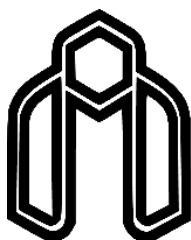


بنام خداوند جان و



دانشگاه صنعتی شاهرود

دانشکده مهندسی نفت، معدن و ژئوفیزیک

رساله دکتری استخراج مواد معدنی

مدلسازی جریان خروج گاز متان از لایه‌های زغال‌سنگ به داخل گمانه‌های

گاز زدایی و ارائه الگوی مناسب جانمایی گمانه‌ها و مشخصات آنها

نگارنده: شادی السادات جمالان

اساتید راهنما:

دکتر فرهنگ سرشکی

دکتر محمد عطایی

استاد مشاور:

دکتر مهدی نجفی

اسفند ۱۴۰۰

تقدیم اثر

بیاد پدرم که همیشه آموختن علم را می ستود،

و تقدیم به مادرم که هر آنچه در زندگیم دارم از وجود پدر از محبت او سرچشمه می گیرد؛

و تقدیم به

همه کسانی که محطه ای بعد انسانی و وجدانی خود را فراموش نمی کنند و بر آستان گران سنگ انسانیت سر
فرود می آورند.

با تشکر از

استاد گرامی و ارجمندم جناب آقایان دکتر فرهنگ سرشتی و دکتر محمد عطائی و راهنمایی‌های ایشان،
که هدف و انگیزه این پروژه را ایجاد کردند. سپاس از تلاشهای بی دریغتان که همواره شامل حال ما
دانشجویان بوده است.

همچنین تشکر از کلیه استاد دانشکده معدن دانشگاه صنعتی شاهرود به ویژه استاد دکتر اقدرد که مرا این رفیعی
برای تمام راهنمایی‌های ایشان.

تعهدنامه

اینجانب شادی السادات جمالان دانشجوی دوره دکتری رشته مهندسی معدن گرایش استخراج معدن دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده رساله مدلسازی جریان خروج گاز متان از لایه‌های زغال‌سنگ به داخل گمانه‌های گاز زدایی و ارائه الگوی مناسب جانمایی گمانه‌ها و مشخصات آنها تحت راهنمایی دکتر فرهنگ سرشکی و دکتر محمد عطائی متعهد می‌شوم:

تحقیقات این پایان‌نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است.

- در استفاده از نتایج پژوهش‌های محقق‌های دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است.
- مطالب مندرج در پایان‌نامه تاکنون توسط خود یا افراد دیگر برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است.
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج پایان‌نامه تأثیرگذار بوده‌اند رعایت شده است.
- در کلیه مراحل انجام این پایان‌نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است.

امضاء:

تاریخ:

مالکیت نتایج و حق نشر

کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج، کتاب، برنامه‌های رایانه‌ای، نرم افزارها و تجهیزات ساخته شده است) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می‌باشد. این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود. استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان‌نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی‌باشد.

چکیده

زغال سنگ به عنوان یکی از منابع اصلی انرژی در دنیا از قرن ها پیش مورد استفاده بوده است. از خطرات مهم استخراج زیرزمینی زغال سنگ، حضور گاز متان است که هر ساله تلفات جانی زیادی در معادن دنیا به وجود می آورد. وجود این گاز در معادن علاوه بر ایجاد محیطی خطرناک و آماده انفجار برای معدن کاران، هزینه های تهویه را نیز افزایش می دهد. براین اساس با گاز زدایی متان قبل از استخراج زغال سنگ می توان میزان مخاطرات موجود در این معادن را کاهش داد. در این رساله ابتدا با استفاده از معادلات و فرضیات و اطلاعات بدست آمده از معدن زغال سنگ طبس و استفاده از نرم افزار کامسول (COMSOL)، شبیه سازی گاززدایی از لایه ی C1 معدن زغال سنگ پروژه I طبس انجام شد و سپس گمانه های گاززدایی مناسب متان لایه ی زغال سنگ با مدل سازی سه بعدی در COMSOL طراحی گردید. براساس شبیه سازی های انجام گرفته مشاهده شد که مقدار انتشار متان با افزایش یا کاهش فاصله از گمانه ها متغیر است. به طوری که از مدل استنباط گردید، فشار خروج گاز از گمانه ها در روز های اول تا سوم گاززدایی به میزان ۱۰ درصد کاهش پیدا کرد. این مقدار بسته به تخلخل زغال سنگ، تعداد گمانه ها و قطر و عمق آن ها متغیر است. با استفاده از دو گمانه، فشار در لایه ی زغال سنگ ۱۷ درصد کاهش یافت. کاهش فشار در مدل هایی که بیشتر از دو گمانه دارند به علت افزایش قدرت مکش بیشتر است. هنگامی که قطر گمانه ها ۶۶ میلی متر و مدل سه گمانه ای است، فشار متان در نزدیکی گمانه ها ۹۰ درصد در روز پانزدهم گاززدایی کاهش می یابد. نمودارها نشان می دهند که هر چقدر طول گمانه ها بیشتر باشد، کاهش فشار سریع تر و در زمان کمتری اتفاق می افتد. هنگامی که نتایج بدست آمده از مدل جدید با مدل ساخته شده برای دیگر معادن مشابه مقایسه شد، نتایج سازگار بودند.

کلید واژه: گاز زدایی، متان، لایه ی زغال سنگ، مدل سازی سه بعدی، نرم افزار کامسول (COMSOL)

لیست مقالات مستخرج از رساله

مقالات چاپ یا پذیرفته شده در مجلات ISI				
شماره	عنوان مقاله	عنوان مجله	وضعیت	سال
۱	Numerical modelling of coal gas drainage in a three-dimensional framework	Arabian Journal of Geosciences	پذیرش	۲۰۲۲
مقالات ارائه شده در کنفرانس های داخلی و خارجی				
شماره	عنوان مقاله	عنوان کنفرانس	وضعیت	سال
۱	بررسی ریسک های اثرگذار بر فرآیند سیستم گاز زدایی . همایش ملی مدیریت ریسک و تاب آوری در صنایع معدنی	مدیریت ریسک و تاب آوری در صنایع معدنی	چاپ	۱۳۹۸
۲	مدل سازی عددی جریان گاز در اثر گاززدایی از داخل لایه زغال سنگ	پنجمین کنگره ملی زغالسنگ ایران	چاپ	۱۴۰۰
۳	اصول اجرایی زهکشی متان	پنجمین کنگره ملی زغالسنگ ایران	چاپ	۱۴۰۰
۴	فرآیند زهکشی متان در کارگاه E3 از معادن پروده یک	پنجمین کنگره ملی زغالسنگ ایران	چاپ	۱۴۰۰
۵	برآورد انتشار گاز متان در کارگاه استخراج زغال سنگ معدن یک پروده با استفاده از سیستم هوشمندسازی	پنجمین کنگره ملی زغالسنگ ایران	چاپ	۱۴۰۰

فهرست مطالب

فصل اول کلیات.....	۱
۱-۱- مقدمه.....	۲
۲-۱- بیان مساله.....	۴
۳-۱- ضرورت انجام پژوهش.....	۸
۴-۱- سؤال‌های اصلی پژوهش.....	۹
۵-۱- اهداف پژوهش.....	۱۰
۶-۱- جنبه جدید بودن و نوآوری پژوهش.....	۱۰
۷-۱- ساختار رساله.....	۱۱
فصل دوم سابقه تحقیق و مبانی نظری.....	۱۳
۱-۲- مقدمه.....	۱۴
۲-۲- گاززدایی متان از لایه‌ی زغالسنگ.....	۱۴
۱-۲-۲- تکنولوژی استخراج، مهار و بازیافت گاز متان.....	۱۶
۲-۲-۲- موارد مصرفی و بازار متان.....	۱۸
۳-۲- اهمیت گازکشی متان از لایه زغالسنگ از گذشته تاکنون.....	۱۹
۴-۲- مخازن هیدروکربون.....	۲۳
۵-۲- مزایای استفاده از تکنولوژی CBM.....	۲۶
۶-۲- جذابیت‌های مخازن نامتعارف CBM در حوزه انرژی.....	۳۰
۷-۲- روش‌های استخراج گاز متان از لایه‌های زغالسنگ.....	۳۴
۱-۷-۲- روش‌های استحصال گاز قبل از عملیات استخراج.....	۳۴
۲-۷-۲- روش‌های استحصال گاز حین یا بعد از عملیات استخراج.....	۴۸
۸-۲- پیشینه‌ی مطالعات.....	۶۱
۹-۲- جمع بندی و نتیجه گیری.....	۷۲
فصل سوم معدن زغالسنگ طبس.....	۷۵
۱-۳- مقدمه.....	۷۶
۲-۳- مطالعه‌ی موردی.....	۷۶
۱-۲-۳- گازخیزی معدن زغال سنگ پروده طبس.....	۷۶
۲-۲-۳- روش گاززدایی معدن زغال سنگ پروده طبس.....	۷۸
فصل چهارم مدلسازی و تحلیل نتایج.....	۸۳
۱-۴- مقدمه.....	۸۴

۸۴	۲-۴- معرفی نرم افزار کامسول
۸۵	۳-۴- مدل سازی عددی
۸۶	۴-۳-۱- مدل هندسی و جزئیات آن
۸۷	۴-۳-۲- جنس اجزای تشکیل دهنده
۸۸	۴-۳-۳- محاسبات عددی
۹۱	۴-۳-۴- شرایط مرزی
۹۲	۴-۳-۵- مش بندی
۹۳	۴-۴- شبیه سازی نتایج
۹۳	۴-۴-۱- فشار گاز
۹۴	۲-۴-۴- تأثیر تعداد گمانه ها
۹۵	۴-۴-۳- تأثیر شعاع گمانه
۹۶	۴-۴-۴- تأثیر تعداد و شعاع گمانه و زمان گاززدایی بر کاهش فشار لایه
۱۰۱	۵-۴-۴- شعاع تأثیر گمانه و زمان گاززدایی
۱۰۳	۶-۴-۴- تغییرات فشار - زمان
۱۰۸	۵-۴- اعتبار سنجی مدل عددی
۱۱۲	۱-۵- نتیجه گیری
۱۱۳	۲-۵- پیشنهادات
۱۱۶	منابع

فهرست جداول

جدول ۱-۲- مقایسه بین ویژگی‌های مخازن متعارف با مخازن زغال‌سنگ به لحاظ قابلیت تولید گاز	۳۳
جدول ۲-۲- مقایسه بین روش‌های مختلف تولید از ذخایر زغال‌سنگ در دنیا (Sawhney, 2007)	۵۲
جدول ۳-۲- خلاصه‌ای از مطالعات انجام‌شده در ارتباط با موضوع مورد مطالعه	۶۲
میرسد. بر اساس نتایج به دست آمده، مقدار متوسط گازخیزی طبیعی نسبت به عمق برای لایه‌های	
(B2,B1) و (C2,C1,D) به صورت جدول ۱-۳ می‌باشد.	۷۷
جدول ۱-۳- مقدار متوسط گازخیزی طبیعی لایه های مختلف معدن پروده نسبت به عمق (برزگر، ۱۳۶۱).	۷۷
جدول ۱-۴- پارامترهای موثر در میزان حرکت مولکول‌های گاز (Taheri,2016؛ Sereshki,2005)	۸۸
جدول ۲-۴- اطلاعات حاصل از مش‌بندی بر روی مدل	۹۲
جدول ۳-۴- اطلاعات حاصل از معدن زغال‌سنگ جیولیشن چین (Yue et al., 2019)	۱۰۹
جدول ۴-۴- اطلاعات حاصل از معدن زغال‌سنگ طبس (گزارش مجتمع معادن زغال‌سنگ پروده طبس،	
۱۳۷۸)	۱۰۹

فهرست اشکال

- شکل ۱-۲- طرز قرارگیری گاز در لایه‌های زغالسنگ (توکلی و سرشکی، ۱۳۸۵)..... ۱۷
- شکل ۲-۲- مقایسه انواع ذخایر نامتعارف با ذخایر متعارف هیدروکربون (Zou et al., 2013) ۲۴
- شکل ۳-۲- توزیع شبکه خطوط انتقال گاز و میزان مجاورت آن‌ها با ساختارهای زغال سنگ (عسکری، ۱۳۹۴)..... ۲۶
- شکل ۴-۲- قابلیت جذب ذاتی CO₂ نسبت به متان در زغال سنگ در فشارهای مختلف (Ma, 2004)..... ۲۸
- شکل ۵-۲- مقدار سرانه مصرف انرژی در ایران به تفکیک حامل‌های انرژی و سهم بسیار اندک زغال سنگ..... ۲۹
- شکل ۶-۲- مقایسه نرخ تولید در یک مخزن متعارف با تولید گاز از زغال سنگ (Thakur, 2016)..... ۳۲
- شکل ۷-۲- مکانیسم تولید گاز زغال سنگ (Han, 2015) ۳۳
- شکل ۸-۲- فرایند تولید آب و گاز در لایه زغال سنگ (Thakur, 2016)..... ۳۵
- شکل ۹-۲- مکانیزم ازدیاد برداشت گاز طی فرایند تزریق و تولید گاز در لایه زغال سنگ (Thakur, 2016)..... ۳۶
- شکل ۱۰-۲- فرایند تولید گاز در روش‌های ازدیاد برداشت میکروبی از زغال سنگ (Ritter, 2015) ۳۶
- شکل ۱۱-۲- نمایی شماتیک از گاززدایی با گمانه قائم (Ojha et al., 2011)..... ۳۸
- شکل ۱۲-۲- نمایی شماتیک از گمانه‌های افقی کوتاه (Ojha et al., 2011) ۴۲
- شکل ۱۳-۲- نمایی شماتیک از انواع گمانه‌های درون لایه افقی طولانی (Ojha et al., 2011)..... ۴۴
- شکل ۱۴-۲- حفاری گمانه‌های فوقانی (Ojha et al., 2011) ۴۵
- شکل ۱۵-۲- نمایی شماتیک از حفاری گمانه‌های جهتدار (Ojha et al., 2011)..... ۴۶
- شکل ۱۶-۲- نمایی کلی از روشهای گاززدایی حین استخراج (United Nations, 2010)..... ۴۹
- شکل ۱۷-۲- تاثیر منطقه تخریب بر لایه‌های مجاور (Ojha et al., 2011)..... ۵۰
- شکل ۱۸-۲- چرخه صنعتی تولید گاز از لایه زغال سنگ به روش CMM (Roshchanka et al., 2017) .. ۵۱
- شکل ۱۹-۲- انواع روشهای گاززدایی در منطقه تخریب (Ojha et al., 2011)..... ۵۳
- شکل ۲۰-۲- حفاری گمانه‌های تقاطعی (Ojha et al., 2011) ۵۷
- شکل ۲۱-۲- گاززدایی از منطقه تخریب با استفاده از روش گمانه های فوقانی (Ojha et al., 2011) ۶۰
- شکل ۱-۳- مقطع الگوی گمانه زنی () ۸۱
- شکل ۱-۴- ژئومتری سه بعدی مدل ۸۷
- شکل ۲-۴- مدل مش بندی شده ۹۲
- شکل ۳-۴- فشار خروج گاز در حالت دو گمانه با عمق ۱۰ متر و قطر ۶۶ میلی متر در ابتدا ۹۳
- شکل ۴-۴- فشار خروج گاز در حالت دو گمانه با عمق ۱۰ متر و قطر ۶۶ میلی متر در روز پانزدهم ۹۴
- شکل ۵-۴- فشار خروج گاز در حالت سه گمانه با عمق ۱۰ متر و قطر ۶۶ میلی متر در روز پانزدهم ۹۵
- شکل ۶-۴- فشار خروج گاز در حالت دو گمانه با عمق ۱۰ متر و قطر ۷۶ میلی متر در روز پانزدهم ۹۶
- شکل ۷-۴- فشار خروج گاز در حالت سه گمانه با عمق ۱۰ متر و قطر ۸۶ میلی متر در ابتدا ۹۷
- شکل ۸-۴- فشار خروج گاز در حالت سه گمانه با عمق ۱۰ متر و قطر ۸۶ میلی متر در روز سوم ۹۸

- شکل ۴-۹- فشار خروج گاز در حالت سه گمانه با عمق ۱۰ متر و قطر ۸۶ میلی متر در روز ششم..... ۹۹
- شکل ۴-۱۰- فشار خروج گاز در حالت سه گمانه با عمق ۱۰ متر و قطر ۸۶ میلی متر در روز نهم..... ۱۰۰
- شکل ۴-۱۱- فشار خروج گاز در حالت سه گمانه با عمق ۱۰ متر و قطر ۸۶ میلی متر در روز پانزدهم .. ۱۰۱
- شکل ۴-۱۲- شعاع تاثیر گمانه ها در حالت سه گمانه با عمق ۱۰ متر و قطر ۶۶ میلی متر در روز سوم. ۱۰۲
- شکل ۴-۱۳- شعاع تاثیر گمانه ها در حالت سه گمانه با عمق ۱۰ متر و قطر ۶۶ میلی متر در روز پانزدهم ۱۰۳
- شکل ۴-۱۴- نمودار فشار-زمان در حالت دوگمانه‌ای با طول ۱۰ متر و قطر ۶۶ میلی متر..... ۱۰۴
- شکل ۴-۱۵- نمودار فشار-زمان در حالت دوگمانه‌ای با طول ۵ متر و قطر ۶۶ میلی متر..... ۱۰۴
- شکل ۴-۱۶- نمودار فشار-زمان در حالت دوگمانه با عمق ۱۰ متر و قطر ۷۶ میلی متری..... ۱۰۵
- شکل ۴-۱۷- نمودار فشار-زمان در حالت سه گمانه با عمق ۱۰ متر و قطر ۶۶ میلی متری..... ۱۰۵
- شکل ۴-۱۸- نمودار فشار-زمان در حالت سه گمانه با عمق ۱۰ متر و قطر ۸۶ میلی متری..... ۱۰۶
- شکل ۴-۱۹- تغییرات فشار در طی ۱۵ روز گاززدایی..... ۱۰۷
- شکل ۴-۲۰- تأثیرات تعداد گمانه‌ها بر روی گاز زدایی در زمان ۱۵ روز..... ۱۰۷
- شکل ۴-۲۱- نتایج مقایسه‌ی نمودارهای فشار-زمان به دست آمده از معادن حالت دوگمانه‌ای طبس (قرمز) و جیولیشان (آبی)..... ۱۰۸

فصل اول

کلیات

۱-۱- مقدمه

انرژی در حیات اقتصاد صنعتی کشورهای جهان، از نقشی فوق‌العاده مهم و زیر بنایی برخوردار است؛ چنانکه توسعه اقتصادی پایدار بدون دسترسی پیوسته و کافی به منابع انرژی امکان‌پذیر نخواهد بود. نگاهی به گذشته جهان نشان می‌دهد که عمده معضلات و کشمکش‌های جهانی بر سر تصاحب منابع انرژی بیشتر بوده است.

اهمیت انرژی که با وقوع انقلاب صنعتی بیش از گذشته مشهود شد، با تغییر گرایش جهان از مصرف زغال‌سنگ به نفت در ابتدای قرن اخیر رویکردی تازه یافت، چراکه برخلاف زغال‌سنگ که معادن آن در اختیار کشورهای جهان صنعتی بود، منابع نفتی پراکندگی یکسانی در سطح جهان نداشته و عمدتاً در منطقه خلیج‌فارس و نیز آمریکای شمالی قرار داشتند که رفته‌رفته نقش کشورهای حاشیه خلیج‌فارس پررنگ‌تر شد.

بدین ترتیب با اهمیت یافتن نفت، کشورهای حامل انرژی در یک‌سو و مصرف‌کنندگان در سوی دیگر واقع شدند. این امر با ورود گاز به عرصه معادلات انرژی جهانی و پیش‌بینی افزایش نقش آن در آینده تشدید خواهد شد. نکته مهم آن است که عمده منابع نفت و گاز جهان در خاورمیانه و روسیه واقع شده است که روابط این کشورها با جهان صنعتی در گذر زمان دارای افت‌وخیزهای فراوانی بوده است.

افتراق نسبی میان دو قطب مصرف و تولید نفت و گاز و به‌ویژه نقش حیاتی انرژی و لزوم تأمین امنیت عرضه برای کشورهای صنعتی، هم‌زمان با وقوع شوک‌های نفتی، این کشورها را به فکر تنظیم یک برنامه رقابتی برای دستیابی مطمئن و دائم به منابع انرژی کرد.

حضور مؤثر در عرصه بین‌الملل انرژی برای هر دودسته از کشورهای صادرکننده و واردکننده، ناشی از یک برنامه‌ریزی دقیق، کارآمد و رقابتی است که تضمین‌کننده منافع آن‌هاست و از آن به‌عنوان «دیپلماسی انرژی» یاد می‌شود. در این میان کشور ایران از نظر برخورداری از منابع و ذخایر متنوع انرژی در زمره غنی‌ترین کشورهای جهان است. به نحوی که ایران چه از نظر ذخایر نفت و چه از نظر ذخایر گاز در مقام دوم

کشورهای دارای این دو صورت ارزشمند انرژی قرار دارد. از آنجایی که کشور ایران از طریق نفت به بازار انرژی جهان وارد شد، این صورت از انرژی برای ایران نقشی فوق‌العاده حیاتی پیدا کرده است. علاوه بر نقش استراتژیک نفت به‌عنوان مهم‌ترین کالای صادراتی ایران، صنایع داخلی نیز بر اساس استفاده از این صورت از انرژی در کشور توسعه پیدا کرد. با ورود گاز طبیعی به عرصه انرژی جهان بخصوص در ۴۰ سال گذشته، ایران به‌عنوان دومین دارنده ذخایر این ماده ارزشمند در جهان، سعی در جایگزینی این سوخت ارزان‌تر و پاک‌تر از نفت در سبد انرژی خود کرد به نحوی که بخش اعظم برنامه توسعه تأمین انرژی برای مصارف خانگی و صنعتی کشور به استفاده از گاز طبیعی به‌جای نفت اختصاص یافت. از طرف دیگر با رشد چشمگیر قیمت جهانی گاز طبیعی طی ۴۰ سال گذشته، این صورت از انرژی به‌عنوان یک کالای ارزشمند صادراتی برای ایران مطرح شده است.

باوجود برخورداری ایران از ذخایر عظیم نفت و گاز، محدود بودن عمر این منابع با توجه به سطح برداشت کنونی از یک طرف و جذابیت‌های صادراتی این دو صورت از انرژی برای ایران به‌عنوان دومین کشور دارنده نفت و گاز از طرف دیگر، لزوم توجه به سایر منابع انرژی داخلی ازجمله زغال‌سنگ را بیش از پیش آشکار می‌سازد. با این وجود، خطرات ناشی از استخراج زغال‌سنگ یکی از عوامل محدودکننده طراحی در معادن زیرزمینی محسوب می‌شود (اصانلو، ۱۳۷۸). از مهم‌ترین خطرات ناشی از استخراج زغال‌سنگ در معادن زیرزمینی می‌توان به نشست سطح زمین، انفجار خود به خودی سنگ، خودسوزی زغال‌سنگ، گازخیزی، تصاعد آبی، آلودگی محیط‌زیست و غیره اشاره کرد (عطائی، ۱۳۹۰). در این پروژه سعی شده است تا در ابتدا منابع علمی مختلف و پژوهش‌های انجام‌شده تاکنون مورد بررسی قرار گیرد و سپس با استفاده از مدل‌سازی دقیق و استفاده از نکات پیشنهادی تحقیقات موجود و به حداقل رساندن نواقص و محدودیت‌های موجود در این زمینه، مدلی برای پیش‌بینی گاز زدایی لایه‌های زغال‌سنگ ارائه گردیده است. با توجه به مطالب عنوان‌شده، عنوان "مدلسازی جریان خروج گاز از لایه‌های زغال‌سنگ به داخل گمانه‌های گاز زدایی و ارائه الگوی مناسب جانمایی گمانه‌ها و مشخصات آنها" برای موضوع رساله در نظر گرفته شد.

۲-۱- بیان مساله

گاز متان، دومین گاز گلخانه‌ای بعد از CO_2 است که از توانایی گرم کردن زمین تا ۲۵ برابر CO_2 برخوردار است (Franklin et al., 2010). متان علاوه بر اینکه یکی از اجزای تشکیل‌دهنده گاز طبیعی است، گاز گلخانه‌ای مؤثر و قوی نیز است. بر اساس ارزیابی‌های انجام‌شده، این گاز از سال ۱۸۵۰ میلادی باعث افزایش ۲۰ درصدی گازهای گلخانه‌ای شده است (Irving et al., 1996). اجرای پروژه‌های کاهش انتشار گاز متان در معادن زغال‌سنگ باعث افزایش ضریب ایمنی معدن، افزایش تولید و درآمد بیشتر می‌گردد. بزرگ‌ترین منابع تولیدکننده متان در بخش معدنی، معادن زغال‌سنگ زیرزمینی می‌باشند. گاز متان از معادن سطحی و زیرزمینی در نتیجه فعالیت‌های معدنی و عملیات وابسته به آن نظیر فرآوری زغال‌سنگ، ذخیره‌سازی و حمل‌ونقل تولید می‌شود (Brunner, 2004). امروزه سعی بر این است تا با اجرای پروژه‌های مختلف و کاهش انتشار متان در فضا، زمینه ورود این گاز به بازار فراهم شود. به‌طور کلی گاز متان خروجی از معادن زغال‌سنگ شامل ۸ درصد کل متان تولیدشده از فعالیت‌های بشری است. میزان انتشار متان در سال ۲۰۰۰ ناشی از معادن زغال‌سنگ، معادل ۳۰/۸ بلیون مترمکعب بوده است که در سال ۲۰۲۰ این میزان به حدود ۳۹/۳ بلیون مترمکعب افزایش می‌یابد (Brunner, 2004). دو کشور چین و ایالات متحده آمریکا، بزرگ‌ترین تولیدکنندگان زغال‌سنگ و همچنین صادرکنندگان اصلی متان می‌باشند (Cheng, 2011). کشور چین از گاز متان بستر زغال‌سنگی بسیار غنی برخوردار است. حجم آن منابع با عمق ۲۰۰-۳۰۰ متر در بخش‌های زغال‌سنگی آنتراسیت و بیتومین، بالای ۳۱/۴۶۰ میلیارد مترمکعب است. عمده‌ترین منابع این گاز در کشور چین، معادن فعال، متروکه و همچنین ناشی از عملیات فرآوری زغال‌سنگ است.

ایالات متحده آمریکا، دومین تولیدکننده عمده زغال‌سنگ بعد از کشور چین است و از منابع متان لایه‌ی زغال‌سنگی مهمی برخوردار است. این کشور با میزان تولید ۱۱-۴ تریلیون مترمکعب گاز متان در سال، بعد از کشورهای کانادا، روسیه، چین و استرالیا قرار دارد (Salomons, 2003).

در کشور ژاپن نیز حدود ۲/۵ میلیون مترمکعب گاز متان در سال از معدن زغال سنگ کوشیرو بازیافت می‌شود. در معدن متروکه آکابیرا، حدود ۰/۵ میلیون مترمکعب گاز متان در سال بازیافت می‌شود که برای مصرف ژنراتورهای توربین کوچک به کار می‌رود (Cheng, 2011). سایر کشورهای دارنده گاز متان، استرالیا، آلمان، هند، روسیه، قزاقستان، اوکراین، آفریقای جنوبی و انگلستان می‌باشند. کشورهای مکزیک و ویتنام هرچند میزان کل گاز متان تولیدی بالایی ندارند ولی دارای چندین معدن زغال سنگ با میزان قابل توجهی از این گاز می‌باشند (Somers, 2010). در کشور کانادا مقدار گاز متان منتشرشده، بر اساس گزارش سازمان هواشناسی (IPCC) در محدوده ۴۵۰ - ۴۱۰ (سال/میلیون تن) است که از این مقدار ۵۰-۳۰ (سال/میلیون تن) مربوط به معادن زغال سنگ است (Salomons, 2003). انتشار گاز متان از معادن زیرزمینی زغال سنگ کانادا، حدود ۲۵-۲۰ (سال/میلیون تن) تخمین زده می‌شود که حدود ۷۰ درصد آن مربوط به هوای تهویه شده معادن زغال سنگ با غلظت کمتر از ۱٪ است (Salomons, 2003).

مقدار گاز متان آزادشده در خلال عملیات معدن کاری به چندین فاکتور بستگی دارد. از مهم‌ترین این فاکتورها، نوع زغال سنگ، سن زغال سنگ، درجه زغال شوندگی، نفوذپذیری، رطوبت، عمق لایه زغال سنگی و همچنین روش استخراج می‌باشد. معادن زیرزمینی زغال سنگ به علت عمق زیاد لایه و لایه زغال سنگ، نسبت به معادن سطحی و روباز، متان بیشتری آزاد می‌کنند. درجه زغال شوندگی، اختلاف مرحله تشکیل زغال سنگ را نشان می‌دهد و بستگی به زمان تشکیل لایه‌ی زغال سنگ دارد. به موازات افزایش درجه زغال شوندگی، میزان گاز متان تولیدی نیز افزایش می‌یابد. از آنجایی که فشار با افزایش عمق لایه‌ی زغال سنگ زیاد می‌شود و ظرفیت جذب زغال سنگ نیز با فشار افزایش می‌یابد، بنابراین لایه‌های زغال سنگی با عمق بیشتر دارای مقدار گاز متان زیادتری نسبت به لایه‌های کم عمق با درجه زغال شوندگی یکسان می‌باشند، بعلاوه امکان انتشار گاز متان به اتمسفر در نزدیکی‌های سطح بیشتر است (Irving et al., 1996). رطوبت همراه زغال سنگ، یک عنصر کلیدی برای توسعه منابع متان است. زغال سنگ‌هایی با درجه زغال شوندگی و رطوبت بالا بیشترین مقدار متان را تولید می‌نمایند (Barker, 2003).

در خلال فرآیند زغال شوندگی، مقدار زیادی از گاز (عمدتاً متان) تولید می‌شود. مقداری از این گاز به داخل دیگر سنگ‌ها نفوذ می‌کند و یا وارد جو می‌شود؛ اما مقداری از آن در بستر زغال‌سنگ باقی می‌ماند. در بسیاری از موارد زغال‌سنگ یک منبع عالی برای ذخیره گاز است (James, 2003).

نفوذپذیری زغال‌سنگ عمدتاً به وسیله ساختارهایی به اسم ریز درزه ۱ ایجاد می‌شود. از آنجایی که ریز درزه‌ها با آب اشباع می‌شوند، متان در زغال‌سنگ به وسیله آب موجود در ریز درزه‌ها گرفتار می‌شود که معمولاً با تکنولوژی حفاری گمانه مرسوم، کشف نمی‌گردند (James, 2003).

یکی از منابع انرژی که در حال حاضر بیشترین تاثیرهای زیست محیطی 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 فنون نوین و سایر امکانات موجود، این آثار مخرب را به حداقل رسانید. زغال‌سنگ یکی از منابع مهم انتشار گازهای گلخانه‌ای مثل متان و دی اکسید کربن است. گاززدایی از معادن زغال‌سنگ با استفاده از سه روش گاززدایی قبل، حین و پس از استخراج انجام می‌شود. برای گاززدایی بهینه ابتدا باید سیستم‌های گاززدایی بررسی و سیستم مناسب انتخاب شود. روش‌های تولید گاز طبیعی از زغال‌سنگ به موارد زیر تقسیم می‌گردد:

استخراج متان لایه زغال‌سنگ قبل از عملیات معدنی (CBM ۲): به منظور بهره‌برداری از گاز ذخیره‌شده در زغال‌سنگ قبل از انجام عملیات معدنی استخراج زغال‌سنگ از روش CBM استفاده می‌شود.

استخراج طولانی مدت متان لایه زغال‌سنگ (ECBM ۳): در روش CBM به منظور تولید طولانی مدت گاز و همچنین برای جلوگیری از افت فشار در لایه‌های زغال‌سنگ از تکنیک‌هایی از قبیل شکافت هیدرولیکی، تزریق گاز CO_2 یا روش‌های بیولوژیکی برای ازدیاد برداشت استفاده می‌گردد. به این روش‌ها که به افزایش بازیافت از مخزن منجر می‌شوند اصطلاحاً ECBM اطلاق می‌گردد. تزریق CO_2 در لایه‌های زغال‌سنگ یکی

1- cleat

2- Coal Bed Methane

3- Enhanced CBM

از بهترین راهکارها برای افزایش نرخ تولید گاز است که علاوه بر ازدیاد برداشت به لحاظ زیست‌محیطی نیز می‌تواند منجر به کاهش گازهای گلخانه‌ای شود. به‌صورت خیلی ساده برای تکنیک نیاز به یک گمانه تولیدی و یک گمانه تزریقی CO_2 با فاصله مناسب (با توجه به تراوایی) است. تزریق تا مشاهده CO_2 در گمانه تولیدی ادامه پیدا می‌کند و با دیده شدن CO_2 در گمانه تولیدی گمانه تزریقی بسته می‌شود.

استخراج متان حین عملیات معدنی (CMM^۱): در حین عملیات استخراج زغال‌سنگ می‌توان با سرمایه‌گذاری اندک، سیستم‌ها و مکانیزم‌هایی برای استحصال گاز متان از جبهه کار زغال‌سنگ در حال استخراج تعبیه کرد و بدین طریق گاز را به فضای بیرون از معدن هدایت و در آنجا جمع‌آوری کرد. به این روش اصطلاحاً CMM اطلاق می‌گردد.

استخراج متان از معادن متروکه (AMM^۲): در بعضی از معادن که فرایند استخراج زغال‌سنگ به هر علتی متوقف بوده ولی انتشار گاز متان از لایه‌های زغال‌سنگ زیرزمین و تجمع آن‌ها در فضای معدن رها شده کماکان ادامه دارد؛ به روش‌های جمع‌آوری و استحصال گاز موجود در زغال‌سنگ در چنین شرایطی AMM گفته می‌شود.

تهویه متان لایه زغال‌سنگ (VAM^۳): در معادن زغال‌سنگ همچنین از سیستم‌های تهویه هوا برای خارج کردن گاز متان استفاده می‌شود که می‌توان با افزایش درصد متان و ذخیره‌سازی این گاز از مسیرهای تهویه از ورود این گاز به اتمسفر جلوگیری کرد. در روش‌های VAM به نوعی ترقیق گاز متعاضد شده در معدن توسط سیستم‌های تهویه صورت گرفته و درنهایت در سطح زمین با استفاده از فرایندهایی تغلیظ می‌گردد.

با توجه به پتانسیل بالای سوخت‌های فسیلی و اهمیت بارز آن‌ها در تامین انرژی مورد نیاز بخش صنعت، ضرورت بهره‌برداری بهینه از این منابع محرز است. یکی از مشکلات مهمی که در معادن زغال‌سنگ وجود

1- Coal Mine Methane

2- Abandoned Mine Methane

3- Ventilation Air Methane

دارد این است که بتوان آرایش مناسب گمانه ها را تعیین نمود تا به بهترین شکل ممکن گاززدایی متان از لایه ها صورت گیرد.

۱-۳- ضرورت انجام پژوهش

مخاطرات ناشی از انتشار و انفجار گاز متان موجود در لایه زغال سنگ اعم از خسارات جانی و مالی و تخریب محیط زیست، اهمیت تحقیق در زمینه ارزیابی انتشار گاز متان لایه زغال سنگ را به خوبی نشان می دهد. زغال سنگ از دیرباز به عنوان مهم ترین منبع تأمین انرژی در جهان مطرح بوده است. اگرچه پیش از انقلاب صنعتی، زغال سنگ بیشتر برای تأمین انرژی گرمایی خانگی توسط بشر به کار برده می شد، پس از انقلاب صنعتی به ویژه اختراع ماشین های حرارتی مانند ماشین بخار، استفاده از زغال سنگ در جهان وارد فاز جدیدی شد. با وقوع انقلاب صنعتی نیاز به فولاد به عنوان مهم ترین ماده مصرفی در صنایع مختلف رشد تصاعدی پیدا کرد. در نتیجه تولید آهن به روش کوره بلند به سرعت توسعه یافت و در اندک زمانی کوره های بلند تولید آهن، به یکی از مهم ترین مبادی مصرف زغال سنگ در جهان بدل شدند. از طرف دیگر با بالا رفتن استانداردهای بهداشتی و پیشرفت های پزشکی در خلال قرون نوزدهم و بیستم میلادی، متوسط امید به زندگی در نوع بشر افزایش یافته و با افزایش تصاعدی جمعیت نیاز به منابع انرژی طی دو قرن اخیر به شکل تصاعدی افزایش پیدا کرده است. به طور خلاصه به سه دلیلی که در بالا اشاره شد، یعنی نیاز صنایع جهان به انرژی (چه حرارتی و چه تأمین برق)، تولید آهن و فولاد و افزایش جمعیت جهانی و نیاز به انرژی بیشتر، زغال سنگ به یکی از مهم ترین اشکال مورد مصرف انرژی در جهان بدل شده است. به نحوی که با وجود مزایای استفاده از نفت و گاز در مصارف صنعتی و خانگی هنوز زغال سنگ سهم مهمی از تأمین انرژی مورد نیاز دنیا را بر عهده دارد.

از مهم ترین خطرات ناشی از استخراج زغال سنگ در معادن زیرزمینی می توان به گاز خیزی لایه ی زغال-سنگ اشاره کرد بنابراین هم از منظر اهمیت برای کشور و هم از لحاظ دیدی به وسعت فراگیری این روش در سراسر جهان، مطالعه در زمینه گاز زدایی لایه های زغال سنگ، امری ضروری به نظر می رسد. با توجه به این مطالب به طور خلاصه ضرورت انجام این پروژه را می توان به صورت زیر بیان کرد:

- اهمیت زغال سنگ در حوزه انرژی و صنعت و لزوم تأمین امنیت جانی کارکنان معادن
 - وجود ذخایر قابل توجه زغال سنگ در کشور و نیاز به افزایش ظرفیت‌ها و بومی‌سازی دانش و فناوری در حوزه گاز زدایی از لایه‌های زغال سنگ
 - نقش اساسی و بنیادین فرآیند گاز زدایی از لایه‌های زغال سنگ و پیش‌بینی مقدار گاز متان لایه‌های زغال سنگ در مراحل طراحی و استخراج تا انباشت و مصرف آن
 - باوجود گستردگی و پراکندگی مطالعات، عدم وجود طراحی الگوی مناسب برای حفاری گمانه‌های گاز زدایی که شامل پارامترهای مؤثر در زمینه گاز زدایی بهتر لایه‌های زغال سنگ باشد.
- بهینه‌سازی گمانه‌ها در معدن زغال سنگ طبس اثر قابل توجهی در گاززدایی گاز متان از لایه زغال سنگ و لایه‌های دربرگیرنده آن دارد. از جمله پارامترهای مورد توجه در هنگام بهینه‌سازی قطر گمانه، طول گمانه، فاصله‌داری گمانه‌ها نسبت به یکدیگر و جانمایی گمانه‌ها است. بهینه‌سازی هر یک از این پارامترها موجب کمتر شدن مقدار حفاری گمانه و در نتیجه کمتر شدن هزینه‌های گاززدایی، استحصال بیشتر گاز متان و گاززدایی متان از کل ماتریکس زغال سنگ، عدم توقف تولید معدن در اثر بوجود آمدن شرایط ناایمن، معدن‌کاری با شرایط ایمن‌تر و عدم انفجار گاز متان و ایجاد هزینه‌های مالی و جانی، قابل استخراج شدن لایه‌های با گازخیزی بالا که قبلاً غیرقابل استخراج بوده‌اند و در نتیجه سوددهی بیشتر معدن خواهد شد. با توجه به موارد بیان‌شده روشن است که باید مطالعه‌ای بر روی بهینه‌سازی آرایش گمانه‌ها انجام شود.

۴-۱- سؤال‌های اصلی پژوهش

به‌طور کلی مهم‌ترین سؤال‌های این پژوهش را می‌توان به‌طور خلاصه به‌صورت زیر بیان کرد:

۱. فشار مکش مناسب برای گاززدایی متان در معدن زغال سنگ طبس چقدر است؟

۲. نقش و تأثیر هر یک از پارامترهای شناسایی شده (قطر، طول و تعداد گمانه ها) روی عملیات گاز زدایی از لایه های زغال سنگ چگونه و چقدر است و کدام یک از پارامترها دارای بیشترین اهمیت می باشند؟

۳. مناسب ترین الگو برای حفاری گمانه های گاز زدایی کدام است، عمق گمانه، قطر مناسب گمانه و تعداد مناسب گمانه ها چقدر است؟

۱-۵- اهداف پژوهش

هدف اصلی در این مطالعه، تخمین گاز خیزی لایه های زغال سنگ با استفاده از نرم افزارهایی همچون کامسول با هدف تعیین الگوی مناسب برای حفاری گمانه های گاز زدایی است. برای این منظور در این پژوهش موارد زیر دنبال می شود:

- شناسایی دسته عوامل مؤثر بر جریان خروج گاز از لایه های زغال سنگ و پارامترهای هر دسته و بررسی رابطه ی آن ها با یکدیگر و چگونگی تغییرات و تأثیرات آن ها بر گاز زدایی
- تأثیر عمق، قطر بهینه و فاصله ی گمانه های گاز زدایی از یکدیگر بر روی نرخ گاز متان آزاد شده از لایه های زغال سنگ

۱-۶- جنبه جدید بودن و نوآوری پژوهش

مهم ترین جنبه های نوآوری این تحقیق را می توان به شرح زیر خلاصه کرد:

انجام مطالعه گسترده بر روی فشار و غلظت گاز درون لایه های زغال سنگ و تأثیر آن ها بر نرخ گاز زدایی و در نهایت انتخاب الگوی مناسب حفاری گمانه ها، تأثیر پارامترهایی نظیر عمق، قطر و تعداد گمانه ها بر نرخ انتشار گاز متان و ارائه راهکارهایی برای پیش بینی الگوی حفاری گمانه های گاز زدایی مناسب با هر نوع زغال سنگ.

۷-۱- ساختار رساله

این رساله در پنج فصل به شرح زیر تدوین شده است:

- فصل اول

در این فصل به کلیات موضوع پرداخته شد که شامل: بیان مسأله، ضرورت انجام پروژه، سوال های اصلی پژوهش، اهداف پژوهش و جنبه ی نوآوری پژوهش است. همچنین در این فصل به مطالعه در مورد عملیات گاز زدایی، شناسایی عوامل مؤثر بر گاز زدایی لایه زغال سنگ، مشکلات گاز متان در معادن، نحوه جمع آوری گاز در معادن زیرزمینی، اهمیت گاز متان، میزان انتشار گاز متان از معادن زغال سنگ، عوامل مؤثر در انتشار گاز متان پرداخته شد و همچنین روش های گاززدایی متان از لایه های زغال سنگ بررسی گردید.

- فصل دوم

در این فصل به مرور پیشینه تحقیق و همچنین بررسی متون علمی موجود و تحقیقات گذشته در زمینه گاز زدایی متان پرداخته شد. دسته بندی مطالعات قبلی گام اساسی برای تعیین موقعیت این تحقیق نسبت به سایر مدل های موجود، شناخت نقاط ضعف و قوت آن ها به منظور کاهش نواقص مدل های پیشنهادی و استخراج پارامترهای لازم در ارزیابی و پیش بینی میزان فشار و غلظت گاز در گمانه های گاز زدایی و فاصله ی مناسب بین گمانه های گاززدایی است.

- فصل سوم

در این فصل به معرفی معدن زغال سنگ طبس، گازخیزی معدن و روش گاززدایی معدن پرداخته شد.

- فصل چهارم

در این فصل به معرفی نرم افزار کامسول پرداخته شد و اطلاعات و معادلات مربوط به مدل، فرضیات لازم جهت مدل سازی، مدل سازی هندسی و جزئیات آن و چگونگی مش بندی و محاسبات عددی مربوط به مش بندی توسط نرم افزار کامسول بررسی گردید. به ارائه ی یافته ها و همچنین اجرای مدل پرداخته شد و مدل جریان خروج گاز از لایه های زغال سنگی با استفاده از نرم افزار کامسول ایجاد گردید و سپس

اعتبارسنجی مدل مورد بحث و بررسی قرار گرفت. به طور کلی در این فصل به معرفی مدل، معادلات، فرض-های لازم برای مدل سازی و همچنین اجرای مدل پرداخته شد. در ادامه الگوی مناسب برای حفاری گمانه های گاز زدایی با توجه به نتایج مدل سازی جریان خروج گاز و اعتبار سنجی آن ارائه گردید.

- فصل پنجم

در این فصل به تفسیر یافته های حاصل از این پروژه و بحث بر روی آن ها پرداخته شد و پیشنهادهایی برای انجام تحقیقات بعدی در این زمینه فراهم آمد و جمع بندی و تدوین رساله صورت گرفت.

فصل دوم

سابقه تحقیق و مبانی نظری

۲-۱- مقدمه

سابقه علمی موضوع در چند بخش جداگانه بررسی شده است به طوری که در ابتدا گاززدایی متان از لایه‌ی زغال سنگ، موارد مصرفی و بازار متان، اهمیت گازکشی متان از لایه‌های زغال سنگ از گذشته تاکنون، مخازن هیدروکربوری، جذابیت‌های مخازن نامتعارف، روش‌های استخراج گاز متان از لایه‌های زغال سنگ و... به طور مختصر بیان شده است و در ادامه برخی از مهم‌ترین مطالعات انجام شده پیشین به طور خلاصه در قالب چند جدول آمده است.

۲-۲- گاززدایی متان از لایه‌ی زغال سنگ

گاز درون زغال سنگ که عمدتاً شامل متان با مقادیر جزئی از هیدروکربن‌های سنگین‌تر، دی‌اکسید کربن، نیتروژن، اکسیژن، هیدروژن و هلیوم است، یکی از موارد اصلی ایجاد انفجار در یک معدن زغال سنگ محسوب می‌شود. اگرچه این گاز باعث ایجاد خطرات جانی و مالی در معادن زغال سنگ شده و انتشار آن برای محیط زیست نیز مشکل ساز است اما اگر از جنبه‌ی دیگری بدان توجه شود می‌توان آن را یک منبع سوخت با جنبه‌های مثبت زیست محیطی به حساب آورد که پس از سوختن به مقادیر کمی از اکسید سولفور، هیدروکربن و منوکسید کربن تجزیه می‌شود (MacDonald, 1990). متان به صورت آزاد درون خلل و فرج طبیعی زغال سنگ و منافذ ریز ماتریس زغال سنگ وجود دارد و مقداری متان نیز به صورت جذبی در کنار مولکول‌های زغال سنگ قرار داشته و با آن‌ها پیوند خورده است (Holditch, 1989).

از آنجائی که لایه‌ی زغال سنگ در زیرزمین تحت فشار قرار داشته و راه نفوذ آن نیز در مواردی وجود ندارد، گاز متان به صورت محبوس درون لایه‌ها قرار گرفته و در صورت کاهش فشار (در اثر استخراج و ایجاد سینه کار و یا حفر گمانه گازکشی) به حرکت درآمده و به سمت قسمت کم فشار جریان می‌یابند. از آنجائی که پتانسیل جذب متان توسط زغال سنگ بسیار بالا است، زغال سنگ‌ها می‌توانند مقادیر بسیاری از گاز متان را درون خود انباشته سازند. برای مثال مقدار ۰/۴۵ کیلوگرم از زغال سنگ دارای ۴۶۵۰۰ مترمربع سطح جذب بوده (Wyman, 1984) و همچنین تخمین زده می‌شود که زغال سنگ پرورده واقع در طبس در ایران حاوی

۱۷ مترمکعب بر تن گاز آزادشده باشد (Najafi, 2012). اگرچه زغال سنگ یک محیط متخلخل بوده و دارای نفوذپذیری بسیار کم است اما ساختار منافذ آن به مراتب پیچیده تر از لایه های معمولی دیگر سنگ ها است. بنابراین توجه بیشتر به الگوهای شکستگی در ماتریس زغال سنگ از اهمیت ویژه ای برخوردار بوده تا بتوان از آن به عنوان مخازن گاز استفاده کرد (Laubach, 1991).

شکستگی های طبیعی و نفوذپذیری زغال سنگ باعث ایجاد مسیری برای جریان گاز و آب درون لایه زغال سنگ از درون ریز درزه ها می شوند. ریز درزه ها، شکستگی های طبیعی و سیستماتیکی هستند که مانند ریز درزه ها در دیگر سنگ های رسوبی به وجود می آیند (Kendall, 1993). سیستم ریز درزه ها از خصوصیات منبع نگهدارنده گاز است که تأثیر فراوانی در اقتصادی بودن گازکشی متان از زغال سنگ می گذارد که می تواند به موفقیت آمیز بودن پروژه ی شکست آن منجر گردد و در برنامه پیشرفت پروژه گازکشی نیز تأثیرگذار است (Dhir, 1991). سیال درون ریز درزه ها از قانون جریان داری برای آب و گاز تبعیت می کند و از آن ها به عنوان شاخصه نفوذپذیری در زغال سنگ استفاده می شود. دو مجموعه از ریز درزه ها که به عنوان ریز درزه های طولی و عرضی نام برده می شود بر یکدیگر عمود بوده و سیستم ریز درزه زغال سنگ را تشکیل می دهند (Gray, 1987). ریز درزه های طولی معمولاً مسطح و دارای شکستگی صاف هستند، که قسمت اصلی سیستم ریز درزه ها را تشکیل می دهند. نفوذپذیری گاز درون زغال سنگ ممکن است ۳ تا ۱۰ برابر در جهت ریز درزه طولی بیشتر از دیگر ریز درزه ها باشد (McCulloch, 1974). در زغال سنگ دو فاز از جریان گاز به درون گمانه مکش گاز وجود دارد. در مرحله اول، متان جذب شده باید از طریق منافذ ریز از ماتریس زغال سنگ منتشر شده و به ریز درزه ها برسد و در مرحله دوم جریان گاز می بایست از طریق عبور از سیستم ریز درزه های طولی و عرضی و بر طبق اختلاف فشار به گمانه گازکشی برسد (Harpalani, 1990). جریان گاز متان از زغال سنگ وابسته به نفوذپذیری مؤثر زغال سنگ است. بنا بر برخی از مدل های ریاضی و کامپیوتری گاززدایی متان، فاصله میان منافذ ریز و ریز درزه ها نقش اصلی را در جریان گاز متان از زغال سنگ بازی می کنند.

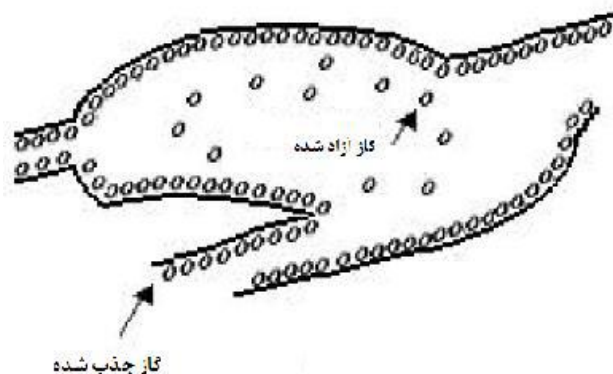
۲-۱-۲- تکنولوژی استخراج، مهار و بازیافت گاز متان

مهار و انتقال گاز متان معادن زغال سنگ برای افزایش ایمنی معدن و سلامت کارگران، امری حیاتی و الزامی است. در غلظت‌های ۵ تا ۱۵ درصد، متان از خاصیت انفجاری بالایی برخوردار است، لذا در عملیات استخراج، دو روش سیستم تهویه و گاز زدایی برای کنترل و هدایت گاز متان به کار گرفته می‌شود. هدف از تهویه در کشورهای تولیدکننده زغال سنگ، کاهش غلظت متان به مقدار ۰/۷۵ درصد است (Irving et al., 1996). سیستم گاز زدایی در برخی از معادن زیرزمینی گازدار در کشورهای استرالیا، ایالات متحده آمریکا و روسیه اجرا شده است. عموماً این روش‌ها به عنوان سیستم تهویه تکمیلی به کار می‌روند (Irving et al., 1996).

کارایی روش گاززدایی گاز متان در کشور کانادا از ۳۲ درصد در سال ۱۹۹۰ میلادی به ۴۲ درصد در سال ۲۰۰۳ افزایش یافته است. در سال ۲۰۰۴ کلیه متان لایه‌ی زغال سنگ استفاده شده در آمریکا از طریق سیستم گاززدایی تهیه شده است (McCarthy, 2010). گاززدایی متان که گازکشی زغال سنگ نیز نامیده می‌شود به عمل انتقال و بیرون کشیدن گاز موجود در لایه‌های زغال سنگ و لایه‌های متصل به آن از طریق گمانه و خطوط لوله گفته می‌شود. گاز کشی سبب بازیابی گاز متان موجود در لایه‌های زغال سنگی می‌گردد. همانطوری که گفته شد این روش خطرات ناشی از استخراج زیرزمینی زغال سنگ و هزینه‌های تهویه معادن را کاهش داده و اثرات مخرب زیست محیطی استخراج زغال سنگ مانند انتشار گازهای گلخانه‌ای، آلودگی آب‌های سطحی و غیره را کاهش می‌دهد. بر پایه‌ی تحقیقات انجام شده گاز متان از نظر زیست محیطی نسبت به گاز دی‌اکسید کربن خطرناک‌تر بوده و انتشار آن به محیط باعث ایجاد لطمه‌های جبران‌ناپذیری به لایه ازن می‌گردد (Thakur, 2016).

مقدار گاز درون زغال سنگ بستگی به ساختار خلل و فرج، نفوذپذیری، رطوبت و دمای آن دارد. مکانیزم نگهداری گاز در درون زغال سنگ به صورت جذب سطحی است و بستگی زیاد به خلل و فرج میکروسکوپیک دارد زیرا حدود ۸۵٪ از خلل و فرج به این صورت می‌باشند.

در شکل ۱-۲ طرز قرارگیری گاز در لایه‌های زغال‌سنگ نشان داده شده است. وقتی در حین استخراج، فشار بر روی لایه کم شود گازهای جذب شده بر روی لایه از قسمتی که فشار بیشتر است به قسمتی که فشار کمتر است مهاجرت می‌کنند. تا زمانی که فشار به تعادل برسد. می‌توان با کنترل کردن فشار در درون لایه، گازها را به محل مورد نظر هدایت کرد (توکلی و سرشکی، ۱۳۸۵). تاکنون در تمامی معادن زغال‌سنگ ایران، گاز متان انتشاریافته از لایه‌های زغال‌سنگ برای جلوگیری از وقوع انفجار به وسیله تهویه به خارج معدن منتقل شده و در فضای آزاد پخش می‌شود. در کشورهای استرالیا، چین، کانادا، آمریکا و ... عموماً این گاز استحصال شده و به عنوان سوخت به مصرف می‌رسد.



شکل ۱-۲- طرز قرارگیری گاز در لایه‌های زغال‌سنگ (توکلی و سرشکی، ۱۳۸۵)

روش‌های متعددی برای گازکشی متان از لایه زغال‌سنگ وجود دارد که این روش‌ها بر طبق زمین‌شناسی و شکل لایه زغال‌سنگ متفاوت است. از روش‌های مهمی که برای گازکشی استفاده می‌شود می‌توان به روش حفاری قائم قبل از استخراج، روش حفاری افقی همراه استخراج، روش حفاری و گازکشی از منطقه تخریب و حفاری مورب از درون تونل‌های دسترسی معدن نام برد.

پیشرفت‌های مهم در سیستم‌های حفاری جهت‌دار در خلال دو دهه گذشته منجر به تکامل تکنولوژی گاززدایی متان در مقیاس بزرگ شده است که توانایی شناسایی بهتر، درک زمین‌شناسی و شرایط استخراج برای پیشرفت معادن را تضمین می‌نماید. در نواحی که گمانه‌های استخراج زیرزمینی قائم قابل اجرا نیستند، حفاری جهت‌دار با گمانه‌های استخراج زیرزمینی افقی انجام می‌شود (Mwiluka, 2009).

گمانه‌های دهانه باز قائم برای زغال‌سنگ‌هایی با نفوذپذیری بالاتر بهتر عمل می‌نمایند. مشکلی که اکثر گمانه‌های قائم در ارتباط با کارایی پایین بازبایی گاز متان دارند، مربوط به زمان زیاد آب‌زدایی، تعداد زیاد گمانه‌های مورد نیاز برای کاهش فشار و محدود بودن سطح دسترسی است. بعلاوه سیستم گل که در حفاری قائم استفاده می‌شود، ممکن است باعث ایجاد مشکلاتی در تخلخل و نفوذپذیری شود. حفاری عمودی برای زغال‌سنگ‌هایی با نفوذپذیری متوسط و بسترهای نازک زغال‌سنگ و محل‌هایی که لایه‌های زغال‌سنگی چندگانه وجود دارند، مناسب است (Vielstich et al., 2003). گمانه‌های دهانه باز افقی برای لایه‌های ضخیم زغال‌سنگ، زغال‌سنگ‌های با نفوذپذیری کم و جاهایی که تداوم یک‌سویی لایه‌ها وجود دارد مناسب می‌باشند (Vielstich et al., 2003). طول و مسیر جهت‌دار گمانه‌های حفاری در لایه‌ها باعث کاهش محتوی گاز محل برای حجم بزرگی از زغال‌سنگ با نفوذپذیری کم می‌شود (Brunner, 2004).

۲-۲-۲- موارد مصرفی و بازار متان

استفاده سودآور از متان معادن زغال‌سنگ بسیار متنوع است و استفاده بهینه بستگی به کیفیت متان و عوامل اقتصادی پروژه دارد. مصارف متان شامل تزریق در لوله‌های گاز طبیعی، تولید برق، تولید گرمای مورد نیاز معدن، خشک کردن زغال‌سنگ، سوخت مربوط به حمل‌ونقل و استفاده‌های کارخانه یا صنعتی برای تولید کربن سیاه، متانول و دی‌متیل اتر است. از متان‌های با غلظت کم مانند متان موجود در هوای تهویه شده معدن، با عمل اکسایش می‌توان در تولید برق و نیز به‌عنوان سردکننده (در یخچال) استفاده کرد. اخیراً مصارف شهری، تولید نیرو، سوخت صنعتی، صنایع شیمیایی و سوخت اتومبیل بیشترین موارد استفاده از متان در کشور چین می‌باشند (McCarthy, 2010). تقریباً تمامی متان تولیدشده از معادن زغال‌سنگ در ایالات متحده وارد شبکه لوله گاز طبیعی می‌شوند. با توجه به قیمت بالای گاز طبیعی، فروش گاز متان برای برخی معادن می‌تواند درآمدزا باشد (McCarthy, 2010). امروزه عمده مصرف متان در خارج از معدن زغال-سنگ است مصرف کم متان به حالت درجا به خاطر قیمت بالای گاز طبیعی در مقایسه با تولید نیروی برق در ایالات متحده است. اکثر معادن مایل به فروش متان به خطوط لوله گاز و خرید نیروی برق خود می‌باشند.

از سوی گروه انرژی ایالات متحده آمریکا، شرکت انرژی سوخت پیلی مطالعات امکان‌سنجی تولید نیروی پیل سوختی در محل معدن با استفاده از گاز متان معادن زغال‌سنگ را انجام داده است.

میزان مصرف متان این کارخانه در یک روز بالای ۲۲۶۵ متر مکعب با خلوص ۴۷-۴۲ درصد بوده است. کارخانه پیل سوختی امروزه فعال بوده و نیازی به زیرساخت هیدروژنی ندارد. این تکنولوژی با کارایی بالا، بیشترین نیروی برق را از سوخت کمتر تولید می‌نماید. میزان انتشار دی‌اکسید کربن نیز در مقایسه با روش‌های سوخت مرسوم کمتر است (Vielstich et al., 2003).

۲-۳- اهمیت گازکشی متان از لایه زغال‌سنگ از گذشته تاکنون

زغال‌سنگ به‌عنوان یکی از منابع اصلی انرژی در دنیا قرن‌هاست که مورد استفاده قرار می‌گیرد. حضور گاز متان در معادن زغال‌سنگ یکی از مهم‌ترین مشکلات عمده در معادن زیرزمینی زغال‌سنگ است که هر ساله تلفات جانی زیادی در معادن دنیا به وجود می‌آورد. حضور 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 آزادشده در بعضی از لایه‌های زغال‌سنگ، تهویه معدن در مورد چنین لایه‌هایی به‌تنهایی نمی‌تواند محیطی ایمن برای استخراج زغال‌سنگ 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. امروزه باوجود پیشرفت تکنولوژی و پیدایش انرژی‌های نو، زغال‌سنگ به‌عنوان یکی از مواد اولیه برای تهیه کک در صنعت فولاد و همچنین به‌عنوان یک منبع تولید انرژی از درجه اهمیت بالایی برخوردار است. استخراج زغال‌سنگ به دلیل وجود انواع گازها در لایه‌های زغال‌سنگ، همواره مخاطرات فراوانی را در سراسر دنیا به همراه داشته است. انتشار، تجمع و انفجار گاز متان موجود در لایه‌های زغال‌سنگ، مهم‌ترین عامل ایجاد خطر در معادن زیرزمینی زغال‌سنگ است؛ انفجار گاز متان در معادن زغال‌سنگ، تلفات جانی و

خسارات مالی فراوانی را در سراسر دنیا به وجود آورده است. بر اساس آمار، انفجار گاز متان در معادن زغال سنگ از سال ۲۰۰۸ تا سال ۲۰۱۰ جان بیش از ۵۶۰ نفر را گرفته است (Black, 2011). از این رو آگاهی از میزان گاز خیزی لایه های زغال سنگ در معادن زیرزمینی قبل از شروع عملیات استخراج، تأثیر بسزایی در بکارگیری تمهیدات مناسب برای جلوگیری از خسارات جانی و مالی ناشی از انفجار گاز متان دارد و همچنین در طراحی و بکارگیری سیستم های تهویه و گاززدایی مناسب به منظور ترقیق و بازیابی گاز متان و افزایش ایمنی استخراج زغال سنگ بسیار مؤثر است. تاکنون روش های متفاوتی برای تخمین میزان گاز خیزی لایه های زغال سنگ از قبیل روش های آزمایشگاهی، روش های درون یابی زمین آماری، شبکه عصبی، شبیه سازی عددی و روابط تجربی استفاده شده است (Karacan, 2008).

با توجه به اهمیت گاز متان موجود در لایه زغال سنگ در زمینه ایمنی عملیات استخراج، مسائل محیط زیستی و تولید انرژی، تحقیقات گسترده ای با هدف چگونگی تشکیل و انتشار گاز متان لایه زغال سنگ، شناسایی فاکتورهای مؤثر بر میزان گاز خیزی، تخمین گاز خیزی لایه های زغال سنگ و روش های کاهش گاز متان در معادن زیرزمینی زغال سنگ انجام شده است. ملایمت و همکاران در سال ۲۰۱۲ با استفاده از روش شبکه عصبی مصنوعی و رگرسیون غیرخطی، به ارزیابی گاز خیزی معدن زغال سنگ طبس پرداختند (ملایمت، ۱۳۹۱). وزیری و همکاران نیز در سال ۲۰۱۵، همین مطالعه را با استفاده از روش تخمین زمین آماری کریجینگ و سیستم اطلاعاتی جغرافیایی (GIS)، انجام دادند و به این نتیجه رسیدند که بیش از ۵۷ درصد منطقه مورد مطالعه دارای گاز خیزی بیش از ۱۵ مترمکعب بر تن زغال سنگ است (Vaziri, 2015).

هایجیا و همکاران در سال ۲۰۱۶ در ارزیابی پتانسیل استخراج گاز متان لایه زغال سنگ حوضه جانگار در شمال غربی چین، به این نتیجه رسیدند که عمق لایه زغال سنگ یک فاکتور زمین شناسی مهم در استخراج منابع گاز متان موجود در لایه زغال سنگ است. آن ها نشان دادند که میزان انتشار گاز متان از لایه های زغال سنگ عمیق تر، بیشتر است؛ آن ها همچنین دریافتند که در شرایط برابری عمق لایه زغال سنگ و میزان گاز خیزی، لایه های ضخیم تر، پتانسیل بالاتری برای تشکیل منابع گاز متان دارند (Haijiao, 2016).

یومین و همکاران در سال ۲۰۱۲ در بررسی فاکتورهای مؤثر بر استخراج گاز متان لایه زغال سنگ به این نتیجه رسیدند که، گمانه‌هایی که به منظور گاززدایی گاز متان، در لایه‌های زغال سنگ عمیق حفر می‌شوند، گاز متان بیشتری را در مقایسه با گمانه‌های حفر شده در لایه‌های کم عمق تولید می‌کنند (Yumin, 2012).

کاراکان و همکاران در سال ۲۰۱۱ گاز متان لایه زغال سنگ را به منظور افزایش ایمنی استخراج و کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای مورد بررسی قرار دادند (Karacan, 2011). کاراکان در سال ۲۰۰۸ نیز مطالعه‌ای در زمینه پیش‌بینی و مدل‌سازی گاز متان منتشر شده در سیستم تهویه معادن زغال سنگ جبهه کار طولانی ایالات متحده با استفاده از شبکه عصبی انجام داده است (Karacan, 2008). حجم گاز جذب شده در واحد جرم زغال سنگ، تحت عنوان گاز خیزی زغال سنگ شناخته می‌شود. چن و همکاران در سال ۲۰۱۱ به این نتیجه رسیدند که ادغام داده‌های گاز خیزی با سایر داده‌های زمین‌شناسی و عملیاتی، روشی مناسب برای تخمین اولیه میزان انتشار گاز متان در معادن زغال سنگ و انتخاب تجهیزات لازم برای تهویه است (Chen, 2011). بر اساس مطالعات ژینچنگ و همکاران در سال ۲۰۱۴ در زمینه ارائه یک مدل برای پیش‌بینی گاز متان موجود در لایه زغال سنگ، این نتیجه حاصل شد که میزان گاز خیزی با فاکتورهایی نظیر عمق لایه زغال سنگ، تخلخل، درصد مواد فرار، درصد رطوبت و درصد خاکستر زغال سنگ ارتباط دارد (Xincheng, 2014). سارهوئیس و همکاران در سال ۲۰۱۶ در مطالعه‌ای که به منظور ارائه یک مدل برای تولید گاز متان لایه زغال سنگ انجام دادند، به این نتیجه رسیدند که نفوذپذیری لایه زغال سنگ یکی از عوامل تأثیرگذار در پروژه‌های استخراج گاز متان از لایه زغال سنگ است که به‌طور مستقیم با میزان تولید گاز متان در ارتباط است (Sarhosis et al., 2016). تائو^۱ و همکاران یک مدل نفوذپذیری تشکیل شده از منافذ و میدان تنش را با نرم‌افزار کامسول ایجاد کردند (Tao et al., 2016). چنگ^۲ و همکاران تأثیر اندازه‌ی حفره‌ها را بر روی پارامترها بررسی کردند و میزان اشباع شدن فشار مویینه بر تجزیه‌ی کربن را تخمین زدند

¹ Tao

² Cheng

(Cheng et al., 2017). لان^۱ و همکاران با استفاده از مدل دینامیک محاسباتی سیال روشی ابداع کردند که حرکت زغال سنگ در یک لایه از گمانه متان را بررسی کنند (Lan et al., 2017).

ژانگ^۲ و همکاران قوانین پاشیدگی زغال سنگ متان تخت^۳ را بیان کردند و همچنین به پیشرفت اساسی ذخیره سازی آن کمک بسیار کردند (Zhang et al., 2018). شارما^۴ و همکاران ثابت کردند که درک رفتارهای جریان ها در شکستگی ها اهمیت حیاتی در زمینه های مختلف دارد. در اکثر مواقع، جریان مایعات می تواند بسیار غیرخطی و غیرمعمول باشد. با استفاده از روش های عددی شرایطی که به سختی می توان در آزمایشگاه ایجاد کرد، می توان روی دستگاه شبیه سازی کرد (Sharma et al., 2017). جینه ای^۵ و همکاران پارامترهای فیزیکی دست یافته از شکستگی های سه بعدی سنگی خود را وارد نرم افزار کامسول مولتی فیزیکس^۶ کردند و خصوصیات سطح مدل سه بعدی آن را بدست آوردند (Jinhai et al., 2018). یوئه^۷ و همکاران پی بردند که مقادیر برجای زیرزمینی، یک خصوصیت ناهمسانگردی شعاع تاثیر گمانه ناشی از لایه ی زغال سنگ و ریز درزه های زغال سنگ را نشان می دهد (Yue et al., 2019). ونگ و همکاران ثابت کردند که در نفوذپذیری پایین و لایه های نرم زغال سنگ، گمانه ها اکثر مواقع توسط رئولوژی زغال سنگ متوقف می شوند. این امر باعث کاهش جریان و غلظت گاز می شود. در نتیجه، لازم است که گام هایی طی شوند تا به صورت مصنوعی نفوذپذیری لایه های زغال سنگ بالا روند؛ برای مثال روش آب شکنی (Wang et al., 2019). توتاک^۸ و همکاران بر پایه ی سیستم های عصبی مصنوعی و روش های آماری انتخاب شده، یک نوع روش کار برای آنالیز و آزمایش تئوری طراحی کردند تا انتشار گاز را پیش بینی کنند. آن ها همچنین با استفاده از شبکه ی پرسپترون چندلایه ای^۹ یک مدل پیش بینی کننده ایجاد کردند (Tutak et al., 2019).

¹ Lan

² Zhang

³ CBM

⁴ Sharma

⁵ Jinhai

⁶ Multiphysics

⁷ Yue

⁸ Tutak

⁹ MLP: multi-layer perceptron، نام یکی از الگوریتم های هوش مصنوعی است

ری^۱ و همکاران پی بردند که گاززدایی معدن زغال سنگ در همه جای جهان بسیار اسیدی است. آب های به شدت اسیدی نیز توسط یون های سنگین سمی آهنی آلوده شده اند (Ray et al., 2020). بای^۲ و همکاران بسیاری از مواردی را آنالیز کردند که در آنها به علت تاخیر گسل، آب فوران سریع داشته بود و به این نتیجه رسیدند که تحول فوران آب زیرزمینی را می توان به دو مرحله تقسیم کرد (Bai et al., 2021). لی^۳ و همکاران نشان دادند که روند دینامیک تحول زغال سنگ متان تخت را می توان به شش مرحله تقسیم کرد: مرحله ی تشکیل گاز بیوژنیک نابالغ؛ مرحله ی اصلی تشکیل گاز؛ مرحله ی تشکیل تدریجی گاز؛ مرحله ی دوم تشکیل گاز؛ مرحله ی پراکندگی مطلق تدریجی گاز؛ مرحله ی پراکندگی مطلق سریع گاز (Li et al., 2021). ژائو^۴ لایه های مساعد متان لایه ی زغال سنگ را با در نظر گرفتن یکپارچگی مکان های جغرافیایی و شباهت در شرایط زمین شناسی آنها دسته بندی کرد (Zhao, 2021).

گوئو^۵ و همکاران تأثیر مکان اصلی روزنه ی آب بندی روی گاززدایی آب را مطالعه کردند. آنها این عمل را از طریق تئوری و شبیه سازی عددی همراه با اندازه گیری در محل انجام دادند تا مشکل کمبود اشباع گاز در مرحله ی قبل از گاززدایی گمانه های معادن زغال سنگ واقع در چین را حل کنند (Guo et al., 2021).

۲-۴- مخازن هیدروکربون

امروزه مخازن هیدروکربون در دنیا به دو گروه متعارف^۶ و نامتعارف^۷ تقسیم می شوند. مخازن متعارف ذخایری هستند که نفت یا گاز در آنها به صورت طبیعی از محل اولیه خود (سنگ منشا) مهاجرت کرده و در یک محیط متخلخل با تراوایی و تخلخل نسبتاً خوب به تله می افتد. بنابراین بهره برداری از این مخازن معمولاً با توجه به خصوصیات هیدرولیکی مناسب سنگ، به راحتی صورت می گیرد.

¹ Ray

² Bai

³ Li

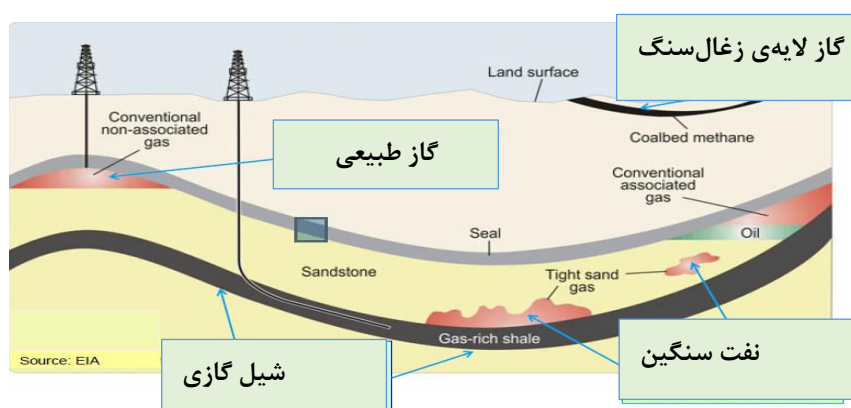
⁴ Zhao

⁵ Guo

6 - Conventional

7 - Unconventional

در مخازن نامتعارف، طبق شکل ۲-۲ برخلاف دسته اول با توجه به تخلخل و تراوایی بسیار پایین این مخازن، هیچ‌گونه مهاجرتی در هیدروکربن تولیدشده شکل نمی‌گیرد و لذا سنگ مخزن همان سنگ منشا اولیه است. شیل‌های گازی، هیدرات‌های گازی، نفت سنگین و گاز طبیعی موجود در لایه‌های زغال‌سنگ جزء این مخازن طبقه‌بندی می‌گردند.



شکل ۲-۲- مقایسه انواع ذخایر نامتعارف با ذخایر متعارف هیدروکربون (Zou et al., 2013)

CBM گاز طبیعی متان است که درون لایه‌های زغال‌سنگ تشکیل و به تله^۱ می‌افتد. گاز موجود در زغال-سنگ بیشتر از متان تشکیل‌شده (حدود ۹۵٪) و مقادیر متفاوتی از اجزا سنگین‌تر هیدروکربن و در بعضی موارد مقدار کمی دی‌اکسید کربن نیز در آن دیده می‌شود. CBM به علت نداشتن سولفید هیدروژن به‌عنوان یک گاز شیرین شناخته می‌شود. نحوه ذخیره شدن گاز و جریان گاز در این مخازن با مخازن متعارف متفاوت است. متان در لایه‌های زغال‌سنگ برخلاف مخازن متعارف در خلل و فرج سنگ ذخیره نمی‌گردد بلکه به سطح زغال‌سنگ می‌چسبد. با توجه به مساحت گسترده ذرات زغال‌سنگ در حجم کوچکی از آن، مقدار گاز جذب‌شده^۲ توسط سطوح داخلی زغال‌سنگ قابل توجه خواهد بود. به‌طوری‌که در شرایط حجمی یکسان، زغال‌سنگ می‌تواند شش تا هفت برابر بیشتر از مخازن معمولی گاز را درون خود ذخیره نماید.

1- Trapped
2- Adsorbed

به لحاظ رتبه‌بندی و درجه بلوغ زغال‌سنگ، هر چه درجه بلوغ در زغال‌سنگ بالاتر باشد زغال‌سنگ قابلیت تولید گاز بیشتری دارد. بنابراین تولید گاز از زغال‌سنگ‌های با رتبه^۱ بالا در شرایطی که قیمت جهانی گاز پایین هم باشد می‌تواند توجیه اقتصادی داشته باشد، اما زغال‌سنگ‌های نابالغ که دارای درجه بلوغ کمتری هستند در موارد افزایش قیمت گاز، قابلیت بهره‌برداری داشته و توجیه اقتصادی دارند.

مقدار قابل‌توجه گاز برای مصارف اقتصادی از طریق CBM توسط کشورهایی مانند آمریکا، استرالیا، کانادا، چین و هند در حال تولید است. کشورهای دیگری نیز مثل اندونزی، روسیه و بریتانیا در مرحله اکتشاف و توسعه مخازن CBM هستند (Moore, 2012).

امروزه ایران علی‌رغم داشتن بزرگ‌ترین ذخایر متعارف گازی دنیا، یکی از پرمصرف‌ترین کشورهای حال حاضر نیز است. از طرفی افزایش تولید گاز از منابع زغال‌سنگی یک امتیاز محسوب شده و منافع سرشاری عاید کشور خواهد کرد که به تفصیل بررسی خواهد شد. امتیازات دیگری مانند استخراج ایمن، افزایش نرخ استخراج، کاهش هزینه‌های عملیاتی حین استخراج زغال‌سنگ، کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای، افزایش حجم ذخایر استراتژیک کشور در حوزه انرژی، کارآفرینی و اشتغال‌زایی، تولید انرژی‌های نو و تجدید پذیر از منابع زغال‌سنگ، ایجاد نیروگاه‌های سیکل ترکیبی و ... از جمله مواردی هستند که می‌توانند نقش قابل‌ملاحظه‌ای در پیشرفت صنعت کشور داشته باشد. علاوه بر موارد فوق شواهد و قرائن نشان می‌دهند که صنایع وابسته به بهره‌برداری از زغال‌سنگ و استفاده از آن در چرخه صنعت کشور، سهم بسیار ناچیزی در سبد مصرفی انرژی کشور داشته و در حقیقت صنعت زغال‌سنگ کشور ناکارآمد و تقریباً بدون بازده است (عسکری، ۱۳۹۴). در چنین شرایطی استفاده از تکنولوژی‌های تولید CBM ممکن است بتواند به لحاظ اقتصادی، سرمایه‌گذاری و توسعه بخش‌های مرتبط را موجه کرده و بخشی از وضعیت نامطلوب چرخه تولید به مصرف زغال‌سنگ را بهبود ببخشد.

۲-۵- مزایای استفاده از تکنولوژی CBM

استحصال گاز از لایه‌های زغال‌سنگ می‌تواند مزایای زیادی در حوزه انرژی، محیط‌زیست و استخراج داشته باشد. با توجه به خلوص بالای گاز متان در لایه‌های زغال‌سنگ (بیشتر از ۹۳ درصد) به لحاظ کیفی قابلیت انتقال مستقیم (بدون نیاز به پالایش) به خطوط لوله مصرفی گاز را دارد. از طرفی شبکه خطوط انتقال لوله در سال‌های اخیر گسترش یافته و لذا به لحاظ فنی و اجرایی CBM قابل تزریق به شبکه توزیع خطوط لوله کشور است. بنابراین استفاده از CBM به‌عنوان یک سوخت پاک و باکیفیت می‌تواند بخشی از انرژی مورد نیاز کشور را تأمین نماید. در حقیقت نزدیکی گستره لایه‌های زغال‌سنگ و معادن زغال‌سنگ موجود در کشور به خطوط انتقال لوله گاز فرصتی مناسب برای شارژ گاز طبیعی به نواحی شهری و صنعتی به‌ویژه مناطق نسبتاً دور از جنوب کشور در مواقع افت فشار و قطعی گاز است. شکل ۲-۳ توزیع شبکه خطوط انتقال گاز و میزان مجاورت آن‌ها با ساختارهای زغال‌سنگ را نشان می‌دهد (عسکری، ۱۳۹۴).



شکل ۲-۳- توزیع شبکه خطوط انتقال گاز و میزان مجاورت آن‌ها با ساختارهای زغال‌سنگ (عسکری، ۱۳۹۴)

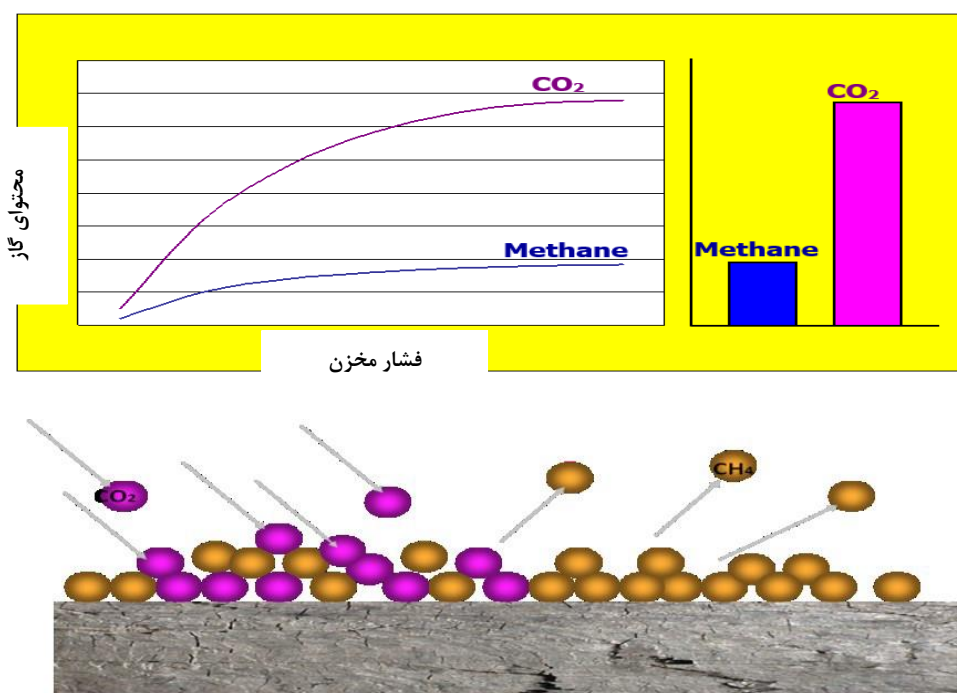
گاز در معادن زغال‌سنگ به‌عنوان یک فاکتور مخرب شناخته می‌شود و لذا معدن کاران به لحاظ حفظ ایمنی و جلوگیری از انفجار گاز و همچنین به منظور ایجاد شرایط مناسب (تهویه هوای معدن) برای معدن کاری

به‌ناچار مجبور به خروج این گاز از فضای کار معدن و انتقال آن به فضای بیرون از معدن هستند. لذا استفاده از تکنولوژی CBM در معادن زغال‌سنگ علاوه بر داشتن مزایای اقتصادی به لحاظ فنی و ایمنی معضل بزرگی از معدن کاری زغال‌سنگ را مرتفع می‌کند. استحصال گاز قبل یا حین عملیات استخراج، علاوه بر کاهش ریسک، افزایش سرعت بهره‌برداری از معدن و کاهش هزینه‌های اجرایی درنهایت منجر به افزایش راندمان تولید خواهد شد. مروری بر مطالعات موردی انجام‌شده در نقاط مختلف دنیا نشان می‌دهد که به لحاظ زیست‌محیطی استخراج زغال‌سنگ به‌تنهایی عامل انتشار حدود ۱۰ درصد از کل گاز متان در جو زمین است. با توجه به اینکه متان یک گاز گلخانه‌ای محسوب می‌شود، اثر مخرب آن در گرمایش زمین، ۲۱ برابر دی‌اکسید کربن است. بنابراین استحصال آن از معادن زغال‌سنگ قبل از عملیات معدن کاری از انتشار منبع بزرگی از متان در اتمسفر جلوگیری می‌کند. تمایل ذاتی کانسار زغال‌سنگ به جذب گاز دی‌اکسید کربن به‌صورت طبیعی ۴ تا ۵ برابر گاز متان است که در شکل ۲-۴ قابل مشاهده است، بنابراین این قابلیت طبیعی زغال‌سنگ گزینه مناسبی را برای تزریق و ذخیره‌سازی مناسب این گاز در لایه‌های زغال‌سنگ به وجود می‌آورد. تزریق گاز دی‌اکسید کربن در لایه‌های زغال‌سنگ علاوه بر کاهش گازهای گلخانه‌ای منجر به برداشت بیشتر گاز متان در اثر افزایش فشار در زیر سطح زمین می‌شود (Karacan, 2011). بنابراین ضمن ذخیره‌سازی مؤثر CO_2 به لحاظ زیست‌محیطی هم‌زمان سناریوهای ازدیاد برداشت نیز مطرح می‌گردد که می‌تواند نقش مؤثری در افزایش ضریب بازیافت مخزن داشته باشد. همچنین افزایش تولید گاز با استفاده از این روش می‌تواند بخشی از هزینه‌های انتقال و ذخیره‌سازی CO_2 را پوشش دهد. علاوه بر این جذب سطحی CO_2 توسط زغال‌سنگ عملاً باعث تسهیل در فرایند ذخیره‌سازی می‌گردد. چراکه معمولاً ذخیره‌سازی گاز در ساختارهای زمین‌شناسی مانند مخازن استحصال‌شده ۱ یا گنبدی‌های نمکی به دلیل پیچیدگی ساختارهای زمین‌شناسی (وجود گسل‌ها و شکستگی‌های طبیعی، وجود بستگی ۲ مناسب به منظور به تله افتادن سیال) با مشکلات متعددی همراه است.

1- Depleted

2- Closure

قابلیت جذب ذاتی زغال سنگ از طرفی باعث کاهش هزینه‌های تزریق CO_2 در لایه‌های زغال سنگ می‌شود چراکه در مقایسه با فرایندهای ذخیره‌سازی در سایر ساختارهای زمین‌شناسی، مقدار فشار ناچیزی برای نگه‌داشتن گاز در لایه‌های زغال سنگ لازم است و این امر می‌تواند عملیات تزریق گاز و پایش ۱ را بعد از اتمام ذخیره‌سازی به‌طور چشمگیری تسهیل نماید.

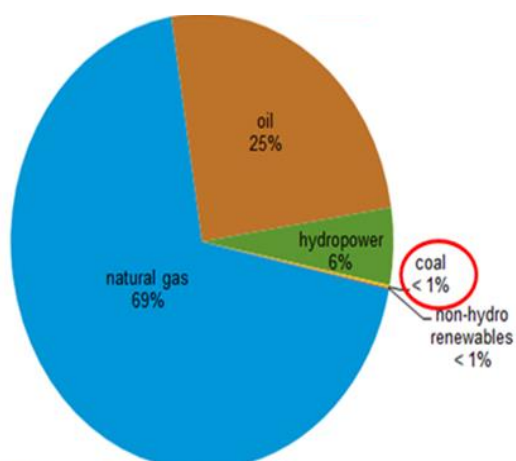


شکل ۲-۴- قابلیت جذب ذاتی CO_2 نسبت به متان در زغال سنگ در فشارهای مختلف (Ma, 2004)

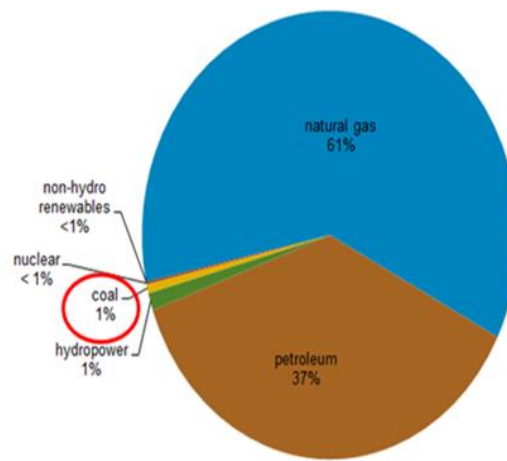
همان‌طور که در شکل ۲-۵ نیز نشان داده شده است، در حال حاضر در حدود ۹۸ درصد از انرژی مورد نیاز ایران از منابع نفت و گاز تأمین می‌شود. مقایسه بین سبد انرژی جهان و ایران نشانگر اتکای بیش از حد ایران به منابع نفت و گاز در قیاس با سایر کشورها است. مقایسه مقدار سرانه مصرف انرژی در ایران به تفکیک حامل‌های انرژی با مقادیر جهانی نشان می‌دهد سرانه مصرف گاز طبیعی و نفت خام و فرآورده‌های نفتی به ترتیب ۶ و ۱/۶ برابر متوسط جهانی است. به نحوی که سایر منابع انرژی اعم از منابع زغال سنگ تنها ۱/۵ درصد از سبد انرژی ایران را در بر گرفته است. بر اساس ترازنامه انرژی، مصرف سرانه زغال سنگ در

ایران بسیار پایین‌تر از متوسط جهانی است (U.S Energy Information Administration, 2012). بنابراین افزایش سهم زغال‌سنگ در سبد انرژی کشور، علاوه بر کاهش وابستگی به تولید انرژی از نفت و گاز می‌تواند صنعت از کار افتاده و با بهره‌وری بسیار پایین زغال‌سنگ را مجدداً شکوفا نماید.

تولید الکتریسیته توسط سوخت در ایران سال ۲۰۱۲



مقدار سرانه مصرف سوخت در ایران سال ۲۰۱۲



شکل ۲-۵- مقدار سرانه مصرف انرژی در ایران به تفکیک حامل‌های انرژی و سهم بسیار اندک زغال‌سنگ (U.S Energy Information Administration, 2012)

CMM به نوعی از فناوری استحصال گاز از زغال‌سنگ اطلاق می‌گردد که در آن بهره‌برداری از گاز از فضای داخل معدن صورت می‌گیرد. این گاز از ترکیب هوا و گاز متان متصاعد شده در فضای داخلی معدن تشکیل می‌شود. درصد گاز متان در این نوع تولید بین ۲۵ تا ۶۰ درصد متغیر است. در نتیجه در این روش، گاز متان جمع‌آوری و با شبکه‌ای سیستماتیک به فضای بیرون از معدن انتقال می‌یابد. بنابراین علاوه بر کاهش خطر انفجار هزینه‌های استخراج و تهویه معدن نیز کاهش می‌یابد. معادن زغال‌سنگ متروک که حتی سال‌ها بعد از رهاسازی، کماکان گاز متان آزاد می‌کنند که این گاز مستقیماً وارد اتمسفر می‌شود. با جمع‌آوری این گاز علاوه بر ممانعت از ورود گاز متان به جو می‌توان با تجهیزات اولیه و سرمایه‌گذاری پایین انرژی تولید کرد. این پروژه‌ها در کشورهای آمریکا، انگلیس، چین و استرالیا عملیاتی شده‌اند.

ایران به دلیل شرایط متنوع زمین‌شناسی دارای کانسارهای متنوع زغال‌سنگ است. قسمت عمده منابع زغال‌سنگ ایران در پنج ناحیه کرمان- نایبند (طبس)، البرز، شمال شرق خراسان، کاشان- اصفهان و ناحیه مراغه (آذربایجان) واقع شده است. در مناطقی که بیشتر زغال‌سنگ‌های کشور در آن واقع شده‌اند نفت و گاز طبیعی (مخازن متعارف) وجود ندارد. گازرسانی به این مناطق هزینه بسیاری را در بردارد. برای مثال در شهرستان طبس که یکی از بزرگ‌ترین ذخایر زغال‌سنگ ایران در آن واقع است فاصله بسیار دور از مرکز دریافت گاز که پالایشگاه شهید هاشمی نژاد است موجب شده اجرای پروژه گازرسانی با مشکلات و هزینه بسیاری همراه باشد. در مقایسه با مخازن متعارف گازی، لایه‌های زغال‌سنگی معمولاً در اعماق کم و نزدیک به سطح زمین یافت می‌شوند و در نتیجه هزینه‌های اکتشاف و بهره‌برداری آن‌ها به مراتب پایین‌تر است.

با توجه به اینکه گاز به صورت جذب سطحی در زغال‌سنگ ذخیره می‌شود حجم گاز ذخیره‌شده در زغال- سنگ نسبت به حجم مشابه یک سنگ از مخزن گازی متعارف بسیار بیشتر است. به‌طور کلی یک تن از زغال‌سنگ قابلیت نگهداشتن حجم گازی بین ۵ تا ۱۵ مترمکعب را درون خود دارد.

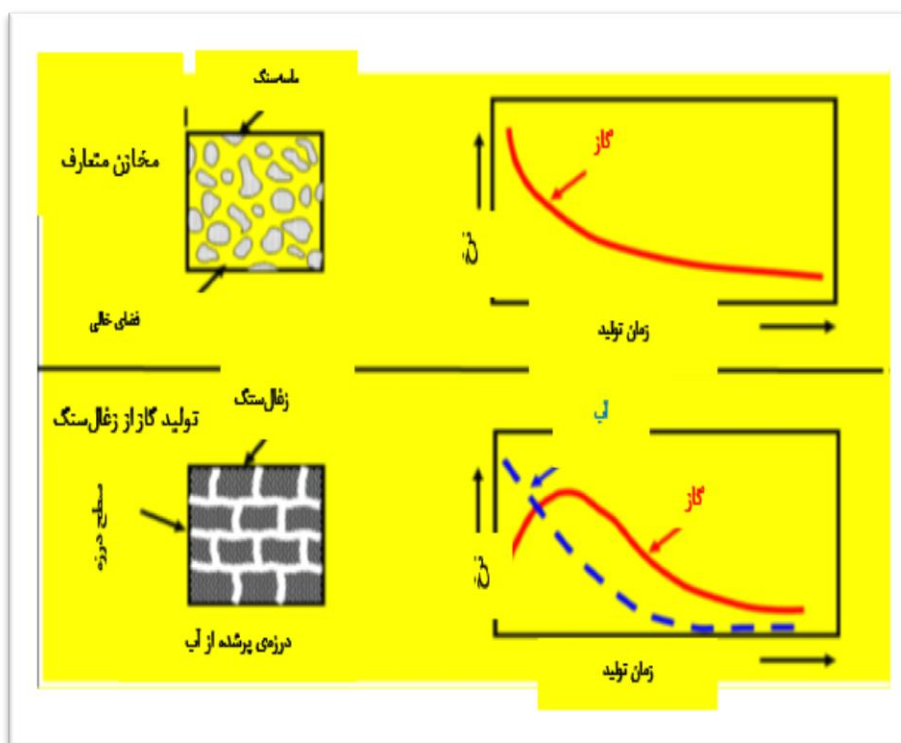
کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای، معدن کاری ایمن، درآمدزایی از محل تولید و فروش گاز متان و تغییر ندادن ساختار زغال‌سنگ پس از استخراج گاز از آن، همگی از امتیازات و نکات برجسته تولید گاز از زغال- سنگ هستند که ضرورت مطالعه و بررسی چگونگی پیاده‌سازی فناوری CBM در کشور را بیش از پیش نمایان می‌کند.

۲-۶- جذابیت‌های مخازن نامتعارف CBM در حوزه انرژی

علی‌رغم تشابهات زیادی که مخازن نامتعارف CBM با مخازن متعارف دارند، به لحاظ ساختاری اختلافات قابل‌ملاحظه‌ای در میزان بهره‌دهی و تولید انرژی دارند که در نوع خود بسیار حائز اهمیت است (عسکری، ۱۳۹۴).

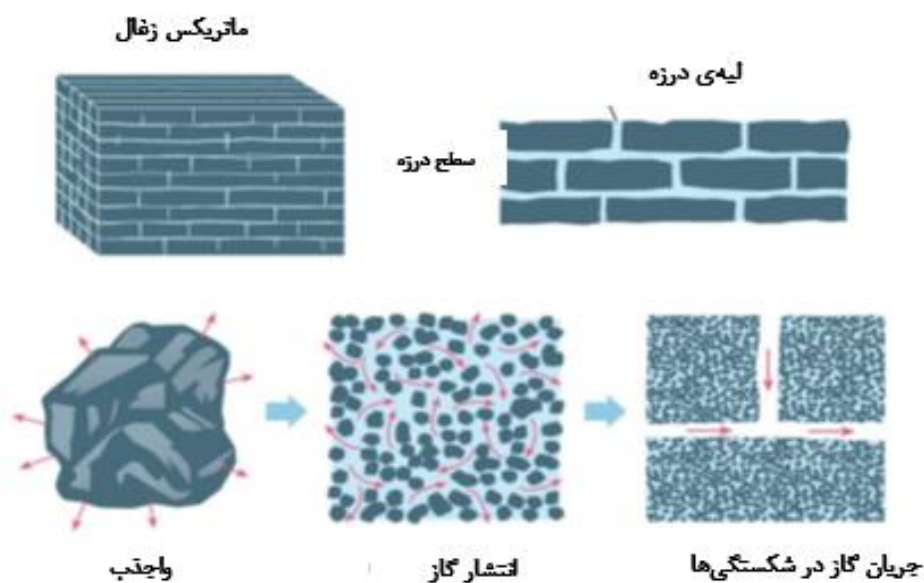
برای نمونه می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

- تخلخل در کانی زغال‌سنگ برخلاف مخازن معمولی بسیار پایین و نزدیک به صفر است و عمده جریان سیال توسط سیستم شکستگی‌های طبیعی در زغال‌سنگ، هدایت می‌شود.
- مکانیزم ذخیره‌سازی گاز در مخازن متداول به‌صورت تجمع گاز در محیط متخلخل صورت می‌پذیرد درحالی‌که گاز در زغال‌سنگ به‌صورت جذب سطحی^۱ ذخیره می‌گردد.
- حجم گاز ذخیره‌شده در زغال‌سنگ ۶ تا ۷ برابر مخازن متعارف است.
- برخلاف مخازن متداول تولید گاز در روش CBM با کاهش فشار مخزن افزایش می‌یابد و بنابراین طبق شکل ۲-۶ نسبت گاز به آب با گذشت زمان افزایش می‌یابد.
- برخلاف مخازن متعارف که در آن جریان سیال در محیط متخلخل به‌واسطه رابطه داری کنترل می‌شود، مکانیزم هدایت گاز در زغال‌سنگ توسط فرایند انتشار که ناشی از اختلاف غلظت و اختلاف فشار در نواحی مختلف سنگ است انجام می‌پذیرد.



شکل ۲-۶- مقایسه نرخ تولید در یک مخزن متعارف با تولید گاز از زغال سنگ (Thakur, 2016)

- گاز در مخازن متعارف تنها در محیط متخلخل ذخیره می‌گردد لکن گاز در زغال سنگ عمدتاً به دو بخش جذب شده در بافت سنگ و گاز آزاد (گاز موجود در سیستم شکستگی‌های طبیعی زغال سنگ) وجود دارد. استحصال گاز آزاد باعث کاهش فشار منفذی در ساختار زغال سنگ شده و لذا اختلاف فشار ایجاد شده منجر به آزادسازی گاز جذب شده از سطوح زغال سنگ و جریان یافتن آن به درون تخلخل شکستگی‌ها می‌گردد. همان‌طور که در شکل ۲-۷ نشان داده شده است کاهش فشار منفذی منجر به واجذب سطحی گاز از سطح زغال سنگ شده و توسط فرایند انتشار درون خلل و فرج و شکستگی‌ها قرار گرفته و در آنجا ذخیره می‌شود.



شکل ۲-۷- مکانیسم تولید گاز زغال‌سنگ (Han, 2015)

در جدول ۱-۲ مقایسه بین قابلیت‌های تولید گاز در مخازن متعارف و لایه‌های زغال‌سنگ آورده شده است؛ با توجه به خصوصیات ذکر شده قابلیت‌های تولید گاز در مخازن CBM به مراتب بیشتر از مخازن متعارف است. لذا احتمال موفقیت در این روش بالا و ریسک سرمایه‌گذاری پایین است.

جدول ۱-۲- مقایسه بین ویژگی‌های مخازن متعارف با مخازن زغال‌سنگ به لحاظ قابلیت تولید گاز (Thakur, 2016)

ویژگی	مخازن متعارف	مخازن CBM
فرایند ذخیره‌سازی گاز	در فضای متخلخل سنگ	جذب سطحی در سطوح داخلی زغال‌سنگ
عمق نسبی مخزن	معمولاً در اعماق زمین	خیلی کم عمق، کمتر از ۱۰۰۰ متر
رژیم فشار منفذی	معمولاً بیشتر از فشار هیدروستاتیک	معمولاً کمتر از فشار هیدروستاتیک
روش تولید	با افزایش یا حفظ فشار منفذی	آب‌زدایی یا گاز زدایی و کاهش فشار واجذب
روند تولید (نسبت تولید گاز به آب GWR)	در ابتدا GWR خیلی زیاد و در ادامه کاهش می‌یابد.	در ابتدا GWR خیلی کم و در ادامه تولید زیاد

۲-۷- روش‌های استخراج گاز متان از لایه‌های زغال سنگ

به‌طور خلاصه تقسیم‌بندی روش‌های استخراج گاز متان از لایه‌های زغال سنگ را می‌توان با توجه به ماهیت استخراج در دسته‌های زیر طبقه‌بندی کرد:

- استخراج متان قبل از عملیات استخراج

- در حین عملیات استخراج

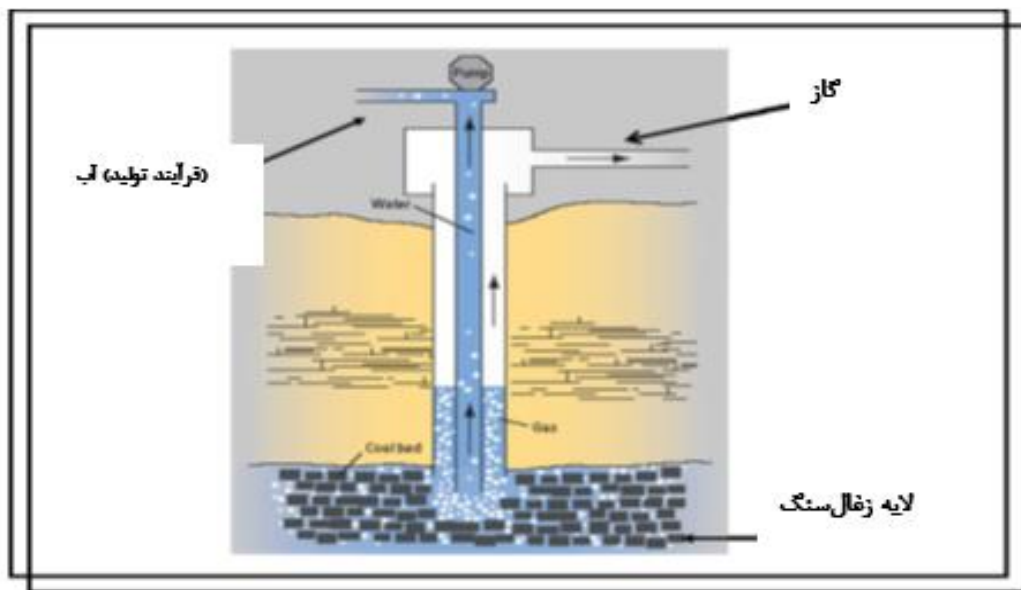
- بعد از عملیات استخراج

۲-۷-۱- روش‌های استحصال گاز قبل از عملیات استخراج

فرایند تولید CBM از ذخایر زغال سنگ به شکل ساده و ابتدایی شامل حفاری چند گمانه در لایه‌های زغال سنگ و نواحی مستعد با پتانسیل گاز بالا^۱ صورت می‌گیرد که در آن کاهش فشار حاصل از تخلیه سیال موجود^۲ (آب یا گاز) در سیستم شکستگی‌های زغال سنگ مکانیسم اصلی تولید گاز به شمار می‌رود. برای آزادسازی مؤثر گاز می‌بایست فشار مخزن تا نزدیکی فشار اتمسفر تغییر کند (Han, 2015). شکل ۲-۸ به صورت شماتیک یک گمانه تولید CBM را نشان می‌دهد که در آن به واسطه پمپاژ آب درون زغال سنگ به بیرون، گاز متصاعد شده ناشی از اختلاف فشار به وجود آمده از ماتریکس سنگ به سمت سیستم شکستگی‌ها و از آنجا به سمت گمانه جریان پیدا می‌کند.

1- Sweet Spots

2- Dewatering or Degasing



شکل ۲-۸- فرایند تولید آب و گاز در لایه زغال سنگ (Thakur, 2016)

همانطور که گفته شد، روش‌های ازدیاد برداشت یا اصطلاحاً ECBM یکی از مؤثرترین راهکارها برای افزایش نرخ تولید در روش استحصال CBM هستند. تزریق CO_2 با قابلیت جذب سطحی بسیار بالا بهترین راهکار به منظور افزایش بازدهی و حتی افزایش حجم ذخیره^۱ به شمار می‌رود. نرخ بالای تولید، فشار تولیدی بالاتر، ظرفیت ذخیره‌سازی بالا در فشارهای پایین، ریسک پایین نشت^۲ یا هدر رفت^۳ گاز ازجمله محاسن و مزایای قابل‌توجه این روش است. شکل ۲-۹ به صورت شماتیک نحوه تزریق گازکربنیک از یک گمانه تزریقی و برداشت گاز در گمانه دیگر را نشان می‌دهد. روش‌های میکروبی^۴ یکی دیگر از تکنیک‌های ازدیاد برداشت گاز از ذخایر زغال‌سنگ هستند که عمدتاً با تزریق کاتالیزورهای شیمیایی یا مواد بیولوژیکی باعث تسریع در فرایند بلوغ زغال‌سنگ و یا آزادسازی مولکول‌های گاز از سطح زغال‌سنگ می‌شوند. همان‌طور که در شکل ۲-۱۰ نیز مشاهده می‌شود استفاده از این مواد در روش استحصال CBM منجر به افزایش تولید گاز در فاز سوم تولید (ابتدای روند کاهشی تولید گاز) شده است. نکته قابل‌توجه در این روش این است که استفاده از روش‌های میکروبی عملاً تولید گاز از این روش را جز روش‌های تجدید پذیر طبقه‌بندی می‌کند چراکه با تداوم تبدیل مولکول‌های زغال‌سنگ

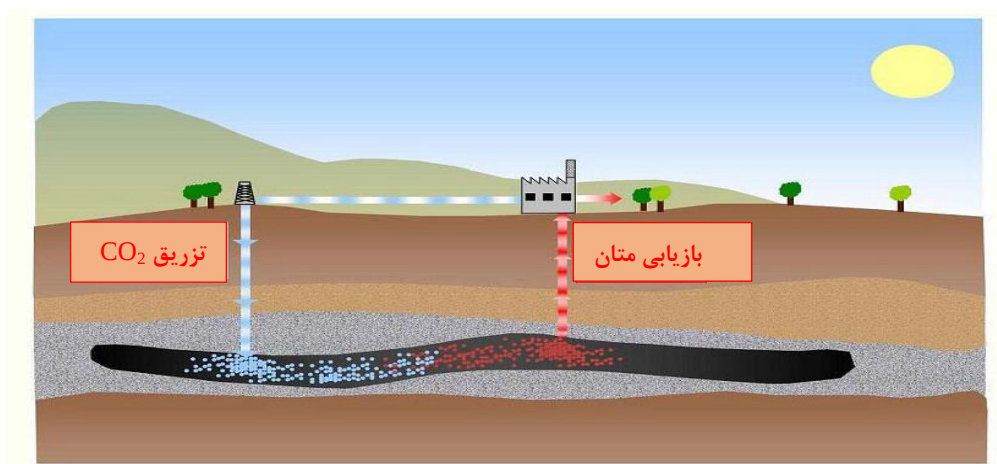
1- Reserve

2- Leakage

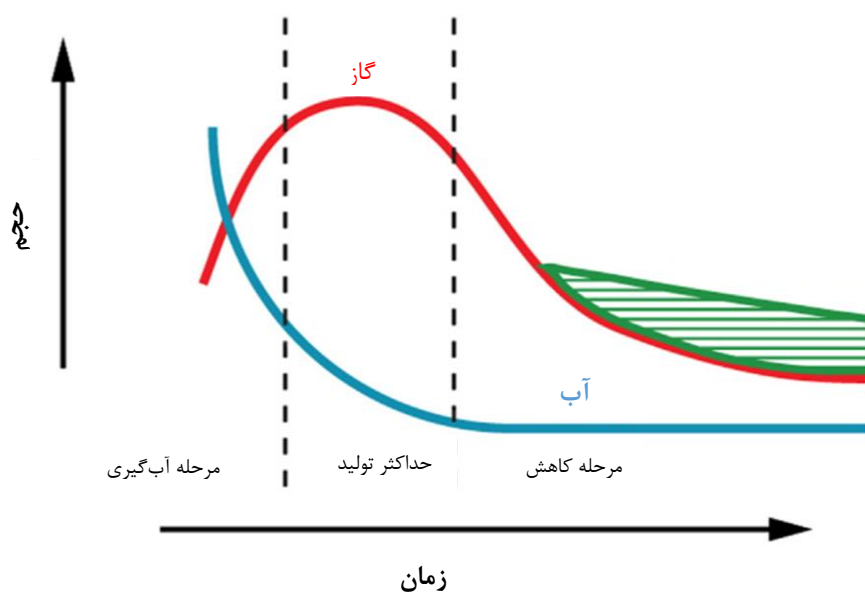
3- Loss

4- Microbially enhanced coalbed methane

به گاز در زیر زمین فرایند شکل‌گیری و ایجاد گاز متان در لایه‌های زغال‌سنگ به‌صورت پیوسته ادامه خواهد داشت (Ritter, 2015).



شکل ۲-۹- مکانیزم ازدیاد برداشت گاز طی فرایند تزریق و تولید گاز در لایه زغال‌سنگ (Thakur, 2016)



شکل ۲-۱۰- فرایند تولید گاز در روش‌های ازدیاد برداشت میکروبی از زغال‌سنگ (Ritter, 2015)

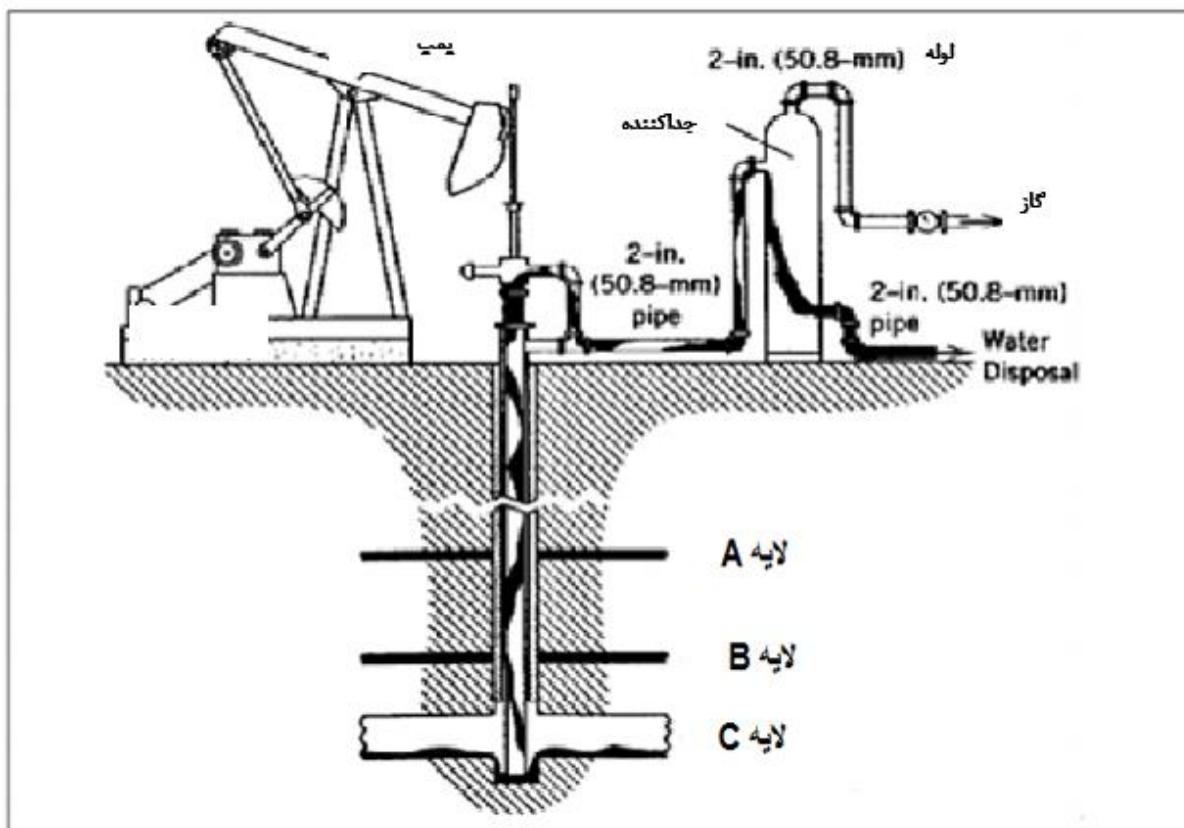
حفاری چرخشی معمولاً برای حفاری گمانه‌های درون لایه زیرزمینی ۱۰۰ تا ۲۰۰ متری بکار می‌رود. به هر حال گمانه‌های ۱۰۰۰ متری یا بیشتر می‌توانند با استفاده از تکنیک‌های حفاری جهت‌دار زیرزمینی برای

افزایش بهره‌وری گاززدایی اجرا شوند. بنابراین در مناطقی که معادن خیلی عمیق نیستند، حفاری درون لایه می‌تواند از سطح زمین اجرا شود (United Nations, 2010).

روش‌های متنوعی برای گاززدایی قبل از استخراج با توجه به هدف گاززدایی و بویژه شرایط زمین‌شناسی منطقه وجود دارد. در ادامه روش‌های گاززدایی قبل از استخراج به تفکیک توضیح داده می‌شود.

الف) گمانه‌های قائم حفاری شده از سطح زمین

اصطلاح گمانه‌های قائم معمولاً برای گمانه‌های حفاری شده از سطح زمین برای رسیدن به لایه یا لایه‌های زغال سنگ هدف به کار برده می‌شود. گمانه‌ها در عمل ۲ تا ۱۰ سال قبل از عملیات استخراج زغال سنگ حفر می‌شوند. شکل ۱۱-۲ نمایی شماتیک از یک گمانه قائم را نشان می‌دهد (Ojha et al., 2011). مزیت گمانه‌های قائم نسبت به سایر روش‌های گاززدایی قبل از استخراج، گاززدایی همزمان از چند لایه زغال سنگ است. در شرایط مناسب، این گمانه‌ها می‌توانند با استفاده از کمترین فیلتراسیون، گازی با کیفیت مناسب و به مقداری کافی که باعث اقتصادی بودن حفاری آنها می‌شود، تولید کنند (Ojha et al., 2011).



شکل ۲-۱۱- نمایی شماتیک از گاززدایی با گمانه قائم (Ojha et al., 2011)

گمانه‌های قائم حفاری شده در لایه‌های زغال‌سنگ دست‌نخورده در طول چند ماه ابتدایی عملیات اغلب مقدار زیادی آب و فقط مقدار کمی گاز متان تولید می‌کنند. بطوریکه بیشتر آب‌ها از لایه زغال‌سنگ خارج شده و فشار آن کاهش می‌یابد. گمانه‌های قائم معمولاً در یک الگوی شبکه‌ای منظم به طوریکه شعاع ناحیه گاززدایی هر گمانه با هم تداخل داشته باشد، به منظور ارائه موثرترین روش برای فرآیند آبگیری و کاهش فشار هیدرواستاتیک لایه زغال‌سنگ، حفاری می‌شوند (Ojha et al., 2011).

بعد از حفاری گمانه‌های قائم آن را با پوششی فلزی می‌پوشانند. این پوشش از ریزش گمانه و همچنین ورود آب به داخل آن جلوگیری می‌کند. بطور کلی گمانه‌های قائم به دو دسته زیر تقسیم می‌شوند.

گمانه‌های آزاد: بیشترین نوع اجرای گمانه‌های قائم است که گمانه‌ها فقط در بالاترین نقطه کیسینگ‌گذاری می‌شوند. این نوع گمانه‌ها فقط زمانی می‌توانند مورد استفاده قرار گیرند که دیواره آنها شامل سازند زمین-شناسی خوبی بوده و ریزش آن نیز غیرمحمتمل باشد.

گمانه‌های کیسینگ گذاری شده: این نوع از گمانه‌ها با لوله‌هایی از جنس فولاد و یا فایبرگلاس محصور می‌شوند. این لوله‌ها پایداری گمانه در طول تحریک زغال‌سنگ را حفظ کرده اما استخراج زغال‌سنگ با رسیدن به گمانه بطور ایمن انجام می‌شود. در بعضی از مواقع این نوع گمانه‌ها می‌تواند به عنوان گمانه‌های منطقه تخریب به گاززدایی خود ادامه دهند (United Nations, 2010).

اندازه کیسینگ نهایی و نوع اجرای آنها به فاکتورهای زیر بستگی دارد:

- عمق زغال‌سنگ هدف
 - تعداد لایه‌های تحریک شده
 - حداکثر تولید آب در گاززدایی از زغال‌سنگ
 - فشار مخزن از هر لایه زغال‌سنگ گاززدایی شده
- بیشتر گمانه‌های قائم تا زمانی که نفوذپذیری لایه‌های زغال‌سنگ مخزن با رفتار تحریک بهبود نیابد، گاز تولید نمی‌کند. استفاده از گمانه‌های قائم روشی موثر برای کاهش گاز محتوی لایه زغال‌سنگ قبل از استخراج، کاهش انتشار متان به اتمسفر و افزایش ایمنی معدن و بهره‌وری است.
- یکی از مزایای اصلی گمانه‌های قائم توانایی تولید متان با کیفیت بدون استفاده از فرآیندی اضافی است. همچنین از معایب اصلی روش نیز می‌توان هزینه‌های بالای حفاری و نگهداری نسبت به گمانه‌های منطقه تخریب و افقی را نام برد. فرآیند تحریک یا ایجاد شکستگی ۳۰ تا ۵۰ درصد کل هزینه‌های استفاده از این نوع گمانه‌ها را شامل می‌شود. متغیرهای اصلی در حفاری و اجرا گمانه‌های قائم عمق حفاری، روش اجرا، تعداد لایه‌های زغال‌سنگ، اندازه و نوع هر فرآیند ایجاد شکافت هیدرولیکی استفاده شده و هزینه ساخت زیربنای مکان گمانه است (Ojha et al., 2011).

تعدادی از مزایا و معایب استفاده از این روش در ادامه ذکر می‌شود (United Nations, 2010).

مزایا:

- انتقال گاز قبل از استخراج
- تولید گاز با کیفیت و ارزش تجاری بالا
- انجام عملیات گاززدایی مستقل از عملیات استخراج زیرزمینی زغال سنگ
- معمولاً در زمان شکافت هیدرولیکی زغال سنگ، شرایط سقف تحت تاثیر منفی قرار نمی گیرد.
- این گمانه ها حین استخراج نیز به عنوان گمانه های منطقه تخریب مورد استفاده قرار می گیرند.

معایب:

- بالا بودن هزینه های اجرا
- آرایش سطحی می تواند از نظر مالکیت و دسترسی سخت باشد.
- امکان کاهش نفوذپذیری در لایه های عمیق باعث کاهش بهره وری می شود.
- هزینه های حفاری ممکن است مانعی برای لایه های زغال سنگ عمیق باشد.
- لایه های زغال سنگ باید نفوذپذیری بالایی داشته باشند.
- مشکلات هماهنگی با طرح استخراج.
- طراحی و اجرا این نوع گمانه ها کاری تخصصی است.

ب) گمانه های درون لایه افقی

لایه های زغال سنگ لایه هایی تخت هستند که طول و عرض آنها خیلی بیشتر از بعد قائم آنها است. همین امر باعث شده که گمانه های قائم فقط بخش نسبتاً کوچکی از لایه زغال سنگ را برای گاززدایی پوشش دهند

و همچنین گمانه‌های قائم همیشه به ایجاد یا توسعه شکافت‌های هیدرولیکی و مسیرهای نفوذپذیری افقی در زغال‌سنگ برای جریان گاز به گمانه احتیاج دارند (Ojha et al., 2011).

این روش جایگزینی برای گاززدایی قبل از استخراج با استفاده از گمانه‌های قائم است. امکان حفاری گمانه‌های افقی تا طول ۱۵۲۵ متر (۵۰۰۰ فوت) درون لایه‌های زغال‌سنگ وجود دارد. با اجرا این نوع گمانه‌ها حجمی از زغال‌سنگ که بطور مستقیم با گمانه‌های گاززدایی در ارتباط بوده افزایش می‌یابد و بطور کلی این نوع حفاری به شکافت هیدرولیکی نیازی ندارد (Ojha et al., 2011).

این نوع گمانه‌ها یا بطور مستقیم از درون کارگاه و یا از سطح زمین حفاری می‌شوند. با حفاری جهتدار، گمانه‌های افقی به طور عمود صفحه شکستگی‌های موجود در لایه زغال‌سنگ را برای بهینه‌سازی گاززدایی متان قطع می‌کنند. بطور کلی گمانه‌های درون لایه افقی به گروه‌های زیر تقسیم می‌شوند:

گمانه‌های کوتاه: معمولاً به طور موازی با جبهه کار پنل حفاری می‌شوند.

گمانه‌های طولانی: به طور طولی در یک پنل یا در عرض چندین پنل حفاری می‌شوند.

گمانه‌های فوقانی: برای گاززدایی قبل از استخراج از لایه مجاور لایه زغال‌سنگ هدف استفاده می‌شود.

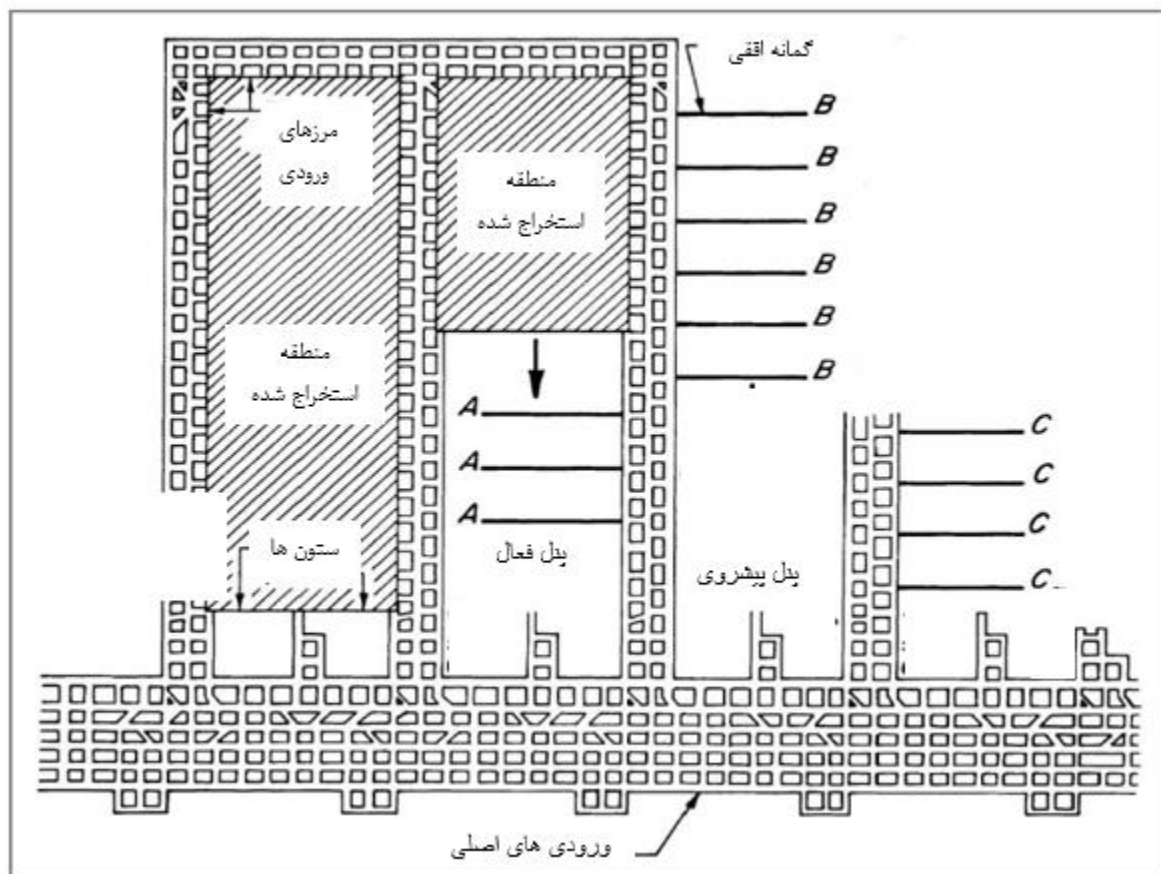
گمانه‌های سطحی جهتدار: از سطح زمین شروع شده و با شعاع‌های مختلف برای حفاری افقی در لایه زغال سنگ تغییر جهت می‌دهند.

ج) گمانه‌های کوتاه

گمانه‌های افقی کوتاه بطور موازی با جبهه کار حفاری می‌شود. گاززدایی از لایه‌های زغال‌سنگ در زمان کوتاهی قبل از استخراج، جریان متان به داخل جبهه کار را کاهش می‌دهد. گمانه‌های کوتاه با طولی کمتر از ۳۰۵ متر (۱۰۰۰ فوت) می‌تواند با دریل‌های نسبتاً ساده، بدون سیستم هدایت کننده که برای گمانه‌های طولانی مورد نیاز است، حفاری شود. گمانه‌های کوتاه معمولاً ۵ تا ۸ میلی‌متر (۲ تا ۳ اینچ) قطر دارند و با فاصله ۳۰ تا ۱۲۲ متر (۱۰۰ تا ۴۰۰ فوت) از یکدیگر حفاری می‌شوند. گمانه‌ها معمولاً از راهروهای برگشت

هوا (B و C) در شکل ۲-۱۲ برای به حداکثر رساندن زمان گاززدایی از پنل بعدی و کاهش جریان متان به ورودی‌های پیشروی مجاور حفاری می‌شوند (Ojha et al., 2011).

کیفیت گاز تولیدی از گمانه‌های افقی معمولاً بالا است و می‌تواند به عنوان محصولی برای خط لوله بکار رود. هزینه‌های معمولی برای حفاری گمانه‌ها با استفاده از دریل‌های دوار و با هزینه تدارکات و آب و برق حدود ۵۰ تا ۶۵ دلار در هر متر است (Ojha et al., 2011). از مزایای گاززدایی با گمانه‌های کوتاه می‌توان کم هزینه بودن آنها برای کاهش احتراق اصطکاکی و کنترل انتشار گاز متان را نام برد. ولی جریان گاز پایین از معایب گاززدایی با گمانه‌های کوتاه است (United Nations, 2010).



شکل ۲-۱۲- نمایی شماتیک از گمانه‌های افقی کوتاه (Ojha et al., 2011)

د) گمانه‌های طولانی

گمانه‌های درون لایه طولانی از داخل راهروهای موجود در لایه‌های زغال‌سنگ هدف حفاری می‌شوند که به طور قابل توجهی گاز محتوی زغال‌سنگ را بویژه زمانی که دوازده ماه یا بیشتر قبل از شروع استخراج حفاری شده باشند، کاهش می‌دهد. گمانه‌های جهتدار که با استفاده از موتورهای درون گمانه‌ای حفاری می‌شوند، در ماه‌هایی از سال برای گاززدایی از پهنه‌های جبهه‌کار طولانی قبل از استخراج و برای گاززدایی از زغال-سنگ در اطراف ورودی‌های پیشروی استفاده می‌شوند (Ojha et al., 2011).

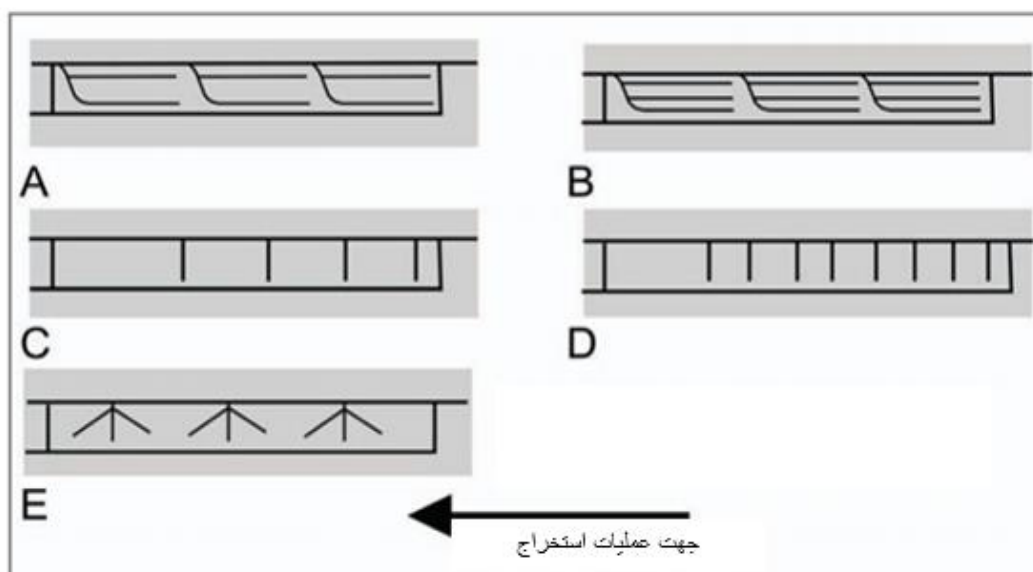
پیشرفت تکنولوژی‌های حفاری در دهه گذشته باعث حفاری دقیق و سریع لایه زغال‌سنگ تا عمق ۱۵۲۵ متری شده است. این پیشرفت‌ها به کاهش هزینه‌های حفاری جهتدار و افزایش فرصت برای استفاده از این تکنیک در گاززدایی منجر شده است.

حفاری گمانه‌های درون لایه طولانی همچنین می‌تواند در پنل‌های جبهه‌کار طولانی بعدی، چند ماه قبل از شروع استخراج شروع شود و زمانی که به طور جهتدار حفاری می‌شوند، می‌توانند در لایه‌های زغال‌سنگی که پیش از این با گمانه‌های قائم سطحی گاززدایی شده، قرار بگیرند.

گاززدایی گمانه‌های طولانی برای کمک به تولید در معدن بکار رفته است. برونر ۱ و شاوبل در سال ۲۰۰۵ گزارش دادند که در معدنی در مکزیک شمالی گمانه‌ای با ۸۸۵ متر طول، انتشار متان به داخل ورودی پیشروی و تهویه لازم را ۳۰ درصد کاهش و نرخ پیشروی را ۷۸ درصد افزایش می‌دهد.

بیش از ۵۰ درصد گاز برجا می‌تواند با گمانه‌های درون لایه افقی قبل از استخراج در زغال‌سنگ‌های با نفوذپذیری بالا در آمریکا گاززدایی شود (Ojha et al., 2011).

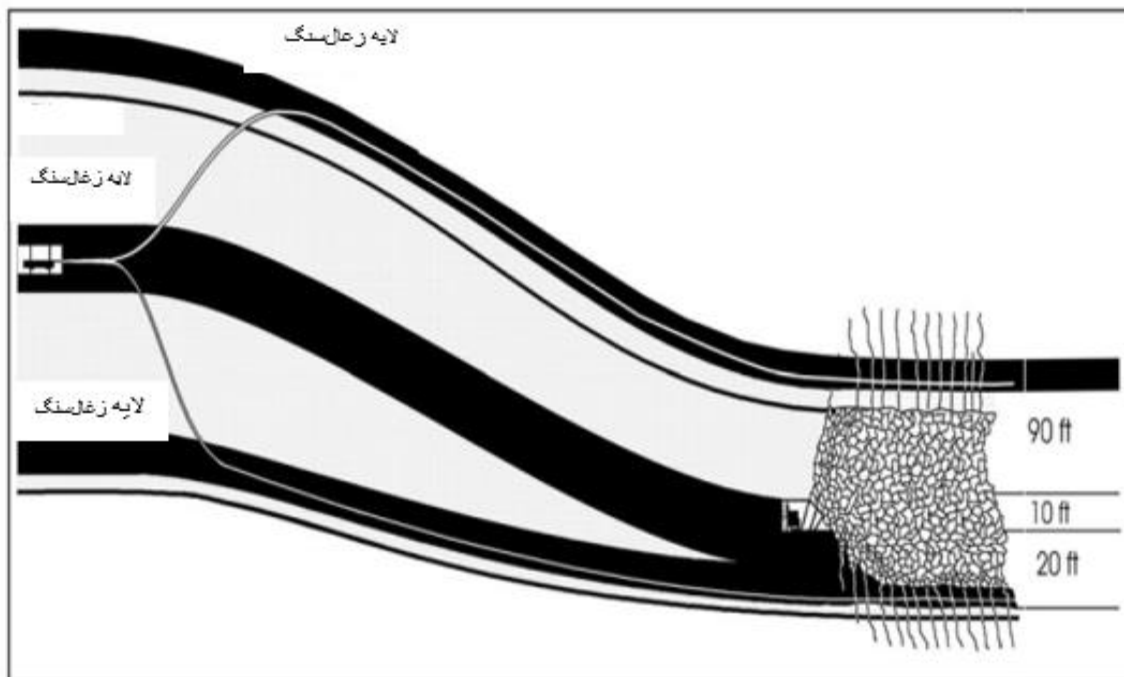
شکل ۲-۱۳ نمایی شماتیک از انواع گمانه‌های درون لایه افقی طولانی را نشان می‌دهد.



شکل ۲-۱۳- نمایی شماتیک از انواع گمانه‌های درون لایه افقی طولانی (Ojha et al., 2011)

ه) گمانه‌های فوقانی

گمانه‌های فوقانی به طور جهت‌دار از ورودی‌های معدن در لایه‌های زغال‌سنگ یا دیگر لایه‌های گازدار در بالا یا پایین لایه زغال‌سنگ هدف حفاری شده و می‌تواند تا ۱۰۰۰ متر طول داشته باشد. هدف اصلی از حفاری این نوع گمانه‌ها گاززدایی از منطقه تخریب شده در نتیجه استخراج جبهه کار طولانی است. به این ترتیب به طور کلی تکنیکی برای گاززدایی حین استخراج در نظر گرفته می‌شوند، اما به نرخ‌های پیشروی جبهه کار طولانی بستگی دارند (Ojha et al., 2011). گمانه‌های طولانی می‌توانند لایه‌های گازدار اطراف لایه زغال-سنگ هدف را در برخی از زمان‌ها قبل از شکل‌گیری منطقه تخریب گاززدایی کنند. اطلاعات جزئی بیشتری در مورد گمانه‌های فوقانی در بخش گمانه‌های گاززدایی حین استخراج ارائه شده است. شکل ۲-۱۴ نمایی از حفاری گمانه‌های فوقانی است (Ojha et al., 2011).



شکل ۲-۱۴ - حفاری گمانه‌های فوقانی (Ojha et al., 2011)

مزایای استفاده از گمانه‌های افقی درون لایه (United Nations, 2010)

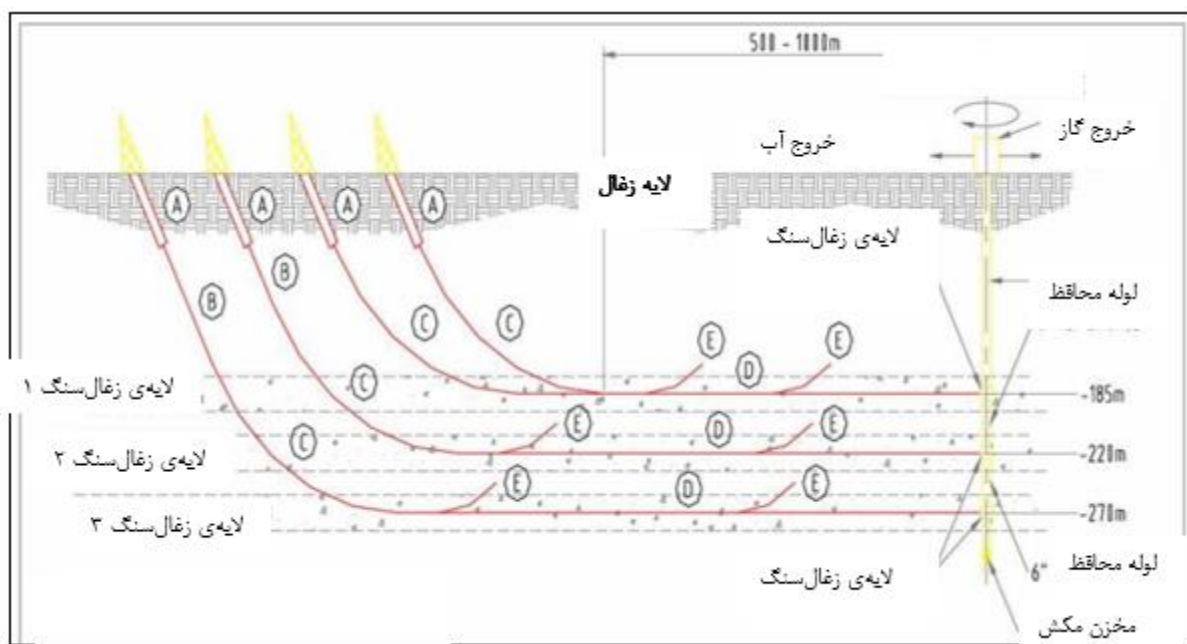
- انتقال گاز قبل از شروع استخراج از پنل‌ها
- تولید گاز با خلوص و کیفیت بالا که برای تزریق به خط لوله انتقال گاز مناسب است.
- عملیات گاززدایی مستقل از عملیات استخراج زغال سنگ است.
- هزینه‌های حفاری این نوع گمانه‌ها کمتر از هزینه‌های حفاری گمانه‌های قائم از سطح زمین است.
- قابل کاربرد در معادن عمیق با نفوذپذیری بالای لایه زغال سنگ است.
- ریسک انفجار را در معادن مستعد انفجار کاهش می‌دهد.

معایب استفاده از گمانه‌های افقی درون لایه (United Nations, 2010)

- گمانه‌های گاززدایی باید قبل از استخراج حفاری شوند.

- لایه زغال سنگ باید نفوذپذیری متوسط تا زیادی برای تسهیل در کاهش قابل توجهی در گاز محتوی لایه زغال سنگ در دوره‌ی زمانی معقول داشته باشد.
 - فقط انتشار گاز از لایه‌های استخراج شده را کاهش می‌دهد و در انتشار گاز از لایه‌های مجاور که تحت تاثیر استخراج قرار دارند، تاثیری ندارد.
 - انتشار آب، پایداری گمانه و کنترل جهت حفاری می‌تواند در بعضی از مکان‌های لایه مشکل باشد.
 - تیم‌های حفار زیرزمینی آموزش دیده لازم است.
- ی) گمانه‌های جهت‌دار حفاری شده از سطح زمین

- این گمانه‌ها بطور گسترده در حفاری نفت و گاز متعارف در چند دهه اخیر استفاده شده است. حفاری با روشی شبیه حفاری گمانه‌های قائم شروع شده، اما در نقطه‌ای از پیش تعیین شده، گمانه در یک منحنی از قائم منحرف شده بطوریکه در شکلی تقریباً موازی با سطح لایه‌بندی ادامه می‌یابد. این نوع گمانه‌ها با شعاع چرخش آنها از قائم تعریف می‌شوند. شکل ۲-۱۵ نمایی شماتیک از حفاری گمانه‌های جهت‌دار است (United Nations, 2010).



شکل ۲-۱۵- نمایی شماتیک از حفاری گمانه‌های جهت‌دار (Ojha et al., 2011)

این نوع گمانه‌ها ترکیبی از حفاری درون لایه افقی و حفاری قائم است. حفاری از سطح زمین ایمن‌تر از درون معدن بوده، مانع عملیات استخراج نیست و می‌تواند سالها پیش از استخراج اجرا شود. یک گمانه افقی طولانی بخش بزرگتری از حجم زغال‌سنگ را نسبت به گمانه‌های قائم پوشش می‌دهد و در بیشتر مواقع به شکافت هیدرولیکی احتیاج ندارد و مسیر گمانه نیز می‌تواند برای استفاده از نفوذپذیری لایه زغال‌سنگ کنترل شود.

علاوه بر این منطقه بزرگی می‌تواند فقط از سطح زمین گاززدایی شود. پس با استفاده از مزایای هر دو نوع حفاری قائم و افقی می‌توان سیستم گاززدایی بهتری ارائه داد (Ojha et al., 2011). گمانه‌های با شعاع متوسط معمولی‌ترین گمانه‌های جهتدار سطحی هستند که در حال حاضر برای گاززدایی از لایه‌های زغال-سنگ استفاده می‌شوند. در ۱۰ سال گذشته این تکنیک تصحیح شده و به نظر می‌رسد که استفاده از آن در آمریکا و استرالیا افزایش یافته است. تلاش‌های اولیه در حفاری گمانه‌های افقی از سطح زمین مشکلاتی در انتقال و تولید آب داشت. انحنای گمانه‌ها استفاده از پمپ‌های معمولی را سخت و پیچیده می‌کند (Ojha et al., 2011).

بخش قائم گمانه و در بعضی مواقع بخش منحنی گمانه برای اطمینان از پایداری گمانه و جلوگیری از ورود آب از سنگ‌های آبدار کیسینگ گذاری می‌شود. گمانه‌های افقی حفاری شده از سطح زمین در زغال‌سنگ-های با نفوذپذیری نسبتاً بالا که چندین سال قبل از استخراج حفاری شده باشند قادر به گاززدایی بیش از ۸۰ درصد متان برجا است که شبیه بازدهی گاززدایی از گمانه‌های قائم است اما در کل گمانه‌های افقی از لایه‌های زغال‌سنگ با نرخ تولید بالا گاززدایی می‌کنند.

هزینه‌های حفاری برای گمانه‌های افقی حفاری شده از سطح به عمق لایه یا لایه‌های هدف، تعداد حفاری-های جانبی و طول آنها بستگی دارد. درحالی‌که هزینه حفاری گمانه‌های افقی در منطقه‌ای یکسان ۲ تا ۳ برابر هزینه حفاری گمانه‌های قائم است، ولی بدلیل زمان بازیابی گاز سریع‌تر، تولید گاز اولیه بیشتر و بازیابی

تولید بالاتر می‌تواند ارزان تر از گمانه‌های قائم باشد. مزیت مهم گمانه‌های افقی لازم نداشتن شکافت هیدرولیکی است که ۳۰ درصد هزینه اجرا گمانه‌های قائم را دارد (Ojha et al., 2011).

مزایای حفاری گمانه از سطح زمین:

- عملیات گاززدایی قبل از استخراج انجام می‌شود.
- گاز تولید شده کیفیت بالایی دارد و برای تزریق به خط لوله مناسب است.
- عملیات گاززدایی مستقل از عملیات استخراج زغال سنگ است.
- بازیابی گاز بهتر از گمانه‌های قائم است.
- می‌توان از گمانه‌ها برای گاززدایی حین استخراج نیز استفاده کرد.
- محل حفاری انعطاف‌پذیر بوده و با مشخصات سطح محدود نمی‌شود.

معایب حفاری گمانه از سطح زمین:

- هزینه حفاری این نوع گمانه‌ها بالا است.
- در همه لایه‌های زغال سنگ قابل اجرا نیست.
- شکست گمانه به سادگی اصلاح نمی‌شود.
- تجهیزات و مهارت‌های حفاری خاصی لازم است.

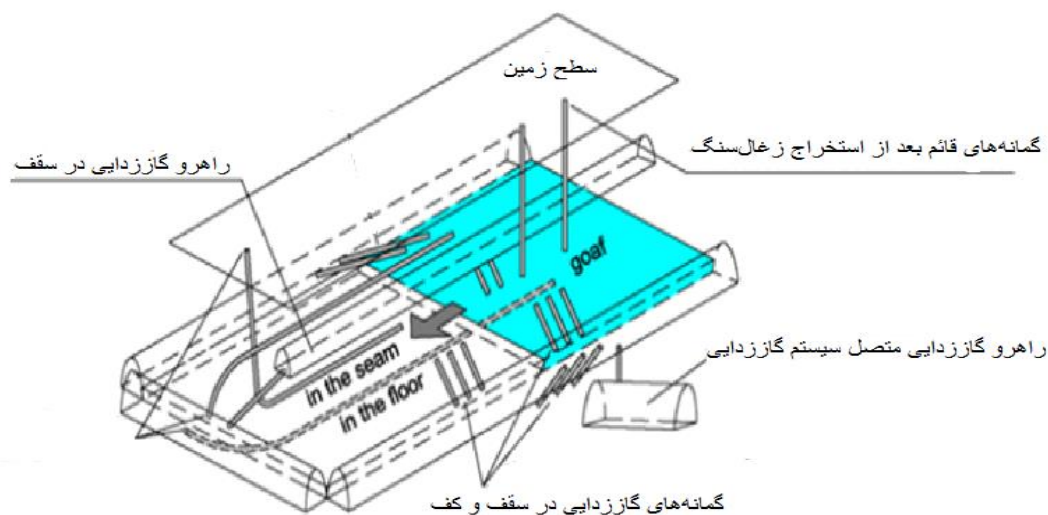
۲-۷-۲- روش‌های استحصال گاز حین یا بعد از عملیات استخراج

در این روش گاز موجود در لایه‌های زغال سنگ با تکنیک‌های مختلفی جذب شده و به سطح زمین منتقل می‌شود. در بسیاری از حوزه‌های زغال سنگی دنیا بدلیل نفوذپذیری پایین لایه‌های زغال سنگ و مشخصات زمین‌شناسی لایه (نوع زغال سنگ، گسل‌ها و ...) استفاده از تکنیک‌های قبل از استخراج ممکن نیست. از

آنجایی که ذخایر کم عمق در بسیاری از کشورها تمام شده و استخراج در لایه‌های عمیق‌تر انجام می‌شود، ممکن است روش‌های گاززدایی حین استخراج معمول شود (Ojha et al., 2011).

با وجود یک یا تعداد بیشتری لایه زغال‌سنگ در بالا یا زیر لایه استخراج شده، انتشار از این منابع ممکن است بطور قابل توجهی از انتشار از لایه‌های استخراج شده تجاوز کند که در درجه اول به ضخامت زغال-سنگ و گاز محتوی این لایه‌ها بستگی دارد. بنابراین حجم بسیار بالاتری از جریان گاز اغلب می‌تواند با استفاده از تکنیک‌های گاززدایی حین استخراج در مقایسه با روش‌های گاززدایی قبل از استخراج گاززدایی شود. اطمینان از غلظت گاز کافی برای گاززدایی موثر و کاربرد ایمن، به طراحی دقیق و مدیریت سیستم‌ها احتیاج دارد (Ojha et al., 2011).

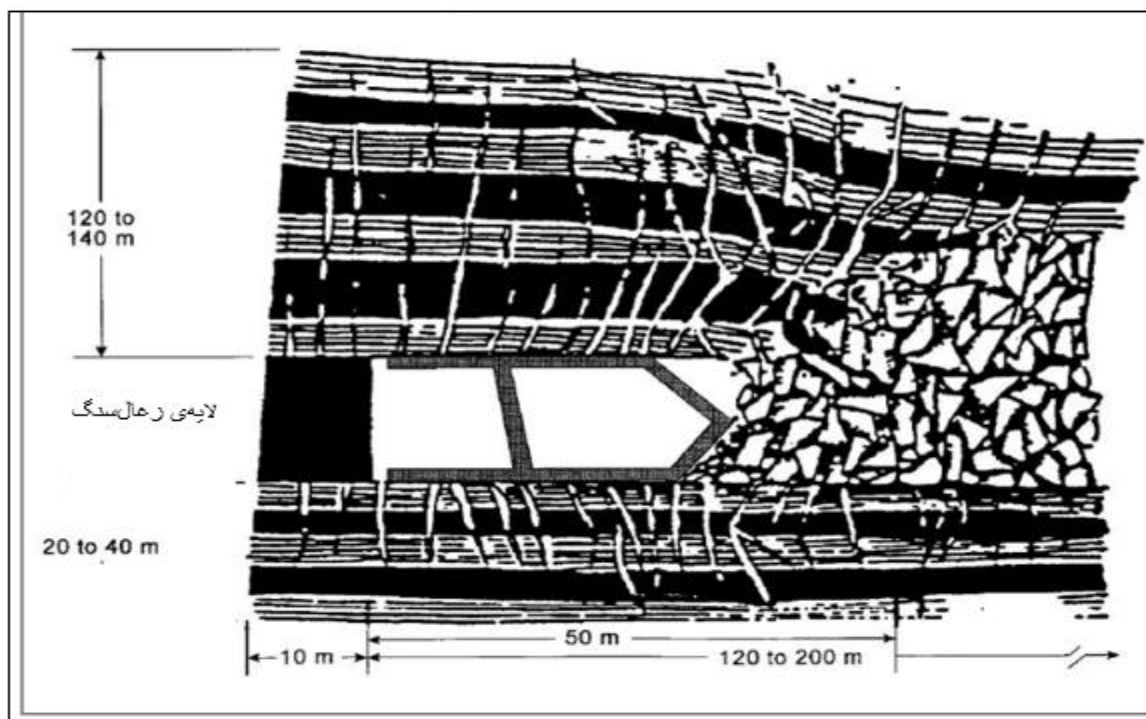
شکل ۲-۱۶ نمایی کلی از روش‌های گاززدایی که می‌تواند برای گاززدایی از یک پنل جبهه‌کار طولانی، حین استخراج زغال‌سنگ بکار رود را نشان می‌دهد.



شکل ۲-۱۶- نمایی کلی از روش‌های گاززدایی حین استخراج (United Nations, 2010)

لایه‌های روی لایه زغال‌سنگ بعد از استخراج زغال‌سنگ خرد شده و فرو می‌ریزد که به آن منطقه تخریب می‌گویند. شکل ۲-۱۷ تاثیر منطقه تخریب بر لایه‌های مجاور را نشان می‌دهد.

حجم گاز آزاد شده از منطقه تخریب به روش استخراج، تعداد و نزدیکی لایه‌های رویی و یا زیرین، مشخصات مخزن آنها و دیگر فاکتورهای زمین‌شناسی بستگی دارد. انگیزه اولیه برای گاززدایی از بخش تخریب، کاهش انتشار متان به داخل جبهه کار و کمک به سیستم تهویه معدن در ارائه محیطی ایمن برای فعالیت‌های استخراج زغال سنگ است (Ojha et al., 2011).

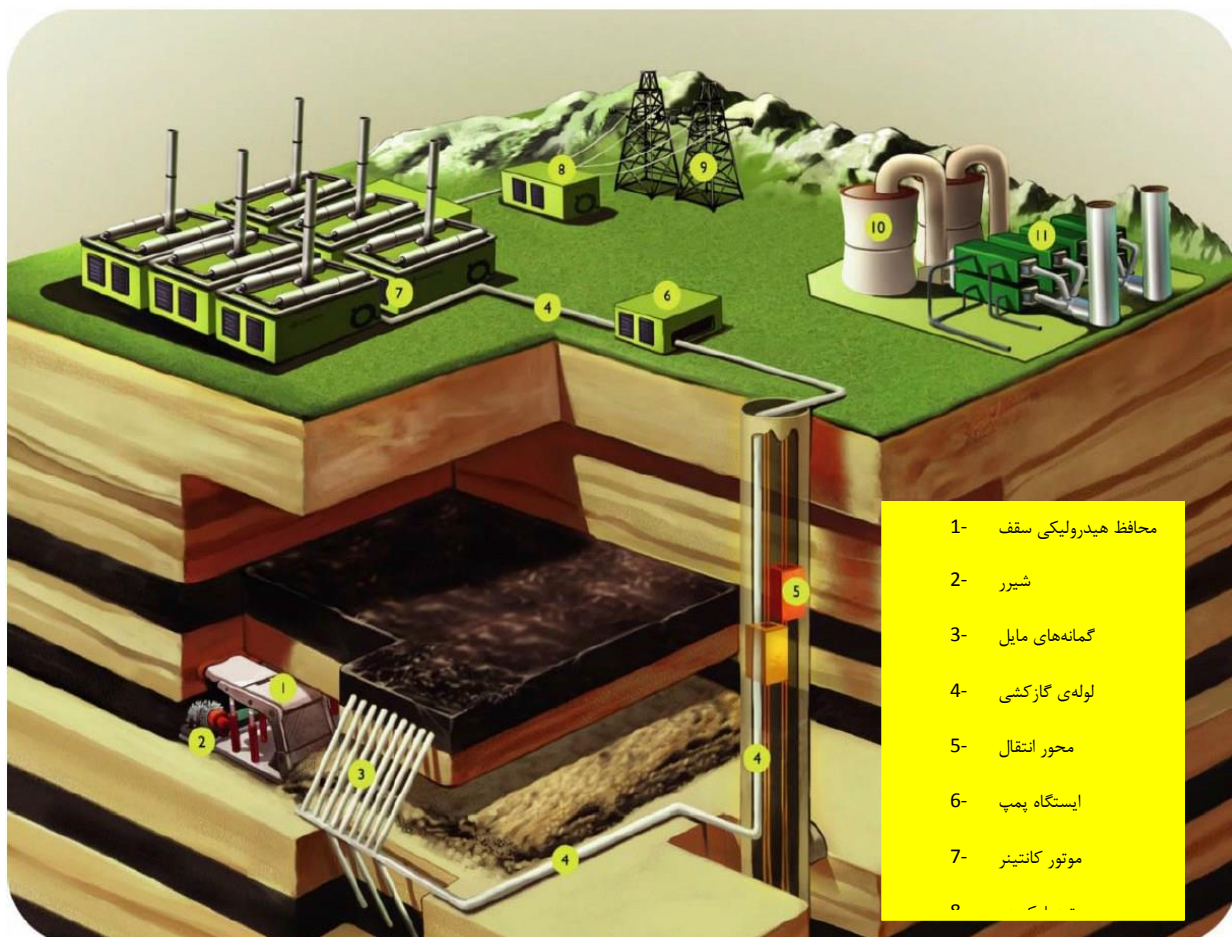


شکل ۲-۱۷- تاثیر منطقه تخریب بر لایه‌های مجاور (Ojha et al., 2011)

بسته به شرایط موجود گاز تولید شده از منطقه تخریب می‌تواند گاز با کیفیت بالا باشد. تولید گاز متان نامرغوب ممکن است در نتیجه طبیعت خود منبع یا توجه بیش از حد به کاهش انتشار گاز به سیستم تهویه معدن بوسیله ترقيق گاز منطقه تخریب با هوای تهویه باشد (Ojha et al., 2011).

رایج‌ترین روش استحصال گاز از زغال سنگ به‌ویژه در شرایطی که مقدار گاز محتوی قابل توجه است، حفاری گمانه‌های زهکش به درون جبهه کار معدن (قبل از کاهش گاز محتوی توسط عملیات استخراج) است. این گمانه‌ها می‌توانند به‌صورت عمودی یا افقی از سطح زمین یا از درون خود لایه زغال سنگ (در ورودی‌های معدن) حفاری شوند (Roshchanka, et al., 2017). شکل ۲-۱۸ نمایی شماتیک از روش استحصال گاز در

معدن یا اصطلاحاً CMM را نشان می‌دهد که در آن گاز توسط گمانه‌های ذکر شده از لایه زغال‌سنگ درون معدن به سطح زمین انتقال پیدا می‌کند.



شکل ۲-۱۸- چرخه صنعتی تولید گاز از لایه زغال‌سنگ به روش CMM (Roshchanka et al., 2017)
 CMM ترکیبی از گاز و هوای درون معدن است که در آن درصد اکسیژن ۵-۱۲ درصد و مقدار گاز متان بین ۲۵-۶۰ درصد تغییر می‌کند. چین، استرالیا و اوکراین از جمله کشورهایی هستند که در مقیاس تجاری صاحب این فناوری می‌باشند. تولید برق و درآمدزایی از محل فروش مستقیم گاز از جمله نتایج پروژه‌های CMM در نقاط مختلف دنیا است.

حجم عظیمی از گاز همچنین هر ساله از فضای بسته معادن متروکه و رها شده به فضای اتمسفر زمین وارد می‌شود. سرمایه‌گذاری بر روی معادن متروکه فرصت خوبی برای استحصال گاز (AMM) در طولانی‌مدت است. امروزه پروژه‌های AMM در کشورهایی از قبیل آمریکا، انگلیس، چین و استرالیا در حال انجام هستند.

AMM به لحاظ اقتصادی به دلیل بازگشت سریع سرمایه در مقایسه با سایر روش‌های استحصال گاز زغال از جذابیت بیشتری برخوردار است. سوددهی و بازدهی بالا، فرایند یکنواخت تولید گاز در مقایسه با نوسانات فشار در سایر روش‌های تولید گاز، محتوای گاز بالا، نسبت گاز به اکسیژن (خلوص) بالا و بدون تغییر در طول زمان ازجمله خصوصیات است که فرایند تولید گاز از این روش را منحصربه‌فرد می‌کند. مقدار گاز متان در این روش بین ۶۰ تا ۸۰ درصد است.

آخرین روش تولید گاز از زغال سنگ روش VAM است که در آن گاز آزاد شده در حین استخراج معدن توسط سیستم‌های تهویه، ترقیق و به محدوده‌ای بین ۰/۵ تا ۰/۸ درصد متان می‌رسد. تکنولوژی تغلیظ گاز و یا تولید مستقیم انرژی از VAM پیچیده و در اختیار کشورهای معدودی است. چین، استرالیا و آمریکا ازجمله کشورهای پیشرو در این فناوری به شمار می‌روند. جدول ۲-۲ مقایسه بین روش‌های مختلف تولید از ذخایر زغال سنگ در دنیا را نشان می‌دهد. مقایسه بین روش‌های مختلف نشان می‌دهد که در میان روش‌های موجود و همچنین با توجه به میزان خلوص گاز خروجی از هر روش، CMM و AMM به ترتیب بیشترین مقدار گاز استحصال شده از زغال سنگ را داشته‌اند (Sawhney, 2007).

جدول ۲-۲- مقایسه بین روش‌های مختلف تولید از ذخایر زغال سنگ در دنیا (Sawhney, 2007)

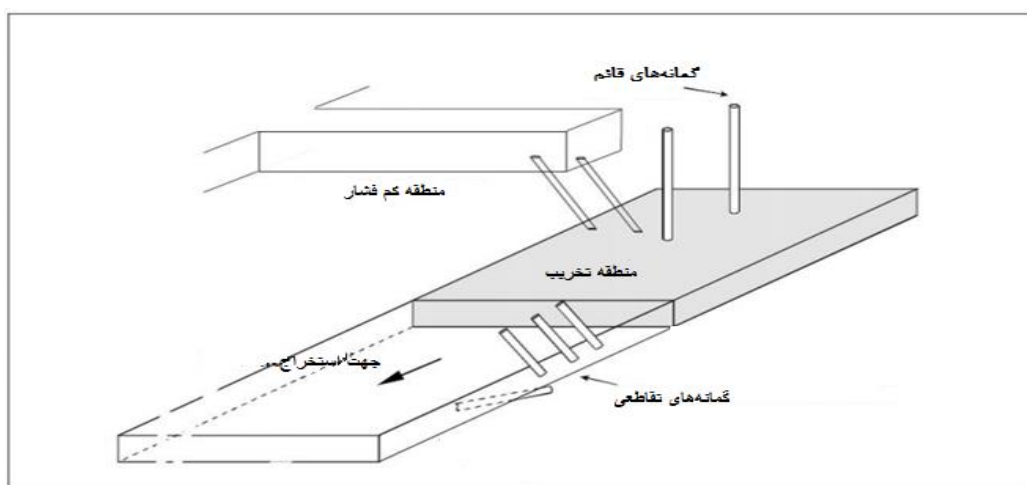
روش استحصال گاز	مقدار تولید خالص گاز (M^3/Day)	درصد خلوص گاز متان (%)
CBM	۱۰۰۰-۴۰۰۰	بیشتر از ۹۵
CMM	۱۹۴۰۰-۶۰۰۰	۷۵-۳۵
VAM	۱۳۰۰۰-۴۰۰۰	۰/۵ تا ۰/۸
AMM	۸۶۰۰-۱۱۰۰	۸۰-۳۵

بطور کلی در سراسر دنیا سه روش اصلی برای گاززدایی از منطقه تخریب جبهه کار طولانی مورد استفاده قرار می‌گیرد.

- گمانه‌های قائم
- گمانه‌های تقاطعی
- روش گمانه‌های فوقانی

برای بیشینه کردن گاززدایی منطقه تخریب، ترکیبی از این سیستم‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد.

شکل ۲-۱۹ انواع روش‌های گاززدایی در منطقه تخریب را نشان می‌دهد.



شکل ۲-۱۹- انواع روش‌های گاززدایی در منطقه تخریب (Ojha et al., 2011)

الف) گمانه‌های قائم

روش گاززدایی منطقه تخریب غالب در آمریکا استفاده از گمانه‌های قائم در بالای لایه زغال‌سنگ در حال استخراج است.

علاوه بر این گمانه‌های قائم موثرترین روش برای کاهش گاز محتوی در مناطق کم عمق است. از این روش در دیگر مناطق دنیا با لایه زغال‌سنگ خیلی عمیق، نفوذپذیری خیلی پایین و مشکلات دسترسی به سطح زمین خیلی زیاد استفاده نشده و گاززدایی با استفاده از دیگر روش‌ها انجام می‌شود (Ojha et al., 2011).

گمانه‌های منطقه تخریب معمولاً قبل از استخراج لایه زغال‌سنگ حفاری می‌شوند، اما فقط بعد از عبور جبهه‌کار از گمانه‌ها و شکل‌گیری منطقه تخریب راه‌اندازی می‌شوند. متان آزاد شده از لایه‌های خردشده در بالا و درون بخش تخریب به گمانه جریان یافته و سپس به سطح زمین منتقل می‌شود.

تعداد گمانه‌های قائم در یک پنل جبهه‌کار طولانی بطور قابل توجهی به نرخ استخراج، طول جبهه‌کار و گاز محتوی لایه رویی بستگی دارد. اولین گمانه‌ها معمولاً ۵۰ تا ۱۷۰ متر از جبهه‌کار قرار دارد و در جبهه‌کاری با طول ۳۰۰۰ متر، ۳ تا ۳۰ گمانه برای گاززدایی از منطقه تخریب احتیاج است.

تراکم بالاتر گمانه‌ها در شروع جبهه‌کار اغلب برای گاززدایی بیشتر در مراحل اولیه عملیات حفاری جبهه‌کار استفاده می‌شود (Ojha et al., 2011).

مطالعات انجام شده توسط سازمان معادن آمریکا نشان می‌دهد که گمانه‌های قرار گرفته در منطقه کشش در طول حاشیه پنل جبهه‌کار طولانی، ۷۷ درصد بیش تر از گمانه‌هایی که بطور سنتی در مرکز پنل قرار گرفته و تحت فشارند، گاز تولید می‌کند. اغلب اپراتورها ابتدا موقعیتی برای اولین گمانه منطقه تخریب در پنل انتخاب می‌کنند و از مقدار تولید آن برای کمک به موقعیت‌یابی گمانه‌های بعدی استفاده می‌کنند.

گمانه‌های قائم قبل از استخراج، از سطح زمین تا فاصله ۶-۲۸ متری بالای لایه زغال‌سنگ در حال کار حفاری می‌شوند. پایین‌ترین بخش گمانه یا کیسینگ گذاری نمی‌شود یا با کیسینگ چاکدار برای حفظ یکپارچگی گمانه و جریان گاز به گمانه اجرا می‌شود. پوشش چاکدار با سیمان محکم نشده و از پایین کیسینگ آویزان می‌شود.

اجرا گمانه‌های منطقه تخریب در حوزه‌های زغال‌سنگی مختلف در آمریکا به عمق، جریان گاز و آب مورد انتظار و مشخصات ژئومکانیکی لایه‌های روباره بستگی دارد. کارایی جذب گمانه‌های بخش تخریب در آمریکا بین ۳۰ تا ۷۰ درصد است که به شرایط زمین‌شناسی و تعداد گمانه‌های پنل بستگی دارد. بعضی از اپراتورها که از گمانه‌های قائم در شرایط زمین‌شناسی مناسب و موقعیت مناسب ذخیره استفاده می‌کنند، از کارایی بیش از ۸۰ درصد بهره می‌برند.

کیفیت و کمیت متان تولید شده از گمانه‌های قائم منطقه تخریب به عوامل زیادی مثل موارد زیر بستگی دارد.

مشخصات مخزن و زمین‌شناسی منطقه

مشخصات استخراج

موقعیت گمانه‌ها

شیوه‌های اجرا

عملیات سرگمانه

شیوه‌های تهویه و گاززدایی در معدن

اجرا گمانه‌های قائم در منطقه تخریب نشان می‌دهد که بهره‌وری گمانه به حجم زغال‌سنگ استخراج شده بستگی دارد. در بسیاری از عملیات در آمریکا نرخ‌های تولید گاز در منطقه تخریب به نرخ پیشروی جبهه کار بستگی دارد.

در سیستم گمانه قائم عملیات سرگمانه، کنترل تهویه و عملیات استخراج زیرزمینی از هم جدا هستند، ولی داشتن ابزاری کارآمد برای مدیریت تاثیر سیستم‌ها بر یکدیگر اهمیت دارد. بدلیل تاثیر گمانه‌های منطقه تخریب بر سیستم تهویه معدن، اپراتورها باید این سیستم‌ها را با استفاده از رفتارسنجی پیوسته هماهنگ کنند. رفتارسنجی پیوسته برای حفظ کیفیت گاز ضروری است. در بسیاری از عملیات استخراج نرخ‌های تولید و کیفیت گاز بالا با مکش، رفتارسنجی و کنترل مناسب ایجاد می‌شود.

(ب) گمانه‌های تقاطعی

این روش اولین روش بکاررفته در اروپا و روسیه است که در جبهه کارهای طولانی با شیب‌های مختلف و در اعماق حدود ۶۰۰ متر کار می‌شود. این روش در چندین معدن آمریکا آزمایش شده و قابل اجرا بوده است، ولی بدلیل سهولت کار با گمانه‌های قائم و همچنین هزینه‌های پایین‌تر نسبت به روش تقاطعی، در آمریکا

بیشتر از روش گمانه‌های قائم استفاده می‌شود. از این روش در آمریکا بیشتر در معادنی با گاز بالا، عمیق و جاییکه حفاری گمانه‌های قائم غیرممکن است، استفاده می‌شود (Ojha et al., 2011).

گمانه‌های تقاطعی جلوتر از جبهه کار در زوایای مختلف در سقف یا کف راهروها حفاری می‌شوند. هدف از حفاری آنها پیش‌گاززدایی از لایه‌های بالایی یا زیرین و سپس جذب گاز از منطقه تخریب بعد از عبور جبهه کار است. گمانه‌ها معمولاً در راهروهای برگشت هوا حفاری می‌شوند اما در شرایط به شدت گازی گمانه‌ها می‌توانند در هر دو ورودی رفت و برگشت هوا حفاری شوند. زاویه، طول و فاصله‌داری گمانه‌ها همگی به شرایط خاص منطقه از قبیل عرض پنل، عمق از سطح زمین، ضخامت لایه استخراج شده، ویژگی‌های ژئومکانیکی لایه‌های اطراف، فضای حفاری در دسترس و محدودیت تجهیزات حفاری بستگی دارد.

در استخراج جبهه کار طولانی پسرو حفظ گمانه‌های تقاطعی و لوله‌های جمع‌آوری گاز از راهروهای مجاور منطقه تخریب در عقب‌نشینی پیچیده و بغرنج است. برای استخراج پسرو با یک راهرو، گمانه‌ها از یک راهرو اضافی در یک طرف پنل برای ارائه دسترسی به گمانه‌های گاززدایی و محیطی محافظ برای سیستم جمع-آوری گاز حفاری می‌شوند.

گمانه‌های تقاطعی قطر کوچکی بین ۵۰ تا ۱۰۰ میلیمتر دارند و در زوایای مختلفی بین ۲۰ تا ۵۰ درجه حفاری می‌شوند. مطالعات آمریکا و تجارب اروپا نشان می‌دهد که گمانه‌های قائم عمر تولید بیشتری داشته و متان خالص‌تری تولید می‌کنند. به هر حال هر منطقه تخریب یک زاویه حفاری بهینه داشته و در زوایای بیش از آن، اجرا گمانه مختل می‌شود.

مطالعات انجام شده توسط سازمان معادن آمریکا (USBM) نشان می‌دهد که بیش از ۷۵ درصد گاز منطقه تخریب از لایه تازه خرد شده و منطقه تخلیه تنش که بطور مستقیم پشت جبهه کار وجود دارد، آزاد می‌شود. گمانه‌های تقاطعی در معادن اروپا به سمت جلو و به طرف بالا حفاری می‌شوند. شکل ۲-۲۰ جهت حفاری گمانه‌های تقاطعی در اروپا را نشان می‌دهد. این جهت‌یابی بویژه برای راهروهای منفرد استفاده شده

با استخراج پسر و بدلیل نیاز به تولید بیشینه در طول عمر محدود گمانه مهم است. زمانیکه جبهه کار از گمانه عبور کرد، دسترسی به گمانه از دست می رود و گمانه معمولاً بسته می شود. گمانه ها معمولاً با محور جبهه کار ۱۵ تا ۳۰ درجه اختلاف زاویه دارند.

برای گاززدایی از منطقه کم فشار پیوسته روی بخش تخریب با استفاده از روش گمانه های تقاطعی، گمانه ها باید طوری قرار گیرند که منطقه تاثیر آنها کمی همپوشانی داشته باشد. اگر گمانه ها خیلی از هم دور باشند، گازهای موجود بین گمانه ها تمایل دارند که به سمت نزدیک ترین ورودی معدن حرکت کنند، و اگر گمانه ها خیلی نزدیک یکدیگر قرار گیرند، ممکن است که باعث ورود هوای تهویه معدن به بخش تخریب و کاهش کیفیت گاز تولیدی شوند.

فاصله داری گمانه ها می تواند از ۲۵ تا ۶۰ متر بسته به فشار مکش در دسترس در سر گمانه و نفوذپذیری منطقه تخریب تغییر کند. فاصله داری ممکن است در نزدیکی ابتدا و انتهای پنل های زغال سنگی جدید برای جذب جریان گاز افزایش یافته در منطقه کشش که خیلی خرد شده و نفوذپذیری بالایی دارند، کاهش یابد. موقعیت نقطه ی شروع حفاری در سقف یا کف راهروها در اجرا گمانه و بهبود کیفیت گاز، بحرانی خواهد بود. موقعیت دهانه گمانه ها معمولاً در نزدیکی پایه های موجود یا دیگر نگهدارنده های سقف برای مینیمم



شکل ۲-۲- حفاری گمانه های تقاطعی (Ojha et al., 2011)

کردن شکستگی‌های بوجود آمده در ابتدای گمانه بر اثر استخراج زغال‌سنگ نزدیک گمانه‌ها است.

برای بیشینه کردن جریان گاز در منطقه تخریب، مینیمم کردن جریان داخلی هوای معدن به سیستم گاززدایی و جلوگیری از بسته شدن گمانه‌ها، یک لوله قائم فولادی یا پلاستیکی با بیش از ۱۰ متر طول می‌تواند در ابتدای گمانه قرار گرفته و محکم شود.

بدلیل ارتباط سیستم گاززدایی با سیستم تهویه و عملیات استخراج ارائه مدیریتی هماهنگ (با استفاده از ابزارها، رفتارسنجی، کنترل و ارتباطات خوب) برای بهینه‌سازی هر سه تابع مهم است.

در این روش محدوده بهره‌وری بین ۲۰ تا ۷۰ درصد است. معمولاً کمترین کیفیت گاز بدلیل تعداد گمانه‌های حفاری شده و هدایت جریان بین گمانه‌ها و سیستم تهویه در این سیستم است. جریان معمولی از یک گمانه منحصر بفرد، ۸۱۵ متر مکعب در روز است، اما گاهی اوقات می‌تواند تا ۴۰۰۰ متر مکعب در روز برای گمانه‌های عمیق‌تر برسد.

ج) روش‌های گمانه‌های فوقانی

روش‌های گمانه‌های فوقانی با ایجاد منطقه‌ای کم فشار در لایه بلافاصله بالای منطقه تخریب و گاهی اوقات زیر آن باعث جلوگیری از انتقال گاز منطقه تخریب به جبهه کار می‌شود. مناطق کم فشار با استفاده از راهروهای موجود یا حفاری جهتدار گروهی از گمانه‌ها شکل گیرد. کاربرد گاززدایی منطقه تخریب با استفاده از روش‌های گمانه‌های فوقانی در مناطقی است که گمانه‌های منطقه تخریب حفاری شده از سطح زمین نمی‌تواند اجرا شود، همچنین این روش جایگزینی کارا از لحاظ هزینه‌ای برای گمانه‌های تقاطعی است. این روش در بعضی از عملیات استخراج عمیق و گازدار در اروپا شرقی و روسیه استفاده می‌شود. این روش در لایه‌های زغال‌سنگی خیلی گازدار در معادن فرانسه و آلمان در اواخر دهه ۱۹۴۰ اجرا شد.

در این روش‌ها یک گالری ۲۰ تا ۳۵ متر بالای لایه‌ای که باید استخراج شود، حفر می‌شود. اگر گالری در یک لایه زغال‌سنگ ایجاد شود یا از قبل وجود داشته باشد، هزینه‌های پیشروی تا حدی جبران می‌شود و

این روش اقتصادی تر خواهد بود. این گالری کاملاً بسته شده و بطور مستقیم به یک سیستم جمع‌آوری گاز تحت خلا، متصل می‌شود و حفره‌ای کم فشار برای انتقال گاز ایجاد می‌کند. گمانه‌های کوتاه با قطر کم می‌توانند در اطراف لایه گازدار از گالری موجود برای بهبود انتقال گاز حفاری شوند. شکل ۲-۲۱ استفاده از این روش را نشان می‌دهد. در طول دو دهه گذشته، روش‌های گمانه‌های فوقانی که از گمانه‌های جهتدار در داخل معدن در بالا یا زیر لایه زغال‌سنگ قبل از عملیات جبهه‌کار طولانی استفاده می‌کند، در ژاپن، چین، استرالیا، آلمان و آمریکا بکار رفته است. این روش از تجهیزات حفاری جهتدار داخل معدن که معمولاً برای گمانه‌های گاززدایی طولانی استفاده می‌شود، استفاده می‌کند.

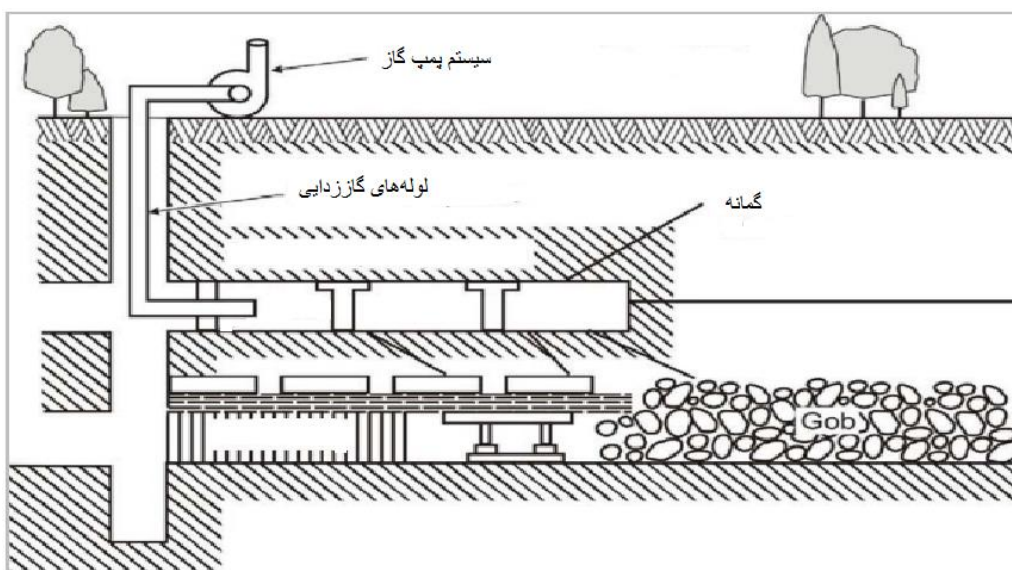
در حالت ایده‌آل، برای موقعیت‌یابی گمانه‌های حفاری شده از لایه‌های رویی باید تا حد امکان فاکتورهای زیر را در نظر گرفت.

حفاری در منطقه‌ای با کمترین میزان تولید

حفاری در طول منطقه کشش نزدیک لبه‌های اطراف پنل

حفاری در مناطق کم فشار با ارتفاع بالا در منطقه تخریب برای استفاده از الگوهای انتقال گاز منطقه تخریب ناشی از سیستم تهویه معدن و هندسه منطقه تخریب

مکان بهینه گمانه‌های قائم معمولاً با آزمون و خطا تعیین می‌شود و به رفتارسنجی مناسب جریان و کیفیت گاز، تولید جبهه‌کار و کنترل خلا در سرگمانه نیاز دارد.



شکل ۲-۲۱- گاززدایی از منطقه تخریب با استفاده از روش گمانه های فوقانی (Ojha et al., 2011)

مزایای روش گمانه های فوقانی نسبت به روش تقاطعی (Ojha et al., 2011)

گمانه‌ها می‌توانند قبل از استخراج و دور از فعالیت استخراج برای سیستم‌های پیشرو یا پسرو حفاری شوند. گمانه‌های طولانی و با تعداد کمتر می‌توانند منطقه کم فشار موثری در طول منطقه تخریب تولید کنند. مکان استراتژیک ممکن است باعث حفظ گمانه از توزیع تنش محلی و تولیدی بودن آنها حین استخراج شود.

سیستم ممکن است خیلی موثر، کم هزینه و از یک سیستم گمانه تقاطعی ساده‌تر باشد.

نسبت به یک سیستم با استفاده از گالری، هزینه اجرای گمانه‌های افقی منطقه تخریب بخصوص اگر گالری-ها فقط برای گاززدایی و در سنگ یا لایه‌های زغال‌سنگی غیر اقتصادی حفر شده باشند، کمتر خواهد بود. حجم انتشار گاز از منطقه تخریب، تعداد گمانه‌های لازم برای پنل را تعیین می‌کند. حداقل سه گمانه در هر پنل برای جذب گاز کافی لازم به نظر می‌رسد. گمانه‌های کوتاه انحرافی می‌تواند از گمانه‌های اصلی برای توسعه منطقه کاهش فشار بالای منطقه تخریب حفاری شود.

همانند گمانه‌های تقاطعی، توسعه منطقه کم فشار پیوسته در بالای منطقه تخریب برای گاززدایی با روش گمانه‌های فوقانی به همپوشانی اندک ناحیه تاثیر هر گمانه نیاز دارد. اگر فاصله‌داری گمانه‌ها زیاد باشد، گازهای منطقه تخریب تمایل دارند که به راهروهای معدن منتقل شوند و اگر گمانه‌ها نزدیک یکدیگر حفاری شوند، هوای تهویه معدن به سمت منطقه تخریب منتقل می‌شوند. گمانه‌های کمتر با فاصله‌داری بیشتر و قطر بزرگتر ممکن است که در فشارهای پایین گاز بیشتری از گمانه‌های کوچکتر با فاصله‌داری کمتر بازیابی کنند. هزینه اضافی در حفاری گمانه‌های با قطر بزرگتر که حتی ممکن است تجهیزاتی متفاوت یا گالری بزرگتری نیاز داشته باشد، باید در برابر سود بیشتر ناشی از تولید بیشتر و کیفیت گاز بهتر سنجیده شود.

کارایی گاززدایی منطقه تخریب و کیفیت گاز برای سیستم‌های گمانه‌های فوقانی بوسیله شرایط زمین-شناسی و مخزن، جهت‌یابی گالری‌ها و گمانه‌ها، اندازه و فاصله‌داری گمانه، کنترل مکش، جمع‌آوری آب و تهویه معدن تحت تاثیر قرار می‌گیرد. حفاری گمانه‌های فوقانی از لحاظ فنی پیچیده‌تر از حفاری درون‌لایه است و این در هزینه‌های حفاری بالاتر از ۱۰۰ تا ۱۳۰ دلار در هر متر منعکس می‌شود.

۸-۲- پیشینه مطالعات

در زمینه‌ی گاززدایی از معادن زغال‌سنگ تحقیقات زیادی در گذشته انجام شده و روی موضوعاتی در زمینه‌ی مدل‌سازی با نرم افزار کامسول و دیگر نرم افزارها، برآورد میزان گاز با شبکه‌های عصبی، فرمول‌های تجربی و... کار شده است. برخی از مهم‌ترین مطالعات انجام‌شده پیشین در این زمینه‌ها مورد مطالعه قرار گرفته‌اند که خلاصه‌ای از کارهای انجام‌شده در جدول ۲-۳ آورده شده است.

جدول ۲-۳- خلاصه‌ای از مطالعات انجام‌شده در ارتباط با موضوع مورد مطالعه

مؤلف سال انتشار	شرح کار مطالعه	خلاصه ی یافته ها
Lawall and morris ۱۹۳۴	لاوال و موریس از اولین اقدامات در زمینه حفاری گمانه‌های قائم و افقی به طول ۴/۶ تا ۳۱/۱ متر در داخل لایه‌های زغال‌سنگی شماره ۴ پوکاهونتاس در ایالت ویرجینیای غربی آمریکا گزارش کردند.	میزان گاز خارج‌شده 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.
Venter and Stassen ۱۹۵۳	اواخر دهه ۱۸۰۰ به‌طور موفقیت‌آمیز از گمانه‌های تقاطعی به منظور متان زدایی از لایه‌های دربرگیرنده زغال‌سنگ در ولز شمالی 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 زغال‌سنگی روهر آلمان حاصل شده است.
Vinson et al. ۱۹۷۸	اداره معادن وجود و حضور ذخایر متان در حفره‌های سقف معدن با استفاده از مدل معدنی تمام مقیاس را بررسی می‌کند.	تمرکز متان در ۲۸ نقطه نمونه از کاواک‌ها با استفاده از ۲۱ ترکیب مختلف از نرخ پراکندگی گاز و سرعت هوا اندازه‌گیری شد و تشخیص داده شد که نرخ تهویه مؤثر با افزایش سرعت هوا افزایش می‌یابد.
Stenborg ۱۹۹۴	با گذشت ۱۰ ماه از انجام عملیات متان زدایی تولید متان از گمانه‌ها کاهش یافت ازاین‌رو 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 شد که چندان موفقیت‌آمیز نبود. در سال ۱۹۵۹ روش شکافت هیدرولیکی در منطقه زغال‌سنگی سویکلی 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.

ادامه جدول ۲-۳- خلاصه‌ای از مطالعات انجام‌شده در ارتباط با موضوع مورد مطالعه

مؤلف سال انتشار	شرح کار مطالعه	خلاصه ی یافته ها
Alekseev et al. ۲۰۰۳	قزاقستان یکی از اصلی‌ترین تولیدکنندگان زغال‌سنگ در آسیای مرکزی است. بیشتر از ۷۰ درصد انرژی مورد نیاز در بخش خانگی این کشور از زغال‌سنگ تأمین می‌شود.	بر طبق بررسی‌های انجام‌شده میزان تولید زغال‌سنگ در این کشور بین سال‌های ۱۹۹۹ تا ۲۰۰۲ بین ۵۸ تا ۸۱ میلیون تن بوده است.
Schultz ۲۰۰۳	بیشترین فعالیت‌های متان زدایی در کشور روسیه در حوضه‌های کوزباس و پچورا 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 ازاینرو بیشتر تحقیقات در این حوضه در حال انجام است.
Aminian et al. ۲۰۰۴	بررسی زغال‌سنگ‌های حوزه آپالاچی شمالی آمریکا و بررسی امکان‌سنجی گاز زدایی متان از این منطقه و شرایط زمین‌شناسی و پارامترهای تحت تأثیر	پیش‌بینی میزان تولید گاز متان
Ingelson et al. ۲۰۰۶	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. درحالی‌که پیش‌بینی‌شده است تا سال ۲۰۱۴ حدود ۱۲ درصد تولیدات و تا سال ۲۰۲۵ تقریباً ۵۰ درصد کل بازار تولید گاز طبیعی به CBM اختصاص یابد.
Karacan et al. ۲۰۰۷	یک تکنیک رایج برای کنترل انتشار متان در معادن جبهه کار طولانی، حفاری گمانه‌های عمودی داخل هر یک از پانل‌های جبهه کار برای گرفتن متان از لایه‌های شکست‌خورده قبل از ورود به محیط است.	بهینه‌سازی پارامترهای گمانه، قطر گمانه و طول و موقعیت فواصل پوشش‌های شکاف دار مربوط به مناطق حمل گاز در شکست‌ها مهم است.

ادامه جدول ۲-۳- خلاصه‌ای از مطالعات انجام شده در ارتباط با موضوع مورد مطالعه

مؤلف سال انتشار	شرح کار مطالعه	خلاصه ی یافته ها
Haijun ۲۰۰۹	چین بزرگ‌ترین تولیدکننده و مصرف‌کننده زغال‌سنگ 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.
Karacan ۲۰۰۹	بررسی معدن پیتسبورگ در بخش جنوب غربی پنسیلوانیا و تعیین عوامل موثر در تولید گاز متان از چال‌های گاززدایی	تعیین پارامترهای حفاری، محل گمانه، میزان ایجاد خلأ در گمانه مکش و نرخ استخراج
Sang Shu-xun et al. ۲۰۰۹	بررسی گاز زدایی معدن کویینشو جنوبی چین	بررسی تمامی پارامترهای زمین‌شناسی بر محل گمانه‌های گاز زدایی و میزان تولید آن‌ها
Wang Zhao feng et al. ۲۰۰۹	بررسی عوامل مؤثر بر میزان گاز زدایی و فاصله میان گمانه‌ها، قطر گمانه مکش	میزان ایجاد خلأ در گمانه مکش و مدت‌زمان گاز زدایی برای بهینه‌سازی گاز زدایی
Yang Wei et al. ۲۰۰۹	تحلیل عددی و تئوریکی بر روی مکانیزم آزادسازی استرس و محدودیت‌های حفاری گمانه‌های گاز زدایی	شناسایی مکان‌هایی با احتمال تخریب بالا در گمانه‌های گاز زدایی
Palmer ۲۰۱۰	امروزه با توجه به اهمیت گاز طبیعی، دولت هند سرمایه‌گذاری وسیعی در زمینه گاز CBM انجام داده 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 ۱۰۰۰۰ مترمکعب گاز افزایش خواهد یافت.

ادامه جدول ۲-۳- خلاصه‌ای از مطالعات انجام شده در ارتباط با موضوع مورد مطالعه

مؤلف سال انتشار	شرح کار مطالعه	خلاصه ی یافته ها
Aziz et al. ۲۰۱۱	آزمایش‌هایی بر روی نمونه‌های زغال سنگ معادن استرالیا	تأثیر متان بر میزان ایمنی معادن و سیستم تهویه معدن و افزایش ایمنی با استفاده از گاز زدایی و استفاده از نتایج در معادن دیگر کشورها
Black et al. ۲۰۱۱	بررسی لایه زغال‌سنگی بولی استرالیا	تأثیر عوامل زمین‌شناسی و عملیاتی بر گاز زدایی متان از زغال‌سنگ
Gang et al. ۲۰۱۱	مدل‌سازی سینه کار استخراجی شماره ۴ معدن زغال‌سنگ شاگو چین	محاسبه مدت‌زمان لازم برای انتشار متان و جمع‌آوری آن از سطح سینه کار زغال- سنگ با نرم‌افزار Matlab
Hao-ran et al. ۲۰۱۱	شبیه‌سازی تزریق هوا با فشار بالا به لایه زغال‌سنگ	افزایش نرخ تولید گاز متان بر اثر تزریق هوا به لایه زغال‌سنگی، باز شدن بیشتر شکستگی‌ها و ریز درزه‌ها بر اثر افزایش فشار هوای تزریقی به لایه با نرم‌افزار Comsol
Jiang et al. ۲۰۱۱	بررسی میزان گاز جمع‌آوری شده از معدن چنگ ژوانگ چین و بررسی گاز زدایی برای ۵سال	تهیه مدل برای پیش‌بینی آینده گاز متان این معدن
Karacan et al. ۲۰۱۱	ارتباط میزان انتشار متان با فعالیت‌های معدنی و میزان تهویه معدن	افزایش ایمنی، تولید انرژی و کاهش انتشار گاز گلخانه‌ای با گاز زدایی متان
Lian ۲۰۱۱	بررسی پارامترهای حفاری گمانه‌های گاز زدایی و اهمیت تعیین میزان تمایل و شیب گمانه‌های گاز زدایی و مدیریت و نظارت بر نوع حفاری و قطر و شیب گمانه‌ها	بهبود سیستم گاز زدایی

ادامه جدول ۲-۳- خلاصه‌ای از مطالعات انجام شده در ارتباط با موضوع مورد مطالعه

مؤلف سال انتشار	شرح کار مطالعه	خلاصه ی یافته ها
Shirin et al. ۲۰۱۱	بررسی تکنولوژی استفاده شده گاز زدایی در معادن زغال سنگ اوکراین	مطالعه ساختار گمانه‌های گاز زدایی، مکانیسم آبکشی گمانه‌ها و تجهیزات حفاری و استفاده در دیگر کشورها
Song et al. ۲۰۱۱	شبیه‌سازی میزان نفوذپذیری و میزان افت فشار در نزدیکی گمانه مکش گاز	بررسی تأثیر پارامترهای مختلف بر نرخ تولید گاز متان با نرم‌افزار Ansys
Yanwei et al. ۲۰۱۱	مدل‌سازی گمانه گاز زدایی متان از زغال سنگ	کاهش فاصله مابین گمانه‌های گاز زدایی در مناطق دارای ساختار پیچیده زمین‌شناسی برای کاهش پتانسیل انفجار و محاسبه میزان شعاع نفوذ مؤثر در گمانه‌ها
Xinfeng ۲۰۱۱	مدل‌سازی سه‌بعدی از سیستم گاز زدایی	مشاهده بهتری از سیستم گاز زدایی بر اثر توانایی در سه‌بعدی دیدن و چرخاندن مدل با نرم‌افزار 3D-MAX
Zhang et al. ۲۰۱۱	بررسی پارامترهای جذب گاز توسط زغال سنگ	تغییر در جذب گاز در صورت تغییر دمای محیط، کاهش کشش سطحی نمونه‌ها با افزایش دما
Zhang et al. ۲۰۱۱	بررسی گاز زدایی متان از گمانه‌های منطقه تخریب	کشف اینکه بهترین عمق حفر گمانه در منطقه تخریب حدود 30 متری بالای لایه زغال سنگی است.
Zhou et al. ۲۰۱۲	بررسی یک مدل شبیه‌سازی جریان گاز در معدن ناشی از سه نمونه شبکه شکاف مربوط به موقعیت نفوذپذیری پایین لایه زغال سنگ را با استفاده از نرم‌افزار کامسول	رسم ایزوگرام های فشار گاز در زمان‌های مختلف

ادامه جدول ۲-۳- خلاصه‌ای از مطالعات انجام شده در ارتباط با موضوع مورد مطالعه

مؤلف سال انتشار	شرح کار مطالعه	خلاصه ی یافته ها
Najafi et al. ۲۰۱۲	بررسی زغال سنگ های ایران از نظر گازخیزی	امکان سنجی گاززدایی در زغال های ایران
Qing et al. ۲۰۱۲	بررسی معدن ژائو گژانگ چین و بررسی رفتار گاز متان در سیستم گاز زدایی با استفاده از نظریه گراف	بهینه سازی میزان گاز زدایی
Tian-xuan et al. ۲۰۱۲	شبیه سازی میزان گاز در منطقه تخریب	تخمین میزان عمق گمانه ها در منطقه تخریب و فاصله میان این گمانه ها با نرم افزار RFPA2D
Yang et al. ۲۰۱۲	مدل سازی میزان فشار در اطراف گمانه گاز زدایی	کاهش میزان نفوذپذیری دیواره گمانه گاز زدایی بر اثر افزایش فشار دیواره در نرم افزار E-Clipse300
Janoszek et al. ۲۰۱۳	جریان گاز در عملیات گازکشی معادن زغال سنگ زیرزمینی و اثر متقابل آن بر توده سنگ های اطراف توسط نرم افزار Fluent آنالیز می شود	محاسبات عددی با داده های آزمایشگاهی مقایسه می شود.
Prostanski et al. ۲۰۱۳	سیستم پاشیدن آب و هوا را برای جلوگیری از انفجار متان در معادن جبهه کار طولانی را توضیح می دهد.	جلوگیری از انفجار متان
Quan-wei et al. ۲۰۱۳	شبیه سازی منطقه تخریب در جبهه کار طولانی	محاسبه فاصله عمودی محل اکسایش در منطقه تخریب و محاسبه عمق گمانه های گاز زدایی با نرم افزار Fluent
Durucan et al. ۲۰۱۴	بررسی دو فاز آب و گاز درون لایه زغال- سنگی و انجام آزمایش های مختلف بر روی زغال سنگ و تأثیر فاکتورهای مختلف بر روی نفوذپذیری زغال سنگ و جریان آب و گاز درون زغال سنگ	پیش بینی میزان ذخیره دی اکسید کربن در زغال سنگ

ادامه جدول ۲-۳- خلاصه‌ای از مطالعات انجام‌شده در ارتباط با موضوع مورد مطالعه

مؤلف سال انتشار	شرح کار مطالعه	خلاصه ی یافته ها
Liu et al. ۲۰۱۴	بررسی متان لایه زغال‌سنگ در چین و ارائه پیشنهادهایی برای افزایش میزان گاز زدایی	نگاه جدی‌تر به مسائل و مشکلات ناشی از متان لایه زغال‌سنگ
Shi et al. ۲۰۱۴	قیاس عمقی ۴ مدل نفوذپذیری، مدل پالمر و منصوری (P&M)، مدل شی و دوراکان (S&D)، مدل چی و باستین (C&B) و مدل پیشرفته P&M، تحت موقعیت‌های کرنش یک محوری غالب در مخازن لایه زغال‌سنگ با تمرکز بر روی نفوذ نسبی انقباض ماتریس در هر مدل صورت گرفت.	نسبت ضریب‌های دو رابطه بر بزرگی فشار ضربه برگشت نفوذپذیری یک اثر مستقیمی دارد، که یک پارامتر کلیدی کنترل‌کننده واکنش مدل‌سازی شده نفوذپذیری لایه زغال‌سنگ به افت مخزن است. ناتوانایی مدل‌های C&B و P&M برای توصیف داده‌های نفوذپذیری آزمایشگاهی کسب شده که طبق شرایط میدانی شبیه‌سازی‌شده در مقایسه با عملکرد مدل S&D است، نشان می‌دهد که واکنش نفوذپذیری مخازن لایه زغال‌سنگ به فرسایش فشار روزنه به‌طور برجسته توسط تنش افقی مؤثر کنترل می‌شود، تا متوسط تنش مؤثر
Krause ۲۰۱۵	آزمایش‌ها در آزمایشگاهی در لهستان انجام‌شده است (معدن آزمایشگاهی) و حوادث پیش‌آمده و ریسک موجود و آنالیز و ارزیابی حوادث بحرانی حین آزمایش‌های گازکشی زغال‌سنگ بررسی می‌شود.	انفجارات احتمالی ممکن در گالری را نشان می‌دهد.
Yao et al. ۲۰۱۶	اهمیت مهندسی برای مطالعه‌ی قوانین انتقال گاز در لایه‌های زغال‌سنگی حفاظت‌شده	تهیه کردن مرجع مهم برای کنترل زغال‌سنگ و انفجار گاز در معادن عمیق چین را توضیح می‌دهد.

ادامه جدول ۲-۳- خلاصه‌ای از مطالعات انجام شده در ارتباط با موضوع مورد مطالعه

مؤلف سال انتشار	شرح کار مطالعه	خلاصه ی یافته ها
Li et al. ۲۰۱۶	نتایج آزمایشی نشان می‌دهد که روش‌های شکافت هیدرولیکی تکراری و شکافت هیدرولیکی هدایتی برای افزایش نفوذپذیری لایه نازک معدن زغال‌سنگ نرم مناسب‌تر است تا روش شکافت هیدرولیکی معمولی	توانایی استخراج گاز با روش شکافت هیدرولیکی تکراری بهتر از شکافت هیدرولیکی هدایتی است.
Liu et al. ۲۰۱۶	شبیه‌سازی عددی جریان گاز در مخازن گاز ناحیه تخریب و ارزیابی در محل گازکشی با گمانه انجام می‌شود	مکانیزم کنترل جریان گاز ناحیه تخریب با گاز کشی گمانه بررسی می‌شود.
Panda et al. ۲۰۱۶	تحقیقات آزمایشی روی یک مدل کاملاً شفاف از یک گالری معدن زیرزمینی را نشان می‌دهد	بر روی حفاری هیدرولیکی بحث می‌کند.
Taheri, Sereshki ۲۰۱۶	جریان گاز متان در بلوک زغال سنگ را به منظور محاسبه فشار گاز و سرعت مولکولی برای عملیات گازکشی متان را بررسی می‌کند.	حرکت مولکول‌های مایع و گاز در نمونه زغال‌سنگ با تخلخل متوسط توسط نرم‌افزار کامسول شبیه‌سازی می‌شود.
Tao et al. ۲۰۱۶	ساخت مدل زغال سنگی با استفاده از کامسول	یک مدل زغال‌سنگ نفوذپذیر متشکل از خلل و فرج و زمینه‌ی استرس با استفاده از نرم‌افزار کامسول ساخته شده است.
Thakur ۲۰۱۶	شرح مختصری از حوضه‌های مهم زغال سنگ با برآورد ذخیره CBM ارائه شده است. لیست شامل حوضه‌های زغال‌سنگ ایالت‌های متحده امریکا، کانادای غربی، بریتانیا، فرانسه، آلمان، لهستان، جمهوری چک، اوکراین، روسیه، چین، استرالیا، هند، و آفریقای جنوبی است. این کشورها ۹۰٪ از زغال‌سنگ جهان و تقریباً ۱۰٪ از تمام محصولات CBM را تولید می‌کنند. محدوده اقتصادی عمق برای استخراج معدن حدود ۳۰۰۰ فوت است، فقط حدود ۱ تن از زغال‌سنگ استخراج می‌شود.	حفاری عمودی با شکافت هیدرولیکی (یک کی از تکنیک مرسوم تولید گاز و نفت) روش عمده بکار برده شده برای استخراج گاز در حال حاضر است. به دلیل کاهش جدی در نفوذپذیری، استخراج فقط در ۳۰۰۰ تا ۳۵۰۰۰ فوت صورت می‌گیرد. یک روش جدیدی که به‌طور برجسته در شیل‌های ضخیم و عمیق دوران دونین موفق بوده است به تولید CBM از افق‌های عمیق‌تر اختصاص داده می‌شود. بالاخره، مخزن CBM با مخازن معمولی مقایسه می‌شود.

ادامه جدول ۲-۳- خلاصه‌ای از مطالعات انجام شده در ارتباط با موضوع مورد مطالعه

مؤلف سال انتشار	شرح کار مطالعه	خلاصه ی یافته ها
Adamczewski et al. ۲۰۱۷	یک ردیاب پیشرفته برای تشخیص متان لایه زغال- سنگ غنی شده ارائه می دهد.	در مورد ردیاب‌های شناسایی متان لایه زغال سنگ که با صفحات بازخوانی الکترونیکی کار می کنند توضیح می دهد.
Cheng et al. ۲۰۱۷	تأثیر پارامترهای توزیع اندازه‌ی منافذ و اشباع فشار مویرگی روی تخمین تجزیه کربن بررسی می شود.	تأثیر پارامترهای توزیع اندازه‌ی منافذ
Lan et al. ۲۰۱۷	یک روش با استفاده از مدل دینامیک سیالات کامپیوتری چند متغیره را ارائه می دهد.	مطالعه حرکت گرد زغال سنگ در گمانه متان لایه زغال سنگ
Shi et al. ۲۰۱۷	یک فرایند تحلیل سلسله مراتبی پیشرفته (IAHP) برای بررسی فاکتورهای کمی تأثیرگذار انفجار متان توسعه یافت. IAHP توسط داده‌های آماری معتبر شناخته شد، مزایای آن در کاهش اثرات نشان داده شد.	هم نتایج IAHP و هم داده‌های آماری نشان داد که جرقه الکتریکی، انفجار و جرقه اصطکاک منبع عمده اشتعال محسوب می شوند. عملیات انفجار، فرآیند حفاری، خرج منفجره و فرآیند کشف گاز حاکی از بیشترین وزن تأثیرگذار بر انفجار متان است.
Liu et al. ۲۰۱۷	ارتباط بین پارامترهای فیزیکی لایه زغال سنگ و ضرایب کاهش فشار با نوعی مدل اثر متقابل گمانه دوطرفه را بررسی کرده	نشان می دهد که ضرایب کاهش فشار به طور قطعی با نفوذپذیری زغال سنگ در ناحیه‌ی متخلخل مرتبط هستند.
Walters ۲۰۱۷	ارتباط بین عناصر زمین شناسی و غنی سازی CBM بررسی شد و نشان داده شد که CBM در نواحی که سنگ های رسوبی زیاد توزیع شده اند بیشتر است. در نهایت سه نوع مخزن گاز (مخزن CBM ساندویچی، مخزن گاز CBM وابسته به ماسه سنگ و مخزن گاز زغال سنگ استخراج شده از ماسه سنگ) بر اساس وضعیت ارتباطات بین عناصر CBM لایه های شیلی تشخیص داده شده	پیشنهاد می شود که اکتشافات از شناسایی ساده ی CBM به اکتشاف سه بعدی CBM تغییر یابد.
Wang et al. ۲۰۱۷	تأثیر عمق گمانه حفر شده در لایه زغال سنگ روی زمان لازم برای تعیین فشار گاز و ارزش آن بررسی شد	با استفاده از نرم افزار کامسول دامنه ی جریان گاز گمانه های حفاری شده در اعماق مختلف لایه ی زغال سنگ شبیه سازی شد.
Ni et al. ۲۰۱۷	فرآیند جریان CBM در حفره های بزرگ توسط نرم افزار کامسول شبیه سازی شد	توزیع ساده ی فشار و سرعت نشان داده شد

مؤلف سال انتشار	شرح کار مطالعه	خلاصه ی یافته ها
Zhou, Liang ۲۰۱۷	شبیه‌سازی سیستم تولید متان محبوس در زغال سنگ و پیش‌بینی آزادسازی آن، افت فشار گمانه، شبیه‌سازی شبکه خط لوله سطح و مدل محاسبه مخزن CBM را توضیح می‌دهد. یک ساختار محاسبه سطح/گمانه/مخزن ارائه شد تا تولید گاز را در هر دوره محاسبه تا زمان بالانس مخزن/گمانه/سطح را استخراج کند.	در ابتدا تولید روزانه گاز به‌صورت سال به سال افزایش می‌یابد و سپس به‌تدریج پس از چند سال کاهش می‌یابد. درحالی‌که تولید آب روزانه در همه زمان‌ها با افت فشار تشکیل، کاهش می‌یابد. یک الگوریتم شبیه‌سازی جفت‌شدگی سطح/گمانه/مخزن را توصیف می‌کند که می‌تواند برای پیش‌بینی تولید گاز در یک دوره زمانی مفید باشد. روش گره برای شبیه‌سازی سیستم سطح استفاده می‌شود. محاسبه‌های ترمودینامیک و هیدرولیک به‌همدیگر همراه شده‌اند تا محاسبه انجام شود. CBM BHFP نشان می‌دهد که ترکیب روش تحلیلی و روش ضریب انحراف میانگین دمای میانگین می‌تواند دقت نسبتاً بالایی را فراهم کند. مزایا و معایب مدل‌های ترکیبی مختلف به‌خوبی فهرست شده‌اند. پیش‌بینی تولید CBM مبتنی بر بالانس مواد است.
Wu et al. ۲۰۱۸	در مورد اهمیت ارزیابی و پارامترهای بهینه‌سازی شکست توضیح می‌دهد.	یک مدل نفوذپذیری غیرخطی گاز-آب از گمانه‌های شکست را ارائه می‌دهد.
Sun et al. ۲۰۱۸	با ترکیب رابطه اشباع فشار برای اولین بار معادلات تعادل جریان ماده (FMB)، اصلاح شده که به‌عنوان ابزار مهندسی برای استخراج اطلاعات مخزن بر طبق عملکرد تولید گمانه‌های تولیدی استفاده می‌شود.	می‌تواند به عنوان ابزاری عملی و قوی برای استخراج اطلاعات ارزشمند، با توجه به نفوذپذیری پایین مخازن CBM به کار رود.
Yue et al. ۲۰۱۹	پی بردند که مقادیر برجای زیرزمینی، یک خصوصیت ناهمسانگردی شعاع تاثیر گمانه ناشی از لایه‌ی زغال سنگ و ریز درزه‌های زغال سنگ را نشان می‌دهد	شعاع تاثیر گمانه ناشی از لایه‌ی زغال سنگ و ریز درزه‌های زغال سنگ
Wang et al. ۲۰۱۹	ثابت کردند که در نفوذپذیری پایین و لایه‌های نرم زغال سنگ، گمانه‌ها اکثر مواقع توسط رئولوژی زغال سنگ متوقف می‌شوند.	این امر باعث کاهش جریان و غلظت گاز می‌شود. در نتیجه، لازم است که گام‌هایی طی شوند تا به‌صورت مصنوعی نفوذپذیری لایه‌های زغال سنگ بالا روند؛ برای مثال روش آب شکنی

ادامه جدول ۲-۳- خلاصه‌ای از مطالعات انجام شده در ارتباط با موضوع مورد مطالعه

مؤلف سال انتشار	شرح کار مطالعه	خلاصه ی یافته ها
Bai et al. ۲۰۲۱	بسیاری از مواردی را آنالیز کردند که در آن‌ها به علت تاخیر گسل، آب فوران سریع داشته بود.	به این نتیجه رسیدند که تحول فوران آب زیرزمینی را می‌توان به دو مرحله تقسیم کرد.
Li et al. ۲۰۲۱	نشان دادند که روند داینامیک تحول زغال سنگ متان تخت را می‌توان به چند مرحله تقسیم کرد.	نشان دادند که روند داینامیک تحول زغال سنگ متان تخت را می‌توان به شش مرحله تقسیم کرد: مرحله ی تشکیل گاز بیوژنیک نابالغ؛ مرحله ی اصلی تشکیل گاز؛ مرحله ی تشکیل تدریجی گاز؛ مرحله ی دوم تشکیل گاز؛ مرحله ی پراکندگی مطلق تدریجی گاز؛ مرحله ی پراکندگی مطلق سریع گاز
Guo et al. ۲۰۲۱	تأثیر مکان اصلی روزنه ی آب بندی روی گاززدایی آب را مطالعه کردند.	آنها این عمل را از طریق تئوری و شبیه سازی عددی همراه با اندازه گیری در محل انجام دادند تا مشکل کمبود اشباع گاز در مرحله ی قبل از گاززدایی گمانه های معادن زغال سنگ واقع در چین را حل کنند.

۲-۹- جمع بندی و نتیجه گیری

در این فصل به بررسی کارهای انجام گرفته در زمینه گاز زدایی متان از لایه زغال سنگ پرداخته شد و در مورد متان لایه زغال سنگ، گاز زدایی متان از زغال سنگ، مدل سازی و ذخیره سازی گاز در لایه های زمین شناسی، تعدادی از کارهای انجام شده توسط محققین مختلف مورد مطالعه قرار گرفت.

از آنجایی که بحث مدل سازی از موضوعات مهم در مورد شناسایی و به دست آوری اطلاعات مفید در زمینه گاز زدایی است، مورد بررسی بیشتری قرار گرفت. تاکنون پژوهشگران در مورد مدل سازی گاز زدایی متان از زغال

سنگ توسط نرم افزارهای متفاوت فقط به جزئی از حرکت گاز در زغال سنگ اشاره کرده اند و در هرکدام از مدل های ایجاد شده ، فرض های متفاوتی در نظر گرفته شده است که می بایست تمامی آن ها مورد بررسی بیشتر قرار گرفته و برای ایجاد یک مدل واحد ، آن ها را بخش بندی کرده و مورد استفاده قرار داد. Tian و همکاران در سال ۲۰۱۲ تنها به بررسی جریان گاز در منطقه تخریب پرداخته اند در حالی که با استفاده از مدل سازی با نرم افزار کامسول می توان با شبیه سازی سیستم گاز زدایی و جریان گاز گمانه های منطقه گاز زدایی، فاصله میان گمانه ها، فشار گاز زدایی و قطر گمانه ها را در حین عملیات استخراجی نیز تخمین زد و یا Quan و همکاران در سال ۲۰۱۳ تنها به محاسبه عمق گمانه های گاز زدایی با نرم افزار Fluent پرداخته اند، در حالی که محاسبه عمق، قطر و فاصله مناسب گمانه های گاز زدایی از هم توسط نرم افزار کامسول تا بحال انجام نگرفته است. همچنین مطالعه گسترده بر روی سرعت و غلظت گاز درون لایه های زغال سنگ و تأثیر آن ها بر میزان گاز زدایی و در نهایت انتخاب الگوی مناسب حفاری گمانه ها یکی از اهداف محققان به شمار می آید. به این منظور باید تمام پارامترهای مؤثر بر انتخاب الگوی مناسب حفاری گمانه های گاز زدایی بررسی شود که به این منظور در فصل بعدی به نحوه این بررسی پرداخته خواهد شد.

فصل سوم

معدن زغال سنگ طبس

۳-۱- مقدمه

در این فصل معدن زغال سنگ طبس معرفی و میزان گازخیزی و روش استخراج در این معدن بررسی گردید. روش گاززدایی متان لایه‌های زغال سنگ در معدن با استفاده از گمانه های گاززدایی متان و نیز روشی که برای نصب تجهیزات جهت گاززدایی در داخل معدن به کار رفته است مورد بررسی قرار گرفت.

۳-۲- مطالعه ی موردی

معدن پروده I در شمال استان یزد و جنوب استان خراسان رضوی و در فاصله ۷۵ کیلومتری غرب طبس، در مسیر جاده آسفalte طبس-یزد و در رسوبات زغال سنگی ایران مرکزی قرار دارد (معین السادات و رضوی ارمغانی، ۱۳۷۲). زغال سنگ های معدن پروده I از نوع کک شو می باشد که اولین معدن تمام مکانیزه کشور با ظرفیت استخراج ۱/۲ میلیون تن در سال در آن طراحی و در حال حاضر استخراج می شود. زغال سنگ های پروده اغلب از نوع بیتومینه با مواد فرار کم و میزان خاکستر آن بالا و به طور متوسط ۴۰ درصد است (گزارش، ۱۳۷۸).

۳-۲-۱- گازخیزی معدن زغال سنگ پروده طبس

روش استخراج در معدن پروده طبس به شکل مکانیزه است و ابعاد پهنه های استخراجی ۲۲۰ متر در طول بیش از ۱۰۰۰ متر است. ضخامت لایه ها حدوداً بین ۲ متر تا ۲/۵ متر متغیر بوده و شیب لایه ها بین ۱۰ تا ۱۵ درجه است. بر اساس بررسی های انجام شده بر روی لایه های زغال سنگی معدن پروده طبس مشخص شده است که اولاً گازخیزی در ناحیه متانی به سرعت زیاد میشود. به طوری که تا عمق ۳۵۰ متری بطور متوسط از ۱۰ متر مکعب در تن به ۱۴ الی ۱۹ متر مکعب در تن جسم قابل سوخت میرسد و از آن به بعد تا عمق ۷۰۰ متری تغییر چندانی نکرده و بطور متوسط به ۲۰ الی ۲۱ متر مکعب در تن جسم قابل سوخت رسیده است و این مقدار گازخیزی برای زغال سنگ هایی با متامورفیزم متوسط قابل پیش بینی می باشد. ثانیاً تفاوت ماکزیمم و مینیمم گازخیزی در یک عمق مشخص زیاد نیست. مثلاً در عمق ۵۰۰ متری از ۱۶ تا ۲۴ متر مکعب در تن جسم قابل سوخت در نوسان است که این مسئله به دلیل وجود فعالیت کم تکتونیک در

منطقه می‌باشد که این تکتونیک آرام باعث یکنواختی در پخش گازها در اعماق مختلف شده است (برزگر، ۱۳۶۱). به منظور ارزیابی گازخیزی سنگ‌های کمر بالا و کمر پائین لایه‌های زغال‌سنگی نمونه‌هایی گرفته شده است (Taheri et al., 2017). بررسی این نمونه‌ها نشان می‌دهد که اولاً اجزا تشکیل دهنده گاز این سنگها همان اجزا موجود در گازهای لایه‌های زغالی می‌باشد ولی مقدار آنها به مراتب کمتر است که علت آن قابلیت جذب کم سنگها می‌باشد و نیز عمق زون هوازده در لایه‌های سنگی بیشتر از لایه‌های زغالی بوده و از ۹۲ تا ۲۱۸ متر در نوسان است. ثانیاً با توجه به افزایش عمق، گازخیزی سنگها به خصوص شیل‌ها افزایش می‌یابد به طوری که در عمق ۶۷۰ متری به ۶/۹ متر مکعب در تن سنگ می‌رسد که این مقدار گازخیزی با توجه به وسعت و گسترش لایه‌های سنگی عامل مهمی برای ورود گاز به داخل حفریات معدنی خواهد بود. گازخیزی لایه‌های زغال‌سنگ بالا بوده و بطور متوسط به ۲۰ الی ۲۱ متر مکعب در تن جسم قابل سوخت

میرسد. بر اساس نتایج به دست آمده، مقدار متوسط گازخیزی طبیعی نسبت به عمق برای لایه‌های (B2،B1) و (C2،C1،D) به صورت جدول ۳-۱ می‌باشد.

جدول ۳-۱- مقدار متوسط گازخیزی طبیعی لایه‌های مختلف معدن پروده نسبت به عمق (برزگر، ۱۳۶۱)

عمق (متر)	مقدار متوسط گازخیزی لایه‌های (C2،C1،D) (مترمکعب بر تن)	مقدار متوسط گازخیزی لایه‌های (B2،B1) (مترمکعب بر تن)
۱۰۰	۱۰/۲	۱۰/۴
۲۰۰	۱۵/۴	۱۵/۵
۳۰۰	۱۷/۵	۱۸
۴۰۰	۱۸/۸	۱۹/۶
۵۰۰	۱۹/۴	۲۰/۳
۶۰۰	۱۹/۸	۲۰/۷
۷۰۰	۲۰	۲۱

بطوری که در جدول قبل مشاهده می‌شود، گازخیزی با افزایش عمق تغییر می‌کند و الان یکی از مشکلاتی که در معدن طبس وجود دارد گازخیزی است.

۳-۲-۲- روش گاززدایی معدن زغال‌سنگ پروده طبس

روشی که ابتدا برای نصب تجهیزات جهت گاززدایی در داخل معدن به‌کار گرفته شده بود بر اساس روش انگلیسی است. با توجه به مطالعات صورت گرفته این روش کمک شایانی به امر سهولت استخراج زغال‌سنگ نمی‌کند. به همین دلیل طرح به‌صورت کاملاً متفاوت و توسط گروه لهستانی صورت گرفت و تمام تجهیزات روش انگلیسی جمع‌آوری شده است.

به‌منظور انطباق با طراحی معادن مدرن زغال‌سنگ، گازخیزی آن‌ها باید با کنترل تهویه صحیح انجام گیرد. غلظت گاز در این معادن باید کاهش یابد، بنابراین یک وضعیت ایمن برای استخراج معادن زغال‌سنگ وجود خواهد داشت. برای کنترل میزان تصاعد گاز زغال‌سنگ و پیشگیری از انفجار، اقدامات ذیل باید انجام شود (گزارش مجتمع معادن زغال‌سنگ پروده طبس، ۱۳۷۸):

- اقدامات فنی برای جلوگیری از تجمع و انفجار گاز متان در شبکه‌های تونل‌های زیرزمینی
- اقدامات لازم برای شناسایی به‌هنگام وجود گاز متان در معدن
- اقدامات لازم برای حذف عوامل ایجاد جرقه یا شعله
- اقدامات فنی زیر را برای کنترل تجمع گاز متان در شبکه‌های زیرزمینی معادن می‌توان به‌کار برد:
- طراحی سیستم استخراج و سیستم تهویه مناسب
- اولویت استخراج لایه‌های زغال‌سنگی با گازخیزی کم نسبت به لایه‌های زغال‌سنگی با گازخیزی بالا
- حفر گمانه‌های بلند برای گازکشی از لایه‌های زغال‌سنگی
- آتش‌باری ارتعاشی (لرزاننده) البته در صورت نیاز به آتش‌باری

- تخلیه گازهای لایه‌ای

- تهویه موضعی در مناطق کور در شبکه تهویه

- گاززدایی

گاززدایی بهترین روش کنترل انفجار گاز در معادن با گازخیزی بالا است. اساس تمام روش‌های کنترل انفجار گاز، بر مبنای کاهش فشار و مقدار گاز زغال‌سنگ استوار است. انتخاب نوع روش به شرایط محلی و ملاحظات اقتصادی بستگی دارد. میزان نفوذپذیری و زمانی که گاززدایی انجام می‌گیرد، مهم‌ترین پارامترهای تاثیرگذار بر طراحی این روش‌ها است. سایر پارامترهای تاثیرگذار شامل موارد زیر است (گزارش مجتمع

معادن زغال‌سنگ پروده طبس، ۱۳۷۸).

- وضعیت توجیهی گمانه‌ها (موازی یا عمود بر کلیواژهای اصلی)

- وجود آب و روش کنترل جریان آب

- پایدارسازی گمانه‌ها

با توجه به اینکه معادن پروده طبس دارای گازخیزی ۱۵-۲۷ مترمکعب گاز در هر تن زغال‌سنگ می‌باشند، در حال حاضر دارای ۶ فن اصلی در سطح زمین است که ۲ فن آن برای معدن شماره یک در حال استفاده می‌باشند. این معدن بهترین سیستم تهویه معادن ایران را دارا است و پیشرفته‌ترین فن‌های فرعی در کشور نیز در پروده طبس موجود می‌باشد. حد خطر در معادن پروده طبس ۱/۲۵ درصد گاز متان است. با گمانه‌زدن در سمت تخریب و دیواره Tail Gate، گاززدایی انجام گرفته و وقتی معدن ۳۰ درصد گاز داشته باشد، گاز بهینه و مقرون به صرفه‌ای می‌باشد (گزارش مجتمع معادن زغال‌سنگ پروده طبس، ۱۳۷۸).

پس از بررسی‌های به‌عمل آمده بر روی معدن زغال‌سنگ پروده طبس، روش گاززدایی موضعی و یا محلی در امتداد مسیر (Post-Drainage) مناسب تشخیص داده شده و از این روش استفاده می‌گردد. دلایلی که باعث می‌شود در معدن زغال‌سنگ طبس از روش Post-Drainage استفاده شود این است که لایه زغال‌سنگ دارای شیب کم بوده و با پیشروی معدن عمق لایه زغال‌سنگ بیشتر می‌شود. بنابراین گمانه‌زدن از سطح

به دلیل عمق زیاد مقرون به صرفه نمی باشد. یکی دیگر از دلایل استفاده از این روش مشخصات زغال سنگ است که شامل نفوذپذیری کم و جذب سطحی بالای گاز می باشد (گزارش مجتمع معادن زغال سنگ پروده طبس، ۱۳۷۸).

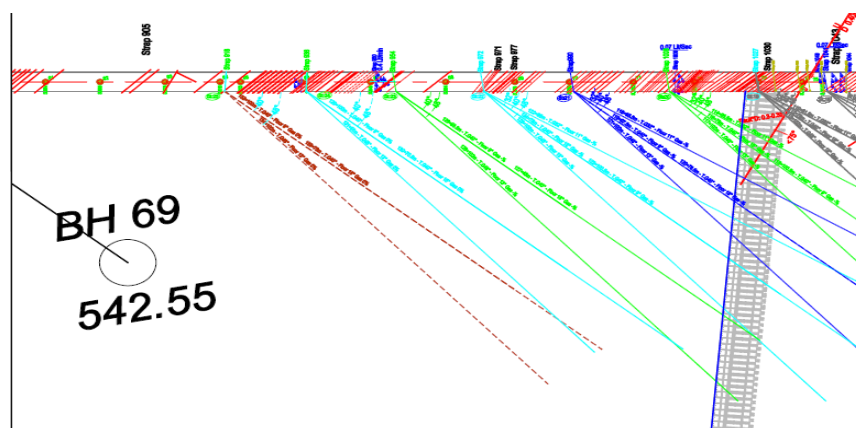
با افزایش عمق استخراج میزان گاز متصاعد شده از لایه ها افزایش خواهد یافت و بنابراین مشکلات ناشی از افزایش گاز در کارگاه نیز افزایش پیدا می کند. از یک عمق بحرانی به بعد عملاً بدون انجام گاززدایی امکان ادامه فعالیت در کارگاه استخراج وجود نخواهد داشت و لذا باید به سمت استفاده از سیستم های گاززدایی از معدن رفت. این موضوع در معدن زغال سنگ پروده طبس از کارگاه E2 به بعد ضروری تشخیص داده شد و این شرکت با استفاده از تجربیات شرکت لهستانی بکر ۱ اقدام به راه اندازی اولین سیستم گاززدایی متان از کارگاه استخراج در ایران نموده است (گزارش مجتمع معادن زغال سنگ پروده طبس، ۱۳۷۸).

شرکت بکر با مطالعه بر روی لایه بندی زمین شناسی و ویژگی های زغال سنگ معدن پروده و محاسبه محتوای گاز متان موجود در زغال سنگ و همچنین تخمین میزان گازی که در حین استخراج به دلیل ایجاد درزه و شکاف و شکستگی از لایه های زغال سنگی در بالا و پایین لایه اصلی (لایه C1) آزاد می شود، ظرفیت لازم را برای سیستم گاززدایی (تعداد گمانه، قطر لازم برای لوله های اصلی گاززدایی و قدرت مکش سیستم مکش از سطح) را محاسبه کرد. شرکت بکر علاوه بر این با بررسی رفتار احتمالی گاز متان در حین استخراج و تخمین مکان های مناسب تجمع گاز متان، ۳ دسته گمانه که هر کدام از دسته گمانه ها دارای پارامترهای نزدیک به هم هستند را در طرح گاززدایی مورد نظر خود برنامه ریزی کرده است که در شکل ۳-۱ آورده شده است (گزارش مجتمع معادن زغال سنگ پروده طبس، ۱۳۷۸).

گروه اول شامل ۶ گمانه با زاویه بین ۲۵ تا ۴۵ درجه نسبت به راهرو برگشت هوا و زاویه ۸ تا ۱۸ درجه نسبت به افق که فضای پشت تخریب را هدف قرار می دهد و از نظر زمان زودتر از سایر دسته گمانه ها به اصطلاح فعال می شود (امکان گاززدایی از آن فراهم می شود) (گزارش مجتمع معادن زغال سنگ پروده طبس، ۱۳۷۸).

گروه دوم شامل ۶ گمانه با زاوایی حدوداً عمود با محور راهرو برگشت هوا و زاویه ۴۰ تا ۴۵ درجه نسبت به افق برنامه‌ریزی شده است. این دسته گمانه‌ها به دلیل اینکه لایه‌های بالاتری را نسبت به دسته اول مورد هدف قرار می‌دهند، دیرتر از دسته اول فعال شده و عملاً باید امکان نگهداری راهرو برگشت هوا (Tail Gate) در پشت منطقه تخریب فراهم باشد تا بعد از عبور کارگاه استخراج از محل این دسته گمانه‌ها امکان گاززدایی از آن‌ها فراهم شود (گزارش مجتمع معادن زغال‌سنگ پروده طبس، ۱۳۷۸).

گروه سوم شامل ۲ گمانه با زاوایی حدود ۴۵ تا ۵۰ درجه نسبت به راهرو برگشت هوا و زاوایی ۴۰ تا ۴۵ درجه نسبت به افق (گمانه در کف راهرو حفر می‌شود) برنامه‌ریزی شده است. این گمانه‌ها به دلیل اینکه جابه‌جایی لایه‌ها و ایجاد درزه و شکاف در زیر لایه زغال‌سنگ استخراجی کمتر بوده و عملاً تاثیر استخراج دیرتر به لایه‌های پایینی می‌رسد، دیر از دو دسته دیگر فعال شده و پس از گذشتن کارگاه استخراج به میزان حدود ۷۰ متر فعال می‌شوند (گزارش مجتمع معادن زغال‌سنگ پروده طبس، ۱۳۷۸).



شکل ۳-۱- مقطع الگوی گمانه زنی (گزارش مجتمع معادن زغال‌سنگ پروده طبس، ۱۳۷۸)

همانطور که از شکل ۳-۱ مشخص است در معدن زغال‌سنگ طبس، گاززدایی از لایه‌های سقف انجام می‌شود و چون برای گاززدایی از داخل لایه برنامه ریزی نشده است، در این پژوهش، گاززدایی داخل لایه و آرایش مناسب گمانه‌ها بررسی گردید.

فصل چهارم مدلسازی و تحلیل نتایج

شبیه‌سازی مخازن گازی ترکیبی از مهندسی مخازن، ریاضیات، فیزیک و برنامه‌نویسی کامپیوتری برای توسعه ابزاری برای پیش‌بینی عملکرد مخازن گازی تحت شرایط عملیاتی مختلف است. هدف از شبیه‌سازی مخازن گازی تعیین توزیع فشار و تولید گاز در طول زمان تحت شرایط ایجاد شده است که معمولاً برای رسیدن به این هدف از معادلات تفاضل محدود استفاده می‌شود. در این فصل با استفاده از نرم افزار کامسول لایه زغال سنگ C₁ معدن پروده طبس به عنوان مخزن گاز طبیعی متان شبیه‌سازی شد و توزیع فشار و نرخ تولید گاز در این معدن تخمین زده شد. نمودارهای مربوط به فشار خروج گاز در حالت دو گمانه و سه گمانه با قطر های متفاوت و نمودار فشار-زمان مربوط به تعداد و قطرهای متفاوت گمانه در هر یک از بخش‌های مدل در این فصل مورد بحث و تحلیل قرار گرفت و در آخر مدل با استفاده از اطلاعات معدن زغال‌سنگ در چین اعتبار سنجی گردید.

۴-۲- معرفی نرم‌افزار کامسول

نرم‌افزار کامسول مولتی فیزیکس^۱ یک مجموعه کامل شبیه‌سازی است که می‌تواند معادلات دیفرانسیل سیستم‌های غیرخطی را توسط مشتق‌های جزئی به روش اجزاء محدود (FEM^۲) در فضاهای یک، دو و سه‌بعدی حل نماید. این نرم‌افزار می‌تواند در حضور چالش‌هایی نظیر میدان‌های الکترومغناطیسی، کشش، دینامیک سیالات و دینامیک گاز به‌خوبی راهگشا باشد. کامسول همچنین فرصتی برای حل مشکل به‌عنوان یک فرمول ریاضی (در فرم معادلات) و فیزیکی (انتخاب مدل فیزیکی، به‌عنوان مثال مدل فرآیند انتشار) را به کاربر می‌دهد. بدیهی است در هر مورد سیستم معادلات حل خواهد شد، تفاوت فقط در امکان استفاده از سیستم‌های فیزیکی و جسمی و واحدهای نهفته است. به اصطلاح حالت فیزیکی، می‌توان از معادلات پیش تعریف شده برای اکثر پدیده‌های انجام گرفته در علوم و فن‌آوری مانند انواع روش‌های انتقال حرارت و برق،

1 Comsol MultiPhysic
2 Finite Element Method

تئوری الاستیسیته، نفوذ مولکولی و انتقال جرم و انتشار، انتشار موج و جریان سیال استفاده کرد (Taheri et al., 2017).

با استفاده از نرم افزار کامسول می توان طراحی و شبیه سازی پروژه های مهندسی برق، مکانیک، علوم زمین، شیمی، فیزیک، نجوم و کوانتوم را انجام داد. همچنین، این برنامه امکان تعامل با نرم افزارهای مهندسی دیگر مانند کتیا ۱ و متلب ۲ را دارد.

این نرم افزار در سال ۱۹۸۶ توسط دانشجویان مؤسسه سلطنتی فن آوری سوئد ایجاد شده است و نام قبلی این نرم افزار FEMLAB بوده است و از سال ۲۰۰۵ به کامسول تغییر نام داده است.

قابلیت های کلیدی نرم افزار کامسول را می توان به صورت زیر بیان کرد (Zhou et al., 2012):

- طراحی و شبیه سازی پروژه های مهندسی برق، مکانیک، علوم زمین، شیمی، فیزیک، نجوم و کوانتوم
- حل معادلات دیفرانسیل سیستم های غیرخطی، توسط مشتق های جزئی روش المان محدود در فضا های یک، دو و سه بعدی
- راهگشای خوبی در حضور چالش هایی نظیر میدان های الکترومغناطیسی، کشش، دینامیک سیالات و دینامیک گاز
- امکان تعامل با نرم افزارهای مهندسی دیگر مانند کتیا و مطلب

قابلیت نصب در سیستم عامل Mac OS و Linux و بر روی ویندوزهای ۳۲ بیتی و ۶۴ بیتی.

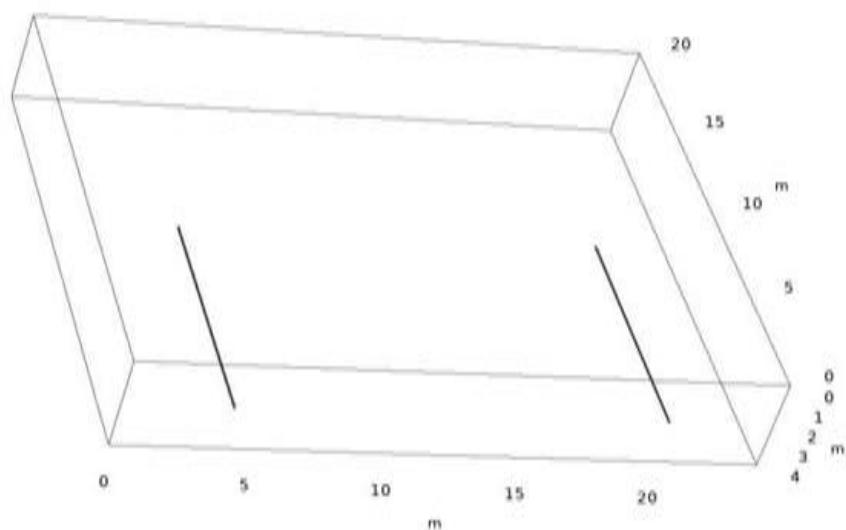
۴-۳- مدل سازی عددی

با توجه به مطالب ارائه شده و با توجه به فرمول ها و معادلات مربوط به حرکت سیال در یک محیط متخلخل و همچنین با استفاده از نتایج حاصل از اطلاعات مربوط به میزان نفوذپذیری، درزه داری، تخلخل،

چگالی و میزان گرانشی دینامیکی زغال سنگ که از اطلاعات مربوط به گزارش معدن زغال سنگ طبس بدست آمده، میتوان حرکت مولکول های گاز متان درون یک بلوک زغال سنگی را مدل سازی نمود.

۴-۳-۱- مدل هندسی و جزئیات آن

برای ایجاد مدل ابتدا میبایست مقادیر هندسی آن را به مدل وارد نمود. بنابراین در این قسمت گمانه هایی که از آنها گاز منتشر می شود را درون بلوک زغال سنگی مدل نموده و فرض میکنیم ابتدا تعداد ۲ گمانه ی گاز زدایی در یک مدل مکعبی وجود دارد و مرزهای مدل بلوکی، بدون شار در نظر گرفته شد یعنی جریانی از مرزها وجود ندارد. با توجه به اطلاعات کسب شده از معدن زغال سنگ طبس، طول بلوک مدل زغال سنگی را ۲۴ متر، عرض را ۲۰ متر، ارتفاع را ۴ متر و عمق نهایی گمانه ی گاز زدایی را ۱۰ متر در نظر گرفته و مدل طبق شکل ۴-۱ طراحی گردید. ابعاد مدل با توجه به شرایط معدن زغال سنگ طبس این مقدار در نظر گرفته شد زیرا طول مدل بلوکی زغال سنگ نباید بیشتر از ۲۴ متر در نظر گرفته شود زیرا ابعاد بیشتر از ۲۴ متر در معدن طبس مشکل حفاری داشته و چون زغال سنگ در معدن طبس خشک است اجازه ی حفاری در طول های بیشتر داده نمی شود. با جانمایی گمانه های بیشتر از طول ۱۰ متر نیز در معدن زغال سنگ طبس، گاز زدایی دشوار گردیده، گرد زغال به داخل گمانه ها آمده و دهانه ی گمانه های گاز زدایی در این شرایط بسته خواهد شد.



شکل ۴-۱- ژئومتری سه بعدی مدل

۴-۳-۲- جنس اجزای تشکیل دهنده

از آنجائی که مشخصات و پارامترهای زغال سنگ درون نرم افزار به صورت پیش فرض نبوده و می بایست مقادیر آن وارد شود بنابراین از نتایج تحقیقات گذشته استفاده نموده و مقادیر نفوذپذیری، تخلخل، چگالی و ویسکوزیته دینامیکی که پارامترهای اصلی در میزان انتشار گاز می باشند به صورت جدول ۴-۱ وارد مدل تهیه شده می شوند (Taheri, 2016؛ Sereshki, 2005).

جدول ۴-۱- پارامترهای موثر در میزان حرکت مولکول‌های گاز (Taheri, 2016; Sereshki, 2005)

پارامتر	مقدار	واحد
نفوذپذیری	2×10^{-2}	دارسی
تخلخل	۰/۴	-
چگالی	۱۳۷۰	kg/m ³
ضریب گرانشی دینامیکی	10^{-4}	Pa×s

۴-۳-۳- محاسبات عددی

برای تشخیص معادله حاکمه در شبیه‌سازی و مدل‌هندسی، مهم است که شبیه‌سازی دقیق انجام شود. در اینجا دو فاز از جریان گاز به درون گمانه مکش گاز وجود دارد. در مرحله اول، متان جذب شده باید از طریق منافذ ریز از ماتریس زغال‌سنگ منتشر شده و به ریز درزه‌ها برسد و در مرحله دوم جریان گاز باید از طریق سیستم ریز درزه‌های طولی و عرضی عبور کرده و بر طبق اختلاف فشار به گمانه گاززدایی برسد. اما در زغال‌سنگ پارامترهایی مانند فشار گاز، آب محتوا، اختلالات ناشی از حفاری، تورم و همچنین انقباض و انبساط ناشی از جذب و واجذب گاز متان در میزان نفوذپذیری تأثیر مستقیم دارد (Zhang et al., 2012). معادلات مختلفی برای تعیین نفوذپذیری لایه زغال‌سنگی برای گاز متان تاکنون محاسبه شده است که فنگ و همکاران آنها را مورد مطالعه قرار داده و در تحقیقات خود از آنها استفاده نموده‌اند (Feng et al., 2012). دارسی معادله جریان سیالی را ارائه داده که تا به امروز یکی از ابزارهای ریاضی استاندارد مهندسی بوده است. اندازه‌گیری نفوذپذیری باید محدود به دبی جریان پایین (گرانرو یا آرام) باشد زیرا جریان‌های آشفته خطا ایجاد می‌کنند. در دبی‌های بالای جریان، معادله دارسی برای توصیف رابطه دبی جریان و افت فشار

نامناسب است. مبنی بر معادلات ذکر شده انتشار متان قوانین دارسی، فیک^۱ و کلینکنبرگ را دنبال می‌کند (Yue et al., 2019). پس هنگام استفاده از نرم‌افزار، قوانین دارسی را انتخاب کردیم.

جریان گاز از منافذ کوچک داخل زغال‌سنگ به ریز درزه‌های آن با هندسه‌ی داده‌شده شبیه‌سازی گردید. در این شبیه‌سازی، از انتقال جرم - انرژی استفاده می‌شود. از تابع چگالی احتمال به عنوان یک روش معادلاتی برای انتشار متان استفاده می‌کنیم (Janoszek et al., 2013). این روش مبتنی بر حل یک معادله مربوط به حرکات یک مخلوط در یک فضای بسته عمل می‌کند. به‌علاوه، مقدار جرم و انرژی ثابت می‌ماند. در این مورد، فرض‌های زیر در هنگام ساخت مدل اعمال شدند:

۱. مدل‌سازی جریان خروج گاز از لایه‌های زغال‌سنگ در حین عملیات استخراجی، به طوری که فقط خود لایه زغال‌سنگ مد نظر است و لایه‌های بالایی زغال‌سنگ در نظر گرفته نشدند.
۲. مکش آب در مدل‌سازی با نرم افزار کامسول در نظر گرفته نشده و فرض بر این است که آب اصلاً وجود ندارد.
۳. دمای محیط در هنگام عملیات گاززدایی ثابت می‌ماند.
۴. ریز درزه‌های زغال‌سنگ مستقیم و بدون پیچ و خم هستند.
۵. با گاززدایی گاز متان، ماتریس زغال‌سنگ دچار انقباض نمی‌شود.

معادله پیوستگی برای یک سیال فاز گازی را می‌توان به صورت زیر نوشت (Crowe et al., 1977).

$$-\left(\frac{1}{r}\right) \left(\frac{\partial}{\partial r}\right) \left[\frac{r P_a}{Z P_a} \vec{v}\right] + \frac{RT}{M} \frac{q_m}{v_{ba}} + \frac{RT}{M} \frac{q_{ai}}{v_{ba}} = \phi_a \frac{\partial}{\partial t} \left[\frac{P_a}{Z P_a}\right] \quad (1)$$

¹ Fick

که در آن: R مقدار ثابت جهانی گازها، Z ضریب تراکم پذیری گاز، M جرم مولکولی (kg/kmol)، T دما (K)، Φ نفوذپذیری، t زمان (s)، Q شدت جریان حجمی سیال (std m³/s) و q_m شدت جریان جرمی است (kg/s).

بر طبق قانون دارسی برای جریان یک شکستگی داریم (Neuman, 1977):

$$\vec{v} = -\left[\frac{K}{\mu}\right] \left(\frac{\partial P_a}{\partial r}\right) \quad (2)$$

که V سرعت و k نفوذ پذیری است (md).

با جای گذاری معادله ۲ در معادله ۱ داریم (Neuman, 1977):

$$\left(\frac{1}{r}\right) \left(\frac{\partial}{\partial r}\right) \left[\frac{krP_a}{ZP_a\mu} \left(\frac{\partial P_a}{\partial r}\right)\right] + \frac{TP_{sc}}{T_{sc}} \frac{q_{sc}}{v_{ba}} + \frac{RT}{M} \frac{q_{ai}}{v_{ba}} = \phi_a \frac{\partial}{\partial t} \left[\frac{P_a}{ZP_a}\right] \quad (3)$$

جریان در منافذ ریز و قانون فیک برای نفوذ (Brogioli et al., 2000):

$$\left(\frac{1}{r}\right) \left(\frac{\partial}{\partial r}\right) \left[rD \left(\frac{\partial C}{\partial r}\right)\right] = \left(\frac{\partial C}{\partial t}\right) \quad (4)$$

D ضریب پخش است (cm²/s).

میزان جذب و دفع گاز در شرایط تعادل به وسیله معادله لانگمور بدست می آید (Marczewski, 2010):

$$V_E = \frac{V_\infty P}{P + P_L} \quad (5)$$

در این معادله همدمای تعادلی است (kg/m³)، V_∞ ثابت حجمی لانگمور است (kg/m³)، P میزان

چگالی (kg/m³)، P_t ثابت فشار لانگمور (psi, kPa) و P واحد فشار است (kPa).

تراکم کامل گاز در ماتریس زغال سنگ به ازای هر واحد حجمی بوسیله‌ی رابطه‌ی زیر ممکن می‌شود

:(Marczewski, 2010)

$$C = \left(\frac{PM\phi_i}{ZRT} \right) + \left(\frac{V_{\infty}P}{P+P_L} \right) \quad (6)$$

C در این جا تراکم گاز در ماتریس زغال سنگ (kg/m³) و M گرانیوی است (Cp).

با جایگزین کردن C با معادل آن در فرمول ۴ به فرمول زیر می‌رسیم (Janoszek et al., 2013):

$$\left(\frac{1}{r} \right) \left(\frac{\partial}{\partial r} \right) [rD \left(\frac{\partial}{\partial r} \left\{ \left(\frac{PM\phi_i}{ZRT} \right) + \left(\frac{V_{\infty}P}{P+P_L} \right) \right\} \right)] = \frac{\partial}{\partial t} \left[\left(\frac{PM\phi_i}{ZRT} \right) + \left(\frac{V_{\infty}P}{P+P_L} \right) \right] \quad (7)$$

و قانون جهانی گاز بدین صورت است (Janoszek et al., 2013):

$$P = CZRT \quad (8)$$

۴-۳-۴- شرایط مرزی

برای حل کردن معادلات پیوند نقل و انتقال مدل گازی در زغال سنگ، حالت اولیه و شرط حدی آن به این گونه قرارداد شده‌اند:

حالت اولیه: فشار: $P|_{t=0} = P_0$; stress: $\sigma|_{t=0} = 0$

جابه‌جایی: $u|_{i=0} = u_i$ سرعت: $\left. \frac{\partial u}{\partial x_i} \right|_{i=0} = v_i$

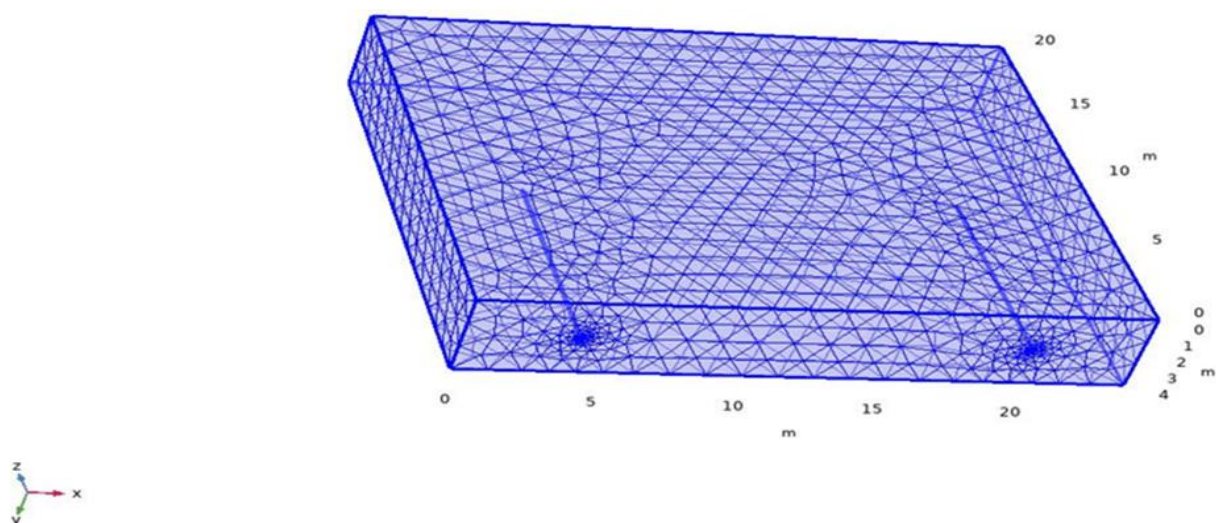
شرط مرزی: فشار گاز: $p|_{t=0} = p_0$

$u|_{boundary} = u_i$ جابه‌جایی مرزی:

بارگذاری مرزی: $\sigma_{ij} \cdot \vec{n}_j|_{boundary} = \sigma_0$

۴-۳-۵- مش بندی

از آنجائی که نرم افزار از طریق روش اجزاء محدود (FEM) عمل می نماید مش بندی به صورت شکل ۴-۲ بر روی مدل انجام گرفته است. در جدول ۴-۲ اطلاعات حاصل از مش بندی و پارامترهای به دست آمده بعد از عملیات به صورت کامل نشان داده شده است.



شکل ۴-۲- مدل مش بندی شده

جدول ۴-۲- اطلاعات حاصل از مش بندی بر روی مدل

Element type	All elements
Mesh vertices	12260
Tetrahedra	68095
Triangles	4034
Edge elements	1006
Vertex elements	24
Number of elements	68095
Minimum element quality	0.205
Average element quality	0.6428
Element volume ratio	4.358E-5
Mesh volume	1920 m ³

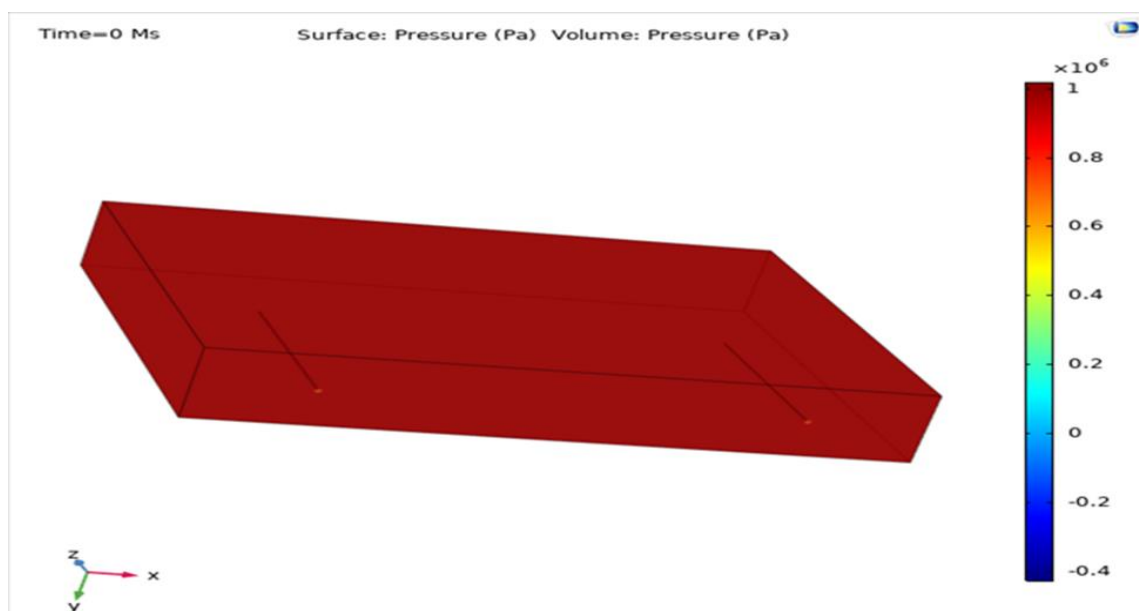
سپس برای اضافه کردن گمانه‌ها، مقادیر شعاع و ارتفاع آن‌ها وارد شدند و مدل ایجاد گردید. بلوک مکعب زغال‌سنگی در دسترس، از زغال‌سنگ و متان ایجاد شده است. متان توسط گمانه‌ها با قدرت مکش ۵ کیلو پاسکال استخراج می‌شود. این مقدار بسته به اطلاعاتی است که از معدن زغال‌سنگ طبس در ایران بدست آمده است.

۴-۴- شبیه‌سازی نتایج

برای این که بدانیم گاز چگونه در بلوک زغال‌سنگی در اثر عملیات گاز زدایی جابه‌جا می‌شود، تأثیرات فشار گاز، تعداد گمانه‌ها و شعاع آن‌ها در طول مدت ۱۵ روز گاززدایی بررسی شده اند.

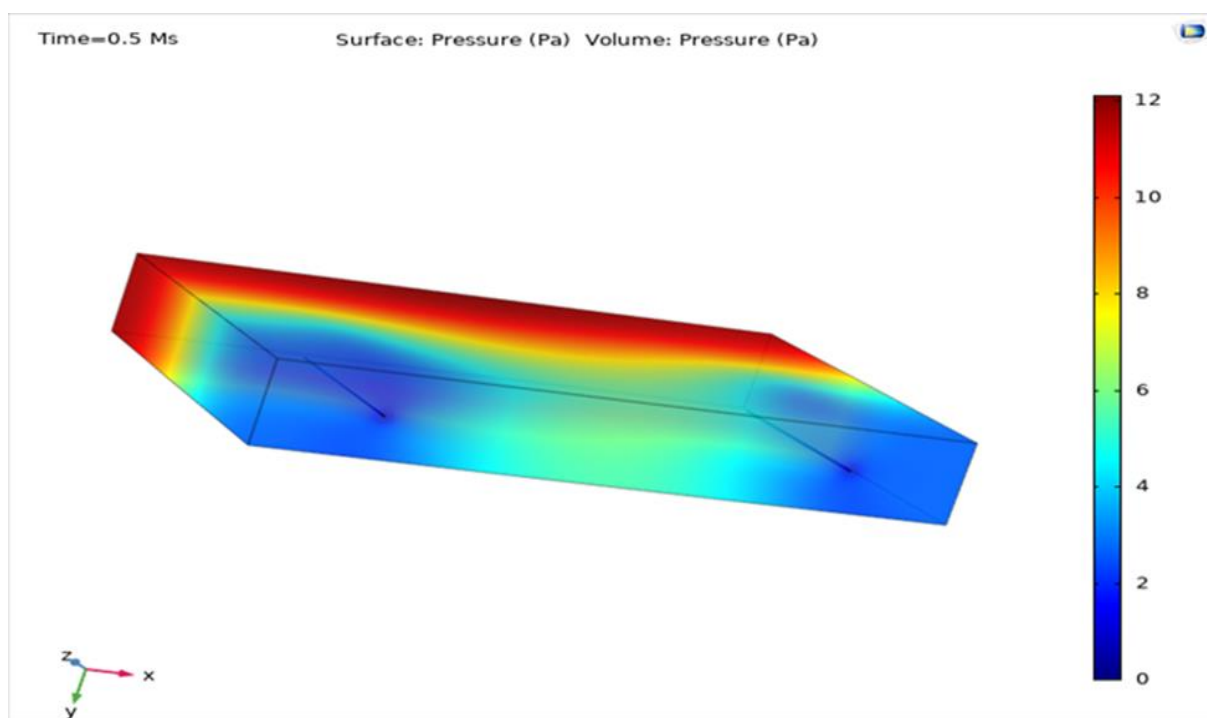
۴-۴-۱- فشار گاز

هر چه گاز متان از مرزهای ورودی (مرزهای دیواره ی بلوک) به سمت مرزهای خروجی گاز متان (خروجی گمانه‌ها) نزدیکتر می‌شود فشار آن کمتر می‌گردد یعنی طبق شکل ۳-۴ از فشار یک مگاپاسکال به سمت ۰/۸ مگاپاسکال در اطراف دهانه‌ی گمانه‌ها، یعنی به میزان ۸۰ درصد در حال کاهش است.



شکل ۳-۴- فشار خروج گاز در حالت دو گمانه با عمق ۱۰ متر و قطر ۶۶ میلی متر در ابتدا

شکل ۴-۴ فشار خروجی گاز در مدل بلوکی دوگمانه‌ای با طول گمانه‌ی ۱۰ متر و قطر ۶۶ میلی‌متر را در روز پانزدهم عملیات نشان می‌دهد. فشار گاز در نزدیکی گمانه‌ها از ۱۲ پاسکال در نزدیکی مرزهای بلوک زغال‌سنگ به ۲ پاسکال در نزدیکی گمانه‌ها، یعنی به میزان ۱۶ درصد فقط در روز پانزدهم عملیات، در حال کاهش است. بنابراین فشار گاز متان در همان روزهای ابتدای گاززدایی با درصد بیشتری کاهش می‌یابد.

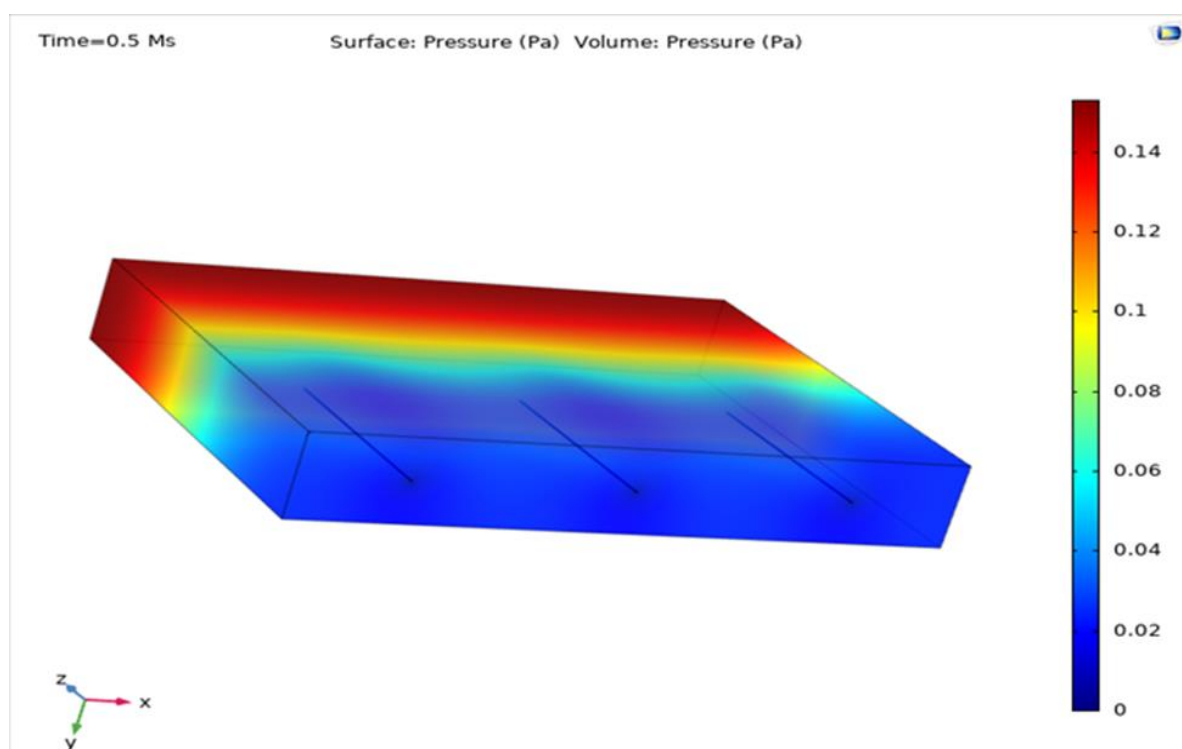


شکل ۴-۴- فشار خروج گاز در حالت دو گمانه با عمق ۱۰ متر و قطر ۶۶ میلی متر در روز پانزدهم

۴-۴-۲- تأثیر تعداد گمانه‌ها

شکل ۴-۵ فشار خروجی در مدل بلوکی سه‌گمانه‌ای ۶۶ میلی‌متری را در روز آخر گاززدایی نشان می‌دهد. فشار گاز به علت تعداد گمانه‌های بیشتر نسبت به حالت دوگمانه‌ای و در نتیجه قدرت مکش بیشتر، بیشتر کاهش می‌یابد. این کاهش در نزدیکی گمانه‌ها از ۰/۱۴ پاسکال به ۰/۰۲ پاسکال یعنی به میزان ۱۴ درصد است. در روز پانزدهم گاززدایی فشار داخل لایه‌ی زغال‌سنگ از مقدار یک مگا پاسکال در روز اول به مقدار

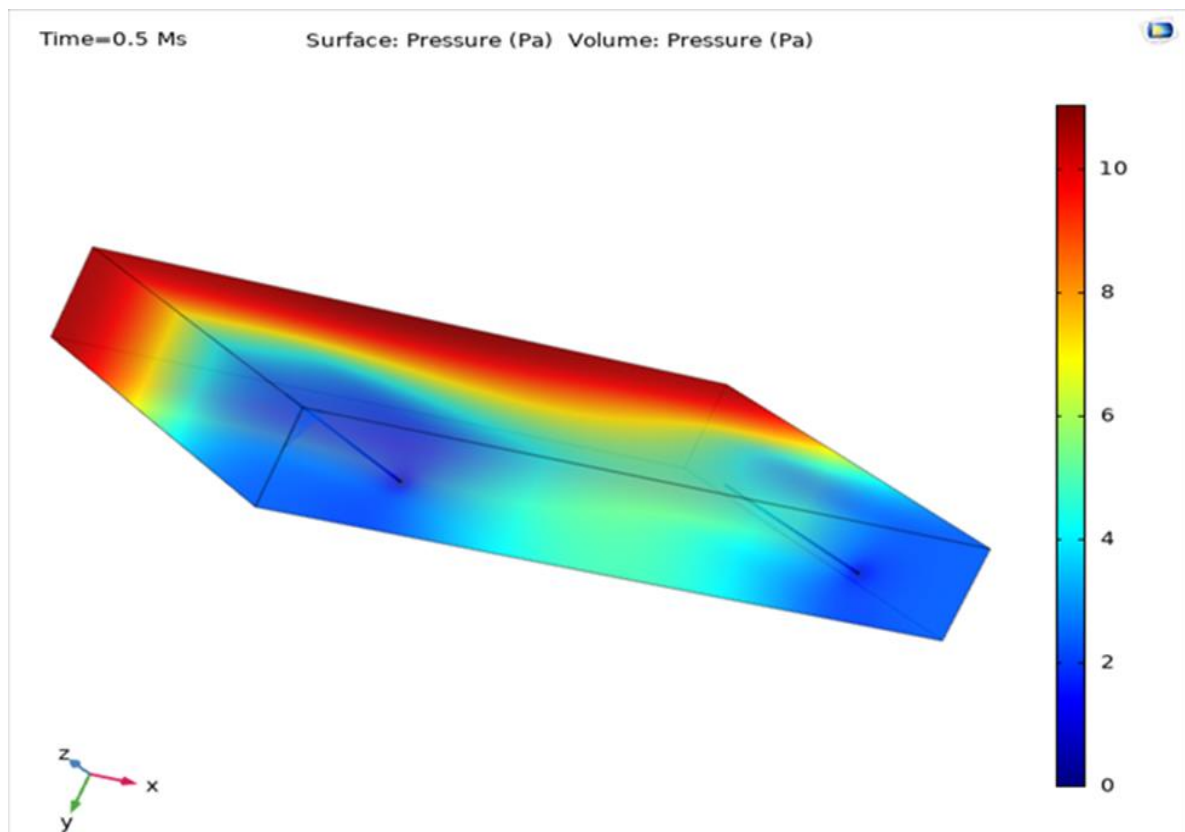
۰/۱۴ پاسکال در روز آخر می‌رسد. بنابراین تأثیر وجود گمانه ها و فشار مکش بر روی میزان گاززدایی داخل لایه ی زغال سنگ کاملاً مشخص است.



شکل ۴-۵- فشار خروج گاز در حالت سه گمانه با عمق ۱۰ متر و قطر ۶۶ میلی متر در روز پانزدهم

۴-۳-۴- تأثیر شعاع گمانه

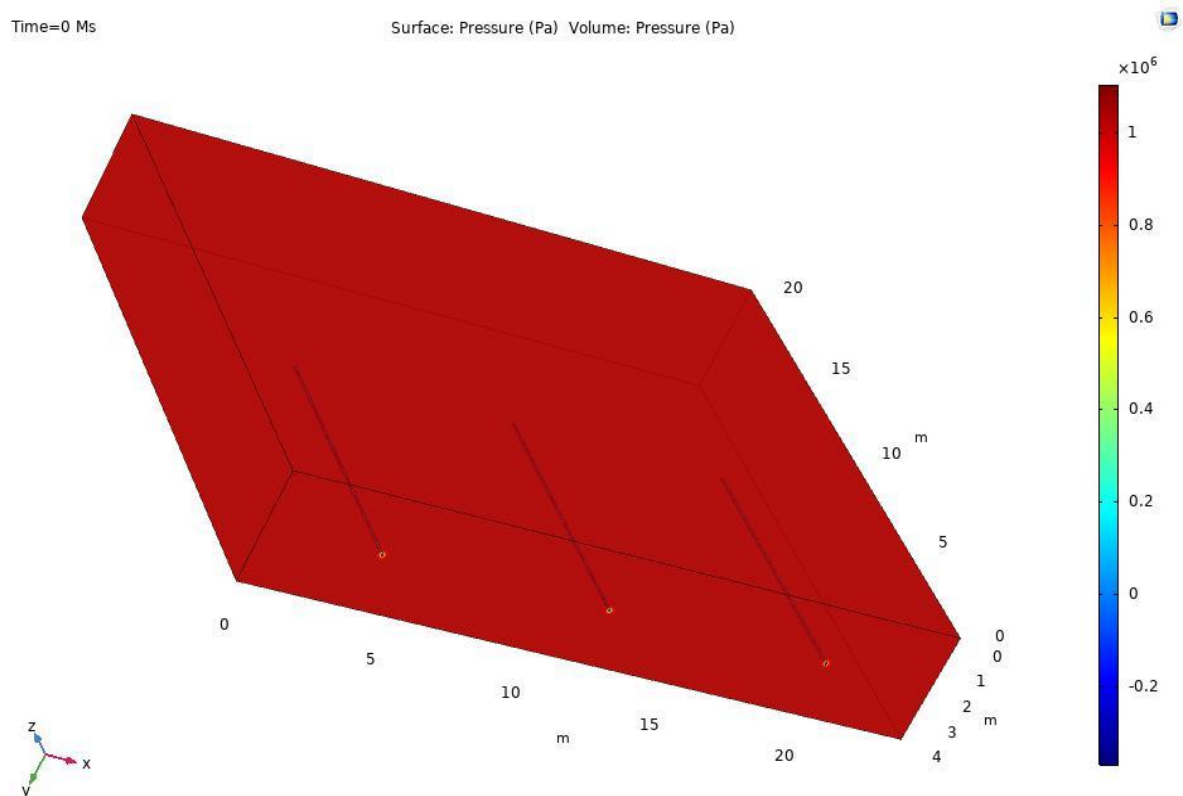
شکل ۴-۶- فشار خروجی مدل بلوکی با دوگمانه با قطر ۷۶ میلی متر را در روز پانزدهم گاززدایی نشان می‌دهد. کاهش فشار در این مدل بیشتر از کاهش فشار در مدل با دوگمانه با قطر ۶۶ میلی متر است که نشان می‌دهد با افزایش قطر گمانه ها میزان گاززدایی نیز افزایش میابد. در این نمودار کاهش فشار به میزان ۲۰ درصد است.



شکل ۴-۶- فشار خروج گاز در حالت دو گمانه با عمق ۱۰ متر و قطر ۷۶ میلی متر در روز پانزدهم

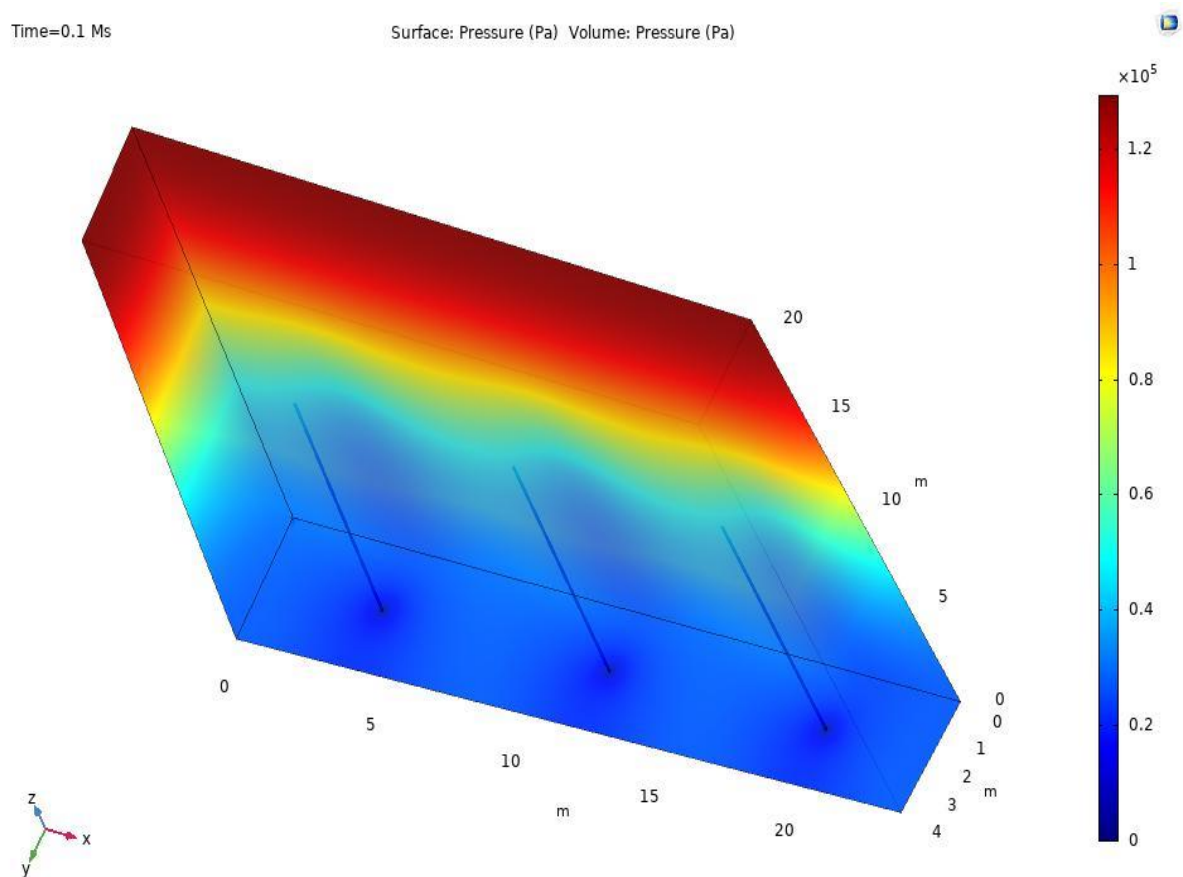
۴-۴-۴- تأثیر تعداد و شعاع گمانه و زمان گاززدایی بر کاهش فشار لایه

شکل ۴-۷- فشار خروجی گاز در مدل بلوکی سه گمانه‌ای با عمق گمانه‌ی ۱۰ متر و قطر ۸۶ میلی‌متر را در روز اول عملیات نشان می‌دهد. کاهش فشار گاز در نزدیکی گمانه‌ها میزان ۸۰ درصد است.



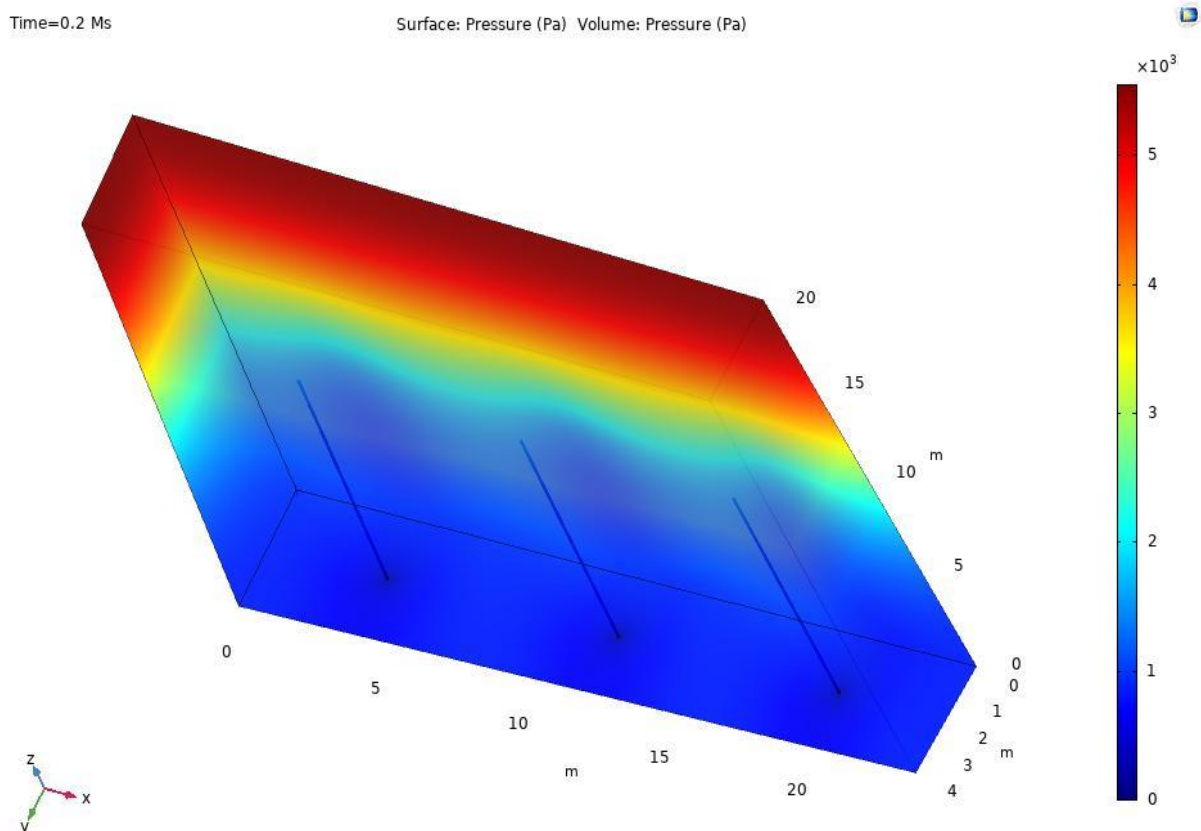
شکل ۴-۷- فشار خروج گاز در حالت سه گمانه با عمق ۱۰ متر و قطر ۸۶ میلی متر در ابتدا

شکل ۴-۸- فشار خروجی گاز در مدل بلوکی سه گمانه‌ای با عمق گمانه‌ی ۱۰ متر و قطر ۸۶ میلی‌متر را در روز سوم عملیات گاززدایی نشان می‌دهد. فشار در نزدیکی مرزهای ورودی گاز متان در لایه‌ی زغال‌سنگ از ۰/۱۲ مگا پاسکال تا ۰/۰۲ مگا پاسکال در نزدیکی گمانه‌ها یعنی به میزان ۱۶ درصد است.



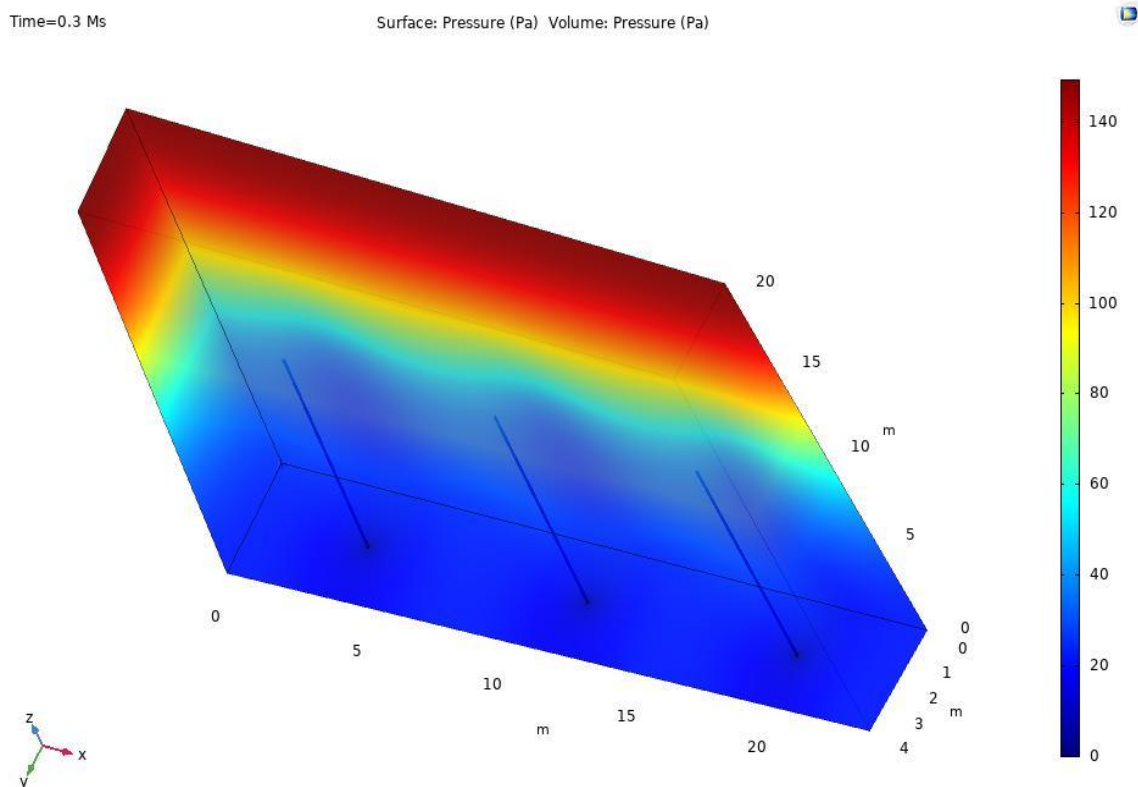
شکل ۴-۸- فشار خروج گاز در حالت سه گمانه با عمق ۱۰ متر و قطر ۸۶ میلی متر در روز سوم

شکل ۴-۹- فشار خروجی گاز در مدل بلوکی سه گمانه‌ای با عمق گمانه‌ی ۱۰ متر و قطر ۸۶ میلی‌متر را در روز ششم عملیات گاززدایی نشان می‌دهد. کاهش فشار گاز از ۵۰۰۰ پاسکال در اطراف لایه زغال‌سنگ تا ۱۰۰۰ پاسکال در اطراف گمانه‌های گاززدایی یعنی به میزان ۲۰ درصد است.



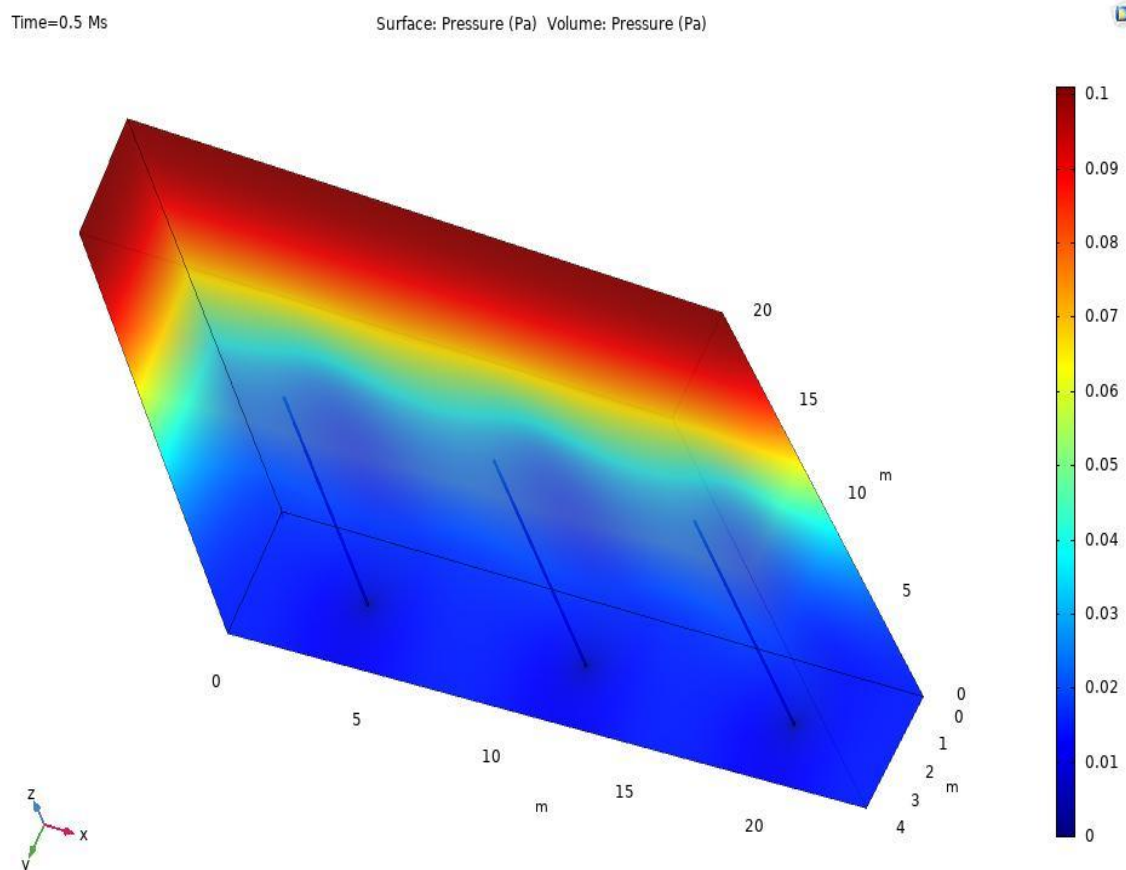
شکل ۴-۹- فشار خروج گاز در حالت سه گمانه با عمق ۱۰ متر و قطر ۸۶ میلی متر در روز ششم

شکل ۴-۱۰- فشار خروجی گاز در مدل بلوکی سه گمانه‌ای با عمق گمانه‌ی ۱۰ متر و قطر ۸۶ میلی‌متر را در روز نهم عملیات گاززدایی نشان می‌دهد. کاهش فشار گاز از ۱۴۰ پاسکال در ابتدای روز نهم و در اطراف مرزهای ورودی گاز متان به لایه‌ی زغال‌سنگ تا فشار ۲۰ پاسکال در انتهای روز نهم و اطراف گمانه‌های گاززدایی یعنی به میزان ۱۴ درصد است.



شکل ۴-۱۰- فشار خروج گاز در حالت سه گمانه با عمق ۱۰ متر و قطر ۸۶ میلی متر در روز نهم

شکل ۴-۱۱- فشار خروجی گاز در مدل بلوکی سه گمانه‌ای با عمق گمانه‌ی ۱۰ متر و قطر ۸۶ میلی‌متر را در روز پانزدهم عملیات گاززدایی نشان می‌دهد. کاهش فشار گاز از ۰/۱ پاسکال در مرز لایه های زغال‌سنگ به ۰/۰۱ پاسکال در کنار دهانه‌ی گمانه‌ها یعنی به میزان ۱۰ درصد است.

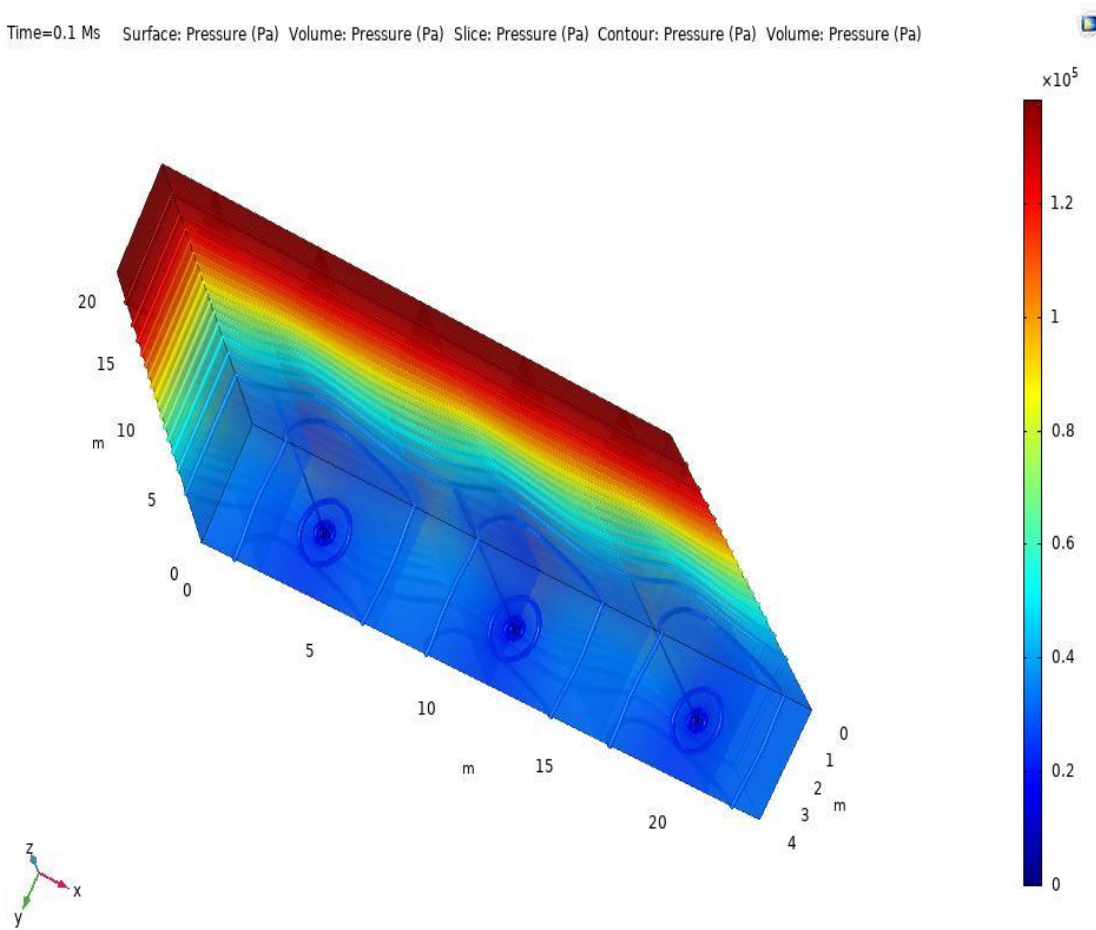


شکل ۴-۱۱- فشار خروج گاز در حالت سه گمانه با عمق ۱۰ متر و قطر ۸۶ میلی متر در روز پانزدهم

۴-۵- شعاع تأثیر گمانه و زمان گاززدایی

شکل ۴-۱۲ و ۴-۱۳ شعاع تأثیر گمانه‌ها را در مدل بلوکی سه گمانه‌ای با عمق گمانه‌ی ۱۰ متر و قطر ۶۶ میلی‌متر را در روز سوم و پانزدهم عملیات گاززدایی نشان می‌دهد. افزایش شعاع تأثیر در کنار دهانه‌ی گمانه‌ها با گذشت زمان به وضوح قابل مشاهده است که از میزان افزایش شعاع تأثیر میتوان برای تعیین جانمایی مناسب گمانه‌ها در طول لایه‌ی زغال‌سنگ استفاده کرد.

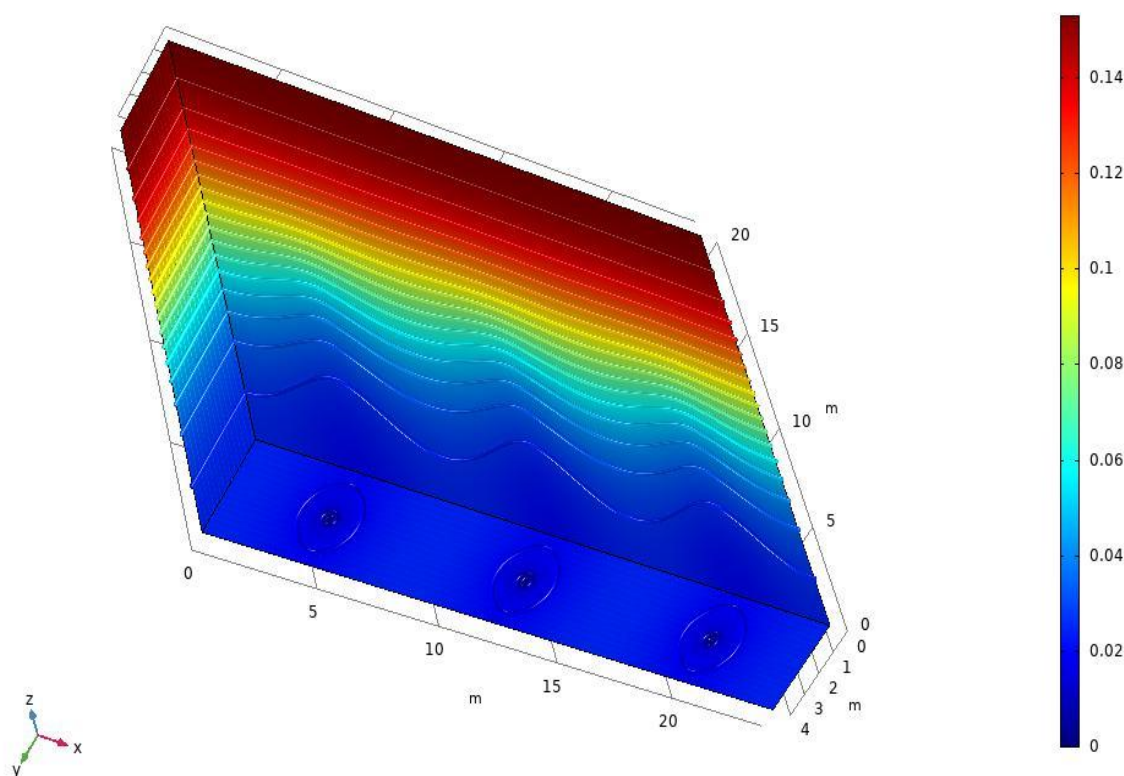
Time=0.1 Ms Surface: Pressure (Pa) Volume: Pressure (Pa) Slice: Pressure (Pa) Contour: Pressure (Pa) Volume: Pressure (Pa)



شکل ۴-۱۲- شعاع تاثیر گمانه ها در حالت سه گمانه با عمق ۱۰ متر و قطر ۶۶ میلی متر در روز سوم

Time=0.5 Ms

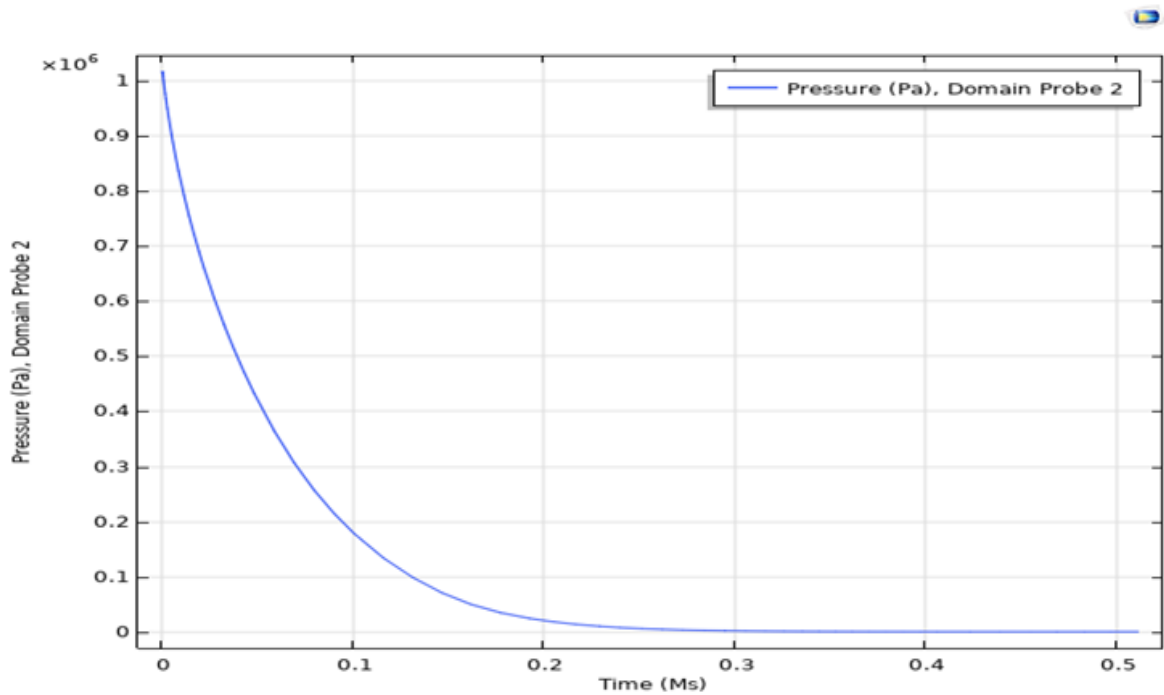
Surface: Pressure (Pa) Volume: Pressure (Pa) Slice: Pressure (Pa) Contour: Pressure (Pa)



شکل ۴-۱۳- شعاع تاثیر گمانه ها در حالت سه گمانه با عمق ۱۰ متر و قطر ۶۶ میلی متر در روز پانزدهم

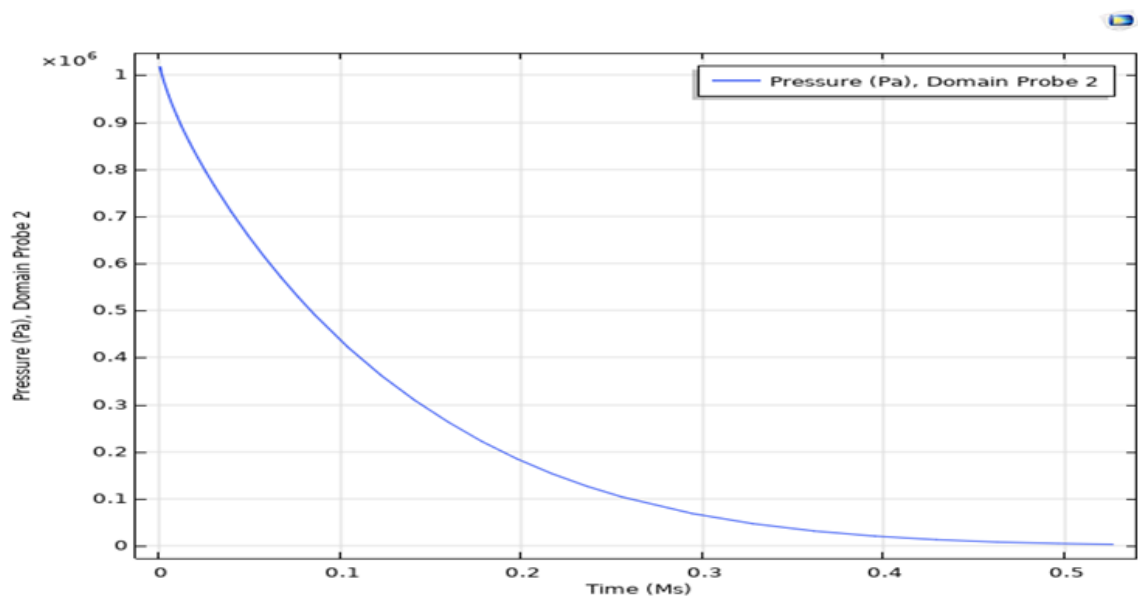
۴-۴-۶- تغییرات فشار - زمان

از قابلیت‌های نرم‌افزار کامسول، نشان دادن تغییرات فشار در هر بخش دلخواه از بلوک است. بخشی از مدل بلوکی که دو گمانه داشت انتخاب شد. این نقاط به نرم‌افزار وارد شد تا تغییرات فشار مشاهده گردد. بعد از اعمال تغییرات و انجام دستورات لازم، نمودارهای مربوط به فشار و فشار-زمان از خروجی نرم‌افزار بدست آمد که به صورت جداگانه آورده شده‌اند. شکل ۴-۱۴ نمودار فشار - زمان مدل بلوکی دوگمانه‌ای ۶۶ میلی‌متری با عمق ۱۰ متر را در طی عملیات ۱۵ روزه‌ی گاززدایی نشان می‌دهد. در این نمودار، به علت کاهش متان توسط گمانه‌ها، فشار به آرامی با گذر زمان کاهش می‌یابد ولی از روز نهم گاززدایی تا روز پانزدهم کاهش فشار چشمگیر نیست و نمودار ثابت می‌ماند.



شکل ۴-۱۴- نمودار فشار-زمان در حالت دوگمانه‌ای با طول ۱۰ متر و قطر ۶۶ میلی متر

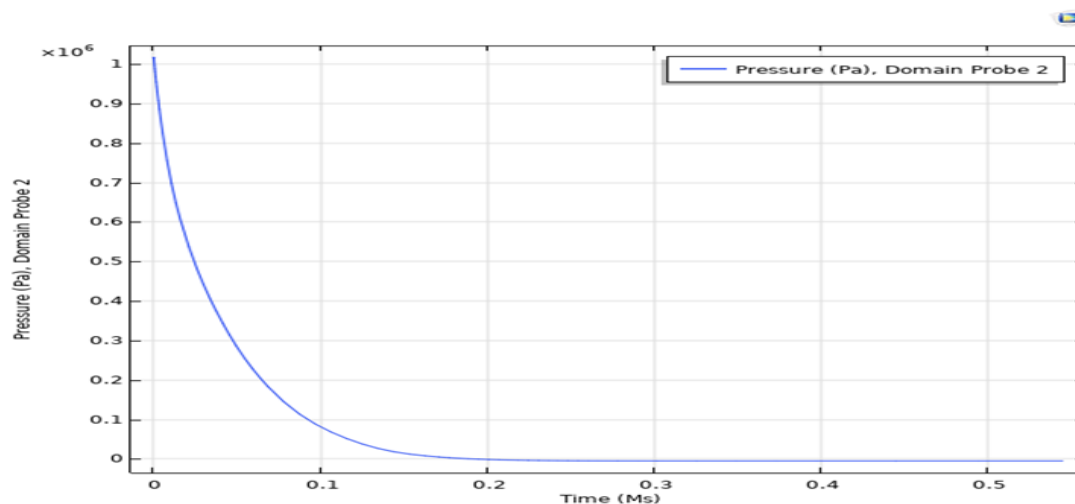
شکل ۴-۱۵- نشان می‌دهد که هرچه ارتفاع گمانه کمتر (عمق گمانه ۵ متر) باشد کاهش فشار در طول ۱۵



شکل ۴-۱۵- نمودار فشار-زمان در حالت دوگمانه‌ای با طول ۵ متر و قطر ۶۶ میلی متر

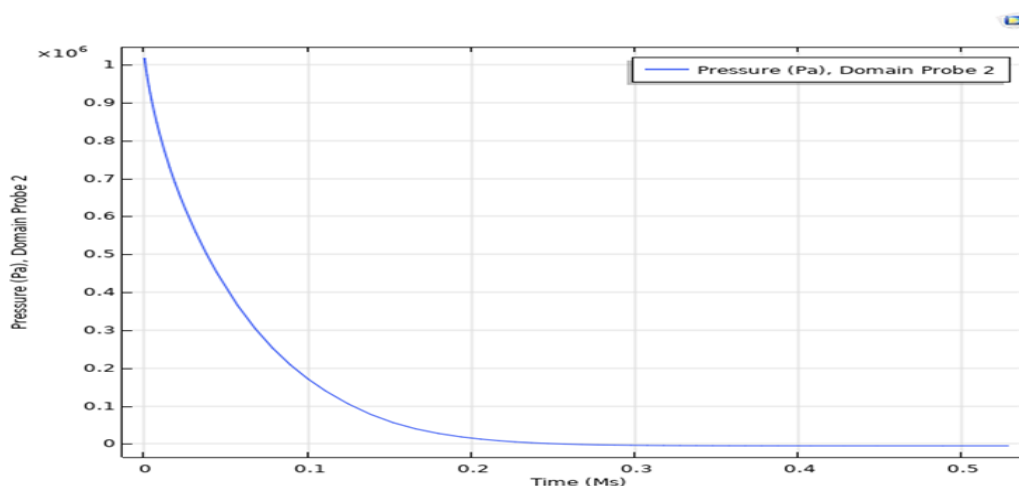
روز کمتر اتفاق می‌افتد.

شکل ۴-۱۶ نشان می‌دهد که هرچه قطر گمانه‌ها (۷۶ میلی متر) بیشتر باشد، کاهش فشار سریع‌تر اتفاق می‌افتد و میزان این کاهش فشار می‌تواند تعیین کننده‌ی قطر مناسب گمانه‌ی مناسب باشد که آیا این میزان کاهش فشار از نظر اقتصادی هم مقرون به صرفه هست یا خیر.



شکل ۴-۱۶- نمودار فشار-زمان در حالت دو گمانه با عمق ۱۰ متر و قطر ۷۶ میلی متری

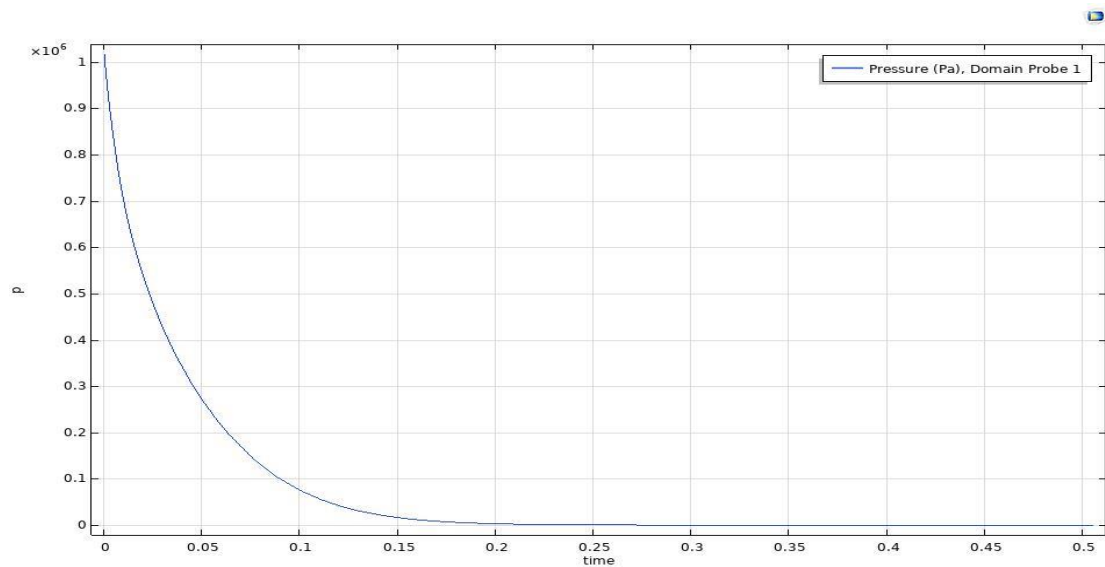
شکل ۴-۱۷ نشان می‌دهد که هرچقدر تعداد گمانه‌ها بیشتر باشد (۳ گمانه) کاهش فشار در مدت زمان ۱۵



شکل ۴-۱۷- نمودار فشار-زمان در حالت سه گمانه با عمق ۱۰ متر و قطر ۶۶ میلی متری

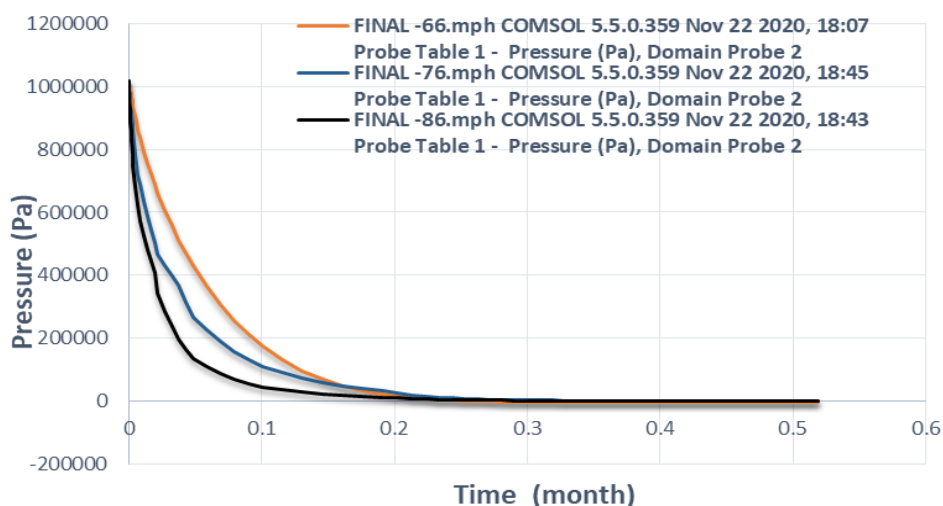
روزه، سریعتر اتفاق می افتد.

شکل ۴-۱۸ نشان می دهد که هرچقدر تعداد و قطر گمانه ها بیش تر باشد کاهش فشار بسیار سریعتر اتفاق می افتد.



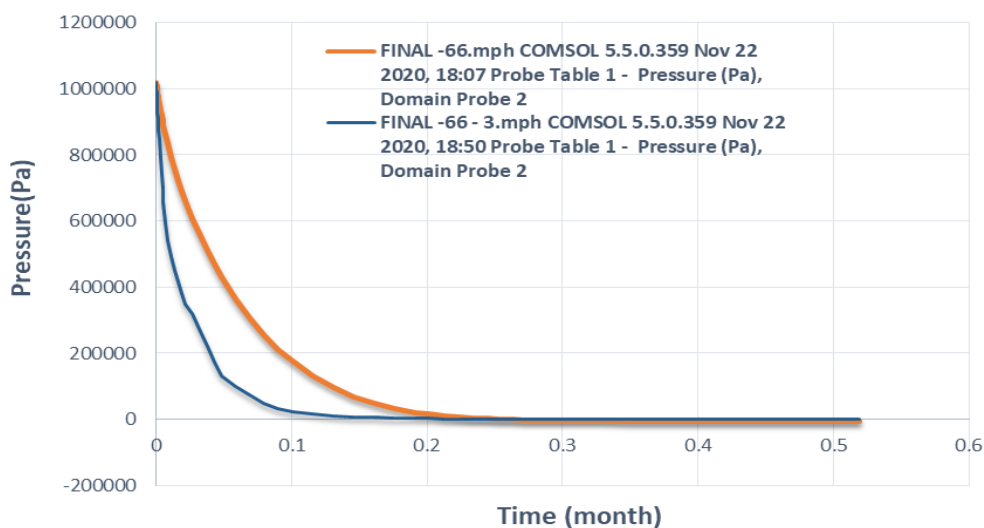
شکل ۴-۱۸- نمودار فشار-زمان در حالت سه گمانه با عمق ۱۰ متر و قطر ۸۶ میلی متری

شکل ۴-۱۹ که از مقایسه ی نمودارهای بدست آمده از نرم افزار کامسول در اکسل بدست آمده، نشان می دهد که فشار در طول ۱۵ روز گاززدایی برای چند گمانه ی مختلف با عمق ثابت اما قطرهای متفاوت، تغییر می کند و مشاهده شد که هر چقدر قطر گمانه بیشتر باشد، فشار در آن گمانه در طول گاززدایی بیشتر کاهش می یابد.



شکل ۴-۱۹- تغییرات فشار در طی ۱۵ روز گاززدایی

شکل ۴-۲۰ گمانه‌های هم اندازه اما با تعداد متفاوت در زمان گاززدایی را نشان می‌دهد. اگر تعداد گمانه‌ها بیشتر باشد در مدت زمان کمتری، فشار کاهش بیشتری می‌یابد و تأثیر تعداد گمانه‌ها بسیار بیشتر از تأثیر قطر گمانه‌ها است. بنابراین مناسب ترین حالت جانمایی برای گاززدایی استفاده از سه گمانه با قطر ۶۶ میلی‌متر و عمق ۱۰ متر در ۹ روز عملیات گاززدایی می‌باشد.

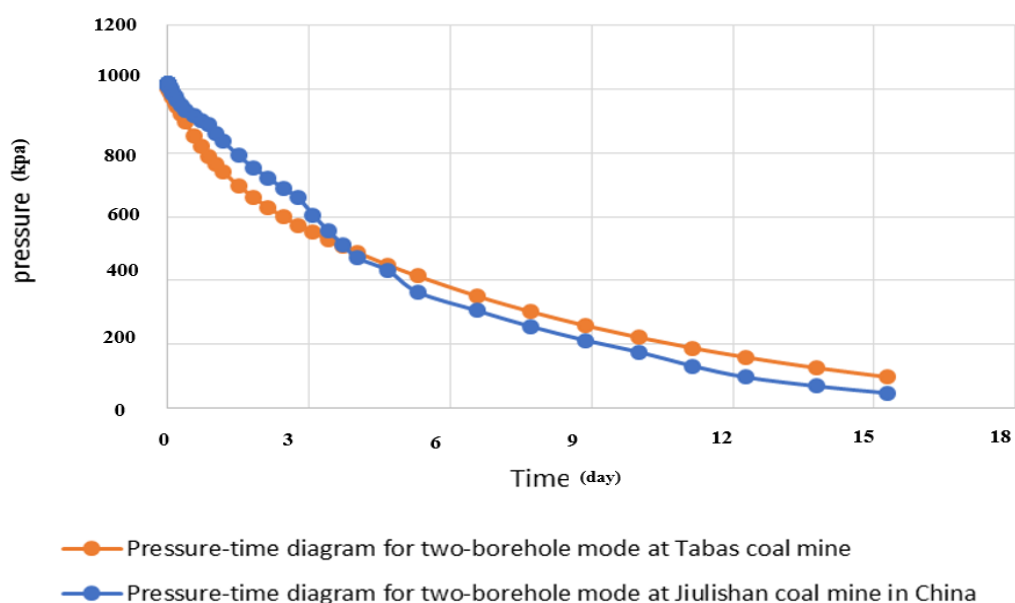


شکل ۴-۲۰- تأثیرات تعداد گمانه‌ها بر روی گاز زدایی در زمان ۱۵ روز

۴-۵- اعتبار سنجی مدل عددی

برای اعتبارسنجی میبایست مدل را برای معدنی که در حال گاززدایی می باشد اجرا نمود. اما از آنجایی که در ایران در معدنی عملیات گاززدایی دقیقاً به این شیوه صورت نمی گیرد، بنابراین می بایست نتایج حاصل از مدل را با دیگر تحقیقات صورت گرفته مقایسه نمود تا از صحت مدل اطلاع پیدا کرد .

در لایه های زغال سنگ شبیه به مطالعات قبلی، با دو گمانه، مقدار فشار از ۱۲ پاسکال به ۲ پاسکال کاهش می یابد (Taheri et al., 2016). مقایسه ای این مقادیر برابر بودن تقریبی آنها را نشان داد. نتایج بدست آمده از معدن طبس در ایران با نتایج بدست آمده از معدن جیولیشان در چین مقایسه شد. در ابتدا، اطلاعات مدل استخراجی لایه زغال سنگ جیولیشان در چین که از مقاله گرفته شده بود، به وسیله ی معادلات در نرم افزار کامسول بازسازی و شبیه سازی گردید. سپس نتایج بدست آمده از مدل جدید با مدلی که از اطلاعات استخراجی لایه زغال سنگ طبس بدست آمده بود مقایسه گردید. همان طور که در شکل ۴-۲۱ مشخص است، مشاهده شد که نتایج تقریباً برابر بودند و فرمولاسیون و ضرایب معادلات درست بوده و دو نمودار همپوشانی داشتند.



شکل ۴-۲۱- نتایج مقایسه ای نمودارهای فشار-زمان به دست آمده از معادن حالت دوگمانه ای طبس (قرمز) و جیولیشان (آبی)

در جدول ۳-۴ و ۴-۴ به ترتیب اطلاعات حاصل از معدن زغال سنگ جیولیشن چین و اطلاعات لایه ها در معدن زغال سنگ طبس آمده است.

جدول ۳-۴- اطلاعات حاصل از معدن زغال سنگ جیولیشن چین (Yue et al., 2019)

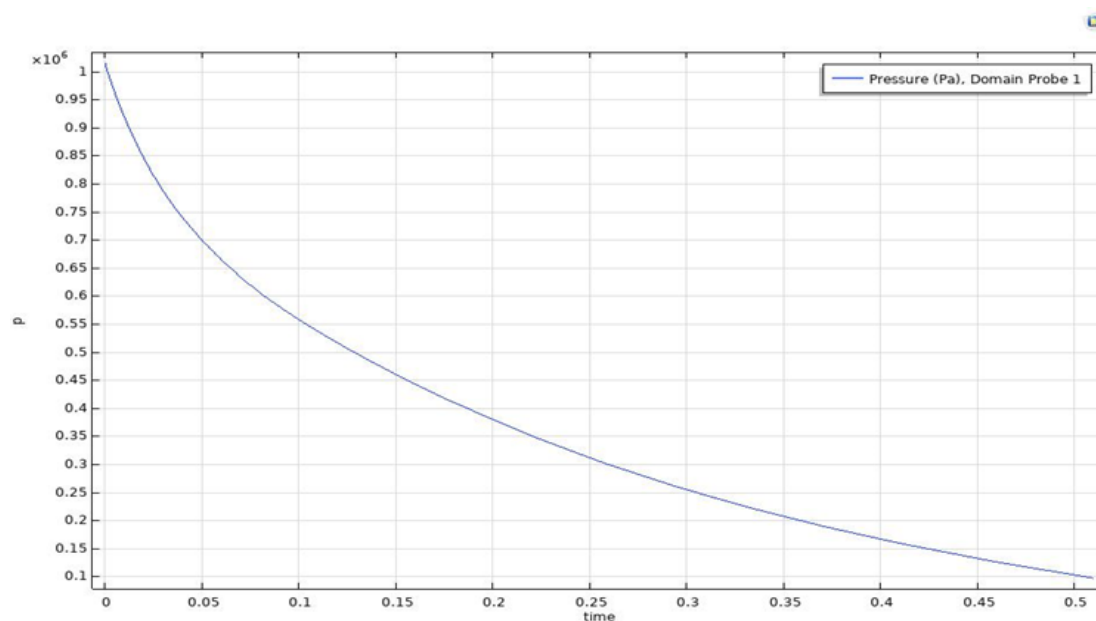
پارامتر	مقدار در معدن جیولیشن چین	واحد
عمق گمانه	۴۰	متر
قطر گمانه	۹۴	میلی متر
ضخامت میانگین لایه ها	۷/۲	متر
فشار داخل لایه ها	۱/۲	مگاپاسکال
میزان گاز خیزی متان لایه ی زغال سنگ	۴۰	مترمکعب بر تن
زمان گاز زدایی	۱۵	روز

جدول ۴-۴- اطلاعات حاصل از معدن زغال سنگ طبس (گزارش مجتمع معادن زغال سنگ پروده طبس، ۱۳۷۸)

پارامتر	مقدار در معدن زغال سنگ طبس	واحد
عمق گمانه	۱۰	متر
قطر گمانه	۶۶	میلی متر
ضخامت لایه	۴	متر
فشار داخل لایه ها	۱	مگاپاسکال
میزان گاز خیزی متان لایه ی زغال سنگ	۲۷	مترمکعب بر تن
زمان گاز زدایی	۱۵	روز

شکل ۴-۲۲ کاهش فشار گمانه‌ها در معدن زغال‌سنگ جیولیشان^۱ چین را نشان می‌دهد که با مدل‌سازی اطلاعات معدن جیولیشان چین در نرم افزار کامسول بدست آمده است. مشاهده می‌شود که فشار با گذر زمان کاهش می‌یابد (Yue et al., 2019).

شکل ۴-۲۲- نمودار فشار-زمان برای حالت دوگمانه‌ای با طول ۴۰ متر و قطر ۹۴ می



¹Jiulishan

فصل پنجم

جمع بندی و پیشنهادات

۵-۱- نتیجه گیری

۱. فشار خروج گاز از گمانه ها در روز های اول گاززدایی به میزان ۹۰ درصد کاهش میابد. این مقدار بسته به تخلخل زغال سنگ، تعداد گمانه ها و قطر و طول آن ها متغیر است.
۲. با استفاده از مدل سازی و طراحی دو گمانه ی گاززدایی، فشار در لایه های زغال سنگ در روز پانزدهم گاززدایی از ۱۲ پاسکال به مقدار ۲ پاسکال یعنی میزان ۱۶ درصد کاهش یافت.
۳. نمودارها نشان می دهند که هر چقدر طول گمانه ها بیشتر باشد، کاهش فشار سریع تر و در زمان کمتری اتفاق می افتد.
۴. مشخص گردید که کاهش فشار، در مدل هایی که بیشتر از دو گمانه دارند، به علت افزایش قدرت مکش، بیشتر است و تأثیر افزایش تعداد گمانه ها برای کاهش فشار گاز متان از تأثیر افزایش قطر گمانه ها بیشتر است.
۵. هنگامی که قطر گمانه ها ۶۶ میلی متر و طول آن ها ۱۰ متر طراحی شد و طراحی مدل بصورت سه گمانه ای بود، فشار متان در نزدیکی گمانه ها از به میزان ۹۰ درصد در روز آخر گاززدایی کاهش یافت که مناسب ترین حالت برای گاززدایی طبق مدل ایجاد شده در نرم افزار کامسول است.
۶. مناسب ترین حالت جانمایی برای گمانه های گاززدایی استفاده از سه گمانه با قطر ۶۶ میلی متر و عمق ۱۰ متر در ۹ روز عملیات گاززدایی می باشد و از روز نهم تا پانزدهم تغییرات کاهش فشار ناچیز است و نمودار فشار-زمان ثابت می ماند.
۷. هنگامی که نتایج بدست آمده از مدل جدید با مدل ساخته شده از اطلاعات استخراجی بدست آمده از معدن زغال سنگ جیولیشان در چین مقایسه گردید، نمودارها همپوشانی داشته و نتایج سازگار بود.

۵-۲- پیشنهادات

بر اساس آزمایش‌ها و تحقیقات صورت گرفته در این رساله، پیشنهادهای زیر مطرح میشود:

۱- پارامترهای دیگر زغال‌سنگ شامل بازشدگی ریز درزه‌ها، میزان رطوبت محتوا، نوع گازهای موجود در زغال سنگ و اثرات تنش‌ها، در میزان انتشار گاز متان از زغال‌سنگ تاثیر دارند. بنابراین پیشنهاد میشود که در آینده تاثیر این گونه پارامترها نیز بر روی میزان انتشار و مدل ایجاد شده مورد مطالعه قرار گیرد.

۲- در تحقیقات آینده پیشنهاد می‌شود تا شرایط نشت گاز از گمانه‌های گاززدایی هم برای مدل سازی در نظر گرفته شود.

۳- پیشنهاد می‌شود بر اساس یافته‌ها و پارامترهای به دست آمده از این تحقیق، پدیده وقوع تصاعد آبی گاز متان در زغال‌سنگ نیز بررسی شود.

منابع

منابع

- اصالو . م، (۱۳۷۸)، مهندسی زغال سنگ، انتشارات ناقوس، تهران
- برزگر. ه، (۱۳۶۱)، گزارش اکتشافات تفضیلی زغال پروده I طبس، جلد چهارم
صفحه ۲۸۹ الی ۳۱۲
- توکلی . م و سرشکی. ف، (۱۳۸۵)، گاز زغال و روش های کاهش آن، گاز زدایی در معدن پروده طبس،
پنجمین کنفرانس دانشجویی، مهندسی معدن
- عسکری . ا، (۱۳۹۴)، پروژه تهیه اطلس جامع طرح ذخیره سازی گاز، پژوهشگاه صنعت نفت
- عطایی . م، (۱۳۹۰)، روش های معدنکاری زیرزمینی، انتشارات دانشگاه صنعتی شاهرود، جلد ۲
- گزارش مجتمع معادن زغال سنگ پروده طبس، دفتر فنی مهندسی زغال سنگ پروده طبس، ۱۳۷۸
- معین السادات س.ح، رضوی ارمغانی م ب، (۱۳۷۲) زمین شناسی ایران (زغال سنگ)، انتشارات سازمان
زمین شناسی و اکتشافات معدنی کشور
- ملایمت. ح، (۱۳۹۱)؛ "تخمین گاز خیزی در معدن زغال سنگ پروده طبس با استفاده از شبکه عصبی،
اولین کنگره ملی زغال سنگ
- Adamczewski J,(2017),“Development of the CBM RICH readout electronics and
DAQ”
- Alekseev VP,(2003),Lithofacies analysis: Teaching-methodical instruction of
sediments and self-learning in lithology, Ekaterinburg: the Ural Academy
of Mining & Geology
- Aminian, K., Ameri, S., Bhavsar, A., Sanchez, M., & Garcia, A. ,(2004), Type curves
for coalbed methane production prediction. In *SPE eastern regional meeting*.
OnePetro.
- Aziz N,Black D,Ren T,(2011),Mine gas drainage and outburst control in Australian
underground coal mines, First International Symposium on Mine Safety Science and
Engineering, Procedia Engineering 26, pp. 84-92

- Bai, J., Duan, S., Liu, R., Xin, L., Tian, J., Zhang, Q., & Ma, H, (2021), Evolution of delayed water inrush in fault fracture zone considering time effect. *Arabian Journal of Geosciences*, 14(11), 1-12.
- Barker C.E,(2003), Alaska Coalbed and Shallow Gas Resources May 2001 Workshop Proceedings
- Black D,Aziz N,(2011),Actions to Improve Coal Seam Gas Drainage Performance, 11th Underground Coal Operators' Conference, University of Wollongong & the Australasian Institute of Mining and Metallurgy, PP. 307-314
- Black J,(2011),“Factors Affecting The Drainage Of Gas From Coal And Methods To Improve Drainage Effectiveness”, Ph.D. thesis, University Of Wollongong, School of Civil, Mining and Environmental Engineering
- Brogioli, D., & Vailati, A, (2000), Diffusive mass transfer by nonequilibrium fluctuations: Fick’s law revisited. *Physical Review E*, 63(1), 012105.
- Brunner, C., Ernst, K. H., Hess, H., & Vogel, V. (2004). Lifetime of biomolecules in polymer-based hybrid nanodevices. *Nanotechnology*, 15(10), S540.
- Chen K.C,Irawan S,Sum C.W,(2011),“Preliminary study on gas storage capacity and gas-in-place for CBM potential in Balingian Coalfield, Sarawak Malaysia”, International Journal of Applied Science and Technology
- Cheng, C. L., Perfect, E., Yu, T. E., & Gragg, M. J, (2017), Impact of the capillary pressure-saturation pore-size distribution parameter on geological carbon sequestration estimates. *Journal of Sustainable Mining*, 16(3), 67-72.
- Cheng, Y. P., Wang, L., & Zhang, X. L. (2011). Environmental impact of coal mine methane emissions and responding strategies in China. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 5(1), 157-166.
- Crowe, C. T., Sharma, M. P., & Stock, D. E, (1977), The particle-source-in cell (PSI-CELL) model for gas-droplet flows. 325-332

- Dhir R., Dern R.R., Mavor M.J,(1991),Economic and reserve evaluation of coal bed Methane Reservoirs: Society of petroleum engineers, Paper No. 22024, Texas (USA)
- Durucan, S., Ahsan, M., Shi, J. Q., Syed, A., & Korre, A. ,(2014), Two phase relative permeabilities for gas and water in selected European coals. *Fuel*, 134, 226-236.
- Economic commission for europe methane to markets partnership,(2010), Best Practice Guidance for EffectiveMethane Drainage and Use in Coal Mines.
- Feng, Q., Zhang, J., Zhang, X., & Hu, A. ,(2012), Optimizing well placement in a coalbed methane reservoir using the particle swarm optimization algorithm. *International Journal of Coal Geology*, 104, 34-45.
- Franklin P, Ruiz F, and Somers J,(2010),“Coalbed Methane Outreach Program US Environmental Protection Agency”, US Coal Mine Methane Conference Birmingham, Alabama
- Gang L,Qingxin Q,Hongyan L,Wenbo J,(2011),The Theoretical Prediction Model of Reasonable Pre-draining Time of Gas in Coal Seam, *Procedia Engineering* 26
- Gray I,(1987),Reservoir Engineering in Coal seams: The Physical process of gas storage in movement in coal seams: Society of petroleum engineers Reservoir Engineers
- Guo, X., Xue, S., Li, Y., Zheng, C., & Xie, L, (2021), Research on Optimization of Key Areas of Drainage Borehole Sealing in Ultrathick Coal Seam. *Shock and Vibration*, vol. 2021, Article ID 5536196, 8 pages, 2021.
- Haijiao F,Dazhen T,Hao X,(2016), “Geological characteristics and CBM exploration potential evaluation: A case study in the middle of the southern Junggar Basin, NW China”, *Journal of Natural Gas Science and Engineering*vol
- Hai-jin W, Bai-quan L, Qian Y, (2009), The theory model and analytic answer of gas diffusion,The6th International Conference on Mining Science & Technology,Procedia Earth and Planetary Science 1, pp. 328-335
- Han G,Ling K,Zhang H,(2015),Smart De-Watering and Production System through Real-Time Water Level Surveillance for Coal-Bed Methane Wells

- Hao-ran L, Yuan-ping Ch, Zhi Zh, (2011), The Mathematical Model and Numerical Simulation of High Pressure Air Replacement Coal Seam Gas, First International Symposium on Mine Safety Science and Engineering, Procedia Engineering 26
- Harpalani S, Schraufnagel R.A, (1990), Shrinkage of coal matrix with release of gas and its impact on permeability of coal. Journal Fuel, Volume 69
- Holditch S.A, (1989), Enhanced Recovery of coal bed Methane through hydraulic fracturing. Published In: Society of Petroleum Engineers Texas (USA)
- Houcheng D, Zhongan J, Qingming Zh, (2012), Optimized parameters and forecast analysis of high-position hole for goaf gas drainage, International Symposium on Safety Science and Technology, Procedia Engineering 45, pp. 305 – 310
- Ingelson A, (2006), CBM produced water-the emerging canadian regulatory framework
- Irving W, Oleg tailakov, (1996), “CH₄ Emissions: coal mining and handling”
- James C. Cobb, (2003), “State geologist and director Kentucky geological survey university of Kentucky, Lexington, “coal bed methane
- Janoszek T, Jacek Iacznny M, Stanczyk K, Smolinski A, Wiatowski M, (2013), Modeling of gas flow in the underground coal gasification process and its interactions with the rock environment, Published in : Journal of sustainable mining, Vol 12, No 2, pp 8-20
- Jiang Ch, Yin G, Li W, Huang Q, (2011), Experimental of mechanical properties and gas flow of containing-gas coal under different unloading speeds of confining pressure, First International Symposium on Mine Safety Science and Engineering, Procedia Engineering 26, pp. 1380- 1384
- Jinhai, Z., Liming, Y., & Weijia, G, (2018), Influence of three-dimensional roughness of rock fracture on seepage characteristics based on the digital image technology. *Arabian Journal of Geosciences*, 11(24), 1-12
- Karacan C, (2007), Swelling-induced volumetric strains internal to a stressed coal associated with CO₂ sorption, International Journal of Coal Geology

- Karacan C,(2008),“Modeling and prediction of ventilation methane emission of U.S.longwall mines using supervised artificial neural networks”, International Journal of Coal Geolog
- Karacan C,(2009),Forecasting gob gas venthole production performances using intelligent computing methods for optimum methane control in longwall coal mines, International Journal of Coal Geology 79,pp. 131–144
- Karacan C, Ruiz FA, Cotè M, Phipps S,(2011),“ Coal mine methane: a review of capture and utilization practices with benefits to mining safety and to greenhouse gas reduction J C”
- Karacan C,Felicia A. R,Michael C,Sally Ph,(2011),Coal mine methane: A review of capture and utilization practices with benefits to mining safety and to greenhouse gas reduction, International Journal of Coal Geology 86 ,PP. 121–156
- Kendall P.F.,Briggs H,(1993),The formation of Rock Joints and the cleats of coal, Royal Society of Edinburgh
- Krause, E., Krzemień, A., & Smoliński, A. ,(2015), Analysis and assessment of a critical event during an underground coal gasification experiment. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 33, 173-182.
- Krzemień J,(2013),”APPLICATION OF MARKAL MODEL GENERATOR IN OPTIMIZING ENERGY SYSTEMS”, Journal of Sustainable Mining
- Kuijk V,H.A.J.A,(2008),Grate furnace combustion : a model for the solid fuel layer
- Kuksov L,Mochalov S and Sarychev V,(2012),Numeric Simulation of Turbulent Flows in Cylindrical Swirl Combustion Chamber Designed for Fuel Based on Coal Enrichment Wastes, World Applied Sciences Journal 19 (1): 100-105
- Lan, W., Wang, H., Yang, S., Zheng, C., Liu, Y., & Chen, S.,(2017), Study on the migration of pulverized coal in CBM wellbore. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 156, 740-747.
- Laubach S.E,tremain C.M.,Ayers W.B,(1991),Coal Fracture Studies: Guides for coal bed methane exploration and development. Published In: Journal of Coal Quality
- Lawall C,Morris L,(1934),Occurrence and flow of gas in the Pocahontas No. 4 coal bed in southern West Virginia

- Lee, Anthony L., Mario H. Gonzalez, and Bertram E. Eakin,((1966), "The viscosity of natural gases." *Journal of Petroleum Technology* 18.08, 997-1
- Li, F., Jiang, B., Wei, C., Cheng, G., & Song, Y, (2021), Simulation of coalbed methane generation, dissipation, and preservation and analysis of the geological influencing factors: a case study of the Xinjing coal mine, northeastern Qinshui basin, China. *Arabian Journal of Geosciences*, 14(5), 1-18.
- Lian J,(2011),The Design of Gas Drainage Holes' Opening Parameters Intelligent Measurement and Control System for Coal Mine, 2011 Xian International Conference on Fine Geological Exploration and Groundwater & Gas Hazards Control in Coal Mines, *Procedia Earth and Planetary Science* 3
- Liu Y,Luo D,(2014),Opportunities and challenges of the CBM development environment in China, *Journal of Chemical and Pharmaceutical Research*, Vol 6(7), pp1225-1230
- Liu, Y., Shao, S., Wang, X., Chang, L., Cui, G., & Zhou, F ,(2016), Gas flow analysis for the impact of gob gas ventholes on coalbed methane drainage from a longwall gob. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 36, 1312-1325.
- Liu, Z., Cheng, Y., Jiang, J., Li, W., & Jin, K.,(2017), Interactions between coal seam gas drainage boreholes and the impact of such on borehole patterns. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 38, 597-607.
- MacDonald G.J,(1990),The future of methane as an energy resource, Published In: *Annual Review of Energy* Volume 15 Virginia (USA)
- Marczewski, A. W, (2010), Analysis of kinetic Langmuir model. Part I: integrated kinetic Langmuir equation (IKL): a new complete analytical solution of the Langmuir rate equation. *Langmuir*, 26(19), 15229-15238.
- McCarthy G,(2010),The U.S. Government's Methane to Markets Partnership Accomplishments

- Mcculloch C.M,(1974),Duel M., Jeran P.W.,Cleats in Bituminous coal bed, US Bureau of Mines: Reports of Investigations No. 7910
- Moore Tim A,(2012),Coalbed methane: A review, International Journal of Coal Geology
- Mwiluka J,(2009),AN Assessment of Coal from MUI BASIN as an alternative energy resource For KENYA
- Najafi M, Mohammadi H, Aghajani H,(2012),Pre-Feasibility Study of Coal Bed Methane Drainage in Iran Coal Basins, 1th Iranian Coal Congress
- Neuman, S. P, (1977), Theoretical derivation of Darcy's law. *Acta mechanica*, 25(3), 153-170.
- Ni, X., Miao, J., Lv, R., & Lin, X. (2017). Quantitative 3D spatial characterization and flow simulation of coal macropores based on μ CT technology. *Fuel*, 200, 199-207.
- Ojha, K., Karmakar, B., Mandal, A., & Pathak, A. K , (2011), Coal bed methane in India: difficulties and prospects. *International Journal of Chemical Engineering and Applications*, 2(4), 256.
- Palmer I,(2010),Coalbed methane completions: a world view, International Journal of Coal Geology
- Panda S, Pal S, Murthy P,(2016),Evaluation of pre-jamming indication parameter during blind backfilling technique, Journal of Sustainable Mining
- Pramod T, (2017), Advanced Reservoir and Production Engineering for Coal Bed Methane
- Prostański D,(2013),”USE OF AIR-AND-WATER SPRAYING SYSTEMS FOR IMPROVING DUST CONTROL IN MINES”,Journal of Sustainable Mining
- Qing Y,Haizhen W,Zhenzhen J,Yan P,(2012),Graph theory and its application in optimization of gas drainage system in coal mine, 2012 International Symposium on Safety Science and Technology, Procedia Engineering 45, pp. 339 – 344

- Quan-wei D,Xin-hua L,Chang L,Qi-zhao L,Ming-go Y,(2013),Numerical Simulation of Spontaneous Oxidation Zone Distribution in Goaf under Gas Stereo Drainage, *Procedia Engineering* 52, pp. 72- 78
- Ray, S., & Dey, K, (2020), Coal mine water drainage: the current status and challenges. *Journal of the Institution of Engineers (India): Series D*, 101, 165-172.
- Ritter, D., Vinson, D., Barnhart, E., Akob, D. M., Fields, M. W., Cunningham, A. B., ... & McIntosh, J. C. ,(2015), Enhanced microbial coalbed methane generation: a review of research, commercial activity, and remaining challenges. *International Journal of Coal Geology*, 146, 28-41.
- Roshchanka, V., Evans, M., Ruiz, F., & Kholod, N. ,(2017), A strategic approach to selecting policy mechanisms for addressing coal mine methane emissions: A case study on Kazakhstan. *Environmental Science & Policy*, 78, 185-192.
- Salomons, S., Hayes, R. E., Poirier, M., & Sapoundjiev, H. (2003). Flow reversal reactor for the catalytic combustion of lean methane mixtures. *Catalysis Today*, 83(1-4), 59-69.
- Sang Sh.x,Liu H.h,Li Y.m,Li M.x,Li L,(2009),Geological controls over coal-bed methane well production in southern Qinshui basin, *Procedia Earth and Planetary Science*, PP.912–917
- Sarhosis V,Jaya A,Thomas H,(2016),“Economic modelling for coal bed methane production and electricity generation from deep virgin coal seams”, *Energy*
- Sawhney P,(2007),Methane to markets conference methane to markets conference New Delhi New Delhi potential for cmm / amm / cbm in India. Reliance Industries Limited
- Schultz K,(2003),CBM Technologies and Activities in Russia, US Environmental Protection Agency. Presented at US Russia Energy Working Group Third Meeting
- Sereshki, F, (2005), Improving coal mine safety by identifying factors that influence the sudden release of gases in outburst prone zones. *PhD thesis (University of Wollongong)*, pp.120-125.
- Sereshki, F., Aziz, N., & Porter, I, (2003), Impact of coal permeability on gas sorption and coal volume change. In *Proceedings of the 7th annual environmental engineering research event conference, Marysville, Victoria, Australia* (pp. 333-342).

- Sharma, K. M., Roy, D. G., Singh, P. K., Sharma, L. K., & Singh, T. N, (2017), Parametric study of factors affecting fluid flow through a fracture. *Arabian Journal of Geosciences*, 10(16), 1-18.
- Shirin L.N,Dudlya N.A,Fedorenko E.A,(2011),Methane Drainage Borehole Drilling Technology Status of Ukraine, *Procedia Earth and Planetary Science* 3 .PP 47 – 52
- Shi, L., Wang, J., Zhang, G., Cheng, X., & Zhao, X. ,(2017), A risk assessment method to quantitatively investigate the methane explosion in underground coal mine. *Process Safety and Environmental Protection*, 107, 317-333.
- Shi, J. Q., Pan, Z., & Durucan, S ,(2014), Analytical models for coal permeability changes during coalbed methane recovery: Model comparison and performance evaluation. *International Journal of Coal Geology*, 136, 17-24.
- Somers J,(2010),Advanced Mining for Sustainable Development, Ha Long Bay, Viet Nam September
- Song X,Xie Zh,(2011),Numerical Simulation and Inversive Study of Gas Flow Field Around Coal Bed Borehole, First International Symposium on Mine Safety Science and Engineering, *Procedia Engineering* 26, pp. 1234-1239
- Stenborg J,(1994),Method for controlling gas migration from a landfill
- Sun, Z., Shi, J., Zhang, T., Wu, K., Miao, Y., Feng, D.,.. & Li, X. ,(2018), The modified gas-water two phase version flowing material balance equation for low permeability CBM reservoirs. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 165, 726-735.
- Taheri, A., Sereshki, F., Ardejani, F. D., & Mirzaghorbanali, A, (2016), Numerical modeling of gas flow in coal pores for methane drainage. *Journal of Sustainable Mining*, 15(3), 95-99.

- Taheri, A., Sereshki, F., Ardejani, F. D., & Mirzaghobanali, A, (2017), Simulation of macerals effects on methane emission during gas drainage in coal mines. *Fuel*, 210, 659-665.
- Tao, Y., Liu, D., Xu, J., Peng, S., & Nie, W,(2016), Investigation of the Klinkenberg effect on gas flow in coal matrices: A numerical study. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 30, 237-247.
- Thakur S,(2016),Comparison of process stability in methane generation from palm oil mill effluent using dairy manure as inoculum , Pages 360-365
- Tian-Xuan H,Zhi-chao J,Feng L,(2012),Optimization of Goaf Gas Drainage Parameters Based on Numerical Simulation Studying Fracture in Overlying Strata, International Symposium on Safety Science and Engineering in China(ISSSE-2012), Procedia Engineering 43 (2012) 269 – 275
- Tony Ma,(2004),hycal energy research laboratories, Canadian Innernational petroleum Conference
- Tutak, M., & Brodny, J, (2019), Forecasting methane emissions from hard coal mines including the methane drainage process. *Energies*, 12(20), 3840.
- United Nations,(2010), Economic commission for europe methane to markets partnership; Best Practice Guidance for EffectiveMethane Drainage and Use in Coal Mines
- U.S Energy Information Administration,(2012), International energy statistic
- Vaziri V, Khademi Hamidi J,Sayadi A.R,(2015),“Estimation of Coal Gas Content Using Geostatistical Methods in GIS Environment: A Case Study From Tabas Coal Mine”, 24th International Mining Congress and Exhibition of Turkey
- Venter J,Stassen P,(1953),Drainage and utilization of firedamp
- Vielstich W, Lamm A, Gasteiger H,(2003),(Eds.), Handbook of Fuel Cells , London
- Vinson, R. P., Thimons, E. D., & Kissell, F. N. ,(1978), *Methane accumulations in coal mine roof cavities* (Vol. 8267). Department of the Interior, Bureau of Mines.
- Wang, C., Yang, S., Jiang, C., Yang, D., Zhang, C., Li, X., ... & Tang, J. ,(2017), A method of rapid determination of gas pressure in a coal seam based on the advantages

of gas spherical flow field. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 45, 502-510.

- Wang, L., & Xu, Y, (2019), Study of the law of gradual change of the influence of hydraulic punching under a rational coal output. *Arabian Journal of Geosciences*, 12(14), 1-11.
- Wang X,Dai S,Zhao L,Peng S,Chou C.L,(2009),Abundances and distribution of minerals and elements in high-alumina coal: fly ash from the Iungar Power Plant, Inner Mongolia, China.*International Journal of Coal Geology*
- Walters C,(2017),*Springer Handbook of Petroleum Technology* pp 359-379
- Wei Y,Bai-quan L,Hai-jin W,(2009),Study of the stress relief and gas drainage limitation of a drilling and the solving mechanism, The 6th International Conference on Mining Science& Technology, *Procedia Earth and Planetary Science* 1
- Wu, K., Feng, G., Liu, Y., Liu, C., Zhang, X., Liu, S., ... & Lu, H ,(2018), Enhanced hydrolysis of mechanically pretreated cellulose in water/CO₂ system. *Bioresour technology*, 261, 28-35.
- Wyman R.E,(1984),Gas resources in Elmworth coal seams, Elmworth: Case Study of a Deep Basin Gas Field, American Association of Petroleum Geologists Memoir
- Xincheng H,Yang S,Zhou X,(2014),“A quantification prediction model of coalbed methane content and its application in Pannan coalfield, Southwest China”, *Journal of Natural Gas Science and Engineering*
- Xinfeng D,(2011),Study on 3D Visualized Technique for Coalbed Methane Integrated Surface and Underground Drainage in Mining Area, *Procedia Earth and Planetary Science* 3, PP338 – 342
- Yang Y,Peng X,Liu X,(2012),the Stress Sensitivity of Coal Bed Methane Wells and Impact on Production, International Conference on Advances in Computational Modeling and Simulation, *Procedia Engineering* 31, pp. 571-579

- Yanwei L, Mingju L, Jianping W, (2011), Regional Outburst-prevention Technique by Gas Predrainage Based on Large Diameter Boreholes along Coal Seams under Deep Mining, First International Symposium on Mine Safety Science and Engineering, Procedia Engineering 410, pp. 623-629
- Yao, B., Ma, Q., Wei, J., Ma, J., & Cai, D. , (2016), Effect of protective coal seam mining and gas extraction on gas transport in a coal seam. *International Journal of Mining Science and Technology*, 26(4), 637-643.
- Yue, G., Liu, H., Yue, J., Li, M., & Liang, W, (2019), Influence radius of gas extraction borehole in an anisotropic coal seam: Underground in- situ measurement and modeling. *Energy Science & Engineering*, 7(3), 694-709.
- Yumin L, Dazhen T, Haohan L, (2012), “Production characteristics and the key factors in high-rank coalbed methane fields: A case study on the Fanzhuang Block, Southern Qinshui Basin, China”, *International Journal of Coal Geology*
- Zhang L, Aziz N, Xren T, Wang Zh, (2011), Influence of temperature on coal sorption characteristics and the theory of coal surface free energy, First International Symposium on Mine Safety Science and Engineering, Procedia Engineering 26
- Zhang L, Aziz N, Ren T, Nemcik J, Wang Zh, (2012), “Permeability testing coal under different Triaxial conditions”, coal operators` Conference, The University of Wollongong
- Zhang, R. H., Zhang, L. H., Wang, R. H., Zhao, Y. L., & Huang, R, (2018), Simulation of a multistage fractured horizontal well in a water-bearing tight fractured gas reservoir under non-Darcy flow. *Journal of Geophysics and Engineering*, 15(3), 877-894.
- Zhang Zh, Li H, Cheng Y, (2011), The Mathematical Model and Numerical Simulation of High Pressure Air Replacement Coal Seam Gas, First International Symposium on Mine Safety Science and Engineering, Procedia Engineering 26, pp. 934-941
- Zhao, Z, (2021), Evaluation of coalbed methane resources in the Huainan-Huaibei coalfield of Anhui Province, China, using an analytic hierarchy process and grey cluster method. *Arabian Journal of Geosciences*, 14(17), 1-11.

- Zhou, H., Liu, J., Xue, D., Yi, H., & Xue, J ,(2012), Numerical simulation of gas flow process in mining-induced crack network. *International Journal of Mining Science and Technology*, 22(6), 793-799.
- Zhou, J., Liang, G., Deng, T., & Zhou, S ,(2017), Optimization design of coalbed methane pipeline network–coupled wellbore/reservoir simulation. *Advances in Mechanical Engineering*, 9(6), 1687814017708905.
- Zou C.N,(2013),Continuous hydrocarbon accumulation over a large area as a distinguishing characteristic of unconventional petroleum: The Ordos Basin, North-Central China

Abstract

Coal has been used as one of the main sources of energy in the world for centuries. One of the major dangers of underground coal mining is the presence of methane gas, which causes many casualties in the world's mines every year. The presence of this gas in the mines, in addition to creating a dangerous and explosive environment for miners, also increases the cost of ventilation. Accordingly, methane drainage before coal mining can reduce the hazards in these mines. In this dissertation, first, using equations, hypotheses and information obtained from Tabas Coal Mine and using COMSOL software, drainage simulation of C1 layer of Parvadeh I Tabas Coal Mine was performed and then Suitable methane boreholes were designed by 3D modeling by COMSOL. Based on the simulations, it was observed that the amount of methane emission varies with increasing or decreasing distance from the boreholes. As inferred from the model, the gas outlet pressure from the boreholes was reduced by 10% in the first to third days of drainage. This value varies depending on the porosity of the coal, the number of boreholes and their diameter and depth. Using two boreholes, the pressure in the coal layer was reduced by 17%. The pressure drop is greater in models with more than two boreholes due to the increased suction power. When the boreholes are 66 mm in diameter and the model is three-borehole, the methane pressure near the boreholes is reduced by 90% on the 15th day of drainage. The graphs show as the longer the boreholes, the faster and in less time the pressure drop occurs. The results were consistent when the results obtained from the new model were compared with the model made for other similar mines.

Keywords: Gas drainage, methane, Coal gas seams, Three-dimensional modelling, COMSOL Software



Shahrood University of Technology

Faculty of Mining, Petroleum and Geophysics Engineering

Ph.D. Thesis in Mineral Exploitation

**Modeling of methane gas outflow from coal Seams into
drainage boreholes and providing a suitable boreholes
pattern and their characteristics**

By: Shadi Jamalan

Supervisors:

Dr. Farhang Sereshki

Dr. Mohammad Ataei

Advisor:

Dr. Mehdi Najafi

March 2022