر گمانه بالای ۷۰۰ لیتر بر ثانیه در معادن منطقه LW استرالیا.
زهکشی از منطقه تخریب شده	درصد متان بین ۲۰ تا ۸۰ درصد و بالای ۹۰ درصد متان در تشکیلات تخریبی قابل دستیابی است.	۱۰۰ تا ۱۰۰۰ لیتر بر ثانیه در هر گمانه بالای ۵۰۰۰ لیتر بر ثانیه در معادن استرالیا قابل دستیابی است.

۳-۱۵- افزایش نفوذپذیری لایه زغال سنگ

در مواردی که نفوذپذیری لایه زغال از ۵ میلی داری بیشتر باشد، گاززدایی از لایه‌ها به خوبی و سهولت انجام می‌شود. زمانی که نفوذپذیری به کم‌تر از ۲/۵ میلی داری افت کند، حفاری ادامه یافته و زمان گاززدایی نیز افزایش می‌یابد. زمانی که نفوذپذیری به یک میلی داری و یا کم‌تر افت کند، گاززدایی با پیشرفت معدنکاری رفته رفته بسیار مشکل می‌شود. در چنین مواردی دسترسی به نرخ پیشروی و نرخ گاززدایی بالا امکان‌پذیر نیست.

افت نفوذپذیری به دلیل عوامل متعددی از جمله، نفوذپذیری طبیعی لایه زغال (نوع زغال)، نوع سیال و گاز (مرطوب با دی‌اکسید کربن)، عمق و تنش‌های ناشی از فعالیت‌های تکتونیکی و زمین‌شناسی بستگی دارد. تنش، مؤثرترین فاکتور بر نفوذپذیری زغال سنگ به شمار می‌آید. معدنکاری نواحی اطراف لایه‌های زغالی که در بالا و یا در زیر لایه‌های نفوذناپذیر قرار دارند، موجب آزادی تنش‌ها می‌شود. اما در شرایطی که اقتصاد عملیات وابسته به معدنکاری یک لایه مجزا باشد، این عملیات امکان‌پذیر نخواهد بود. روش‌های مختلفی به منظور افزایش نرخ جریان سیال از لایه‌های با نفوذپذیری پایین ارائه شده‌اند عبارتند از:

- عملکرد شیمیایی لایه زغال
- شکست الکتروهیدرولیکی
- شکست هیدرولیکی

- پمپاژ پرفشار آب
- شیارزنی
- آتشکاری
- تزریق آب

در ادامه، جزئیات و نحوه اجرای هر یک از روش ها به تفصیل ارائه خواهند شد.

۳-۱۵-۱- عمل آوری شیمیایی لایه های زغال سنگ^۱

عملکرد شیمیایی لایه های زغال سنگ که بر پایه تزریق سیال انجام می گیرد، باعث افزایش نفوذپذیری از طریق نامحلول سازی مواد موجود در سطوح کلیواژهای زغال سنگ است. برخی از لایه های زغالی با نفوذپذیری بالا در به طور متوسط دارای ۱ تا ۴ درصد و در برخی موارد بیش از ۱۶/۵٪ کربنات بوده و بیشترین مقدار در کائولینیت (۴۰-۴۵٪)، سیدریت (۴۰-۵۰٪)، و کلسیت (۵-۱۰٪) مشاهده شده است. مطالعات نشان داده است که کلسیت اصلی ترین پوشش سطوح کلیواژهای زغال بوده و در لایه های زغالی حاوی دی اکسید کربن، وجود ندارد.

تحقیقات نشان داده است که با تزریق اسید کلریدریک (حدود ۲٪) به لایه زغال، اسید به بافت های نامحلول نفوذ کرده و منجر به تغییر بافت شیشه ای خاکستر شده و در نهایت موجب افزایش نفوذپذیری می شود. در فازهای غیرگازی، افزایش انرژی فعال منجر به کاهش نرخ انتقال گاز شده و در نهایت با افزایش در تناوب انتشار گاز، منجر به آزاد شدن مقداری متان می شود.

به منظور افزایش نفوذپذیری و انتشار گاز از زغال، محلول HCL همراه با آب به محدوده مناسبی از لایه زغال سنگ تزریق می شود. تغییرات دوره ای سیال ها (اسید کلریدریک و آب) منجر به واکنش های شیمیایی بین کربنات-اسید شده و گاز آزاد می شود. این عمل منجر به نفوذ اسید به فواصل دورتری از چال شده و بنابراین شعاع تأثیر آن افزایش می یابد. علاوه بر این، افزایش انحلال اسید منجر به کاهش فشار موینگی

¹ Chemical Treatment of Coal Seam

شده و درجه اشباع ریز حفره های زغال را افزایش می دهد. بررسی سرعت واکنش اسید با مواد معدنی در اطراف چال با استفاده از شناساگرها امکان پذیر است.

عمق چال حفر شده بسته به تجهیزات و ماشین آلات متغیر است و فاصله داری چال ها به نفوذپذیری و تعداد تکرارهای ممکن بستگی دارد. در یک چرخه ۴ تا ۵ ساعته، از چال هایی با فاصله داری ۱۰ تا ۱۵ متر، مقدار ۲۰ تا ۵۰ مترمکعب محلول با فشار ۰/۱ تا ۱/۵ مگاپاسکال پمپاژ می شود.

اسید کلریدریک باعث افزایش ۴ تا ۹ برابری نفوذپذیری گاز در لایه های زغالی نفوذناپذیر گردیده و گازخیزی را با ضریب ۲ تا ۳ و شعاع گازخیزی چال را تا ۲ برابر افزایش می دهد. مطالعات آزمایشگاهی بر نمونه های زغالی نشان داده است که نفوذپذیری لایه های زغال با استفاده از اسید کلریدریک تا ۲ برابر افزایش می یابد (Lama and Bodziony, 1996). گلد و اسمیت^۱ نشان دادند که پمپاژ اسید کربنیک به نمونه های زغالی، با تبدیل کربنات به بیکربنات، موجب تولید کلسیت نامحلول می شود و نفوذپذیری نمونه های زغالی از ۸ تا ۱۲۸ میلی داری (پیش از افزودن اسید) به ۹۱ تا ۲۷۶ میلی داری (پس از افزودن اسید) افزایش می یابد (Thomson and Poppitt, 1993).

۳-۱۵-۲- شکست الکترو هیدرولیکی

روش شکست الکترو هیدرولیکی بر پایه تبدیل انرژی الکتریکی به انرژی مکانیکی در حضور یک سیال و در نتیجه تولید پالس های پرا انرژی استوار است. در این روش، در چال های پر از آب و مستعد تخلیه الکتریکی، فشار بالایی القا می گردد، الکترودها در داخل چال قرار گرفته و با استفاده از خازن هایی با ظرفیت ۵ تا ۱۰ میکرو فاراد به اندازه ۵ تا ۸ کیلوولت شارژ می شوند. برانگیختگی در چال های پر از آب با بهره گیری از تخلیه الکتریکی، منجر به تولید پالس های پرفشار خواهد شد. این امواج ضربه ای موجب تولید ترک های جدید و بازشدگی ترک هایی که از قبل وجود داشته اند، می شود. آزمون های آزمایشگاهی و صحرایی، افزایش گازخیزی را با استفاده از این روش مورد تأکید قرار داده اند.

¹ Gould and Smith

مطالعات متعددی با استفاده از این روش در معادن فلزی به منظور آتشکاری لایه‌ها و خردایش نمونه‌های زغالی در ایالات متحده آمریکا و هلند انجام شده است اما محققان تحقیقاتی را به منظور بررسی استفاده از این روش‌ها برای افزایش نرخ جریان گاز ارائه نداده‌اند (Lama and Bodziony, 1996).

۳-۱۵-۳- شکست هیدرولیکی در زیرزمین

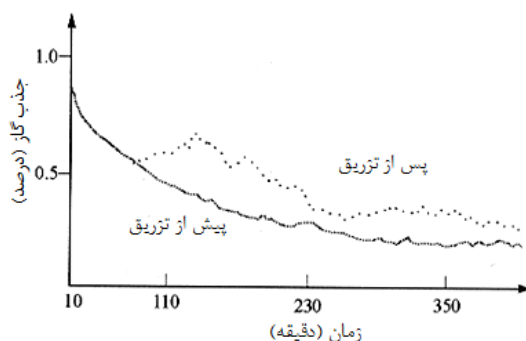
استفاده از آب به منظور ایجاد شکاف‌های ریز در لایه‌های زغالی با هدف افزایش نرخ جریان، در آزمون‌هایی که در استرالیا انجام شده، مورد بررسی قرار گرفته است. این آزمایش‌ها در لایه‌های زغالی با نفوذپذیری تقریباً یک میلی‌داری در یک معدن آنتراسیت انجام شده است. طول چال‌ها از ۱۰۰ تا ۲۰۰ متر متغیر بوده و از چال‌های منفرد و یا چندگانه (۲ یا ۳ گانه) استفاده شده است. فاصله‌داری چال‌ها بین ۶۰ تا ۱۰۰ متر متغیر بوده است.

فشار تزریق به نفوذپذیری و عمق بستگی دارد. معمولاً در اعماق ۳۰۰ تا ۶۰۰ متری، فشار تزریق در حدود ۱۱ تا ۱۲ مگاپاسکال و در اعماق بیشتر، ۳۰ تا ۴۰ مترمکعب بر ساعت متغیر است. حجم کلی فضای تزریق به اندازه ۲۵ تا ۱۶۰ مترمکعب به ازای هر چال انتخاب می‌شود. شعاع زون‌های ترک‌خورده به اندازه ۳۰ تا ۵۰ متر است (Law and Rice, 1993). ترک‌ها از سقف لایه زغال‌سنگ شروع و تا درون لایه ادامه می‌یابد.

۳-۱۵-۴- پمپاژ آب تحت فشار بالا

این روش منجر به توزیع غیریکنواخت گاز از یک لایه در حین معدنکاری شده و در مقایسه با روش‌های استاندارد، نرخ همگرایی لایه‌های اطراف زغال را افزایش می‌دهد. یکی از بهترین تجربیات این روش در لایه‌های زغال‌سنگ مستعد انفجار گاز و انفجار زغال در معدن کاراگاندا (لایه‌های K_{10} و K_{12}) کشور استرالیا انجام شده است. در این معدن چال‌های ۴ تا ۷ متری حفاری شده و آب با فشار ۱۰ تا ۳۵ مگاپاسکال و با نرخ ۱۵ تا ۳۰ لیتر بر دقیقه، پمپاژ شده است. در حدود ۲ تا ۳ مترمکعب از کل آب مصرفی در ۰/۱۵ تا ۱۰ مترمکعب از محدوده پمپاژ شده است. چال‌های ۲ تا ۳ متری در مقاطع ۱/۷ تا ۱/۸ متری حفر شده و فاصله‌داری هر یک از چال‌ها در حدود ۴ تا ۸ متر بوده است. حداقل ضخامت جبهه کار استخراج شده در حدود ۰/۷ تا ۰/۸ متر بوده است.

حداکثر همگرایی سقف و کف در حین پمپاژ آب و نیز پس از آن، در این مناطق پایین بوده و در مقایسه با دیگر مناطق دارای تغییرات یکنواخت بوده است. این روش در برخی معادن چین نیز استفاده شده است (Williams and Rogis, 1980). شکل ۳-۴۱، تأثیر تزریق آب پرفشار بر لایه های زغال سنگ و نرخ گازخیزی را نشان می دهد. قطر چال ها ۴۵ میلی متر و عمق آن ها ۲ تا ۳ متر بوده است. فشار پمپاژ ۷/۸۵ تا ۱۱/۷۷ مگاپاسکال و زمان تزریق ۴/۷ دقیقه و مقدار تزریق ۰/۲۱ مترمکعب در هر چال بوده است. تزریق آب منجر به تغییر در مشخصات مکانیکی زغال سنگ، کاهش نرخ انتشار گاز و نیز کاهش احتمال انفجار گاز می شود.



شکل ۳-۴۱: تأثیر تزریق آب پرفشار بر لایه های زغال سنگ و نرخ گازخیزی

۳-۱۵-۵- شکاف زنی^۱

در لایه های مستعد انفجار گاز، شکاف زنی می تواند منجر به افزایش ایمنی و افزایش گاززدایی شود. شکاف زنی می تواند به صورت مکانیکی در سطح جبهه کار و یا به کمک آتشکاری و حتی با استفاده از جت های پرفشار آب انجام شود. اعمال شیار تا اعماق کم (تقریباً ۳ متر) به منظور کنترل انفجار گاز و زغال استفاده می شود. شکاف زنی تا اعماق زیاد (۱۰۰ تا ۱۲۰ متر) منجر به کنترل انفجار گاز و گاززدایی در لایه های زغال سنگ با نفوذپذیری پایین می شود. شکاف های تنش زدا در انواع و دسته های مختلفی وجود دارند. یکی از جدیدترین روش ها در معادن زغال سنگ، حفاری دو چال با قطر ۱۰۰ تا ۱۲۰ میلی متر و تا عمق ۱۲ تا ۱۵ متر است. میله های فلزی مسلح به زنجیرهای برشی در چال تعبیه شده که می تواند به اندازه ۳ تا ۵ متر انبساط یابد.

^۱ Slotting

شیارها ممکن است با استفاده از جت آب ایجاد شوند. فشار بالای آب در چال های گاززدایی منجر به شستشوی چال از خرده های زغال سنگ می شود. این عمل، موجب تنش زدایی از جبهه کار می شود. قطر چال هایی که برای این منظور استفاده می شوند، بیش از ۷۵ میلی متر است. جت آب ها برای چال های با طول بیش از ۱۰۰ متر مورد استفاده قرار می گیرند. به منظور پرهیز از ایجاد آسیب به جبهه کار، عمق شیارها ۱۰ متر در نظر گرفته می شود. افزایش در ضخامت جت، عمق شیار را افزایش می دهد. در لایه های زغال سنگ با ضریب پرتودیاکانوف برابر ۱/۳، فشار آب در حدود ۱۰ تا ۳۰ مگاپاسکال و مقدار آب مورد استفاده در حدود ۱۲۰ تا ۱۵۰ لیتر در دقیقه است. بازشدگی این شیارها، در حدود ۱۰۰ تا ۱۲۰ میلی متر است.

شیارها ممکن است در طول چال نیز به وجود آیند. ایجاد یک محدوده یک هزار مترمربعی از شیارها با استفاده از تنها یک چال واحد امکان پذیر است. با این عمل، مقدار گازخیزی از چال بسیار افزایش می یابد. مقدار گازخیزی از ۱۰۰ متر از طول یک چال شیارکاری شده، به طور متوسط در حدود ۰/۱۲ مترمکعب در دقیقه است که این مقدار، ۳ برابر بیشتر از مقدار گازخیزی قبل از شیار کاری (۰/۰۴ مترمکعب بر دقیقه) است (بدون احتساب مقدار گازخیزی در جریان عملیات شیارزنی).

۳-۱۵-۶- آتشکاری

آتشکاری رایج ترین روش در افزایش نرخ جریان و ایمنی معدن است. بیشتر آزمایش ها در استفاده از این روش، در لایه های زغالی با نفوذپذیری پایین و مستعد انفجار در محدوده های معدنی در روسیه و اوکراین انجام شده است. اساس این روش، تخریب منطقه به منظور تنش زدایی از محدوده و انتقال تنش به نواحی فراتر از جبهه کار و دورتر از لایه زغال سنگ است.

طبق گزارش های موجود، در این نوع آتشکاری در اکراین، ۱۲ کیلوگرم خرج در طول های ۲-۱/۵ متر در لایه زغال سنگ استفاده شده و دو تا سه عدد از چنین خرج هایی (۲۴ تا ۳۶ کیلوگرم) در فواصل دورتری آتش شده اند. در ۱۵ چال طراحی شده، طول چال ها ۱۵۰ تا ۲۰۰ متر بوده است. نرخ جریان متان نیز در یک دوره ۴ ماهه در حدود ۳۰ تا ۴۰٪، افزایش یافته است (Lama and Bodziony, 1996).

در روسیه، لایه زغال سنگ با ضخامت ۷ متر و شیب نزدیک به افق، ماده منفجره آنفو شماره ۸ به منظور آتشکاری استفاده شده است. در این مورد، ۱۲-۱/۵ کیلوگرم ماده منفجره آتش شده که منجر به افزایش ۳۰ درصدی جریان گاز شده است. در اولین روزهای انفجار، در مقایسه با زمانی که آتشکاری انجام نشده، افزایش ۲ برابری در نرخ جریان گاز گزارش شده است.

۳-۱۵-۷- تزریق آب

تزریق آب یکی از روش های رایج برای گازخیزی لایه های زغالی در کشورهای بلغارستان، چین، فرانسه و نیز کانادا است. اساس این روش بر پایه افزایش درصد رطوبت لایه های زغالی استوار است که اجازه انتشار سریع گاز را نمی دهد. مقدار فشار آب (P_w) به فشار گاز و عمق بستگی دارد. رابطه ۴-۱ نشان دهنده کیفیت این وابستگی است.

$$0.37\sigma_H < P_w < (1.2-1.5)P \quad (1-4)$$

که در آن:

σ_H : تنش افقی (MPa)

P: فشار گاز، (MPa)

روش تزریق آب در استخراج جبهه کار طولانی و نیز در لایه هایی که برای اولین بار تحت استخراج قرار گرفته اند، موفقیت آمیز بوده است. در جریان فرآیند پمپاژ آب، سه مرحله قابل مشاهده است. در اولین مرحله نرخ جریان با زمان کاهش یافته، در دومین مرحله، نرخ جریان ثابت و در مرحله سوم نرخ جریان افزایش می یابد. در مرحله اول و دوم، فشار پمپاژ ثابت بوده و در مرحله سوم کاهش می یابد. رسیدن به مرحله سوم که همراه با توزیع ترک ها در لایه زغال سنگ است، بیانگر موفقیت آمیز بودن این فرآیند است.

در مواردی که نفوذپذیری پایین بوده، فشار پمپاژ بیش از ۱۵ مگاپاسکال برای چال های با فاصله ۲ متر با پمپاژ آهسته و در یک دوره ۲۰ تا ۲۵ روزه، استفاده شده است (Lama, 1983). افزودن تجهیزات فعال کننده سطحی به آب، در جریان تزریق، منجر به افزایش نرخ نفوذ آب و تغییر در ساختارهای مولکولی زغال سنگ می شود. این تغییرات در بافت های چرب زغال سنگ ایجاد می شود. خصوصیات الکترولیتی این ساختارها در اعماق نفوذ پیدا کرده و انرژی زنجیره های متانی را کاهش می دهد. این فرآیند در یک دوره ۱ تا ۲ روزه با

فشار ۵ تا ۶ مگاپاسکال انجام می‌شود. این ترکیبات به اندازه ۵۰ تا ۶۰ متر در چال نفوذ کرده و منجر به افزایش ۶۵ تا ۷۵ درصدی گازخیزی در یک دوره زمانی مشخص می‌شود. این نکته حائز اهمیت است که تزریق آب در چال‌های حاوی دی‌اکسید کربن موفقیت‌آمیز نیست. در چنین شرایطی، تزریق آب تحت فشار منجر به افزایش فشار گاز در سیستم ریز درزه‌ها شده و با توزیع ترک‌ها همراه است. و ممکن است منجر به وقوع انفجار گاز شود (Lama, 1983). قابلیت انحلال دی‌اکسید کربن در آب بالاست. به همین دلیل پیشنهاد شده است که به منظور نامحلول‌سازی دی‌اکسید کربن و کاهش مقدار گاز، مواد شیمیایی نظیر هیدروکسید سدیم در چال‌ها پمپاژ شود. پمپاژ سیال با استفاده از پمپ‌هایی که دارای فشار تزریق متغیر هستند، به دلیل ایجاد ارتعاشات، آسان‌تر است. این عمل منجر به افزایش نرخ پمپاژ تا دو برابر می‌شود.

۳-۱۶- فرآیند تصمیم‌گیری در اجرای یک پروژه CBM در یک منطقه معدنی

پارامترهای زیادی بر اقتصادی بودن یک پروژه CBM تأثیر می‌گذارند. اولین دسته از پارامترهای تأثیرگذار، پارامترهای مربوط به خصوصیات زمین‌شناسی لایه زغال‌سنگ و لایه‌های دربرگیرنده آن است. دومین متغیرها مربوط به هزینه‌های معدنکاری است. سومین متغیرها که اهمیت بسیار زیادی دارند مربوط به استخراج متان و جمع‌آوری آن است. از بین سه عامل بیان‌شده، عوامل مربوط به جمع‌آوری و بازاریابی گاز، عامل مهم برای شرکت‌های معدنی است.

عوامل اصلی تأثیرگذار بر فرآیند تصمیم‌گیری در ادامه تشریح شده است و در شکل ۳-۴۲ به صورت روند نما نشان داده شده است (USEPA, 1999). این عوامل به شرح زیر است:

۱- محاسبه گاز محتوی لایه زغال‌سنگ. لایه‌ای که دارای گاز محتوی بیشتر از ۱۰۰ فوت مکعب بر هر تن (۳ متر مکعب بر تن) باشد مناسب برای گاز کشی است.

۲- مشخص کردن حالات تأخیر (توقف و کاهش). حالات تأخیر در سر معدن مشخص می‌شود.

۳- استفاده از مهندسیین متخصص برای تعیین تأخیر و کاهش میزان متان از سینه کار. زمان‌های تأخیر می‌تواند از گزارش‌های مسئول شیفت معدن مشخص شود اما زمان کاهش نیاز به مطالعات و اندازه‌گیری دارد. هزینه‌های ایجاد شده باید توسط روش‌های دقیق حسابداری محاسبه شود.

- ۴- محاسبه تأخیرها با توجه به شبیه‌سازی معادن مجاور و مشابه.
- ۵- محاسبه هزینه‌های تهویه.
- ۶- محاسبه هزینه کنترل ذرات گردوغبار. کنترل ذرات گردوغبار عامل مهمی است که تحت تأثیر حجم هوا است.
- ۷- محاسبه هزینه‌های مربوط به سیستم ایمنی.
- ۸- محاسبه مجموع هزینه‌های بند ۴ تا ۷.
- ۹- آیا زمان زهکشی پیش از معدنکاری برای استفاده از گمانه‌های قائم مهیا است؟ زمان زهکشی مناسب ۲ تا ۷ سال است.
- ۱۰- محاسبه هزینه‌های مربوط به گمانه قائم.
- ۱۱- بررسی امکان استفاده از گمانه‌های واقع در منطقه تخریب. گمانه‌های تخریب در روش جبهه کار طولانی، روش مؤثری برای کاهش میزان متان در شرایط عملیاتی است.
- ۱۲- محاسبه هزینه گمانه‌های تخریب.
- ۱۳- بررسی امکان استفاده از گمانه‌های افقی و تقاطعی. در صورتی که امکان دسترسی به سطح زمین مشکل باشد، حفر گمانه‌های تقاطعی روشی مقرون‌به‌صرفه است.
- ۱۴- محاسبه هزینه‌های گمانه‌های افقی و تقاطعی.
- ۱۵- محاسبه درآمد ناشی از فروش گاز به خط لوله. این کار می‌تواند برای گازهای حاوی بالای ۹۰ درصد متان انجام شود.
- ۱۶- بررسی امکان فرآوری متان زهکشی شده. فرآیندهای انجام‌شده برای خالص‌سازی متان مانند حذف بخار آب، نیتروژن، اکسیژن و دی‌اکسید کربن است.
- ۱۷- افزایش ارزش حرارتی متان با اضافه کردن سایر فرآورده‌ها نظیر پروپان.
- ۱۸- محاسبه هزینه‌های بند ۱۷.
- ۱۹- بررسی امکان استفاده از گازهای دارای ارزش حرارتی متوسط.

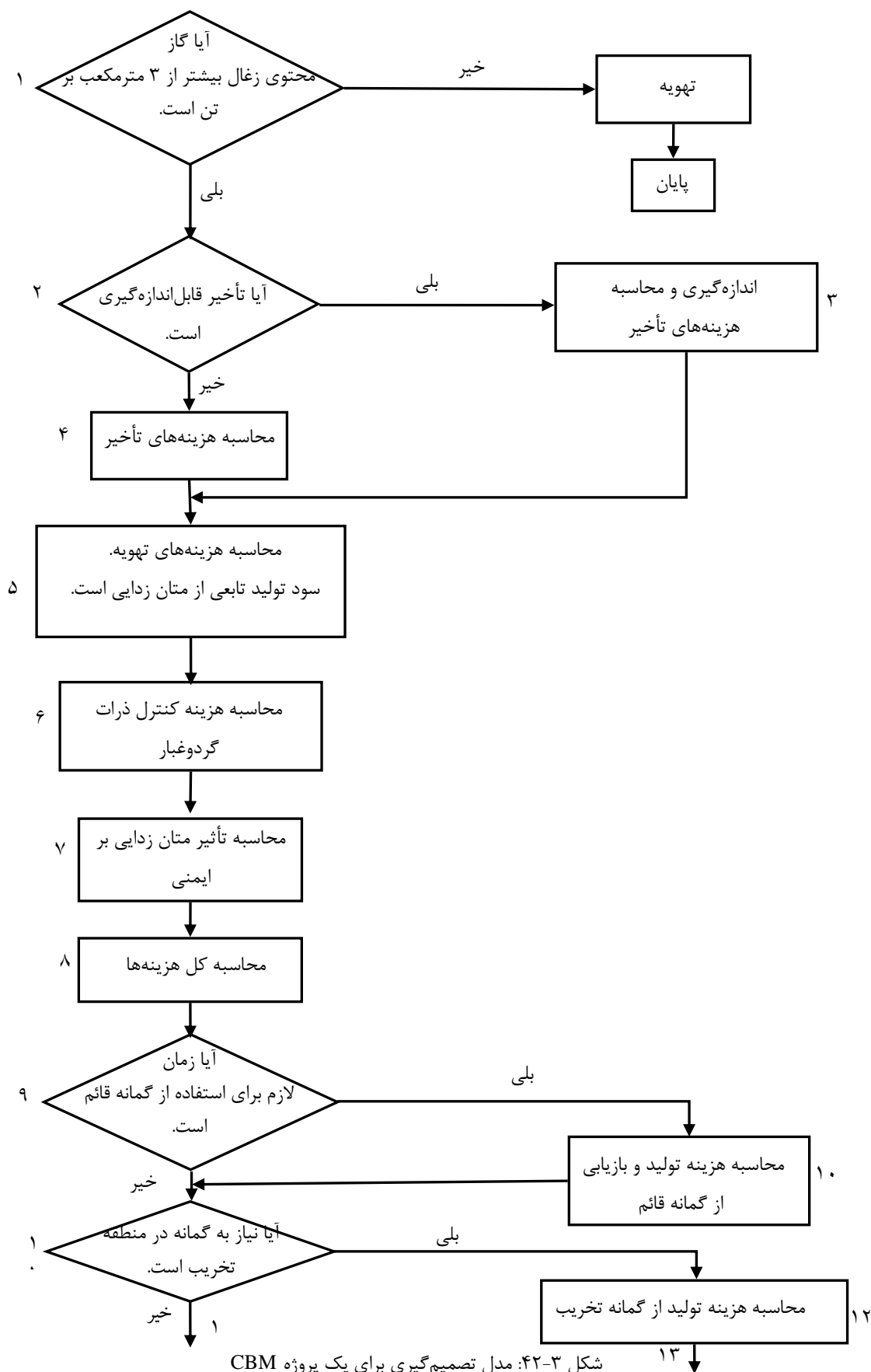
۲۰- بررسی امکان استفاده از گاز متان در کاهش گازهای گلخانه‌ای و تعیین سود و زیان آن.

۲۱- انتخاب بهترین طرح متان زدایی.

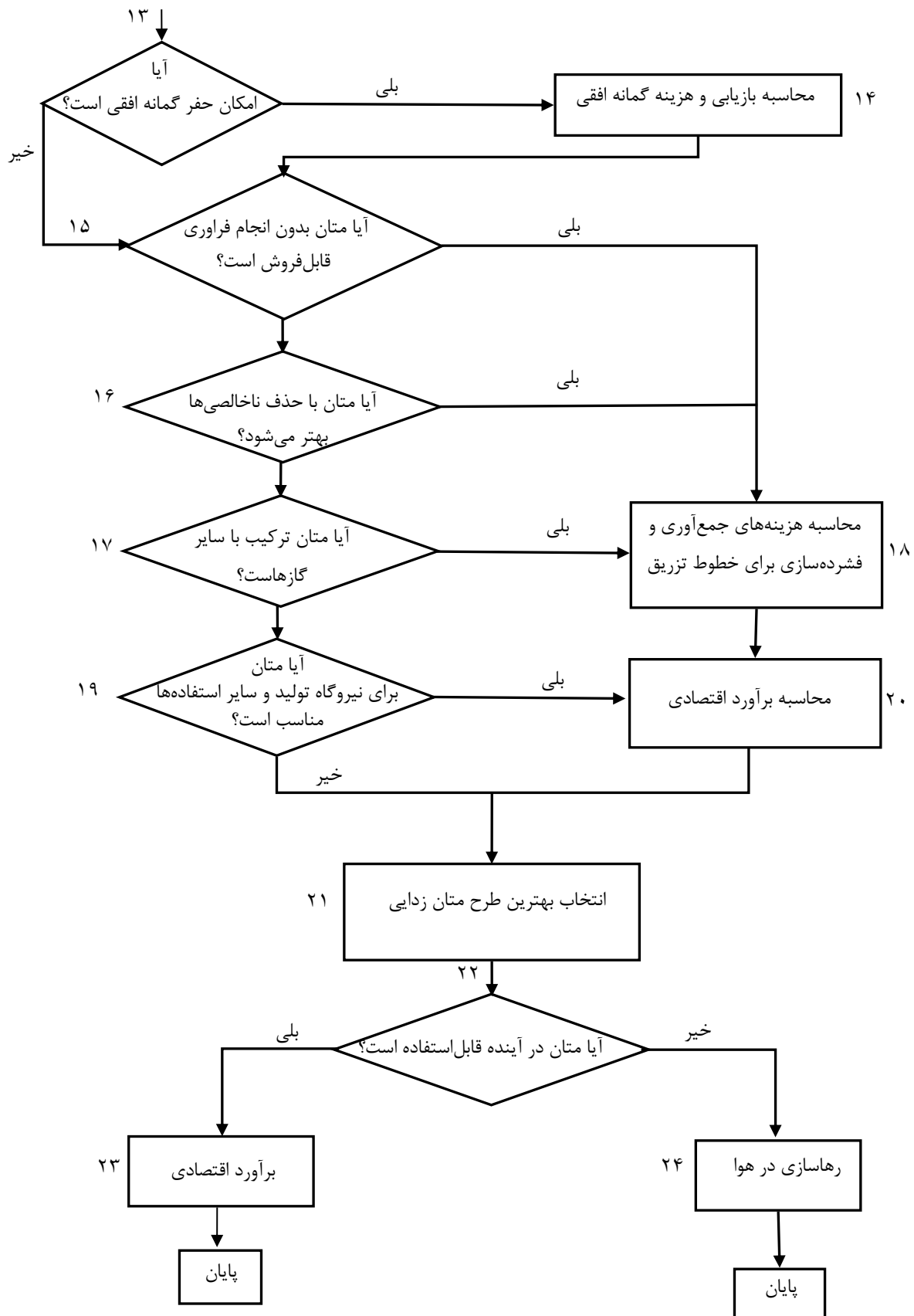
۲۲- آیا استفاده از سیستم متان زدایی وابسته به هزینه‌ها و درآمدهای ناشی از آن است؟ امکان اقتصادی بودن آن در آینده وجود دارد یا نه؟

۲۳- در صورتی که متان در آینده قابل استفاده است میزان سودهی آن محاسبه می‌شود.

۲۴- اگر فروش متان سودهی ندارد از نقطه نظر اقتصادی باید در هوا رهاسازی شود. به‌هرحال با رهاسازی متان در هوا، باید در بازه‌های زمانی مختلف با ورود وسایل و تجهیزات پیشرفته، شرکت‌های معدنی نسبت به امکان بررسی استفاده دوباره از فناوری متان زدایی اقدام نمایند.



شکل ۳-۴۲: مدل تصمیم گیری برای یک پروژه CBM



ادامه‌ی شکل ۳-۴۲: مدل تصمیم‌گیری برای یک پروژه CBM

فصل چهارم

بررسی عوامل زمین‌شناسی مؤثر بر فرآیند متان زدایی

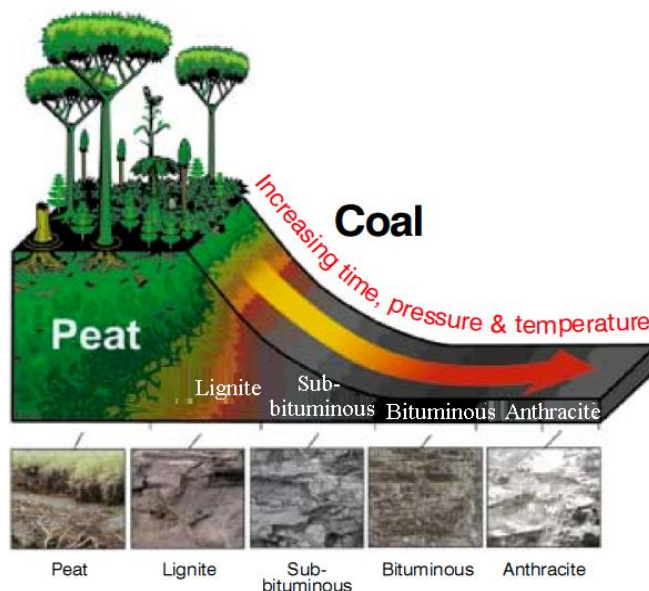
امروزه نمی‌توان اهمیت تأثیر دانش زمین‌شناسی را در مراحل مختلف معدنکاری نادیده گرفت. از این رو یکی از اصلی‌ترین و مهم‌ترین اقداماتی که باید در اکثر پروژه‌های معدنی صورت گیرد، مطالعات مربوط به زمین‌شناسی منطقه است. پارامترهای زمین‌شناسی از جمله پارامترهای مهم و تأثیرگذار در یک پروژه هستند که در صورت نادیده گرفتن، ممکن است خسارات جبران‌ناپذیری به یک پروژه تحمیل شود و چه بسا سبب تعطیلی پروژه شود. انتخاب سیستم حفاری، تکمیل، شبیه‌سازی و تکنیک‌های تولید برای CBM نیاز به دانشی گسترده از حوضه‌های مختلف زمین‌شناسی، پارامترهایی از زغال‌سنگ و سنگ‌های اطراف آن دارد. پارامترهای زمین‌شناسی زیادی بر انجام یک پروژه CBM تأثیر می‌گذارند این پارامترها شامل مشخصات درزه‌ها و گسل‌ها، شبکه کلیت‌ها و ناپیوستگی‌ها، رگه‌های رس، نفوذپذیری و گاز محتوی لایه زغال‌سنگ و سنگ‌های دربرگیرنده آن، تراوا بودن لایه، کیفیت زغال‌سنگ و ضریب گسترده‌گی زغال‌سنگ در منطقه است. از این رو در ابتدا به دلیل تأثیر شرایط تشکیل زغال‌سنگ بر میزان گاز محتوی آن، به فرآیند زغالی شدن و تشکیل متان پرداخته‌شده و در انتها شرایط زمین‌شناسی لازم برای اجرای یک پروژه CBM بیان شده است.

۴-۲ - فرآیند زغالی شدن

زغال‌سنگ منشأ گیاهی دارد و طی فرآیندهای طولانی شیمیایی، بیولوژیکی و زمین‌شناسی در دوره‌های گذشته، تشکیل شده و به صورت ذخیره‌های با ارزشی درآمده است که امروزه انسان از آن بهره‌برداری می‌کند. همه انواع زغال‌سنگ‌ها، به یک شیوه به وجود نیامده‌اند، بلکه با توجه به دوران مختلف زمین‌شناسی و شرایط متفاوت آن‌ها، نوع تغییرات مؤثر در به وجود آوردن زغال‌سنگ‌ها نیز متفاوت بوده است. از این رو، امروزه چند نوع زغال‌سنگ در معادن وجود دارد (یزدی، ۱۳۸۲).

زغال‌سنگ ماده‌ای غیر متجانس است که از تجزیه گیاهان تحت شرایط مختلف از نظر رطوبت، حرارت و فشار به وجود می‌آید و به عنوان یکی از پرستفاده‌ترین سوخت‌های فسیلی که به سهولت می‌سوزد و بیش از ۵۰٪ از وزنش را مواد کربن‌دار تشکیل داده است بر اثر دگرگونی بقایای گیاهی، تحت فشار، حرارت و با

گذشت زمان در طی میلیون‌ها سال به وجود آمده است. در ابتدا بقایای گیاهی در حوزه‌های باتلاقی رسوب کرده و تشکیل اسید هیومیک^۱ و پس از آن تشکیل زغال‌سنگ نارس یا تورب^۲ را می‌دهند. زمان، گرما و فشار سه عامل تعیین کننده در درجه زغال‌شدگی هستند. بسته به نوع گیاه، میزان تجزیه و شرایط محیط، محصولی که تولید می‌شود یکسان نبوده بلکه از طیف گسترده‌ای برخوردار است که با افزایش میزان کربن، زغال‌ها به انواع لیگنیت^۳ (زغال قهوه‌ای- نارس)، ساب بیتومینه^۴ (زغال نیمه قیری)، بیتومینه^۵ (زغال قیری)، آنتراسیت^۶ (زغال سخت) و نهایتاً گرافیت^۷ تقسیم‌بندی می‌شوند (اصانلو، ۱۳۷۸) که در شکل ۱-۴ مجموعه فرآیند زغال‌شدگی آورده شده است.



شکل ۱-۴: مراحل تشکیل زغال (Greb et al., 2006)

به طور کلی در فرآیند زغالی شدن، پیت به انواع زغال‌سنگ تبدیل می‌شود. تبدیل پیت به زغال‌سنگ قیری نتیجه اثر طولانی فشار و دما است و تبدیل آن به آنتراسیت به فشار و دمای بیشتری نیاز دارد که از فرآیند تشکیل کوه‌ها و حرکت افقی پوسته زمین ناشی می‌شود. فرآیند تبدیل پیت به زغال‌سنگ، با کاهش مقدار رطوبت، اکسیژن، هیدروژن و حجم مواد فرار (دی‌اکسید کربن، مونوکسید کربن و گازهای دیگر) موجود در

¹ - Acid Humic

² - Peat

³ - Lignite

⁴ - Sub-Bituminous

⁵ - Bituminous

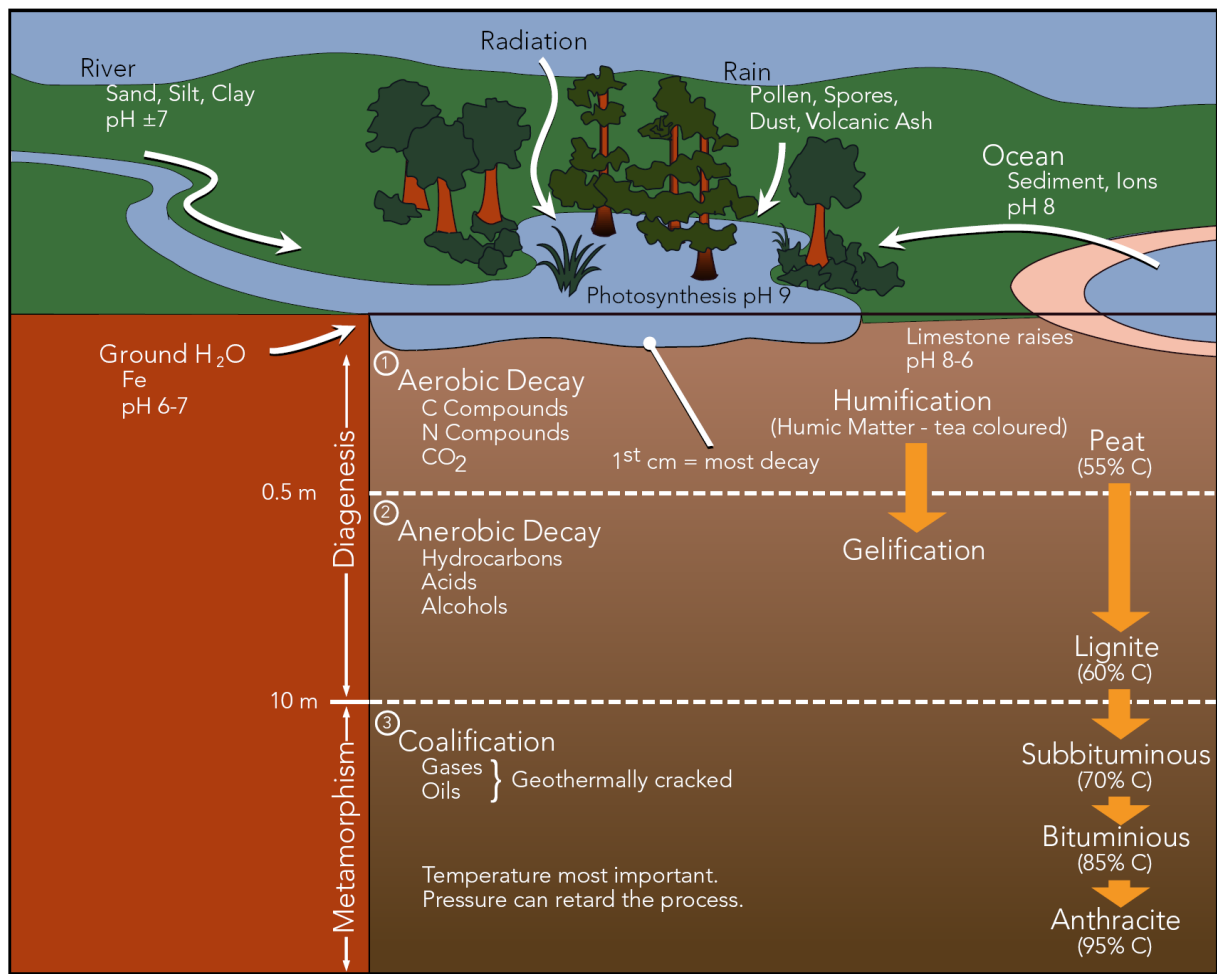
⁶ - Anthracite

⁷ - Graphite

آن و افزایش درصد کربن ثابت، گوگرد و در بسیاری موارد، محتویات خاکستر آن همراه است. این فرآیند تبدیل، به‌طور کلی به عوامل زمین‌شناسی زیر مربوط است:

- فشار و حرارت که این خود به عمق رگه‌های پیت در لایه‌های زیرزمینی مربوط است.
- زمان که هر چه زمان ذخیره‌سازی زغال سنگ طولانی‌تر باشد، عمل تشکیل زغال سنگ کامل‌تر است.
- دگرگونی ساختاری
- حرارت ناخواسته ناشی از سنگ‌های مجاور
- ترکیب و ساختار گیاهان
- شرایط محیطی

فرایند زغالی شدن در شکل ۲-۴ نشان داده شده است.



شکل ۲-۴: فرایند تشکیل زغال سنگ و انواع آن (www.smtc.com)

۴-۳- گاز زغال سنگ

منظور از گاز زغال سنگ، گازی است که در معادن زغال سنگ از لایه‌های زغال سنگ و یا سنگ در برگیرنده لایه زغال سنگ متصاعد می‌شود. از آنجا که بیشتر این گاز (تا ۹۹ درصد) از متان (CH_4) تشکیل شده است؛ لذا غالباً آن را گاز متان می‌نامند. گاز زغال سنگ از خطرناک‌ترین گازهای معادن است و در موارد بسیاری موجب انفجار معدن و مرگ افراد زیادی شده است. علاوه بر متان، گازهایی نظیر دی‌اکسید کربن، ازت، هیدروژن و نیز هیدروکربن‌های سنگین مانند اتان (C_2H_6)، سولفور هیدروژن (SH_2)، گاز سولفور (SO_2) و مونواکسید کربن (CO) در ترکیب آن دیده می‌شود (مدنی، ۱۳۶۶).

متان گازی است بی‌رنگ و بی‌بو که چگالی آن نسبت به هوا $0/۵۵۴$ و بنابراین از هوا سبک‌تر است. مهم‌ترین خطر گاز زغال، انفجار آن است، زیرا این گاز در اثر حرارت، به سهولت با اکسیژن هوا ترکیب می‌شود و گاز کربنیک و بخار آب تولید می‌کند.

۴-۳-۱- نحوه تشکیل گاز متان

هنگام تجزیه مواد گیاهی و تبدیل آن‌ها به انواع زغال سنگ، مقدار زیادی گاز متان و سایر گازهای موجود در گاز زغال سنگ تشکیل می‌شود. بیشتر این گازها در لایه‌های زغال سنگ محبوس و مقداری از آن‌ها در سنگ‌های درون‌گیر لایه‌های زغال سنگ جمع می‌شود و به همین علت، هنگام حفاری در سنگ‌های اطراف زغال سنگ بایستی همیشه هوای معدن را از نظر میزان گاز کنترل کرد.

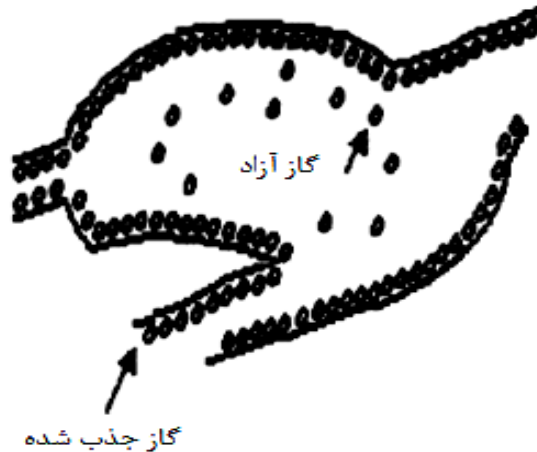
ساختار زغال سنگ از دو نوع حفره‌های میکروسکوپی (کمتر از ۲ نانومتر) و ماکروسکوپی (بیشتر از ۵۰ نانومتر) تشکیل شده است. ذخیره شدن متان درون زغال سنگ با توجه به شکل ۳-۴ به دو صورت است (توکلی و سرشکی، ۱۳۸۵):

۱- به صورت جذب سطحی در روی حفره‌ها و سطوح میکروسکوپی زغال سنگ.

مکانیسم نگهداری گاز درون زغال سنگ به صورت جذب سطحی بستگی زیادی به خلل و فرج میکروسکوپی دارد زیرا حدود ۸۵ درصد از خلل و فرج در سطح زغال سنگ به صورت میکروسکوپی است.

۲- به صورت گاز آزاد.

ذخیره شدن متان در سطح زغال‌سنگ به صورت گاز آزاد خیلی کمتر از جذب سطحی است. معمولاً بیش از ۹۵ درصد از گاز زغال‌سنگ به صورت جذب سطحی به شکل لایه‌های تک‌مولکولی بر روی سطح زغال‌سنگ و کمتر از ۵ درصد به صورت گاز آزاد است.



شکل ۳-۴: روش قرارگیری گاز در سطح زغال‌سنگ (توکلی و سرشکی، ۱۳۸۵)

تحقیقات نشان داده است که ۱ کیلوگرم زغال‌سنگ بین ۲۰ تا ۲۰۰ هزار مترمربع سطح دارد که این سطح می‌تواند تا ۲۵ مترمکعب بر تن گاز جذب کند. مقدار گاز در زغال‌سنگ بستگی به ساختار خلل و فرج، نفوذپذیری، رطوبت و دمای آن دارد و در صورتی که فشار بر لایه زغال‌سنگ وارد شود، گاز از آن خارج می‌شود. از این‌رو زمانی که پوشش زغال‌سنگ در اثر معدنکاری یا فرسایش حذف شود، فشار محبوس‌کننده لایه زغال‌سنگ از بین می‌رود و متان منتشر می‌شود. متان تولید شده در اثر این فرایندها در سطح زغال‌سنگ جذب شده و در اثر فشار آب وارد به آن در سطح زغال‌سنگ جذب می‌شود (Skow et al, 1980).

باید توجه داشت که میزان گاز لایه‌های زغال‌سنگ، علاوه بر جنس و خصوصیات زمین‌شناسی به مشخصات سنگ دربرگیرنده آن نیز بستگی دارد. مثلاً اگر لایه‌های زغال‌سنگ در نزدیکی سطح زمین واقع شده باشند، قسمت اعظم گاز آن‌ها به سطح زمین راه پیدا می‌کند و خارج می‌شود در صورتی که لایه‌های عمیق، معمولاً حاوی مقدار بیشتری گاز زغال‌سنگ هستند. به‌هرحال، به‌طور معمول مقدار متان در زغال‌سنگ با افزایش عمق و کیفیت زغال‌سنگ افزایش می‌یابد.

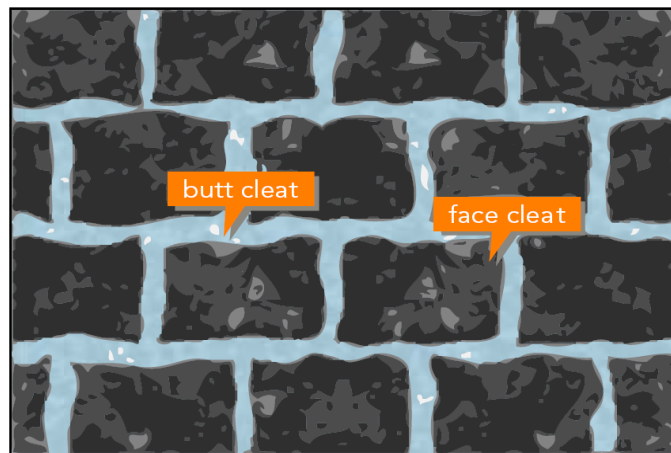
۴-۴- پارامترهای زمین‌شناسی مؤثر بر عملیات تولید متان از لایه‌های زغال سنگ

در ادامه به مهم‌ترین پارامترهای زمین‌شناسی مؤثر بر عملیات متان زدایی پرداخته شده است.

۴-۴-۱- ناپیوستگی‌های لایه زغال سنگ

زغال سنگ به طور طبیعی دارای ناپیوستگی‌هایی است که این ناپیوستگی‌ها تأثیر زیادی بر نفوذپذیری آن دارد. این ناپیوستگی‌ها شامل کلیت‌ها^۱، درزه‌ها و صفحات ناپیوستگی بزرگ است.

به‌طور کلی سیستم شکستگی‌های قائم طبیعی در لایه‌های بیتومینه، کلیت نامیده می‌شود. طول این شکستگی‌ها کمتر از یک متر و فراوانی آن‌ها بین ۵ تا ۲۰ درزه در هر متر است. این ناپیوستگی‌ها معمولاً حالت قائم دارند و امتداد آن‌ها در دو جهت عمود بر هم است که معمولاً به دو بخش تقسیم می‌شود. صفحات شکستگی اصلی که ممتدتر هستند و صفحات لایه‌بندی که زغال سنگ را قطع می‌کنند و ممکن است در فواصل بزرگ‌تری گسترش یابند. کلیت‌های فرعی معمولاً کوتاه هستند و ممکن است دارای انحنا باشند و شکستگی‌های غیر پیوسته‌ای هستند که به طور متناوب به کلیت‌های اصلی ختم می‌شوند. در شکل ۴-۴ شبکه کلیت در داخل لایه زغال سنگ نشان داده شده است.

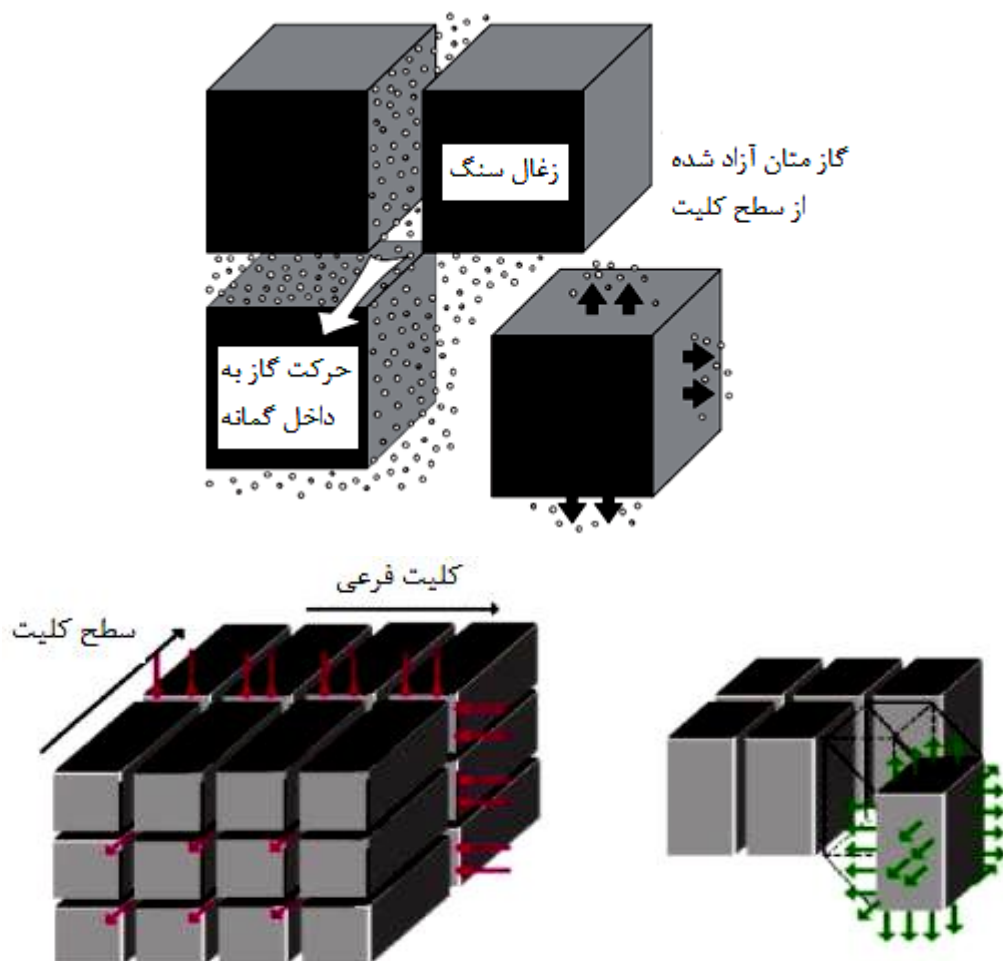


شکل ۴-۴: کلیت‌ها و شبکه شکستگی‌ها در زغال سنگ (www.ch4.com.au)

متان معمولاً در لایه‌های زغال سنگ به همراه آب و در داخل کلیت‌ها وجود دارد. شکل ۴-۵ چگونگی حرکت گاز از داخل لایه زغال سنگ را نشان می‌دهد. واضح است که علاوه بر گاز خارج‌شده مقداری از این گاز در

¹ Cleats

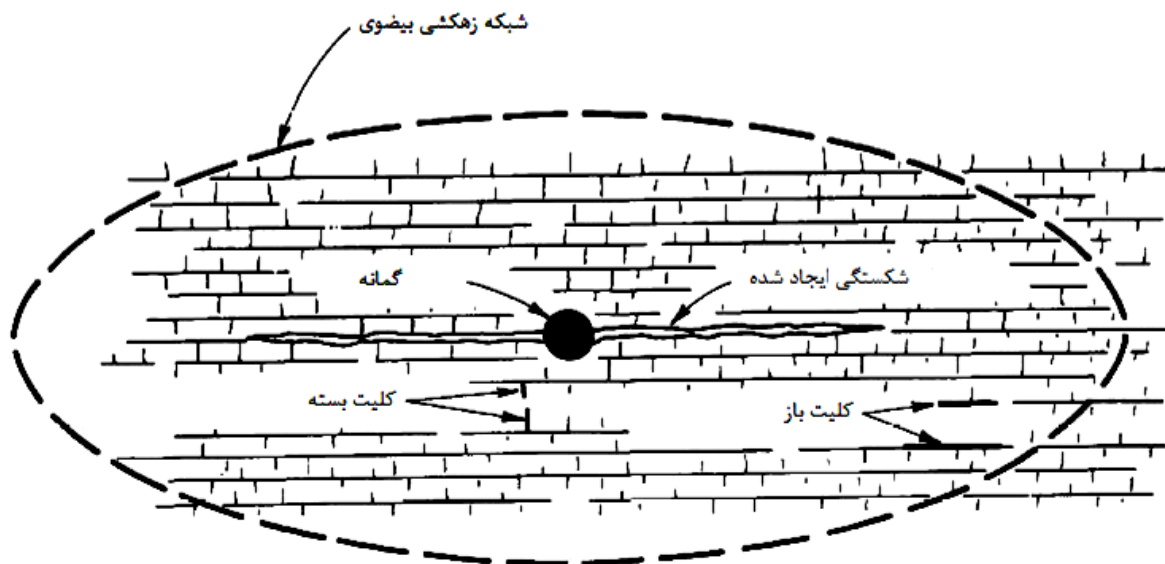
داخل لایه باقی می‌ماند. جهت کلیت‌های زغال‌سنگ نیز در بازدهی گاز کشی مؤثر است. کلیت‌های اصلی و فرعی نفوذپذیری جهت‌دار را فراهم می‌کنند به این معنی که جریان گاز در جهت موازی کلیت‌های اصلی بیشتر است.



شکل ۴-۵: حرکت گاز متان از داخل کلیت‌ها و سطح زغال‌سنگ (www.smtc.com)

آزمایش‌های زیرزمینی در معادن زغال‌سنگ نشان می‌دهد که گمانه‌های افقی به‌منظور افزایش بازدهی باید عمود بر تعداد بیشتری کلیت اصلی قرار گیرند. در نتیجه مقدار بیشتری گاز در زمان معینی نسبت به گمانه‌های حفر شده عمود بر کلیت فرعی حاصل می‌شود. همچنین سیستم کلیت لایه‌های زغال‌سنگ بر روی گاز کشی قائم گمانه‌هایی که از سطح زمین حفر می‌شوند تأثیر می‌گذارند. گمانه‌های قائم در لایه زغال‌سنگ با توسعه مناسب کلیت‌های اصلی و فرعی، گاز را با نرخ بالاتری از شکستگی جهت یافته در جهات کلیت‌های اصلی نسبت به شکستگی در جهت موازی با جهات کلیت فرعی جمع خواهد کرد. بنابراین الگوی

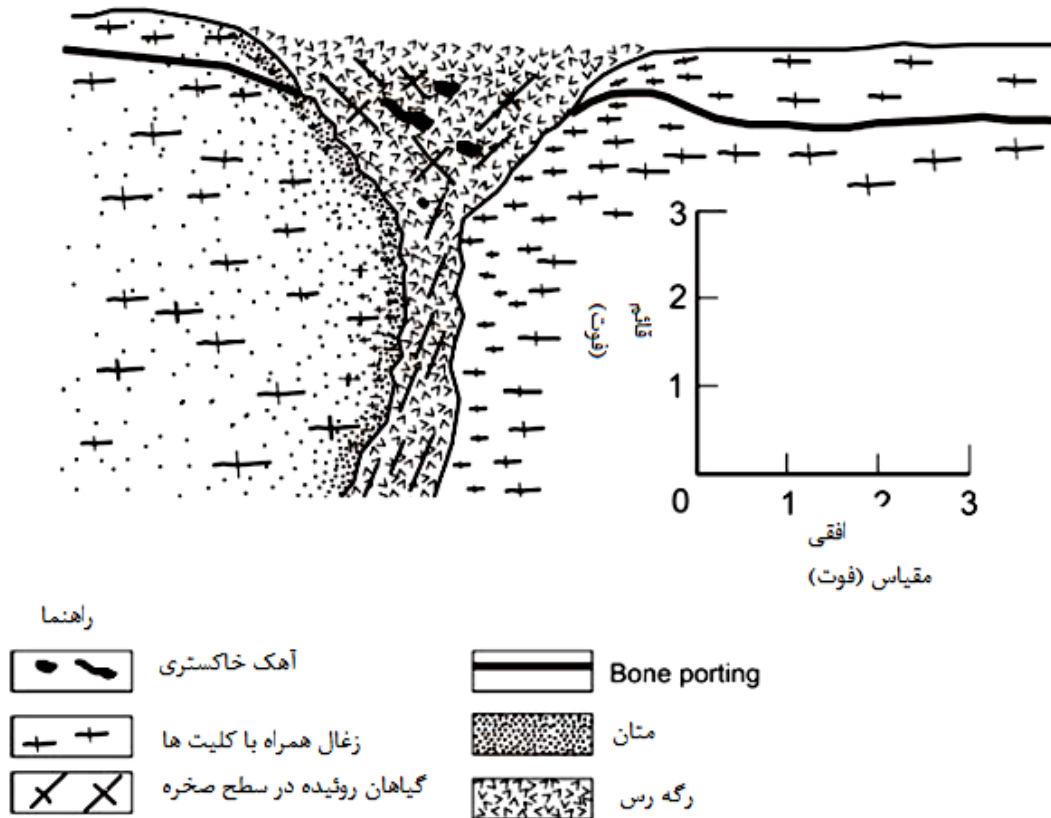
زهکشی بیضوی (شکل ۴-۶) با محور بلند باید به نحوی به موازات کلیت اصلی طراحی شود. تفاوت در نفوذپذیری کلیت‌های اصلی و فرعی در زغال‌سنگ‌های بلوکی بارزتر است. در زغال‌سنگ‌های دارای خاصیت خودسوزی که کلیت‌های اصلی و فرعی تقریباً دارای ویژگی‌های یکسانی هستند، لایه زغال‌سنگ از نظر نفوذپذیری رفتار ناهمسانگردی از خود نشان می‌دهد (Howard and Hartman, 1992).



شکل ۴-۶: الگوی زهکشی بیضوی در نتیجه تغییرات نفوذپذیری

۴-۴-۲- رگه‌های رس

احتمال این که رگه رس از بالا یا پایین به داخل لایه زغال‌سنگ نفوذ کند وجود دارد. با توجه به شکل ۴-۷ احتمال این که رگه به صورت قائم یا افقی یا با زاویه ۴۵ درجه نسبت به رگه زغال‌سنگ قرار گرفته باشد وجود دارد. این رگه ممکن است از جنس نرم یا سخت باشد و در صورت سخت بودن احتمال آسیب زدن آن به تجهیزات معدنکاری وجود دارد. به طور کلی ضخامت رگه‌های رس از ۲۵ میلی‌متر تا ۳/۴ متر و طول آن‌ها ممکن است به ۳۰۰ متر هم برسد. این رگه‌ها اغلب حاوی حجم زیادی از گاز تحت فشار زیاد هستند و با عبور سینه کار از مقابل این رگه‌های مقدار زیادی از گاز خارج می‌شود بنابراین احتمال انفجار با عبور سینه کار از مقابل رگه در روش جبهه کار طولانی و اتاق و پایه وجود دارد (Howard and Hartman, 1992). در عملیات متان زدایی باید از قبل برنامه‌ای برای گاز کشی از این لایه‌ها طراحی کرد.

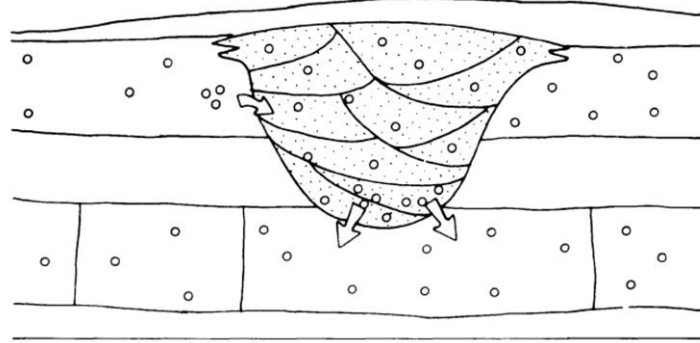


شکل ۴-۷: وجود رگه‌های رس در لایه زغال‌سنگ و جهت حرکت متان در داخل آن (James and Ulery, 2007)

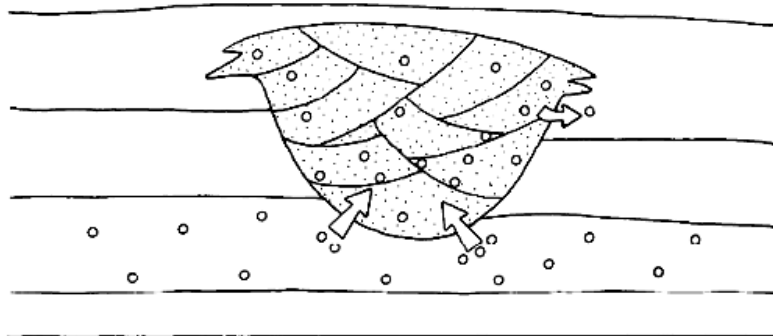
۴-۳-۴- کانال‌های ماسه‌سنگی

این کانال‌ها اغلب عدسی شکل یا سینوسی شکل هستند و ممکن است در داخل یا خارج لایه زغال‌سنگ واقع شده باشند. این کانال‌ها اغلب بر نفوذپذیری زغال‌سنگ اثر می‌کنند، از این‌رو ممکن است باعث کاهش ورود متان به داخل کلیت‌ها و یا گمانه‌های گاز کشی شوند و یا سبب افزایش نرخ ورود متان به داخل لایه شوند (شکل ۴-۸). بنابراین مطالعه رفتار دقیق این رگه‌های ماسه‌سنگی قبل از طراحی سیستم گاز کشی سبب بهینه‌سازی سیستم گاز کشی می‌شود. با طراحی صحیح گمانه‌ها در محل این عدسی‌های ماسه‌سنگی می‌توان مانع کاهش نفوذپذیری شد. با توجه به شکل ۴-۹ با انجام روش‌های پیش‌زهکشی و زهکشی همراه با معدنکاری می‌توان به متان زدایی از این رگه‌ها در صورتی که همانند مانعی در برابر زهکشی عمل کنند (جهت حرکت متان به داخل این لایه‌ها باشد) اقدام کرد.

علاوه بر موارد بیان‌شده، جهت سیستم کلیت‌ها نسبت به گمانه زهکشی متان، گسل‌ها، چین‌خوردگی‌ها، زون‌های شکسته شده می‌تواند بر زهکشی متان از یک معدن تأثیر بگذارد (Howard and Hartman, 1992).



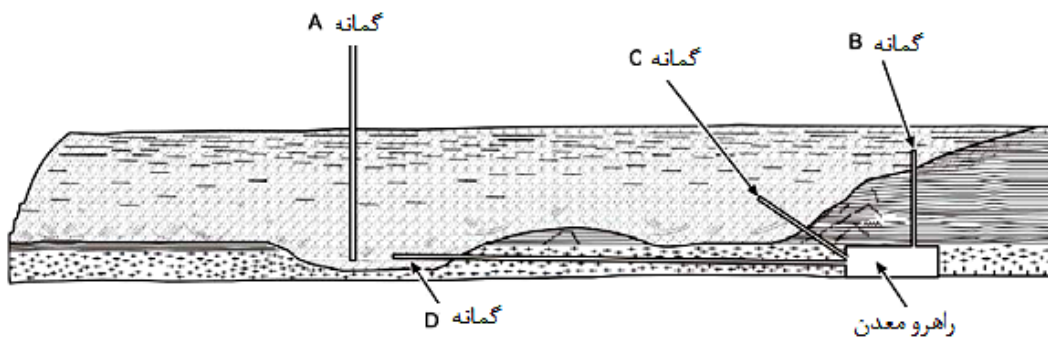
الف: اثر افزایشی بر تولید گاز متان



راهنما
 • متان
 ➔ جهت حرکت متان

الف: اثر کاهشی بر تولید گاز متان

شکل ۴-۸: کانال‌های ماسه‌سنگی و تأثیر آن‌ها بر حرکت متان (Howard and Hartman, 1992)



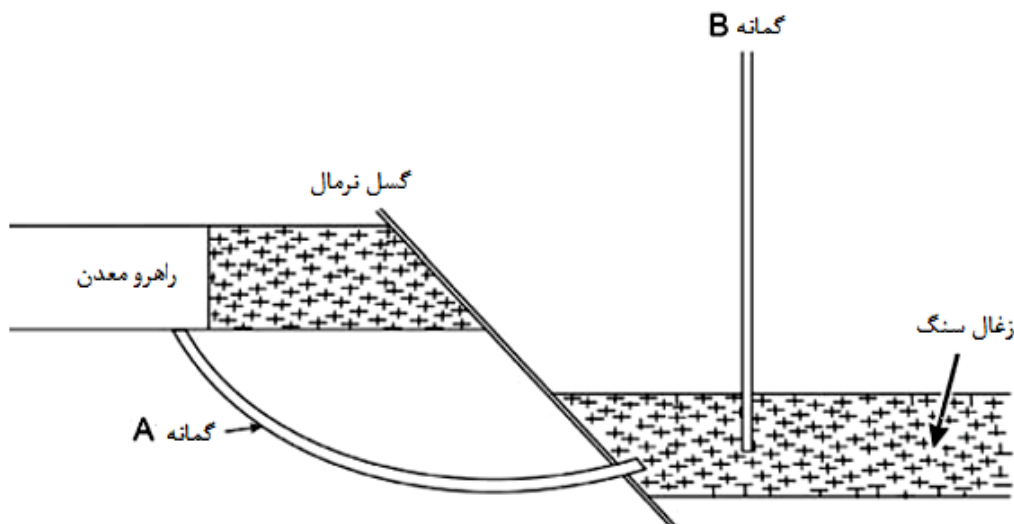
شکل ۴-۹: روش متان زدایی از کانال ماسه‌سنگی در صورتی که به صورت مانع عمل کند (James and Ulery, 2007)

۴-۴-۴- گسل

گسل‌های بزرگ به گسل‌هایی گفته می‌شود که بیش از ۵۰۰ متر طول داشته و سبب جابه‌جایی قائم ۱۰ تا ۲۰ متر شده باشند. این گسل‌ها ممکن است سبب انتشار تصاعد آبی گاز متان شده یا به عنوان سد نفوذناپذیر در مقابل گاز متان محسوب شوند. گسل‌های بزرگ ممکن است به عنوان کانالی برای عبور جریان

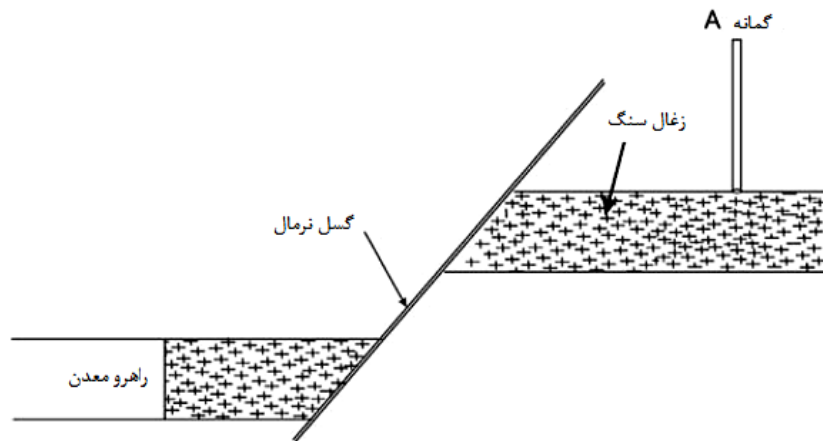
گاز از لایه‌های دربرگیرنده به داخل محیط معدنکاری یا برعکس عمل کنند. به طور کلی بهترین روش متان زدایی از لایه‌های گسل خورده، متان زدایی با استفاده از گمانه‌های قائم، جهت‌دار و متقاطع است (James and Ulery, 2007).

در هنگام باز کردن معدنی که بر روی لایه‌های گسل خورده احداث می‌شوند باید به حالات مختلف قرارگیری ورودی معدن نسبت به گسل و چگونگی انجام زهکشی گاز متان توجه ویژه‌ای شود. مطابق شکل ۴-۱۰، در صورتی که ورودی معدن در کمرباطین یک گسل نرمال قرار گرفته باشد این احتمال وجود دارد که گسل به عنوان یک کانال انتقال گاز عمل کرده و سبب انتقال گاز به لایه پایینی شود. در این شرایط، احتمال وقوع پدیده‌های ناگوار در معدنکاری لایه واقع در کمرباطی گسل وجود دارد از این‌رو بهترین روش برای زهکشی گاز متان، حفاری گمانه قائم (گمانه B) و حفاری جهت‌دار (گمانه A) است.



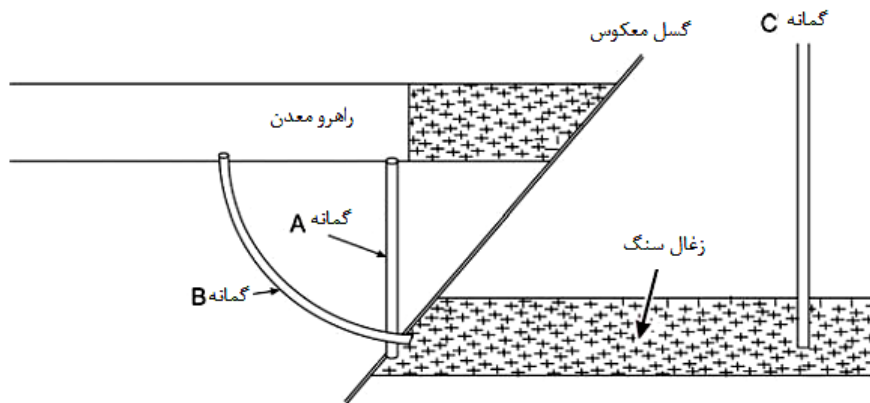
شکل ۴-۱۰: روش متان زدایی از کمرباطین گسل نرمال (James and Ulery, 2007)

در صورتی که مطابق شکل ۴-۱۱، ورودی معدن در کمرباطی یک گسل نرمال واقع شده باشد تنها راه‌حل ممکن جهت کاهش حادثه و عدم ورود گاز به داخل معدن، حفاری یک گمانه قائم (گمانه A) در کمرباطین گسل بر روی لایه زغال سنگ است.



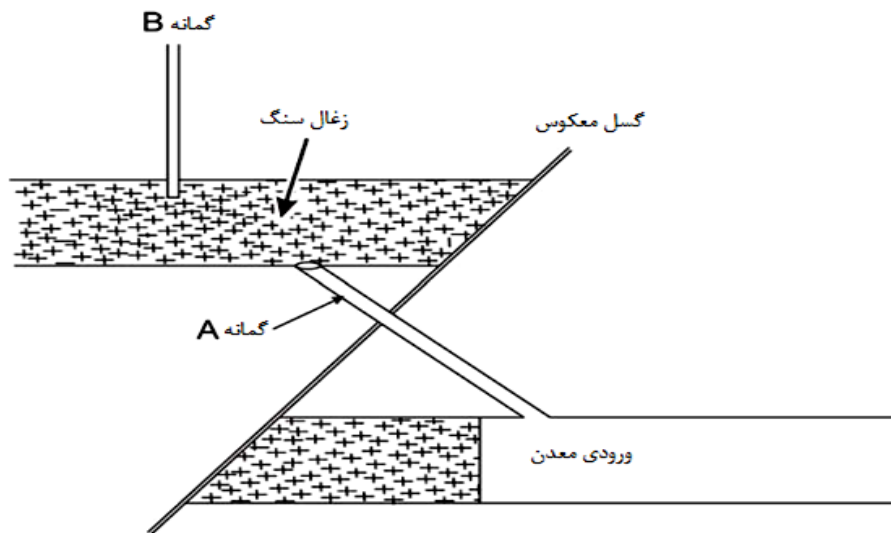
شکل ۴-۱۱: روش متان زدایی از کمربالای گسل نرمال (James and Ulery, 2007)

گسل‌های معکوس اغلب به‌عنوان یک مانع در مقابل جریان گاز عمل می‌کنند. شکل ۴-۱۲، یک ورودی معدنی را نشان می‌دهد که در کمربالای یک گسل معکوس واقع شده است. در اغلب موارد به‌خصوص گسل‌های بزرگ مقیاس گمانه قائم (گمانه C) از سطح زمین حفاری می‌شود. سایر روش‌ها برای گاز زدایی، حفاری یک گمانه قائم و گمانه جهت‌دار از داخل ورودی واقع در کمربالای گسل به داخل لایه واقع در کمرپایین گسل است.



شکل ۴-۱۲: روش متان زدایی از کمربالای گسل معکوس (James and Ulery, 2007)

شکل ۴-۱۳، ورودی معدنی را نشان می‌دهد که در کمرپایین یک گسل معکوس واقع شده است. استفاده از گمانه‌های متقاطع به سمت کمربالا و حفاری یک گمانه قائم بهترین روش متان زدایی به منظور کاهش خطر است.



شکل ۴-۱۳: روش متان زدایی از کمرپایین گسل معکوس (James and Ulery, 2007)

۴-۴-۵- ضخامت لایه زغال سنگ

با توجه به وجود ناخالصی‌ها درون لایه زغال سنگ، تعیین ضخامت لایه زغال سنگ، روش پیچیده‌ای است. تعیین ضخامت مؤثر لایه زغال سنگ با استفاده از لاگ‌های مقاومت ویژه^۱، آزمایش گمانه^۲، لاگ تولید^۳ و آزمایش ایزولاسیون مناطق^۴ انجام‌شدنی است (Aminian, 2005). هر چه ضخامت لایه زغال سنگ بیشتر باشد میزان گاز بیشتری قابل زهکشی است. در زهکشی با گمانه‌های قائم این امر اهمیت بیشتری دارد زیرا طولی از گمانه که در داخل لایه زغال سنگ قرار می‌گیرد بیشتر است و نیز در صورتی که زغال دارای نفوذپذیری کمتری باشد انجام آزمایش‌های شکافت هیدرولیکی و آتشیاری کنترل‌شده با موفقیت بیشتری همراه است.

۴-۴-۶- رتبه^۵ زغال سنگ (درجه زغال‌شدگی)

مقدار گاز در هر لایه زغالی به ظرفیت ذخیره^۱ ذاتی زغال سنگ و شرایط فیزیکی لایه زغال سنگ بستگی دارد. ظرفیت ذخیره زغال سنگ اصولاً تابع رتبه آن است و همچنین نمی‌تواند از حضور گمانه زهکشی متان تأثیر بپذیرد.

¹ Resistivity log

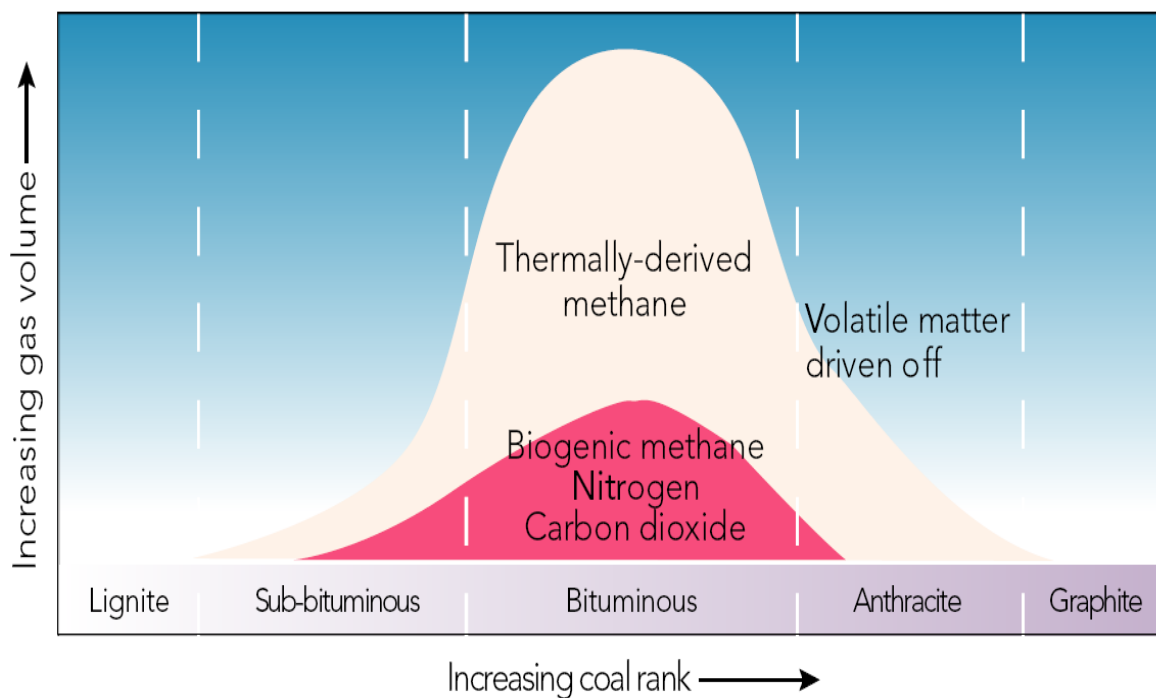
² Well test

³ Production log

⁴ Zonal isolation tests

⁵ Rank

با توجه به شکل‌های ۴-۱۴ و ۴-۱۵ رتبه زغال‌سنگ تأثیر زیادی بر میزان گاز محتوی لایه زغال‌سنگ دارد. رتبه‌های خاص زغال‌سنگ برای متان زدایی مناسب هستند. اکثر پروژه‌های متان زدایی، گاز متان را از زغال‌های بیتومینه^۲ تولید می‌کنند، اما تولید متان از زغال‌های آنتراسیت^۳ 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 کدام از ماسرال‌ها قادرند حجم‌های متفاوت متان را جذب کنند و با افزایش رتبه زغال‌سنگ، متان ذخیره شده در آن بیشتر می‌شود (www.slb.com , 2003).

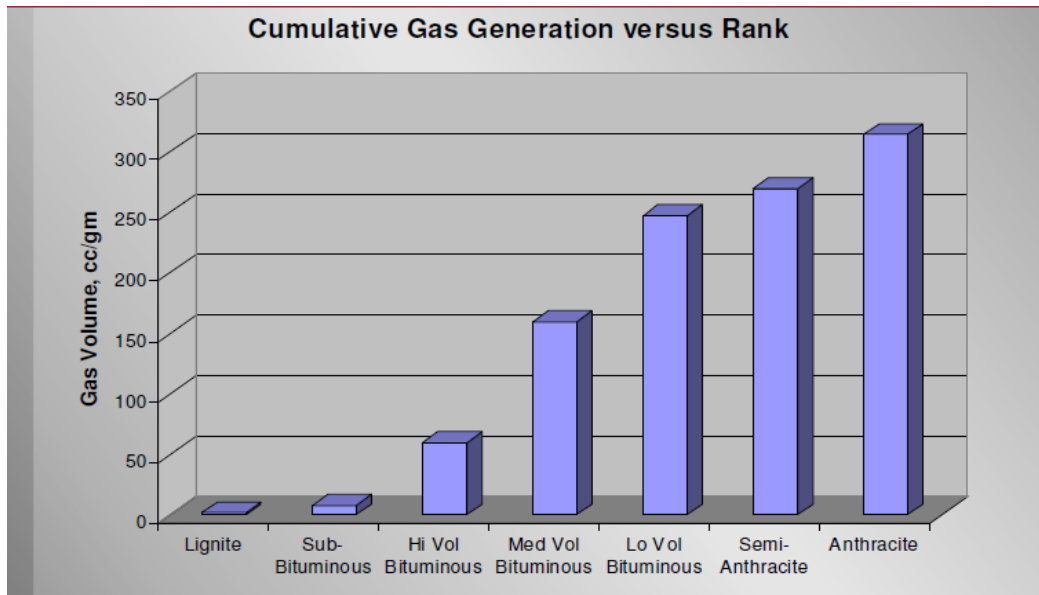


شکل ۴-۱۴: گاز محتوی زغال‌سنگ با توجه به رتبه آن (www.slb.com , 2003)

¹ Inherent storage capacity

² Bituminous

³ Anthracite



شکل ۴-۱۵: تأثیر رتبه زغال‌سنگ بر میزان گاز زهکشی (www.norweatcorp.com)

۴-۴-۷- نفوذپذیری

عبور جریان مایعات از داخل حفره‌ها یا سنگ‌ها را نفوذپذیری می‌نامند. مقدار نفوذپذیری به اندازه حفره‌ها، غلظت مایع و نیروی کششی که با کاهش اندازه دانه‌ها کم می‌شود، بستگی دارد. در واقع عواملی که بر تخلخل اولیه مؤثرند، در میزان نفوذپذیری نیز مؤثر می‌باشند. نفوذپذیری را معمولاً با واحد داریسی بیان می‌کنند. یک داریسی عبارت است از نفوذپذیری سیالی که در آن یک مایع با غلظت مشخص تحت فشار یک اتمسفر در یک سانتی‌متر طول عبور کند.

در پدیده‌هایی همچون انفجار گاز^۱ و گاززدایی، نفوذپذیری نقش بسیار مهمی در تخمین فشار، توزیع تنش‌های کششی و میزان گازخیزی دارد. نفوذپذیری یکی از خواص مواد است که به صورت جریان سیال در نتیجه گرادیان فشار وارد بر جسم در امتداد سطح آن تعریف می‌شود. معادله داریسی در محاسبه نفوذپذیری به صورت رابطه زیر است (Lama et al., 1996):

$$q = \frac{kA}{\mu} \cdot \frac{\Delta P}{\Delta x} \quad (۴-۱)$$

که در آن:

^۱ Out Burst

q: شدت جریان سیال عبوری از جسم (cc/sec)

k: ضریب نفوذپذیری داریسی

A: سطح مقطع جسم (cm^2)

μ : ضریب گرانروی دینامیکی سیال بر حسب سانتی داریسی

$\frac{\Delta P}{\Delta x}$: گرادیان فشار (Pa/cm)

معادله داریسی بر فرض جریان آرام در یک سیال تک‌فازی و تراکم ناپذیر استوار است. جریان گاز در زغال سنگ در جریان معدنکاری و زهکشی، در اولین مرحله، از متن زغال به خلل و فرج‌های آن ساطع شده و در نهایت از میان ریزترک‌های آن به گمانه زهکشی راه می‌یابد. تنش‌های ناشی از عملیات استخراجی، تأثیر مستقیمی بر نفوذپذیری زغال دارد.

نفوذپذیری به طور معمول به توانایی لایه زغالی در انتقال گاز تحت تأثیر فشار آن اطلاق می‌شود. نفوذپذیری به طور مستقیم به بافت زغال (مثل فاصله بین درزه‌ها و یا بازشدگی آن) بستگی دارد. علاوه بر این، نفوذپذیری به عوامل مهمی همچون تنش، فشار گاز، مقدار آب، اغتشاشات ناشی از حفاری و میزان تورم (یا نشست) ناشی از جذب (یا دفع) گاز بستگی دارد (Lama et al., 1996). استفاده از نمونه‌های زغال در شرایط محیط آزمایشگاه نشان داده است که مقادیر نفوذپذیری در آزمایشگاه با مقادیر نفوذپذیری برجا مطابقت ندارد. آزمون‌های انجام شده توسط گری^۱ در سال ۱۹۸۲ نشان داده است که، نفوذپذیری نمونه‌های زغالی در محیط آزمایشگاه کم‌تر از ۵ میلی‌داریسی است. این در حالی است که آزمون‌های برجا مقادیر حدود ۲۰۰ میلی‌داریسی را ارائه داده است. این عامل به شدت بر پروفیل گازخیزی و عملکرد لایه‌های گازدار در حین استخراج گاز تأثیر می‌گذارد. علاوه بر این، نفوذپذیری یکی از فاکتورهای مهم در کنترل مقدار گازخیزی از لایه‌های زغالی است.

^۱ Gray

پاچینگ^۱ در سال ۱۹۶۵، با مطالعه نفوذپذیری زغال تحت تنش‌های تک‌محوره و سه محوره، نشان داد که همزمان با اعمال تنش، به دلیل بسته شدن ترک‌ها، درزه‌ها و ریز خلل و فرج‌ها، زغال متراکم می‌شود و نفوذپذیری آن کاهش می‌یابد. رابطه (۲-۷)، مدل تراکم‌پذیری که توسط والش^۲ در سال ۱۹۸۱ ارائه شده است به شرح زیر است (Lama et al., 1996):

$$k^{1/3} = A.e^{B.P_e} \quad (۲-۴)$$

که در آن:

A: نفوذپذیری تحت تنش

B: تراکم‌پذیری

P_e: فشار مؤثر

علاوه بر این، مطالعات نشان داده است که لگاریتم نفوذپذیری در ارتباط خطی با تنش مؤثر قرار دارد. ارتباط بین نفوذپذیری (k) با تخلخل (Φ) به صورت زیر است.

$$\frac{k_i}{k_0} = \left(\frac{\Phi_i}{\Phi_0} \right)^n \quad (۳-۴)$$

در این رابطه، n، ضریب ثابتی است که بین ۲ و ۳ تغییر می‌کند.

جریان گاز در زغال بسیار پیچیده است. به طوری که، خلل و فرج‌های موجود در نمونه‌های زغال محدوده گسترده‌ای از شکل و اندازه دارند و در ریزترک‌های در محدوده انگستروم و در اندازه‌های نزدیک به مولکول‌های گاز هستند. انتظار می‌رود که ابعاد بسیار کوچک با وجود ظرفیت جذب سطحی بالا، نفوذپذیری بسیار پایینی داشته باشند، اما اغلب این چنین نیست. انرژی جنبشی (مستقل از مسیر) موجب حرکت مولکول‌های گاز از دیواره‌های متخلخل می‌شود که این پدیده "اثر شیب کلینکنبرگ"^۳ نام دارد و عامل مهم در افزایش آهنگ جریان سیال است.

^۱ Patching

^۲ Walsh

^۳ Klinkenberg Slip Effect

علاوه بر تخلخل، اندازه خلل و فرج‌ها، تنش، سیستم درزه‌ها و نوع و فشار گاز بر نفوذپذیری زغال‌سنگ (خصوصاً زغال‌سنگ) مؤثر است. تأثیر تنش بر نفوذپذیری سنگ و زغال به خوبی به اثبات رسیده است. مطالعات بر روی زغال‌سنگ‌های کانادا نشان داد که، نفوذپذیری زغال به شدت به تنش و ضریب شیب کلینکینبرگ بستگی دارد. علاوه بر این، تحقیقات پاچینگ در سال ۱۹۶۵ به کمک تحقیقاتی که گارهام و بوتام^۱ در سال ۱۹۵۸ انجام دادند نشان داد که، جریان گاز در زغال در میان درزه و ترک‌های آن جریان دارد در حالی که ماتریس زغال دارای نفوذپذیری بسیار بسیار پایین است (Lama et al., 1996).

پومری و رابینسون^۲، در سال ۱۹۶۷، از مکعبی با ابعاد ۵ سانتی‌متر تحت فشار ۲۵۰ اتمسفر در آزمون دو محوری استفاده کردند و مقدار نفوذپذیری موازی و عمود بر سطح را اندازه‌گیری کردند. نتایج بیانگر آن بود که با پیروی سیال از قانون دارسی، نفوذپذیری به شدت وابسته به فشار وارده و درزه‌های جسم است. علاوه بر این، آزمایش‌های دوبوس^۳ نشان داد که، با اعمال روبراه‌های مختلف، مقدار نفوذپذیری آب تقریباً نصف نفوذپذیری هوا است. همچنین با اعمال فشار ناشی از روبراه‌های بیشتر، نفوذپذیری آب و گاز تا ۱۵ برابر کاهش می‌یابد. این آزمایش‌ها نشان دادند که تأثیر فشار روبراه بر نفوذپذیری زغال‌سنگ بسیار چشمگیرتر از تأثیر آن بر نفوذپذیری سنگ‌های مشابه است. دوبوس در سال ۱۹۷۶ نشان داد که با حضور گاز هلیوم، مقدار تخلخل محاسبه شده پس از یک ماه در حدود ۵ تا ۶ برابر تخلخل محاسبه شده در همان جسم اشباع از آب است.

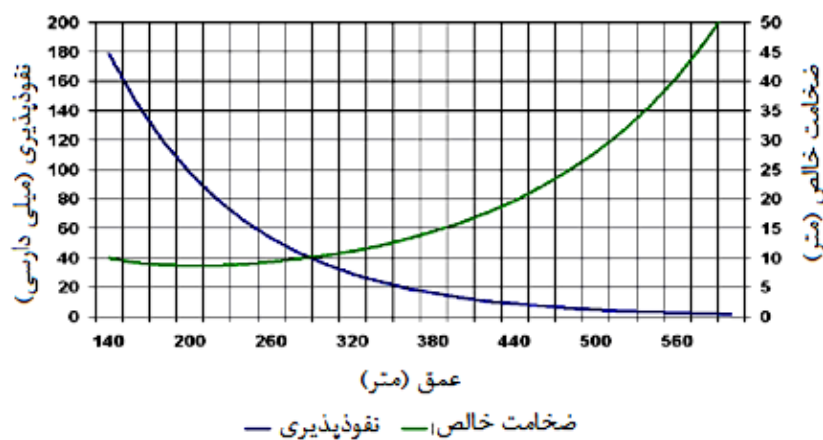
با توجه به تحقیقات انجام‌شده بر روی پروژه‌های مختلف متان زدایی در اکثر نقاط دنیا، این نتیجه حاصل شده است که میزان نفوذپذیری مناسب برای فرایند گاز کشی ۳۰ تا ۵۰ میلی داریسی است. امروزه با ورود تکنولوژی‌ها جدید قادرند از زغال‌های با نفوذپذیری کم فرایند متان زدایی را انجام دهند. تحقیقات انجام‌شده نشان می‌دهد کمترین میزان نفوذپذیری لازم برای عمل گاز کشی ۱ میلی داریسی است (توکلی و سرشکی، ۱۳۸۵).

¹ Garham & Botham

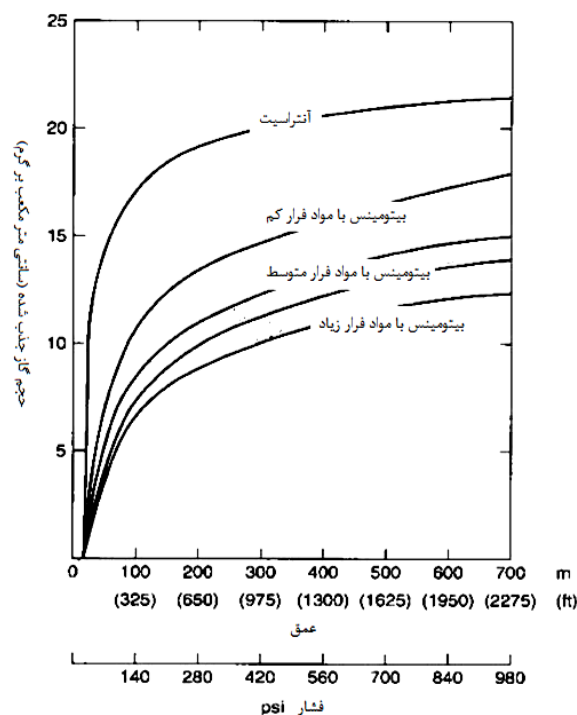
² Pomery & Robinson

³ Dobbous

با افزایش عمق، فشار وارد بر لایه زغال سنگ افزایش می‌یابد. این امر باعث می‌شود که ظرفیت جذب زغال سنگ افزایش یابد. ظرفیت جذب در زغال‌های با کیفیت‌تر برای یک عمق مشخص، بالاتر است. افزایش عمق از سویی دیگر باعث می‌شود که شبکه کلیت‌ها و شکستگی‌ها به یکدیگر بچسبند و نفوذپذیری لایه زغال سنگ کاهش یابد. ارتباط بین نفوذپذیری با عمق و ضخامت لایه در شکل ۴-۱۶ و نیز ارتباط ظرفیت جذب با نوع زغال سنگ و عمق (فشار) در شکل ۴-۱۷ نشان داده شده است.



شکل ۴-۱۶: ارتباط بین نفوذپذیری با عمق (www.norwestcorp.com, 2009)

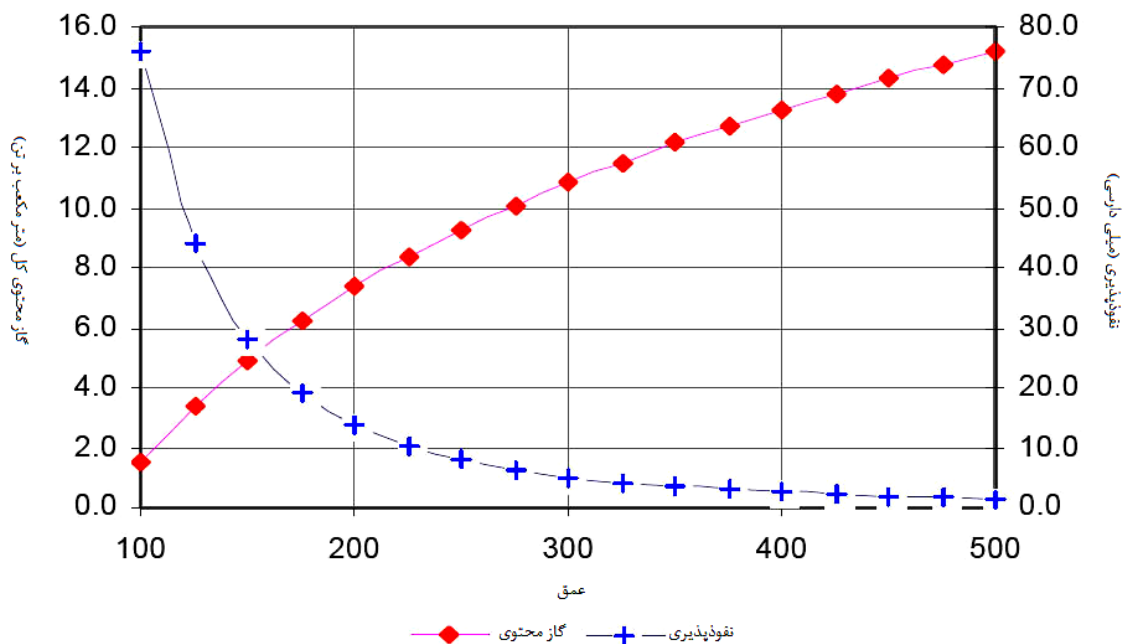


شکل ۴-۱۷: ارتباط حجم گاز ذخیره‌شده در لایه زغال سنگ نسبت به نوع زغال سنگ و عمق قرارگیری لایه (Esterle, 2005)

۴-۴-۹- گاز محتوی

گاز محتوی برابر است با میزان گاز بر واحد وزن زغال‌سنگ یا سنگ که واحد آن معمولاً برحسب فوت مکعب استاندارد بر تن است. گاز محتوی یک پارامتر کلیدی است که باید مستقیماً از روی نمونه‌های مغزه تهیه‌شده محاسبه شود. میزان گاز جذب‌شده در زغال‌سنگ به طور مستقیم یا غیرمستقیم قابل اندازه‌گیری است (Aminian, 2005). به‌منظور تعیین میزان گاز محتوی از آزمایش مخزن تراوش گاز استفاده می‌شود در این روش یک نمونه مغزه تازه در داخل مخزن قرار داده می‌شود و به‌منظور کم کردن تأثیر حرارت بر روی جذب سطحی، آزمایش باید در مخزن آب انجام شود. برای محاسبه دقیق گاز محتوی باید میزان گاز از دست‌رفته در حین آزمایش مشخص شود تا بتوان بر اساس آن میزان دقیق گاز محتوی را مشخص کرد. از آنجا که ترکیب گاز در طول یک ذخیره زغالی ثابت نیست گاز محتوی آن نیز ثابت نیست. به‌منظور دستیابی به یک تخمین قابل‌اعتماد از میزان گاز محتوی، نمونه‌های مختلفی از ذخیره با ترکیبات مختلف گاز باید بررسی شود.

گاز محتوی لایه زغالی با افزایش عمق، افزایش و نفوذپذیری آن کاهش می‌یابد. با توجه به شکل ۴-۱۸، واضح است که عمق بهینه‌ای برای استخراج وجود دارد.



شکل ۴-۱۸: رابطه بین نفوذپذیری و گاز محتوی نسبت به عمق (Esterle, 2005)

۴-۴-۱۰- حجم ذخیره

تعیین میزان ذخیره معمولاً برحسب فاصله گمانه‌ها انجام می‌شود. از این رو می‌توان با مدل‌سازی عددی سه‌بعدی ذخیره و با توجه به تغییرات ساختاری و زمین‌شناسی موقعیت و شکل صحیح قرارگیری ذخیره را در عمق زمین مشخص کرد. داده‌های سه‌بعدی لرزه‌ای نیز می‌تواند کمک زیادی به مشخص کردن شکل هندسی ذخیره نمایند.

۴-۵- اطلاعات اولیه لازم در پروژه متان زدایی

جمع‌آوری اطلاعات مورد نیاز در پروژه CBM، اولین مرحله در ارزیابی یک پروژه متان زدایی است. در جدول ۴-۱ روش کسب اطلاعات پارامترهای مورد نیاز و در جدول ۴-۲ معیارهای زمین‌شناسی مورد انتظار در یک پروژه متان زدایی بیان شده است (Aminian, 2005). عمق و ضخامت واحدهای زغالی باید برای تعیین میزان همبستگی چینه‌شناسی، تهیه نقشه‌های تکمیلی و طراحی مدل و شبیه‌سازی آن بررسی شوند. دقیق‌ترین اطلاعات از مغزه‌های حفاری به دست می‌آید که وقت‌گیر و پرهزینه است. پیمایش^۱ ژئوفیزیکی ارزان‌تر است و می‌تواند برای نواحی زغالی با ضخامت کمتر از ۰/۳ متر بکار رود. ارتباط بین پارامترهای زمین‌شناسی و سایر پارامترهای اقتصادی (قیمت گاز، انگیزه‌های مالیاتی، مجاورت در کنار خطوط لوله و سایر ساختارهای زیرسطحی) نقش کلیدی در طراحی یک پروژه CBM ایفا می‌نماید. در شکل ۴-۱۹ ارتباط بین عوامل زمین‌شناسی و نیز قابلیت تولید گاز از زغال‌سنگ در پروژه CBM نشان داده شده است.

^۱ Logging

جدول ۴-۱: اطلاعات منابع و داده‌های مورد نیاز برای ذخایر CBM

مشخصات	روش کسب اطلاعات
ظرفیت ذخیره‌سازی	آنالیز مغزه
گاز محتوی	آنالیز مغزه
ضریب پخش	آنالیز مغزه
قابلیت تراکم خلل و فرج	آنالیز مغزه
ضخامت ناخالصی‌ها	لاگ گمانه
ضخامت مؤثر	لاگ گمانه
فشار	آزمایش‌های گمانه
نفوذپذیری مطلق	آزمایش‌های گمانه
نفوذپذیری نسبی	شبیه‌سازی
تخلخل	شبیه‌سازی
خواص سیال	ترکیب و همبستگی
ترکیب گاز	میزان گاز جذب شده و تولید شده
ظرفیت گاز کشی	مطالعات زمین‌شناسی

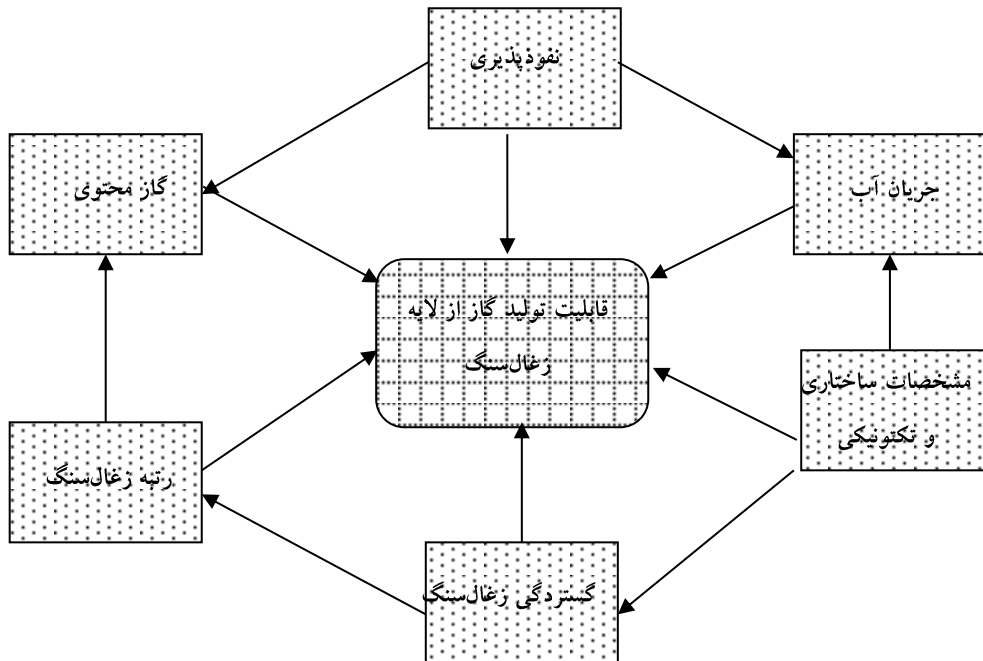
جدول ۴-۲: معیارهای زمین‌شناسی مورد انتظار در اجرای CBM (Robert, 2002)

پارامترهای زمین‌شناسی	مشخصات مناسب
ضخامت لایه	لایه ضخیم
عمق	زغال سنگ‌های کم‌عمق
یکنواختی	زغال سنگ یکنواخت
محدوده گستردگی زغال سنگ	محدوده وسیع
خصوصیات کف و سقف لایه	رسوبات خوب دانه‌بندی شده در سقف و کف بلا واسطه
گاز محتوی	گاز محتوی بالا
ترکیب گاز	متان بالا
نفوذپذیری	نفوذپذیری بالا
آب‌شناسی	سهولت آب‌کشی

جدول ۴-۳: تأثیر پارامترهای زمین‌شناسی بر میزان زهکشی گاز در دو حوضه زغالی مختلف در آمریکا

(Robert, 2002)

حوضه زغالی		خصوصیات
PRB	سن خوان	
۰/۵ تا ۲/۲۸۶	۰/۲۵ تا ۱ متر	ضخامت لایه زغال سنگ
-	۳۸ تا ۷۶ متر	عمق
کمتر از ۸۰ فوت مکعب بر تن	بین ۱۰۰ تا ۸۰۰ فوت مکعب بر تن	گاز محتوی
۱۰۰۰ میلی داریسی	بین ۵ تا ۳۰ میلی داریسی	نفوذپذیری



شکل ۴-۱۹: ارتباط پارامترهای تأثیرگذار بر تولید گاز از لایه زغال سنگ

۴-۶- طبقه‌بندی لایه‌های زغال سنگ از دیدگاه قابلیت گاز کشی

از دیدگاه قابلیت گاز کشی، لایه‌های زغال سنگ در ۳ دسته طبقه‌بندی می‌شوند که عبارت است از (Wang and Xue, 2008):

۱- قابلیت بالا

۲- قابلیت متوسط

۳- قابلیت پائین

این طبقه‌بندی با توجه به نفوذپذیری در جدول ۴-۴ نشان داده شده است.

جدول ۴-۴: طبقه‌بندی لایه‌های زغال سنگ از دیدگاه قابلیت گاز کشی (Wang and Xue, 2008)

رده	ضریب کاهش نرخ گاز کشی در گمانه‌ای به طول ۱۰۰ متر	نفوذپذیری ($m^2MPa^{-2}d^{-1}$)
قابلیت بالا	کمتر از ۰/۰۰۵	بیشتر از ۱۰
قابلیت متوسط	۰/۰۰۵ تا ۰/۰۰۵	بین ۱۰ تا ۰/۱
قابلیت پائین	بیشتر از ۰/۰۰۵	کمتر از ۰/۱

(برابر با ۲۵ میلی داری است).

۴-۷- نتیجه‌گیری

در این قسمت به بررسی تأثیر پارامترهای زمین‌شناسی بر روی یک پروژه CBM پرداخته شد. با توجه به نتایج حاصل‌شده در این فصل مهم‌ترین پارامترهایی که در یک پروژه CBM باید مدنظر قرار گیرند نفوذپذیری و میزان گاز محتوی است هرچند که سایر پارامترها نقش مهمی ایفا می‌کنند. به‌هرحال با توجه به شکل ۴-۱۹ بیشتر از این که یک پارامتر نقش کلیدی ایفا کند ارتباط بین پارامترها نقش مهم‌تری را ایفا می‌کنند.

فصل پنجم

امکان سنجی انجام عملیات گاززدایی در معادن

زغال سنگ البرز شرقی

با توجه به پتانسیل بالای سوخت‌های فسیلی و اهمیت بارز آن‌ها در تأمین انرژی مورد نیاز بخش صنعت، ضرورت بهره‌برداری بهینه از این منابع محرز است. یکی از منابع انرژی که در حال حاضر بیشترین تأثیرهای زیست‌محیطی را دارد، زغال‌سنگ است. با گسترش و توسعه معادن زغال‌سنگ، مسائل و مشکلات استخراج آن افزایش یافته و در عین حال باید نهایت تلاش به عمل آید تا با استفاده از دانش فنی و تکنولوژی نوین و سایر امکانات موجود، این آثار مخرب را به حداقل رسانید. زغال‌سنگ یکی از منابع مهم انتشار گازهای گلخانه‌ای مثل متان و دی‌اکسید کربن است.

انفجار متان از خطرات بالقوه در معادن زغال‌سنگ است که هر ساله تلفات جانی زیادی در معادن زغال‌سنگ سراسر دنیا به همراه دارد. با توجه به حجم بالای گاز آزاد شده در بعضی از لایه‌های زغال‌سنگ، تهویه معدن در مورد چنین لایه‌هایی به تنهایی نمی‌تواند محیطی ایمن برای استخراج زغال‌سنگ ایجاد کند، بنابراین گاززدایی قبل از استخراج، حین استخراج و یا پس از استخراج لازم به نظر می‌رسد.

برای گاززدایی بهینه ابتدا باید سیستم‌های گاززدایی بررسی و سیستم مناسب انتخاب شود. در معادن دنیا از هر سه روش برای گاززدایی استفاده می‌شود که در اکثر معادن معمولاً ابتدا با استفاده از روش گاززدایی قبل از استخراج، عمل گاززدایی متان از زغال‌سنگ انجام و برای کاهش گاز باقیمانده از سیستم‌های گاززدایی حین استخراج استفاده می‌شود.

تاکنون مطالعات بسیار زیادی در مورد پارامترهای مؤثر بر قابلیت گاز کشی زغال‌سنگ انجام شده است. به طور کلی در کلیه مطالعات پیشین، چنان چه در فصل سوم و چهارم مورد بحث قرار گرفت، اندرکنش بین پارامترهای مختلف بر فرآیند گاز کشی و نتیجه مطالعات تأثیرگذار است که تاکنون به این مسأله توجه‌ای نشده است و روش کامل و جامعی که شامل کلیه پارامترهای مؤثر در قابلیت گاز کشی زغال‌سنگ باشد ارائه نشده است.

در این تحقیق با شناسایی و جمع‌آوری پارامترهای تأثیرگذار، تلاش شده است تا این پارامترها در یک سیستم طبقه‌بندی جامع به صورت یک روش بهینه برای ارزیابی قابلیت گاز کشی زغال سنگ پیشنهاد شود و معادنی که در این تحقیق استفاده شده است برای اولویت‌بندی گاز کشی در نظر گرفته شود.

مهم‌ترین مرحله در ارائه سیستم طبقه‌بندی و ارزیابی جامع با تعداد مشخصی پارامتر، تعیین وزن هر پارامتر بر پدیده اصلی است. از آنجایی که کلیه سیستم‌های طبقه‌بندی مهندسی، همواره بر اساس تعدادی پارامتر مرکب و در ارتباط با هم ارائه می‌شوند، تأثیر توأم هر یک از پارامترها، ارزیابی پدیده نهایی را دشوار می‌سازد؛ لذا تعیین وزن هر پارامتر، همواره دغدغه اصلی در ارائه سیستم‌های طبقه‌بندی مهندسی بوده است. روش‌های مختلفی برای وزن‌دهی پارامترهای مختلف مؤثر در پدیده‌های گوناگون ارائه شده است. از جمله مشهورترین آن‌ها می‌توان به روش تجربی- مقایسه‌ای، روش سیستم‌های مهندسی سنگ (RES¹) و روش‌های تصمیم‌گیری چند معیاره (MCDM²) اشاره کرد.

در روش سیستم‌های مهندسی سنگ کلیه پارامترهای مؤثر در یک پدیده، در یک ماتریس اندرکنش به صورت کلی آورده می‌شوند. سپس هر یک از سلول‌های ماتریس فوق با توجه به تجربیات افراد محقق به ازای اهمیت نسبی یک پارامتر نسبت به کل پدیده با یک امتیاز مخصوص پر می‌شوند. با انجام محاسبات ریاضی مربوطه، یک نمودار اثر- تأثیر بین پارامترها رسم می‌شود. با استفاده از این نمودار، مؤثرترین، کم‌تأثیرترین، غالب‌ترین، و مغلوب‌ترین پارامتر یک پدیده مشخص می‌شود. پس از این مرحله و پس از تعیین اهمیت نسبی پارامترها وزن پیشنهادی به هر پارامتر اختصاص می‌یابد (تقی پور و رخشنده، ۱۳۸۲).

در این تحقیق از روش سیستم‌های مهندسی سنگ برای اولویت‌بندی گاز کشی معادن زغال سنگ مورد مطالعه استفاده شده است و پس از آن با استفاده از روش تصمیم‌گیری تحلیل سلسله مراتبی فازی به انتخاب روش گاز کشی مناسب در معدنی که دارای بالاترین قابلیت گاز کشی است پرداخته شده است.

¹ - Rock Engineering Systems

² - Multi Criteria Decision Making

۵-۲- تعیین پارامترهای مؤثر

انتخاب پارامترهای مهم و ترکیب این پارامترها در کنار هم یکی از مهم‌ترین مراحل به شمار می‌رود. در سیستم‌های طبقه‌بندی همواره سعی می‌شود با کمترین تعداد پارامترها بهترین قضاوت صورت گیرد؛ لذا در این تلاش از ۹ پارامتر مهم که در فصل چهارم به آن‌ها اشاره شد استفاده شده است که این پارامترها عبارتند از:

P_1 : نفوذپذیری

P_2 : جریان آب

P_3 : ناپیوستگی‌ها

P_4 : گستردگی زغال‌سنگ

P_5 : نوع زغال‌سنگ

P_6 : گاز محتوی

P_7 : عمق قرارگیری

P_8 : میزان ذخیره

P_9 : ضخامت لایه زغال‌سنگ

در ادامه، مراحل مختلف روش سیستم‌های مهندسی سنگ و سپس سیستم طبقه‌بندی برای اولویت‌بندی منطق مستعد گاز کشی در مناطق زغال‌سنگ البرز شرقی ارائه شده است.

۵-۳- روش سیستم‌های مهندسی سنگ (RES)

با پیچیده‌تر شدن مسائل مهندسی و کاربردهای گوناگون، با نگاهی واقع‌بینانه به موضوع درمی‌یابیم که روش‌های مرسوم عددی، تجربی و تحلیلی قادر به در نظر گرفتن کلیه عوامل تأثیرگذار بر یک مسأله خاص نبوده و همواره از بسیاری از ساده‌سازی‌ها در آن‌ها استفاده می‌شود و در نتیجه با محدودیت‌های بی‌شماری در مواجهه با مسائل گوناگون روبرو هستند (خالوکاکائی و زارع نقدهی، ۱۳۸۸).

در هنگام طراحی یک ساختار در یک مسأله، لازم است که علاوه بر در نظر گرفتن تک تک فاکتورها، نحوه تأثیر متقابل این عوامل بر روی یکدیگر نیز در نظر گرفته شود. به عنوان یک روش سیستمی جهت مواجهه با تمام اندرکنش‌ها، می‌توان آن‌ها را در یک ماتریس قرار داد. این کار به عنوان ابزاری پایه‌ای به وسیله رویکرد سیستم‌های مهندسی سنگ (RES) مورد استفاده قرار می‌گیرد (Hudson, 1992; Hudson & Harrison, 1992).

هادسون (Hudson) در سال ۱۹۹۲ میلادی، رویکرد جدیدی با نام سیستم‌های مهندسی سنگ RES (Rock Engineering Systems) ارائه نمود. این رویکرد با در نظر گرفتن مسأله به صورت یک سیستم واقعی و با استفاده از ویژگی‌ها و تفکر سیستمی، امروزه به عنوان راه حلی جدید برای مسائل پیچیده مهندسی به شمار می‌رود (خالوکائی و زارع نقدهی، ۱۳۸۸). رویکرد مذکور تاکنون در بسیاری از علوم مهندسی نظیر محیط‌زیست و شناخت گستره آلودگی‌ها، مهندسی عمران، مهندسی معدن، آتشیاری و ناپایداری شیب‌های سنگی و غیره به کار رفته است (Frough & Torabi, 2013).

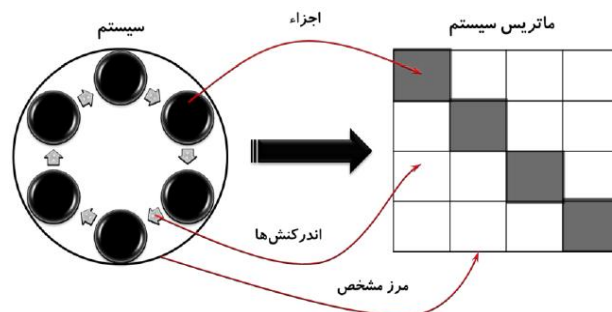
۵-۳-۱- مفهوم سیستم و تفکر سیستمی

درباره سیستم تعاریف گوناگونی وجود دارد، از نظر Bertalanffy سیستم‌ها عبارتند از تعدادی عنصر که با یکدیگر ارتباط دارند. برخی سیستم را مجموعه‌ای از اجزا به هم پیوسته می‌دانند که بین آن‌ها ارتباطی منظم وجود دارد، از یکدیگر تأثیر می‌پذیرند، بر هم اثر می‌گذارند، به صورت کل عمل می‌کنند و هدف‌دار هستند. کلیت که از ویژگی‌های هر سیستم است از سلسله مراتب تبعیت می‌کند، به طوری که هر سیستم در درون سیستم دیگر عمل می‌کند و به یکدیگر بستگی دارند. در واقع سیستم در سیستم کار می‌کند و تمام سیستم‌ها در درون یکدیگر و به صورت کل وجود دارند و سیستم به مرتبه پایین‌تر از خود عمل می‌کند (Bertalanffy, 1968).

Allenby سیستم را به صورت، گروهی از بخش‌ها و اعضای مستقل و دارای اندرکنش بر روی همدیگر تعریف می‌کند که این اثرات باعث تغییر در انرژی، ماده و یا اطلاعات می‌شوند. طبق نظر وی، همیشه کل یک سیستم از جمع تک تک اعضای آن بزرگ‌تر است (Allenby, 1999).

طبق نظر Jiao و Hudson استفاده از رویکرد سیستمی زمانی بسیار ضروری است که با مسائلی روبرو هستیم که از پیچیدگی زیادی برخوردارند، آن چنان که روش‌های مرسوم به تنهایی و به سادگی قادر به حل آن‌ها نمی‌باشند (Jiao & Hudson, 1995).

بدین ترتیب سیستم را می‌توان متشکل از اجزای مؤثر بر هم با یک مرز مشخص فرض کرد. سیستم‌ها در کاربردهای مختلف معمولاً به صورت ماتریس‌هایی با نام «ماتریس سیستم» نشان داده می‌شوند. این ماتریس‌ها تمام خصوصیات یک سیستم اعم از اجزاء، اندرکنش‌ها و مرز مشخص را دارا هستند (Hill & Warfield, 1972) این مفهوم در شکل ۵-۱ نشان داده شده است.

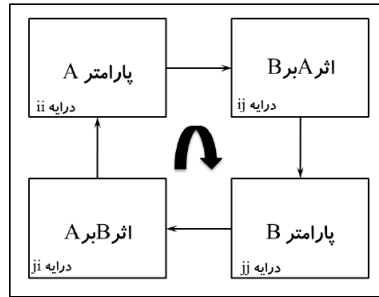


شکل ۵-۱: مفهوم ساختار رویکرد سیستم‌ها (Hill & Warfield, 1972)

۵-۳-۲- ماتریس‌های اندرکنش

در سیستم‌های مهندسی سنگ، شناسایی پارامترهای بحرانی، مسیرهای تأثیرگذار، حلقه‌های برگشتی و ارزیابی تکنیک‌های انتخابی مهندسی مناسب، با استفاده از ماتریس اندرکنش صورت می‌گیرد. ماتریس اندرکنش یک ماتریس مربعی است که بر روی قطر اصلی آن پارامترهای اصلی مرتبط با مسأله مورد نظر لیست شده و عناصر غیر قطری آن اندرکنش‌ها و اثرات متقابل هر جفت از پارامترها را نشان می‌دهند (شکل ۵-۲).

همان‌طور که در شکل ۵-۲ نشان داده شده است پارامتر A در درایه بالا سمت چپ و پارامتر B در درایه پایین سمت راست ماتریس قرار گرفته است. درایه بالا سمت راست نشان دهنده تأثیر A بر روی B و درایه پایین سمت چپ نشان دهنده تأثیر B بر روی A است (Hill & Warfield, 1972; Hudson, 1992).



شکل ۵-۲: مفهوم ماتریس اندرکنش در RES برای سیستمی شامل دو پارامتر A و B (Hudson, 1992)

۵-۳-۳- کدگذاری ماتریس‌های اندرکنش

در بخش قبل، ماتریس‌های اندرکنش به عنوان ابزاری قوی به منظور استفاده در رویکرد سیستم‌های مهندسی سنگ (RES) و نشان دادن مکانیزم‌های تأثیر عوامل اصلی بر یکدیگر معرفی شدند. این مکانیزم‌ها می‌توانند به صورت تحلیلی یا گرافیکی به خوبی نمایش داده شوند. با این حال، بایستی چگونگی کمی‌سازی اهمیت پارامترها در نظر گرفته شود. برای این منظور نیاز به روشی برای کدگذاری ماتریس اندرکنش است که از این طریق چگونگی تأثیر پارامترها بر روی یکدیگر به سبب فرآیندهای موجود به صورت عددی بیان شود.

طبق نظر هادسون که ارائه‌دهنده رویکرد RES در سال ۱۹۹۲ میلادی بود، پنج روش مختلف جهت کدگذاری ماتریس اندرکنش وجود دارد. این روش‌ها عبارتند از:

۱- روش دوتایی^۱

۲- نیمه عددی خبره (ESQ^۲)

۳- شیب نمودار پارامترها

۴- تطبیقی از رویکرد سیستمی مستقیم

۵- روش صریح^۳

^۱ - Binary

^۲ - Expert Semi-Quantitative

^۳ - Explicit

۵-۳-۱- روش نیمه عددی خبره

از میان این روش‌ها، روش کدگذاری نیمه عددی خبره تا حدّ زیادی موفق بوده و تاکنون از بیشترین کاربرد برخوردار بوده است و به صورت اولیه در بسیاری از موارد پیشنهاد شده است و به همین دلیل نیز در این تحقیق از این روش استفاده شده است.

کدگذاری در این روش با توجه به اندرکنش بین هر جفت پارامتر انجام می‌شود و یکی از اعداد ۰، ۱، ۲، ۳ و ۴ انتخاب می‌شود. هر یک از این اعداد با در نظر گرفتن رابطه بین هر جفت پارامتر، بیانگر مفهوم و معنی ویژه‌ای است که در جدول ۵-۱ آورده شده است (Hudson, 1992).

جدول ۵-۱: کدهای انتخابی در روش کدگذاری نیمه کمی خبره (Hudson, 1992)

توضیح	کد
عدم وجود اندرکنش	۰
اندرکنش ضعیف	۱
اندرکنش متوسط	۲
اندرکنش قوی	۳
اندرکنش اثر بحرانی و شدید	۴

۵-۳-۴- نمودار علت-اثر

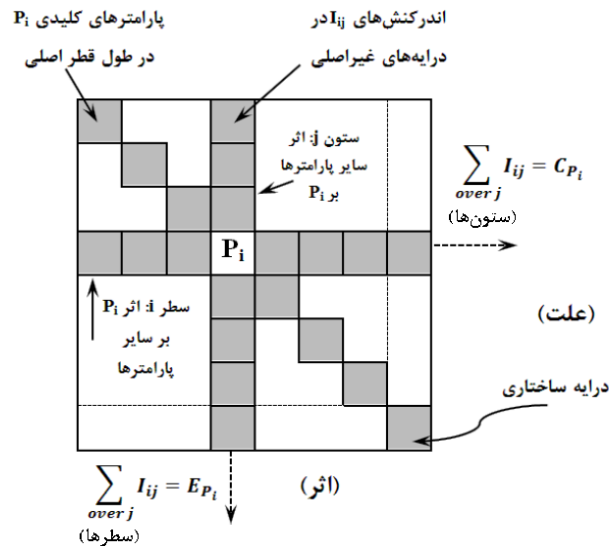
نمودار علت-اثر پارامترها که از تأثیر ماتریس اندرکنش به دست می‌آید امکان شناسایی پارامترهای غالب طراحی و شدت اندرکنش هر یک بر رفتار سیستم را نشان می‌دهد. در نمودار علت-اثر پارامترها، اثر یک پارامتر روی سیستم «اثر» و اثر سیستم روی پارامتر «تأثیر» نامیده می‌شود (Hudson, 1992).

با توجه به نحوه ساخته شدن ماتریس واضح است که هر سطر عبوری از یک درایه نشان‌دهنده تأثیر آن بر تمام پارامترهای موجود در سیستم است. برعکس، هر ستون عبوری از آن درایه نشان‌دهنده تأثیر پارامترهای دیگر سیستم بر روی آن است (Hudson, 1992).

بعد از کدگذاری ماتریس، می‌توان مجموع هر سطر و هر ستون را محاسبه کرد. مجموع مقادیر عددی هر سطر به نام «علت^۱» یا اثر Pi روی سیستم و مجموع مقادیر هر ستون به عنوان «تأثیر^۱» یا اثر سیستم روی

^۱ - Cause

پارامتر است. که در نهایت منجر به وجود آمدن محورهای C و E می‌شوند (شکل ۵-۳). بنابراین C نشان‌دهنده نحوه تأثیرات P_i بر روی سیستم است و E نشان‌دهنده تأثیری است که سیستم بر روی پارامتر P_i می‌گذارد (Hudson, 1992).

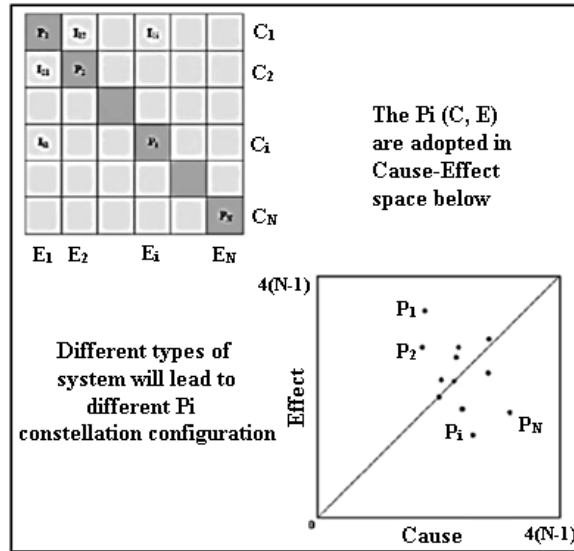


شکل ۵-۳: کدگذاری ماتریس اندرکنش و شکل‌گیری محورهای علت و اثر در ماتریس اندرکنش (Hudson, 1992)

پس از کدگذاری ماتریس، مقادیر علت و اثر تمام پارامترها محاسبه و بر روی نمودار علت-اثر رسم می‌شوند. موقعیت هر نقطه در فضای (C/E) وضعیت اندرکنش آن پارامتر را مشخص می‌کند. بدیهی است هرچه مقدار عددی حاصل جمع (C+E) پارامتر مورد نظر بیشتر باشد، شدت اندرکنش آن با کل سیستم بیشتر بوده و هرچه مقدار عددی تفاضلی (C-E) (با در نظر گرفتن علامت آن) پارامتر مورد نظر بیشتر باشد میزان غلبه پارامتر مذکور روی سیستم بیشتر است. مقدار منفی برای (C-E) نشان‌دهنده غلبه سیستم بر پارامتر مورد نظر است (Hudson, 1992).

مقادیر محورها برای هر پارامتر می‌تواند بر روی نمودار علت-اثر انتقال یابد. در شکل ۵-۴ نمودار (C/E) تعمیم داده شده به N پارامتر قابل مشاهده است. در این مورد پارامترها به صورت ابر مانند در فضای C و E درآمده و از سیستمی پیچیده حکایت دارند. توجه به موقعیت این نقاط که در واقع نماینده پارامترهای اصلی سیستم هستند، در توسعه و سودمندی نظریه سیستمی ارائه شده از اهمیت بسیاری برخوردار است (Hudson, 1992).

¹ - Effect



شکل ۵-۴: نمودار علت-اثر تعمیم داده شده به N پارامتر (Hudson, 1992)

در نهایت جهت به دست آوردن وزن هر پارامتر در سیستم از معادله (۵-۱) استفاده می‌شود (Mazzoccola & Hudson, 1996):

$$a_i = \frac{C_i + E_i}{\sum_{i=1}^n C_i + \sum_{i=1}^n E_i} \quad (5-1)$$

که در این رابطه:

i: تعداد پارامترهای اصلی

a_i : وزن پارامتر i ام

C_i : اثرگذاری پارامتر i ام

E_i : تأثیرپذیری پارامتر i ام

در نهایت نتیجه تشکیل ماتریس اندرکنش تشکیل جدولی می‌شود که حاوی مقادیر C، E، C+E، C-E و a_i برای هر پارامتر است که شمای کلی آن در جدول ۵-۲ نشان داده شده است.

جدول ۵-۲: شمای کلی از یک جدول حاصله از یک ماتریس اندرکنش

ai	C-E	C+E	E	C	پارامتر
a_1	C1- E1	C1+ E1	E1	C1	P1
a_2	C2- E2	C2+ E2	E2	C2	P2
.
a_n	Cn- En	Cn+ En	En	Cn	Pn

۵-۴- اولویت بندی پتانسیل بهره برداری از مناطق زغالی البرز شرقی با استفاده از روش

سیستم های مهندسی سنگ (RES)

به منظور درک چگونگی اثرات متقابل پارامترهای مؤثر در گاز کشی زغال سنگ، نیاز به یک مطالعه سیستمی است تا بتوان میزان اثر یک پارامتر در سایر پارامترها را تشریح نمود. بنابراین، ۹ پارامتر مهم انتخاب شده در بخش ۵-۲، در امتداد قطر اصلی یک ماتریس اندرکنش قرار می گیرند. ماتریس اندرکنش برای مسأله قابلیت گاز کشی، به روشی که در بخش ۵-۳-۳-۱ توضیح داده شد، کدگذاری شد که نتیجه آن در جدول ۵-۳ آورده شده است.

روش کدگذاری نیمه عددی خبره (ESQ) معروفترین روش کدگذاری است که دارای پنج کلاس از ۰ تا ۴ است. در این کلاس بندی، به ترتیب صفر برای عدم وجود اندرکنش، ۱ برای اندرکنش ضعیف، ۲ برای متوسط، ۳ برای قوی و ۴ برای اثر بحرانی و شدید در نظر گرفته می شود.

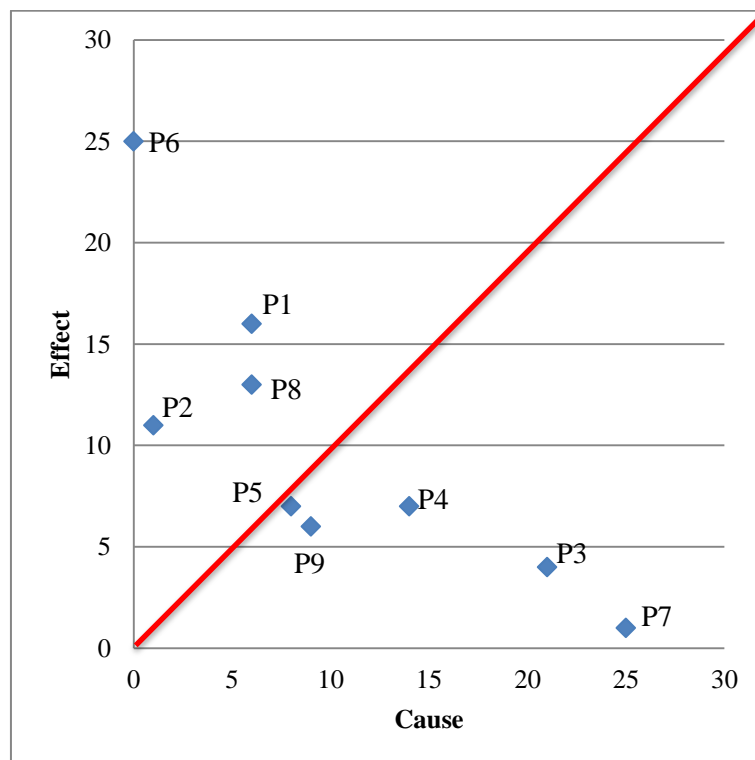
جدول ۵-۳: ماتریس اندرکنش کدگذاری شده

P ₁	۳	۰	۰	۰	۳	۰	۰	۰	۶	Cause
۱	P ₂	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱	
۳	۳	P ₃	۳	۲	۴	۰	۳	۳	۲۱	
۱	۲	۲	P ₄	۱	۳	۱	۴	۰	۱۴	
۴	۰	۰	۰	P ₅	۴	۰	۰	۰	۸	
۰	۰	۰	۰	۰	P ₆	۰	۰	۰	۰	
۴	۳	۲	۲	۴	۴	P ₇	۳	۳	۲۵	
۰	۰	۰	۲	۰	۴	۰	P ₈	۰	۶	
۳	۰	۰	۰	۰	۳	۰	۳	P ₉	۹	
۱۶	۱۱	۴	۷	۷	۲۵	۱	۱۳	۶		
Effect										

پس از کدگذاری ماتریس، علت C به صورت مجموع تمام کدهای سطر و اثر E به صورت مجموع تمام کدهای ستون برای هر پارامتر قابل محاسبه است. مقادیر علت و اثر هر پارامتر به روی محورهای x و y منتقل

شده و بنابراین نمودار علت-اثر را به وجود آورده‌اند (شکل ۵-۵). قطر این نمودار نشان‌دهنده مکان هندسی ($C=E$) است و در طول این قطر، مجموع $C+E$ افزایش می‌یابد.

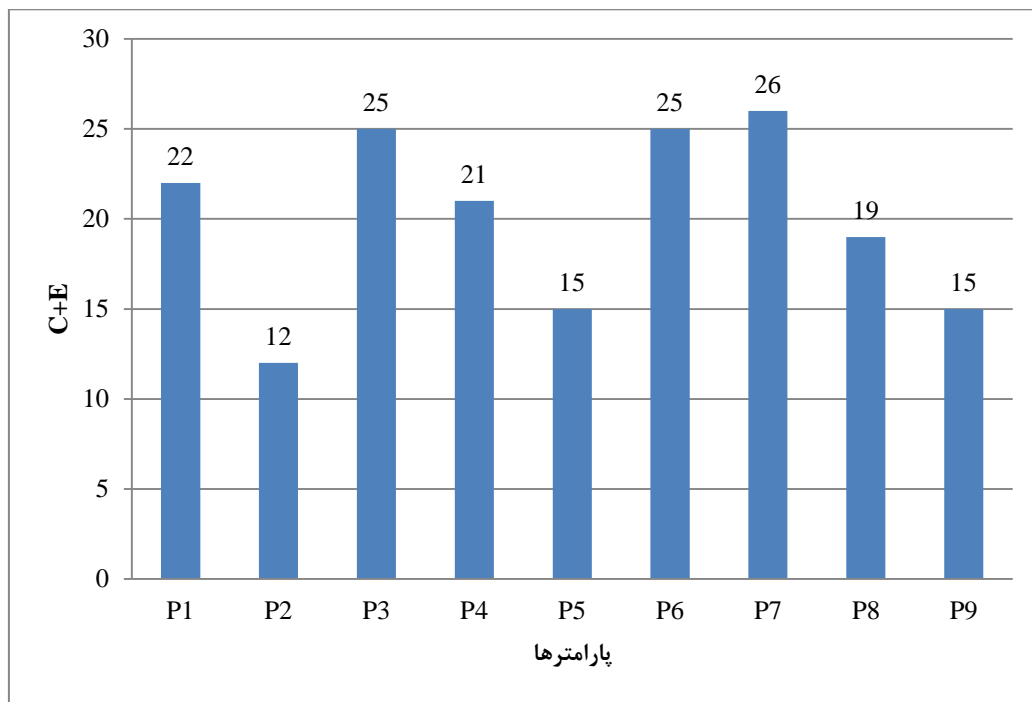
نمودار علت-اثر شکل ۵-۵، تفاوت میان اثرات متقابل زیاد و کم را نشان می‌دهد. نقاطی که در قسمت پایین سمت راست نمودار قرار می‌گیرند، پارامترهایی هستند که بر روی سیستم تسلط دارند و به عبارت دیگر بر روی سیستم غالب هستند، چرا که از مقادیر $C-E$ بزرگ‌تری نسبت به نقاطی که در اطراف قطر قرار دارند، برخوردارند. پارامترهایی که تحت اثر سیستم قرار گرفته‌اند در قسمت بالا و سمت چپ نمودار قرار می‌گیرند و مقادیر $C-E$ کوچک‌تری را دارا هستند و به عبارت دیگر مغلوب سیستم شده‌اند. نمودار علت-اثر در فهم نقش هر پارامتر در پروژه دارای اهمیت بوده و می‌تواند اثرات متقابل مفید و غیرمفید از نظر مهندسی را مشخص کند. محاسبه میزان اندرکنش به صورت مقدار $C+E$ می‌تواند موجب شناسایی پارامترهایی شود که لازم است تحت کنترل قرار بگیرند، چرا که تغییر در این پارامترها احتمالاً می‌تواند باعث القای تغییرات مهمی در سیستم شود.



شکل ۵-۵: نمودار علت-اثر برای مسأله پتانسیل گاز کشی معادن البرز شرقی

از نمودار علت- اثر رسم شده در شکل ۵-۵. مشخص می‌شود که پارامتر P6 یعنی گاز محتوی کاملاً تحت اثر سیستم بوده و در عوض پارامتر P7 و P3 یعنی عمق قرارگیری و ناپیوستگی‌ها (گسل‌ها) بیشترین تسلط را بر روی سیستم دارد.

با به دست آوردن مجموع علت و اثرها (C+E) برای هر پارامتر می‌توان هیستوگرام شدت اندرکنش را رسم کرد که این نمودار در شکل ۵-۶ آورده شده است. انتخاب C+E به عنوان فاکتور تمایز بین پارامترها به دلیل تمرکز بر نقش اندرکنش سیستم بوده است. به طور کلی هر چه اندرکنش یک سیستم بیشتر باشد، آن سیستم به صورت بالقوه ناپایدار است، زیرا شانس بیشتری وجود دارد که تغییر کوچک در یک پارامتر تا حد قابل توجهی بر رفتار سیستم تأثیر بگذارد.



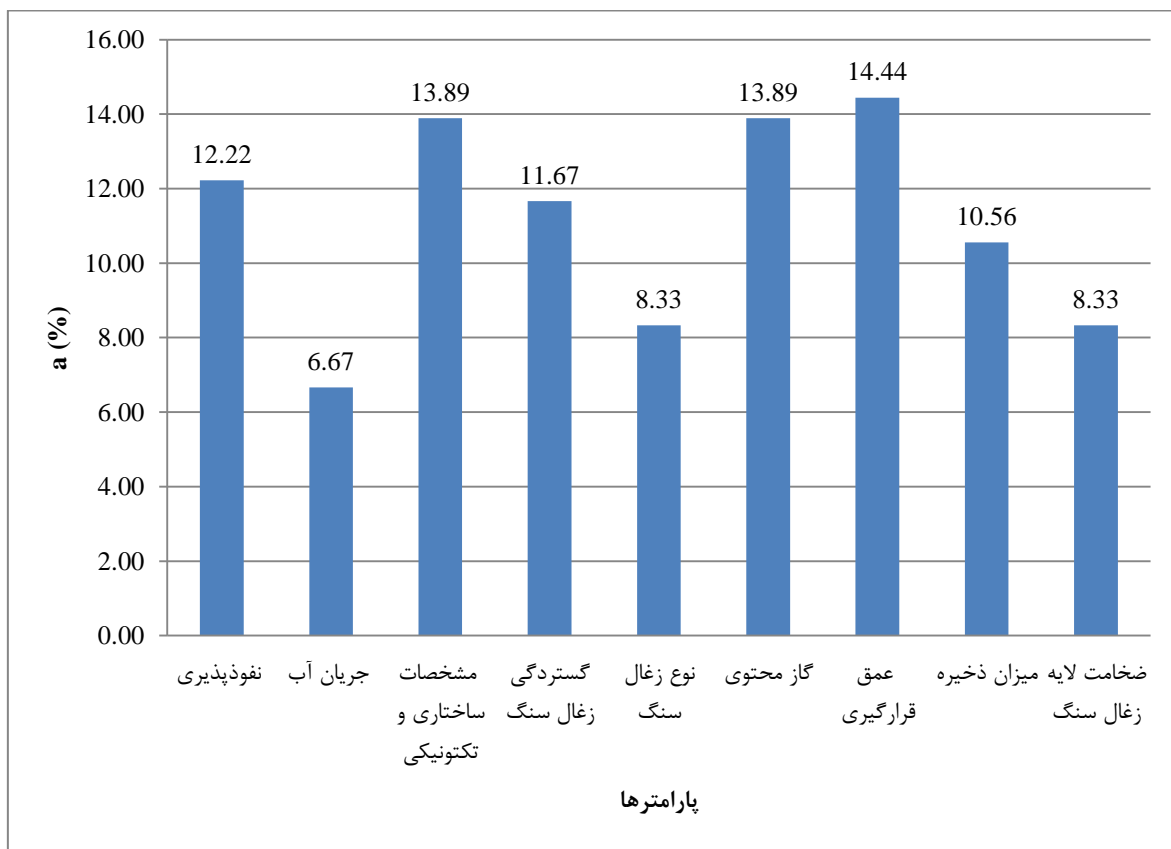
شکل ۵-۶: هیستوگرام شدت اندرکنش پارامترها

نمودار شدت اندرکنش پارامترها نشان می‌دهد که پارامترهای عمق قرارگیری لایه (P7)، گاز محتوی (P6)، ناپیوستگی‌ها (گسل‌ها) (P3) و نفوذپذیری (P1) بیشترین شدت اندرکنش را در سیستم داشته و بنابراین تغییر کوچکی در این پارامترها تا حد قابل توجهی بر رفتار سیستم تأثیر خواهد گذاشت.

جدول ۵-۴ و شکل ۵-۷ وزن هر پارامتر (a_i) را نشان می‌دهد.

جدول ۵-۴: محاسبه وزن پارامترهای مؤثر بر گاز کشی با روش سیستم‌های مهندسی سنگ

پارامتر	C	E	C+E	C-E	a_i (%)
P_1	6	16	22	-10	12.22
P_2	1	11	12	-10	6.67
P_3	21	4	25	17	13.89
P_4	14	7	21	7	11.67
P_5	8	7	15	1	8.33
P_6	0	25	25	-25	13.89
P_7	25	1	26	24	14.44
P_8	6	13	19	-7	10.56
P_9	9	6	15	3	8.33
	$\sum_{i=1}^{15} C_i = 90$	$\sum_{i=1}^{15} E_i = 90$	$\sum_{i=1}^{15} (C_i + E_i) = 180$		$\sum_{i=1}^{15} a_i = 100$



شکل ۵-۷: وزن نهایی پارامترهای مؤثر در گاز کشی زغال‌سنگ با روش سیستم‌های مهندسی سنگ

۵-۵-۵- تشکیل فهرست‌های رده‌بندی سیستم طبقه‌بندی

با توجه به اینکه تا این مرحله از کار، وزن نهایی اهمیت پارامترها از طریق روش سیستم‌های مهندسی سنگ به دست آمده است، لازم است که مقادیر واقعی پارامترها نیز وارد شده و داده‌های ورودی با جزئیات کامل از معادن به دست آیند.

برخی از پارامترها کیفی و برخی دیگر کمی توضیح داده شده‌اند. به همین دلیل، امکان وارد کردن مقادیر واقعی پارامتر به صورت مستقیم در محاسبه اندیس گاز کشی زغال سنگ ممکن نبوده است و به همین دلیل یک رده‌بندی برای طبقه‌های مختلف کیفیت‌ها و مقادیر پارامترها تعیین شده است که جدول نهایی امتیازدهی و بدنه کلی سیستم طبقه‌بندی شاخص قابلیت گاز کشی به شرح جدول ۵-۵ قابل ارائه است. به ترکیب مقادیر پارامترها و کلاس‌های اختصاص یافته شده برای پارامترها اصطلاحاً فهرست‌های (منوهای) رده‌بندی گفته می‌شود که در عمل، مقادیر پارامترها از این منوهای رده‌بندی انتخاب می‌شوند. در این تحقیق، حداکثر شش کلاس برای مقادیر هر پارامتر در نظر گرفته شده است که صفر برای «سهم بسیار کم» و بیشترین مقدار رده‌بندی برای «سهم بسیار زیاد» پارامترها تعیین شده است. بنابراین مقادیر بالاتر به کلاس‌هایی از مقدار پارامترها اختصاص می‌یابند که در خصوص گاز کشی زغال سنگ سهم بیشتری دارند (جدول ۵-۵).

جدول ۵-۵: منوهای رده‌بندی در نظر گرفته شده برای پارامترها

رده‌بندی اختصاص داده شده						پارامتر (واحد)
۵	۴	۳	۲	۱	۰	
>۳۰	۱۰-۳۰	۳-۱۰	۱-۳	۰/۱-۱	کمتر از ۰/۱	نفوذپذیری (میلی داریسی)
<۳	۳-۵	۵-۷	۷-۱۲	۱۲-۲۴	>۲۴	جریان آب (رطوبت %)
---	---	ناموجود	کمتر از ۲ عدد گسل / ۵۰۰	بیشتر از ۲ عدد گسل / ۵۰۰ متر	گسل بزرگ با ریزش‌های بزرگ	ناپوستگی‌ها (گسل‌ها)
---	---	---	زیاد	متوسط	کم	گسترده‌گی زغال سنگ
---	---	آنتراسیت ^۴	بیتومینه ^۳	ساب بیتومینه ^۲	لیگنیت ^۱	نوع زغال سنگ
---	---	>۱۵	۱۰-۱۵	۵-۱۰	< ۵	گاز محتوی (m ³ / ton)
۵۰-۲۵۰	۲۵۰-۵۰۰	۵۰۰-۷۵۰	۷۵۰-۱۰۰۰	۱۰۰۰-۱۲۵۰	<۵۰ >۱۲۵۰	عمق قرارگیری (متر)
>۴	۳-۴	۲-۳	۱-۲	۰/۵-۱	۰-۰/۵	میزان ذخیره (میلیون تن)
---	> ۵	۳/۲-۵	۲/۴-۳/۲	۱/۲-۲/۴	< ۱/۲	ضخامت لایه زغال سنگ

^۱ - Lignite

^۲ - Sub-bituminous

^۳ - Bituminous

^۴ - Anthracite

۵-۶- تعریف اندیس پتانسیل گاز کشی زغال‌سنگ (CBMPi)

آسیب‌پذیری^۲ به عنوان حدّ و توانایی عناصر ایجاد کننده یک سیستم از قبیل افراد و تجهیزات در پاسخ به یک خطر و پیامدهای آن است که تحت شرایط کاری خاص مربوط به خود در ریسک قرار می‌گیرند. اندیس آسیب‌پذیری به عنوان یک ترکیب خطی از وزن پارامترها a_i و مقدار این پارامترها (P_i) بیان می‌شود. رابطه اندیس آسیب‌پذیری به صورت معادله (۵-۲) بیان می‌شود (Mazzoccola & Hudson, 1996):

$$VI = \sum_{i=1} a_i \frac{P_i}{P_{Max}} \quad (۵-۲)$$

که در این رابطه:

i: شمارنده تعداد پارامترهای اصلی

a_i : وزن پارامتر i ام در سیستم

P_i : مقدار پارامتر i ام

P_{Max} : حداکثر مقداری است که یک پارامتر می‌تواند داشته باشد (فاکتور یگه کردن).

بدین ترتیب می‌توان اندیس پتانسیل گاز کشی زغال‌سنگ (CBMPi) را از معادله (۵-۳) محاسبه کرد.

$$CBMPi_j = \sum_{i=1}^9 a_i \frac{P_{ij}}{P_{Max_i}} \quad (۵-۳)$$

که در این رابطه:

i: مربوط به پارامترها (از ۱ تا ۹ پارامتر)

j: مربوط به شماره معدن

a_i : ضریب وزنی پارامتر i ام که از جدول ۵-۴ به دست می‌آید.

P_{ij} : امتیاز پارامتر i ام در هر کلاس از منوی رده‌بندی (جدول ۵-۵) با توجه به شرایط معدن j

P_{Max_i} : حداکثر امتیاز هر پارامتر در منوی رده‌بندی شده (جدول ۵-۵)

حداقل مقدار CBMPi عدد صفر و حداکثر مقدار CBMPi عدد ۱۰۰ است.

¹ - Coal Bed Methane Potential Index

² - Vulnerability

پس از تعیین شاخص CBMPi، بر اساس مقدار به دست آمده برای هر معدن می‌توان قابلیت گاز کشی زغال سنگ را پیش‌بینی کرد که برای این منظور می‌توان از جدول ۵-۶ استفاده کرد.

جدول ۵-۶: بازه بندی اندیس پتانسیل گاز کشی زغال سنگ

اندیس گاز کشی بالا		اندیس گاز کشی متوسط		اندیس گاز کشی پایین	
عالی	خیلی خوب	خوب	متوسط	ضعیف	بسیار ضعیف
۱۰۰	CBMPi	۶۶	CBMPi	۳۳	CBMPi

در ادامه در ابتدا به معرفی مناطق مختلف زغالی حوزه البرز شرقی اشاره خواهد شد و پس از آن با استفاده از روش سیستم‌های مهندسی سنگ به اولویت‌بندی مناطق حوزه البرز شرقی از دیدگاه قابلیت گاز کشی خواهیم پرداخت.

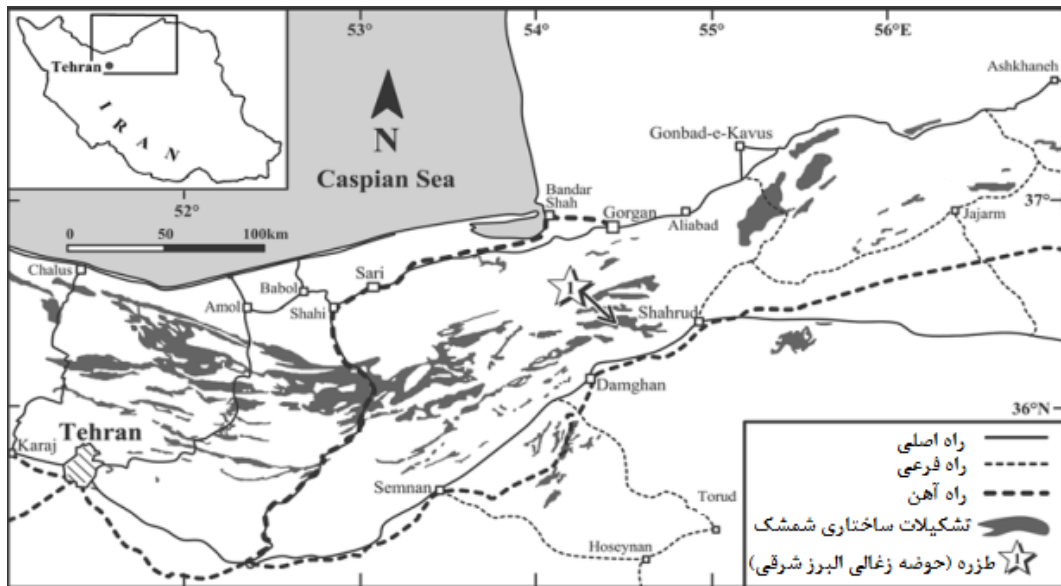
۵-۷- حوزه زغالی البرز شرقی

کارهای مقدماتی اکتشافی مناطق شاهرود برای اولین بار در سال ۱۳۴۸ شروع شد که طی آن منطقه زغال خیز طزره مورد بررسی قرار گرفت. معادن زغال سنگ البرز شرقی در رشته کوه‌های البرز واقع شده که ارتفاع این منطقه از سطح دریا (به استثناء منطقه قشلاق) از ۲۰۰۰ تا ۲۸۰۰ متر متغیر بوده و اکثراً دارای آب‌وهوای کوهستانی و زمستان‌های سرد و تابستان‌های ملایم و معتدل است. شکل ۵-۸ نقشه شماتیک منطقه زغال دار شرکت البرز شرقی را نشان می‌دهد.

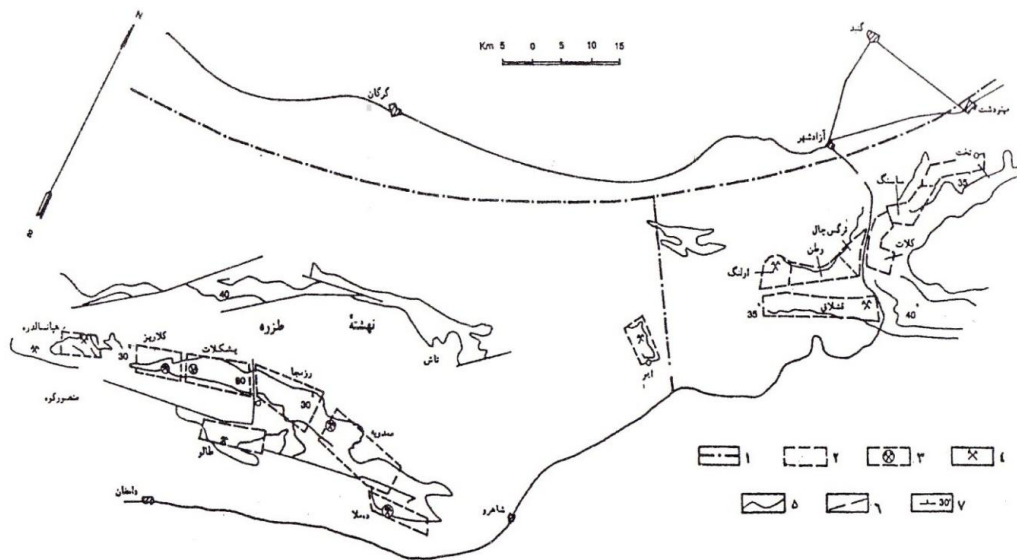
این منطقه شامل دو منطقه عمده زغالی زیر است.

الف: منطقه طزره که دربرگیرنده معادن پشکلات، کلاریز، رزمجا و ممدویه است.

ب: منطقه قشلاق و اولنگ.



(الف)



۱- مرز نواح رسوبات زغال‌نخیز، ۲- مرز مناطق، ۳- معادن فعال شرکت ملی فولاد، ۴- معادن فعال بخش خصوصی، ۵- مرز رخنمون تریاس - ژوراسیک و ژوراسیک، ۶- خطوط جابه‌جا کننده طبقات، ۷- شیب سنگها.

(ب)

شکل ۵-۸: الف) موقعیت جغرافیایی و راه‌های دسترسی به برش چینه‌شناسی ناحیه طزره که در آن گسترش سازند شمشک در البرز مرکزی و شرقی مشخص شده است (Fursich et al. 2005). ب) نقشه شماتیک مناطق زغال‌دار شرکت البرز شرقی (دوست فاطمه، ۱۳۸۱).

۵-۷-۱- منطقه طزره

منطقه طزره با وسعت ۳۴ کیلومتر مربع بخشی از دامنه جنوبی رشته کوه البرز را تشکیل می‌دهد که در فاصله ۷۰ کیلومتری شمال غرب شاهرود واقع شده است. منطقه طزره شامل مناطق معدنی پشکلات، کلاریز، رزمجا و ممدویه است که در ادامه به توضیح مناطق پشکلات، کلاریز و رزمجا پرداخته شده است.

۵-۷-۱-۱- منطقه پشکلات

منطقه پشکلات در قسمت مرکزی معدن طزره قرار دارد که یال جنوبی ناودیس میاناب را می‌سازد. منطقه پشکلات جزئی از مناطق زغال خیز تریاس- ژوراسیک طزره است. این منطقه از غرب به منطقه کلاریز و از شرق به منطقه رزمجا محدود می‌شود.

در منطقه پشکلات جهت دسترسی به طبقات زیرین سطح زمین جمعاً ۱۰۳ حلقه چاه در نقاط مختلف حفاری شده است.

زغال‌خیزی منطقه پشکلات از شمال به نزدیکی آهک‌های لارد و رسوبات بخش زغالی دانسريت (مربوط به ژوراسیک میانی) محدود می‌گردد و از جنوب شامل زیر بخش کلاریز که تحتانی‌ترین لایه آن، K5 شماره گذاری شده است محدود می‌گردد.

همزمان با شروع فعالیت‌های اکتشافی در منطقه کلاریز، گزارش‌های مقدماتی منطقه پشکلات که آن زمان ۳۲ حلقه گمانه در آن حفر شده بوده آماده شد و ذخایر زغالی ۱۶/۳۰۴ میلیون تن برای ۱۲ لایه زغالی شامل، K5، K10، K12، K14، K13، K19، K21، K23، K25، P3، P10، P15، P18 و محاسبه شده و بدین ترتیب مرحله اول اکتشاف در سال ۱۳۵۲ با حفاری‌های بیشتر شروع گردید. اکنون منطقه پشکلات با ۱۷ لایه زغالی قابل استخراج و ذخیره ۲۰/۹۴۵ میلیون تن یکی از بهترین منطقه‌های واحد شاهرود است. این منطقه بر روی رسوبات آهکی- دولومیتی سازند الیکا، رسوبات تریاس- ژوراسیک سازند شمشک با شیبی به طرف شمال و امتدادی شرقی- غربی قرار گرفته، که یک نبود چینه‌شناسی آن‌ها را از هم جدا می‌سازد. تشابه این نبود لایه سرخ بوکسیتی است که مستقیماً روی آهک‌های دولومیتی الیکا را می‌پوشاند حد بالایی سازند شمشک در این منطقه رسوبات سازند دلیچای است. به طور کلی تشکیلات منطقه پشکلات رسوبات

ساحلی (پارالیک) هستند که بیشتر از ماسه سنگ‌های میکا و رس دار، شیل‌ها، آرژیلیت‌ها و زغال‌سنگ‌های نرم و لغزنده تشکیل شده‌اند و این باعث می‌گردد که نیروهای تکتونیکی تغییرات زیادی در آن‌ها به وجود آورد (گزارش دفتر فنی اکتشافات شرکت البرز شرقی، ۱۳۵۶).

رسوبات زغال دار منطقه پشکلات دارای امتداد شرقی- غربی و آزیموتی برابر ۲۲۰ تا ۳۶۰ درجه هستند. شیب طبقات از ۳۰ تا ۵۰ درجه در نوسان بوده به همین دلیل شیب در جهت غرب افزایش می‌یابد. گسل‌های زیادی از نوع گسل‌های نرمال و معکوس همچنین گسل‌های هم‌شیب در منطقه مشاهده می‌گردد که رسوبات زغال دار در بخش بزرگی از منطقه توسط گسل‌ها قطع شده‌اند. در گسل‌های هم‌شیب، امتداد گسل و امتداد طبقات یکی است، از این رو اندازه‌گیری جابه‌جایی در این گسل‌ها در بسیاری از موارد ممکن نیست بخصوص در مواردی که شیب گسل و شیب طبقات یکسان باشد. از این نوع گسل در اواسط تشکیلات طزره از دره پشکلات تا دره کلامرگ ادامه دارد.

رسوبات اصلی منطقه زغال خیز پشکلات از نقطه نظر زمانی متعلق به تریاس بالائی، ژوراسیک زیرین و میانی بوده که مجموعاً سازند شمشک را تشکیل می‌دهد. به طور کلی منطقه پشکلات از بخش‌های مختلف زغالی و بدون زغالی به شرح زیر تشکیل شده است.

الف: بخش اکراسر

این بخش در پائین تشکیلات شمشک جای گرفته و به علت نداشتن لایه‌های زغالی، منطقه زغال خیز به شمار نمی‌آید.

ب- بخش طزره

این بخش بر روی بخش اکراسر قرار گرفته و از سه زیر بخش لله‌بند، کلاریز و آلاشت تشکیل شده است.

۱- زیر بخش لله بند

این زیر بخش شامل تناوب سیلتستون خاکستری رنگ، آرژیلیت و ماسه سنگ دانه ریز با رخساره کولابی- دلتائی^۱ است. سن زیر بخش لله‌بند مربوط به تریاس پسین است. این زیر بخش مناطق زغالی و آرژیلیتی را در بر می‌گیرد و زیر بخش زغال‌خیز به حساب نمی‌آید.

۲- زیر بخش کلاریز

این زیر بخش دارای لایه‌های زغالی است و رسوبات آن شامل ماسه‌سنگ‌هایی با دانه‌بندی مختلف خاکستری رنگ، سیلتستون، آرژیل و زغال با ژنز دریاچه‌ای الویال است. در مقاطع مختلف این زیر بخش بیشتر از ۱۲ لایه زغالی قابل بهره‌برداری وجود دارد که بیشترین ذخیره زغالی مربوط به لایه‌های K5، K10 و K19 است. زیر بخش کلاریز به ضخامت شش صد متر قسمت اعظم لایه‌های زغالی منطقه پشکلات را در بر می‌گیرد که عبارتند از: K5، K6، K8، K9، K10، K12، K13، K14، K19L، K19U، K21، K23 و K25 ضخامت کل لایه‌های زغالی این زیر بخش برابر با ۸/۱۷ متر و ضخامت متوسط لایه‌های زغالی قابل استخراج برابر با ۰/۶۳ متر است. ضریب کل زغال‌خیزی زیر بخش کلاریز ۲/۸۴ درصد و ضریب لایه‌های استخراج به ۲/۱۱ درصد می‌رسد. از ۱۳ لایه زغالی قابل استخراج ضخامت لایه‌های K5، K10، K19u، K19L و K5 بیشتر از دیگر لایه‌هاست. ضخامت زیر بخش کلاریز حدود ۶۰۸ متر است.

۳- زیر بخش آلاشت

مقاطع تیپ زیر بخش آلاشت در منطقه زغال‌دار آلاشت مربوط به رسوبات کارمزد است. سیلتستون‌های خاکستری رنگ زیر بخش کلاریز حد پائینی زیر بخش آلاشت را تشکیل می‌دهند که کنتاکی به فرم هم شیب با رسوبات این زیر بخش دارد. زیر بخش آلاشت را می‌توان در این منطقه به دو قسمت زغال‌دار و بدون زغال‌دار تقسیم کرد. حدود ۲۰۰ متر قسمت زیرین شامل انواع ماسه سنگ‌ها و لایه‌های آرژیل می‌شود که در زون‌های مرکزی و جنوبی به کنگلومرا تغییر رخساره می‌دهد. رسوبات قسمت فوقانی زیر بخش آلاشت (پشکلات) حاوی لایه‌های زغالی کوچک و بزرگ بوده و لایه زغالی P10 که یکی از گسترده‌ترین لایه‌های

¹ Lagoon- deltaic

زغالی قابل استخراج است در این زیربخش واقع گردیده است. لایه‌های زغالی قابل استخراج این بخش عبارتند از P3، P10، P15 و P18 که ضخامت لایه‌های زغالی قابل استخراج ۲/۶۱ متر و ضخامت متوسط آن‌ها ۰/۶۵ متر است.

ج - بخش شیرین دشت

این بخش به طور کلی از رسوبات دریائی تشکیل شده (ماسه سنگ، سیلتستون آرژیلیت و رگه‌های سنگ‌آهک) سنگ‌های ماسه‌ای تجمعی به طرف قسمت تحتانی بخش دارند و در زیر بخش زیرین (روزه) محدود می‌شوند.

بخش شیرین دشت به دو زیر بخش روزه و کوانسار تقسیم می‌گردد که بدون لایه زغالی بوده و بخش زغال‌خیز به شمار نمی‌آید.

رسوبات بخش طزره به فرم هم شیب به وسیله رسوبات بخش شیرین دشت پوشیده شده‌اند. زیر بخش زیرین (روزه) دارای ضخامتی حدود ۵۰۰ متر است. و زیر بخش بالائی (کوانسار) حدود ۸۰۰ متر ضخامت دارد.

د - بخش دانسریت

بخش دانسریت بالاترین بخش زغال‌خیز منطقه پشکلات بوده و حدود ۷ لایه زغالی کوچک و بزرگ در این بخش مشاهده می‌گردد که دو لایه زغالی آن ضخامت قابل استخراج را دارا بوده و ضخامت آن حداکثر به یک متر می‌رسد.

۵-۷-۱-۲ - منطقه کلاریز

کلاریز در قسمت غربی منطقه طزره و در فاصله ۸۰ کیلومتری غرب شاهرود و در ۴۰ کیلومتری شمال دامغان واقع شده است. آب‌وهوای این معدن، مشخصات آب‌وهوای کوهستانی و کویری را دارا است. کارهای زمین‌شناسی اکتشافی منطقه کلاریز از سال ۱۳۴۹ شروع گردید و تا سال ۱۳۵۱ کارهای پی‌جویی و از سال ۱۳۵۱ تا سال ۱۳۵۲ کارهای اکتشاف مقدماتی انجام شده است (گزارش دفتر فنی اکتشافات شرکت البرز شرقی، ۱۳۵۴).

منطقه کلاریز بخش اعظم لایه‌های زغالی قابل استخراج را در بردارد و ضخامت کل لایه‌ها به ۴/۱۵ متر می‌رسد. ضریب لایه‌های زغالی قابل استخراج در این منطقه به ۱/۲ می‌رسد. گسترش طولی لایه‌های زغالی ۶/۵ کیلومتر و گسترش عرضی آن‌ها، ۱/۸ کیلومتر است. (گزارش دفتر فنی اکتشافات شرکت البرز شرقی، ۱۳۵۴).

۵-۷-۱-۳- منطقه رزمجا

منطقه زغال‌دار رزمجا از نظر جغرافیایی در استان سمنان و به فاصله ۲۵ کیلومتری شهر دامغان و ۷۵ کیلومتری شهر شاهرود و به فاصله ۳۵ کیلومتری جاده اصلی تهران مشهد واقع شده است. منطقه رزمجا از نظر زمین‌شناسی جزء رسوبات زغال‌دار طزره است. این منطقه از غرب با یک گسل نرمال در اتصال با منطقه پشکلات بوده و در شرق دارای کنتاکی بوده که با یک سیستم گسل پیچیده رسوبات زغال‌دار رزمجا را از مهماندویه با جابه‌جایی در حدود ۴۰۰ متر جدا می‌کند. بیرون زدگی زغال‌دار این منطقه کاملاً آشکار و هیچ‌گونه پوشش جنگلی روی آن وجود ندارد و در جهت عرض جغرافیایی امتداد دارد. در قسمت شرقی انحرافی جزئی به طرف جنوب شرقی داشته به طوری که این بیرون‌زدگی به وسیله تعداد زیادی دره‌های طولی V شکل قطع شده و بزرگ‌ترین دره در منطقه رزمجا، درزه امامزاده است.

منطقه رزمجا دارای لایه‌های زغالی قابل ملاحظه‌ای است و در قسمت تحتانی دو لایه ماسه سنگ ضخیم منشعب قرار دارد که بر طبق برداشت زمین‌شناسی لایه‌های آلویتهی این انشعاب را از هم جدا می‌کند و ضخامت آن بین ۲ تا ۴ متر است. این سری رسوبات با رسوبات تحتانی بخش کلاریز منطقه پشکلات قابل مقایسه می‌باشند (گزارش دفتر فنی اکتشافات شرکت البرز شرقی، ۱۳۶۰).

۵-۷-۲- منطقه اولنگ، قشلاق و تخت

منطقه اولنگ و قشلاق شامل سه منطقه اصلی زغالی شامل اولنگ، قشلاق و تخت است که در ادامه به تشریح این مناطق زغالی پرداخته شده است.

۵-۷-۲-۱- منطقه قشلاق

در ناحیه البرز شرقی بیشترین مقادیر زغال سنگ مربوط به یک ناودیس بزرگ با امتداد شمال شرقی- جنوب غربی است که از منطقه مینودشت شروع می شود و تا منطقه رامیان ادامه می یابد. این منطقه به نام منطقه قشلاق شناخته می شود. زغال سنگ های این منطقه اغلب از نوع گازی، گازی چرب و کمتر از نوع کک شو چرب و کک شو هستند (یزدی، ۱۳۸۲).

۵-۷-۲-۲- منطقه تخت

منطقه تخت در ۱۲ کیلومتری جنوب شرقی شهرستان مینودشت واقع شده است. منطقه تخت از نظر تقسیمات کشوری تابع استان گلستان و شهرهای آزادشهر و مینودشت است. این منطقه از طریق دو جاده چهل چای و جنگل ده با شهرستان مینودشت ارتباط دارد. همچنین از طریق روستای سوسرا، که در جنوب غربی منطقه قرار دارد امکان دسترسی به منطقه فراهم است (گزارش دفتر فنی اکتشافات شرکت البرز شرقی، ۱۳۷۱)

منطقه تخت از شمال به دره چهل چای، از جنوب به دره ساسنگ، از شرق به ارتفاعات حاجی لر و از غرب به روستاهای لیسسه، محمد زمان خان، امام عبدالله، لولم، سراپو و ازداران محدود می شود.

شناسایی رسوبات زغال دار در این منطقه برای نخستین بار در ایران در سال ۱۳۴۱ توسط شرکت "میناک"^۱ انجام گرفت و از آن تاریخ تا سال ۱۳۵۰ هیچ گونه عملیات اکتشافی در منطقه انجام نپذیرفت و تنها در همین سال تعدادی ترانسه در این ناحیه حفر شده است. مجدداً در سال ۱۳۶۹ عملیات اکتشافی وسیعی به منظور مطالعه و شناخت بهتر رسوبات زغال دار توسط شرکت زغال سنگ البرز شرقی انجام پذیرفت که هم اکنون نیز ادامه دارد. با توجه به گسترش زیاد لایه های زغال دار و به منظور مطالعه بهتر تشکیلات زغال دار منطقه به دو بخش الف) شمالی با گسترش طولی ۱۱ کیلومتر و ب) جنوبی با گسترش طولی ۹ کیلومتر تقسیم شده است که در فاز اول کلیه عملیات اکتشاف اعم از عملیات سطحی (حفر ترانسه و گمانه) و تعقیب باندهای راهنما (باندهای کوارتزیتی و ماسه سنگی) و عملیات اکتشافی مقدماتی (حفر اکلون و تونل

^۱ Minak

اکتشافی) در بخش شمالی (الف) متمرکز شد. عملیات اکتشافی در بخش جنوبی نیز از سال ۱۳۸۰ آغاز شده است و هم اکنون ادامه دارد.

منطقه زغالی تخت توسط پنج گسل بزرگ احاطه می‌شود. این گسل‌ها عبارتند از گسل دره سوسرا، گسل محور آنتی کلینال تخت، گسل حیدر کلاه تخت، گسل دره چهل چای و گسل آب پیران است. رسوبات زغال دار منطقه تخت مربوط به بخش کلاریز پائینی معادل تریاس فوقانی تا ژوراسیک تحتانی است. از تعداد ۲۶ لایه زغال موجود در منطقه تنها ۶ لایه آن بنام‌های K8، K10، K11، K17، K19 و K20 با اقتصادی و قابل کار است (گزارش دفتر فنی اکتشافات شرکت البرز شرقی، ۱۳۷۱).

۵-۷-۲-۳- منطقه اولنگ

منطقه اولنگ در ۷۵ کیلومتری شمال شرق شاهرود و در فاصله ۳۱ کیلومتری جنوب شرقی رامیان از توابع استان مازندران قرار دارد. این منطقه از اوایل سال ۱۳۶۰ مورد شناسایی و اکتشاف قرار گرفت. رسوبات این منطقه مربوط به بخش کلاریز بوده و مربوط به تریاس فوقانی تا ژوراسیک تحتانی می‌باشند. در این منطقه حدود ۵۰ لایه زغالی وجود دارد که حدود شش لایه زغالی آن بنام‌های K4، K7، K13، K21، K23 و K30 قابل کار بوده و از نظر مارک دارای (ک-ژ-گ ژ) می‌باشند. منطقه اولنگ کاملاً کوهستانی بوده و پایین‌ترین ارتفاع از سطح دریا ۱۳۰۰ متر و بلندترین ارتفاع آن ۲۰۰۰ متر است. بدین معنی که زغال‌های این بخش به واسطه قرار گرفتن در ارتفاعات زیاد و محیط کوهستانی از افراز بسیار خوبی برخوردار می‌باشند و این امر در کارهای تونلی بسیار حائز اهمیت است. البته این امر در سایر بخش‌های اولنگ نیز صادق است (گزارش دفتر فنی اکتشافات شرکت البرز شرقی، ۱۳۶۴).

کار حفاری در اولنگ از تیرماه ۱۳۶۰ در بخش جوزچال به نام چاه ۷۰۱ شروع گردید و با توجه به تمرکز عملیات زمین‌شناسی در رضی دومین چاه به نام ۷۰۲ در این بخش شروع به حفاری نمود. در بخش رضی بخصوص در محدوده مورد ارزیابی گسل‌های زیادی از نوع نرمال و معکوس و همچنین گسل‌های هم شیب مشاهده می‌گردد که رسوبات زغال دار را در قسمت‌های مختلف قطع می‌نماید.

منطقه اولنگ شامل معدن رضی، ملج آرام، جوزچال، آریاتوگلف، کشکک ویرو و رودبار است. با توجه به اهمیت بیشتر منطقه رضی و ملج آرام در ادامه به شرح این دو منطقه پرداخته می‌شود.

الف: منطقه رضی

منطقه رضی بخشی از منطقه اولنگ است. با توجه به اطلاعات حاصله از عملیات اکتشافی بر روی لایه‌های زغالی اولنگ بخصوص بخش رضی و به استناد مدارک موجود، رضی را می‌توان از نظر وجود زغال بخش نسبتاً خوبی بشمار آورد. تعداد لایه‌های قابل استخراج در این بخش با ضخامت بیش از ۴۵ سانتی‌متر ۷ لایه است که متوسط ضخامت این لایه‌ها از ۰/۱۳ تا ۳/۴۵ متر متغیر است. در ادامه به مشخصات لایه‌های زغالی این منطقه پرداخته شده است.

ب: منطقه ملج آرام فوقانی

منطقه ملج آرام فوقانی جزئی از منطقه اولنگ است. این منطقه دارای ساختمان زمین‌شناسی بسیار پیچیده‌ای است و رسوبات منطقه توسط عوامل تکتونیکی زیاد خرد شده و لایه‌های زغالی وضعیت غیریکنواختی دارا می‌باشد.

با استفاده از اطلاعات حاصل شده از عملیات اکتشافی بر روی لایه‌های زغالی ملج آرام فوقانی می‌توان اظهار نظر کرد که زغال‌های ملج آرام نیز در زمره زغال‌های خوب و اقتصادی قلمداد می‌شوند. (گزارش دفتر فنی اکتشافات شرکت البرز شرقی، ۱۳۷۲).

۵-۸- رده‌بندی معادن البرز شرقی از نظر پتانسیل گاز کشی

با استفاده از جدول ۴-۵، جدول ۵-۵، جدول ۶-۵ و معادله (۳-۵) معادن کلاریز شرقی، رزمجای غربی، برناکی، بزرگ، رضی و تخت از لحاظ پتانسیل گاز کشی مورد ارزیابی قرار گرفته‌اند که جزئیات مربوط به محاسبه پتانسیل گازکشی معادن در جدول ۷-۵ آورده شده است. مقادیر اختصاص داده شده به هر پارامتر از هر معدن (از ۰ تا ۵) با توجه به رده‌بندی‌های تعریف شده در جدول ۵-۵ آورده شده است.

جدول ۵-۷: محاسبه اندیس پتانسیل گازکشی زغال سنگ برای معادن زغال سنگ البرز شرقی

قابلیت پتانسیل گازکشی زغال سنگ	امتیازبندی پارامترها										
	$\sum_{i=1}^9 a_i = 100$	۸,۳۳	۱۰,۵۶	۱۴,۴۴	۱۳,۸۹	۸,۳۳	۱۱,۶۷	۱۳,۸۹	۶,۶۷	۱۲,۲۲	وزن پارامتر با RES
	---	۴	۵	۵	۳	۳	۲	۳	۵	۵	PMaxi
	CBMPi	P9	P8	P7	P6	P5	P4	P3	P2	P1	پارامتر معادن
متوسط	۵۵,۲۰	۱	۲	۳	۲	۲	۲	۱	۵	۱	کلاریز شرقی
متوسط	۵۷,۳۱	۱	۳	۳	۲	۲	۲	۱	۵	۱	رز مجا غربی
متوسط	۵۹,۸۳	۱	۲	۳	۲	۲	۲	۲	۵	۱	برناکی
متوسط	۵۱,۴۷	۱	۳	۳	۲	۲	۱	۱	۵	۱	بزرگ
بالا	۷۰,۱۰	۲	۳	۳	۳	۳	۲	۲	۴	۱	رضی
متوسط	۶۰,۲۰	۱	۵	۳	۱	۲	۲	۲	۴	۱	تخت

با توجه به کلاس بندی ارائه شده (جدول ۵-۶)، معادن مورد مطالعه رده بندی شده اند که نتایج آن در جدول ۵-۷ آورده شده است. قابل ذکر است که در ارائه ی این طبقه بندی و به منظور تعیین محدوده اندیس در هر طبقه از شواهد و اتفاق های رخ داده شده در گذشته نیز استفاده شده است که مقایسه ها تطابق خوبی را نشان می دهند. قابل ذکر است معادن رضی در حال حاضر به خاطر گازدهی بالا و مخاطرات ناشی از آن به حالت توقف درآمده است و استخراج از لایه های این معدن صورت نمی گیرد؛ لذا پیشنهاد می شود که این معدن تحت عملیات گازکشی قرار گیرد که در بخش بعد به تعیین روش مناسب گازکشی از این معدن خواهیم پرداخت.

۵-۹- روش تحلیل سلسله مراتبی فازی (FAHP^۱)

هر چند هدف از به کارگیری روش تحلیل سلسله مراتبی به دست آوردن نظر کارشناسان و متخصصین است، با این وجود روش تحلیل سلسله مراتبی معمولی به درستی نحوه ی تفکر انسانی را منعکس نمی کند، زیرا در مقایسه های زوجی این روش از اعداد دقیق استفاده می شود. از دیگر مواردی که اغلب روش تحلیل سلسله

^۱ - Fuzzy Analytical Hierarchy Process

مراتبی به خاطر آن‌ها مورد نکوهش قرار می‌گیرد عبارتند از: وجود مقیاس نامتوازن^۱ در قضاوت‌ها، عدم قطعیت و نادقیق بودن مقایسه‌های زوجی. تصمیم‌گیرندگان اغلب به علت طبیعت فازی مقایسه‌های زوجی قادر نیستند به صراحت نظرشان را در مورد برتری‌ها اعلام کنند. به همین دلیل در قضاوت‌هایشان ارائه یک بازه را به جای یک عدد ثابت ترجیح می‌دهند. برای غلبه بر این مشکلات روش تحلیل سلسله مراتبی فازی ارائه شده است.

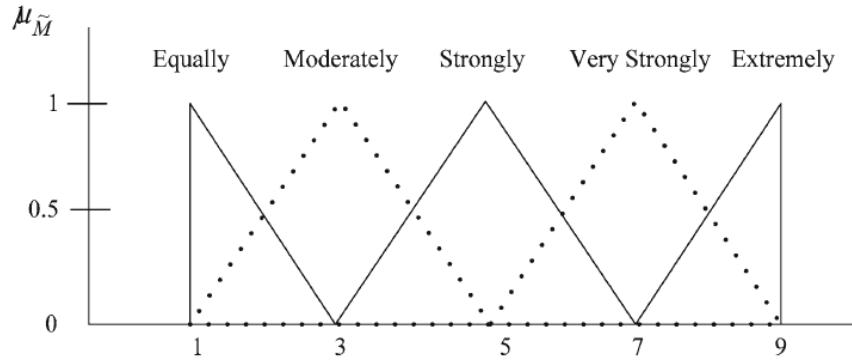
در روش تحلیل سلسله مراتبی فازی، پس از تهیه نمودار سلسله مراتبی از تصمیم‌گیرنده (یا تصمیم‌گیرندگان) خواسته می‌شود تا عناصر هر سطح را نسبت به هم مقایسه کنند و اهمیت نسبی عناصر را با استفاده از اعداد فازی بیان کنند.

به طور مثال در جدول ۵-۸ نمونه‌ای از اعداد فازی مثلثی تعریف شده و توابع عضویت آن‌ها درج شده است. در شکل ۵-۹ نیز تابع عضویت فازی برای متغیرهای زبانی نشان داده شده است.

جدول ۵-۸: نمونه‌ای از اعداد فازی تعریف شده در روش تحلیل سلسله مراتبی فازی

عدد فازی	تعریف	مقیاس فازی مثلثی	دامنه	تابع عضویت
$\tilde{9}$	اهمیت مطلق	(7,9,9)	$7 \leq x \leq 9$	$\frac{x-7}{9-7}$
$\tilde{7}$	اهمیت خیلی قوی	(5,7,9)	$7 \leq x \leq 9$	$\frac{9-x}{9-7}$
			$5 \leq x \leq 7$	$\frac{x-5}{7-5}$
$\tilde{5}$	اهمیت قوی	(3,5,7)	$5 \leq x \leq 7$	$\frac{7-x}{7-5}$
			$3 \leq x \leq 5$	$\frac{x-3}{5-3}$
$\tilde{3}$	اهمیت ضعیف	(1,3,5)	$3 \leq x \leq 5$	$\frac{5-x}{5-3}$
			$1 \leq x \leq 3$	$\frac{x-1}{3-1}$
$\tilde{1}$	اهمیت یکسان	(1,1,3)	$1 \leq x \leq 3$	$\frac{3-x}{3-1}$
۱	دقیقاً مساوی	(1,1,1)	-	-

¹ - Unbalanced scale



شکل ۵-۹: تابع عضویت فازی برای متغیرهای زبانی

۵-۹-۱- مراحل روش تحلیل سلسله مراتبی فازی

مراحل روش تحلیل سلسله مراتبی فازی به روش چانگ^۱ به شرح زیر است:

مرحله ۱: رسم نمودار سلسله مراتبی

مرحله ۲: تعریف اعداد فازی به منظور انجام مقایسه‌های زوجی

مرحله ۳: تشکیل ماتریس مقایسه زوجی (\tilde{A}) با به کارگیری اعداد فازی

ماتریس مقایسه زوجی به صورت زیر خواهد بود:

$$\tilde{A} = \begin{bmatrix} 1 & \tilde{a}_{12} & \dots & \tilde{a}_{1n} \\ \tilde{a}_{21} & 1 & \dots & \tilde{a}_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \tilde{a}_{n1} & \tilde{a}_{n2} & \dots & 1 \end{bmatrix}$$

که این ماتریس حاوی اعداد فازی زیر است:

$$\tilde{a}_{ij} = \begin{cases} 1 & i = j \\ \tilde{1}, \tilde{3}, \tilde{5}, \tilde{7}, \tilde{9} \text{ or } \tilde{1}^{-1}, \tilde{3}^{-1}, \tilde{5}^{-1}, \tilde{7}^{-1}, \tilde{9}^{-1} & i \neq j \end{cases}$$

اگر کمیته تصمیم‌گیرنده دارای چندین تصمیم‌گیرنده باشد، درایه‌های ماتریس مقایسه زوجی جامع که در روش تحلیلی سلسله مراتبی فازی به کار می‌رود، یک عدد فازی مثلثی است که مؤلفه اول آن حداقل نظرسنجی‌ها، مؤلفه دوم آن میانگین نظرسنجی‌ها و مؤلفه سوم آن حداکثر نظرسنجی‌ها است.

^۱ - Chang

مرحله ۴: محاسبه S_i برای هر یک از سطرهاى ماتریس مقایسه زوجی

S_i که خود یک عدد فازی مثلثی است از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$S_i = \sum_{j=1}^m M_{gi}^j \otimes \left[\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m M_{gi}^j \right]^{-1} \quad (۴-۵)$$

که در این رابطه i بیان‌گر شماره سطر و j بیان‌گر شماره ستون است. M_{gi}^j در این رابطه اعداد فازی مثلثی

ماتریس‌های مقایسه زوجی هستند. مقادیر M_{gi}^j ، $\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m M_{gi}^j$ ، را می‌توان به ترتیب از روابط زیر

محاسبه کرد:

$$\sum_{j=1}^m M_{gi}^j = \left(\sum_{j=1}^m l_j, \sum_{j=1}^m m_j, \sum_{j=1}^m u_j \right) \quad (۵-۵)$$

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m M_{gi}^j = \left(\sum_{i=1}^n l_i, \sum_{i=1}^n m_i, \sum_{i=1}^n u_i \right) \quad (۶-۵)$$

$$\left[\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m M_{gi}^j \right]^{-1} = \left(\frac{1}{\sum_{i=1}^n u_i}, \frac{1}{\sum_{i=1}^n m_i}, \frac{1}{\sum_{i=1}^n l_i} \right) \quad (۷-۵)$$

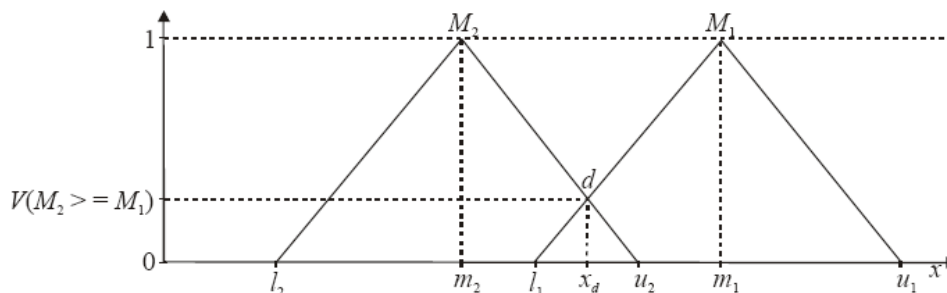
در روابط بالا l_i ، m_i و u_i به ترتیب مؤلفه‌های اول تا سوم اعداد فازی هستند.

مرحله ۵: محاسبه درجه بزرگی S_i ها نسبت به همدیگر

به طور کلی اگر $M_1 = (l_1, m_1, u_1)$ و $M_2 = (l_2, m_2, u_2)$ دو عدد فازی مثلثی باشند، طبق شکل ۵-۱۰ درجه

بزرگی M_1 نسبت به M_2 به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$V(M_2 \geq M_1) = \text{hgt}(M_1 \cap M_2) = \mu_{M_2}(d) = \begin{cases} 1 & \text{if } m_2 \geq m_1 \\ 0 & \text{if } l_1 \geq u_2 \\ \frac{l_1 - u_2}{(m_2 - u_2) - (m_1 - l_1)} & \text{otherwise} \end{cases} \quad (۸-۵)$$



شکل ۵-۱۰: درجه بزرگی دو عدد فازی نسبت به هم

از طرف دیگر میزان بزرگی یک عدد فازی مثلثی از K عدد فازی مثلثی دیگر از رابطه زیر به دست می آید:

$$V(M \geq M_1, M_2, \dots, M_k) = V[(M \geq M_1) \text{ and } (M \geq M_2) \text{ and } \dots \text{ and } (M \geq M_k)] \quad (9-5)$$

$$= \text{Min } V(M \geq M_i), \quad i = 1, 2, 3, \dots, k$$

مرحله ۶: محاسبه وزن معیارها و گزینه‌ها در ماتریس‌های مقایسه زوجی

بدین منظور از رابطه زیر استفاده می‌شود:

$$d'(A_i) = \text{Min } V(S_i \geq S_k) \quad k = 1, 2, \dots, n, \quad k \neq i \quad (10-5)$$

بنابراین بردار وزن نرمالیزه نشده به صورت زیر خواهد بود:

$$W' = (d'(A_1), d'(A_2), \dots, d'(A_n))^T \quad A_i \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (11-5)$$

مرحله ۷: محاسبه بردار وزن نهایی

برای محاسبه بردار وزن نهایی باید بردار وزن محاسبه شده در مرحله قبل را نرمالیزه کرد. بنابراین:

$$W = (d(A_1), d(A_2), \dots, d(A_n))^T \quad (12-5)$$

به عنوان مثال ماتریس مقایسه زوجی زیر را در نظر بگیرید که درایه‌های این ماتریس اعداد فازی مثلثی هستند:

	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5
C_1	(1,1,1)	(2/5,1/2,2/3)	(1/2,2/3,1)	(1/2,1,3/2)	(1/2,2/3,1)
C_2	(3/2,2,5/2)	(1,1,1)	(3/2,2,5/2)	(2,5/2,3)	(3/2,2,5/2)
C_3	(1,3/2,2)	(2/5,1/2,2/3)	(1,1,1)	(1,3/2,2)	(1,3/2,2)
C_4	(2/3,1,2)	(1/3,2/5,1/2)	(1/2,2/3,1)	(1,1,1)	(1/2,2/3,1)
C_5	(1,3/2,2)	(2/5,1/2,2/3)	(1/2,2/3,1)	(1,3/2,2)	(1,1,1)

مقادیر $\sum_{j=1}^m M_{gi}^j$ برای هر یک از سطرهای این ماتریس برابر است با:

$$C_1: \left(1 + \frac{2}{5} + \frac{1}{2} + \frac{1}{2} + \frac{1}{2}, 1 + \frac{1}{2} + \frac{2}{3} + 1 + \frac{2}{3}, 1 + \frac{2}{3} + 1 + \frac{3}{2} + 1\right) = (2.9, 3.833, 5.167)$$

$$C_2: \left(\frac{3}{2} + 1 + \frac{3}{2} + 2 + \frac{3}{2}, 2 + 1 + 2 + \frac{5}{2} + 2, \frac{5}{2} + 1 + \frac{5}{2} + 3 + \frac{5}{2}\right) = (7.5, 9.5, 11.5)$$

$$C_3: \left(1 + \frac{2}{5} + 1 + \frac{3}{2} + \frac{3}{2}, \frac{3}{2} + \frac{1}{2} + 1 + \frac{3}{2} + \frac{3}{2}, 2 + \frac{2}{3} + 1 + 2 + 2\right) = (4.4, 6.7, 6.667)$$

$$C_4: \left(\frac{2}{3} + \frac{1}{3} + \frac{1}{2} + 1 + \frac{1}{2}, 1 + \frac{2}{5} + \frac{2}{3} + 1 + \frac{2}{3}, 2 + \frac{1}{2} + 1 + 1 + 1\right) = (3.3, 7.33, 5.5)$$

$$C_5: \left(1 + \frac{2}{5} + \frac{1}{2} + 1 + 1, \frac{3}{2} + \frac{1}{2} + \frac{2}{3} + \frac{3}{2} + 1, 2 + \frac{2}{3} + 1 + 2 + 1\right) = (3.9, 5.167, 6.667)$$

مقدار $\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m M_{gi}^j$ نیز برابر است با:

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m M_{gi}^j &= (1 + \frac{2}{5} + \frac{1}{2} + \frac{1}{2} + \frac{1}{2} + \frac{3}{2} + 1 + \frac{3}{2} + 2 + \frac{3}{2} + 1 + \frac{2}{5} + 1 + 1 + 1 + \frac{2}{3} + \frac{1}{3} + \frac{1}{2} + 1 + \frac{1}{2} + 1 + \frac{2}{5} + \frac{1}{2} + 1 + 1, \\ &1 + \frac{1}{2} + \frac{2}{3} + 1 + \frac{2}{3} + 2 + 1 + 2 + \frac{5}{2} + 2 + \frac{3}{2} + \frac{1}{2} + 1 + \frac{3}{2} + \frac{3}{2} + 1 + \frac{2}{5} + \frac{2}{3} + 1 + \frac{2}{3} + \frac{3}{2} + \frac{1}{2} + \frac{2}{3} + \frac{3}{2} + 1, \\ &1 + \frac{2}{3} + 1 + \frac{3}{2} + 1 + \frac{5}{2} + 1 + \frac{5}{2} + 3 + \frac{5}{2} + 2 + \frac{2}{3} + 1 + 2 + 2 + 2 + \frac{1}{2} + 1 + 1 + 1 + 2 + \frac{2}{3} + 1 + 2 + 1) \\ &= (21.7, 28.233, 36.5) \end{aligned}$$

و لذا مقدار $\left[\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m M_{gi}^j\right]^{-1}$ برابر است با:

$$\left[\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m M_{gi}^j\right]^{-1} = \left(\frac{1}{36.5}, \frac{1}{28.233}, \frac{1}{21.7}\right) = (0.0274, 0.0354, 0.04608)$$

S_i برای هر یک از سطرهای ماتریس مقایسه زوجی برابر است با:

$$S_1 (2.9, 3.833, 5.167) \otimes (0.0274, 0.0354, 0.04608) = (0.079, 0.136, 0.238)$$

$$S_2 (7.5, 9.5, 11.5) \otimes (0.0274, 0.0354, 0.04608) = (0.205, 0.336, 0.530)$$

$$S_3 (4.4, 6.7, 6.667) \otimes (0.0274, 0.0354, 0.04608) = (0.121, 0.213, 0.353)$$

$$S_4 (3.3, 7.33, 5.5) \otimes (0.0274, 0.0354, 0.04608) = (0.082, 0.132, 0.253)$$

$$S_5 (3.9, 5.167, 6.667) \otimes (0.0274, 0.0354, 0.04608) = (0.107, 0.183, 0.307)$$

درجه بزرگی هر یک از مقادیر S_i نسبت به همدیگر به شرح زیر خواهد بود:

$V(S_1 \geq S_2) = 0.14$	$V(S_1 \geq S_3) = 0.61$	$V(S_1 \geq S_4) = 1$	$V(S_1 \geq S_5) = 0.74$
$V(S_2 \geq S_1) = 1$	$V(S_2 \geq S_3) = 1$	$V(S_2 \geq S_4) = 1$	$V(S_2 \geq S_5) = 1$
$V(S_3 \geq S_1) = 1$	$V(S_3 \geq S_2) = 0.54$	$V(S_3 \geq S_4) = 1$	$V(S_3 \geq S_5) = 1$
$V(S_4 \geq S_1) = 0.98$	$V(S_4 \geq S_2) = 0.19$	$V(S_4 \geq S_3) = 0.62$	$V(S_4 \geq S_5) = 0.74$
$V(S_5 \geq S_1) = 1$	$V(S_5 \geq S_2) = 0.4$	$V(S_5 \geq S_3) = 0.86$	$V(S_5 \geq S_4) = 1$

با توجه به مقادیر S_i نسبت به همدیگر، وزن نرمال نشده معیارها در ماتریس‌های مقایسه زوجی برابر است با:

وزن نرمال نشده	وزن نرمال شده	
۰/۱۴	۰/۰۶۲	C ₁
۱	۰/۴۴	C ₂
۰/۵۴	۰/۲۳۹	C ₃
۰/۱۹	۰/۰۸۴	C ₄
۰/۴۰	۰/۱۷۵	C ₅

سایر مراحل روش مشابه روش تحلیل سلسله مراتبی کلاسیک خواهد بود.

۵-۱۰- تعیین روش مناسب گازکشی معدن رضی با استفاده از روش تحلیل سلسله مراتبی

فازی

چنانچه در مجموعه بخش‌های قبلی اشاره شد با بررسی آخرین منابع علمی از ۹ پارامتر مهم که در زیر آورده شده است استفاده شده است که این پارامترها عبارتند از:

P₁: نفوذپذیری

P₂: جریان آب (رطوبت)

P₃: ناپیوستگی‌ها (گسل‌ها)

P₄: گسترده‌گی زغال سنگ

P₅: نوع زغال سنگ

P₆: گاز محتوی

P₇: عمق قرارگیری

P₈: میزان ذخیره

P₉: ضخامت لایه زغال سنگ

همچنین با توجه به مطالب ذکر شده در فصل سوم و با توجه به موقعیت جغرافیایی محل مورد مطالعه گزینه‌های قابل کاربرد در این منطقه عبارتند از:

A₁: پیش زهکشی با گمانه قائم از سطح زمین

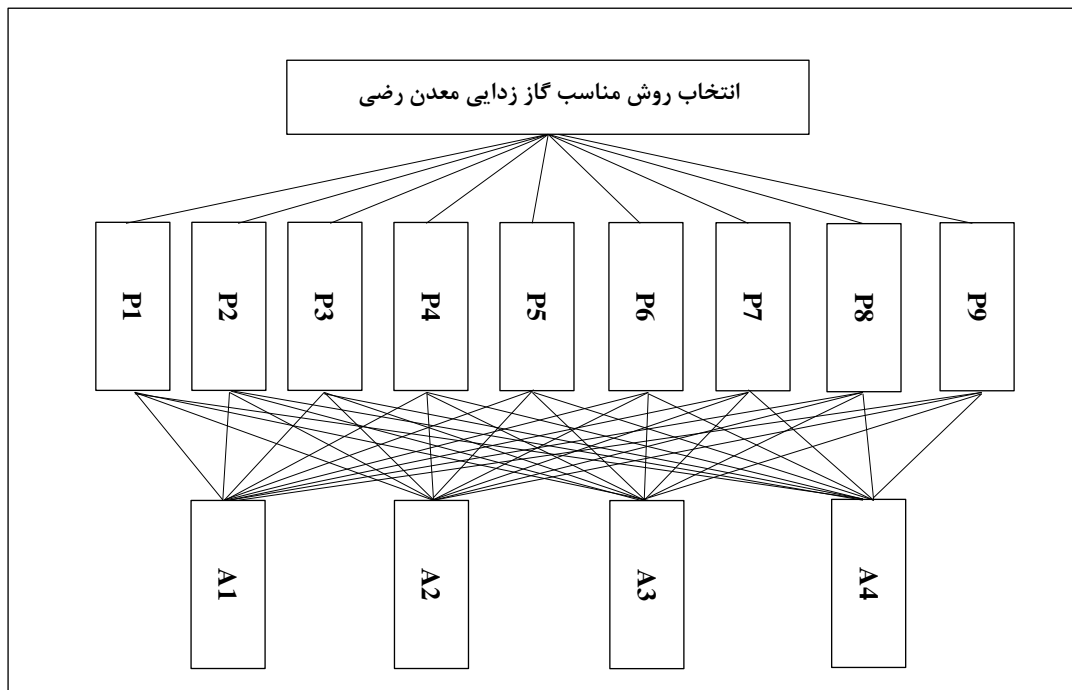
A₂: پیش زهکشی با گمانه افقی از داخل لایه

A₃: پیش زهکشی با استفاده از حفاری جهت‌دار از سطح زمین به داخل لایه

A₄: پیش زهکشی با گمانه‌های تقاطعی

در مرحله اول از روش تحلیل سلسله مراتبی فازی باید نمودار سلسله مراتبی مسئله رسم شود که نمودار سلسله مراتبی مذکور در شکل ۵-۱۱ رسم شده است.

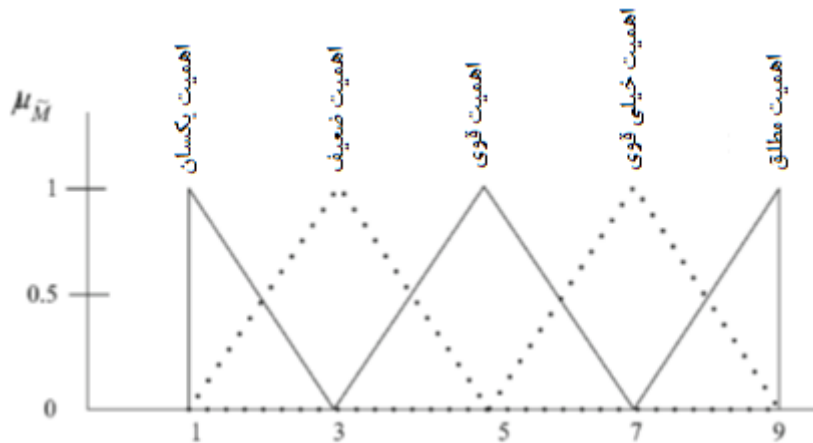
در مرحله دوم از روش تحلیل سلسله مراتبی فازی اعداد فازی به منظور انجام مقایسه‌های زوجی انجام شده است که در جدول ۵-۹ و شکل ۵-۱۲ آورده شده است.



شکل ۵-۱۱: نمودار سلسله مراتبی انتخاب روش مناسب گازکشی معدن رضی با ۹ پارامتر و ۴ گزینه

جدول ۵-۹: اعداد فازی تعریف شده در روش تحلیل سلسله مراتبی فازی مسئله گازکشی معدن رضی

عدد فازی	تعریف	مقیاس فازی مثلثی
۱	دقیقاً مساوی	(1,1,1)
$\tilde{1}$	اهمیت یکسان	(1,1,3)
$\tilde{3}$	اهمیت ضعیف	(1,3,5)
$\tilde{5}$	اهمیت قوی	(3,5,7)
$\tilde{7}$	اهمیت خیلی قوی	(5,7,9)
$\tilde{9}$	اهمیت مطلق	(7,9,9)



شکل ۵-۹: تابع عضویت فازی برای متغیرهای زبانی در روش تحلیل سلسله مراتبی فازی مسئله گازکشی معدن رضی

در مرحله سوم و به منظور تشکیل ماتریس مقایسه زوجی (\tilde{A}) با به کارگیری اعداد فازی تعریف شده در جدول ۵-۹ برای انتخاب نهایی یک گروه دو نفره تعیین شده است. از این گروه خواسته شد تا اهمیت هر یک از معیارها از دیدگاه هدف را با استفاده از جدول ۵-۱۰ و اهمیت هر یک از گزینه‌ها از دیدگاه معیارها را با استفاده از جدول ۵-۱۱ تکمیل کنند که نتایج آن در جدول‌های ۵-۱۲ تا ۵-۱۵ آورده شده است.

جدول ۵-۱۰: اهمیت هر یک از معیارها از دیدگاه هدف

اهمیت هر یک از معیارها از دیدگاه هدف					
بدون اهمیت ($\tilde{1}$)	کم اهمیت ($\tilde{3}$)	اهمیت متوسط ($\tilde{5}$)	با اهمیت ($\tilde{7}$)	بسیار با اهمیت ($\tilde{9}$)	
					نفوذپذیری (میلی داری)
					جریان آب (رطوبت %)
					ناپیوستگی‌ها (گسل‌ها)
					گسترده‌گی زغال سنگ
					نوع زغال سنگ
					گاز محتوی (m ³ / ton)
					عمق قرارگیری (متر)
					میزان ذخیره (میلیون تن)
					ضخامت لایه زغال سنگ

جدول ۵-۱۱: اهمیت هر یک از گزینه‌ها از دیدگاه معیارها

معیارها								اهمیت هر یک از گزینه‌ها از دیدگاه معیارها		
ضخامت لایه زغال سنگ	میزان ذخیره	عمق قرارگیری	گاز محتوی	نوع زغال-سنگ	گسترده‌گی زغال-سنگ	ناپیوستگی‌ها (گسل‌ها)	جریان آب (رطوبت %)			نفوذپذیری
									پیش زهکشی با گمانه قائم از سطح زمین	گزینه‌ها
									پیش زهکشی با گمانه افقی از داخل لایه	
									پیش زهکشی با استفاده از حفاری جهت‌دار از سطح زمین به داخل لایه	
									پیش زهکشی با گمانه‌های تقاطعی	

جدول ۵-۱۲: اهمیت هر یک از معیارها از دیدگاه هدف از دیدگاه متخصص ۱

اهمیت هر یک از معیارها از دیدگاه هدف از دیدگاه متخصص ۱					
بدون اهمیت (1)	کم اهمیت (3)	اهمیت متوسط (5)	با اهمیت (7)	بسیار با اهمیت (9)	
			*		نفوذپذیری (میلی داریسی)
		*			جریان آب (رطوبت %)
		*			ناپیوستگی‌ها (گسل‌ها)
		*			گسترده‌گی زغال سنگ
				*	نوع زغال سنگ
				*	گاز محتوی (m3/ ton)
			*		عمق قرارگیری (متر)
			*		میزان ذخیره (میلیون تن)
			*		ضخامت لایه زغال سنگ

جدول ۵-۱۳: اهمیت هر یک از معیارها از دیدگاه هدف از دیدگاه متخصص ۲

اهمیت هر یک از معیارها از دیدگاه هدف از دیدگاه متخصص ۲					
بدون اهمیت (1)	کم اهمیت (3)	اهمیت متوسط (5)	با اهمیت (7)	بسیار با اهمیت (9)	
				*	نفوذپذیری (میلی داریسی)
		*			جریان آب (رطوبت %)
			*		ناپیوستگی‌ها (گسل‌ها)
				*	گسترده‌گی زغال سنگ
				*	نوع زغال سنگ
				*	گاز محتوی (m3/ ton)
				*	عمق قرارگیری (متر)
			*		میزان ذخیره (میلیون تن)
				*	ضخامت لایه زغال سنگ

جدول ۵-۱۴: اهمیت هر یک از گزینه‌ها از دیدگاه معیارها از دیدگاه متخصص ۱

معیارها									اهمیت هر یک از گزینه‌ها از دیدگاه معیارها از دیدگاه متخصص ۱
ضخامت لایه زغال-سنگ	میزان ذخیره	عمق قرارگیری	گاز محتوی	نوع زغال-سنگ	گسترده‌گی زغال سنگ	ناپیوستگی‌ها (گسل‌ها)	جریان آب (رطوبت %)	نفوذپذیری	
9	9	9	7	5	5	9	7	9	پیش زهکشی با گمانه قائم از سطح زمین
3	5	7	7	5	5	3	7	7	پیش زهکشی با گمانه افقی از داخل لایه
5	5	7	5	3	9	7	5	7	پیش زهکشی با استفاده از حفاری جهت‌دار از سطح زمین به داخل لایه
5	7	7	7	5	5	5	7	7	پیش زهکشی با گمانه‌های تقاطعی

جدول ۵-۱۵: اهمیت هر یک از گزینه‌ها از دیدگاه معیارها از دیدگاه متخصص ۲

معیارها									اهمیت هر یک از گزینه‌ها از دیدگاه معیارها از دیدگاه متخصص ۲
ضخامت لایه زغال سنگ	میزان ذخیره	عمق قرارگیری	گاز محتوی	نوع زغال-سنگ	گسترده‌گی زغال-سنگ	ناپیوستگی‌ها (گسل‌ها)	جریان آب (رطوبت %)	نفوذپذیری	
9	9	9	5	5	9	5	7	9	پیش زهکشی با گمانه قائم از سطح زمین
3	7	3	9	3	3	3	9	9	پیش زهکشی با گمانه افقی از داخل لایه
7	7	7	5	1	9	9	7	9	پیش زهکشی با استفاده از حفاری جهت‌دار از سطح زمین به داخل لایه
7	5	3	3	3	7	9	7	5	پیش زهکشی با گمانه‌های تقاطعی

بر اساس نتایج حاصل از گروه تصمیم‌گیری، ماتریس‌های مقایسه زوجی اهمیت هر یک از معیارها از دیدگاه هدف و اهمیت هر یک از گزینه‌ها از دیدگاه معیارها از دیدگاه متخصص ۱ و ۲ تشکیل شده است که در جدول‌های ۵-۱۶ تا ۵-۳۵ آورده شده است.

جدول ۵-۱۶: ماتریس مقایسه زوجی اهمیت هر یک از معیارها از دیدگاه هدف از دیدگاه متخصص ۱

	P1			P2			P3			P4			P5			P6			P7			P8			P9		
P1	1.00	1.00	1.00	0.71	1.40	3.00	0.71	1.40	3.00	0.71	1.40	3.00	0.56	0.78	1.29	0.56	0.78	1.29	0.56	1.00	1.80	0.56	1.00	1.80	0.56	1.00	1.80
P2	0.33	0.71	1.40	1.00	1.00	1.00	0.43	1.00	2.33	0.43	1.00	2.33	0.33	0.56	1.00	0.33	0.56	1.00	0.33	0.71	1.40	0.33	0.71	1.40	0.33	0.71	1.40
P3	0.33	0.71	1.40	0.43	1.00	2.33	1.00	1.00	1.00	0.43	1.00	2.33	0.33	0.56	1.00	0.33	0.56	1.00	0.33	0.71	1.40	0.33	0.71	1.40	0.33	0.71	1.40
P4	0.33	0.71	1.40	0.43	1.00	2.33	0.43	1.00	2.33	1.00	1.00	1.00	0.33	0.56	1.00	0.33	0.56	1.00	0.33	0.71	1.40	0.33	0.71	1.40	0.33	0.71	1.40
P5	0.78	1.29	1.80	1.00	1.80	3.00	1.00	1.80	3.00	1.00	1.80	3.00	1.00	1.00	1.00	0.78	1.00	1.29	0.78	1.29	1.80	0.78	1.29	1.80	0.78	1.29	1.80
P6	0.78	1.29	1.80	1.00	1.80	3.00	1.00	1.80	3.00	1.00	1.80	3.00	0.78	1.00	1.29	1.00	1.00	1.00	0.78	1.29	1.80	0.78	1.29	1.80	0.78	1.29	1.80
P7	0.56	1.00	1.80	0.71	1.40	3.00	0.71	1.40	3.00	0.71	1.40	3.00	0.56	0.78	1.29	0.56	0.78	1.29	1.00	1.00	1.00	0.56	1.00	1.80	0.56	1.00	1.80
P8	0.56	1.00	1.80	0.71	1.40	3.00	0.71	1.40	3.00	0.71	1.40	3.00	0.56	0.78	1.29	0.56	0.78	1.29	0.56	1.00	1.80	1.00	1.00	1.00	0.56	1.00	1.80
P9	0.56	1.00	1.80	0.71	1.40	3.00	0.71	1.40	3.00	0.71	1.40	3.00	0.56	0.78	1.29	0.56	0.78	1.29	0.56	1.00	1.80	0.56	1.00	1.80	1.00	1.00	1.00

جدول ۵-۱۷: ماتریس مقایسه زوجی اهمیت هر یک از معیارها از دیدگاه هدف از دیدگاه متخصص ۲

	P1			P2			P3			P4			P5			P6			P7			P8			P9		
P1	1.00	1.00	1.00	1.00	1.80	3.00	0.78	1.29	1.80	0.78	1.00	1.29	0.78	1.00	1.29	0.78	1.00	1.29	0.78	1.00	1.29	0.78	1.29	1.80	0.78	1.00	1.29
P2	0.33	0.56	1.00	1.00	1.00	1.00	0.33	0.71	1.40	0.33	0.56	1.00	0.33	0.56	1.00	0.33	0.56	1.00	0.33	0.56	1.00	0.33	0.71	1.40	0.33	0.56	1.00
P3	0.56	0.78	1.29	0.71	1.40	3.00	1.00	1.00	1.00	0.56	0.78	1.29	0.56	0.78	1.29	0.56	0.78	1.29	0.56	0.78	1.29	0.56	1.00	1.80	0.56	1.00	1.80
P4	0.78	1.00	1.29	1.00	1.80	3.00	0.78	1.29	1.80	1.00	1.00	1.00	0.78	1.00	1.29	0.78	1.00	1.29	0.78	1.00	1.29	0.78	1.29	1.80	0.78	1.00	1.29
P5	0.78	1.00	1.29	1.00	1.80	3.00	0.78	1.29	1.80	0.78	1.00	1.29	1.00	1.00	1.00	0.78	1.00	1.29	0.78	1.00	1.29	0.78	1.29	1.80	0.78	1.00	1.29
P6	0.78	1.00	1.29	1.00	1.80	3.00	0.78	1.29	1.80	0.78	1.00	1.29	0.78	1.00	1.29	1.00	1.00	1.00	0.78	1.00	1.29	0.78	1.29	1.80	0.78	1.00	1.29
P7	0.78	1.00	1.29	1.00	1.80	3.00	0.78	1.29	1.80	0.78	1.00	1.29	0.78	1.00	1.29	0.78	1.00	1.29	1.00	1.00	1.00	0.78	1.29	1.80	0.78	1.00	1.29
P8	0.56	0.78	1.29	0.71	1.40	3.00	0.56	1.00	1.80	0.56	0.78	1.29	0.56	0.78	1.29	0.56	0.78	1.29	0.56	0.78	1.29	1.00	1.00	1.00	0.56	0.78	1.29
P9	0.78	1.00	1.29	1.00	1.80	3.00	0.56	1.00	1.80	0.78	1.00	1.29	0.78	1.00	1.29	0.78	1.00	1.29	0.78	1.00	1.29	0.78	1.29	1.80	1.00	1.00	1.00

جدول ۵-۱۸: ماتریس مقایسه زوجی اهمیت هر یک از گزینه‌ها از دیدگاه معیار نفوذپذیری از دیدگاه متخصص ۱

P1	A1			A2			A3			A4		
A1	1.00	1.00	1.00	0.78	1.29	1.80	0.78	1.29	1.80	0.78	1.29	1.80
A2	0.56	0.78	1.29	1.00	1.00	1.00	0.56	1.00	1.80	0.56	1.00	1.80
A3	0.56	0.78	1.29	0.56	1.00	1.80	1.00	1.00	1.00	0.56	1.00	1.80
A4	0.56	0.78	1.29	0.56	1.00	1.80	0.56	1.00	1.80	1.00	1.00	1.00

جدول ۵-۱۹: ماتریس مقایسه زوجی اهمیت هر یک از گزینه‌ها از دیدگاه معیار نفوذپذیری از دیدگاه متخصص ۲

P1	A1			A2			A3			A4		
A1	1.00	1.00	1.00	0.78	1.00	1.29	0.78	1.00	1.29	1.00	1.80	3.00
A2	0.78	1.00	1.29	1.00	1.00	1.00	0.78	1.00	1.29	1.00	1.80	3.00
A3	0.78	1.00	1.29	0.78	1.00	1.29	1.00	1.00	1.00	1.00	1.80	3.00
A4	0.33	0.56	1.00	0.33	0.56	1.00	0.33	0.56	1.00	1.00	1.00	1.00

جدول ۵-۲۰: ماتریس مقایسه زوجی اهمیت هر یک از گزینه‌ها از دیدگاه معیار جریان آب (رطوبت) از دیدگاه متخصص ۱

P2	A1			A2			A3			A4		
A1	1.00	1.00	1.00	0.56	1.00	1.80	0.71	1.40	3.00	0.56	1.00	1.80
A2	0.56	1.00	1.80	1.00	1.00	1.00	0.71	1.40	3.00	0.56	1.00	1.80
A3	0.33	0.71	1.40	0.33	0.71	1.40	1.00	1.00	1.00	0.33	0.71	1.40
A4	0.56	1.00	1.80	0.56	1.00	1.80	0.71	1.40	3.00	1.00	1.00	1.00

جدول ۵-۲۱: ماتریس مقایسه زوجی اهمیت هر یک از گزینه‌ها از دیدگاه معیار جریان آب (رطوبت) از دیدگاه متخصص ۲

P2	A1			A2			A3			A4		
A1	1.00	1.00	1.00	0.56	0.78	1.29	0.56	1.00	1.80	0.56	1.00	1.80
A2	0.78	1.29	1.80	1.00	1.00	1.00	0.78	1.29	1.80	0.78	1.29	1.80
A3	0.56	1.00	1.80	0.56	0.78	1.29	1.00	1.00	1.00	0.56	1.00	1.80
A4	0.56	1.00	1.80	0.56	0.78	1.29	0.56	1.00	1.80	1.00	1.00	1.00

جدول ۵-۲۲: ماتریس مقایسه زوجی اهمیت هر یک از گزینه‌ها از دیدگاه معیار ناپیوستگی‌ها (گسل‌ها) از دیدگاه متخصص ۱

P3	A1			A2			A3			A4		
A1	1.00	1.00	1.00	1.40	3.00	9.00	0.78	1.29	1.80	1.00	1.80	3.00
A2	0.11	0.33	0.71	1.00	1.00	1.00	0.11	0.43	1.00	0.14	0.60	1.67
A3	0.56	0.78	1.29	1.00	2.33	9.00	1.00	1.00	1.00	0.71	1.40	3.00
A4	0.33	0.56	1.00	0.60	1.67	7.00	0.33	0.71	1.40	1.00	1.00	1.00

جدول ۵-۲۳: ماتریس مقایسه زوجی اهمیت هر یک از گزینه‌ها از دیدگاه معیار ناپیوستگی‌ها (گسل‌ها) از دیدگاه متخصص ۲

P3	A1			A2			A3			A4		
A1	1.00	1.00	1.00	0.60	1.67	7.00	0.33	0.56	1.00	0.33	0.56	1.00
A2	0.14	0.60	1.67	1.00	1.00	1.00	0.11	0.33	0.71	0.11	0.33	0.71
A3	1.00	1.80	3.00	1.40	3.00	9.00	1.00	1.00	1.00	0.78	1.00	1.29
A4	1.00	1.80	3.00	1.40	3.00	9.00	0.78	1.00	1.29	1.00	1.00	1.00

جدول ۵-۲۴: ماتریس مقایسه زوجی اهمیت هر یک از گزینه‌ها از دیدگاه معیار گستردگی زغال سنگ از دیدگاه متخصص ۱

P4	A1			A2			A3			A4		
A1	1.00	1.00	1.00	0.43	1.00	2.33	0.33	0.56	1.00	0.43	1.00	2.33
A2	0.43	1.00	2.33	1.00	1.00	1.00	0.33	0.56	1.00	0.43	1.00	2.33
A3	1.00	1.80	3.00	1.00	1.80	3.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.80	3.00
A4	0.43	1.00	2.33	0.43	1.00	2.33	0.33	0.56	1.00	1.00	1.00	1.00

جدول ۵-۲۵: ماتریس مقایسه زوجی اهمیت هر یک از گزینه‌ها از دیدگاه معیار گستردگی زغال سنگ از دیدگاه متخصص ۲

P4	A1			A2			A3			A4		
A1	1.00	1.00	1.00	1.40	3.00	9.00	0.78	1.00	1.29	0.78	1.29	1.80
A2	0.11	0.33	0.71	1.00	1.00	1.00	0.11	0.33	0.71	0.11	0.43	1.00
A3	0.78	1.00	1.29	1.40	3.00	9.00	1.00	1.00	1.00	0.78	1.29	1.80
A4	0.56	0.78	1.29	1.00	2.33	9.00	0.56	0.78	1.29	1.00	1.00	1.00

جدول ۵-۲۶: ماتریس مقایسه زوجی اهمیت هر یک از گزینه‌ها از دیدگاه معیار نوع زغال سنگ از دیدگاه متخصص ۱

P5	A1			A2			A3			A4		
A1	1.00	1.00	1.00	0.43	1.00	2.33	0.60	1.67	7.00	0.43	1.00	2.33
A2	0.43	1.00	2.33	1.00	1.00	1.00	0.60	1.67	7.00	0.43	1.00	2.33
A3	0.14	0.60	1.67	0.14	0.60	1.67	1.00	1.00	1.00	0.14	0.60	1.67
A4	0.43	1.00	2.33	0.43	1.00	2.33	0.60	1.67	7.00	1.00	1.00	1.00

جدول ۵-۲۷: ماتریس مقایسه زوجی اهمیت هر یک از گزینه‌ها از دیدگاه معیار نوع زغال سنگ از دیدگاه متخصص ۲

P5	A1			A2			A3			A4		
A1	1.00	1.00	1.00	0.60	1.67	7.00	1.00	5.00	7.00	0.60	1.67	7.00
A2	0.14	0.60	1.67	1.00	1.00	1.00	0.33	3.00	5.00	0.20	1.00	5.00
A3	0.14	0.20	1.00	0.20	0.33	3.00	1.00	1.00	1.00	0.20	0.33	3.00
A4	0.14	0.60	1.67	0.20	1.00	5.00	0.33	3.00	5.00	1.00	1.00	1.00

جدول ۵-۲۸: ماتریس مقایسه زوجی اهمیت هر یک از گزینه‌ها از دیدگاه معیار گاز محتوی از دیدگاه متخصص ۱

P6	A1			A2			A3			A4		
A1	1.00	1.00	1.00	0.56	1.00	1.80	0.71	1.40	3.00	0.56	1.00	1.80
A2	0.56	1.00	1.80	1.00	1.00	1.00	0.71	1.40	3.00	0.56	1.00	1.80
A3	0.33	0.71	1.40	0.33	0.71	1.40	1.00	1.00	1.00	0.33	0.71	1.40
A4	0.56	1.00	1.80	0.56	1.00	1.80	0.71	1.40	3.00	1.00	1.00	1.00

جدول ۵-۲۹: ماتریس مقایسه زوجی اهمیت هر یک از گزینه‌ها از دیدگاه معیار گاز محتوی از دیدگاه متخصص ۲

P6	A1			A2			A3			A4		
A1	1.00	1.00	1.00	0.33	0.56	1.00	0.43	1.00	2.33	0.60	1.67	7.00
A2	1.00	1.80	3.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.80	3.00	1.40	3.00	9.00
A3	0.43	1.00	2.33	0.33	0.56	1.00	1.00	1.00	1.00	0.60	1.67	7.00
A4	0.14	0.60	1.67	0.11	0.33	0.71	0.14	0.60	1.67	1.00	1.00	1.00

جدول ۵-۳۰: ماتریس مقایسه زوجی اهمیت هر یک از گزینه‌ها از دیدگاه معیار عمق قرارگیری از دیدگاه متخصص ۱

P7	A1			A2			A3			A4		
A1	1.00	1.00	1.00	0.78	1.29	1.80	0.78	1.29	1.80	0.78	1.29	1.80
A2	0.56	0.78	1.29	1.00	1.00	1.00	0.56	1.00	1.80	0.56	1.00	1.80
A3	0.56	0.78	1.29	0.56	1.00	1.80	1.00	1.00	1.00	0.56	1.00	1.80
A4	0.56	0.78	1.29	0.56	1.00	1.80	0.56	1.00	1.80	1.00	1.00	1.00

جدول ۵-۳۱: ماتریس مقایسه زوجی اهمیت هر یک از گزینه‌ها از دیدگاه معیار عمق قرارگیری از دیدگاه متخصص ۲

P7	A1			A2			A3			A4		
A1	1.00	1.00	1.00	1.40	3.00	9.00	0.78	1.29	1.80	1.40	3.00	9.00
A2	0.11	0.33	0.71	1.00	1.00	1.00	0.11	0.43	1.00	0.20	1.00	5.00
A3	0.56	0.78	1.29	1.00	2.33	9.00	1.00	1.00	1.00	1.00	2.33	9.00
A4	0.11	0.33	0.71	0.20	1.00	5.00	0.11	0.43	1.00	1.00	1.00	1.00

جدول ۵-۳۲: ماتریس مقایسه زوجی اهمیت هر یک از گزینه‌ها از دیدگاه معیار میزان ذخیره از دیدگاه متخصص ۱

P8	A1			A2			A3			A4		
A1	1.00	1.00	1.00	1.00	1.80	3.00	1.00	1.80	3.00	0.78	1.29	1.80
A2	0.33	0.56	1.00	1.00	1.00	1.00	0.43	1.00	2.33	0.33	0.71	1.40
A3	0.33	0.56	1.00	0.43	1.00	2.33	1.00	1.00	1.00	0.33	0.71	1.40
A4	0.56	0.78	1.29	0.71	1.40	3.00	0.71	1.40	3.00	1.00	1.00	1.00

جدول ۵-۳۳: ماتریس مقایسه زوجی اهمیت هر یک از گزینه‌ها از دیدگاه معیار میزان ذخیره از دیدگاه متخصص ۲

P8	A1			A2			A3			A4		
A1	1.00	1.00	1.00	0.78	1.29	1.80	0.78	1.29	1.80	1.00	1.80	3.00
A2	0.56	0.78	1.29	1.00	1.00	1.00	0.56	1.00	1.80	0.71	1.40	3.00
A3	0.56	0.78	1.29	0.56	1.00	1.80	1.00	1.00	1.00	0.71	1.40	3.00
A4	0.33	0.56	1.00	0.33	0.71	1.40	0.33	0.71	1.40	1.00	1.00	1.00

جدول ۵-۳۴: ماتریس مقایسه زوجی اهمیت هر یک از گزینه‌ها از دیدگاه معیار ضخامت لایه زغال سنگ از دیدگاه متخصص ۱

P9	A1			A2			A3			A4		
A1	1.00	1.00	1.00	1.40	3.00	9.00	1.00	1.80	3.00	1.00	1.80	3.00
A2	0.11	0.33	0.71	1.00	1.00	1.00	0.14	0.60	1.67	0.14	0.60	1.67
A3	0.33	0.56	1.00	0.60	1.67	7.00	1.00	1.00	1.00	0.43	1.00	2.33
A4	0.33	0.56	1.00	0.60	1.67	7.00	0.43	1.00	2.33	1.00	1.00	1.00

جدول ۵-۳۵: ماتریس مقایسه زوجی اهمیت هر یک از گزینه‌ها از دیدگاه معیار ضخامت لایه زغال سنگ از دیدگاه متخصص ۲

P9	A1			A2			A3			A4		
A1	1.00	1.00	1.00	1.40	3.00	9.00	0.78	1.29	1.80	0.78	1.29	1.80
A2	0.11	0.33	0.71	1.00	1.00	1.00	0.11	0.43	1.00	0.11	0.43	1.00
A3	0.56	0.78	1.29	1.00	2.33	9.00	1.00	1.00	1.00	0.56	1.00	1.80
A4	0.56	0.78	1.29	1.00	2.33	9.00	0.56	1.00	1.80	1.00	1.00	1.00

در مرحله بعد میانگین هندسی نظر افراد به دست آمده است و پس از آن بردارهای وزن با استفاده از روش

تحلیل سلسله مراتبی فازی تعیین شده است که این محاسبات در ادامه آمده است.

جدول ۵-۳۶: میانگین هندسی ماتریس مقایسه زوجی اهمیت هر یک از معیارها از دیدگاه هدف از دیدگاه متخصص ۱ و ۲ بر اساس جدول های ۵-۱۶ و ۵-۱۷

	P1			P2			P3			P4			P5			P6			P7			P8			P9			$\sum_{j=1}^m M_{gi}^j$		
P1	1.00	1.00	1.00	0.85	1.59	3.00	0.75	1.34	2.32	0.75	1.18	1.96	0.66	0.88	1.29	0.66	0.88	1.29	0.66	1.00	1.52	0.66	1.13	1.80	0.66	1.00	1.52	6.62	10.01	15.70
P2	0.33	0.63	1.18	1.00	1.00	1.00	0.38	0.85	1.81	0.38	0.75	1.53	0.33	0.56	1.00	0.33	0.56	1.00	0.33	0.63	1.18	0.33	0.71	1.40	0.33	0.63	1.18	3.76	6.31	11.28
P3	0.43	0.75	1.34	0.55	1.18	2.65	1.00	1.00	1.00	0.49	0.88	1.73	0.43	0.66	1.13	0.43	0.66	1.13	0.43	0.75	1.34	0.43	0.85	1.59	0.43	0.85	1.59	4.62	7.56	13.50
P4	0.51	0.85	1.34	0.65	1.34	2.65	0.58	1.13	2.05	1.00	1.00	1.00	0.51	0.75	1.13	0.51	0.75	1.13	0.51	0.85	1.34	0.51	0.96	1.59	0.51	0.85	1.34	5.29	8.46	13.58
P5	0.78	1.13	1.52	1.00	1.80	3.00	0.88	1.52	2.32	0.88	1.34	1.96	1.00	1.00	1.00	0.78	1.00	1.29	0.78	1.13	1.52	0.78	1.29	1.80	0.78	1.13	1.52	7.65	11.35	15.94
P6	0.78	1.13	1.52	1.00	1.80	3.00	0.88	1.52	2.32	0.88	1.34	1.96	0.78	1.00	1.29	1.00	1.00	1.00	0.78	1.13	1.52	0.78	1.29	1.80	0.78	1.13	1.52	7.65	11.35	15.94
P7	0.66	1.00	1.52	0.85	1.59	3.00	0.75	1.34	2.32	0.75	1.18	1.96	0.66	0.88	1.29	0.66	0.88	1.29	1.00	1.00	1.00	0.66	1.13	1.80	0.66	1.00	1.52	6.62	10.01	15.70
P8	0.56	0.88	1.52	0.71	1.40	3.00	0.63	1.18	2.32	0.63	1.04	1.96	0.56	0.78	1.29	0.56	0.78	1.29	0.56	0.88	1.52	1.00	1.00	1.00	0.56	0.88	1.52	5.75	8.83	15.42
P9	0.66	1.00	1.52	0.85	1.59	3.00	0.63	1.18	2.32	0.75	1.18	1.96	0.66	0.88	1.29	0.66	0.88	1.29	0.66	1.00	1.52	0.66	1.13	1.80	1.00	1.00	1.00	6.51	9.85	15.70

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m M_{gi}^j = (54.48, 83.73, 132.77) \quad \left[\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m M_{gi}^j \right]^{-1} = (0.0075, 0.0119, 0.0184)$$

$$\begin{aligned}
 S_1 &= (6.62, 10.01, 15.70) \otimes (0.0075, 0.0119, 0.0184) = (0.050, 0.120, 0.288) \\
 S_2 &= (3.76, 6.31, 11.28) \otimes (0.0075, 0.0119, 0.0184) = (0.028, 0.075, 0.207) \\
 S_3 &= (4.62, 7.56, 13.50) \otimes (0.0075, 0.0119, 0.0184) = (0.035, 0.090, 0.248) \\
 S_4 &= (5.29, 8.46, 13.58) \otimes (0.0075, 0.0119, 0.0184) = (0.040, 0.101, 0.249) \\
 S_5 &= (7.65, 11.35, 15.94) \otimes (0.0075, 0.0119, 0.0184) = (0.058, 0.136, 0.293) \\
 S_6 &= (7.65, 11.35, 15.94) \otimes (0.0075, 0.0119, 0.0184) = (0.058, 0.136, 0.293) \\
 S_7 &= (6.62, 10.01, 15.70) \otimes (0.0075, 0.0119, 0.0184) = (0.050, 0.120, 0.288) \\
 S_8 &= (5.75, 8.83, 15.42) \otimes (0.0075, 0.0119, 0.0184) = (0.043, 0.105, 0.283) \\
 S_9 &= (6.51, 9.85, 15.70) \otimes (0.0075, 0.0119, 0.0184) = (0.049, 0.118, 0.288)
 \end{aligned}$$

درجه بزرگی هریک از مقادیر S_i (پارامترها) نسبت به همدیگر

$V(S_1 \geq S_2) = 1$	$V(S_1 \geq S_3) = 1$	$V(S_1 \geq S_4) = 1$	$V(S_1 \geq S_5) = 0.94$
$V(S_1 \geq S_6) = 0.94$	$V(S_1 \geq S_7) = 1$	$V(S_1 \geq S_8) = 1$	$V(S_1 \geq S_9) = 1$
$V(S_2 \geq S_1) = 0.78$	$V(S_2 \geq S_3) = 0.92$	$V(S_2 \geq S_4) = 0.87$	$V(S_2 \geq S_5) = 0.71$
$V(S_2 \geq S_6) = 0.71$	$V(S_2 \geq S_7) = 0.78$	$V(S_2 \geq S_8) = 0.84$	$V(S_2 \geq S_9) = 0.79$
$V(S_3 \geq S_1) = 0.87$	$V(S_3 \geq S_2) = 1$	$V(S_3 \geq S_4) = 0.95$	$V(S_3 \geq S_5) = 0.81$
$V(S_3 \geq S_6) = 0.81$	$V(S_3 \geq S_7) = 0.87$	$V(S_3 \geq S_8) = 0.93$	$V(S_3 \geq S_9) = 0.88$
$V(S_4 \geq S_1) = 0.92$	$V(S_4 \geq S_2) = 1$	$V(S_4 \geq S_3) = 1$	$V(S_4 \geq S_5) = 0.85$
$V(S_4 \geq S_6) = 0.85$	$V(S_4 \geq S_7) = 0.92$	$V(S_4 \geq S_8) = 0.98$	$V(S_4 \geq S_9) = 0.92$
$V(S_5 \geq S_1) = 1$	$V(S_5 \geq S_2) = 1$	$V(S_5 \geq S_3) = 1$	$V(S_5 \geq S_4) = 1$
$V(S_5 \geq S_6) = 1$	$V(S_5 \geq S_7) = 1$	$V(S_5 \geq S_8) = 1$	$V(S_5 \geq S_9) = 1$
$V(S_6 \geq S_1) = 1$	$V(S_6 \geq S_2) = 1$	$V(S_6 \geq S_3) = 1$	$V(S_6 \geq S_4) = 1$
$V(S_6 \geq S_5) = 1$	$V(S_6 \geq S_7) = 1$	$V(S_6 \geq S_8) = 1$	$V(S_6 \geq S_9) = 1$
$V(S_7 \geq S_1) = 1$	$V(S_7 \geq S_2) = 1$	$V(S_7 \geq S_3) = 1$	$V(S_7 \geq S_4) = 1$
$V(S_7 \geq S_5) = 0.94$	$V(S_7 \geq S_6) = 0.94$	$V(S_7 \geq S_8) = 1$	$V(S_7 \geq S_9) = 1$
$V(S_8 \geq S_1) = 0.94$	$V(S_8 \geq S_2) = 1$	$V(S_8 \geq S_3) = 1$	$V(S_8 \geq S_4) = 1$
$V(S_8 \geq S_5) = 0.88$	$V(S_8 \geq S_6) = 0.88$	$V(S_8 \geq S_7) = 0.94$	$V(S_8 \geq S_9) = 0.95$
$V(S_9 \geq S_1) = 0.99$	$V(S_9 \geq S_2) = 1$	$V(S_9 \geq S_3) = 1$	$V(S_9 \geq S_4) = 1$
$V(S_9 \geq S_5) = 0.93$	$V(S_9 \geq S_6) = 0.93$	$V(S_9 \geq S_7) = 0.99$	$V(S_9 \geq S_8) = 1$

جدول ۵-۳۷: وزن نهایی معیارها از دیدگاه هدف

وزن نرمال شده	وزن نرمال نشده	معیار
0.117	0.94	P1
0.088	0.71	P2
0.100	0.81	P3
0.105	0.85	P4
0.124	1	P5
0.124	1	P6
0.117	0.94	P7
0.109	0.88	P8
0.115	0.93	P9

جدول ۵-۳۸: میانگین هندسی ماتریس مقایسه زوجی اهمیت هر یک از گزینه‌ها از دیدگاه معیار نفوذپذیری از دیدگاه

متخصص ۱ و ۲ بر اساس جدول‌های ۵-۱۸ و ۵-۱۹

	A1			A2			A3			A4			$\sum_{j=1}^m M_{gi}^j$		
A1	1.00	1.00	1.00	0.78	1.13	1.52	0.78	1.13	1.52	0.88	1.52	2.32	3.44	4.79	6.37
A2	0.66	0.88	1.29	1.00	1.00	1.00	0.66	1.00	1.52	0.75	1.34	2.32	3.06	4.22	6.13
A3	0.66	0.88	1.29	0.66	1.00	1.52	1.00	1.00	1.00	0.75	1.34	2.32	3.06	4.22	6.13
A4	0.43	0.66	1.13	0.43	0.75	1.34	0.43	0.75	1.34	1.00	1.00	1.00	2.29	3.15	4.82

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m M_{gi}^j = (11.85, 16.38, 23.45) \quad \left[\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m M_{gi}^j \right]^{-1} = (0.0427, 0.0610, 0.0844)$$

$$S_1 = (3.44, 4.79, 6.37) \otimes (0.0427, 0.0610, 0.0844) = (0.147, 0.292, 0.537)$$

$$S_2 = (3.06, 4.22, 6.13) \otimes (0.0427, 0.0610, 0.0844) = (0.131, 0.258, 0.517)$$

$$S_3 = (3.06, 4.22, 6.13) \otimes (0.0427, 0.0610, 0.0844) = (0.131, 0.258, 0.517)$$

$$S_4 = (2.29, 3.15, 4.82) \otimes (0.0427, 0.0610, 0.0844) = (0.098, 0.192, 0.407)$$

درجه بزرگی هر یک از مقادیر S_i (گزینه‌ها) نسبت به همدیگر

$$V(S_1 \geq S_2) = 1$$

$$V(S_1 \geq S_3) = 1$$

$$V(S_1 \geq S_4) = 1$$

$$V(S_2 \geq S_1) = 0.91$$

$$V(S_2 \geq S_3) = 1$$

$$V(S_2 \geq S_4) = 1$$

$$V(S_3 \geq S_1) = 0.91$$

$$V(S_3 \geq S_2) = 1$$

$$V(S_3 \geq S_4) = 1$$

$$V(S_4 \geq S_1) = 0.72$$

$$V(S_4 \geq S_2) = 0.81$$

$$V(S_4 \geq S_3) = 0.81$$

جدول ۵-۳۹: وزن نهایی گزینه‌ها از دیدگاه معیار نفوذپذیری

وزن نرمال شده	وزن نرمال نشده	گزینه
0.282	1	A1
0.257	0.91	A2
0.257	0.91	A3
0.203	0.72	A4

جدول ۵-۴۰: میانگین هندسی ماتریس مقایسه زوجی اهمیت هر یک از گزینه‌ها از دیدگاه معیار جریان آب (رطوبت) از

دیدگاه متخصص ۱ و ۲ بر اساس جدول‌های ۵-۲۰ و ۵-۲۱

	A1			A2			A3			A4			$\sum_{j=1}^m M_{gi}^j$		
A1	1.00	1.00	1.00	0.56	0.88	1.52	0.63	1.18	2.32	0.56	1.00	1.80	2.74	4.07	6.65
A2	0.66	1.13	1.80	1.00	1.00	1.00	0.75	1.34	2.32	0.66	1.13	1.80	3.06	4.61	6.92
A3	0.43	0.85	1.59	0.43	0.75	1.34	1.00	1.00	1.00	0.43	0.85	1.59	2.29	3.44	5.52
A4	0.56	1.00	1.80	0.56	0.88	1.52	0.63	1.18	2.32	1.00	1.00	1.00	2.74	4.07	6.65

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m M_{gi}^j = (10.83, 16.18, 25.73) \quad \left[\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m M_{gi}^j \right]^{-1} = (0.0389, 0.0618, 0.0923)$$

$$S_1 = (2.74, 4.07, 6.65) \otimes (0.0389, 0.0618, 0.0923) = (0.107, 0.251, 0.613)$$

$$S_2 = (3.06, 4.61, 6.92) \otimes (0.0389, 0.0618, 0.0923) = (0.119, 0.285, 0.639)$$

$$S_3 = (2.29, 3.44, 5.52) \otimes (0.0389, 0.0618, 0.0923) = (0.089, 0.212, 0.509)$$

$$S_4 = (2.74, 4.07, 6.65) \otimes (0.0389, 0.0618, 0.0923) = (0.107, 0.251, 0.613)$$

درجه بزرگی هر یک از مقادیر S_i (گزینه‌ها) نسبت به همدیگر

$$V(S_1 \geq S_2) = 0.94$$

$$V(S_1 \geq S_3) = 1$$

$$V(S_1 \geq S_4) = 1$$

$$V(S_2 \geq S_1) = 1$$

$$V(S_2 \geq S_3) = 1$$

$$V(S_2 \geq S_4) = 1$$

$$V(S_3 \geq S_1) = 0.91$$

$$V(S_3 \geq S_2) = 1$$

$$V(S_3 \geq S_4) = 0.91$$

$$V(S_4 \geq S_1) = 1$$

$$V(S_4 \geq S_2) = 0.94$$

$$V(S_4 \geq S_3) = 1$$

جدول ۵-۴۱: وزن نهایی گزینه‌ها از دیدگاه معیار جریان آب (رطوبت)

وزن نرمال شده	وزن نرمال نشده	گزینه
0.248	0.94	A1
0.264	1	A2
0.240	0.91	A3
0.248	0.94	A4

جدول ۵-۴۲: میانگین هندسی ماتریس مقایسه زوجی اهمیت هر یک از گزینه‌ها از دیدگاه معیار ناپیوستگی‌ها (گسل‌ها) از

دیدگاه متخصص ۱ و ۲ بر اساس جدول‌های ۵-۲۲ و ۵-۲۳

	A1			A2			A3			A4			$\sum_{j=1}^m M_{gi}^j$		
A1	1.00	1.00	1.00	0.92	2.24	7.94	0.51	0.85	1.34	0.58	1.00	1.73	3.00	5.08	12.01
A2	0.13	0.45	1.09	1.00	1.00	1.00	0.11	0.38	0.85	0.13	0.45	1.09	1.36	2.27	4.03
A3	0.75	1.18	1.96	1.18	2.65	9.00	1.00	1.00	1.00	0.75	1.18	1.96	3.67	6.01	13.93
A4	0.58	1.00	1.73	0.92	2.24	7.94	0.51	0.85	1.34	1.00	1.00	1.00	3.00	5.08	12.01

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m M_{gi}^j = (11.04, 18.45, 41.98) \quad \left[\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m M_{gi}^j \right]^{-1} = (0.0238, 0.0542, 0.0906)$$

$$S_1 = (3.00, 5.08, 12.01) \otimes (0.0238, 0.0542, 0.0906) = (0.072, 0.275, 1.088)$$

$$S_2 = (1.36, 2.27, 4.03) \otimes (0.0238, 0.0542, 0.0906) = (0.032, 0.123, 0.365)$$

$$S_3 = (3.67, 6.01, 13.93) \otimes (0.0238, 0.0542, 0.0906) = (0.088, 0.326, 1.261)$$

$$S_4 = (3.00, 5.08, 12.01) \otimes (0.0238, 0.0542, 0.0906) = (0.072, 0.275, 1.088)$$

درجه بزرگی هریک از مقادیر S_i (گزینه‌ها) نسبت به همدیگر

$$V(S_1 \geq S_2) = 1$$

$$V(S_1 \geq S_3) = 0.95$$

$$V(S_1 \geq S_4) = 1$$

$$V(S_2 \geq S_1) = 0.66$$

$$V(S_2 \geq S_3) = 0.58$$

$$V(S_2 \geq S_4) = 0.66$$

$$V(S_3 \geq S_1) = 1$$

$$V(S_3 \geq S_2) = 1$$

$$V(S_3 \geq S_4) = 1$$

$$V(S_4 \geq S_1) = 1$$

$$V(S_4 \geq S_2) = 1$$

$$V(S_4 \geq S_3) = 0.95$$

جدول ۵-۴۳: وزن نهایی گزینه‌ها از دیدگاه معیار ناپیوستگی‌ها (گسل‌ها)

گزینه	وزن نرمال نشده	وزن نرمال شده
A1	0.95	0.273
A2	0.58	0.167
A3	1	0.287
A4	0.95	0.273

جدول ۴۴-۵: میانگین هندسی ماتریس مقایسه زوجی اهمیت هر یک از گزینه‌ها از دیدگاه معیار گستردگی زغال سنگ از

دیدگاه متخصص ۱ و ۲ بر اساس جدول‌های ۲۴-۵ و ۲۵-۵

	A1			A2			A3			A4			$\sum_{j=1}^m M_{gi}^j$		
A1	1.00	1.00	1.00	0.77	1.73	4.58	0.51	0.75	1.13	0.58	1.13	2.05	2.86	4.61	8.77
A2	0.22	0.58	1.29	1.00	1.00	1.00	0.19	0.43	0.85	0.22	0.65	1.53	1.63	2.66	4.66
A3	0.88	1.34	1.96	1.18	2.32	5.20	1.00	1.00	1.00	0.88	1.52	2.32	3.95	6.19	10.48
A4	0.49	0.88	1.73	0.65	1.53	4.58	0.43	0.66	1.13	1.00	1.00	1.00	2.57	4.07	8.45

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m M_{gi}^j = (11.01, 17.53, 32.36) \quad \left[\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m M_{gi}^j \right]^{-1} = (0.0309, 0.0571, 0.0908)$$

$$S_1 = (2.86, 4.61, 8.77) \otimes (0.0309, 0.0571, 0.0908) = (0.088, 0.263, 0.796)$$

$$S_2 = (1.63, 2.66, 4.66) \otimes (0.0309, 0.0571, 0.0908) = (0.050, 0.152, 0.424)$$

$$S_3 = (3.95, 6.19, 10.48) \otimes (0.0309, 0.0571, 0.0908) = (0.122, 0.353, 0.952)$$

$$S_4 = (2.57, 4.07, 8.45) \otimes (0.0309, 0.0571, 0.0908) = (0.080, 0.232, 0.767)$$

درجه بزرگی هر یک از مقادیر S_i (گزینه‌ها) نسبت به همدیگر

$$V(S_1 \geq S_2) = 1$$

$$V(S_1 \geq S_3) = 0.88$$

$$V(S_1 \geq S_4) = 1$$

$$V(S_2 \geq S_1) = 0.75$$

$$V(S_2 \geq S_3) = 0.6$$

$$V(S_2 \geq S_4) = 0.81$$

$$V(S_3 \geq S_1) = 1$$

$$V(S_3 \geq S_2) = 1$$

$$V(S_3 \geq S_4) = 1$$

$$V(S_4 \geq S_1) = 0.96$$

$$V(S_4 \geq S_2) = 1$$

$$V(S_4 \geq S_3) = 0.84$$

جدول ۴۵-۵: وزن نهایی گزینه‌ها از دیدگاه معیار گستردگی زغال سنگ

وزن نرمال شده	وزن نرمال نشده	گزینه
0.265	0.88	A1
0.181	0.6	A2
0.301	1	A3
0.253	0.84	A4

جدول ۵-۴۶: میانگین هندسی ماتریس مقایسه زوجی اهمیت هر یک از گزینه‌ها از دیدگاه معیار نوع زغال سنگ از دیدگاه

متخصص ۱ و ۲ بر اساس جدول‌های ۵-۲۶ و ۵-۲۷

	A1			A2			A3			A4			$\sum_{j=1}^m M_{gi}^j$		
A1	1.00	1.00	1.00	0.51	1.29	4.04	0.77	2.89	7.00	0.51	1.29	4.04	2.79	6.47	16.08
A2	0.25	0.77	1.97	1.00	1.00	1.00	0.45	2.24	5.92	0.29	1.00	3.42	1.99	5.01	12.30
A3	0.14	0.35	1.29	0.17	0.45	2.24	1.00	1.00	1.00	0.17	0.45	2.24	1.48	2.24	6.76
A4	0.25	0.77	1.97	0.29	1.00	3.42	0.45	2.24	5.92	1.00	1.00	1.00	1.99	5.01	12.30

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m M_{gi}^j = (8.24, 18.73, 47.45) \quad \left[\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m M_{gi}^j \right]^{-1} = (0.0211, 0.0534, 0.1213)$$

$$S_1 = (2.79, 6.47, 16.08) \otimes (0.0211, 0.0534, 0.1213) = (0.059, 0.345, 1.951)$$

$$S_2 = (1.99, 5.01, 12.30) \otimes (0.0211, 0.0534, 0.1213) = (0.042, 0.268, 1.492)$$

$$S_3 = (1.48, 2.24, 6.76) \otimes (0.0211, 0.0534, 0.1213) = (0.031, 0.120, 0.820)$$

$$S_4 = (1.99, 5.01, 12.30) \otimes (0.0211, 0.0534, 0.1213) = (0.042, 0.268, 1.492)$$

درجه بزرگی هر یک از مقادیر S_i (گزینه‌ها) نسبت به همدیگر

$$V(S_1 \geq S_2) = 1$$

$$V(S_1 \geq S_3) = 1$$

$$V(S_1 \geq S_4) = 1$$

$$V(S_2 \geq S_1) = 0.95$$

$$V(S_2 \geq S_3) = 1$$

$$V(S_2 \geq S_4) = 1$$

$$V(S_3 \geq S_1) = 0.77$$

$$V(S_3 \geq S_2) = 0.84$$

$$V(S_3 \geq S_4) = 0.84$$

$$V(S_4 \geq S_1) = 0.95$$

$$V(S_4 \geq S_2) = 1$$

$$V(S_4 \geq S_3) = 1$$

جدول ۵-۴۷: وزن نهایی گزینه‌ها از دیدگاه معیار نوع زغال سنگ

وزن نرمال شده	وزن نرمال نشده	گزینه
0.272	1	A1
0.259	0.95	A2
0.210	0.77	A3
0.259	0.95	A4

جدول ۵-۴۸: میانگین هندسی ماتریس مقایسه زوجی اهمیت هر یک از گزینه‌ها از دیدگاه معیار گاز محتوی از دیدگاه

متخصص ۱ و ۲ بر اساس جدول‌های ۵-۲۸ و ۵-۲۹

	A1			A2			A3			A4			$\sum_{j=1}^m M_{gi}^j$		
A1	1.00	1.00	1.00	0.43	0.75	1.34	0.55	1.18	2.65	0.58	1.29	3.55	2.56	4.22	8.54
A2	0.75	1.34	2.32	1.00	1.00	1.00	0.85	1.59	3.00	0.88	1.73	4.02	3.47	5.66	10.35
A3	0.38	0.85	1.81	0.33	0.63	1.18	1.00	1.00	1.00	0.45	1.09	3.13	2.16	3.57	7.12
A4	0.28	0.77	1.73	0.25	0.58	1.13	0.32	0.92	2.24	1.00	1.00	1.00	1.85	3.27	6.10

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m M_{gi}^j = (10.04, 16.72, 32.11) \quad \left[\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m M_{gi}^j \right]^{-1} = (0.0311, 0.0598, 0.0996)$$

$$S_1 = (2.56, 4.22, 8.54) \otimes (0.0311, 0.0598, 0.0996) = (0.080, 0.252, 0.850)$$

$$S_2 = (3.47, 5.66, 10.35) \otimes (0.0311, 0.0598, 0.0996) = (0.108, 0.339, 1.031)$$

$$S_3 = (2.16, 3.57, 7.12) \otimes (0.0311, 0.0598, 0.0996) = (0.067, 0.213, 0.709)$$

$$S_4 = (1.85, 3.27, 6.10) \otimes (0.0311, 0.0598, 0.0996) = (0.058, 0.196, 0.608)$$

درجه بزرگی هریک از مقادیر S_i (گزینه‌ها) نسبت به همدیگر

$$V(S_1 \geq S_2) = 0.9$$

$$V(S_1 \geq S_3) = 1$$

$$V(S_1 \geq S_4) = 1$$

$$V(S_2 \geq S_1) = 1$$

$$V(S_2 \geq S_3) = 1$$

$$V(S_2 \geq S_4) = 1$$

$$V(S_3 \geq S_1) = 0.94$$

$$V(S_3 \geq S_2) = 0.83$$

$$V(S_3 \geq S_4) = 1$$

$$V(S_4 \geq S_1) = 0.9$$

$$V(S_4 \geq S_2) = 0.78$$

$$V(S_4 \geq S_3) = 0.97$$

جدول ۵-۴۹: وزن نهایی گزینه‌ها از دیدگاه معیار گاز محتوی

وزن نرمال شده	وزن نرمال نشده	گزینه
0.256	0.9	A1
0.285	1	A2
0.236	0.83	A3
0.222	0.78	A4

جدول ۵-۵۰: میانگین هندسی ماتریس مقایسه زوجی اهمیت هر یک از گزینه‌ها از دیدگاه معیار عمق قرارگیری از دیدگاه

متخصص ۱ و ۲ بر اساس جدول‌های ۵-۳۰ و ۵-۳۱

	A1			A2			A3			A4			$\sum_{j=1}^m M_{gi}^j$		
A1	1.00	1.00	1.00	1.04	1.96	4.02	0.78	1.29	1.80	1.04	1.96	4.02	3.86	6.21	10.85
A2	0.25	0.51	0.96	1.00	1.00	1.00	0.25	0.65	1.34	0.33	1.00	3.00	1.83	3.16	6.30
A3	0.56	0.78	1.29	0.75	1.53	4.02	1.00	1.00	1.00	0.75	1.53	4.02	3.05	4.83	10.34
A4	0.25	0.51	0.96	0.33	1.00	3.00	0.25	0.65	1.34	1.00	1.00	1.00	1.83	3.16	6.30

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m M_{gi}^j = (10.57, 17.37, 33.79) \quad \left[\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m M_{gi}^j \right]^{-1} = (0.0296, 0.0576, 0.0946)$$

$$S_1 = (3.86, 6.21, 10.85) \otimes (0.0296, 0.0576, 0.0946) = (0.114, 0.358, 1.026)$$

$$S_2 = (1.83, 3.16, 6.30) \otimes (0.0296, 0.0576, 0.0946) = (0.054, 0.182, 0.596)$$

$$S_3 = (3.05, 4.83, 10.34) \otimes (0.0296, 0.0576, 0.0946) = (0.090, 0.278, 0.978)$$

$$S_4 = (1.83, 3.16, 6.30) \otimes (0.0296, 0.0576, 0.0946) = (0.054, 0.182, 0.596)$$

درجه بزرگی هریک از مقادیر S_i (گزینه‌ها) نسبت به همدیگر

$$V(S_1 \geq S_2) = 1$$

$$V(S_1 \geq S_3) = 1$$

$$V(S_1 \geq S_4) = 1$$

$$V(S_2 \geq S_1) = 0.73$$

$$V(S_2 \geq S_3) = 0.84$$

$$V(S_2 \geq S_4) = 1$$

$$V(S_3 \geq S_1) = 0.92$$

$$V(S_3 \geq S_2) = 1$$

$$V(S_3 \geq S_4) = 1$$

$$V(S_4 \geq S_1) = 0.73$$

$$V(S_4 \geq S_2) = 1$$

$$V(S_4 \geq S_3) = 0.84$$

جدول ۵-۵۱: وزن نهایی گزینه‌ها از دیدگاه معیار عمق قرارگیری

گزینه	وزن نرمال نشده	وزن نرمال شده
A1	1	0.296
A2	0.73	0.216
A3	0.92	0.272
A4	0.73	0.216

جدول ۵-۵۲: میانگین هندسی ماتریس مقایسه زوجی اهمیت هر یک از گزینه‌ها از دیدگاه معیار میزان ذخیره از دیدگاه

متخصص ۱ و ۲ بر اساس جدول‌های ۵-۳۲ و ۵-۳۳

	A1			A2			A3			A4			$\sum_{j=1}^m M_{gi}^j$		
A1	1.00	1.00	1.00	0.88	1.52	2.32	0.88	1.52	2.32	0.88	1.52	2.32	3.65	5.56	7.97
A2	0.43	0.66	1.13	1.00	1.00	1.00	0.49	1.00	2.05	0.49	1.00	2.05	2.41	3.66	6.23
A3	0.43	0.66	1.13	0.49	1.00	2.05	1.00	1.00	1.00	0.49	1.00	2.05	2.41	3.66	6.23
A4	0.43	0.66	1.13	0.49	1.00	2.05	0.49	1.00	2.05	1.00	1.00	1.00	2.41	3.66	6.23

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m M_{gi}^j = (10.86, 16.54, 26.67) \quad \left[\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m M_{gi}^j \right]^{-1} = (0.0375, 0.0605, 0.0920)$$

$$S_1 = (3.65, 5.56, 7.97) \otimes (0.0375, 0.0605, 0.0920) = (0.137, 0.336, 0.734)$$

$$S_2 = (2.41, 3.66, 6.23) \otimes (0.0375, 0.0605, 0.0920) = (0.090, 0.221, 0.574)$$

$$S_3 = (2.41, 3.66, 6.23) \otimes (0.0375, 0.0605, 0.0920) = (0.090, 0.221, 0.574)$$

$$S_4 = (2.41, 3.66, 6.23) \otimes (0.0375, 0.0605, 0.0920) = (0.090, 0.221, 0.574)$$

درجه بزرگی هر یک از مقادیر S_i (گزینه‌ها) نسبت به همدیگر

$$V(S_1 \geq S_2) = 1$$

$$V(S_1 \geq S_3) = 1$$

$$V(S_1 \geq S_4) = 1$$

$$V(S_2 \geq S_1) = 0.79$$

$$V(S_2 \geq S_3) = 1$$

$$V(S_2 \geq S_4) = 1$$

$$V(S_3 \geq S_1) = 0.79$$

$$V(S_3 \geq S_2) = 1$$

$$V(S_3 \geq S_4) = 1$$

$$V(S_4 \geq S_1) = 0.79$$

$$V(S_4 \geq S_2) = 1$$

$$V(S_4 \geq S_3) = 1$$

جدول ۵-۵۳: وزن نهایی گزینه‌ها از دیدگاه معیار میزان ذخیره

وزن نرمال شده	وزن نرمال نشده	گزینه
0.297	1	A1
0.234	0.79	A2
0.234	0.79	A3
0.234	0.79	A4

جدول ۵-۵۴: میانگین هندسی ماتریس مقایسه زوجی اهمیت هر یک از گزینه‌ها از دیدگاه معیار ضخامت لایه زغال‌سنگ از

دیدگاه متخصص ۱ و ۲ بر اساس جدول‌های ۵-۳۴ و ۵-۳۵

	A1			A2			A3			A4			$\sum_{j=1}^m M_{gi}^j$		
A1	1.00	1.00	1.00	1.40	3.00	9.00	0.88	1.52	2.32	0.88	1.52	2.32	4.16	7.04	14.65
A2	0.11	0.33	0.71	1.00	1.00	1.00	0.13	0.51	1.29	0.13	0.51	1.29	1.36	2.35	4.30
A3	0.43	0.66	1.13	0.77	1.97	7.94	1.00	1.00	1.00	0.49	1.00	2.05	2.69	4.63	12.12
A4	0.43	0.66	1.13	0.77	1.97	7.94	0.49	1.00	2.05	1.00	1.00	1.00	2.69	4.63	12.12

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m M_{gi}^j = (10.91, 18.65, 43.18) \quad \left[\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m M_{gi}^j \right]^{-1} = (0.0232, 0.0536, 0.0916)$$

$$S_1 = (4.16, 7.04, 14.65) \otimes (0.0232, 0.0536, 0.0916) = (0.096, 0.378, 1.342)$$

$$S_2 = (1.36, 2.35, 4.30) \otimes (0.0232, 0.0536, 0.0916) = (0.032, 0.126, 0.394)$$

$$S_3 = (2.69, 4.63, 12.12) \otimes (0.0232, 0.0536, 0.0916) = (0.062, 0.248, 1.111)$$

$$S_4 = (2.69, 4.63, 12.12) \otimes (0.0232, 0.0536, 0.0916) = (0.062, 0.248, 1.111)$$

درجه بزرگی هر یک از مقادیر S_i (گزینه‌ها) نسبت به همدیگر

$$V(S_1 \geq S_2) = 1$$

$$V(S_1 \geq S_3) = 1$$

$$V(S_1 \geq S_4) = 1$$

$$V(S_2 \geq S_1) = 0.54$$

$$V(S_2 \geq S_3) = 0.73$$

$$V(S_2 \geq S_4) = 0.73$$

$$V(S_3 \geq S_1) = 0.89$$

$$V(S_3 \geq S_2) = 1$$

$$V(S_3 \geq S_4) = 1$$

$$V(S_4 \geq S_1) = 0.89$$

$$V(S_4 \geq S_2) = 1$$

$$V(S_4 \geq S_3) = 1$$

جدول ۵-۵۵: وزن نهایی گزینه‌ها از دیدگاه معیار ضخامت لایه زغال‌سنگ

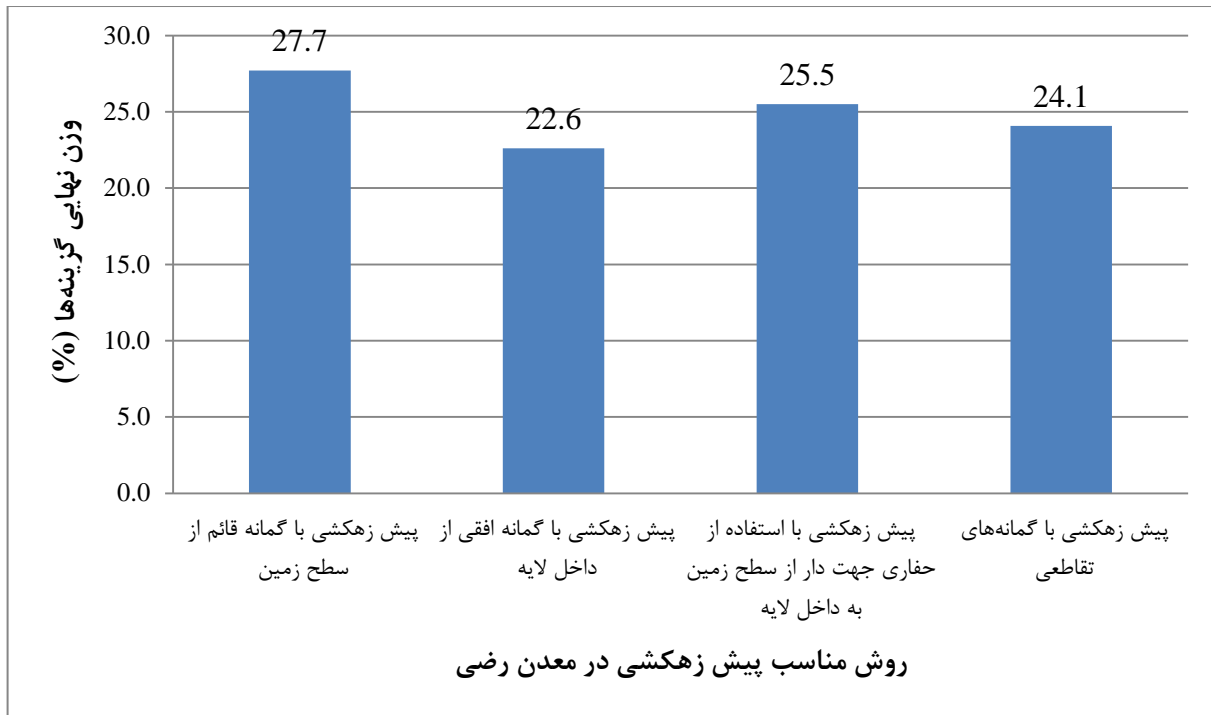
گزینه	وزن نرمال نشده	وزن نرمال شده
A1	1	0.301
A2	0.54	0.163
A3	0.89	0.268
A4	0.89	0.268

در نهایت با توجه به بردارهای وزن محاسبه شده، امتیاز هر یک از گزینه‌ها طبق جدول ۵-۵۶ محاسبه شده

است.

جدول ۵-۵۶: وزن نهایی گزینه‌ها بر اساس بردارهای وزن محاسبه شده

وزن	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	جمع امتیاز	جمع امتیاز (%)
A1	0.117	0.088	0.1	0.105	0.124	0.124	0.117	0.109	0.115	0.277	27.7
A2	0.282	0.248	0.273	0.265	0.272	0.256	0.296	0.297	0.301	0.226	22.6
A3	0.257	0.264	0.167	0.181	0.259	0.285	0.216	0.234	0.163	0.255	25.5
A4	0.257	0.24	0.287	0.301	0.21	0.236	0.272	0.234	0.268	0.241	24.1



شکل ۵-۱۰: وزن نهایی گزینه‌های پیش زهکشی در معدن رضی بر اساس بردارهای وزن محاسبه شده

چنانچه از جدول ۵-۵۶ و شکل ۵-۱۰ مشخص است روش مناسب پیش زهکشی در معدن رضی روش پیش زهکشی با گمانه قائم از سطح زمین است که دارای بیشترین وزن بر اساس نظرات گروه تصمیم‌گیرنده است و در نتیجه به عنوان روش مناسب و بهینه گاززدایی در معدن رضی انتخاب می‌شود.

۵-۱۱- نتیجه‌گیری

از مجموعه مطالب این فصل مشخص شد معدن رضی با استفاده از روش سیستم مهندسی سنگ مناسب‌ترین معدن برای انجام عملیات گاززدایی است به نحوی که این معدن طی سال‌های اخیر به علت گازخیزی زیاد

آن نیز دچار تعطیلی و توقف تولید شده است از طرفی دیگر با استفاده از روش تحلیل سلسله مراتبی فازی نیز مشخص شده که مناسبترین روش پیش زهکشی در این معدن روش استفاده از گمانه‌های قائم است.

فصل هشتم

بررسی فنی اقتصادی گاززدایی از معدن

زغال سنگ رضی

۶-۱- مقدمه

موفقیت و شکست در اجرای هر پروژه، به تصمیم‌گیری آگاهانه و منطقی افراد و بنگاه‌های متولی آن پروژه بستگی دارد. با توجه به اهمیت ارزیابی اقتصادی پروژه‌ها، تحلیل اقتصادی یک پروژه به عنوان یکی از مهم‌ترین روش‌های مقایسه، تصمیم‌گیری و انتخاب از میان مجموعه راهکارها بر اساس شرایط مطلوب اقتصادی تلقی می‌شود. هر پروژه‌ای قبل از انجام باید از نظر مسائل مالی و فنی مورد ارزیابی قرار گرفته و سپس در مورد انجام آن تصمیم‌گیری نهایی صورت پذیرد. در انجام پروژه‌های CBM مشابه اکثر پروژه‌ها، مسائل فنی و اقتصادی باید مورد بررسی قرار بگیرد. بدین منظور بعد از انجام مطالعات امکان‌سنجی در منطقه مورد مطالعه CBM، یک پایلوت آزمایشی طراحی و اجرا می‌شود تا بر اساس آن بتوان به اقتصادی بودن طرح مهر تأیید زد. در صورت اقتصادی بودن، پروژه در مقیاس وسیع قابل اجراست. با توجه به اهمیت اقتصادی ارزیابی هزینه‌ها، در ادامه به برآورد میزان هزینه‌های اجرایی یک پروژه متان زدایی پرداخته شده است.

۶-۲- گازکشی متان به عنوان یک درآمد

گازکشی یک کسب‌وکار پرسود بوده که شامل نصب، راه‌اندازی و همچنین استفاده از گاز تولیدی است. موارد گوناگون استفاده از گاز متان موجود در زغال در سراسر دنیا وجود دارد که اقتصادی می‌باشند. هزینه‌های بالای پری‌ساز را می‌توان با انتخاب درست روش و سیستم گازکشی از بین برد. هزینه‌های گازکشی متان جز هزینه‌های عملیاتی بوده که توجیه منطقی برای سرمایه‌گذاری داشته و هدف آن نیز ایمنی بیشتر در جبهه کار طولانی و افزایش تولید زغال است. تأثیر مالی را می‌توان بدین صورت نشان داد که یک جبهه کار طولانی مدرن با تولید بالا که در لایه ضخیم (حدود ۳ متر) استخراج می‌شود، می‌تواند ۲ تا ۴ میلیون تن در سال در شرایط زمین‌شناسی مناسب زغال استخراج کند. اگر قیمت زغال سنگ ۴۰ دلار بر هر تن باشد، در صورتی که بر اثر انتشار گاز، اگر حدود ۱۰ درصد از زمان تولید توقف در استخراج ایجاد

شود با یک حساب ساده می‌توان متوجه شد که سالانه بین ۸ الی ۱۶ میلیون دلار درآمد از دست رفته وجود خواهد داشت.

هنگامی که یک سیستم گازکشی متان در معدن نصب می‌شود هزینه صرفه‌جویی شده در برق تهویه و یا افزایش پتانسیل تولید زغال می‌تواند سرمایه‌گذاری انجام شده را تعدیل کند.

۳-۶- هزینه‌های فرآیند CBM

محاسبه و بررسی هزینه‌های اجرایی در یک پروژه CBM اهمیت زیادی دارد. در حال حاضر با توسعه روزافزون فرآیندهای متان زدایی در دنیا، اطلاعات زیادی موجود است تا شرکت‌ها و کشورها بتوانند بر اساس آن به بررسی منابع هزینه‌ای مورد نیاز در یک پروژه CBM بپردازند. هزینه‌های انجام یک پروژه CBM بستگی به شرایط جغرافیایی منطقه مورد نظر، توپوگرافی سطح زمین، تجهیزات مورد استفاده، نیروی انسانی مورد نیاز، روش زهکشی متان، عمق گمانه‌ها، پیچیدگی ساختارهای زمین‌شناسی و شرایط معدنکاری دارد. هزینه‌های یک پروژه زهکشی گاز متان، شامل هزینه‌های حفاری گمانه، هزینه‌های سیستم جمع‌آوری گاز در سطح زمین و نیز هزینه‌های دفع و تصفیه آب است که در ادامه جزئیات هزینه‌ای مربوط به هر کدام از این موارد در جداول مشخص بیان شده است.

با توجه به سابقه کشور آمریکا در زمینه زهکشی گاز متان، اطلاعات زیادی از حفاری ۶۰۰۰ حلقه گمانه CBM موجود است تا بر اساس آن بتوان یک دید کلی از هزینه‌های اجرایی روش زهکشی گاز متان به دست آورد. با توجه به اطلاعات به دست آمده از این ۶۰۰۰ حلقه گمانه حفاری شده، در جدول ۶-۱ هزینه‌های کلی حفاری و تکمیل گمانه در یک پروژه CBM با توجه به نوع روش زهکشی متان بیان شده است (USEPA, 1999). یکی از مواردی که در کاربرد هزینه‌های بیان شده جدول ۶-۱ باید مدنظر قرار داد، متفاوت بودن تغییرات هزینه‌های حفاری و تکمیل گمانه در مناطق مختلف است. به عنوان مثال، میزان هزینه‌های سرمایه‌ای برای حفاری و تکمیل گمانه‌های قائم و گمانه‌های تخریبی در حوضه‌های زغالی آمریکا در جدول ۶-۲ بیان شده است. با توجه به این جدول مشخص است که در هزینه‌های حفاری و تکمیل گمانه از یک حوضه زغالی به حوضه دیگر تفاوت قابل ملاحظه‌ای وجود دارد.

جدول ۶-۱: هزینه‌های یک پروژه CBM بر حسب نوع روش زهکشی متان (USEPA, 1999)

روش زهکشی متان	نوع هزینه	موارد هزینه‌ای	هزینه (دلار بر گمانه)
گمانه قائم	هزینه‌های سرمایه‌ای	زمین‌شناسی، ژئوفیزیک و کسب اطلاعات	۲۰,۰۰۰ تا ۳۰,۰۰۰
		حفاری گمانه و تکمیل آن	۱۱۰,۰۰۰ تا ۳۰۰,۰۰۰
		اجاره تأسیسات جمع‌آوری گاز	۶۰,۰۰۰ تا ۱۲۰,۰۰۰
		سیستم آب‌کشی	۴۰,۰۰۰ تا ۵۰,۰۰۰
		سیستم شکافت هیدرولیکی	۶۰,۰۰۰ تا ۸۰,۰۰۰
		خدمات مهندسی، اداری و عمومی	۱۰۰,۰۰۰ تا ۳۰,۰۰۰
		جمع کل	۳۲۰,۰۰۰ تا ۶۴۰,۰۰۰
هزینه‌های عملیاتی	۲۰,۰۰۰ تا ۴۰,۰۰۰ (دلار بر سال)		
گمانه تخریب	هزینه‌های سرمایه‌ای	طراحی پروژه، نقشه‌برداری و تسطیح زمین	۱۷,۹۰۰ تا ۳۱,۰۰۰
		جانمایی و ایجاد جاده در سطح زمین	۵۶,۰۰۰ تا ۱۲۲,۰۰۰
		حفاری گمانه و تکمیل آن	۱۱۲,۰۰۰ تا ۱۸۲,۰۰۰
		اجاره تجهیزات	۷۲,۰۰۰ تا ۱۲۰,۰۰۰
		عملیات نظارت، اداری، عمومی و بالاسری	۵۰,۰۰۰ تا ۸۰,۰۰۰
		جمع هزینه‌ها	۳۰۷,۹۰۰ تا ۵۳۵,۰۰۰
		هزینه‌های عملیاتی	۲۰,۰۰۰ تا ۴۰,۰۰۰ (دلار بر سال)
گمانه افقی	هزینه‌های سرمایه‌ای	هزینه بر واحد طول	۳۳ تا ۶۶ (دلار بر متر)
	هزینه‌های عملیاتی	۱۰۵,۰۰۰ تا ۶۴۰,۰۰۰ (دلار بر سال بر پروژه)	
گمانه تقاطعی	هزینه‌های سرمایه‌ای	هزینه بر واحد طول	۱۲۵ تا ۱۸۴ (دلار بر متر)
	هزینه‌های عملیاتی	۱۰۵,۰۰۰ تا ۶۴۰,۰۰۰ (دلار بر سال بر پروژه)	

جدول ۶-۲: هزینه‌های سرمایه‌گذاری برای گمانه‌های قائم و گمانه‌های تخریب (هزینه یک گمانه) (USEPA, 1999)

حوضه زغالی													روش متان زدایی		
وسترن			واریور			الینویز			آپالچینای شمالی			آپالچینای مرکزی			هزینه (هزار دلار)
زیاد	متوسط	کم	زیاد	متوسط	کم	زیاد	متوسط	کم	زیاد	متوسط	کم	زیاد	متوسط	کم	
۲۱۰	۱۵۰	۱۰۰	۲۰۰	۱۴۰	۹۰	۱۶۰	۱۰۰	۵۰	۱۷۰	۱۱۰	۶۰	۱۹۰	۱۳۰	۸۰	گمانه تخریب (a)
۵۸۰	۴۵۰	۳۲۰	۲۹۰	۱۹۰	۹۰	۱۹۵	۱۱۵	۴۵	۲۰۵	۱۴۰	۵۰	۲۲۵	۱۲۵	۶۰	گمانه قائم (b)

a: هزینه‌های سرمایه‌گذاری برای گمانه‌های تخریب شامل هزینه‌های مستقیم چال زنی در سطح زمین، تجهیز سایت و آماده‌سازی آن، هزینه چال زنی و تعمیر و نگهداری گمانه‌ها است.

b: هزینه‌های سرمایه‌گذاری برای گمانه‌های قائم شامل هزینه‌های مستقیم چال زنی در سطح زمین، تجهیز سایت و آماده‌سازی آن، هزینه چال زنی و تعمیر و نگهداری گمانه‌ها و نیز روش شکافت هیدرولیکی است.

در جدول ۳-۶ هزینه‌های سیستم زهکشی متان به ازای میزان تولید زغال سنگ بیان شده است. این مقایسه بر مبنای زهکشی گاز متان از پهنه‌های جبهه کار طولانی در کشورهای استرالیا و چین که دارای مشخصاتی شامل، طول پهنه ۲ کیلومتر، عرض پهنه ۲۵۰ متر، ضخامت لایه زغال سنگ ۳ متر، عمق قرارگیری از سطح زمین ۶۰۰ متر و نرخ استخراج بین ۰/۵ تا ۲ میلیون تن بر سال است، محاسبه شده است. با توجه به جدول ۳-۶ مشخص است که با افزایش عمق ذخایر زغال سنگ، هزینه‌های حفاری افزایش می‌یابد و زهکشی از داخل معدن ارزش اقتصادی بیشتری پیدا می‌کند. در معادن با گازخیزی بالا قبل از آن که ظرفیت معدن به تولید نهایی برسد ترکیب روش‌های مختلف متان زدایی باید مورد ارزیابی قرار گیرد (ECE, 2010).

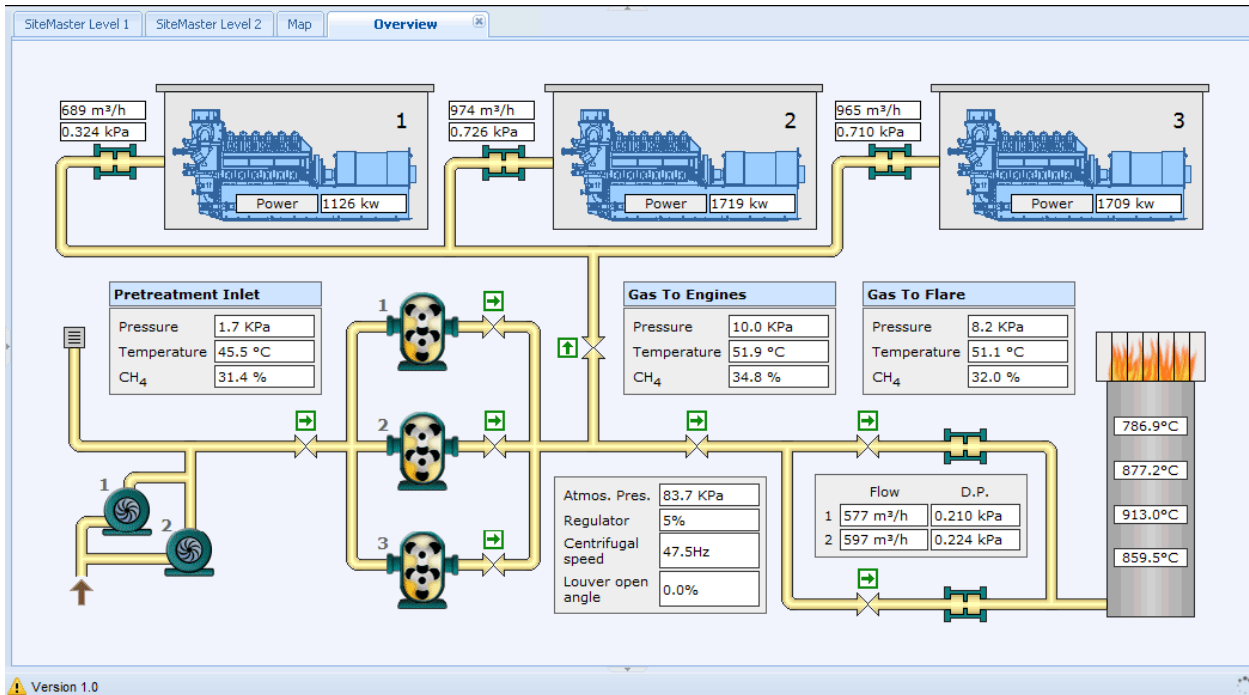
علاوه بر هزینه‌های مربوط به حفاری و تکمیل گمانه، نوع دوم هزینه‌ها، هزینه‌های مربوط به سیستم‌های جمع‌آوری، فروش و استفاده از گاز برای تولید برق و هزینه‌های مربوط به سیستم تصفیه و زهکشی آب است. هزینه‌های سیستم جمع‌آوری گاز شامل هزینه‌های مربوط به خطوط جمع‌آوری گاز، کمپرسورها، کارخانه‌های فرآوری گاز و خطوط انتقال برای رساندن گاز به خطوط لوله سراسری گاز است. در صورتی که از گاز زهکشی شده برای تولید برق استفاده شود این هزینه‌ها شامل هزینه خطوط لوله، توربین گازی یا موتورهای احتراق داخلی، خطوط انتقال به منظور اتصال به شبکه، دریچه‌های تهویه ژنراتورها و غیره است. علاوه بر موارد هزینه‌ای یک‌سری پارامترها و عوامل اقتصادی باید در پروژه‌های تولید برق از گاز متان زهکشی شده را باید در نظر گرفت که شامل کمیت و کیفیت گاز زهکشی شده، تغییرات شدت جریان گاز، هزینه فرصت و افزایش سرمایه مورد نیاز است.

جدول ۶-۳: هزینه‌های روش‌های متان زدایی با توجه به تولید زغال سنگ (ECE, 2010)

میزان هزینه (دلار بر تن)	هزینه‌های اصلی متغیر	هزینه‌های اصلی	تکنولوژی زهکشی متان	روش زهکشی متان
۰/۴ تا ۳/۲	قطر و طول گمانه	متخصصان حفاری و تجهیزات مورد نیاز	گمانه‌های افقی بلند در امتداد لایه و طول پهنه	پیش زهکشی از داخل معدن
۰/۶ تا ۴	قطر و طول گمانه	حفاری دورانی و تجهیزات	حفاری گمانه در طول پهنه به روش دورانی	
۱/۲ تا ۹/۶	عمق گمانه و تعداد لایه‌های دربرگیرنده آن.	قرارداد با پیمانکاران حفاری، تجهیزات روش شکافت هیدرولیکی، لوله‌گذاری و مهروموم کردن گمانه	گمانه قائم همراه با روش شکافت هیدرولیکی	پیش زهکشی از سطح زمین
۱ تا ۸	عمق گمانه و طول جانبی آن در داخل لایه. مشکلات خاص به وجود آمده در حین حفاری	قرارداد با پیمانکاران حفاری، تجهیزات شکافت هیدرولیکی، لوله‌گذاری و مهروموم کردن گمانه	حفاری گمانه از سطح زمین به داخل لایه و استفاده از روش حفاری انشعابی	
۰/۱ تا ۱/۶	قطر و طول گمانه	حفاری چرخشی و تجهیزات	گمانه با آرایش تقاطعی	زهکشی از داخل معدن همزمان با معدنکاری
۰/۳ تا ۱۱/۲	فاصله از بالا یا پایین لایه استخراجی	ایجاد راهروهای اضافی	گالری‌های زهکشی	
۰/۵ تا ۴	مسائل و مشکلات حفاری شعاعی و جهت‌دار	متخصصان حفاری و تجهیزات مربوط به حفاری رو به پایین	گمانه‌های افقی مستقیم	
۱/۴ تا ۱۵/۲	عمق	قرارداد با پیمانکاران حفاری، تجهیزات شکافت هیدرولیکی، لوله‌گذاری و مهروموم کردن گمانه	گمانه‌های تخریب	زهکشی از سطح زمین همراه با معدنکاری

با بررسی‌های انجام شده در سال ۲۰۰۸ میلادی هزینه‌های سرمایه‌گذاری برای تولید برق از متان با استفاده از ژنراتورها دارای کیفیت بالای استاندارد بین‌المللی برابر با ۱ تا ۱/۵ دلار به ازای هر مگاوات است و هزینه‌های تعمیر و نگهداری کارخانه تا وارد شدن برق به مدار برابر با ۰/۰۲ تا ۰/۰۲۵ دلار به ازای هر کیلووات ساعت بوده است. از این رو عملکرد اقتصادی یک کارخانه برق بستگی به در دسترس بودن گاز، قابلیت اعتماد تجهیزات (ساعات تعمیر و نگهداری)، مقبولیت برق نزد شبکه سراسری مصرف و نیز سود حاصل شده از این عملیات دارد. در بعضی موارد، هزینه‌های اضافی ممکن است تحت تأثیر شدت جریان گاز

و کیفیت آن باشد. بنابراین طراحی موفق یک پروژه نیازمند استفاده از تجهیزات خوب و آزمایش شده، برنامه منظم تعمیر و نگهداری و پایش لحظه به لحظه است. در شکل ۶-۱ یک صفحه نمایش که در پایش کارخانه تولید برق از گاز متان استفاده می‌شود نشان داده شده است.



شکل ۶-۱: تولید برق از گاز متان و مشخص شدن زمان کاهش جریان گاز (شامل ۳ موتور و یک Flare) (ECE, 2010)

با راهاندازی کارخانه تولید برق، تغییرات جریان گاز و نیز کمیت و کیفیت آن در طول عملیات معدنکاری باید ثابت باقی بماند. با استفاده از داده‌هایی که در حین عملیات زهکشی گاز متان ثبت می‌شود می‌توان در مورد مقبولیت گاز برای تولید برق در هر مرحله تصمیم‌گیری کرد و در صورت لزوم گاز بی‌کیفیت و غیر قابل استفاده را سوزاند. به هر حال در صورتی که گاز از کیفیت و میزان بالایی برخوردار باشد می‌توان موتورهای دیگری به خط تولید برق اضافه کرد. شدت جریان متان خالص ۴ مترمکعب بر دقیقه می‌تواند یک مگاوات برق را تأمین کند (ECE, 2010).

به‌طور کلی با توجه به نوع استفاده از گاز متان زهکشی شده، میزان هزینه‌ها متفاوت است که در جدول ۶-۴ میزان هزینه‌ها بیان شده است.

جدول ۴-۶: هزینه‌های سیستم جمع‌آوری گاز و تولید برق در روش زهکشی گاز متان (USEPA, 1999)

فرایند مصرف	موارد هزینه‌ای	هزینه (دلار)
خطوط لوله	<ul style="list-style-type: none"> - خطوط جمع‌آوری - کمپرسورها - عملیات فراوری - خطوط لوله تا شبکه سراسری گاز 	<ul style="list-style-type: none"> ۱۰,۰۰۰ تا ۱۰۰,۰۰۰ برای هر گمانه ۱۸۰ تا ۲۰۰ (بر mcf^۱ بر روز) ۱۰ تا ۳۰ (بر mcf بر روز) ۲۰۰,۰۰۰ تا ۹۵۰,۰۰۰ بر مایل
	<ul style="list-style-type: none"> - کمپرسورها - عملیات فراوری - غنی‌سازی و تصفیه 	<ul style="list-style-type: none"> ۰/۰۸ تا ۰/۰۶ (برای هر mcf) ۰/۰۴ تا ۰/۰۲ (برای هر mcf) ۱ تا ۲ (برای هر mcf)
تولید برق	<ul style="list-style-type: none"> - خطوط جمع‌آوری بین سر گمانه و ژنراتور - توربین گاز - لوله جانبی برای استفاده از هوای تهویه - سایت 	<ul style="list-style-type: none"> ۱۰۰۰۰ تا ۴۰۰۰۰ بر گمانه ۸۰۰ تا ۱۲۰۰ بر کیلووات نصب ۴۰۰,۰۰۰ تا ۶۰۰,۰۰۰ ۱۰۰,۰۰۰ تا ۵۰۰,۰۰۰
	عملیاتی	توربین گاز

نوع سوم هزینه‌ها در فرایند متان زدایی، هزینه‌های مربوط به سیستم جمع‌آوری و تصفیه آب زهکشی شده گمانه است. هزینه‌های مربوط به عملیات تصفیه و جمع‌آوری آب در جدول‌های ۵-۶ و ۶-۶ بیان شده است.

جدول ۵-۶: هزینه‌های مربوط به عملیات دفع و تصفیه آب (USEPA, 1999)

فرآیند مصرف	نوع هزینه	هزینه (دلار)
سیستم دفع و تصفیه آب	هزینه‌های سرمایه‌ای	۰/۳ تا ۳/۳ (بر هر بشکه)
	هزینه‌های عملیاتی	۰/۰۲ تا ۱ (بر هر بشکه)

جدول ۶-۶: هزینه‌های مربوط به فناوری‌های مربوط به تصفیه و زهکشی آب از گمانه (USEPA, 1999)

هزینه واحد (دلار بر شبکه)	هزینه‌های سالیانه (هزار دلار)	فناوری تصفیه
۰/۰۳ تا ۰/۰۶	۲۸ تا ۴۸	ته‌نشینی
۰/۴۷	۴۱۱	اسمز معکوس ^۲
۰/۵۱	۴۴/۷	الکترودیالیز
۰/۸۱	۷۰۶	تزیق در زمین با گمانه عمیق
۲/۱۵	۱,۸۷۲	تبخیر

^۱ Million Cubic Feet

^۲ Reverse Osmosis

۶-۴- بررسی فنی و اقتصادی گاززدایی از معدن زغال سنگ رضی

معدن زغال سنگ رضی واقع در منطقه زغال خیز اولنگ در فاصله ۷۵ کیلومتری شمال شرق شاهرود و ۳۱ کیلومتری جنوب و جنوب شرق رامیان از توابع استان گلستان واقع است. در حال حاضر معدن رضی به دلیل انتشار بالای گاز متان، خصوصاً در افق‌های زیرین و برای جلوگیری از خطرات مربوط به انفجار و گاز گرفتگی کارگران تعطیل است. همان‌طور که در فصل قبلی بررسی شد زهکشی گاز قبل از عملیات معدنکاری به روش قائم برای این معدن مناسب است. البته می‌توان بعد از زهکشی گاز با اطمینان نسبت به استخراج زغال سنگ نیز اقدام کرد.

برای بررسی و تحلیل میزان گاز کشی، هزینه‌ها و درآمد ناشی از مصرف گاز استحصال شده نیاز به پارامترهای زیر است:

مقدار ذخیره زغال سنگ

مقدار انتشار گاز متان

عمر معدن

تجهیزات لازم برای سیستم گاز کشی

میزان ذخیره قطعی این معدن $2/500/000$ تن و ذخیره احتمالی آن تا $4/500/000$ تن برآورد شده است و تا عمق ۱۸۰۰ متری از سطح زمین نیز اکتشافات تفضیلی صورت گرفته و مشخصات چاه‌های حفاری آن نیز موجود است. با فرض آنکه بخواهیم طی یک عملیات ۵ ساله و هر سال گاز کشی از $500/000$ تن از زغال سنگ را انجام دهیم و با در نظر گرفتن میزان گازدهی ۱۸ مترمکعب به ازای هر تن زغال سنگ در افق‌های زیرین این معدن، و با راندمان ۸۰ درصد کمپرسورهای مکنده گاز در مجموع $7/200/000$ مترمکعب گاز می‌توان استحصال کرد.

در بررسی هزینه تجهیزات و آنالیز قیمت‌ها برای زهکشی گاز می‌بایست هزینه‌های مربوط به حفاری چال‌های گاز کشی (حفاری و نصب تجهیزات)، فشرده‌سازی (نصب مکنده‌ها برای هر چال، آماده‌سازی محل کمپرسورها، تهیه کمپرسورها و هزینه جاری آن‌ها)، آب کشی از چاه‌ها (تهیه پمپ آب سر چاه، تجهیزات

آبکشی پس از فشرده‌سازی) و دیگر هزینه‌های عملیاتی سالیانه (تعمیر و نگهداری، حقوق و مزایای کارگران، آموزش، بیمه و ...) است. جهت برآورد این هزینه‌ها ابتدا می‌بایست با توجه به توپوگرافی منطقه و حجم گاز کشی از معدن تعداد چاه‌ها، عمق چاه‌ها و محل هر یک از آن‌ها برای حفاری مشخص شود که این کار جز هدف این تحقیق نیست. با این وجود با توجه به اطلاعات داده شده در این فصل در مورد ارزیابی هزینه‌های فرآیند متان زدایی در دنیا، می‌توان یک دید کلی برای ارزیابی اقتصادی عملیات زهکشی گاز متان در معدن رضی بیان کرد.

با توجه به جدول ۶-۳ که هزینه‌های سیستم زهکشی متان به ازای میزان تولید زغال سنگ در کشورهای استرالیا و چین را بیان کرده است که بر مبنای زهکشی گاز متان از پهنه‌های جبهه کار طولانی مشخصاتی شامل، طول پهنه ۲ کیلومتر، عرض پهنه ۲۵۰ متر، ضخامت لایه زغال سنگ ۳ متر، عمق قرارگیری از سطح زمین ۶۰۰ متر و نرخ استخراج بین ۰/۵ تا ۲ میلیون تن در سال است، محاسبه شده است که مشابه معدن رضی است. در اینجا پیش زهکشی از سطح زمین به روش قائم میزان هزینه به طور متوسط ۵ دلار بر تن در سال ۲۰۱۰ برآورد شده است اگر در حال حاضر با ۲۰ درصد افزایش در نظر بگیریم. برای معدن رضی با گازکشی از ۵۰۰/۰۰۰ تن سالیانه و با هزینه ۶ دلار برای هر تن، مبلغ ۳/۰۰۰/۰۰۰ دلار هزینه خواهد داشت و با توجه به ۷/۲۰۰/۰۰۰ مترمکعب گاز استحصالی، قیمت تمام‌شده استحصال هر مترمکعب گاز ۰/۴۲ دلار معادل ۱۵۱۲۰ ریال خواهد بود.

جدول‌های ۶-۷، ۶-۸ و ۶-۹ گاز بهای مصرفی خانگی و صنایع در سال ۱۳۹۴ در ایران است.

جدول ۶-۷: گاز بهای مصرفی هر مترمکعب در هفت ماهه فصل گرم در بخش خانگی سال ۱۳۹۴ (خبرگزاری تسنیم خرداد

(۹۴)

دامنه (پله) مصرف	اول	دوم	سوم	چهارم	پنجم	ششم	هفتم	هشتم	نهم	دهم	یازدهم	دوازدهم
حجم مصرف	تا ۴۵	۴۶	۹۶	۱۴۶	۱۹۶	۲۴۶	۲۹۶	۳۴۶	۳۹۶	۴۴۶	۴۹۶	۵۴۶
قیمت (تومان)	۱۰۸	۱۳۱	۱۶۵	۲۱۱	۲۵۷	۲۸۰	۳۱۵	۳۴۹	۳۷۲	۳۹۵	۴۱۸	۴۳۰

فصل ششم: بررسی فنی اقتصادی گاززدایی از معدن زغال سنگ رضی

جدول ۶-۸: گاز بهای مصرفی هر مترمکعب در پنج ماهه فصل سرد در بخش خانگی سال ۱۳۹۴ (خبرگزاری تسنیم خرداد ۹۴)

دامنه (پله) مصرف	اول	دوم	سوم	چهارم	پنجم	ششم	هفتم	هشتم	نهم	دهم	یازدهم	دوازدهم
اقلیم ۱	تا ۳۰۰	-۴۰۰ ۳۰۱	-۵۰۰ ۴۰۱	-۶۰۰ ۵۰۱	-۷۰۰ ۶۰۱	-۸۰۰ ۷۰۱	-۹۰۰ ۸۰۱	-۱۰۰۰ ۹۰۱	-۱۱۰۰ ۱۰۰۱	-۱۲۰۰ ۱۱۰۱	-۱۳۰۰ ۱۲۰۱	مازاد بر ۱۳۰۰
اقلیم ۲	تا ۲۵۰	-۳۵۰ ۲۵۱	-۴۵۰ ۳۵۱	-۵۵۰ ۴۵۱	-۶۵۰ ۵۵۱	-۷۵۰ ۶۵۱	-۸۵۰ ۷۵۱	-۹۵۰ ۸۵۱	-۱۰۵۰ ۹۵۱	-۱۱۵۰ ۱۰۵۱	-۱۲۵۰ ۱۱۵۱	مازاد بر ۱۲۵۰
اقلیم ۳	تا ۲۰۰	-۳۰۰ ۲۰۱	-۴۰۰ ۳۰۱	-۵۰۰ ۴۰۱	-۶۰۰ ۵۰۱	-۷۰۰ ۶۰۱	-۸۰۰ ۷۰۱	-۹۰۰ ۸۰۱	-۱۰۰۰ ۹۰۱	-۱۱۰۰ ۱۰۰۱	-۱۲۰۰ ۱۱۰۱	مازاد بر ۱۲۰۰
اقلیم ۴	تا ۱۵۰	-۲۵۰ ۱۵۱	-۳۵۰ ۲۵۱	-۴۵۰ ۳۵۱	-۵۵۰ ۴۵۱	-۶۵۰ ۵۵۱	-۷۵۰ ۶۵۱	-۸۵۰ ۷۵۱	-۹۵۰ ۸۵۱	-۱۰۵۰ ۹۵۱	-۱۱۵۰ ۱۰۵۱	مازاد بر ۱۱۵۰
قیمت (تومان)	۴۱	۶۹	۹۶	۱۲۴	۱۵۱	۲۲۰	۲۶۲	۳۰۳	۳۴۵	۳۸۶	۴۴۱	۴۸۳

جدول ۶-۹: گاز بهای مصرفی سایر صنایع سال ۱۳۹۴ (خبرگزاری تسنیم خرداد ۹۴)

نوع مصرف	گاز بهاء در ۷ ماهه گرم سال به ازای هر مترمکعب (تومان)	گاز بهاء در ۵ ماهه سرد سال به ازای هر مترمکعب (تومان)
پتروشیمی	۲۶۵	۲۶۵
فولاد	۱۳۲	۱۳۲
کشاورزی و صنایع	۱۱۵	۶۹
سایر صنایع	۱۰۰	۱۰۰
تجاری عادی	۱۵۰	۱۵۰
تجاری عمومی (دولتی)	۳۰۰	۱۵۰
نانوایی و گرمابه	۱۰۵	۱۰۵
آموزشی	۸۰,۵	۸۰,۵
ورزشی	۸۰,۵	۸۰,۵
مذهبی	۸۰,۵	۸۰,۵
خیریه	۸۰,۵	۸۰,۵
گاز بهای CNG هر کیلوگرم ۶۰۰ تومان		

۶-۵- نتیجه گیری

محاسبات انجام گرفته حاکی از غیر اقتصادی بودن گازکشی متان از معدن زغال سنگ رضی است. از آنجایی که قیمت گاز مصرفی در ایران رو به افزایش است، با حذف یارانه‌ها از حامل‌های انرژی و در نظر گرفتن کاهش هزینه پس از انجام عملیات گازکشی برای استخراج زغال سنگ، همچنین مزایای مربوط به ایمنی کارکنان در این معدن می‌توان آن را به سمت اقتصادی بودن پیش برد.

فصل ہفتم

نتیجہ گیری و پیشہا دہا

۷-۱- نتیجه‌گیری

افزایش تقاضای انرژی و کاهش سریع منابع آن در جهان، باعث شده است تا تولید انرژی از مخازن هیدروکربنی غیرمتعارف مثل مخازن زغال‌سنگ از نظر اقتصادی مقرون به صرفه به نظر برسد. زغال‌سنگ یکی از منابع اصلی انرژی در دنیا است که از قرن‌ها پیش مورد استفاده بوده است. گاز متان موجود در زغال‌سنگ از خطرات مهم معدنکاری زیرزمینی زغال‌سنگ است که هر ساله تلفات جانی زیادی در معادن دنیا به وجود می‌آورد. وجود این گاز در معادن علاوه بر ایجاد محیطی سخت و خطرناک برای معدن کاران، هزینه‌های تهویه معدن را نیز افزایش می‌دهد. همچنین تهویه و رهاسازی این گاز در هوا سبب آلودگی بیشتر اتمسفر و افزایش گازهای گلخانه‌ای در هوا می‌شود. در ایران منابع زغالی بسیاری وجود دارد که می‌توان انتظار داشت بعضی از آن‌ها برای اجرای متان زدایی مستعد باشند. از طرفی به دلیل روند رو به رشد و افزایش نیاز کشور به انرژی و اهمیت یافتن منابع جایگزین برای نفت و گاز متعارف، ضروری است که به امکان‌سنجی استحصال این منبع بالقوه انرژی در کشور پرداخته شود. با زهکشی گاز متان قبل از استخراج زغال‌سنگ، در حین معدنکاری و یا پس از استخراج زغال‌سنگ می‌توان میزان مخاطرات موجود در معادن زغال‌سنگ را کاهش داد. لذا در این تحقیق به بررسی قابلیت گاز زدایی در معادن کلاریز شرقی، رزمجای غربی، برناکی، بزرگ، رضی و تخت از مجموعه معادن زغال‌سنگ البرز شرقی با استفاده از روش سیستم‌های مهندسی سنگ پرداخته شد که مشخص شد معدن زغال‌سنگ رضی دارای قابلیت مناسبی برای انجام عملیات گاز زدایی است که شواهد و اتفاقات رخ داده در این معدن نیز شاهدهی بر این ادعا است. سپس با استفاده از روش تحلیل سلسله مراتبی فازی به انتخاب روش مناسب پیش زهکشی در این معدن پرداخته شد که مشخص شد روش پیش زهکشی با استفاده از گمانه‌های قائم مناسب‌ترین روش زهکشی در این معدن است و در انتها به بررسی فنی و اقتصادی در این معدن پرداخته شده است.

محاسبات انجام گرفته حاکی از غیر اقتصادی بودن گازکشی متان از معدن زغال‌سنگ رضی است. از آنجایی که قیمت گاز مصرفی در ایران رو به افزایش است، با حذف یارانه‌ها از حامل‌های انرژی و در نظر گرفتن

کاهش هزینه پس از انجام عملیات گازکشی برای استخراج زغال‌سنگ، همچنین مزایای مربوط به ایمنی کارکنان در این معدن می‌توان آن را به سمت اقتصادی بودن پیش برد.

۷-۲- پیشنهادها

با توجه به اینکه تا به حال هیچ‌گونه عملیات گازکشی در معادن زغال‌سنگ ایران انجام نشده، اجرای این پروژه در کشور باعث ایجاد زمینه‌ای جدید در اشتغال‌زایی و فعال شدن معادن زغال‌سنگ می‌شود.

به منظور بهتر شدن نتایج حاصل از امکان‌سنجی زهکشی گاز متان و نیز فرآیند متان زدایی در ایران پیشنهادهای زیر بهتر است مورد بررسی قرار گیرد.

اجرای پایلوت به منظور ارزیابی اقتصادی محل فرآیند متان زدایی امری ضروری است. پیشنهاد می‌شود بعد از انجام امکان‌سنجی فرآیند CBM در حوضه‌های زغالی ایران، یک پایلوت آزمایشی به منظور بررسی فنی و اقتصادی عملیات متان زدایی در حوضه زغالی هدف مورد اجرا قرار گیرد.

بهتر است به منظور استفاده از تجربیات کشورهای جهان در رابطه با متان زدایی مکاتباتی با شرکت‌های فعال در زمینه CBM برای پتانسیل‌یابی و پیاده‌سازی CBM در ایران صورت پذیرد.

بررسی امکان احداث نیروگاه تولید برق در منطقه هدف گازکشی با توجه به نتایج حاصل شده از اجرای پایلوت آزمایشی از نرخ جریان گاز خروجی از گمانه.

با توجه به وقوع چند حادثه به علت تصاعد آبی گاز و انفجار در معادن زغال‌سنگ ایران و تلفات جانی، انجام این پروژه با وجود غیر اقتصادی بودن آن، باعث کاهش خطرات و تلفات انسانی می‌شود.

بسیاری از معادن متروکه زغال‌سنگ ایران هم‌اکنون منبع مناسبی از گاز متان بوده و قابل استحصال است.

منابع و مراجع

- اصانلو م، (۱۳۷۸)، "مهندسی زغالسنگ"، انتشارات ناقوس.
- بایس، چ.ج، شیستس، ر.س.،. تاثیر نفوذپذیری لایه زغال سنگ بر انتخاب روش گاززدایی. ترجمه ناظری، خ، صفحه ۱ تا ۶، سلسله مباحث کانسار، معدن، فلز، بانکی، م، مرکز انتشارات صنعت فولاد، ۱۳۶۹.
- تقی پور س و رخشنده م، (۱۳۸۲)، "طبقه بندی مهندسی توده سنگ‌ها"، انتشارات دانشگاه صنعتی امیرکبیر.
- توکلی، محمد، سرشکی، فرهنگ. گاز زغال و روش‌های کاهش آن (گاززدایی) در معدن پروده طبس. پنجمین کنفرانس دانشجویی مهندسی معدن، ۱۳۸۵.
- خاکی غ، (۱۳۹۰)، "روش تحقیق با رویکرد به پایان نامه نویسی"، (چاپ نهم)، انتشارات بازتاب.
- خالوکاکائی ر و زارع نقدهی م، (۱۳۸۸) "تحلیل و رده‌بندی پتانسیل ناپایداری شیب‌های سنگی مشرف به جاده گردنه خوش ییلاق با استفاده از رویکرد سیستمی"، مجله انجمن زمین شناسی مهندسی ایران، جلد ۲، شماره ۱ و ۲، صفحات ۱۹ تا ۳۳.
- خبرگزاری تسنیم، خرداد ۱۳۹۴، www.tasnimnews.com/
- دفتر فنی اکتشافات شرکت زغال سنگ البرز شرقی، ۱۳۷۱، طرح اکتشاف و تجهیز معدن زغال سنگ تخت، ۲۵ صفحه.
- دوست فاطمه، محمد، محدوده‌های زغال خیز ایران و نگرشی بر روش‌های استخراج و بررسی امکان‌پذیری مکانیزاسیون در معادن زغال سنگ ایران. سمینار کارشناسی ارشد دانشگاه صنعتی شاهرود، ۱۳۸۱.
- صمدزادگاه، رحمان، مهندسی تهویه در معادن، انتشارات نوپردازان، چاپ اول، ۱۳۸۹، ۴۴۸ صفحه.
- گزارش دفتر فنی اکتشافات شرکت زغال سنگ البرز شرقی. گزارش زمین‌شناسی منطقه کلاریز. شرکت ملی ذوب آهن ایران، شرکت زغال سنگ البرز شرقی، ۱۳۵۴.
- گزارش دفتر فنی اکتشافات شرکت زغال سنگ البرز شرقی. نتایج اکتشافات تفضیلی بخش زغال دار منطقه اولنگ، ملج آرام فوقانی. وزارت معادن و فلزات، شرکت زغال سنگ البرز شرقی، ۱۳۶۰.
- گزارش دفتر فنی اکتشافات شرکت زغال سنگ البرز شرقی. نتایج اکتشافات تفضیلی بخش زغال دار منطقه اولنگ، ملج آرام فوقانی. وزارت معادن و فلزات، شرکت زغال سنگ البرز شرقی، ۱۳۷۲.
- گزارش دفتر فنی اکتشافات شرکت زغال سنگ البرز شرقی. نتایج اکتشافات تفضیلی بخش زغال دار رضی منطقه اولنگ. وزارت معادن و فلزات، شرکت زغال سنگ البرز شرقی، ۱۳۶۴.

- گزارش دفتر فنی اکتشافات شرکت زغال سنگ البرز شرقی. نتایج اکتشافات تفضیلی منطقه رزمجا مجتمع طزره. شرکت ملی ذوب آهن ایران، شرکت زغال سنگ البرز شرقی، ۱۳۵۴.
- گزارش دفتر فنی اکتشافات شرکت زغال سنگ البرز شرقی. نتایج تحقیقات اکتشافی منطقه پشکلات. شرکت ملی ذوب آهن ایران، شرکت زغال سنگ البرز شرقی، ۱۳۵۶.
- مدنی، حسن، تهویه در معادن، مرکز نشر دانشگاهی، چاپ هفتم، ۱۳۸۹، ۵۷۴ صفحه.
- مدنی، حسن. تهویه در معادن. مرکز نشر دانشگاهی، تهران، ۱۳۶۶.
- هارتمن. اصول مهندسی معدن. ترجمه مهدی یاوری شهرضا. انتشارات دانشگاه صنایع و معادن. تهران. ۶۴۰. صفحه، ۱۹۸۷.
- یزدی، محمد. زغال سنگ (از منشاء تا اثرات زیست محیطی). انتشارات جهاد دانشگاهی واحد صنعتی امیرکبیر، ۱۳۸۲.

- Alekseev/ E.G., Mustafin/ R.K., Umarhajieva/ N.S. (2003). Coal Methane: Potential Energy Prospects for Kazakhstan. UNECE Ad Hoc Group of Experts on Coal in Sustainable Development.
- Allenby B.R., (1999), "Industrial Ecology: Policy Framework and Implementation. In Complex System and Risks, Costs and Benefits", chapters 9 and 10 , pp. 132-162.
- Aminian/K., (2005). Evaluation of Coalbed Methane Reservoirs. Petroleum & Natural Gas Engineering Department West Virginia University.
- Bertalanffy L.V., (1968), "General System Theory: Foundations, Development, Applications", George Braziller Publisher.
- Black D. J., Factors Affecting the Drainage of Gas from Coal and Methods to Improve Drainage Effectiveness, PhD thesis, University of Wollongong, Australia, 2011.
- Chang D.Y. 1996, Applications of extent analysis method on fuzzy AHP. European Journal of Operational Research, 95, pp.649-655.
- Davies/Cameron., (2001). Coalmine Methane-Greenhouse Gas Mitigation in Action. presented at the 2nd Annual Coalbed and Coal Mine Methane Conference, Denver, Colorado.
- Deul/ M and Kim/ A. G., (1988). Methane Control Research: Summary of Results, 1964–1980. Bulletin 687, US Bureau of Mines, pp. 3–118.
- Dougherty, H. N., Karacan, C. Ö, Methane drainage and degasification – general concepts, NIOSH Short Course – Control of Methane Gas in Underground Mining Operations, 12 June, 2010, Sudbury, Ontario, Canada.
- ECE ENERGY SERIES, (2010). Best Practice Guidance for Effective Methane Drainage and Use in Coal Mines. UNITED NATIONS PUBLICATION.
- Esterle/Joan, (2005). Gas in Coal: a Hazard and a Resource. The university of Queensland Australia, Earth Sciences.

- Fox/D., (2009). Coal Bed Natural Gas Development, Natural Resource Specialist. (406) 233-3664
- Frough, O. and Torabi, S.R., (2013), "An application of rock engineering systems for estimating TBM downtimes", Engineering Geology, Vol. 157, pp.112-123.
- Fursich, M., Wilmsen, M., Seyed-Emami, K., Cecca, F., Majidifard, M. R., The upper Shemshak Formation (Toarcian–Aalenian) of the Eastern Alborz (Iran): Biota and palaeoenvironments during a transgressive–regressive cycle, Journal of Facies, 4 June 2005.
- Gamson, P. D., Beamish, B. B., Coal type, microstructure and gas flow behaviour of Bowen Basin coals, Symposium on Coalbed Methane Research and Development in Australia, Coalseam Gas Research Institute – James Cook University, Townsville, 19-21 November, Volume 4, 1992, pp 43-64.
- Garratt, John R.F.,(2001) .Extraction and Utilization of Gas from Abandoned Coal Mine. 2nd Annual Coalbed and Coal Mine Methane Conference, Denver, Colorado.
- Greb S.F., Eble C.F., Peters D.C. and Papp A.R., (2006), "COAL and the Environment", American Geological Institute In cooperation with Illinois Basin Consortium U.S. Department of Energy, Office of Fossil Energy, National Energy Technology Laboratory Office of Surface Mining, ISBN: 0-922152-77-2.
- Haijun/ Qiu, (2009). Coalbed Methane Exploration in China. Ministry of Land and Resources, Beijing, China
- Hill J.D. and Warfield J.N., (1972), "Unified program planning. In:Sage A.P. (ed) Systems Engineering: Methodology and Applications", New York: IEEE Press.
- Howard/L., Hartman., (1992). Methane Drainage. In: Gerald/ L. Finger and Michael/A., Trevits, Handbook of Mining Engineering, pp. 896-937, Inc. Littleton Colorado. Society for Mining, Metallurgy and Exploration.
- <http://www.bp.com>, 2008
- <http://www.ch4.com.au>
- <http://www.edenenergy.com.au>, 2007
- <http://www.energy.gov>
- <http://www.iea.org>
- <http://www.norwestcorp.com/>, 2009
- http://www.slb.com/resources/publications/oilfield_review/en/2003/or2003_aut.aspx (oilfield review, autumn 2003.
- <http://www.smtc.com>
- <http://www.undergroundcoal.com.au>
- Hudson J.A. and Harrison J.P. (1992), "A new approach to studying complete rock engineering problems", Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology Vol. 25, pp. 93-105, doi:10.1144/GSL.QJEG.1992.025.02.03
- Hudson J.A., (1992), "Rock Engineering Systems, Theory and Practice", Ellis Horwood Ltd, Chichester, 185 p.
- Ingelson/A et al., (2006). CBM Produced Water.The Emerging Canadian Regulatory Framework, Institute for Sustainable Energy, Environment and Economy (ISEEE).

- James/C. and Cobb., (2003). Coal Bed Methane.State geologist and Director Kentucky Geological Survey University of Kentucky, Lexington
- James/P. and Ulery., (2007). Managing excess gas emissions associated with coal mine geological features. Handbook for Methane Control in Mining.
- Jiao Y. and Hudson J.A., (1995), “The fully-coupled model for rock engineering systems”, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, Vol. 32, Issue 5, pp. 491-512.
- Hu, X., Yang, S., Zhou, X., Zhang, G. and Xie, B., 2014. A quantification prediction model of coalbed methane content and its application in Pannan coalfield, Southwest China. J. Nat. Gas Sci. Eng. 21, 900–906.
- Lama, R. D., Bodziony, J., Outburst of Gas, Coal and Rock in Underground Coal Mines, Westonprint Pub., Kiama, NSW, Australia, 1996, pp. 499.
- Lama, R. D., Prediction of shear zones associated with outbursts in coal mines, 20th Int. Mine Safety Conf., Sheffield, Oct. 1983.
- Lambert/S.W., Trevits/M.A and Steidl/ P.F., (1980). Vertical Borehole Design and Completion Practices to Remove Methane Gas From Mineable Coalbeds. RI-CMTC-TR-80-2, US Department of Energy, Aug., 163 pp.
- Law, B. E., The relationship between coal rank and cleat spacing: implication for the prediction of permeability in coal, The 1993 Int. Coalbed Methane Symposium , Birmingham, Paper No. 934122.
- Law/B.E. and Rice/D.D.,(1993). Hydrocarbons from Coal. AAPG Studies in Geology #38. The American Association of Petroleum Geologists. Tulsa, Oklahoma.
- Lawall, C. E., and L. M. Morris. (1934). Occurrence and Flow of Gas in the Pocahontas No. 4 Coalbed in Southern West Virginia. Trans. AIME, V. 108, pp. 11-30.
- Mazzoccola D.F. and Hudson J.A., (1996), “A comprehensive method of rock mass characterization for indicating natural slope instability”, Quarterly Journal of Engineering Geology & Hydrogeology, Vol. 29, No 1, pp. 37-56, doi: 10.1144/GSL.QJEGH.1996.029.P1.03
- McPherson M.J., (1993), “Chap. 9: Ventilation Planning”, Subsurface Ventilation and Environmental Engineering, Chapman & Hall, New York, pp. 282-321.
- Robert/ M., (2002). Coal bed methane (CBM) and mine methane (CMM) in North America where and why? Norwest Mine Services, Inc.
- Sawhney/Prem, (2010) . Development in Indial-CMM/CBM. Essae Exploration & production Ltd. Coe-clean Business.
- Schultz/ Karl, (2003). CMM/CBM Technologic and activitize in Russia. US Enviromental Protection Agency.
- Skow/M.L., Kim/ A.G., and Deul/ M., (1980) .Creating a Safer Environment in U.S. Coal Mines. The Bureau of Mines Methane Control Programs 1964-79,” Impact Report, US Bureau of Mines, 50 P.
- Thakur, Pramod/C., (2006) .Global Coalbed Methane: Resources and Production Techniques. 2nd Annual Coalbed and Coal Mine Methane Conference, Denver, Colorado.
- Thomson, S., Poppitt, I., Radio imaging to reduce risk: seam height investigation at Baal Bone Colliery, ACIRL Seminar, Sydney Oct. 1993.

-
- USEPA (U.S. Environmental Protection Agency), (1999). Guidebook on Coalbed Methane Drainage for Underground Coal Mines. Cooperative Agreement No. CX824467-01-0 with The Pennsylvania State University by Jan M. Mutmanský,
- Venter, J., and P. Stassen (1953). Drainage and Utilization of Firedamp. BuMines IC 7670, 22 P.
- Wang/Y, (2003). Investigation Report of methane emission in Chinese coal mines. Fushun Branch of China Coal Research Institute.
- Wang/K and Xue/S, (2008). Gas Drainage Practices and Challenges in Coal Mines of China. Conference, University of Wollongong & the Australasian Institute of Mining and Metallurgy, 178-185.
- William P.D. 1994. Methane Control for Underground Coal Mines. United state Department of the interior Bruce Babbitt, Secretary and Bureau of mines.
- Williams, R. J., Rogis, J., An analysis of geological factors leading to outburst-prone conditions at Collinsville, Queensland. Symposium on Occurrence, Prediction and Control of Outbursts in Coal Mines, Brisbane, Australia, Sept. 1980, pp. 99-110.
- Xue/ S and Guo/H, (2009). Control drainage gas quality and quantity from underground coal mines to enhance its utilisation options. CSIRO Exploration and Mining PO Box 883, Kenmore, QLD, Australia 4069.

Abstract

Coal as a major source of energy in the world has been used for centuries. The presence of methane in underground coal mines is one of the major problems, because this subject creates many deaths every year in underground coal mines. Presence of this gas in mines is not only difficult and dangerous work in the mine, but also makes it more expensive; because miners for ventilation and release this gas to atmosphere are growing incur additional costs. The release of this gas in the air cause further pollution of the atmosphere and increase the greenhouse gases in the air. Due to the high volume of gas in some of the seams of coal, mine ventilation of these seams cannot create a secure environment for coal mining, so degassing before, during or after extraction mining is necessary. Accordingly, the degassing of methane can reduce the risks involved in these mines. So, in this research, according to a review of all the latest, known and credible studies about Coal Bed Methane (CBM), the degassing process and methods of degassing coal mines are discussed. In Continue the geological parameters affecting on the process of removing methane was discussed. Feasibility of CBM in eastern Kellariz, western Razmja, Bornaki, Bozorg, Razi and Takht of eastern Alborz coal mines by using Rock Engineering Systems (RES) was calculated. Based on the calculation determine, the Razi coal mine has the potential to degassing, and events occurring in the mine, is evidence for this claim. Then, by using Fuzzy Analytical Hierarchy Process (FAHP) method, the best method for pre-drainage in this mine was selected. Based on the calculation determine, the vertical boreholes is the most appropriate method in this mine. In the final chapter technical and economic studies on the mine has been paid.

Keywords

Coal, Eastern Alborz Coal Mines, Razi Coal Mine, Coal Bed Methane (CBM), Rock Engineering Systems (RES), Fuzzy Analytical Hierarchy Process (FAHP).



Shahrood University of Technology

Kharazmi Campus

Mining Exploitation Group

**Feasibility of Coal Bed Methane (CBM) in Eastern Alborz Coal
Mines, Case Study: Razi Coal Mine**

Keramat Ghanbari

Supervisors:

**Dr. Farhang Sereshki
Prof. Mohammad Ataei**

Advisor:

Amir Saffari

**Thesis Submitted in Partial Fulfillment of Requirements for the Degree of
Master of Science (M.Sc.)**

**In
Exploitation Mining Engineering**

February 2016