

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک

رساله دکتری مهندسی استخراج معدن

مدل سازی جریان گاز متان در منافذ زغال سنگ به منظور

عملیات گاززدایی و اعتبارسنجی آن،

مطالعه‌ی موردی: معدن زغال سنگ پروده طبس ایران

نگارنده: عادل طاهری

اساتید راهنما:

دکتر فرهنگ سرشکی

دکتر فرامرز دولتی ارده جانی

استاد مشاور:

دکتر علی میرزاقربانعلی

مهر ۱۳۹۶

شماره: ۹۶/۹۹-۲۰۳۴
تاریخ: ۹۶/۸/۲
ویرایش:

باسمه تعالی



مدیریت تحصیلات تکمیلی

فرم شماره ۱۱: صورت جلسه دفاع از رساله دکتری (Ph.D)

بدینوسیله گواهی می شود آقای عادل طاهری دانشجوی دکتری رشته مهندسی معدن - استخراج معدن به شماره دانشجویی ۹۱۲۵۱۲۵ ورودی مهر ماه سال ۱۳۹۱ در تاریخ ۹۶/۷/۲۶ از رساله خود با عنوان: مدل سازی جریان گاز متان در منافذ زغال سنگ به منظور عملیات گاززدایی و اعتبارسنجی آن، مطالعه‌ی موردی: معدن زغال سنگ پروده طبس ایران دفاع و با اخذ نمره ۱۹ به درجه: عالی نائل گردید.

☐ الف) درجه عالی: نمره ۱۹-۲۰	☐ ب) درجه بسیار خوب: نمره ۱۸-۱۷
☐ ج) درجه خوب: نمره ۱۶-۱۵	☐ د) غیر قابل قبول و نیاز به دفاع مجدد دارد
☐ ه) رساله نیاز به اصلاحات دارد	

ردیف	هیئت داوران	سمت	مرتبه علمی	امضاء
۱	دکتر فرهنگ سرشکی	استاد راهنما	دانشیار	
۲	دکتر فرامرز دولتی ارده جانی	استاد راهنما	استاد	
۲	دکتر علی میرزا قربانعلی	مشاور	مربی	
۳	مهندس حسن مدنی	داور خارجی	استادیار	
۴	دکتر محمد عطایی	داور داخلی	استاد	
۵	دکتر سید محمد اسماعیل جلالی	داور داخلی	دانشیار	
۶	دکتر امین روشندل کاهو	نماینده تحصیلات تکمیلی دانشگاه	دانشیار	

مدیر محترم تحصیلات تکمیلی دانشگاه:

ضمن تأیید مراتب فوق مقرر فرمائید اقدامات لازم بعمل آید.

رئیس دانشکده و رئیس هیئت داوران: دکتر علیرضا عرب امیری

تاریخ و امضاء:



صدافرشته بوسه بر آن دست می زند

کز کار خلق یک گره بسته واکند

سپاس مخصوص خداوند مهربان که به انسان توانایی و دانایی بخشد تا به بندگانش شفقت ورزد، مهربانی کند و در حل مشکلاتشان یاری شان نماید. از راحت خویش بگذرد و آسایش هم نوعان را مقدم دارد، با او معامله کند و در این خلوص انباز نکیرد و خوش باشد که پروردگار سمیع و بصیر است.

تقدیم به همسر:

که سایه مهربانش سایه سازندگیم می باشد، او که اسوه صبر و تحمل بوده و مشکلات مسیر را برایم تسهیل نمود.

پاس

پاس اوراکہ در سایہ مهر و عنایتش قدمی هر چند کوچک، برای رسیدن به ذره ای از علم بیکرانش بیدارم.

از پدر و مادر عزیزم که بهواره پستیان ادامه تحصیل بوده اند سپاسگزارم.

از اساتید راهبانی گرامی جناب آقای دکتر فرہنگ سرکشی و جناب آقای دکتر فرامرزدولتی ارادہ جانی کہ در طول انجام این پژوهش با صبر و حوصلہ و علاقہ مندی در ہمہ زمینہ ما

راہبانی باور سادات ارزندہ خود مایاری نمودند صمیمانہ شکر و قدردانی می نمایم.

از استاد مشاور عزیزم جناب آقای دکتر علی میرزا قربانعلی کہ با کمکشان روند اتمام پژوهش را تسریع نمودند شکر می نمایم.

صمیمانہ از جناب آقای مهندس حسن مدنی، جناب آقای دکتر محمد عطایی و جناب آقای دکتر سید محمد اسماعیل جلالی کہ زحمات داوری پایان نامہ را بر عہدہ داشتند قدردانی می نمایم.

از شرکت زغال سنگ پرودہ طبس بہ خصوص جناب آقای مهندس کریمی ثانی، مدیر عامل محترم شرکت کہ اجازہ نمونہ برداری و استفادہ از تحقیقات پیشین صورت گرفته موجود در

شرکت را بہ اینجانب دادند شکر و قدردانی می نمایم.

از مسئول دفتر اسکندہ جناب آقای شاہ حسینی بابت تلاش ہای دلسوزانہ در روند انجام امور اداری نہایت شکر و قدردانی را دارم.

در پایان از دوستان عزیزم، بخصوص جناب آقای دکتر امیر صفاری کہ از ہنگامی و بہکاریشان استفادہ نمودم نہایت شکر و قدردانی را دارم.

عادل طاحری

مہر ماہ ۱۳۹۶

تعهد نامه

اینجانب عادل طاهری دانشجوی دوره دکتری مهندسی معدن - استخراج معدن دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه مدل سازی جریان گاز متان در منافذ زغال سنگ به منظور عملیات گاززدایی و اعتبارسنجی آن، مطالعه‌ی موردی: معدن زغال سنگ پروده طبس ایران تحت راهنمایی جناب آقای دکتر فرهنگ سرشکی و دکتر فرامرز دولتی ارده جانی متعهد می شوم:

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

تاریخ

امضای دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

- کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج، کتاب، برنامه های رایانه ای، نرم افزار ها و تجهیزات ساخته شده است) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد. این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود.
- استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی باشد.

چکیده:

یکی از مهمترین مشکلاتی که در استخراج زیرزمینی زغال اتفاق می‌افتد، انفجار ناگهانی متان در هنگام استخراج است. برای کاهش احتمال وقوع این حادثه و کاهش میزان انتشار گاز متان، باید عملیات گاززدایی قبل از استخراج را انجام داد. هدف اصلی این رساله، تجزیه و تحلیل جریان گاز متان در یک بلوک زغالی است تا میزان سرعت و فشار حرکت مولکول گاز جهت گاززدایی متان از زغال‌سنگ محاسبه و مدل شود. مدل هندسی که در این مطالعه از آن استفاده شد، دارای مفروضات مشابه زغال‌سنگ می‌باشد. بدین منظور از معدن مورد مطالعه که معدن زغال‌سنگ پروده طبس در ایران می‌باشد نمونه‌های زغال‌سنگ انتخاب شد. سپس بعد از مغزه‌گیری، میزان نفوذپذیری، تخلخل، وزن مخصوص آن اندازه‌گیری شد. همچنین با استفاده از تصویربرداری میکروسکوپی به شناسایی ماسرال‌های آن جهت تعیین تاثیر ماسرال بر میزان نفوذپذیری تعیین شد. با استفاده از سی تی اسکن فاصله‌داری درزه‌های زغال مشخص گردید. پارامترهای لازم برای مدل‌سازی از طریق آزمایشات تجربی به دست آمد. برای مدل‌سازی، یک بلوک زغالی که توسط درزه‌های اصلی احاطه شده، مورد مطالعه قرار گرفت. در این‌باره حرکت یک سیال مانند گاز متان در یک محیط متخلخل همانند زغال‌سنگ مدل گردیده و فرآیند حرکت مولکول‌های گاز شبیه‌سازی شده است. حل عددی در نرم‌افزار کامسول مولتی‌فیزیکس انجام شد. سرعت حرکت مولکول‌های گاز متان در نمونه زغال پروده طبس 0.0269 متر بر ثانیه حاصل شد. در تحقیقاتی که قبلاً صورت گرفته، این مقدار 0.005 متر بر ثانیه محاسبه شده که از نظر اعتبار سنجی نیز نتایج قابل قبول می‌باشد.

کلمات کلیدی:

مدل‌سازی عددی - گاززدایی متان از زغال‌سنگ - جریان گاز - تخلخل - نفوذپذیری - ماسرال

مقالات مستخرج از رساله

• مقالات ISI:

- Taheri A, Sereshki F, Doulati F.A, Mirzaghorbanali A, (2017), Simulation of macerals effects on methane emission during gas drainage in coal mines, Journal of Fuel, vol 210, pp. 659-665
- Taheri A, Sereshki F, Doulati F.A, Mirzaghorbanali A, (2017), Determining the spacing of coal cleats by computer based image processing for gas drainage modeling , Journal of Transylvanian Review , Online press

• مقالات کنفرانسی و علمی- ترویجی

- Taheri A, Sereshki F, Doulati F.A, Mirzaghorbanali A, (2016), Numerical modeling of gas flow in coal pores for methane drainage, Journal of Sustainable Mining , Vol 15, pp. 95-99
- Taheri A, Sereshki F, (2016), Estimate of optimum horizontal well depth for gas drainage using a numerical method in the tabas Coal Mine, Coal Operators Conference, pp.398-402, University of Wollongong, Australia.

- طاهری ع، سرشکی ف، ۱۳۹۴، افزایش ایمنی و راندمان اقتصادی در تولید گاز متان به عنوان سوخت از معدن زغال سنگ طبس، مجله تکنولوژی بهره وری از منابع زیرزمینی، دانشگاه آزاد اسلامی شاهرود، فصل نامه شماره ۲، اردیبهشت ۹۴.

فهرست مطالب

فصل اول کلیات	۱
۱-۱- بیان مساله	۲
۲-۱- ضرورت انجام تحقیق	۳
۳-۱ اهداف تحقیق	۶
۴-۱- جنبه های نوآوری تحقیق	۶
۵-۱- ساختار تحقیق	۷
فصل دوم گاززدایی متان از زغال	۹
۱-۲- مقدمه	۱۰
۲-۲- اهداف کنترل گاز متان	۱۱
۳-۲- مصارف گاز متان	۱۵
۴-۲- هزینه ها و مسائل اقتصادی	۱۷
۵-۲- مسائل زیست محیطی و اجتماعی	۱۸
۶-۲- جمع آوری گاز متان	۲۱
۷-۲- اصول روشهای گاززدایی متان در سراسر دنیا	۲۳
۸-۲- اصول کنترل گاز	۲۵
۹-۲- مبانی روشهای قبل از استخراج	۲۶
۱۰-۲- اصول گاززدایی متان ضمن استخراج	۲۹
۱۱-۲- ایجاد گاز در زغال سنگ	۳۳
۱۲-۲- فرآیند انتشار گاز	۳۳
۱۳-۲- گازخیزی نسبی از معادن زغال سنگ	۳۵
۱۴-۲- ویژگی ها و پارامترهای انتشار گاز از معادن زغال سنگ	۳۵
۱۵-۲- اندازه گیری مقدار گاز درجای زغال	۳۸

۴۱	۲-۱۶- برآورد عملی جریان گاز در معادن زغال سنگ
۴۲	۲-۱۷- جمع بندی
۴۳	فصل سوم سابقه تحقیق
۴۴	۳-۱- مقدمه
۴۴	۳-۲- مروری بر تحقیقات انجام شده
۴۵	۳-۲-۱- متان لایه زغال
۴۷	۳-۲-۲- گاززدایی متان از زغال سنگ
۵۱	۳-۲-۳- نفوذپذیری و خروج گاز متان از زغال
۵۴	۳-۲-۴- مدل سازی
۵۸	۳-۲-۵- ایمنی و ذخیره گاز در لایه های زمین
۶۰	۳-۳- جمع بندی
۶۱	فصل چهارم معدن زغال سنگ طبس خصوصیات زغال و آزمایش های مربوط به آن
۶۲	۴-۱- آشنایی
۶۲	۴-۲- بخش اول؛ پتروگرافی زغال سنگ
۶۳	۴-۲-۱- عناصر اصلی تشکیل دهنده زغال
۶۵	۴-۲-۲- شاخص های مهم تعیین کیفیت زغال
۶۸	۴-۲-۳- معدن زغال پروده طبس
۷۰	۴-۲-۴- بررسی پتروگرافی زغال سنگ
۷۶	۴-۲-۵- جمع بندی بخش اول
۷۸	۴-۳- بخش دوم؛ آزمایشات تعیین خصوصیات زغال سنگ
۷۹	۴-۳-۱- تخلخل
۸۰	۴-۳-۲- تخلخل مطلق
۸۰	۴-۳-۳- تخلخل موثر
۸۲	۴-۳-۴- اندازه گیری آزمایشگاهی تخلخل

۸۶	۴-۳-۵- تخلخل نمونه های زغال طبس
۸۷	۴-۳-۶- نفوذپذیری
۹۴	۴-۳-۷- اثر کلینکنبرگ
۱۰۰	۴-۳-۸- اندازه گیری نفوذپذیری
۱۰۴	۴-۳-۹- عوامل تاثیرگذار بر اندازه گیری های نفوذپذیری
۱۰۴	۴-۳-۱۰- اثر سر خوردن گاز بر اندازه گیری های نفوذپذیری
۱۰۶	۴-۳-۱۱- جمع بندی بخش دوم
۱۰۶	۴-۴- بخش سوم؛ ماسرال ها
۱۰۸	۴-۴-۱- مطالعات میکروسکوپی
۱۱۵	۴-۴-۲- قابلیت انعکاس نوری زغال سنگ ها
۱۱۶	۴-۴-۳- انواع زغال سنگ ها از نظر تعداد ماسرال
۱۱۷	۴-۴-۴- ماسرال ها و ارتباط آنها با زغال سنگ
۱۲۰	۴-۴-۵- تعیین نفوذپذیری زغال سنگ با توجه به ماسرال های آن
۱۲۳	۴-۴-۶- نتایج آزمایش نفوذپذیری
۱۲۸	۴-۴-۷- تخلخل نمونه های معدنی زغال طبس
۱۲۸	۴-۴-۸- طبقه بندی تخلخل
۱۲۸	۴-۴-۹- انواع تخلخل بر مبنای اندازه
۱۲۹	۴-۴-۱۰- عوامل موثر در تخلخل اولیه
۱۳۰	۴-۴-۱۱- محاسبه تخلخل نمونه زغال
۱۳۲	۴-۴-۱۲- جمع بندی بخش سوم
۱۳۳	فصل پنجم پردازش تصویر و درزه داری
۱۳۴	۵-۱- آشنایی
۱۳۴	۵-۲- درزه های زغال سنگ
۱۳۷	۵-۳- مقدمه ای بر پردازش تصویر دیجیتال

۱۳۸	۵-۳-۱- پردازش تصویر
۱۳۸	۵-۳-۲- فضای رنگ
۱۳۹	۵-۳-۳- مراحل پردازش تصویر
۱۴۱	۵-۴- کاربرد پردازش تصویر در علوم زمین و اکتشاف ذخایر معدنی
۱۴۱	۵-۵- نمونه گیری و تصویر برداری
۱۴۷	۵-۶- جمع بندی
۱۴۹	فصل ششم مدل سازی
۱۵۰	۶-۱- آشنایی
۱۵۱	۶-۲- مدل سازی ریاضی
۱۵۲	۶-۳- نرم افزار کامسول
۱۵۳	۶-۴- فرضیات مدل
۱۵۵	۶-۵- معادلات مدل
۱۶۰	۶-۶- مدل سازی
۱۶۰	۶-۶-۱- هندسه مدل
۱۶۱	۶-۶-۲- جنس مواد
۱۶۳	۶-۶-۳- معادلات عددی مدل
۱۶۳	۶-۶-۴- مش بندی مدل
۱۶۴	۶-۶-۵- اجرای مدل و نتایج
۱۶۶	۶-۶-۶- اعتبار سنجی و مقایسه با نتایج تحقیقات قبلی
۱۷۰	۶-۷- جمع بندی
۱۷۱	فصل هفتم نتیجه گیری و پیشنهادها
۱۷۲	۷-۱- نتیجه گیری
۱۷۳	۷-۲- پیشنهادها
۱۷۵	منابع

فهرست اشکال

- شکل ۱-۲- تشکیل مخلوط‌های انفجاری ۱۳
- شکل ۲-۲- توزیع مصرف گاز متان درون زغال در پروژه‌های صورت گرفته در کل دنیا ۱۶
- شکل ۳-۲- شمایی از سیستم گاززدایی متان از یک معدن زیرزمینی زغال‌سنگ و امکانات سطحی ۲۲
- شکل ۴-۲- شمایی از گاززدایی متان از زغال‌سنگ توسط حفاری از سطح ۲۸
- شکل ۵-۲- روش‌های مختلف گاززدایی متان ضمن استخراج ۳۰
- شکل ۶-۲- تشکیل منطقه تخریب در بالای لایه استخراج شده زغال‌سنگ و لایه‌های شکسته شده ۳۴
- شکل ۷-۲- تجهیزات اندازه‌گیری مقدار گاز درجا بر اساس استاندارد استرالیا ۳۹
- شکل ۸-۲- نمودار آماده‌سازی نمونه زغال و تست انقباض ۴۰
- شکل ۹-۲- نمونه زغالی به همراه تجهیزات اندازه‌گیری ۴۱
- شکل ۱-۴- موقعیت سازندها در منطقه پروده I نسبت به یکدیگر بر روی عکس ماهواره ای ۶۹
- شکل ۲-۴- پراکندگی حوضه‌های زغالی در ایران ۶۹
- شکل ۳-۴- قبل از کک شوندگی (سمت چپ) و درحین کک شوندگی (سمت راست) ۷۰
- شکل ۴-۴- چگالی سنج الکتریکی برای تعیین حجم کلی نمونه‌های کوچک مغزه ۸۴
- شکل ۵-۴- حجم سنج راسل برای تعیین حجم کلی و حجم ذرات نمونه‌های سنگ ۸۴
- شکل ۶-۴- نحوه عملکرد تخلخل سنج استیون ۸۵
- شکل ۷-۴- تخلخل سنج مرکز توسعه گاز معادن ۸۶
- شکل ۸-۴- دستگاه تخلخل سنج پروپرم شرکت وینسی ۸۷
- شکل ۹-۴- مدل جریان خطی دارسی ۹۰
- شکل ۱۰-۴- نمونه ای معرف محیط متخلخل ۹۲
- شکل ۱۱-۴- اثر کلینکنبرگ در اندازه‌گیری‌های نفوذپذیری گاز ۹۶
- شکل ۱۲-۴- اثر نفوذپذیری بر بزرگی اثر کلینکنبرگ ۹۶
- شکل ۱۳-۴- اثر فشار گاز بر نفوذپذیری‌های گازهای مختلف ۹۶
- شکل ۱۴-۴- مدل جریان شعاعی ۹۸

- شکل ۴-۱۵- دستگاه اندازه گیری نفوذپذیری ۱۰۱
- شکل ۴-۱۶- دستگاه نفوذپذیری سنج AGP ۱۰۲
- شکل ۴-۱۷- اندازه گیری های مختلف نفوذپذیری با استفاده از گازهای هیدروژن، نیتروژن ۱۰۵
- شکل ۴-۱۸- رابطه ریاضی بین فاکتور کلینکنبرگ و نفوذپذیری ۱۰۶
- شکل ۴-۱۹- اجزاء قابل رؤیت باندهای بیتومینی در بررسی میکروسکپی و ماکروسکپی ۱۱۲
- شکل ۴-۲۰- نمایش میکروسکپی باندهای روشن و تیره ۱۱۳
- شکل ۴-۲۱- نمایش میکروسکپی ماسرال های ویتروینایت و فوزینیت و اینترتیت ۱۱۹
- شکل ۴-۲۲- نمونه زغال حاوی ویتروینایت، فوزینایت و کانی های رسی ۱۲۰
- شکل ۴-۲۳- عکسبرداری از مقاطع نازک تهیه شده از زغال- آزمایشگاه دانشگاه صنعتی شاهرود ۱۲۱
- شکل ۴-۲۴- ماسرال ها و مواد معدنی موجود در یک نمونه زغال سنگ پروده طبس ۱۲۲
- شکل ۴-۲۵- نمونه های زغالی آماده شده از معدن زغال سنگ طبس ۱۲۵
- شکل ۴-۲۶- مراحل تهیه مغزه از نمونه های زغال، انیستیتو نفت دانشکده فنی دانشگاه تهران ۱۲۶
- شکل ۴-۲۷- دستگاه تعیین نرخ نفوذپذیری AGP، آزمایشگاه پژوهشگاه صنعت نفت ۱۲۶
- شکل ۴-۲۸- نفوذپذیری محاسبه شده برای نمونه های زغال طبس در دو فشار متفاوت ۱۲۷
- شکل ۴-۲۹- دستگاه پروپرم، انیستیتو مهندسی نفت پردیس دانشکده های فنی دانشگاه تهران ۱۳۱
- شکل ۵-۱- درزه های فرعی و اصلی زغال سنگ و ارتباط میان آنها ۱۳۵
- شکل ۵-۲- درزه های افقی و عمودی درون زغال ۱۳۶
- شکل ۵-۳- نمونه های گرفته شده از معدن زغال پروده I طبس جهت شناسایی فاصله داری درزه ها ۱۴۲
- شکل ۵-۴- نمونه زغال در حال سی تی اسکن ۱۴۳
- شکل ۵-۵- سی تی اسکن انجام شده بر روی مقاطع عمودی و افقی نمونه زغالی ۱۴۴
- شکل ۵-۶- پردازش تصویر بر روی مقاطع زغال و درزه های مشخص شده بر روی عکس ها در یک مقطع ۱۴۵
- شکل ۵-۷- فاصله داری درزه های افقی و عمودی پس از پردازش تصاویر توسط رایانه ۱۴۶
- شکل ۶-۱- جریان گاز متان درون تشکیلات ساختاری زغال ۱۵۱
- شکل ۶-۲- هندسه و داده های مورد نیاز مدل ۱۶۱
- شکل ۶-۳- منافذ دارای گاز متان و بلوک زغالی مدل شده ۱۶۱

- شکل ۶-۴- مش بندی انجام شده بر روی مدل توسط نرم افزار و اطلاعات مربوط به مش بندی ۱۶۳
- شکل ۶-۵- سرعت مولکول‌های گاز متان درون بلوک زغالی پس از اجرای مدل ۱۶۵
- شکل ۶-۶- فشار مولکول‌های گاز متان درون بلوک زغالی پس از اجرای مدل ۱۶۶
- شکل ۶-۷- انتخاب مقطع بر روی زغال جهت نمایش تغییرات فشار و سرعت ۱۶۷
- شکل ۶-۸- نمودار سرعت برای یک منفذ در نمونه زغال طبس ۱۶۸
- شکل ۶-۹- نمودار سرعت برای یک درزه در نمونه زغال طبس ۱۶۸
- شکل ۶-۱۰- نمودارهای سرعت و فشار برای یک منفذ و درزه در مدل آنالیز شده ۱۶۹
- شکل ۶-۱۱- مدل نهایی از حرکت مولکول‌های گاز درون یک درزه برای اعتبارسنجی ۱۶۹

فهرست جداول

جدول ۱-۲ - حوادث مهم انفجار گاز متان - بعد از سال ۲۰۰۰	۲۰
جدول ۲-۲ - روش‌های مختلف گاززدایی و مزایا و معایب هر کدام	۲۴
جدول ۱-۳ - تعدادی از تحقیقات صورت گرفته در زمینه متان لایه زغال سنگ	۴۵
جدول ۲-۳ - تعدادی از تحقیقات انجام گرفته در زمینه گاززدایی متان از زغال سنگ	۴۸
جدول ۳-۳ - تعدادی از تحقیقات صورت گرفته در زمینه نفوذپذیری زغال و تولید گاز متان	۵۲
جدول ۴-۳ - تحقیقات صورت گرفته در زمینه مدل‌سازی گاززدایی متان از زغال سنگ	۵۴
جدول ۵-۳ - مختصری از تحقیقات صورت گرفته در زمینه تزریق گاز به درون لایه زغال	۵۹
جدول ۱-۴ - ماکزیمم و متوسط گازخیزی اجزا تشکیل دهنده گاز	۷۵
جدول ۲-۴ - مقدار متوسط گازخیزی طبیعی لایه‌های مختلف معدن پروده نسبت به عمق	۷۸
جدول ۳-۴ - مقایسه نفوذپذیری‌های مشاهده شده در ماتریس و مغزه کامل نمونه‌های سنگ آهک	۱۰۳
جدول ۴-۴ - بعضی از خواص سنگ شناسی زغال به روش استاپ	۱۱۲
جدول ۵-۴ - روش پیشنهادی استاپ - هرلن جهت نامگذاری ترکیبات زغال	۱۱۴
جدول ۶-۴ - نتایج حاصل از آزمایش‌های ماسرالی نمونه‌ها	۱۲۳
جدول ۷-۴ - نفوذپذیری نمونه‌های زغال سنگ پروده برای گاز زغال تحت بارگذاری محوری ثابت	۱۲۷
جدول ۸-۴ - تخلخل محاسبه شده از طریق دستگاه پروپرم، انیستیتو مهندسی نفت دانشکده فنی	۱۳۱
جدول ۱-۵ - فاصله داری بدست آمده برای درزه‌های افقی و عمودی نمونه زغال سنگ پروده طبس ایران	۱۴۶
جدول ۱-۶ - پارامترهای پیش فرض گاز متان در نرم افزار کامسول	۱۵۹
جدول ۲-۶ - پارامترهای موثر در میزان حرکت مولکول‌های گاز	۱۵۹
جدول ۳-۶ - اطلاعات حاصل از مش‌بندی بر روی مدل	۱۶۴

فصل اول

کلیات

۱-۱- بیان مساله

زغال سنگ یکی از منابع مهم تولید انرژی اولیه در دو قرن گذشته بوده و برای تأمین انرژی در آینده نیز برای زغال سنگ حساب ویژه ای باز شده است. متان منتشر شده از زغال سنگ به هنگام استخراج، شرایط ناامنی را برای بسیاری از معادن زیرزمینی زغال ایجاد می کند. مدیریت این گاز منتشر شده نگرانی های مربوط به ایمنی استخراج این ماده انرژی را کاهش می دهد. متان منتشر شده ضمن تهویه معدن به اتمسفر وارد شده و بدون اینکه از این منبع انرژی مهم استفاده مطلوب شود، از بین می رود. به علاوه، انتشار این گاز به اتمسفر (به عنوان گاز گلخانه ای^۱ GHG) باعث تغییرات آب و هوایی شدید و سبب گرم شدن کره زمین می شود. خوشبختانه راه حل های مناسب جلوگیری از این مشکل وجود دارد و در حال استفاده است.

اگر چه فناوری ویژه استفاده از گاز متان زغال سنگ^۲ پیشرفت کرده، اما مدیریت آن در معادن بسیاری از کشورها هنوز به صورت فراگیر ایجاد نشده است. کتاب ها و منابع بسیاری برای گاز کشی متان از زغال تهیه شده است که می توان کتاب "گاززدایی متان از تشکیل تا لوله انتقال" را نام برد که مجموعه ای از مقالات مفید در این زمینه بوده و کمک شایانی در آشنایی و نحوه عملیات گاززدایی متان از زغال می نماید (Thakur et al, 2014). اسموت و پرات نیز در کتاب خود نحوه گاززدایی و گاززدایی متان را بررسی نموده و معادنی که در حال انجام این عملیات هستند را مورد مطالعه قرار داده اند (Smoot and Pratt, 1979).

استفاده روزافزون از زغال سنگ برای کشورهای در حال رشد و کشورهای صنعتی قابل پیش بینی است. امروزه از زغال سنگ برای تأمین ۲۵ درصد از انرژی اولیه جهان، ۴۰ درصد از تولید برق جهان و تقریباً ۷۰ درصد از تولید فولاد و آلومینیوم دنیا استفاده می شود. آژانس بین المللی

¹ Green House Gas (GHG)

² Coal Bed Methane

انرژی^۱ (IEA) رشد تقاضای ۹۳ درصدی انرژی را تا سال ۲۰۳۰ میلادی پیش‌بینی کرده است که در این میان کشورهای چین و هند بیشترین تقاضا را داشته و از زغال‌سنگ به عنوان مهم‌ترین منبع تولید انرژی یاد کرده‌اند (ECE, Energy Series, 2010).

با توجه به مطالب گفته شده، درخواست روزافزون زغال باعث استخراج بیشتر این ماده معدنی شده و با به اتمام رسیدن منابع سطحی و نزدیک زمین، استخراج زغال‌سنگ‌های عمیق‌تر آغاز گردیده است. این منابع به طور طبیعی دارای گاز متان بیشتری بوده و بر همین اساس، شرکت‌های معدنی نیز نیاز بیشتر به ایجاد شرایط امن‌تر را احساس می‌کنند. علاوه بر این، قوانین حفظ محیط‌زیست نیز به مراتب دشوارتر از قبل شده است. گاززدایی متان بهترین راه حل برای جلوگیری از بروز این مشکلات است. گاززدایی باعث کاهش حوادث مربوط به گاز متان و انفجار آن شده و همچنین در کمک به حفاظت از محیط‌زیست از طریق کاهش تولید گازهای گلخانه‌ای کمک شایانی می‌شود.

پر واضح است که با توجه به عدم تجربه مناسب و کافی در بحث گاززدایی متان از زغال‌سنگ در ایران و مخصوصاً معدن زغال‌سنگ پروده طبس که دارای گازخیزی بالا و حجم استخراج زیاد می‌باشد، لذا تحقیق و بررسی پارامترهای موثر در گاززدایی و همچنین مدل‌سازی حرکت مولکول‌های گاز متان درون زغال می‌تواند در جهت فعال‌سازی این عملیات در معدن کمک شایانی نماید.

۲-۱- ضرورت انجام تحقیق

تقریباً تمامی لایه‌های زغال حاوی گاز هستند. این گازها ممکن است توسط فعالیت‌های استخراج از معادن زیرزمینی منتشر شوند (Markowski, 1998). گاز متان درون زغال‌سنگ اغلب مسبب انفجار در یک معدن زغال‌سنگ می‌شود (Macdonald, 1990). این گاز عمدتاً از متان با مقادیر جزئی از هیدروکربن‌های سنگین‌تر، دی‌اکسیدکربن، نیتروژن، اکسیژن، هیدروژن و هلیوم تشکیل شده است (Karen et al, 1969). گاز درون زغال‌سنگ به عنوان یک سوخت با جنبه‌های

¹ International Energy Agency (IEA)

مثبت زیست محیطی است که پس از سوختن به دی اکسید کربن، آب و مقادیر کمی از اکسید سولفور، هیدروکربن ها و منواکسید کربن تجزیه می شود (Holditch, 1989). متان در درجه اول در خلل و فرج طبیعی زغال و منافذ ریز ماتریس زغال سنگ انباشته شده است و مقداری نیز به صورت جذب در مولکول های زغال می باشد (Wyman, 1984). از این رو، میزان انتشار در درجه حرارت موجود در معادن بسیار پائین است (Mc Cants et al, 2001). پتانسیل جذب متان توسط زغال سنگ بسیار بالا می باشد. از این رو زغال سنگ ها می توانند مقادیر بسیاری از گاز متان را درون خود انباشته سازند. برای مثال، مقدار ۰/۴۵ کیلوگرم از زغال سنگ دارای ۴۶۵۰۰ مترمربع سطح جذب می باشد. همچنین تخمین زده می شود که زغال سنگ طبس ایران حاوی ۱۸ مترمکعب بر تن گاز آزاد شده باشد. عیار گاز آزاد شده می تواند تا ۳۲ درصد در زغال های بیتومینه بالا رود (Soeder, 1991). دمای زغال سنگ نیز بر میزان جذب و واجذب گاز متان مهم می باشد (Zhang et al, 2011). متان موجود در زغال سنگ را می توان یک منبع گاز قابل توجه در نظر گرفت. اگر چه زغال سنگ یک محیط متخلخل بوده و دارای نفوذپذیری بالا می باشد و ساختار منافذ آن به مراتب پیچیده تر از لایه های معمولی دیگر سنگ ها می باشد (Laubach et al, 1991). 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 نمود (Kendall and Briggs, 1993). شکستگی های طبیعی و نفوذپذیری زغال باعث ایجاد مسیری برای جریان گاز و آب درون لایه زغال سنگ می شوند. لایه زغال همانند دیگر سنگ های رسوبی، دارای درزه هایی می باشند که این درزه ها به صورت سیستماتیک درون لایه زغال ایجاد شده اند. سیستم درزه داری سنگ بستر از خصوصیات مهم منبع نگه دارنده گاز می باشد که تأثیر فراوانی بر اقتصادی بودن گاززدایی متان از زغال سنگ می گذارد که می تواند به موفقیت آمیز بودن پروژه یا شکست آن منجر گردد و در برنامه پیشرفت پروژه گاززدایی نیز تأثیرگذار می باشد. درزه های درون زغال باعث افزایش نفوذپذیری زغال می شوند و از قانون داری برای جریان آب و گاز تبعیت می کنند

(Gray, 1987; Harpalani and Schraufnagel, 1990). دو مجموعه از درزه‌ها با عنوان درزه‌های طولی و عرضی بر یکدیگر عمود بوده و سیستم درزه زغال را تشکیل می‌دهند. درزه‌های طولی معمولاً مسطح، دارای شکستگی صاف که قسمت اصلی سیستم درزه‌ها را تشکیل می‌دهند (Kendall and Briggs, 1993). نفوذپذیری گاز درون زغال در جهت درزه طولی ممکن است ۳ الی ۱۰ برابر بیشتر نسبت به دیگر جهت‌ها باشد (Dhir et al, 1991). در اینجا دو فاز از جریان گاز به درون چاه مکش گاز وجود دارد. در مرحله اول، متان جذب شده باید از طریق منافذ ریز از ماتریس زغال‌سنگ منتشر شده و به درزه‌ها برسد و در مرحله دوم جریان گاز باید از طریق سیستم درزه‌های طولی و عرضی عبور کرده و بر طبق اختلاف فشار به چاه گاززدایی برسد (جریان داری) (Harpalani and Schraufnagel, 1990). جریان گاز متان از زغال‌سنگ به نفوذپذیری مؤثر زغال بستگی دارد. بر طبق برخی از نتایج مدل‌های کامپیوتری و ریاضی، فاصله میان درزه‌ها و منافذ در زغال، نقشی اساسی را در گاززدایی متان از زغال ایفا می‌نمایند.

با توجه به مطالب گفته شده بررسی نحوه جریان گاز متان در طول درزه‌های زغال‌سنگ در زمان گازدهی مهم می‌باشد. از آنجا که در یک زغال‌سنگ دست نخورده، مولکول‌های متان در منافذ ریز از ماتریس زغال باقی مانده‌اند، می‌توان با تحقیق و بررسی بر روی منافذ و درزه‌های موجود در زغال و نحوه حرکت گاز در این شکستگی‌ها، اطلاعات مفید و کاربردی در زمینه گاززدایی متان از لایه‌های زغالی بدست آورد. لذا رساله حاضر با عنوان " مدل‌سازی جریان گاز متان در منافذ زغال‌سنگ به منظور عملیات گاززدایی آن از زغال‌سنگ و اعتبارسنجی آن: مطالعه‌ی موردی معدن زغال‌سنگ پروده طبس ایران " پیشنهاد شد.

۳-۱- اهداف تحقیق

هدف اصلی از انجام این رساله مدل سازی ماتریس زغال، منافذ و شکستگی ها در قالب نرم افزار COMSOL بوده تا بتوان حرکت مولکول های گاز متان درون یک لایه زغالی را مورد بررسی قرار داد. با انجام این هدف کلی و ایجاد مدل، می توان بر روی موارد زیر تحقیق نموده و اطلاعات مفیدی در زمینه گاززدایی متان از زغال حاصل نمود:

- تأثیر فاصله درزه ها از یکدیگر در تولید گاز متان و حرکت گاز در لایه های زغال سنگ
- مشاهده تأثیرات غلظت، سرعت و عیار گاز متان در انتشار این گاز از لایه های زغال سنگ در معادن
- تخمین مدت زمان لازم برای حرکت مولکول های گاز متان جهت انتشار از محل منفذ به دیواره کارگاه استخراجی
- تأثیر میزان تخلخل و نفوذپذیری بر جریان گاز متان درون زغال سنگ
- شناسایی انواع ماسرال های زغال و بررسی میزان نفوذپذیری هر کدام از ماسرال ها
- ایجاد بستری مناسب برای تحقیقات بر روی زغال های معادن مختلف و انواع زغال از نظر ماسرال های تشکیل دهنده آن و نوع زغال بر روی مقدار انتشار گاز متان

۴-۱- جنبه های نوآوری تحقیق

- مهمترین جنبه های نوآوری این تحقیق را می توان به شرح زیر خلاصه نمود:
- ارائه مدلی بر اساس شرایط و پارامترهای واقعی حاصل شده از آنالیزهای مختلف جهت مشاهده جریان گاز متان درون زغال سنگ
 - استفاده از پردازش تصویر جهت محاسبه میزان درزه داری زغال سنگ

- انجام مطالعه گسترده بر روی ماسرال های زغال و تأثیر آنها بر میزان نفوذپذیری و در

نهایت میزان گاززدایی متان در زغال

- ارائه راهکاری برای پیش‌بینی میزان تهویه مورد نیاز در معادن زغال

۵-۱- ساختار تحقیق

تحقیق حاضر به منظور ایجاد مدلی جهت مشاهده جریان گاز متان درون منافذ زغال‌سنگ

انجام می‌گیرد. این تحقیق در ۷ فصل نگارش شده است که عبارتند از:

فصل ۱، فصل پیش رو، مقدمه‌ای بر تحقیق پیشنهادی و اهمیت آن در عملیات گاززدایی متان

است. تعریف مسأله تحقیق، ضرورت، هدف از انجام و همچنین نوآوری‌های انجام این تحقیق در این فصل آمده است.

فصل ۲، به معرفی گاززدایی متان از زغال اختصاص دارد. در این فصل کلیاتی در مورد عملیات

گاززدایی، مشکلات گاز متان در معادن، نحوه جمع‌آوری گاز در معادن زیرزمینی، هزینه‌ها و مسائل اقتصادی، فرآیند انتشار گاز و همچنین اهداف کلی کنترل گاز متان مورد بحث قرار می‌گیرد. این فصل تا حدودی پیش زمینه لازم برای شناخت اهداف اصلی این تحقیق را فراهم می‌سازد.

در فصل ۳، به مرور جامع پیشینه تحقیق و همچنین بررسی متون علمی موجود و تحقیقات

گذشته در زمینه گاززدایی متان پرداخته می‌شود. دسته‌بندی مطالعات قبلی گام اساسی در جهت تعیین موقعیت این تحقیق نسبت به سایر مدل‌های موجود، شناخت نقاط ضعف و قوت آنها به منظور کاهش نواقص مدل‌های پیشنهادی و استخراج پارامترهای لازم در ارزیابی و پیش‌بینی میزان سرعت گاز در ریزدرزها می‌باشد.

در فصل ۴، به مطالعه خصوصیات زغال‌سنگ، پتروگرافی و شناسایی ماسرال های زغال

پرداخته می‌شود. همچنین پارامترهای تخلخل و نفوذپذیری زغال مورد مطالعه قرار گرفته و با استفاده

از نمونه های برداشت شده از معدن زغال طبس، این پارامترها از طریق آزمایشات تجربی محاسبه می شود. براساس عکس برداری میکروسکوپی از ماسرال ها ، انواع مختلف ماسرال درون نمونه زغال تعیین شده و سپس میزان نفوذپذیری هر کدام از نمونه های زغال محاسبه می شود.

در فصل ۵، با استفاده از پردازش تصویر، میزان درزه داری زغال مشخص می شود. فاصله درزه ها در زغال سنگ بر میزان جریان گاز تأثیر مستقیم دارد. بدین منظور، از کلوخه های زغال سی تی اسکن گرفته و پردازش تصویر بر روی آنها انجام می گیرد.

فصل ۶، به معرفی مدل، فرضیات لازم جهت مدل سازی، معادلات و همچنین اجرای مدل پرداخته می شود. پس از ایجاد مدل و اجرای آن، نتایج آن با دیگر محاسبات از قبل انجام شده مقایسه شده و اعتبارسنجی آن نیز مورد بررسی قرار می گیرد.

فصل ۷ به ارائه یافته های حاصل از این تحقیق و بحث بر روی آنها می پردازد و پیشنهاداتی برای انجام تحقیقات بعدی در این زمینه فراهم می آورد.

فصل دوم

گاززدایی متان از زغال

۲-۱- مقدمه

هدف از گاززدایی متان^۱، جمع‌آوری گاز با خلوص بالا از منبع آن و جلوگیری از انتشار گاز در معدن می‌باشد. از نظر نظارت معادن، گاز منتشر شده نباید از حدی که باعث ایجاد خطر می‌شود در هوای تهویه معدن موجود باشد. گاززدایی متان علاوه بر افزایش ایمنی در استخراج باعث کاهش خطرات زیست‌محیطی و بازیابی انرژی می‌شود.

گاز متان را می‌توان قبل، بعد و یا در حین استخراج جمع‌آوری کرد. گاززدایی قبل از معدن‌کاری تنها شیوه جمع‌آوری گاز متان برای کاهش جریان گاز به طور مستقیم قبل از هرگونه عملیات معدنی می‌باشد. البته این روش گاززدایی زمانی قابل استفاده می‌باشد که لایه زغال دارای درزه‌های متوسط بوده و از نفوذپذیری بالایی برخوردار باشد. گاززدایی همراه استخراج یا بعد از آن نیز به شیوه‌ای اطلاق می‌گردد که در آن گاز متان درون لایه در زمان عملیات استخراج زغال، به وسیله حفاری‌های صورت گرفته، جمع‌آوری شود. این عملیات می‌بایست قبل از انتشار متان به هوای معدن انجام شود. حفاری چال‌های این روش به صورت افقی درون لایه و یا به بالا و پائین لایه زغالی انجام می‌گیرد. البته این حفاری‌ها از سطح زمین نیز قابل انجام می‌باشند.

در صورت انتخاب نادرست روش گاززدایی و یا اجرای ضعیف روش انتخاب شده، بازدهی سیستم جمع‌آوری گاز پائین آمده و همچنین باعث ورود گاز به هوای معدن می‌گردد. این عمل تأثیرات منفی در حمل و نقل گاز و تجهیزات آن می‌گذارد زیرا در این صورت عیار گاز به پائین‌تر از ۳۰ درصد رسیده و مشکلات را پیچیده‌تر می‌کند.

از طریق نصب و راه‌اندازی، تعمیر و نگهداری تجهیزات و با نظارت منظم بر سیستم گاززدایی و حفاری مستمر می‌توان عملکرد سیستم‌های گاززدایی متان از زغال را بهبود بخشید.

¹Gas Drainage

نصب تجهیزات و سیستم‌های گاززدایی و راه‌اندازی آن معمولاً اقتصادی بوده و کنترل متان معادن زغال یک عامل کلیدی در دستیابی به سودآوری بیشتر معادن زیرزمینی زغال می‌باشد. بر اساس بررسی‌های انجام گرفته در معادن زغال‌سنگ در سراسر جهان، سرمایه‌گذاری در عملیات گاززدایی متان باعث کمتر شدن مشکلات انتشار گاز متان، ایجاد محیط امن‌تر معدن، استفاده از گاز جمع‌آوری شده به عنوان انرژی و کاهش تولید گازهای گلخانه‌ای شده است. در تمامی معادن زغال‌سنگ که دارای مقدار متان بالایی می‌باشند طرح انجام گاززدایی متان می‌بایست صورت پذیرد.

۲-۲- اهداف کنترل گاز متان

مقدار بالای متان در لایه‌های زغال و سنگ‌های محتوی گاز تأثیر منفی در عملیات استخراج از معادن زیرزمینی خواهد گذاشت (Leisle and Kovalski, 2016). هدف اولیه از اجرای سیستم گاززدایی متان، جلوگیری از انفجارها و عواقب آن در معادن زیرزمینی زغال است. کنترل گاز متان باید به گونه‌ای باشد که در کارگاه استخراج جبهه‌کار بلند^۱، عیار متان از ۰/۷۵ درصد تجاوز نکند و این عملیات می‌بایست از طریق تهویه مناسب صورت گیرد. با این حال در صورت وجود مقدار متان بالاتر از حد ذکر شده، ترکیبی از تهویه معدن و گاززدایی متان می‌بایست مورد استفاده قرار گیرد. کنترل گاز در جهت افزایش ایمنی باعث بهره‌برداری بیشتر از گاز متان زغال می‌گردد.

الف- خطرات گاز زغال

گازهای موجود در زغال‌سنگ موسوم به گاز زغال حاوی ۸۰ الی ۹۵ درصد متان بوده و به طور طبیعی در زغال ایجاد و منتشر می‌گردند. گاز زغال زمانی خطرناک و قابل انفجار می‌شود که مخلوطی انفجاری را ایجاد نماید (ECE, Energy Series, 2010).

¹Longwall Mining

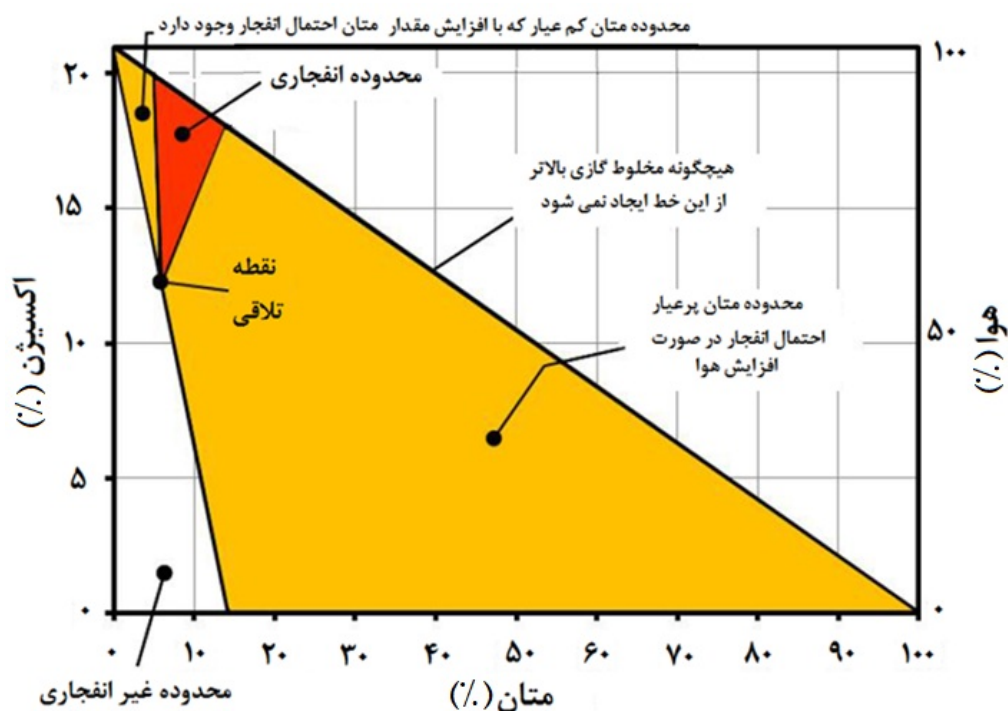
حجم زیادی از گاز زغال در شرایط خاص زمین‌شناسی شامل گاز دی‌اکسیدکربن می‌باشد. دی‌اکسیدکربن سنگین‌تر از هوا بوده و در غلظت‌های بالاتر از ۵ درصد در هوا مرگ‌آور است، اما در غلظت‌های پایین‌تر از ۱ درصد نیز تأثیرات منفی بر شخص می‌گذارد.

متان گازی بی‌رنگ و بی‌بو می‌باشد که با توجه به مشخصات آن می‌بایست برای اندازه‌گیری این گاز از دستگاه مخصوص استفاده کرد. متان قابل اشتعال بوده و وقتی با اکسیژن ترکیب می‌شود مخلوطی انفجاری ایجاد می‌نماید (شکل ۱-۲).

تحت فشار اتمسفری، مخلوط گازی حاوی ۹/۵ درصد متان، دارای بیشترین قدرت انفجاری است. در شرایط محدود زیرزمینی، انفجار باعث تولید گازهای سوخته نشده در محل انفجار می‌گردد. در محیط‌هایی که میزان اکسیژن در آنها کم می‌باشد (مناطق تخریب^۱)، در صورت اضافه شدن هوا به آنها، مخلوطی به شدت منفجر شونده ایجاد می‌شود. اگر محیطی دارای عیار بالای گاز متان باشد، در اثر جابه‌جایی هوا و ترکیب آن با متان محصور شده، مخلوط انفجاری ایجاد گردیده و تجمع بیش از حد آن باعث ایجاد انفجار مهیبی می‌گردد (Moreby, 2009).

در صورتی که تهویه به‌صورت ناقص انجام شود، گاز متان تمایل به بالا رفتن و جمع شدن به‌صورت توده گازی در سقف معدن را دارد. این پدیده به این علت روی می‌دهد که متان از هوا سبک‌تر بوده و میزان جرم مخصوص نسبی آن ۰/۵۵ می‌باشد. در مواردی که سرعت هوا ۰/۵ متر بر ثانیه باشد از متراکم شدن متان در سقف جلوگیری می‌شود. مهندسان معدن برای طراحی سیستم تهویه معدن، عرض لایه، شیب تونل، میزان انتشار گاز متان و موانعی در معدن را شناسایی و در طراحی خود مدنظر قرار می‌دهند (Creedy and Philips, 1997) و (Kissell, 2006).

¹Goaf (United States: Gob)



شکل ۲-۱- تشکیل مخلوط‌های انفجاری (Moreby, 2009)

در برخی شرایط که سرعت تهویه هوا کافی نبوده و توده‌های گازی متان در سقف تشکیل شده‌اند و ترکیب هوا با متان در حال انجام می‌باشد، با رسیدن شعله به این لایه، انفجار مهیبی روی داده و آتش به وسیله این لایه به دیگر مناطق دارای توده‌های گازی متان می‌رسد. در این مورد می‌توان به مناطق تخریب اشاره نمود که در آن توده‌های گازی متان به یکدیگر متصل بوده و می‌توانند انفجار را هدایت کنند. مدیریت ریسک انفجار گاز در معادن جهت ایمنی و سلامت کارگران بسیار مهم و ضروری می‌باشد (Aziz et al. 2011).

کارگران معدن معمولاً مناطقی را که در آنها برای مدت طولانی استخراجی صورت نمی‌گیرد مجزا می‌کنند و از ورود هوای تهویه به آن جلوگیری می‌کنند. اما در برخی موارد این موانع ساخته شده به درستی عمل نکرده و هوای معدن به این بخش‌ها وارد شده و مخلوط گازی منفجر شونده‌ای را سبب می‌شوند که بسیار خطرناک بوده و آماده انفجار می‌باشد.

از مناطق دارای ریسک بالای انفجار (جایی که گاز متان توانایی جمع شدن و انفجار را دارد) می‌توان به مناطق تخریب شده در جبهه‌کار بلند، و مناطق برش مکانیزه زغال و مناطقی که ماشین‌آلات مربوطه در حال کار می‌باشند را نام برد. مخلوط‌های آماده انفجار همچنین می‌توانند در مناطقی که سیستم گاززدایی ضعیف عمل نموده و تهویه مناسب وجود نداشته باشد نیز ایجاد شوند. معادن با سیستم استخراج اتاق و پایه^۱ (بدون بازیابی پایه) دارای منطقه تخریبی نبوده و به همین سبب تهویه بهتر می‌تواند عمل نماید. در نتیجه این معادن نسبت به معادن جبهه کار بلند از خطر انفجار گاز کمتری برخوردار می‌باشند. با این حال با ایجاد مشکل در سیستم تهویه این نوع معادن نیز تجمع لایه‌ای متان در سقف به وقوع پیوسته و خطر انفجار را افزایش می‌دهد (ECE, Energy Series, 2010).

ب- تأثیر متان معادن زغال‌سنگ بر ایمنی و شرایط زیست‌محیطی

صنایع زغال‌سنگ دنیا، دولت‌های کشورهای مختلف، اتحادیه‌های کارگری و طرفداران محیط‌زیست همگی نگران افزایش و شدت انفجارهای گاز متان معادن زغال‌سنگ در کشورهای در حال توسعه و کشورهای توسعه نیافته می‌باشند. معدن‌کاری با شیوه‌های صحیح نیازمند مدیریت مؤثر در تمامی زمینه‌ها می‌باشد. معدن‌کاری در تمامی کشورها حتی در کشورهای توسعه یافته نیز دارای خطراتی است که می‌بایست در کاهش و به حداقل رساندن آن تلاش فراوانی نمود.

در صورتی که عیار متان به ۵ الی ۱۵ درصد برسد، مخلوط گازی منفجر شونده ایجاد می‌گردد. حمل و نقل، جمع‌آوری و یا استفاده از این گاز با این عیار، مستلزم رعایت نمودن مسائل ایمنی می‌باشد. زیرا در این عیار گاز به صورت ذاتی قابلیت انفجار دارد.

مدیریت مؤثر علاوه بر اینکه خطر گاز متان را در معادن زغال‌سنگ کاهش می‌دهد، انتشار گازهای گلخانه‌ای را نیز به حداقل می‌رساند. معادن زغال‌سنگ، منبع تولید گازهای گلخانه‌ای قابل

¹ Room & Pillar Mining

توجهی از متان، با پتانسیل گرمایش جهانی^۱ (GWP) بیش از ۲۰ بار بیشتر از دی‌اکسیدکربن می‌باشند. گاز متان بالغ بر ۱۴ درصد از انتشار گاز گلخانه‌ای را به خود اختصاص داده که در این میان معادن زغال‌سنگ حدود ۶ درصد از تولید متان را بر عهده دارند. به عبارتی می‌توان گفت این عدد معادل سالانه ۴۰۰ میلیون تن دی‌اکسیدکربن می‌باشد. با رشد تولید زغال و استخراج آن پیش‌بینی می‌شود که در سال ۲۰۲۰ میلادی این مقدار به ۷۹۳ میلیون تن دی‌اکسیدکربن برسد (ESMAP, 2007).

ج- نقش سیستم‌های تهویه

حداکثر نرخ استخراج زغال‌سنگ^۲ زمانی به‌دست می‌آید که با ایمنی کافی در محیط گازدار جبهه‌کار استخراجی، عملیات معدن‌کاری انجام شود که متأثر از دو عامل زیر است: ۱- ظرفیت سیستم تهویه معدن برای رقیق نمودن گاز متان در حد قابل قبول باشد و ۲- سیستم گاززدایی متان از زغال‌سنگ به خوبی کار کند.

هزینه‌های عملیاتی کلید اصلی طراحی سیستم گاززدایی متان از معدن می‌باشد. در معدن‌کاری هزینه نصب تهویه مناسب از بالاترین هزینه‌های اجرایی معدن‌کاری به حساب می‌آید. بنابراین معرفی و انتخاب سیستم گاززدایی متان و یا افزایش حجم گاززدایی باعث کاهش تهویه لازم و در نهایت کاهش هزینه‌های عملیاتی می‌شود (ECE, Energy Series, 2010).

۲-۳- مصارف گاز متان

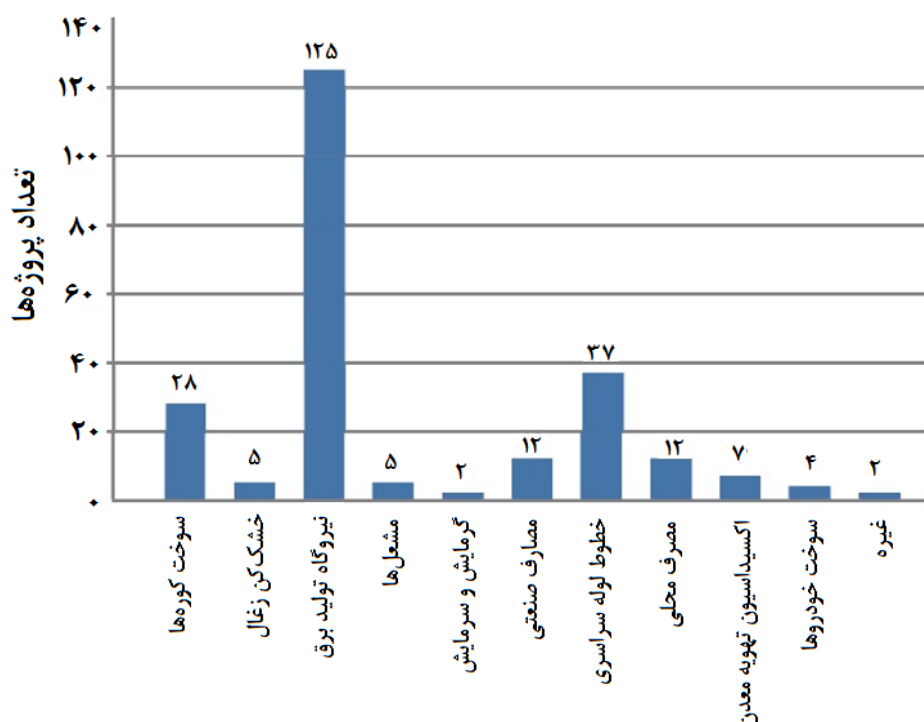
گاز متان زغال یک منبع انرژی پاک بوده که مصارف گوناگونی دارد. شکل ۲-۲ آمار پروژه‌های انجام شده در سطح جهان را در مورد گاززدایی متان نشان می‌دهد. این ارقام از یک پایگاه اطلاعاتی که بیش از ۲۴۰ پروژه در سطح جهان در آن ثبت شده، جمع‌آوری گردیده است. همانطور که این

^۱Global Warming Potential

^۲Maximum Coal Extraction Rate

شکل نشان می‌دهد، تولید برق، تزریق به خطوط سراسری گاز و دیگ‌های بخار بیشترین منابع مصرف گاز متان حاصل از زغال را تشکیل می‌دهند.

همچنین تکنولوژی پر عیارسازی نیز پیشرفت کرده و به‌طور گسترده در حال استفاده می‌باشد (به‌عنوان مثال در آمریکا). این تکنولوژی باعث حذف هرگونه آلاینده‌گی در گاز متان شده و گاز با کیفیت بالا جهت استفاده و مصرف تولید می‌شود. در بسیاری از موارد نیز می‌توان با برنامه‌های کاربردی و نصب تجهیزات اضافی از پر عیارسازی گاز اجتناب کرده و از هزینه‌های اضافی جلوگیری کرد.



شکل ۲-۲- توزیع مصرف گاز متان درون زغال در پروژه‌های صورت گرفته در کل دنیا (Methane to Market Partnership, 2009)

همچنین گاز متان جمع شده که خلوص بالایی ندارد را به‌وسیله مشعل سوزانده تا مانع انتشار آن به اتمسفر شود. یادآوری می‌شود که گاز متان یک گاز گلخانه‌ای بوده که قدرت گرمایش^۱ آن ۲۰ برابر گاز دی‌اکسیدکربن است (IPCC, 2007).

¹Heating Capacity

گاز متانی که توسط سیستم گاززدایی جمع‌آوری نشده است توسط هوای تهویه معدن رقیق شده و عیار آن به ۱ درصد و کمتر از آن می‌رسد (VAM)^۱. این مخلوط گازی بیشترین منبع پخش گاز متان معادن زغال به اتمسفر می‌باشد که در کشورهای مختلف (به‌عنوان مثال استرالیا، چین و ایالات متحده آمریکا) براساس فن‌آوری اکسایش حرارتی به انرژی تبدیل می‌شود و از انتشار آن جلوگیری به‌عمل می‌آید. به‌تازگی تجهیزات VAM پیشرفت کرده و فرآیندهای اکسایش کاتالیزوری جهت جذب این گاز گلخانه‌ای نیز به‌کار می‌رود.

۲-۴- هزینه‌ها و مسائل اقتصادی

گاززدایی مؤثر متان از خطرات ناشی از انفجار می‌کاهد. از این‌رو هزینه‌های مربوط به حوادث انفجار نیز کاهش می‌یابد. هزینه‌های حوادث انفجار گاز در کشورهای مختلف متفاوت بوده ولی از نظر میزان، قابل توجه و رقم بالایی را از آن خود نموده است. به‌عنوان مثال اگر معدنی بر اثر حادثه انفجار گاز تعطیل شده و میزان توقف تولید آن در حدود ۱۰ درصد از کل زمان استخراج سالانه معدن باشد، ضرر وارده به معدن می‌تواند تا ۸ میلیون دلار برآورد شود. در ایالات متحده آمریکا سالانه ۱۶ میلیون دلار در اثر حوادث، خسارت وارد شده است. میزان هزینه‌ها و خسارات وارد شده به یک معدن بزرگ زغال که در آن انفجار گاز متان روی داده است می‌تواند از ۲ تا ۸ میلیون دلار پیش‌بینی شود که این ارقام حاصل از محاسبات بر روی میزان توقف تولید زغال، هزینه‌های قانونی، جبران خسارت و جریمه‌ها می‌باشد. در ایران نیز هزینه‌ها و خسارات وارد شده به معادن بر اثر انفجار گاز متان و گرد زغال بسیار بالا بوده است. انفجارهای معادن زغال‌سنگ در کرمان، شاهرود، طبس و سنگرود علاوه بر کشتن کارگران معدن، هزینه‌های میلیاردی در برداشته‌اند. به‌عنوان مثال انفجار معدن سنگرود در سال ۱۳۷۶ علاوه بر ۲۱ کشته و ۵۵ زخمی بالغ بر ده میلیارد ریال خسارت وارد نموده است. همچنین انفجار معدن باب نیزو کرمان در سال ۱۳۸۶ باعث کشته شدن ۱۲ کارگر و تعطیل شدن

¹Ventilation Air Methane

معدن گردید که میزان خسارت وارد شده را می‌توان بالای ۲۰۰ میلیارد ریال تخمین زد. همچنین به تازگی نیز انفجار در معدن زمستان یورت استان گلستان باعث کشته شدن ۴۳ نفر گردیده است که باعث ایجاد مشکلات اجتماعی خاص خود شده است.

بازیابی گاز متان باعث کاهش انتشار کربن به محیط شده و این مقوله را می‌توان با استفاده از درآمد حاصل از اعتبارات کاهش انتشار کربن^۱ (VER) و گواهی کاهش انتشار آلاینده‌ها^۲ (CER) به‌دست آورد. علاوه بر تأمین مالی مورد نیاز می‌توان از درآمدهای حاصله برای اکسایش VAM و یا سوزاندن گاز اضافی^۳ CMM نیز استفاده نمود. از VAM همچنین می‌توان در زمینه تولید برق نیز استفاده کرد. البته در این مورد به تجاری بودن آن اهمیت کمتری داده شده و بیشتر در جهت جلوگیری از پخش کربن به محیط استفاده می‌شود.

در حال حاضر، با توجه به اقتصادی بودن گاززدایی متان از زغال، بسیاری از معادن زغال‌سنگ را که تاکنون استخراج نشده فعال نموده و تصمیمات سرمایه‌گذاری جدیدی برای آنها اعمال نموده‌اند. این سرمایه‌گذاری‌ها علاوه بر تولید انرژی می‌تواند در حل مسائل زیست‌محیطی سهیم بوده و به اهداف آن در درازمدت کمک رساند. با این حال صاحبان معادن ممکن است برای حل مشکلات خود در زمینه ایمنی معدن، سیستم گاززدایی را فعال نمایند. پیشرفت‌های صورت گرفته در سیستم گاززدایی نیز باعث تولید گاز با عیار بالا شده و رغبت جهت سرمایه‌گذاری در این بخش را بالا برده است (ECE, Energy Series, 2010).

۲-۵- مسائل زیست‌محیطی و اجتماعی

زغال‌سنگ منبع انرژی ضروری در کشورهای صنعتی و در حال توسعه می‌باشد. تقاضای انرژی در تمامی کشورها زیاد شده، به‌ویژه در برخی از کشورهای به سرعت در حال رشد، تقاضا جهت

^۱Verified Emission Reductions

^۲Certified Emission Reductions

^۳Coal Mine Methane

افزایش تولید زغال سنگ توسط معادن زیاد شده است و این خود باعث کاهش ایمنی و به خطر افتادن جان کارگران می شود. وجود متان در معادن زغال سنگ، ایمنی را بسیار کاهش داده و نیازمند مدیریت قوی و مؤثر بوده تا ایمنی افزایش یابد. در حالی که انفجار متان در معادن زغال سنگ از اتفاقات نادر به حساب می آید اما سالانه باعث مرگ و میر و صدمات فراوان به معدن می شود.

بسیاری از حوادث می تواند از یک منبع خطر ایجاد شوند. جدول ۱-۲ برخی از حوادث مرگبار ناشی از انفجار معادن زغال سنگ از سال ۲۰۰۰ به بعد را نشان می دهد. مدیریت صحیح و مؤثر گاز متان زغال می تواند وقوع چنین اتفاقاتی را کاهش دهد.

حوادث زمانی روی می دهد که گاز متان از لایه های زغال به درون هوای معدن وارد شده و یا با استخراج این انتشار انجام گیرد. مقدار گاز منتشر شده به سرعت استخراج زغال و همچنین به مقدار گاز در جای زغال بستگی دارد.

آژانس بین المللی ایمنی معادن^۱، در مورد مقدار انتشار متان به هوای معدن بیشترین محدودیت ها را اعمال نموده است. بنابراین متان موجود در کارهای معدنی یکی از عوامل محدودکننده در تولید زغال می باشد.

کمک به دولت ها و راهنمایی آنها در زمینه کاهش خطرات ناشی از انتشار گاز متان در معادن زیرزمینی زغال یک امر ضروری می باشد. براساس داده های موجود، تعداد مرگ و میرهای ناشی از استخراج زغال سنگ زیرزمینی در کشورهای مختلف دنیا زیاد می باشد. به عنوان مثال نرخ مرگ و میر به ازای هر یک میلیون تن زغال سنگ استخراج شده می تواند از ۱ الی ۳۰ نفر از کشوری به کشور دیگر متفاوت باشد (U.S Environmental Protection Agency, 2009).

هیچ معدن زغالی عاری از خطرات نیست. حوادث انتشار گاز متان می تواند حتی در مدرن ترین معادن زغال سنگ زیرزمینی نیز اتفاق بیافتد. تکنولوژی پیشرفته ریسک حوادث ناشی از انفجار را

¹International Mines Safety Agency

کاهش می‌دهد اما تکنولوژی به تنهایی قادر به حل مشکل نمی‌باشد. مدیریت، ساختار سازمانی، مشارکت کارکنان، آموزش و سیستم‌های نظارتی و اجرای تمامی دستورالعمل‌ها، مدیریت ریسک مؤثر می‌باشد. آگاهی و دانستن اساس کنترل گازمتان می‌تواند تأثیر فوق‌العاده‌ای بر طراحی‌ها و سیستم گاززدایی داشته باشد. در نهایت تمامی حوادث انفجار به‌عنوان تجربه‌ای مهم در نظر گرفته شده و از آن برای پیدا کردن راهی در جهت افزایش ایمنی و اجرای شیوه‌های مؤثر می‌توان استفاده نمود.

جدول ۱-۲- حوادث مهم انفجار گاز متان - بعد از سال ۲۰۰۰ (Maps of World, 2017)

کشور	تاریخ	معدن زغال	تعداد کشته‌ها
چین	۱۴ فوریه ۲۰۰۵	سونژیوان، چاه هایژو، فوکسین ^۱	۲۱۴
قزاقستان	۲۰ سپتامبر ۲۰۰۶	لنینا، کاراگاندا ^۲	۴۳
روسیه	۱۹ مارس ۲۰۰۷	اولنایوفسکایا، کمروف ^۳	۱۰۸
اوکراین	۱۹ نوامبر ۲۰۰۷	زاسیادکو، دونتسک ^۴	۸۰
آمریکا	۲ ژوئن ۲۰۰۶	ساگو، ویرجینیای غربی ^۵	۱۲
ایران	۱۹ آوریل ۲۰۰۹	باب نیزو- زرنند	۱۲
ایران	۱۸ دسامبر ۲۰۱۲	پروده- طبس	۸
ترکیه	۱۳ می ۲۰۱۴	سوما - مانيسا	۳۰۱
ایران	۳ می ۲۰۱۷	زمستان یورت- آزادشهر	۴۳

¹Sunjiawan, Haizhou shaft, Fuxin

²Lenina, Karaganda

³Ulyanovskaya, Kemerovo

⁴Zasyadko, Donetzk

⁵Sago, West Virginia

معادن زغال سنگ یک منبع تولید طبیعی گازهای گلخانه‌ای به حساب می‌آیند. این گازهای گلخانه‌ای بیش از ۲۰ برابر نسبت به دی‌اکسید کربن پتانسیل گرمایش جهانی را دارند. گاز متان منتشر شده از معادن زغال حدود ۶ درصد از تولید گازهای گلخانه‌ای را بر عهده دارد که این مقدار در حدود ۴۰۰ میلیون تن دی‌اکسید کربن در سال می‌باشد. تا سال ۲۰۲۰، انتشار گاز متان زغال به ۷۹۳ میلیون تن دی‌اکسید کربن خواهد رسید، که بیش از ۹۰ درصد از این مقدار گاز متان دارای عیار ۱ درصد و کمتر خواهد بود که از هوای تهویه معدن به اتمسفر منتشر می‌شود.

پیشرفت‌های صورت گرفته می‌تواند به طور قابل ملاحظه‌ای از تولید گازهای گلخانه‌ای بکاهد. اجرای موفقیت‌آمیز آنها نیاز به مدیریت دولت‌ها و تعهد صنایع زغال سنگ در دنیا را می‌طلبد.

تجربه کشورهای صنعتی نشان می‌دهد که سرمایه‌گذاری در سیستم گاززدایی مناسب باعث کمتر شدن زمان استخراج معدن به دلیل نبود گاز متان و امنیت بیشتر معدن می‌شود. این فرصت همچنین باعث تولید کمتر گازهای گلخانه‌ای می‌گردد.

مشکلات عملی موجود در گاززدایی متان از زغال به طور کلی با استفاده از دانش و تکنیک‌های پیشرفته حل شده است. معرفی فن‌آوری‌های جدید و استفاده از شیوه‌های صحیح و مناسب، باعث عملیات موفقیت‌آمیز در زمینه گاززدایی شده است. معرفی هر فن‌آوری جدید مستلزم آزمایش آن برای امنیت بیشتر معدن می‌باشد.

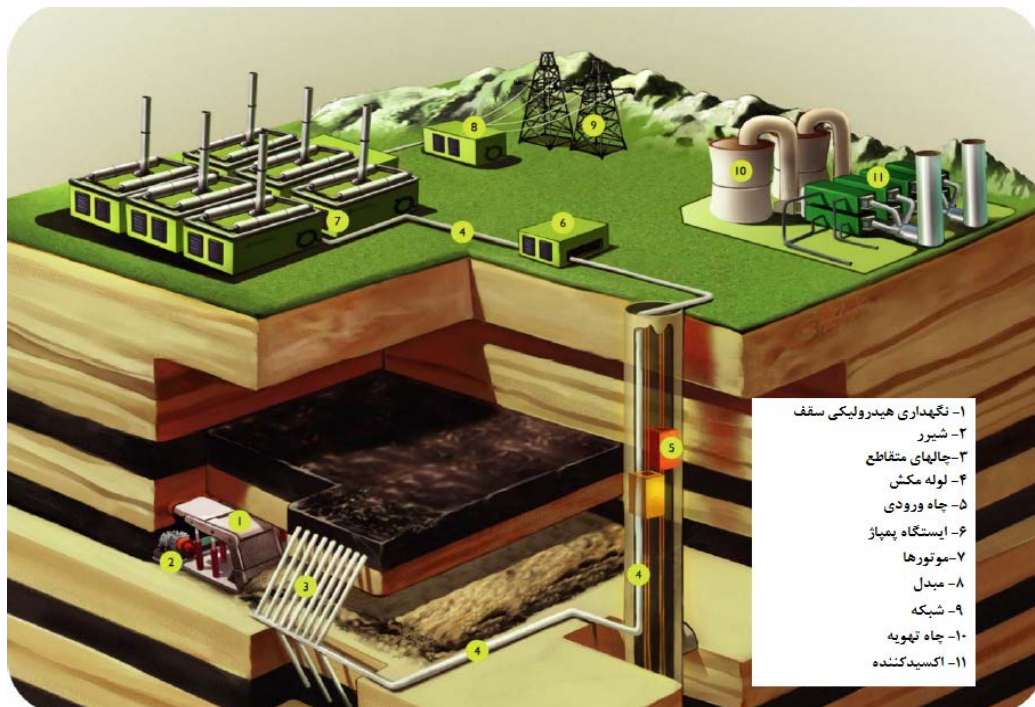
عملکرد سیستم گاززدایی متان را می‌توان با نصب و راه‌اندازی مناسب، تعمیر و نگهداری، نظارت منظم و اجرای برنامه‌های حفاری سیستماتیک بهبود بخشید (U.S Environmental Protection Agency, 2009).

۲-۶- جمع‌آوری گاز متان

جمع‌آوری گاز متان و استفاده از آن در معادن زغال ایده جدیدی نیست. البته پیشرفت‌های بسیاری در این زمینه در سال‌های اخیر صورت گرفته است و کاربرد آن در طول سال‌های اخیر

افزایش یافته است. اولین گاززدایی متان از زغال در سال ۱۷۳۰ در انگلستان انجام شد. ولی گاززدایی متان با روش مدرن از نیمه اول قرن بیستم در معادن اروپا رواج یافت. استفاده از گاز متان جمع‌آوری شده برای روشنایی در معادن زغال در اوایل قرن ۱۸ و در سال ۱۸۸۰ به ثبت رسیده است. گاززدایی متان از لایه های زغالی دارای عوامل مهمی می باشد که می توان آن را به دو شاخه اصلی، عامل شرایط زمین‌شناسی لایه زغال و عامل عملیات اجرایی تقسیم بندی نمود (Black and Aziz, 2011).

شکل ۲-۳ طرح سه‌بعدی از گاززدایی متان از زغال را نشان می‌دهد. در این شکل امکانات و سیستم عملیاتی در یک معدن زغال‌سنگ زیرزمینی مشاهده می‌شود. در این شکل همچنین پیچیدگی و جنبه‌های گاززدایی متان و سیستم‌های جمع‌آوری این گاز و تبدیل آن به الکتریسیته نشان داده شده و تاسیسات مربوط به اکسایش متان هوای تهویه نیز ارائه شده است.



شکل ۲-۳ شمایی از سیستم گاززدایی متان از یک معدن زیرزمینی زغال‌سنگ و امکانات سطحی برای بازیابی انرژی و کاهش متان تهویه هوا (طاهری و سرشکی، ۱۳۹۲)

در حال حاضر صدها پروژه گاززدایی متان در سراسر دنیا در حال انجام و یا در حال توسعه می‌باشند. بیش از ۲۴۰ پروژه در دنیا به ثبت رسیده که در حال استفاده از متان زغال بوده و این عملیات داخل ۱۴ کشور در حال انجام هستند (Methane to Market Partnership, 2009). بیشترین استفاده متان زغال برای تولید برق به ثبت رسیده است. از دیگر کاربردهای آن می‌توان به سوخت دیگ بخار، تزریق به خطوط لوله سراسری، گاز شهری، گاز صنعتی، مواد خام برای تبدیل به سوخت خودروها از قبیل گاز طبیعی مایع^۱ LNG و یا گاز طبیعی فشرده^۲ CNG و خشک‌کن زغال^۳ نام برد. در برخی موارد بازیابی متان از لحاظ اقتصادی به دلیل شرایط سایت معدن و یا بازار فروش مناسب نیست و نیاز به سوزاندن آن و تبدیل به دی‌اکسیدکربن ضروری است. سوزاندن به هدف کاهش انتشار گاز گلخانه‌ای در برخی کشورها بر طبق استاندارد پخش گاز گلخانه‌ای اجرا می‌گردد و از کربن تولید شده برای مصارف مختلف استفاده می‌شود.

۲-۷- اصول روش‌های گاززدایی متان در سراسر دنیا

شرایط استخراج و زمین‌شناسی متفاوت در حوزه‌های زغال‌سنگ دنیا باعث توسعه روش‌های مختلف گاززدایی شده است. روش‌های گاززدایی متان به طور مرسوم به دو حالت قبل از استخراج و پس از استخراج تقسیم می‌شود. در روش‌های قبل از معدن‌کاری، متان محبوس در لایه‌های زغال با حفاری جمع‌آوری می‌شوند. در روش‌های پس از معدن‌کاری یا همراه با معدن‌کاری نیز بر اثر تغییرات ایجاد شده در لایه زغال و افزایش خلل و فرج اقدام به حفاری و جمع‌آوری گاز می‌نمایند. در جدول ۲-۲ مزایا و معایب هر کدام از روش‌های گاززدایی متان آورده شده است (توکلی و سرشکی، ۱۳۸۵).

^۱ Liquefied Natural Gas

^۲ Compressed Natural Gas

^۳ Coal Drying

جدول ۲-۲- روش‌های مختلف گاززدایی و مزایا و معایب هر کدام

نوع روش	روش گاززدایی	مزایا	معایب
قبل از معدن کاری	چال قائم	- باعث پیشروی معدن کاری - عیار بالای گاز - مستقل از فعالیت‌های معدن کاری - سالم باقی ماندن سقف جهت استخراج - لایه زغالی - به عنوان چال منطقه تخریب در آینده	- مقدار کمی از لایه زغال در ارتباط با چال می‌باشد. - هزینه بالای حفاری - نیاز به تجهیزات لوله‌کشی در سطح زمین - شرایط سطح زمین و مالکیت آن - آلودگی منطقه توسط آب شور و پساب و ... - تخلخل کم لایه‌های عمیق - عمق بیشتر باعث افزایش هزینه حفاری - لایه باید دارای نفوذ پذیری بالا باشد - هماهنگی آن با طرح معدن - نیاز به نیروی متخصص جهت حفاری چال‌ها
قبل از معدن کاری و همراه با معدن کاری	چال افقی	- باعث پیشروی معدن کاری - عیار بالای گاز - مستقل از عملیات معدن کاری - هزینه کمتر حفاری نسبت به چال‌های قائم - قابلیت استفاده در معادن عمیق - کاهش ریسک انفجار ناگهانی متان - نرخ بالای تولید از لایه‌ها به علت وجود طول بیشتر در زغال - جمع‌آوری گازهای محبوس در زغال قبل از استخراج زغال	- نیاز به حفاری چال‌های جدید با پیشروی معدن کاری - لایه‌ها با خصوصیت نفوذپذیری متوسط به بالا - استفاده در لایه‌های زغال استخراج نشده - ورود آب به چال و همچنین ریزش چال - نیاز به نیروی متخصص جهت حفاری چال‌ها
همراه معدن کاری	چال‌های متقاطع	- افزایش پیشروی جبهه کار بلند - قابلیت اجرا در زغال‌های با عمق زیاد - حفاری کم جهت رسیدن به منابع گاز - استفاده از گاز استخراج شده در سایت معدن - گاززدایی از لایه‌های زغالی کم گاز - کاهش انتشار ناگهانی گاز توسط گاززدایی چال‌های سقف - دارای الگوی انعطاف‌پذیر و آسان در حفاری چال‌ها - دارای کمترین هزینه حفاری در روش‌های گاززدایی	- نیاز به حفاری در منطقه تخریب و پشت جبهه کار جهت بازیابی - عمر کم چال‌ها - عیار متوسط به پائین گاز به علت ترقیق با هوای تهویه - نیاز به نیروی حفار متخصص زیرزمینی - نیاز به لوله‌کشی گاز از درون معدن به منطقه ای امن در خارج معدن - تخریب چال‌ها به علت ریزشی بودن آنها
همراه معدن کاری	چال‌های منطقه تخریب	- مستقل از عملیات استخراج زیرزمینی - افزایش توانایی تهویه گازهای انفجاری از کارگاه - بهترین گزینه برای لایه‌های با عمق متوسط و کم - عیار بالای گاز - عمر بالای چال‌ها - انعطاف پذیر با طرح معدن	- افزایش هزینه حفاری برای لایه‌های عمیق - وجود جریان آب در لایه‌های زغال زیر سطح ایستایی - عدم گاززدایی از کف لایه زغال - حفاری چال‌ها بعد از عبور جبهه کار بلند - قابل استفاده در زمانی که راه خروج هوا به سطح زمین وجود نداشته باشد - گسل، تخریب یا شکستگی زمین و ...

در صورت انجام درست روش‌های گاززدایی قبل از معدن‌کاری می‌توان به طور معمول ۵۰ الی ۸۰ درصد از کل گاز لایه زغال را در کارگاه استخراج جمع‌آوری کرد. البته در صورت وجود شرایط مناسب زمین‌شناسی این مقادیر قابل دستیابی می‌باشند. در اکثر موارد ۵۰ درصد از کل گاز معدن توسط این روش به‌دست می‌آید.

در تمامی این روش‌ها می‌بایست غلظت ۳۰ درصد متان و یا بالاتر جمع‌آوری شود. البته با استفاده از روش‌های قبل از معدن‌کاری می‌توان به عیار بالای ۶۰ درصد متان نیز دست یافت (Lunarzewski, 2001).

۲-۸- اصول کنترل گاز

ایجاد مقررات مربوط به گاززدایی و اجرای صحیح آن باعث استخراج گاز، حمل و نقل و استفاده از متان با عیار بالا و همچنین افزایش تولید انرژی پاک و کاهش بیشتر انتشار متان می‌گردد. علم روز درباره مدیریت خطرات انفجار متان فوق‌العاده پیشرفت نموده است.

ایجاد شرایط ایمن در محیط‌های گازدار معدن تنها با وضع قوانین و استفاده از پیشرفته‌ترین امکانات به‌وجود نمی‌آید. در عوض ایجاد سیستم‌های مدیریتی درست و صحیح باعث ایجاد ایمنی می‌گردد. از دیگر موارد افزایش ایمنی می‌توان به آموزش مدیران و کارگران و تشویق کارگران به اجرای قوانین و مقررات نام برد.

در ایران نیز استاندارد لازم توسط کارشناسان سازمان نظام مهندسی معدن تعیین و منتشر شده است.

۲-۹- مبانی روش‌های قبل از استخراج

روش گاززدایی قبل از معدن‌کاری تنها راه کاهش جریان گاز به طور مستقیم از لایه زغال استخراجی بوده که دارای منابع گازی زیادی درون خود است. روش گاززدایی قبل از معدن‌کاری گاهی اوقات برای کاهش خطرات انفجار ضروری است. از آنجائی که گاززدایی قبل از استخراج انجام می‌شود، لذا سیستم گاززدایی به علت حرکت نکردن زمین معیوب نشده و خلوص نسبتاً بالایی از گاز را می‌توان استخراج نمود. گاززدایی از بلوک زغال‌سنگ در حالی که هنوز معدن‌کاری شروع نشده باعث تولید جریان گازی قابل توجه و با عیار بالا می‌شود به شرط آنکه زغال از نفوذپذیری مناسبی برخوردار باشد. جریان گاز بالا در روش گاززدایی قبل از معدن‌کاری نشان دهنده زغال با نفوذپذیری بالا و شکستگی‌های متعدد می‌باشد و پتانسیل را برای جمع‌آوری بیشتر گاز بالا می‌برد.

نفوذپذیری زغال به طور مستقیم در مدت زمان لازم برای گاززدایی زغال تأثیر می‌گذارد. در صورتی که اگر زغال دارای نفوذپذیری کمتری باشد زمان لازم برای تخلیه گاز موجود در زغال‌سنگ بیشتر می‌شود. همچنین در زغال‌سنگ‌های با نفوذپذیری پائین نیاز به حفاری بیشتری برای جمع‌آوری گاز می‌باشد. زمان لازم برای گاززدایی و هزینه عملیات حفاری زه‌کشی گاز قبل از معدن‌کاری زیر نظر مدیریت معدن طراحی و اجرا می‌شود.

روش‌های گاززدایی قبل از معدن‌کاری در سراسر دنیا در حال استفاده می‌باشد. حفاری چرخشی^۱ معمولاً برای حفر گمانه‌های ۱۰۰ الی ۲۰۰ متری گاززدایی استفاده می‌شود. با این حال حفاری‌هایی نیز تا عمق ۱۰۰۰ متر و بیشتر نیز برای افزایش بهره‌وری گاززدایی انجام شده است (Moreby, 2009).

علاوه بر این، در معادنی نیز که دارای عمق زیاد می‌باشند حفاری از سطح زمین انجام شده است. حفاری‌های از سطح به درون لایه‌های زغال با نفوذپذیری ۰/۵ میلی داری تا ۱۰ میلی داری

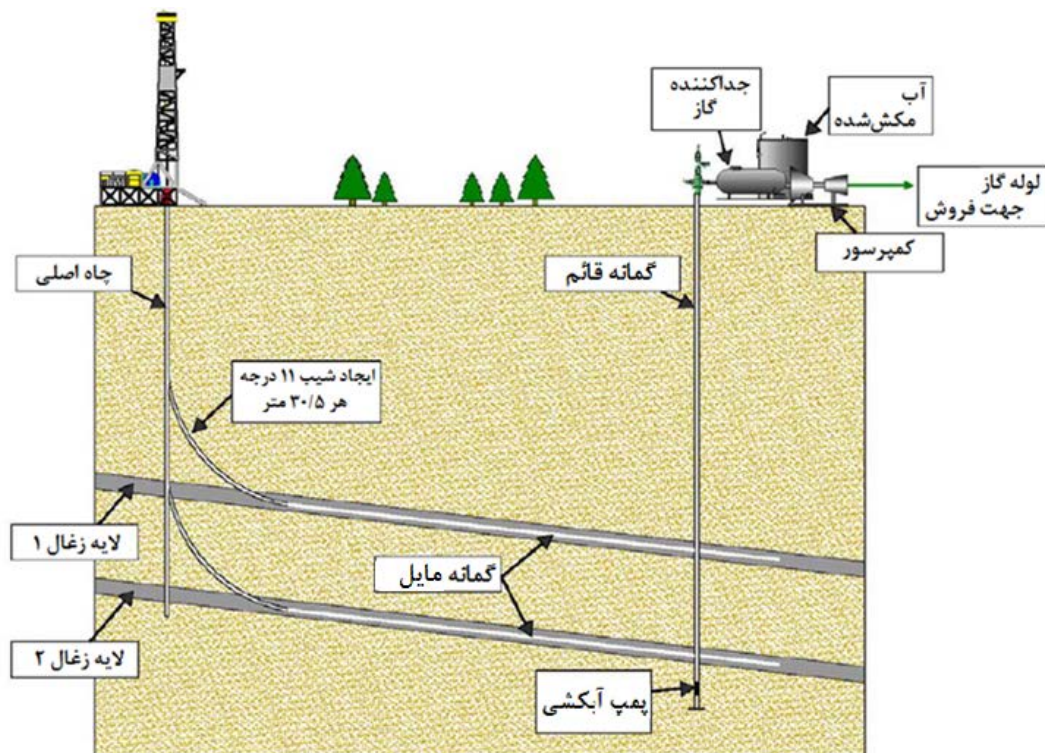
¹Rotary Drilling

تأثیرگذار بوده و گاز با عیار مناسب جمع‌آوری می‌شود. استفاده هم‌زمان تکنیک‌های قبل از معدن‌کاری و همراه معدن‌کاری باعث تولید بالای گاز در تعدادی از معادن استرالیا شده است تا جایی که انتشار گاز را به ۸۰۰۰ لیتر بر ثانیه رسانده و جبهه‌کار بلند به راندمان ۸۰ درصد رسیده است (Moreby, 2009).

مطالعات انجام شده در استرالیا و آمریکا نشان می‌دهد که در مکان‌هایی که قابلیت حفاری از سطح به لایه زغالی وجود داشته و می‌توان لایه زغالی را جهت گاززدایی حفاری نمود بسیار در تولید معدن تأثیر گذاشته و تولید زغال را افزایش داده است (Von Schoenfeldt, 2008). زیرا با گاززدایی قبل از معدن‌کاری دیگر نیازی به صرف زمان در استخراج جهت تهویه و گاززدایی نمی‌باشد (Black and Aziz, 2009).

مطالعات مختلفی نیز بر روی چاه‌های مکش گاز متان از سطح انجام شده و در این مطالعات سرعت و میزان گاززدایی از چاه‌ها مورد بررسی قرار گرفته است. لوو در مطالعات خود به بررسی کامل این چاه‌ها پرداخته و سرعت و میزان گاز جمع‌آوری شده را بر اساس آزمایشات درون‌چاهی و مقاومت سه محوری چاه در زمان انتشار گاز و مکش آن پرداخته است. مدل‌سازی انجام شده در میزان فاصله چاه‌ها از یکدیگر و میزان ایجاد مکش استفاده گردیده است (Lu, 1998).

شکل ۲-۴ شمایی از روش‌های حفاری که قبل از معدن‌کاری می‌توان انجام داد و به لایه زغالی دسترسی پیدا کرد را نشان می‌دهد. در این شکل دو لایه قابل استخراج زغال را با حفاری‌های عمودی و هدایت‌شونده حفاری نموده و گاززدایی می‌نمایند. وقتی که گمانه‌های گاززدایی حفر شدند، گمانه دیگری به طور قائم حفاری شده و آب و گاز تولید شده در آن جمع می‌شود و به سطح زمین منتقل می‌گردد.



شکل ۲-۴- شمایی از گاززدایی متان از زغال سنگ توسط حفاری از سطح (ECE, Energy Series, 2010)

برای لایه‌های با عمق کم و متوسط و با نفوذپذیری بالا (بیشتر از ۱۰ میلی‌داری) چاه‌های قائم جهت شکست هیدرولیکی از سطح زمین حفاری می‌شوند که به آنها چاه شکست می‌گویند و برای افزایش تخلیه گاز متان پیش از استخراج زغال با استفاده از شکست هیدرولیکی حفر می‌گردند. این چاه‌ها عمدتاً در آمریکا حفاری شده و مورد استفاده قرار می‌گیرد. عملیات شکست هیدرولیکی در شرق ایالات متحده آمریکا استفاده شده و هیچگونه خطری برای معدن ایجاد ننموده است. اما احتیاط لازم در مورد استفاده از آن در شرایط زمین و معدن در نقاط مختلف می‌بایست اعمال شود.

استفاده از روش‌های سطحی باعث می‌شود که عملیات گاززدایی را مستقل از عملیات معدن انجام داد. اما همین برنامه نیز به عمق حفاری، نفوذپذیری و خلل و فرج زغال، توپوگرافی سطح زمین بستگی دارد.

۲-۱۰- اصول گاززدایی متان ضمن استخراج

در بسیاری از حوزه‌های زغال‌سنگ جهان، نفوذپذیری کم زغال (کمتر از ۰/۱ میلی داری) و ویژگی‌های زمین‌شناسی منطقه (زغال‌سنگ نرم و گسل‌ها) باعث می‌شود گاززدایی قبل از معدن‌کاری غیرقابل استفاده گردد. در بعضی معادن نیز استخراج از لایه‌های بالایی شروع و به سمت لایه‌های پائینی معدن‌کاری انجام می‌شود و این عملیات مانع انجام گاززدایی قبل از معدن‌کاری لایه‌های زیرین می‌گردد. هرگونه گاززدایی مؤثر در این‌گونه حوزه‌های زغالی مرتبط به وجود شکستگی‌ها و نفوذپذیری لایه‌ها در اثر معدن‌کاری لایه‌های استخراجی می‌باشد.

روش‌های پس از استخراج شامل جمع‌آوری متان منتشر شده در مکان‌های تخریب شده استخراجی بوده و این عملیات می‌بایست قبل از ورود آنها به تهویه هوا انجام گیرد. همچنین شامل گاززدایی از لایه‌های زیرین زغال در حال استخراج نیز می‌شود.

در جایی که چند لایه زغالی وجود دارد، متان از کمر بالا و کمر پائین لایه‌ای که در حال استخراج است منتشر می‌شود. به همین دلیل امکان دارد مقدار گاز بیشتری نسبت به مقدار پیش‌بینی شده منتشر شود که این گازها را می‌توان با استفاده از روش‌های گاززدایی همراه معدن‌کاری جمع نمود. البته این منابع گازی را نمی‌توان در قبل از شروع استخراج جمع‌آوری کرد. اطمینان از غلظت بالای گاز برای گاززدایی بهتر و ایمنی بیشتر مستلزم طراحی دقیق و مدیریت صحیح این سیستم می‌باشد. جمع‌آوری گاز از لایه‌های بالا و پائین زغال باعث شده که این روش‌ها مهم بوده و در معادن مختلف از آن استفاده نمایند.

شکل ۲-۵ شمایی از روش‌های گاززدایی می‌باشد که برای تخلیه گاز از سطح جبهه کار بلند

پس از استخراج زغال استفاده می‌شوند. در این شکل سه حالت حفاری نشان داده شده است:

بعضی موارد نیز مانع ایجاد تخریب و شکستن سقف می‌شود. همچنین دیواره‌های نگه داشته شده در تونل‌ها باعث ایمنی تونل‌های دسترسی شده و منطقه تخریب را از ورود هوای تهویه به آن حفظ می‌کند. زیرا منطقه تخریب دارای متان زیادی می‌باشد و با رسیدن هوا به آن امکان انفجار وجود دارد.

- گمانه منطقه تخریب^۱: این گمانه‌ها از سطح زمین و بر روی منطقه تخریب شده حفاری می‌گردند. معمولاً قبل از استخراج، عملیات حفر انجام می‌شود. این گمانه‌ها طوری حفاری شده‌اند که به بالای منطقه تخریب برسد. جریان گاز که به سمت بالا حرکت می‌کند در بالای منطقه تخریب جمع شده و با ایجاد خلأ نسبی در این گمانه‌ها اقدام به جمع‌آوری گاز متان می‌کنند. البته میزان خلأ نباید به حدی باشد که باعث ورود هوای تهویه به درون منطقه تخریب شود. مکش در حدی باید باشد که غلظت گاز را به کمتر از ۳۰ درصد نرساند. در صورتی که در حالت عادی اگر غلظت به زیر ۳۰ درصد رسید این گمانه بسته شده و از گمانه دیگری گاززدایی متان شروع می‌شود.
- علاوه بر روش‌های نشان داده شده در شکل ۲-۵، گاززدایی از تونل‌های بالا و پائین جبهه‌کار استخراجی و همچنین از مناطق استخراج شده قدیمی نیز باعث افزایش ایمنی و تولید گاز بیشتر می‌شود.

روش گاززدایی متان همراه با استخراج مجموعه‌ای از تکنیک‌های مختلف بوده که انتخاب و برنامه‌ریزی آن بستگی به مقدار بازیابی گاز، شرایط زمین‌شناسی و معدن‌کاری، مناسب بودن منطقه و میزان هزینه‌ها دارد.

¹Surface goaf boreholes

برخی از روش‌های گاززدایی مانند لوله‌های مکش مشبک^۱ برای گمانه‌های منطقه تخریب اجازه می‌دهد تا حجم بیشتری از هوا وارد متان جمع‌آوری شده گردد و به محدوده انفجار نزدیک شود. این نوع روش‌ها و انواع دیگری که باعث جمع‌آوری متان زغال در خلوص پائین می‌شوند بسیار ناکارآمد بوده و به تجمع مخلوط‌های گازی منفجر شونده کمک می‌کنند. البته این روش‌ها مانع تشکیل توده‌های گازی متان در سقف می‌شوند.

همچنین توقف عملکرد سیستم گاززدایی منجر به افزایش سریع غلظت متان در تهویه معدن می‌شود (فرض بر اینکه تهویه هوا ثابت بماند). بنابراین سیستم‌های گاززدایی نیاز مستمر به نظارت و مدیریت ایمنی دقیق دارند.

مقدار جریان گاز متان در معادن زغال‌سنگ در شرایط پایدار و عادی قابل پیش‌بینی می‌باشد. انتشار ناگهانی متان و تصاعد آنی گاز به راحتی قابل پیش‌بینی نیست، اما شرایطی که در آن این حوادث روی می‌دهد شناسایی شده است. روش‌های کاهش خطر با توجه به شناسایی عوامل خطر ساز ایجاد شده است. در چنین شرایط کاری، دقت اجرا و نظارت بر کنترل گاز مهم می‌باشد.

اهمیت این مورد نه تنها باعث جمع‌آوری گاز شده و ایمنی معدن را افزایش می‌دهد، همچنین می‌توان با جمع‌آوری داده‌های مناسب، در خصوص ایمنی بهتر معدن در آینده تصمیم‌گیری کرد.

معادن زغال مدرن و با تولید بالا، با افزایش تولید به گاز متان بیشتری برخورد کرده و عمق آنها نیز به سرعت بیشتر می‌شود و عمق بیشتر نیز باعث افزایش میزان گازخیزی زغال می‌گردد. آگاهی از وقوع انتشار گاز، ویژگی‌های انتشار و میزان جریان از یک معدن زغال‌سنگ به عنوان عواملی برای ایمنی معدن، برنامه‌ریزی تولید، تهویه، استفاده از گاز و کنترل آن مهم می‌باشند.

¹Laying Drainage Pipes

²Outburst

۲-۱۱- ایجاد گاز در زغال سنگ

گاز موجود در زغال سنگ عمدتاً شامل متان (معمولاً ۸۰ الی ۹۵ درصد)، دیگر گازهای هیدروکربنی، نیتروژن و دی اکسید کربن می باشد. به مخلوط متان، بخار آب، هوا و محصولات اکسایش دیگر، که در معادن زغال سنگ وجود دارند گاز زغال می گویند.

متان موجود در زغال سنگ بر اثر واکنش شیمیایی در زمان تشکیل زغال سنگ تولید می شود. بقایای گیاهان موجود در مرداب در محیط های مرطوب به زغال سنگ تبدیل می شوند. در صورتی که این گیاهان در زیر خاک مدفون شوند پس از مدت زمان طولانی به زغال سنگ تبدیل شده که به این واکنش زغال شدگی می گویند. گاز تولید شده از واکنش زغال شدگی در این حالت در درز و شکاف زغال و به شکل جذب سطحی محبوس می شود. در مواردی، گاز موجود در زغال در اثر جریان آب های زیرزمینی حل شده و به سنگ های مجاور حرکت کرده و منابع گازی در این سنگ ها ایجاد می نمایند. این گاز ممکن است در لایه های مجاور متخلخل مانند ماسه سنگ انباشته شده و یا ممکن است توسط شیل آلی جذب شود. این سنگ مخزن، منابع قابل توجهی از جریان گاز داشته که در زغال و لایه های گازدار معدن دست نخورده باقی مانده و در زمان استخراج زغال آزاد می شوند. بر اثر فرآیند جذب مولکولی، متان موجود در غلظت های بسیار بالاتر در زغال سنگ و یا دیگر سنگ ها جذب لایه های زغال سنگ می شود. در یک توالی عمودی از زغال سنگ، مقدار متان اغلب با عمق و درجه زغال شدگی افزایش پیدا می کند (طاهری و سرشکی، ۱۳۹۲).

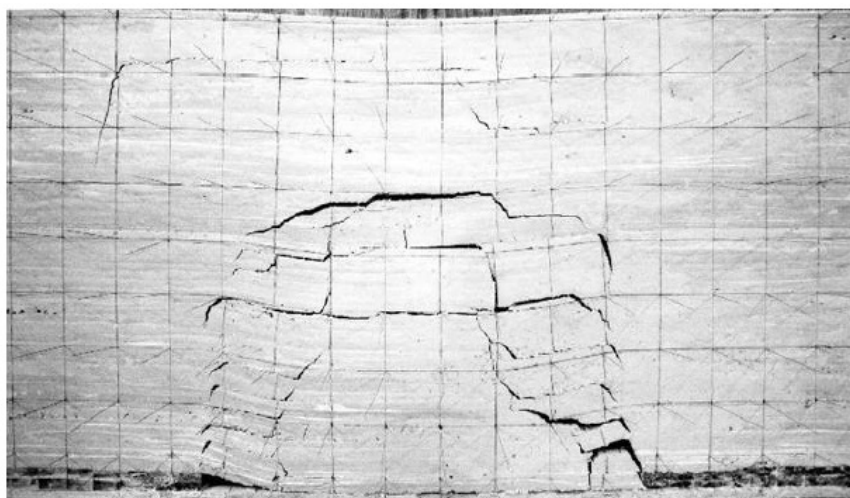
۲-۱۲- فرآیند انتشار گاز

گازی که به طور طبیعی تولید شده و در لایه های زغال سنگ و لایه اطراف آن ذخیره شده است در صورتی که فعالیت معدنی انجام شود منتشر می گردد. سرعت و مقدار گاز بستگی به مقدار اولیه گاز زغال سنگ، حجم و ضخامت زغال سنگ، قدرت گازدهی لایه زغال، شیوه معدن کاری زغال، میزان تولید زغال سنگ و نفوذپذیری زغال دارد. میزان جریان گاز با میزان تخریب لایه های معدنی بر

اثر فعالیت استخراجی متناسب می‌باشد. در یک محیط زمین‌شناسی معمولی، حجم کل گاز منتشر شده در معدن با میزان استخراج زغال‌سنگ متناسب خواهد بود. با این حال و در شرایط خاص، تخلیه سریع و انتشار ناگهانی گاز نیز می‌تواند رخ دهد.

در برخی از معادن زغال‌سنگ استرالیا که عملیات استخراج انجام شده، مقدار گاز دی‌اکسیدکربن آن از میزان متان بیشتر بوده و در چنین معادنی احتمال تصاعد آنی گاز کمتر می‌باشد. بنابراین برای گاززدایی می‌بایست ابتدا محتوای گاز موجود در لایه‌های زغال‌سنگ اندازه‌گیری شود. مطالعات انجام شده در اروپا نشان داده‌اند که در اثر استخراج زغال و تخریب سقف در یک جبهه کار بلند حدود ۱۶۰ الی ۲۰۰ متر از سقف نشست کرده و درزه‌های ممتد در آنها ایجاد شده و زیر طبقه نیز حدود ۴۰ الی ۷۰ متر تخریب می‌شود (Creedy and Philips, 1997).

شکل ۲-۶ یک مدل از منطقه تخریب را نشان می‌دهد. این روش مدل‌سازی در تعیین مقدار شکستگی و تخریب لایه‌های سقف جبهه کار بلند بسیار با اهمیت می‌باشد. علاوه بر تعیین میزان تخریب، موجب افزایش نفوذپذیری و ایجاد مسیر برای مهاجرت گاز می‌گردد. تئوری‌های مختلف و مدل‌های تجربی توسعه یافته‌ای برای نشان دادن این فرایند ایجاد شده است.



شکل ۲-۶- تشکیل منطقه تخریب در بالای لایه استخراج شده زغال‌سنگ و لایه‌های شکسته شده (Creedy and Philips, 1997)

۲-۱۳- گازخیزی نسبی از معادن زغال سنگ

نرخ انتشار خاص یا نسبی معمولاً برای نشان دادن میزان گازخیزی معدن و یا کارگاه جبهه کار بلند به کار می‌رود. از این واحد برای نشان دادن محتوای گاز (مترمکعب متان منتشر شده در هر تن زغال سنگ یا m^3/t) استفاده می‌شود. نرخ تولید گاز متان برابر است با حجم کل متان آزاد شده از تمام منابع، تقسیم بر مقدار کل زغال سنگ تولید شده در طی یک دوره استخراج می‌باشد. به عبارت دیگر، این اندازه‌گیری برای مشخص شدن مقدار مترمکعب گاز متان منتشر شده در هر دوره زمانی برای مقدار تناژ استخراج زغال سنگ می‌باشد. در اثر استخراج زغال، خلل و فرج‌های زیادی در زغال و لایه‌های اطراف ایجاد شده که این عمل باعث حرکت گاز از درون زغال به سطح کارگاه می‌شود. بدین صورت اندازه‌گیری مقدار گاز به صورت دقیق قابل انجام نمی‌باشد. به طور معمول، معادن زغال سنگ دارای تولید حدود ۱۰ مترمکعب متان از هر تن زغال استخراجی می‌باشند. در برخی معادن انگلیس و آمریکا تولید گاز متان به ۵۰ الی ۱۰۰ مترمکعب بر تن می‌رسد که این مقادیر استثنایی می‌باشند (Kissell, 2006).

در بعضی موارد می‌توان با انجام عملیات شکست هیدرولیکی میزان درزه و شکاف را درون لایه زغال افزایش داد تا مقدار گاز بیشتری بتواند درون لایه حرکت کرده و به چاه‌های مکش گاز برسند. البته از این روش در عملیات ذخیره‌سازی دی‌اکسیدکربن در لایه زمین جهت جلوگیری از پخش آنها در اتمسفر نیز استفاده می‌شود (Smith and Senjen, 2011).

۲-۱۴- ویژگی‌ها و پارامترهای انتشار گاز از معادن زغال سنگ

در هنگام تجزیه مواد گیاهی و تبدیل آنها به انواع زغال سنگ، مقدار زیادی گاز متان و گازهای دیگر تشکیل می‌شود. بیشتر این گازها در لایه‌های زغال سنگ محبوس و مقداری نیز در سنگ‌های درون گیر جمع می‌شوند. زغال سنگ از دو نوع حفره میکروسکوپی (کمتر از ۲ نانومتر) و ماکروسکوپی (بیشتر از ۵۰ نانومتر) تشکیل شده است (توکلی و سرشکی ۱۳۸۵). تجمع متان در زغال سنگ به دو

صورت است: ۱- به صورت جذب سطحی بر روی حفره‌ها و سطوح میکروسکوپی زغال‌سنگ، مکانیزم نگهداری گاز درون زغال‌سنگ به صورت جذب سطحی، به خلل و فرج میکروسکوپی بستگی دارد، زیرا حدود ۸۵ درصد از خلل و فرج در سطح زغال به صورت میکروسکوپی است. ۲- به صورت گاز آزاد، تجمع گاز متان در سطح زغال‌سنگ به صورت گاز آزاد به مراتب کمتر از جذب سطحی است. معمولاً بیش از ۹۵ درصد از گاز زغال‌سنگ به صورت جذب سطحی به شکل لایه‌های تک مولکولی بر روی سطح زغال‌سنگ و کمتر از ۵ درصد به صورت گاز آزاد است (محمدي و همکاران ۱۳۹۰). بیشترین تولید گاز متان در محل خروج متان از سطح سینه‌کاری است که در حال عملیات استخراج می‌باشد. مطالعات آماری نشان می‌دهد که عیار این گاز می‌تواند به ۵۰ درصد نیز برسد. پیش‌بینی مقدار هوای لازم برای پائین آوردن غلظت متان از مقدار جریان گاز منتشر شده، انجام می‌پذیرد (Creedy and Philips, 1997).

حجم گاز آزاد شده از منطقه تخریب زغال با گذشت زمان کاهش یافته تا زمانی که فعالیت معدنی به منبع جدیدگازی برخورد نماید. پس از چند مرحله گاززدایی، می‌توان تولید گاز و مجموع گازهای تولیدی در طول یک دوره استخراج را مشخص نمود. مقدار انتشار نسبی (مقدار گاز منتشر شده از هر تن زغال استخراجی) در طول عمر یک کارگاه استخراج می‌تواند افزایش یا کاهش داشته باشد. در صورتی که تولید زغال در جبهه‌کار متوقف شود، جریان و انتشار گاز در این سینه‌کار با نرخ کاهشی ادامه می‌یابد. هنگامی که زغال کارگاه به اتمام می‌رسد و تولید آن صفر شود، نرخ گاز تولید شده نیز نسبت به نرخ اصلی تولید گاز کاهش نسبی پیدا می‌کند. در اکثر محاسبات برای اندازه‌گیری مقدار گاز، فرض را بر تولید یکنواخت زغال‌سنگ و حالت انتشار گاز را نیز یکنواخت در نظر می‌گیرند. زمانی که با این روش مقدار تولید گاز اندازه‌گیری شد، مهندسان معدن نیز بر طبق این داده‌ها محاسبه مقدار جریان تهویه لازم را انجام می‌دهند. همچنین روش‌های کنترل خطر برای کاهش احتمال وقوع حوادث ناشی از انفجار جدی می‌شود. برای مثال، تصاعد آبی گاز در زغال‌سنگ و گاهی

نیز ترکش سنگ^۱ در معادن زغال با نفوذپذیری کم و محتوای گاز بالا رخ می‌دهد. عوامل زمین‌شناسی و شرایط استخراج که باعث بروز خطرات انفجار می‌شوند را اغلب می‌توان شناسایی کرد. اما احتمال وقوع آن همچنان وجود دارد. مدیریت معدن این مشکل ایمنی را با اجرای روش‌های پیگیری و کنترل انتشار ناگهانی گاز کنترل می‌نماید. اساس این روش کاهش محتوای گاز زغال‌سنگ به پائین‌ترین حد لازم برای ایجاد منطقه امن قبل از استخراج زغال می‌باشد (ECE, Energy Series, 2010).

انتشار ناگهانی متان می‌تواند از کف کارگاه جبهه‌کار بلند نیز روی داده و متان به سطح سینه کار و یا مسیر حمل و نقل زغال وارد شود. این نوع انتشار گاز متان معمولاً در شرایطی که در آن کف کارگاه از ماسه‌سنگ تشکیل شده و در ۴۰ الی ۶۰ متری کف کارگاه، لایه زغالی دیگری وجود داشته باشد اتفاق می‌افتد. اگر چه پیش‌بینی این رویداد مشکل است اما به طور کلی می‌توان با یک سری حفاری‌های منظم از کف کارگاه نسبت به جلوگیری انباشت گاز متان ممانعت به عمل آورد.

انتشار ناگهانی و تصاعد آبی گاز می‌تواند خسارت قابل توجهی به معدن وارد نموده و همچنین باعث خسارت جانی نیز گردد. اگر مخلوط هوا و متان در محدوده قابل اشتعال باشد جرقه ناشی از برخورد تجهیزات با سنگ در زمان استخراج نیز می‌تواند باعث انفجار گردد.

گرد زغال و گاز متان در خواص انفجاری در تعامل با یکدیگرند. محدوده اشتعال هر دو آنها در حضور دیگری بسیار وسیع‌تر از حالتی خواهد بود که هر یک از آنها به تنهایی حضور داشته باشد. به بیانی دیگر، وجود گاز متان حتی در حد مجاز خود در مناطقی که غلظت بالایی از گرد زغال وجود دارد می‌تواند بسیار خطرناک باشد. در این حالت اگر چه احتمال انفجار گاز متان پایین است اما حضور آن همراه با گرد زغال، حداقل غلظت لازم برای آغاز انفجار را پایین‌تر خواهد برد که این امر عواقب وخیمی را به دنبال خواهد داشت (سرشکی و حسینی، ۱۳۸۶).

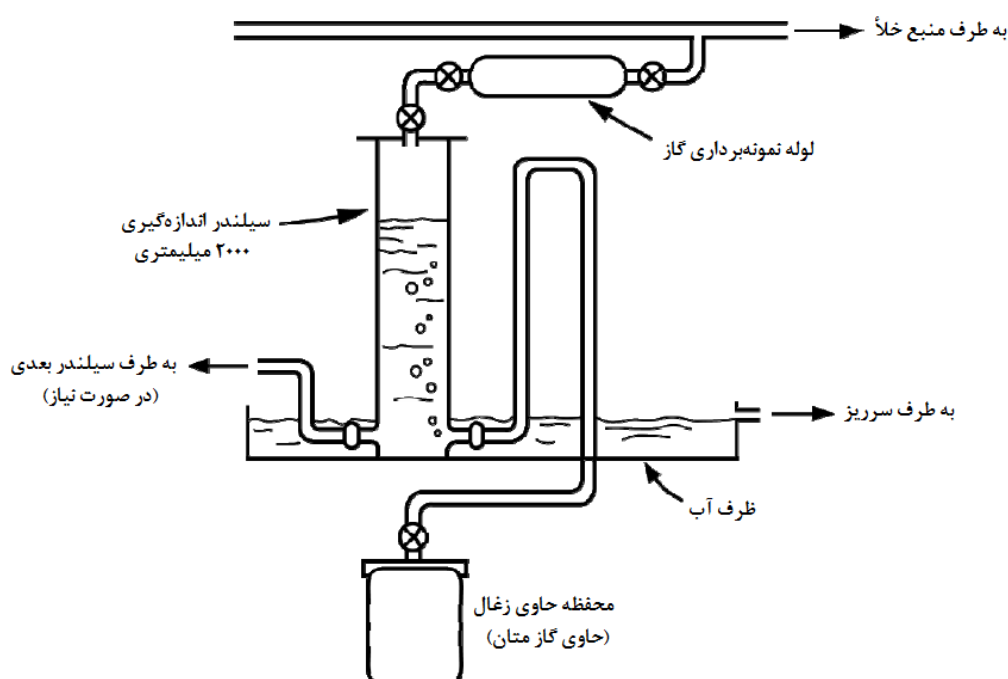
¹Rock Burst

عملیات استخراج معدن می‌تواند گاهی باعث بر هم خوردن وضعیت مخزن گاز طبیعی شده و منجر به انتشار آن تا دو برابر آنچه پیش‌بینی شده گردد. مخازن گاز طبیعی ممکن است درون لایه‌های زغال‌سنگ انباشته شده و به دلیل شرایط خاص زمین‌شناسی و یا نبود خلل و فرج طبیعی در زغال، مسیر حرکت آنها مسدود شده و درون زغال انباشته شوند. تشخیص چنین شرایطی قبل از معدن‌کاری امری مشکل بوده و مهندسان معدن می‌بایست در این مورد کاملاً با تجربه باشند و از حوادث قبلی اطلاع کامل داشته باشند. اهمیت نظارت زیرزمینی در این مورد در جهت رسیدن به ایمنی کامل بسیار مهم می‌باشد.

۲-۱۵- اندازه‌گیری مقدار گاز در جای زغال

برنامه‌ریزی گاززدایی متان از زغال و ایجاد سیستم تهویه لازم نیاز به دانستن مقدار گاز جذب شده تقریبی در زغال دارد. مقدار گاز فشرده در فضاهای خالی بیشتر است. مقدار گاز را با واحد حجم گاز در هر تن زغال‌سنگ (m^3/t) بیان می‌کنند و این مقدار با انتشار نسبی و خاص فرق دارد. رویکرد کلی برای اندازه‌گیری مقدار گاز به این صورت است که با استفاده از دستگاه‌های نمونه‌گیر ویژه، نمونه های زغالی در محفظه‌هایی مخصوص، مهر و موم شده و به آزمایشگاه فرستاده می‌شود. این نمونه‌ها در دمایی نزدیک به دمای مخزن نگهداری شده و به گاز اجازه انتشار می‌دهند. سرعت آزاد شدن گاز را بر طبق میزان به دست آمده اندازه‌گیری می‌کنند. در شکل ۲-۷ تجهیزات لازم برای اندازه‌گیری مقدار گاز منتشر شده از یک نمونه زغال را مشاهده می‌کنید. تجهیزات محاسبه مقدار گاز شامل سیلندر نگهدارنده زغال نمونه برداری شده و تجهیزات محاسبه مقدار گاز خروجی از این سیلندر می‌باشد. همچنین ترکیب گاز به دست آمده را می‌توان با جمع‌آوری آن و ارسال آن به آزمایشگاهی دیگر جهت تجزیه و تحلیل شیمیایی به دست آورد. گاز باقی مانده در زغال‌سنگ نیز پس از آزمایش‌های اولیه،

توسط خرد کردن زغال و اندازه‌گیری مقدار آزاد شده تعیین می‌گردد. اداره معادن آمریکا^۱ (USBM) برای اندازه‌گیری مقدار گاز زغال روشی استاندارد دارد که از چند روز تا یک هفته به طول می‌انجامد (Diamond and Levine, 1981). روش دفع سریع گاز در اروپا و استرالیا ابداع گردید و از آن برای رسیدن به نتایج مورد نیاز در کمترین زمان ممکن استفاده می‌شود (Janas and Opahle, 1986).



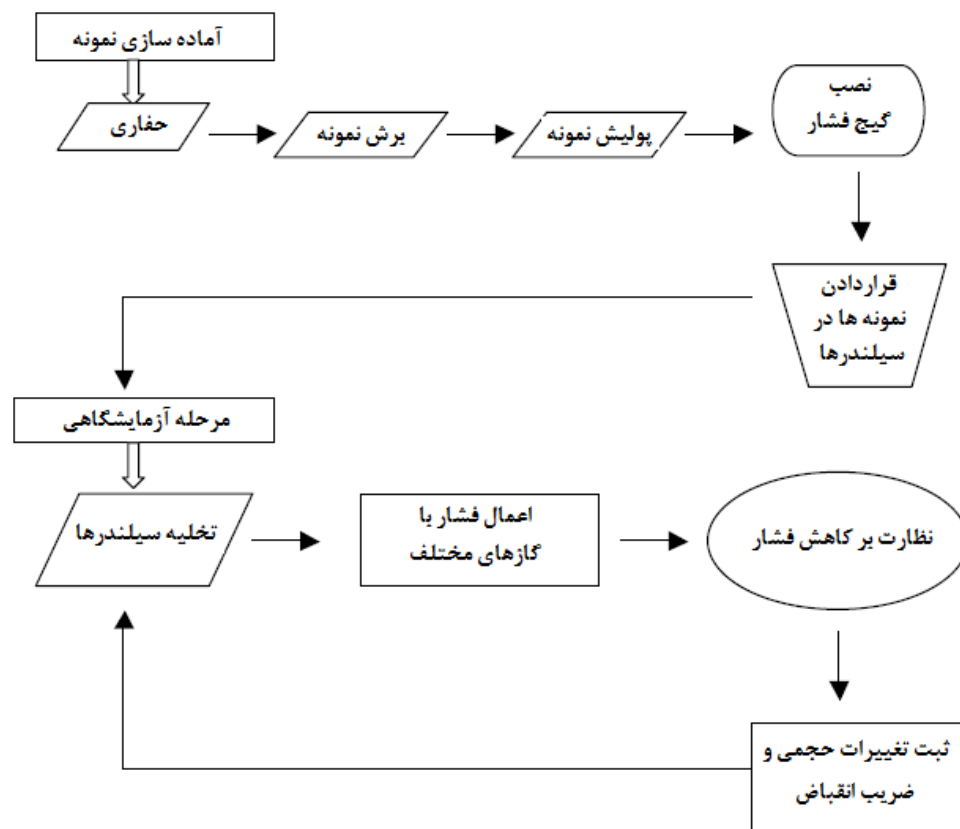
شکل ۲-۷- تجهیزات اندازه‌گیری مقدار گاز درجا بر اساس استاندارد استرالیا (Diamond and Schatzel, 1998)

علاوه بر این، برای زغال‌های با نفوذپذیری کم نیز از طریق تعیین فشار جزئی و روش‌های آماری می‌توان مقدار گاز را محاسبه نمود (Creedy and Philips, 1997).

در شکل ۲-۸ دیاگرامی از آماده‌سازی نمونه های زغالی برای انجام آزمایش ضریب انقباض ارائه شده است. همچنین در شکل ۲-۹ تعدادی از تجهیزات لازم برای محاسبه مقدار گازخیزی زغال نشان داده شده است. همانطور که در شکل مشخص است بر روی نمونه زغال، گیج فشار نصب شده و

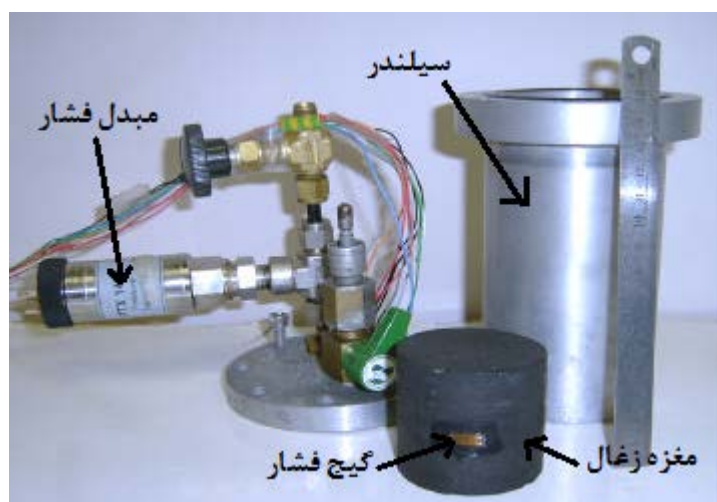
¹United States Bureau of Mines

درون سیلندری قرار داده می‌شود. سپس هوا، نیتروژن و دیگر گازهای مورد آزمایش در فشارهای مختلف به نمونه زغال تزریق می‌شود تا جایگزین گاز متان شده و میزان متان خروجی به عنوان گازخیزی زغال محاسبه می‌شود.



شکل ۲-۸- نمودار آماده سازی نمونه زغال و تست انقباض (Sereshki, 2005)

از آنجاکه لایه های زغال شامل کانی ها و مواد زغالی (به همراه گاز جذب شده) و خاکستر می باشند، فقط می بایست مقدار گاز موجود در این مواد اندازه گیری شود. در اکثر موارد این گاز که عمدتاً متان می باشد به حدود ۳۰ متر مکعب بر تن می رسد.



شکل ۲-۹- نمونه زغالی به همراه تجهیزات اندازه‌گیری (Sereshki, 2005)

۲-۱۶- برآورد عملی جریان گاز در معادن زغال‌سنگ

برای معادن به طور کلی مدل تجربی از انتشار گاز که بسیار قابل اعتماد نیز می‌باشد ساخته شده و بر حسب شرایط خاص آن معدن قابل استفاده می‌باشد. این مدل‌ها نیاز به وارد کردن پارامترهای اساسی مانند مقدار گاز لایه، خواص مکانیکی لایه‌های سنگ و زغال‌سنگ، هندسه معدن، و نرخ تولید زغال را دارد. کاربران می‌توانند مدل‌های خود را بر اساس اطلاعات موجود و یا اطلاعات اختصاصی خود تغییر دهند. برآورد جریان در هر دو شرایط نسبی و مطلق بر حسب مترمکعب بر تن از این مدل‌ها قابل محاسبه می‌باشند. این واحد به صورت مترمکعب در دقیقه و یا لیتر در ثانیه بیان می‌شوند.

همچنین این مدل‌ها می‌توانند اثرات افزایش نرخ تولید زغال‌سنگ در جریان گاز را نیز پیش‌بینی نمایند. علاوه بر این، مدل‌ها قادر به پیش‌بینی مقدار تولید زغال در شرایط ایمن بر طبق حداکثر جریان گاز موجود و بر اساس شرایط زیر هستند:

- محدوده مجاز غلظت گاز قابل اشتعال در راهروهای بازگشت هوا مشخص باشد.

- سیستم تهویه هوا ایجاد شده باشد و امکان چرخش هوا در محدوده‌های تجهیزات استخراج وجود داشته باشد. شدت جریان هوای تهویه به آهنگ استخراج و تعداد راه‌های برگشتی و هوای لازم برای تنفس معدن‌چیان بستگی دارد.
- اگر از سیستم گاززدایی استفاده می‌شود از منابع و تجهیزات گاززدایی به طور مناسب نگه‌داری شود.

۲-۱۷- جمع بندی

در این فصل در مورد زغال‌سنگ، نحوه ایجاد گاز متان در این ماده انرژی‌زا و روش‌های گاززدایی متان از زغال‌سنگ بحث شد. با بررسی‌های انجام گرفته مشخص شد که اهداف اصلی گاززدایی متان از زغال‌سنگ جلوگیری از انفجارها و خطرات ناشی از خفگی در معادن زیرزمینی زغال است. البته جمع‌آوری این گاز و بهره اقتصادی از انرژی حاصل از آن نیز جزو اهداف گاززدایی می‌باشد. از دیگر اهداف گاززدایی، جلوگیری از انتشار متان به اتمسفر می‌باشد، زیرا متان جزو گازهای خطرناک گلخانه‌ای است. اما بحث اصلی که با موضوع رساله ربط دارد، جریان گاز متان داخل لایه زغالی می‌باشد که کلیات این موضوع در این فصل بیان گردید. درزه‌های اصلی، فرعی و همچنین ریزدرزه‌ها در حرکت مولکول‌های گاز متان درون لایه زغالی نقش اساسی را دارا می‌باشند. بررسی و کنترل میزان درزه‌داری لایه زغالی در مقدار گازخیزی زغال مهم بوده و می‌توان میزان انتشار گاز متان درون سینه‌کار استخراجی را محاسبه نمود. در پایان این فصل کلیاتی در مورد محاسبه مقدار گاز متان لایه زغال بحث شد و روش استاندارد محاسبه گاز متان مورد بررسی جزئی قرار گرفت.

فصل سوم

سابقه تحقیق

۳-۱- مقدمه

گاززدایی متان از زغال سنگ یکی از مهمترین موضوعات تحقیقاتی در کشورهای تولید کننده زغال سنگ است. طی سال های اخیر مطالعات زیادی در زمینه گاززدایی متان انجام گرفته است. همان گونه که در فصل گذشته بیان شد گاززدایی متان از زغال سنگ دارای جنبه های مختلف و زمینه های مختلفی است. در این فصل ابتدا برخی از منابعی که در زمینه گاززدایی متان از زغال سنگ می باشند، مورد بررسی قرار گرفته و سپس توضیحاتی در مورد تحقیقات صورت گرفته در مورد مدل سازی جریان گاز در مواد مختلف داده می شود.

۳-۲- مروری بر تحقیقات انجام شده

از آنجایی که موضوع گاززدایی متان از زغال سنگ دارای مطالب و بخش های متنوعی می باشد جهت بررسی کارهای قبلی انجام گرفته در این زمینه، آنها را به بخش های اصلی زیر تقسیم کرده و هر کدام به صورت جداگانه بررسی می گردد.

- متان لایه زغال^۱
- گاززدایی متان از زغال سنگ^۲
- جذب و واجذب گاز متان در زغال^۳
- مدل سازی^۴
- ایمنی و ذخیره گاز در لایه های زمین شناسی^۵

¹ Coal Bed Methane

² Coal Gas Drainage

³ Absorption & Desorption

⁴ Modelling

⁵ Sequestration & Safety

۳-۲-۱- متان لایه زغال

متان موجود در زغال بر اثر واکنش شیمیایی در زمان ایجاد زغال سنگ تولید می‌شود. بقایای گیاهان موجود در مرداب در محیط‌های مرطوب به زغال سنگ تبدیل می‌شوند. در صورتی که این گیاهان در زیر خاک مدفون شوند پس از مدت زمان طولانی به زغال سنگ تبدیل شده که به این واکنش زغال شدگی می‌گویند. هر چه درجه حرارت، فشار و مدت زمان دفن زغال بیشتر باشد درجه خلوص و کیفیت زغال سنگ بیشتر شده و گاز بیشتری نیز تولید می‌شود. گاز تولید شده از واکنش زغال شدگی در این حالت در درز و شکاف زغال محبوس می‌شود. در بعضی موارد، گاز موجود در زغال بر اثر عبور آب‌های زیرزمینی حل شده و به سنگ‌های مجاور حرکت کرده و منابع گازی در این سنگ‌ها ایجاد می‌نماید. این گاز ممکن است در لایه‌های مجاور متخلخل مانند ماسه سنگ انباشته شده و یا ممکن است توسط شیل آلی جذب شود. این سنگ مخزن، منابع قابل توجهی از جریان گاز داشته که در زغال و لایه‌های گازدار معدن دست نخورده باقی مانده و در زمان استخراج زغال آزاد می‌شوند. بر اثر فرآیند جذب مولکولی، متان موجود در غلظت‌های بسیار بالاتر در زغال سنگ و یا دیگر سنگ‌ها جذب لایه‌های زغال سنگ می‌شود. در یک توالی عمودی از زغال سنگ، مقدار متان اغلب با عمق و درجه زغال شدگی افزایش پیدا می‌کند. در جدول ۳-۱ تحقیقات صورت گرفته در این زمینه آورده شده است.

جدول ۳-۱- تعدادی از تحقیقات صورت گرفته در زمینه متان لایه زغال سنگ

ردیف	نام محقق / محققین	سال انتشار	موضوع تحقیق	نتیجه تحقیقات	توضیحات
۱	یان لیو ^۱ و همکاران	۲۰۱۴	بررسی متان لایه زغال در چین	ارائه پیشنهاداتی جهت افزایش میزان گاززدایی	نگاه جدی تر به مسائل و مشکلات ناشی از متان لایه زغال

¹ Yan Liu

ردیف	نام محقق / محققین	سال انتشار	موضوع تحقیق	نتیجه تحقیقات	توضیحات
۲	قیصری ۱ و همکاران	۲۰۱۲	آزمایشات کانی‌شناسی بر روی ماسرال های زغال	مطالعه میزان تخلخل هر یک از ماسرال‌ها	تصمیم‌گیری در مورد گاززدایی متان از ماسرال‌ها
۳	کاراچان ۲ و همکاران	۲۰۱۱	متان ساطع شده از سنگ زغال -	ارتباط میزان انتشار متان با فعالیت‌های معدنی و میزان تهویه معدن	افزایش ایمنی ، تولید انرژی و کاهش انتشار گاز گلخانه‌ای با گاززدایی متان
۴	عزیز ۳ و همکاران	۲۰۱۱	آزمایش‌هایی بر روی های زغال معادن استرالیا	تاثیر متان بر میزان ایمنی معادن و سیستم تهویه معدن	افزایش ایمنی با استفاده از گاززدایی و استفاده از نتایج در معادن دیگر کشورها
۵	یاوبین ۴ و همکاران	۲۰۱۱	بررسی گاززدایی معدن لیوژانگ چین	تعیین میزان گاز زغال و میزان گاز بدست آمده از چال‌های مکش و میزان گاز باقی مانده در زغال	تخمین میزان تهویه لازم در زمان استخراج معدن
۶	بلک ۵ و همکاران	۲۰۱۱	بررسی لایه زغالی بولی استرالیا	تاثیر عوامل زمین‌شناسی و عملیاتی بر گاززدایی متان از زغال	تاثیر غالب عوامل زمین شناسی بر گاززدایی نسبت به عوامل عملیاتی

¹ Gheysari Narges

² Özgen Karacan

³ Naj Aziz

⁴ LI Yao-bin

⁵ Dennis Black

ردیف	نام محقق / محققین	سال انتشار	موضوع تحقیق	نتیجه تحقیقات	توضیحات
۷	وی ۱ و همکاران	۲۰۰۹	تحلیل عددی و تئوریک بر روی مکانیزم آزادسازی استرس و محدودیت‌های حفاری چال‌های گاززدایی	شناسایی مکان‌هایی با احتمال تخریب بالا در چال‌های گاززدایی	بهینه‌سازی فاصله میان چال‌های گاززدایی
۸	توکلی ۲ و همکاران	۲۰۰۸	بررسی معدن زغال پروده طبس	تخمین میزان گاز متان این معدن	بررسی گاززدایی از معدن پروده طبس
۹	گارسیا آرناس ۳	۲۰۰۴	بررسی زغال‌های حوزه آپالاچی شمالی آمریکا	بررسی امکان سنجی گاززدایی متان از این منطقه و شرایط زمین‌شناسی و پارامترهای تحت تاثیر	پیش‌بینی میزان تولید گاز متان

۳-۲-۲- گاززدایی متان از زغال سنگ

هدف از گاززدایی متان، جمع‌آوری گاز با خلوص بالا از منبع آن و جلوگیری از انتشار آن در هوای تهویه معدن می‌باشد. از نظر نظارت معادن، گاز منتشر شده نباید از حدی که باعث ایجاد خطر می‌شود در هوای تهویه معدن موجود باشد. گاززدایی متان علاوه بر افزایش ایمنی در معدن‌کاری باعث کاهش خطرات زیست‌محیطی و بازیابی انرژی می‌گردد.

گاز متان را می‌توان قبل یا بعد از معدن‌کاری جمع‌آوری کرد. گاززدایی قبل از معدن‌کاری تنها شیوه جمع‌آوری گاز متان برای کاهش جریان گاز به طور مستقیم قبل از هرگونه عملیات معدنی می‌باشد. البته این روش گاززدایی زمانی قابل استفاده می‌باشد که لایه زغال دارای درزه‌های متوسط بوده و از نفوذپذیری بالایی برخوردار باشد. در جدول ۳-۲ تعدادی از تحقیقاتی که تاکنون در زمینه گاززدایی متان از زغال سنگ انجام شده، آورده شده است.

¹ Yang Wei

² Tavakoli Mohamad

³ Anangela Garcia Arenas

جدول ۲-۳ تعدادی از تحقیقات انجام گرفته در زمینه گاززدایی متان از زغال سنگ

ردیف	نام محقق / محققین	سال انتشار	موضوع تحقیق	نتیجه تحقیقات	توضیحات
۱	لی ^۱ و همکاران	۲۰۱۴	تولید گازهای گلخانه‌ای در جهان	بررسی میزان تولید متان از زغال و انتشار آن به عنوان گاز گلخانه‌ای	گاززدایی و کاهش انتشار
۲	سانگ و همکاران	۲۰۱۲	بررسی معدن پانگوان چین	امکان سنجی گاززدایی از این معدن و شناخت پارامترهای لازم	تخمین میزان گاززدایی
۳	گاراو ^۲ و همکاران	۲۰۱۲	بررسی عوامل تاثیر گذار بر چال‌های گاززدایی	تاثیر پارامترهای درون چاهی بر میزان تولید گاز متان	بهبود سیستم گاززدایی
۴	کیونگ ^۳ و همکاران	۲۰۱۲	بررسی معدن ژائو گژانگ چین	بررسی رفتار گاز متان در سیستم گاززدایی با استفاده از نظریه گراف و بهینه سازی میزان گاززدایی	بهینه سازی سیستم گاززدایی با استفاده از نظریه گراف

¹ Le Yang

² Kumar Gaurav

³ Ye Qing

ردیف	نام محقق/ محققین	سال انتشار	موضوع تحقیق	نتیجه تحقیقات	توضیحات
۵	نجفی ^۱ و همکاران	۲۰۱۲	بررسی زغال سنگ های ایران از لحاظ گازخیزی	امکان سنجی گاززدایی در زغال های ایران	--
۶	شیرین ^۲ و همکاران	۲۰۱۱	بررسی تکنولوژی استفاده شده گاززدایی در معادن زغال اوکراین	مطالعه ساختار چال های گاززدایی، مکانیسم آبکشی چال ها و تجهیزات حفاری	استفاده در دیگر کشورها
۷	ونپینگ ^۳ و همکاران	۲۰۱۱	بررسی میزان گاز جمع آوری شده از معدن چنگ ژوانگ چین	بررسی گاززدایی برای ۵ سال و تهیه مدل برای پیش بینی آینده گاز متان این معدن	--
۸	لیان ^۴	۲۰۱۱	بررسی پارامترهای حفاری چال های گاززدایی	اهمیت تعیین میزان تمایل و شیب چال های گاززدایی و مدیریت و نظارت بر نوع حفاری و قطر و شیب چال ها	بهبود سیستم گاززدایی
۹	وانگ ^۵ و همکاران	۲۰۱۱	بررسی خصوصیات و پارامترهای بدست آمده از حفاری چال ها	اهمیت ثبت خصوصیات چال در زمان حفاری	استفاده از اطلاعات ثبت شده و شناسایی شکستگی ها و گسلها

¹ Najafi Mehdi

² Shirin L.N

³ Wenping Jiang

⁴ Jie Lian

⁵ Fangtian Wang

ردیف	نام محقق / محققین	سال انتشار	موضوع تحقیق	نتیجه تحقیقات	توضیحات
۱۰	جیانگ ^۱ و همکاران	۲۰۱۱	بررسی اعمال فشار بر لایه زغالی در سرعت تخلیه گاز	افزایش سرعت انتشار گاز با اعمال فشار بیشتر به لایه زغال	افزایش انتشار گاز در لایه‌های زیرین زغال
۱۱	یونگ ^۲ و همکاران	۲۰۱۱	بررسی گاززدایی متان از چال‌های منطقه تخریب	بهترین عمق حفر چال در منطقه تخریب حدود ۳۰ متری بالای لایه زغالی	--
۱۲	محمدی ^۳ و همکاران	۲۰۱۰	بررسی زغال‌های منطقه شاهرود ایران	انتخاب بهترین منطقه گاززدایی متان	استفاده از فرآیند تحلیل سلسله مراتبی در تعیین بهترین منطقه گاززدایی
۱۳	کاراچان ^۴	۲۰۰۹	بررسی معدن پیتسبورگ ^۵ در بخش جنوب غربی پنسیلوانیا	تعیین عوامل موثر در تولید گاز متان از چال‌های گاززدایی	تعیین پارامترهای حفاری، محل چاه، میزان ایجاد خلأ در چاه مکش و نرخ استخراج
۱۴	کاراچان	۲۰۰۹	بررسی منطقه تخریب در بالای کارگاه استخراجی	جمع شدن مقدار قابل توجهی گاز متان در منطقه تخریب	وجود منطقه کم فشار و تخلخل کافی جهت جمع شدن گاز در منطقه تخریب

¹ Changbao Jiang

² Yong ZHANG

³ Mohamadi Hasan

⁴ Özgen Karacan

⁵ Pitsburg Coal Mine

ردیف	نام محقق/ محققین	سال انتشار	موضوع تحقیق	نتیجه تحقیقات	توضیحات
۱۵	فنگ ۱ و همکاران	۲۰۰۹	بررسی عوامل موثر بر میزان گاززدایی	فاصله میان چال‌ها، قطر چال مکش، میزان ایجاد خلاً در چال مکش و مدت زمان گاززدایی	بهینه سازی گاززدایی
۱۶	لی ۲	۲۰۰۹	تحقیق بر روی ارتباط گاززدایی متان با میزان استخراج زغال و تهویه	پیش بینی احتمال جمع شدن گاز و انفجار گاز بر اساس میزان فعالیتهای معدنی و تهویه	تقسیم بندی قوانین حرکت گاز و سنگ بستر جهت پیش بینی بهتر
۱۷	سانگ ۳ و همکاران	۲۰۰۹	بررسی گاززدایی معدن کویینشو جنوبی ۴ چین	تاثیر بالای وضعیت زمین شناسی و تکتونیک منطقه بر میزان گاززدایی	بررسی تمامی پارامترهای زمین شناسی بر محل چال‌های گاززدایی و میزان تولید آنها

۳-۲-۳- نفوذپذیری و خروج گاز متان از زغال

گازی که به طور طبیعی تولید شده و در لایه‌های زغال سنگ و لایه اطراف آن ذخیره شده است در صورتی که فعالیت معدنی انجام شود، منتشر می‌گردد. سرعت و مقدار گاز بستگی به مقدار اولیه گاز زغال سنگ، توزیع و ضخامت زغال سنگ، قدرت گازدهی لایه زغال، شیوه معدن کاری زغال، میزان تولید زغال سنگ و نفوذپذیری زغال دارد. میزان جریان گاز با میزان تخریب لایه‌های معدنی بر اثر فعالیت استخراجی متناسب می‌باشد. در یک محیط زمین‌شناسی معمولی، حجم کل گاز منتشر شده در معدن با میزان استخراج زغال سنگ متناسب خواهد بود. با این حال و در شرایط خاص،

¹ Wang Zhao feng

² Li Guo-jun

³ Sang Shu-xun

⁴ Southern Qinshui

تخلیه سریع و انتشار ناگهانی گاز نیز می‌تواند رخ دهد. محققان بسیاری در این زمینه تلاش نموده‌اند و تأثیر پارامترهای مختلف در مقدار تولید گاز را مورد بررسی قرار داده‌اند که در جدول ۳-۳ به تعدادی از آنها اشاره شده است.

جدول ۳-۳- تعدادی از تحقیقات صورت گرفته در زمینه نفوذپذیری زغال و تولید گاز متان

ردیف	نام محقق / محققین	سال انتشار	موضوع تحقیق	نتیجه تحقیقات	توضیحات
۱	وانگ ^۱ و همکاران	۲۰۱۴	بررسی ترک‌ها و درزه‌های دیواره استخراج	افزایش احتمال انفجار بر اثر وجود درزه‌های طولانی در دیواره استخراجی	گاززدایی از دیواره جهت جلوگیری از انفجار
۲	رودریگز ^۲ و همکاران	۲۰۱۴	بررسی سیستم درزه‌داری زغال	ارتباط بالای میزان گاززدایی با سیستم درزه‌های زغال و مدل نمودن درزه‌بندی زغال	استفاده از درزه‌بندی برای ذخیره دی‌اکسیدکربن
۳	سوکت ^۳ و همکاران	۲۰۱۴	بررسی دو فاز آب و گاز درون لایه زغالی	انجام آزمایشات مختلف بر روی زغال و تاثیر فاکتورهای مختلف بر روی نفوذپذیری زغال و جریان آب و گاز درون زغال	پیش بینی میزان ذخیره دی‌اکسید کربن در زغال
۴	ژانگ ^۴ و همکاران	۲۰۱۱	بررسی پارامترهای جذب گاز توسط زغال	تغییر در جذب گاز در صورت تغییر دمای محیط	کاهش کشش سطحی نمونه‌ها با افزایش دما

¹ Wang zhiliang

² Rodrigues C.F

³ Sevket Durucan

⁴ Lei Zhang

ردیف	نام محقق / محققین	سال انتشار	موضوع تحقیق	نتیجه تحقیقات	توضیحات
۵	جیانلین ۱ و همکاران	۲۰۱۱	تعیین میزان جذب و دفع گاز توسط زغال در درجه‌های مختلف دما	دفع بیشتر گاز در فشار بالا و دمای بالا	کاهش جذب گاز توسط زغال با افزایش فشار از طریق آب
۶	عزیز و همکاران	۲۰۱۰	آزمایش بر روی نمونه‌های معدن تاهمور ۲	تاثیر میزان تخلخل و شکستگی بر روی میزان انتشار گاز	استفاده از گازهای دیگر مانند دی اکسید کربن، نیتروژن و مخلوط متان و دی‌اکسید کربن به جای متان در آزمایش‌ها
۷	اوزکو ۳	۲۰۰۹	بررسی معدن کومپانیا ۴ لهستان	بررسی خطرات انفجار گاز و انفجار سنگ و پارامترهای موثر در بروز این حوادث	ارتباط میزان گاز موجود در لایه‌های زغال و سیستم درزه‌داری زغال
۸	گاش ۵	۱۹۹۱	آزمایش بر روی خصوصیات سنگ و زغال سنگ	تخلخل و نفوذپذیری از عوامل اصلی حرکت آب در لایه زغال بوده و سیستم درزه زغال تاثیر بالایی دارد	استفاده از نتایج حاصل از حرکت آب برای حرکت گاز درون زغال - تبعیت از یک قانون در جریان آب و گاز
۹	لاما ۶ و همکاران	۱۹۸۷	آزمایش مکانیکی در زمینه جریان گاز متان در زغال سنگ	وابستگی نفوذپذیری به فشار گاز و فشار سنگ	استفاده از قوانین دارسی، فیک و لانگمویر در روابط

¹ Xie Jianlin

² Tahmoor

³ Uszko Marek

⁴ Kompania

⁵ B.W.Gash

⁶ R.D.Lama

۳-۲-۴- مدل سازی

مدل نمایش ساده‌ای از یک سیستم پیچیده است. اصولاً با مدل سازی می‌توان حرکات و واکنش‌های یک سیستم دقیق را به سادگی در اختیار گرفت. به وسیله مدل سازی می‌توان با هزینه کم سیستم را در اختیار قرار داد. در مورد مدل نمودن حرکت مولکول‌های یک گاز و یا مدل نمودن عوامل تأثیرگذار بر حرکت مولکول‌های گاز در ماتریس ذکر شده تحقیقاتی صورت پذیرفته است. در جدول ۳-۴ به تعدادی از آنها اشاره گردیده است.

جدول ۳-۴- تحقیقات صورت گرفته در زمینه مدل سازی گاززدایی متان از زغال سنگ

ردیف	نام محقق / محققین	سال انتشار	موضوع تحقیق	نتیجه تحقیقات	توضیحات
۱	ژیاو کونگ ^۱ و همکاران	۲۰۱۴	مدل سازی بر اساس جذب، انتشار و ناهمسانگردی شکستگی، نفوذپذیری	بدست آوری میزان تخلخل مخزن متان زغال با نفوذپذیری معین	استفاده از نظریه صفحه‌های موازی
۲	کوان وی ^۲ و همکاران	۲۰۱۳	شبیه سازی منطقه تخریب در جبهه کار بلند	محاسبه فاصله عمودی محل اکسایش در منطقه تخریب	محاسبه عمق چال‌های گاززدایی- نرم افزار Fluent
۳	یو ^۳ و همکاران	۲۰۱۲	مدل سازی میزان فشار در اطراف چال گاززدایی	کاهش میزان نفوذپذیری دیواره چال گاززدایی بر اثر افزایش فشار دیواره	نرم افزار E-Cclipse300
۴	تیان ژیان ^۴ و همکاران	۲۰۱۲	شبیه سازی میزان گاز در منطقه تخریب	تخمین میزان عمق چال‌ها در منطقه تخریب و فاصله میان این چال‌ها	نرم افزار RFPA2D

¹ Xiao Cong

² Deng Quan-wei

³ Yu Yang

⁴ HAO Tian-xuan

ردیف	نام محقق / محققین	سال انتشار	موضوع تحقیق	نتیجه تحقیقات	توضیحات
۵	هوچنگ ۱ و همکاران	۲۰۱۲	شبیه سازی سیستم گاززدایی و جریان گاز چال های منطقه تخریب در معدن ژانگژی ۲	تخمین فاصله میان چال ها، فشار زه کشی و قطر چال ها	تجزیه و تحلیل رابطه میان مقدار متان تخلیه شده توسط تهویه و زه کشی شده
۶	ژی شنگ ۳	۲۰۱۲	مدل سازی استخراج گاز	محاسبه استخراج گاز به دو روش نرم افزاری و تقریب خطی	مطالعه تئوری استخراج گاز از زغال سنگ بر اساس قانون دارسی
۷	یانوی ۴ و همکاران	۲۰۱۱	مدل سازی چال گاززدایی متان از زغال	کاهش فاصله مابین چال - های گاززدایی در مناطق دارای ساختار پیچیده زمین شناسی جهت کاهش پتانسیل انفجار	محاسبه میزان شعاع نفوذ موثر در چال ها
۸	یانگ ۵ و همکاران	۲۰۱۱	شبیه سازی رابطه میان نفوذپذیری و میزان نشت و دفع آب درون زغال	طراحی بستر زغال سنگ بصورت ماتریس منقبضی بر اثر تولید گاز	نرم افزار Eclipse300
۹	هائو ران ۶ و همکاران	۲۰۱۱	شبیه سازی تزریق هوا با فشار بالا به لایه زغال	افزایش نرخ تولید گاز متان بر اثر تزریق هوا به لایه زغالی	باز شدن بیشتر شکستگی ها و درزه ها بر اثر افزایش فشار هوای تزریقی به لایه نرم افزار Comsol

¹ Ding Houcheng

² Zhangji

³ Fan Xi Sheng

⁴ Liu Yanwei

⁵ Yu Yang

⁶ Li Hao-ran

ردیف	نام محقق / محققین	سال انتشار	موضوع تحقیق	نتیجه تحقیقات	توضیحات
۱۰	بینگ ۱ و همکاران	۲۰۱۱	شبیه سازی معدن چانگچون ۲ چین	تعیین ارتباط میان میزان زه کشی گاز متان از هر چال با میزان شاخص افت فشار	نرم افزار FLAC3D
۱۱	دانگلینگ ۳ و همکاران	۲۰۱۱	مدل سازی جریان گاز درون زغال و انفجار ناگهانی گاز	ایجاد روشی جدید برای محاسبه جریان در دو فاز مختلف در زغال	استفاده از قانون پایستگی انرژی
۱۲	سانگ ۴ و همکاران	۲۰۱۱	شبیه سازی میزان نفوذپذیری و میزان افت فشار در نزدیکی چال مکش گاز	بررسی تاثیر پارامترهای مختلف بر نرخ تولید گازمتان	نرم افزار Ansys
۱۳	گانگ ۵ و همکاران	۲۰۱۱	مدل سازی سینه کار استخراجی شماره ۴ معدن زغال شاکو ۶ چین	محاسبه مدت زمان لازم برای انتشار متان و جمع آوری آن از سطح سینه کار زغال	نرم افزار Matlab
۱۴	زینگفنگ ۷	۲۰۱۱	مدل سازی سه بعدی از سیستم گاززدایی	مشاهده بهتری از سیستم گاززدایی بر اثر توانایی در سه بعدی دیدن و چرخاندن مدل	نرم افزار 3D-MAX

¹ Wu Bing

² Changcun

³ Sun Dongling

⁴ Xiaoyan Song

⁵ Li Gang

⁶ Sha-qu Coal Mine

⁷ Xinfeng Du

ردیف	نام محقق / محققین	سال انتشار	موضوع تحقیق	نتیجه تحقیقات	توضیحات
۱۵	هاججین ۱ و همکاران	۲۰۰۹	مدل سازی جریان گاز در درزه های زغال سنگ	بررسی میزان سرعت و جریان گاز در زغال	استفاده از سیستم مویرگی و معادلات دیفرانسیل و قانون گاز فیک برای مدل سازی - نرم افزار Matlab
۱۶	پینگ ۲ و همکاران	۲۰۰۹	مدل سازی سه بعدی حرکت گاز در مواد مختلف	بدست آوری اطلاعات بیشتر از مدل	توانایی مدل نمودن حرکت گاز در زغال
۱۷	اکرم اوزدمیر ۳	۲۰۰۸	مدل سازی ریاضی یک بلوک زغال	پیش بینی میزان تولید گاز متان درون لایه با استفاده از تزریق دی اکسید کربن	بررسی تاثیر وجود آب در هنگام تزریق
۱۸	الکسیو ۴ و همکاران	۲۰۰۷	مدل سازی انتشار متان در بلوک زغال	بررسی وابستگی میان انتشار متان با اندازه بلوک، تخلخل زغال، ویسکوزیته، قابلیت انحلال، فشار سنگ بستر و دمای بلوک زغال	بخش بندی نرخ انتشار متان به دو صورت کند و سریع
۱۹	ژائو ۵ و همکاران	۱۹۹۴	مدل سازی عددی برای معدن یانگکوان ۶ چین	تخمین شعاع گاززدایی و توزیع تنش در زغال سنگ بر اثر عملیات گاززدایی	نرم افزار FEM

¹ Wu Haj-jin

² Du Ping Ping

³ Ekerem Ozdemir

⁴ A.D.Alexeev

⁵ Yangsheng Zhao

⁶ Yangquan

۳-۲-۵- ایمنی و ذخیره گاز در لایه‌های زمین

مخازن زیرزمینی ذخیره‌سازی گاز یک روش متداول و شناخته شده در جهان برای کمبود گاز مورد نیاز و پوشش مازاد مصرف در فصول سرد و همچنین جمع‌آوری گازهای گلخانه‌ای و عدم انتشار آن به اتمسفر می‌باشد. پس از آنکه در سده گذشته مصرف‌کنندگان سوخت‌های فسیلی به مزایای گاز طبیعی به عنوان حامل انرژی ارزان قیمت پی بردند به تدریج بر کاربردهای گاز در بازار مصرف افزوده شد. شاید این‌گونه بتوان تصور کرد که فکر استفاده از مخازن زیرزمینی و ذخیره‌سازی گاز جهت دستیابی آسان به گاز طبیعی در مواقع اوج مصرف، مورد توجه تأمین‌کنندگان گاز قرار گرفت. اولین تجربه موفق در ذخیره‌سازی گاز در سال ۱۹۱۵ از طریق استفاده از مخزن تخلیه شده گازی در انتاریو^۱ کانادا مورد اجرا واقع شد. پس از آن در سال ۱۹۱۶ میدان زورا^۲ در ایالت نیویورک که در سال ۱۸۸۸ کشف شده بود با ظرفیت ذخیره‌سازی ۱۷ میلیون مترمکعب تبدیل به مخزن ذخیره گاز طبیعی شد. توسعه مخازن ذخیره زیرزمینی گاز^۳ از اواخر دهه ۳۰ قرن گذشته رشد پیوسته‌ای به خود گرفت. اما آنچه باعث می‌گردد که ذخیره‌سازی گاز به گاززدایی متان از زغال ربط داشته باشد این است که در برخی از معادن زغال که عملیات گاززدایی در آنها انجام می‌گردد، جهت تسریع در برداشت متان و همچنین افزایش میزان برداشت متان از زغال، گازهای مختلف از قبیل دی‌اکسیدکربن و نیتروژن را به درون لایه زغالی تزریق می‌نمایند. عملیات جایگزینی مولکول‌های این گازها با گاز متان باعث افزایش خروج گاز از لایه شده و نرخ تولید گاز از این لایه‌ها افزایش پیدا می‌کند. خصوصیات تزریق گاز در این سیستم با عملیات ذخیره‌سازی گاز در مخازن تقریباً مشابه می‌باشد. در جدول ۳-۵ به تعدادی از تحقیقات صورت گرفته در زمینه تزریق گاز به درون لایه زغالی و جایگزین شدن آن به جای متان در زغال پرداخته شده است.

¹ Ontario

² Zora

³ Underground Gas Storage

جدول ۳-۵- مختصری از تحقیقات صورت گرفته در زمینه تزریق گاز به درون لایه زغال

ردیف	نام محقق / محققین	سال انتشار	موضوع تحقیق	نتیجه تحقیقات	توضیحات
۱	دی کانل و همکاران	۲۰۱۳	مانیتورینگ تزریق گاز دی اکسید کربن به زغال	تخمین میزان گاز دی اکسید کربن تزریقی و محاسبه زمان و سرعت تزریق جهت افزایش بهره وری چال گاززدایی	پیش بینی فاصله میان چالهای گاززدایی و تزریق
۲	فنگ ۱ و همکاران	۲۰۱۱	تزریق مخلوط نیتروژن و دی اکسید کربن به لایه زغال	تولید بیشتر گاز متان از چال- های پاززدایی	جایگزین شدن مخلوط گازی به جای متان و حرکت به سمت محیط کم فشار
۳	پینی ۲ و همکاران	۲۰۱۱	جایگزینی دی اکسید کربن و نیتروژن به جای متان	افزایش میزان تولید گاز متان با افزایش تزریق گاز ثانویه	استفاده از معادله لانگمویر در فرآیند جذب
۴	چوی ۳ و همکاران	۲۰۰۹	تحقیق در مورد سیکل ترکیبی گاز متان	بخش بندی موضوع تحقیق به دو قسمت جذب متان و ذخیره سازی کربن در قسمت تخلیه شده	بحث در مورد دینامیک سیالات و شبیه سازی
۵	ان پون ۴ و همکاران	۲۰۰۹	ذخیره سازی دی اکسید کربن و کاهش انتشار آن به محیط	جایگزینی دی اکسید کربن با متان و جمع آوری متان از زغال	بهینه سازی سیستم گاززدایی

¹ Zhiming Fang

² Ronny Pini

³ E.H.Chui

⁴ J.Denis N.Pone

۳-۳- جمع‌بندی

در این فصل به بررسی کارهای انجام گرفته در زمینه گاززدایی متان از لایه زغالی پرداخته شد. از آنجائیکه تحقیقات بسیاری در زمینه گاززدایی انجام گردیده این مطالعات به پنج بخش تقسیم گردید که عبارتند از ۱- متان لایه زغال، ۲- گاززدایی متان از زغال‌سنگ، ۳- جذب و واجذب گاز متان از زغال، ۴- مدل‌سازی و ۵- ایمنی و ذخیره‌سازی گاز در لایه‌های زمین‌شناسی. در مورد تمامی این بخش‌ها، تعدادی از کارهای انجام شده توسط محققین مختلف مورد بررسی قرار گرفت. اما از آنجائیکه بحث مدل‌سازی از موضوعات مهم در مورد شناسایی و بدست‌آوری اطلاعات مفید در زمینه گاززدایی می‌باشد، مورد بررسی بیشتری قرار گرفت. تاکنون محققین در مورد مدل‌سازی گاززدایی متان از زغال توسط نرم افزارهای متفاوت فقط به جزئی از حرکت گاز در زغال اشاره کرده‌اند. در هر کدام از مدل‌های ایجاد شده، فرضیات متفاوتی در نظر گرفته شده است که می‌بایست تمامی آنها مورد بررسی بیشتر قرار گرفته و جهت ایجاد یک مدل واحد، آنها را بخش‌بندی نموده و مورد استفاده قرار داد. یک مولکول گاز متان در داخل لایه زغالی که جذب زغال گردیده ابتدا می‌بایست آزاد شده و از ریز درزه موجود حرکت کرده تا به سیستم درزه اصلی زغال برسد و از آنجا بر اثر تغییرات فشار موجود بین لایه زغال و سطح سینه کار استخراجی و یا چال گاززدایی به سمت فضای آزاد به حرکت درآید. مدل‌سازی می‌تواند نقش سیستم درزه زغال، دما، مقدار آب، نفوذپذیری زغال، خصوصیات مکانیک سنگی زغال و غیره را در میزان انتشار گاز متان از ریزدرزه زغال تا سطح آزاد مشخص کند.

فصل چهارم

معدن زغال سنگ طبس

خصوصیات زغال و آزمایش‌های

مربوط به آن

۴-۱- آشنایی

زغال سنگ مجموعه‌ای مرکب از ماسرال‌ها و مینرال‌ها (کانی‌ها) است، کانی‌های موجود در زغال سنگ‌ها بر خلاف ماسرال‌ها ماهیت بلورین و خواص فیزیکی و شیمیایی مشخصی دارند. شناسایی این کانی‌ها با توجه به خواص فیزیکی و شیمیایی آنها به ما کمک می‌کند که نوع و مقدار عناصر موجود در زغال سنگ‌ها را شناسایی کنیم (یزدی ۱۳۸۲). برخلاف مینرال‌ها، ماسرال‌ها از نظر خواص فیزیکی و شیمیایی کاملاً متفاوت و غیر یکسان و غیر کریستالیزه هستند (اصانلو، ۱۳۷۸). افزایش درجه زغالی شدن ارتباط مستقیم با عمق تدفین زغال سنگ، زمان زغالی شدن، درجه حرارت محیط و ارتباط معکوس با مقدار رطوبت دارد (یزدی، ۱۳۸۲). با ادامه این فرآیند، درجه^۱ زغال سنگ از لیگنیت^۲ به نیمه بیتومین^۳ و بیتومین^۴ و سرانجام آنتراسیت^۵ افزایش می‌یابد. از نظر سنی بیشتر زغال سنگ‌ها متعلق به دوره کربونیفر هستند. در ایران سن رسوبات زغال دار اواخر تریاس تا اوایل ژوراسیک است. آثاری از زغال سنگ در رسوبات پرمین، کربونیفر و ترشیاری در نواحی شمالی ایران دیده می‌شود.

۴-۲- بخش اول؛ پتروگرافی زغال سنگ

تقسیم‌بندی‌های مختلفی برای ماسرال‌ها وجود دارد که آخرین تقسیم‌بندی توسط استاچ^۶ که به روش S-H معروف است صورت گرفته که بر این اساس سه گروه ماسرالی که عبارتند از ویتترینیت، اگزینیت (لیپتینیت) و اینرتینیت (فوزینیت) نام‌گذاری شد. ویتترینیت بخش شفاف و براق زغال است و قدرت انعکاس کمتری نسبت به فیوزین داشته و به رنگ خاکستری در زیر میکروسکوپ با روغن

¹ Rank

² Lignite

³ Sub Bituminous

⁴ Bituminous

⁵ Anthracite

⁶ Stach

امرسیون^۷ قابل تشخیص است. فوزینیت در زیر میکروسکوپ بالاترین قدرت انعکاس را داشته و به رنگ خاکستری روشن تا سفید دیده می‌شود.

فوزینیت‌ها دارای کربن بالا و هیدروژن پایین بوده و درصد خروج مواد فرار آن کم و نیز از نظر شیمیایی غیرفعال هستند. لیپتینیت‌ها ماسرال‌هایی هستند که به ندرت دیده می‌شوند. این ماسرال‌ها از اسپورها، کاتین‌ها، قسمت‌های چوب پنبه‌ای، رزین‌ها و صمغ و بخش روغنی گیاه تشکیل شده‌اند (Stach, 1982).

در زغال‌های درجه پایین‌تر لیپتینیت‌ها از ویتترینیت‌ها قابل تشخیص هستند. این ماسرال‌ها حاوی درصد بالایی از هیدروژن می‌باشند و در زغال‌های با کربونیزاسیون کم قابل مشاهده هستند و با افزایش درجه کربونیزاسیون تشخیص آن‌ها از ویتترینیت‌ها امکان پذیر نیست. حداقل انعکاس را داشته و به صورت خاکستری تیره تا سیاه رنگ دیده می‌شوند (شرکت ملی ذوب آهن، ۱۳۵۶).

بر اساس مطالعات به عمل آمده از سوی کارشناسان شرکت ملی فولاد که در سال ۱۳۷۶ منتشرگردید، میزان ذخایر اکتشافی زغال‌سنگ در ایران بالغ بر ۱/۸ میلیارد تن تخمین زده می‌شود که از این مقدار ۵۰۰ میلیون تن ذخیره قطعی، ۱۱۸۰ میلیون تن ذخیره احتمالی و حدود ۱۲۰ میلیون تن ذخیره ممکن اعلام شده است (گزارش عملیات اکتشاف ناحیه زغال دار پروده، ۱۳۷۶).

۴-۲-۱- عناصر اصلی تشکیل دهنده زغال

عناصری که به طور معمول در ترکیب همه زغال‌ها مشاهده می‌شوند عبارتند از: کربن (C)، هیدروژن (H)، نیتروژن (N)، اکسیژن (O)، و سولفور (S)، که در آنها کربن و هیدروژن استخوان‌بندی اصلی زغال‌ها را تشکیل می‌دهند.

در هر نوع زغال‌سنگ، نسبت کربن ثابت به مواد فرار که نسبت سوخت نامیده می‌شود اهمیت ویژه‌ای دارد. این نسبت در آنتراسیت زیاد و در لیگنیت کم است. درجه مرغوبیت زغال را معمولاً با

⁷ Emersion

نسبت سوخت آن می‌سنجند. بالا بودن نسبت مواد فرار در زغال باعث ایجاد دود زیاد و بالا بودن مقدار کربن، سبب حرارت بیشتر و شعله بدون دود می‌شود.

مقدار کربن و هیدروژن موجود در زغال به درجه متامورفیزم (تکامل) و نوع زغال بستگی دارد. هرچه درجه متامورفیزم زغال زیاد و نوع زغال مرغوب‌تر باشد، درصد کربن افزایش و درصد هیدروژن کاهش خواهد یافت.

زغال‌هایی که از درجه تکامل کمتری برخوردارند حاوی هیدروژن بیشتری هستند در حالی که آنتراسیت که از درجه تکامل بیشتری برخوردار است، حاوی هیدروژن کمتری است.

نیتروژن به مقدار بسیار کم در زغال وجود دارد و مقدار آن بین ۰/۵ تا ۲ درصد از وزن کل زغال را تشکیل می‌دهد. وقتی که زغال تقطیر یا کربونیزه می‌شود، ۱۵٪ از نیتروژن آن به صورت آمونیاک توأم با مقدار کمی سیانوزن در می‌آید. معمولاً حدود ۵۰ درصد از نیتروژن اولیه موجود در زغال وارد کک می‌شود. تغییرات نیتروژن و کربن موجود در انواع زغال‌سنگ‌ها نشان می‌دهد که آنتراسیت که از درجه دگرگونی بیشتری برخوردار است دارای نیتروژن کم بوده و بیتومینوس حاوی درصد نیتروژن بیشتری است.

مقدار اکسیژن در زغال‌ها در محدوده وسیعی تغییر می‌کند و بر حسب درجه تکامل زغال می‌تواند تا ۳۰ درصد وزن آنها را به خود اختصاص دهد. لیگنیت که از درجه تکامل کمتری برخوردار است بیش از ۲۵ درصد وزنی اکسیژن دارد در حالی که آنتراسیت حاوی کمتر از ۵ درصد وزنی اکسیژن است و به همین ترتیب بیتومینوس و ساب بیتومینوس در مقایسه با لیگنیت حاوی مقدار اکسیژن کمتری است (دوست فاطمه، ۱۳۸۱).

گوگرد از زمان‌های گذشته و از زمانی که زغال برای تولید کک در فرآیند متالورژی فولاد مورد استفاده قرار می‌گرفت به عنوان عنصری مزاحم در زغال شناسایی شده بود. بنابراین به دلیل افزایش مصرف زغال، حضور گوگرد در زغال به صورت مشکل حاد درآمده است و مطالعات گسترده‌ای جهت

حذف آن به انواع روش‌های فلوتاسیون و انحلال شیمیایی انجام شده است. مقدار گوگرد موجود در زغال مانند سایر عناصر بستگی به درجه تکامل زغال دارد. گوگرد در زغال به صورت‌های زیر وجود دارد:

۱- به صورت گوگرد آلی که به شکل ترکیب با کربن و یا ترکیب با کربن و هیدروژن وجود دارد مانند گروه تیوفن‌ها.

۲- به صورت FeS_2 که می‌تواند پیریت با بلورهای مکعبی یا مارکاسیت با بلورهای ارتورمبیک باشد. گوگرد پیریتی فراوان‌ترین نوع گوگرد در زغال است.

۳- به صورت سولفات آهن، کلسیم و آلومینیوم.

۴- به صورت گوگرد آزاد که مقدار آن در زغال بسیار کم است.

۴-۲-۲- شاخص‌های مهم تعیین کیفیت زغال

شاخص‌هایی که در ذیل به آنها اشاره می‌شود در زمره مهم‌ترین پارامترهایی است که در استانداردهای معروف طبقه‌بندی مورد استفاده قرار می‌گیرند (محمودی، ۱۳۹۰).

الف- مواد فرار

به موادی گفته می‌شود که در اثر تقطیر زغال در حرارت حدود ۹۵۰ درجه سانتی‌گراد از آن خارج می‌شوند و به طور عمده شامل هیدروژن، منواکسید کربن (CO)، متان، بخار قطران و مقداری گازهای غیر قابل احتراق مانند دی‌اکسیدکربن و بخار آب است. مقدار گازهای غیر قابل احتراق با کاهش درجه متامرفیسم (مانند لیگنیت و ساب بیتومینوس) افزایش می‌یابد.

مواد فرار یکی از عوامل مهم در تجزیه زغال به منظور تعیین طبقه‌بندی و کاربرد آن است و به خصوص نقش مواد فرار در تبدیل زغال به کک و استفاده از انرژی حرارتی آن حائز اهمیت می‌باشد.

ب- خاکستر

خاکستر به موادی اطلاق می‌شود که پس از سوختن کامل زغال برجای می‌ماند و به طور عمده شامل دی‌اکسید سیلیسیوم (SiO_2)، اکسید آلومینیوم (Al_2O_3)، اکسید آهن (Fe_2O_3)، اکسید کلسیم (CaO)، اکسید منیزیم (MgO)، اکسید پتاسیم (K_2O)، اکسید سدیم (Na_2O) و سولفات کلسیم (CaSO_4) می‌باشد. علاوه بر ترکیباتی که به آنها اشاره شد (عمده‌ترین ترکیب کانی‌شناسی خاکستر عبارت است از سیلیکات‌ها، اکسیدها، کربنات‌ها، سولفات‌ها، سولفیدها) رس و اسلیت نیز که از کمر بالا و کمر پائین به همراه زغال استخراج شده‌اند در خاکستر مشاهده می‌شوند.

مقادیر اکسیدکلسیم و اکسیدمنیزیم، اکسیدپتاسیم و اکسیدسدیم کمتر از اکسیدهای سیلیسیوم، آلومینیوم و آهن است و از تجزیه کانی‌های کربناته به دست می‌آیند و نیز مقادیر کربنات و سولفات کلسیم در حد ppm است. بیشترین تغییرات در تعیین میزان خاکستر، ناشی از وجود گوگرد است. چنانچه میزان پیریت و یا کربنات در زغال‌سنگ‌هایی با درجه زغال‌شدگی بالا، بسیار پایین باشد، تعیین خاکستر به سادگی و به سرعت انجام می‌شود، ولی اگر درصد مواد یاد شده در زغال زیاد باشد، معمولاً زغال را در دمای پایین می‌سوزانند تا قبل از نقطه تجزیه کربنات‌ها، پیریت تجزیه شود.

مطالعه و بررسی شیمی خاکستر از جمله پارامترهایی است که در ارزیابی تولید فولاد نقش مهمی را به عهده دارد. وجود کاتیون‌هایی مانند Ca^{2+} ، K^{1+} ، Na^{1+} موجود در خاکستر، ممکن است مربوط به ساختمان کربوکسیلاتی ماسرال‌ها باشد. بیشترین منشاء اکسید آهن، ناشی از وجود پیریت است. پیریت در اثر اکسایش به اکسید آهن تبدیل می‌شود. اورانیوم، ژرمانیوم، بریلیم و بُر نیز از جمله عناصر نادری هستند که وجود آنها در خاکستر زغال اهمیت دارد. بعضی از عناصر مانند نقره در کانی‌های دیگری مانند گالن و برخی مانند ژرمانیوم به همراه زغال وجود دارند (رضایی، ۱۳۸۰).

ج- رطوبت

رطوبت به آب‌های آزاد سطح یا داخل درزه، ترک، شکاف یا منافذ داخلی زغال گفته می‌شود که در حرارت اندکی زیادتر از نقطه جوش آب (۱۰۵ درجه سانتی‌گراد) از زغال خارج می‌شوند. مقدار رطوبت به درجه تکامل آن بستگی دارد. در لیگنیت تا ۴۵ درصد و در بیتومینوس تا ۱۹ درصد وزنی را تشکیل می‌دهد. همچنین نحوه حمل از معدن می‌تواند در میزان رطوبت موجود در زغال مؤثر باشد. رطوبت به شکل‌های مختلفی در زغال سنگ وجود دارد که می‌توان به موارد زیر اشاره نمود:

۱- رطوبت آزاد، یعنی رطوبتی که در سطح زغال وجود دارد و خواص فیزیکی آن مشابه آب معمولی است و در دمای کمی بیش از 100°C از زغال خارج می‌شود.

۲- رطوبت جذب شده، که توسط بخار آب در خلل و فرج زغال نفوذ می‌کند و در دمای جوش آب و یا کمی بیشتر، از زغال خارج می‌شود.

۳- رطوبت ترکیبی، ناشی از کانی‌های موجود در زغال است که به طور عمده از آب فیزیکی و یا آب موجود در ساختمان اتمی کانی‌ها تشکیل می‌شود. آبی که در دمای حدود 100°C از زغال خارج نمی‌شود، آب بین مولکولی نامیده می‌شود که در زمان شکل‌گیری مواد اولیه تشکیل دهنده زغال، تشکیل شده است.

آب‌هایی که در حرارت نزدیک نقطه جوش از زغال خارج نمی‌شوند رطوبت تلقی نمی‌شوند و اصطلاح آب بین مولکولی یا رطوبت ذاتی در مورد آنها بکار گرفته می‌شود که این آب در هنگام شکل‌گیری زغال تشکیل می‌شود. رطوبت زغال باعث اکسایش و کاهش استحکام آن می‌شود. این پارامتر از نظر اقتصادی نیز بسیار اهمیت دارد، زیرا نه تنها افزایش آن، تناژ زغال و یا کک را بی‌رویه افزایش می‌دهد، بلکه هزینه‌های حمل و نقل را نیز افزایش می‌دهد و جایگزین مواد قابل احتراق در زغال می‌شود که کاهش ارزش حرارتی زغال را به دنبال خواهد داشت (رضایی، ۱۳۸۰).

د- پلاستیسیته

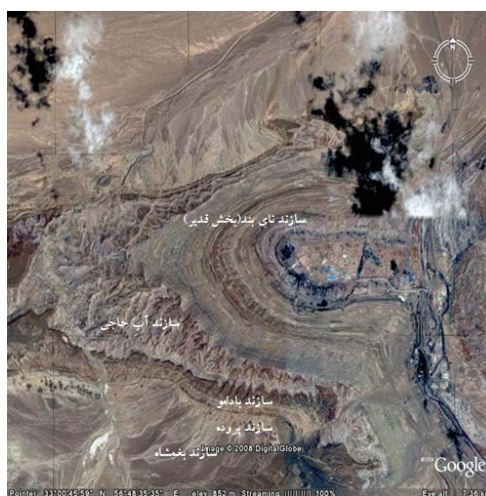
مهمترین پارامتر جهت تعیین خاصیت کک‌شوندگی و به عبارتی گدازپذیری زغال پلاستیسیته آن است. این پدیده با حرارت دادن نمونه‌های زغال خرد شده در آزمایشگاه قابل مشاهده است، به این صورت که با افزایش یکنواخت و آرام حرارت در صورت گدازپذیری، در حدود ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد که به آن شروع نرم‌شوندگی می‌گویند، دانه‌های ریز زغال ابتدا کمی تغییر ماهیت فیزیکی داده و شروع به نرم شدن می‌کند. سپس به شکل گوشه‌دار در آمده و به تدریج با بالا رفتن حرارت این ذرات نرم‌تر و حالت خمیری به خود می‌گیرند و به یکدیگر می‌چسبند و در عین حال حباب‌های کروی در بین ذرات تشکیل و ذرات شروع به انبساط می‌کنند. پس از سرد شدن و جامد شدن، دوباره به صورت یک نمونه متخلخل در می‌آید که حجم آن بیش از حجم اولیه نمونه است و به آن کک می‌گویند. زغال‌های با خاصیت کک‌شوندگی اغلب دارای درصد موادفرار متوسط و کمتر هستند (محمودی، ۱۳۹۰).

۴-۲-۳- معدن زغال پروده طبس

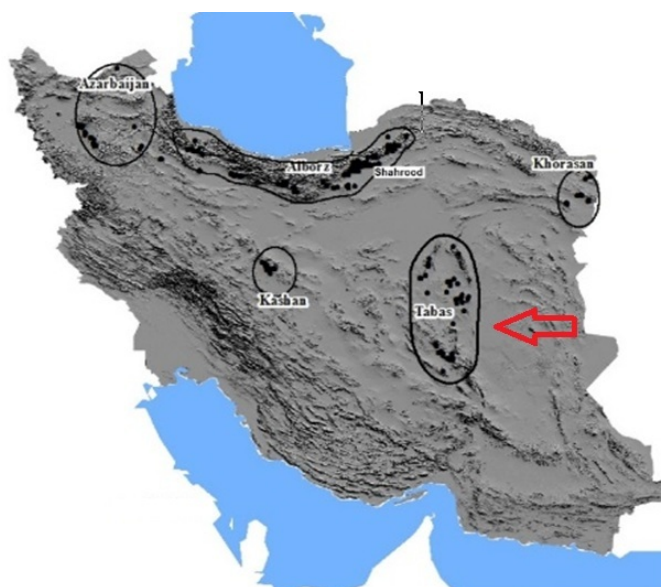
معدن پروده I در شمال استان یزد و جنوب استان خراسان رضوی و در فاصله ۷۵ کیلومتری غرب طبس، در مسیر جاده آسفالته طبس- یزد و در رسوبات زغال‌دار ایران مرکزی قرار دارد (معین‌السادات و رضوی ارمغانی، ۱۳۷۲). منطقه مورد مطالعه در تقسیمات زمین‌شناسی ایران در محدوده ایران مرکزی و به طور خاص در ورقه زمین‌شناسی ۱:۲۵۰۰۰۰ طبس و ۱:۱۰۰۰۰۰ کریت قرار گرفته است (آقا نباتی، ۱۳۸۳). واحدهای سنگ چینه‌ای رخنمون یافته در گستره مورد مطالعه اساساً شامل رسوبات محیط‌های ساحلی و کم‌عمق است که لایه‌هایی از رسوبات نواحی عمیق‌تر و یا رودخانه‌ای نیز در آن دیده می‌شود. عمده نهشته‌ها شامل ماسه‌سنگ، شیل، مارن و سنگ‌های آهکی اوولیتی و پرفسیل است که لایه‌های نازک تا ضخیم زغال‌سنگ نیز در آن یافت می‌شود. از نظر زمانی از تریاس بالایی تا ژوراسیک میانی بر جای گذاشته شده‌اند. رسوباتی که در ناحیه پروده دارای

رخنمون می‌باشند از قدیم به جدید عبارتند از: سازندهای نابیند، آب حاجی، پروده و بغمشاه (Shariat nia 1993) (شکل‌های ۱-۴ و ۲-۴). زغال‌سنگ‌های معدن پروده I از نوع کک‌شو می‌باشد که اولین معدن تمام مکانیزه کشور با ظرفیت استخراج ۱/۲ میلیون تن در سال در آن طراحی و در حال حاضر استخراج می‌شود. زغال‌سنگ‌های پروده اغلب از نوع بیتومینه با مواد فرار کم و میزان خاکستر آن بالا و به طور متوسط ۴۰ درصد است (گزارش عملیات اکتشاف ناحیه زغال دار پروده،

۱۳۷۶).



شکل ۱-۴- موقعیت سازندها در منطقه پروده I نسبت به یکدیگر بر روی عکس ماهواره ای در مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰

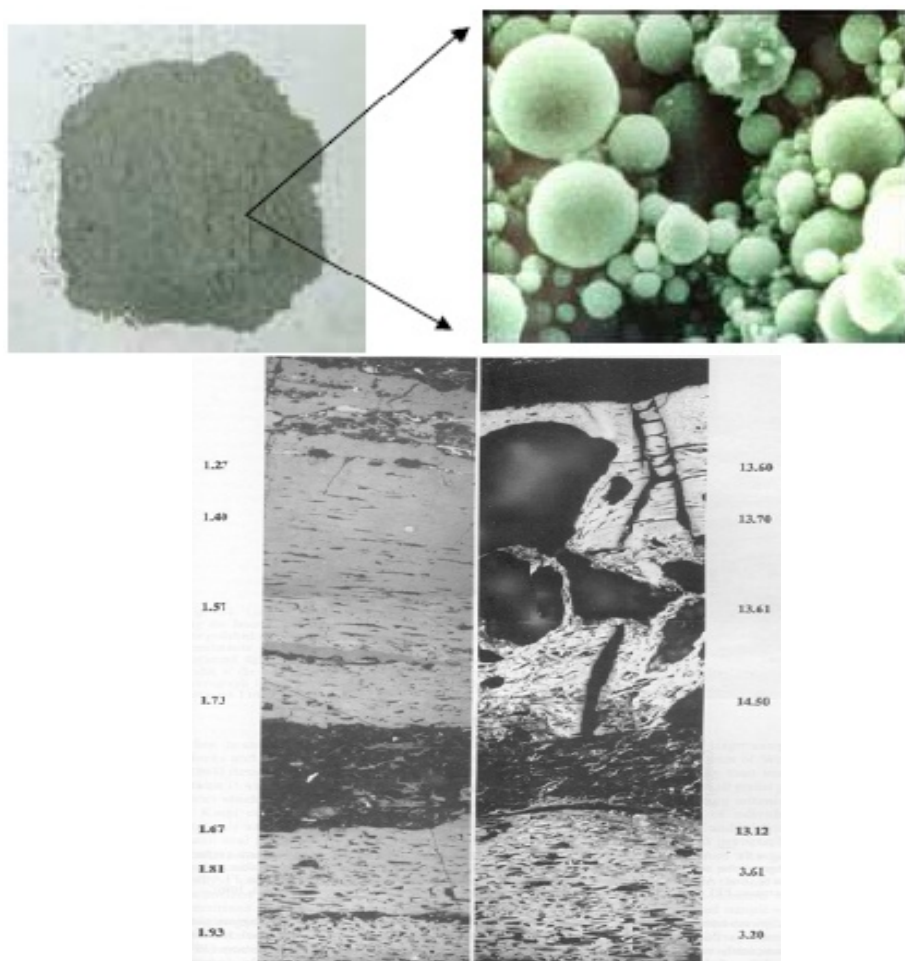


شکل ۲-۴- پراکندگی حوضه‌های زغالی در ایران (Shariat nia, 1993)

۴-۲-۴ - بررسی پتروگرافی زغال سنگ

ماهیت ماسرال های زغال (ویترینیت، اینرتیت، اگزینیت) نه تنها از نظر پتروگرافی بلکه از نظر شیمیایی نیز مشخص شده‌اند.

مقایسه این سه گروه در زغال‌هایی که درجه متامورفیسم برابر دارند، نشان می‌دهد که گروه ویترینیت اکسیژن زیادی دارند و گروه اگزینیت از نظر هیدروژن و گروه اینرتینیت از نظر کربن غنی هستند. هر اندازه هیدروژن زغال بیشتر باشد، همان قدر اگزینیت بیشتر و هر چه حاوی کربن بیشتر باشد همان میزان اینرتینیت بیشتری دارد (شکل ۴-۳).



شکل ۴-۳ - قبل از کک شوندگی (سمت چپ) و درحین کک شوندگی (سمت راست) (Schweinfurt, 2002)

ویترینیت در دگرگونی پایین خاکستری تیره‌تر و در درجات بالاتر متامورفیسم روشن‌تر است. وزن مخصوص آن بین ۱/۸-۱/۳ است. ماسرال‌های گروه اگزینیت در کک‌پزی به ویژه مولد گاز و مواد تقطیری هستند. وزن مخصوص آن بین ۱/۱۸ و ۱/۲۸ است. این گروه زیر میکروسکوپ به صورت خطوط کرمی شکل و اشکال به خصوص با آثار و بقایای گیاهی سیاه‌رنگ دیده می‌شوند. ماسرال‌های گروه اینرتینیت در کک‌پزی به طور کامل عکس‌العمل منفی از خود نشان می‌دهند. این ماسرال‌ها اجزاء غیر قابل پختی هستند که در هنگام سوختن در غیاب اکسیژن واکنش نشان نمی‌دهند. ماسرال‌های این گروه زیر میکروسکپ به صورت قطعات سفید رنگ دیده می‌شوند.

اکسایش در زغال نتیجه تأثیر اکسیژن هوا و رطوبت بر آن می‌باشد، که در نتیجه با مواد تشکیل دهنده آن ترکیب شده و در ساختمان مولکولی آن وارد شده در نتیجه زغال اکسیده خواهد شد. اگر اکسیدشدگی شدید باشد ممکن است مواد تشکیل دهنده زغال را به صورت CO_2 و H_2O خارج کند. از عناصر تشکیل دهنده زغال اینرتینیت‌ها اکسید نمی‌شوند ولی ویترینیت‌ها به شدت تحت تأثیر فرایند اکسایش قرار می‌گیرند. در یک لایه زغالی اگر در قسمتی درصد فوزینیت و در قسمتی دیگر درصد ویترینیت بالا باشد، در قسمتی که ویترینیت آن بالا است لایه به شدت اکسیده می‌شود در این صورت ویترینیت‌ها به صورت CO_2 و H_2O از بین می‌روند و در نتیجه درصد فوزینیت (اینرتینیت) در لایه افزایش یافته و دارای مواد فرار کمتری می‌گردد (Stach, 1982).

زغال‌های قابل پخت به زغال‌هایی می‌گویند که در آن‌ها گروه ویترینیت و گروه لیپتینیت تأثیر بیشتری دارند و این نوع زغال‌ها برای تولید انرژی مناسب هستند. گروه زغال‌های غیرقابل پخت (زغال‌های بدون خاصیت کک‌شوندگی)، پس از آزمایش پلاستومتری، کک نداده و ثابت باقی می‌مانند و از نظر گروه‌بندی در شمار زغال‌های با مارک لاغر (T) و آنتراسیت (A) و نیمه آنتراسیت می‌باشند. مقدار مواد فرار در لیپتینیت از ویترینیت بیشتر و ویترینیت از فوزینیت بیشتر است (رضایی، ۱۳۸۰).

الف - گازخیزی

به هنگام انجام عملیات اکتشافی هدف از بررسی گازخیزی در لایه‌های زغالی و لایه‌های دربرگیرنده زغال که حاوی مقادیری گاز طبیعی می‌باشند، جمع آوری اطلاعاتی در این رابطه است که در پروژه‌های احداث معادن از اهمیت خاصی برخوردار می‌باشند.

نظر به اینکه گازهای متصاعد شده از زغال که در اثر تجزیه‌های شیمیایی و تحت شرایط متامورفیزم زغال تشکیل می‌گردند در مراحل آماده‌سازی و استخراج لایه‌های زغالی مشکلاتی را ایجاد می‌نمایند. لذا بررسی گازخیزی در هر مرحله از اکتشافات حائز اهمیت فراوان است. نتایج حاصل از بررسی گازخیزی نهایی که در کل پروژه I انجام شده و ادامه عملیات پی‌جویی قبلی می‌باشد نمایانگر این مطلب است که میزان گازخیزی در این منطقه نسبت به سایر مناطق زغال‌خیز بیشتر می‌باشد.

ب - حجم عملیات انجام شده جهت بررسی گازخیزی

به منظور بررسی لازم جهت تعیین میزان گازخیزی در لایه‌های زغالی و لایه‌های دربرگیرنده زغال در منطقه پروژه نمونه‌برداری با روش‌های مختلف مطابق استاندارد انجام گرفته و گاز موجود در نمونه‌ها در قسمت دگازاسیون آزمایشگاه از نظر کمی اندازه‌گیری شده است. عمق زون متان در این منطقه از حدود ۵۰ الی ۶۰ متری شروع شده است (برزگر و پورهنک، ۱۳۶۱).

ج - محاسبات گازخیزی

جهت تعیین مقدار گازخیزی لایه‌های زغالی از رابطه زیر استفاده شده است:

$$X_L = \frac{V}{P_r.M} \quad (۱-۴)$$

که در آن:

X_L : مقدار گازخیزی در شرایط آزمایشگاهی به سانتی‌متر مکعب بر یک تن سوخت جامد

V: مجموع حجم گازهای قابل سوخت به سانتی متر مکعب

$P_{r,M}$: مجموع وزن سوخت جامد نمونه به گرم.

لذا تمام لایه‌های زغالی، غیر زغالی و گل حفاری باید برای انجام آنالیز تکنیکی به آزمایشگاه داده شود.

وزن سوخت جامد در هر کدام از باندهای لایه‌های زغالی و غیر زغالی به طور جداگانه در نمونه طبق فرمول زیر محاسبه می‌شود:

$$P_{lr,m} = \frac{100 - (A^C + W^a)}{100} \times Pl \quad (2-4)$$

که در آن:

$P_{lr,M}$: وزن سوخت جامد در باند تفکیکی از نظر لیتولوژی

A^C : خاکستر به درصد

W^a : رطوبت به درصد

Pl : وزن باند لیتولوژی به گرم

در اینجا باید متذکر شد که در نمونه‌های غیر زغالی فرمول سوخت جامد محاسبه نمی‌گردد و جهت تعیین میزان گازخیزی، حجم گاز سوختنی به وزن کل لایه تقسیم می‌گردد.

در هنگام نمونه‌گیری مقدار هدر رفتگی گاز در رابطه با عواملی از قبیل مدت زمان بالا کشیدن لوله‌ها از ته چاه، مدت زمان بستن خاموت لوله گاز و سرپوش لوله وجود دارد. این مقدار اتلاف در منطقه پروده ۳۰ درصد کل گاز متصاعد شده از نمونه‌ها در نظر گرفته شده و برای تعیین گازخیزی حقیقی لایه‌های زغالی از ضریب ۱/۳ استفاده شده است (برزگر و پورهنگ، ۱۳۶۱). در نمونه‌هایی که از لایه‌های سنگی به وسیله لوله گاز گرفته می‌شوند ضریب اتلاف بکار نمی‌رود.

د- گازخیزی رسوبات زغالی

رسوبات زغالی منطقه پروده دارای گازهایی با اجزا متشکله زیر می‌باشند:

نیتروژن، دی اکسید کربن، هیدروژن، متان، اتان، پروپان، بوتان و گاهی پنتان. وجود سولفور هیدروژن، گرچه مقدار آن اندازه‌گیری نشده ولی به علت بوی به‌خصوصی که دارد شناسایی شده است. با افزایش عمق، زون‌های گازی مختلفی به وجود می‌آیند. بدین معنی که در اعماق کم، نیتروژن و دی اکسید کربن به مقدار زیاد موجود می‌باشند و با افزایش عمق جای خود را به متان و سایر هیدروکربورها می‌دهند. با نمونه‌گیری‌هایی که از حفاری‌ها و دساندری‌ها در اعماق مختلف انجام شده وجود زون‌های گازی زیر مشخص شده است.

• زون نیتروژن - دی اکسید کربن تا عمق ۱۹-۲۰ متری

• زون دی اکسید کربن - نیتروژن تا عمق ۳۲-۳۴ متری

زون نیتروژن- متان از ۳۲-۳۴ تا ۱۲۰ متر متغیر است که متوسط آن (حد بالایی زون متان) در عمق ۵۰-۶۰ متری انتخاب شده است و در عمق‌های پائین‌تر زون متانی شروع می‌شود. علت کم عمق بودن زون هوازده (۵۰-۶۰ متری) فعالیت کم تکتونیک در منطقه و شیب کم لایه‌ها می‌باشد که دگازاسیون طبیعی لایه را کند نموده است. در این عمق گازهای سوختنی، فضای قابل انفجاری را به وجود نمی‌آورند. با افزایش عمق از درصد نیتروژن و دی اکسید کربن کاسته شده و در عوض متان و سایر هیدروکربورها افزایش می‌یابند. با توجه به بررسی‌های صورت گرفته مشخص شده است که در عمق ۶۶ متری مقادیر نیتروژن ۲۲/۲۸ درصد، دی اکسید کربن ۲۵/۵۱ درصد، متان ۴۵/۷۳ درصد و اتان ۲/۲۳ درصد می‌باشد که همین اجزا در عمق ۵۴۵ متری به ترتیب نیتروژن و دی اکسید کربن به ۴/۴۱ و ۲/۹۲ درصد کاهش یافته و متان و اتان به ۸۴/۹۲ و ۴/۷۰ درصد افزایش می‌یابند که نشان دهنده جایگزینی متان و اتان به جای نیتروژن و دی اکسید کربن می‌باشد (برزگر و پورهنگ، ۱۳۶۱).

در زون متانی اجزای تشکیل دهنده گازها به‌صورت زیر می‌باشند:

متان (۹۶/۷۳ - ۵۳/۹۰) درصد، اتان (۲۳/۳۹ - ۰/۰۲) درصد، پروپان (۳/۸۱ - ۰/۰۱) درصد، بوتان و پروپان (۳/۰۶ - ۰/۰۱) درصد. ماکزیمم نیتروژن و دی اکسید کربن به ترتیب ۱۳/۳۹ و ۱۰/۳۱ درصد می باشد (جدول ۱-۴).

مقدار گاز کربنیک در لایه های زغالی در زون متانی کم بوده و ماکزیمم به ۱/۶۶ متر مکعب در تن جسم قابل سوخت می رسد که متوسط آن ۰/۴ متر مکعب در تن جسم قابل سوخت می باشد. وجود هیدروکربورهای سنگین تر از متان در گازها و در هوای تونل مرز خطر انفجار را به پائین تر از حد انفجار متان تنزل خواهد داد و این مسئله باید هنگام استخراج در نظر گرفته شود.

جدول ۱-۴- ماکزیمم و متوسط گازخیزی اجزا تشکیل دهنده گاز (برزگر و پورهنگ، ۱۳۶۱)

نوع گاز	ماکزیمم گازخیزی	متوسط گازخیزی
	(متر مکعب در تن جسم قابل سوخت) (متر مکعب در تن جسم قابل سوخت)	
متان	۱۷/۳۷	۱۱/۸۳
اتان	۴/۵۵	۰/۵۷
پروپان	۰/۷۱	۰/۰۹
بوتان و پنتان	۰/۳۶	۰/۰۲
نیتروژن	۴/۰۴	۰/۶۷

درصد هیدروژن بین ۰-۳ درصد در نوسان است ولی این مقدار گاهی تا ۲۰ درصد هم می رسد. چون قابلیت جذب هیدروژن توسط زغال بسیار کم است یعنی اگر قابلیت جذب زغال برای نیتروژن ۱ فرض شود برای متان ۳-۴ برابر و برای هیدروژن فقط ۰/۱۵ خواهد بود. لذا می توان گفت که این مقدار زیاد هیدروژن به ویژه در نمونه های سنگی هنگام دگازاسیون در وان آب گرم در اثر تماس بین فلز روی و قلیایی ها به صورت مصنوعی ایجاد می شود. لذا به دلایل فوق وجود هیدروژن در نمونه مربوط به گاز لایه نیست و در محاسبات گازخیزی هم منظور نشده است.

بر اساس بررسی‌های انجام شده بر روی لایه‌های زغالی معدن پروده طبس مشخص شده است که اولاً گازخیزی در زون متانی به سرعت زیاد می‌شود. به طوری که تا عمق ۳۵۰ متری بطور متوسط 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 زغال‌هایی با متامورفیسم متوسط قابل پیش‌بینی می‌باشد. ثانیاً تفاوت ماگزیمم 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 تکتونیکی در منطقه می‌باشد که این تکتونیک آرام باعث یکنواختی در پخش گازها در اعماق مختلف شده است (برزگر و پورهنگ، ۱۳۶۱).

به منظور ارزیابی گازخیزی سنگ‌های کمر بالا و کمر پائین لایه‌ای زغالی نمونه‌هایی گرفته شده است. 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 آرژیلیت‌های زغال‌دار 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.

۴-۲-۵- جمع بندی بخش اول

از بررسی اطلاعات حاصل از گازخیزی رسوبات زغالی منطقه پروده I نتایج زیر به دست می‌آید:

۱- گاز رسوبات منطقه پروده I دارای اجزا زیر می‌باشد:

نیتروژن، دی اکسید کربن، هیدروژن، هیدروکربورها شامل: متان، اتان، پروپان، بوتان و گاهی پنتان و هیدروژن سولفور.

۲- با ازدیاد عمق، هیدروکربورها جای نیتروژن و دی اکسید کربن را می گیرند و این جایگزینی

باعث به وجود آمدن زون های گازی به شرح زیر می گردد:

- زون نیتروژن- دی اکسید کربن تا عمق ۱۹ الی ۲۰ متری
- زون دی اکسید کربن- نیتروژن تا عمق ۳۲ الی ۳۴ متری
- زون نیتروژن - متان از ۳۲ متری تا ۱۲۰ متری متغیر است که زون متانی از عمق ۵۰-۶۰ متری شروع می گردد.

۳- اجزا اصلی زون متانی و حد تغییرات آنها به صورت زیر است:

متان (۵۳/۹۰-۹۶/۷۳) درصد، اتان (۰/۰۲-۲۳/۳۹) درصد، پروپان (۰/۰۱-۳/۸۱) درصد، بوتان و پنتان (۰/۰۱-۳/۰۶) درصد، نیتروژن و دی اکسید کربن به ترتیب تا ۱۳/۳۹ و ۱۰/۳۱ درصد و هیدروژن اغلب ناچیز و ماکزیمم تا ۳٪ می باشد. وجود هیدروکربورهای سنگین تر از متان در هوای معادن مرز خطر انفجار را به پائین تر از مرز انفجار متان تنزل خواهند داد و این مساله می بایستی به هنگام استخراج در نظر گرفته شود.

۴- گازخیزی لایه های زغالی بالا بوده و به ۲۰ الی ۲۱ متر مکعب در تن جسم قابل سوخت

می رسد. بر اساس نتایج به دست آمده، مقدار متوسط گازخیزی طبیعی نسبت به عمق برای

لایه های (C2,C1,D) و (B1 و B2) به صورت جدول ۴-۲ می باشد.

جدول ۴-۲- مقدار متوسط گازخیزی طبیعی لایه های مختلف معدن پروده نسبت به عمق (برزگر و پورهنگ، ۱۳۶۱)

مقدار متوسط گازخیزی لایه های (B1 و B2)	مقدار متوسط گازخیزی لایه های (C1, C2, D)	عمق متر
متر مکعب برتن	مترمکعب برتن	متر
۱۰/۴	۱۰/۲	۱۰۰
۱۵/۵	۱۵/۴	۲۰۰
۱۸/۰	۱۷/۵	۳۰۰
۱۹/۶	۱۸/۸	۴۰۰
۲۰/۳	۱۹/۴	۵۰۰
۲۰/۷	۱۹/۸	۶۰۰
۲۱/۰	۲۰/۰	۷۰۰

۵- تغییرات گازخیزی نسبت به عمق تا ۳۵۰ متری سریع بوده و به ۱۸ الی ۱۹ مترمکعب در تن سوخت جامد رسیده و از آن به بعد تا ۷۰۰ متری تغییر چندانی نکرده و به طور متوسط به ۲۰ الی ۲۱ مترمکعب در تن جسم قابل سوخت می‌رسد.

۶- گازخیزی آرژیلیت‌های زغال‌دار و آرژیلیت‌ها به ۶/۹ مترمکعب در تن سنگ می‌رسد.

۷- در ضمن پیشروی عملیات معدنی احتمال وجود حفره‌های گازی و فوران گاز وجود دارد.

۴-۳- بخش دوم؛ آزمایشات تعیین خصوصیات زغال سنگ

مواد تشکیل دهنده سنگ متنوع است. دانه‌های تشکیل دهنده سنگ‌ها با مواد مختلف به همدیگر متصل شده‌اند که معمول‌ترین آنها سیلت، کلسیت یا رس می‌باشند. آگاهی از خواص فیزیکی سنگ می‌تواند در فهم و ارزیابی عملکرد آن در شرایط گوناگون کمک شایانی نماید.

خواص سنگ با تحلیل‌های آزمایشگاهی مغزه‌های گرفته شده از سنگ ارزیابی می‌شوند. مغزه-گیری از محیط سنگ معمولاً با تغییراتی در حجم کلی مغزه، حجم فضای متخلخل مغزه، درجات اشباع سیال سنگ همراه است. هر کدام از این تغییرات، بسته به خصوصیات سنگ بستر و خاصیت

پارامتر مورد نظر، اثری قابل اغماض یا مهم بر نتیجه دارد. در آزمایش یک مغزه باید به این تغییرات توجه کرد. اساساً خواص اصلی سنگ که در آزمایش‌های عمده آنالیز مغزه برای اندازه‌گیری خصوصیات فیزیکی سنگ‌ها انجام می‌شوند به صورت زیر است:

- تخلخل

- نفوذپذیری

- درجه اشباع

از آنجایی که این خصوصیات از خواص اصلی یک سنگ می‌باشد و در این تحقیق پارامترهای تخلخل و نفوذپذیری عوامل اصلی در تعیین میزان حرکت مولکول‌های گاز متان درون زغال سنگ می‌باشند، لذا در این فصل به بررسی و مطالعه آنها پرداخته می‌شود.

۴-۳-۱- تخلخل

تخلخل^۱ یک سنگ ظرفیت سنگ (حجم خلل و فرج) برای انباشت سیالات است. به صورت کمی، تخلخل نسبت حجم خلل و فرج به حجم کل سنگ است (طارق، ۱۳۸۹). رابطه زیر این خاصیت مهم سنگ را تعریف می‌کند:

$$\phi = \frac{P.V}{B.V} \quad (۳-۴)$$

که در آن:

ϕ : تخلخل

P.V: حجم خلل و فرج

B.V: حجم کل.

¹ Porosity

سنگ‌ها در دوره‌های زمین‌شناسی با رسوب‌گذاری در محیط‌های مختلف تشکیل شده‌اند. این سنگ‌ها دو نوع فضای خالی دارند. بعضی از این فضاها مرتبطاند و بعضی دیگر با مواد سیمانی از دیگر فضاهای خالی جدا شده‌اند. بر اساس این توضیح کوتاه دو نوع مشخص تخلخل را می‌توان تعریف کرد:

- تخلخل مطلق
- تخلخل موثر

۴-۳-۲- تخلخل مطلق

تخلخل مطلق^۱ نسبت حجم کل خلل و فرج موجود در سنگ به حجم کل نمونه است. ممکن است یک سنگ تخلخل مطلق قابل ملاحظه‌ای داشته باشد در حالی که قابلیت گذردهی سیال آن به علت فقدان ارتباط منافذ در حد صفر باشد. تخلخل مطلق در حالت کلی به صورت زیر بیان می‌شود (Calhoun, 1976):

$$\phi_a = \frac{(P.V)_t}{B.V} \quad (4-4)$$

یا:

$$\phi_a = \frac{(P.V)_t - G.V}{B.V} \quad (5-4)$$

که در آن:

ϕ_a : تخلخل مطلق

$(P.V)_t$: حجم کل خلل و فرج

$B.V$: حجم کل

$G.V$: حجم دانه‌های سنگ.

۴-۳-۳- تخلخل موثر^۲

درصد خلل و فرج مرتبط به هم به حجم کل نمونه است که به صورت زیر بیان می‌گردد:

¹ Absolute Porosity

² Effective Porosity

$$\phi_e = \frac{(P.V)_i}{B.V} \quad (۴-۶)$$

که در آن:

ϕ_e : تخلخل موثر

$(P.V)_i$: حجم خلل و فرج مرتبط به هم.

تخلخل را می‌توان بر اساس منشأ و زمان شکل‌گیری به دو دسته اولیه و ثانویه^۱ نیز تقسیم کرد. تخلخل اولیه هم زمان با تشکیل سنگ ایجاد می‌شود و تخلخل ثانویه در نتیجه بعضی فرآیندهای زمین‌شناسی در سنگ رخ می‌دهد. تخلخل بین دانه‌ای ماسه‌سنگ‌ها و تخلخل بین کریستالی بعضی از سنگ‌های آهک تخلخل اولیه شناخته می‌شوند. تخلخل‌های ایجاد شده با شکستگی‌ها که در اغلب شیل‌ها و سنگ‌آهک‌ها دیده می‌شوند و یا تخلخل‌های ناشی از انحلال مواد سنگی (اغلب در سنگ‌های آهکی) در گروه ثانویه دسته‌بندی می‌شوند. سنگ‌هایی که تخلخل اولیه دارند معمولاً از سنگ‌هایی که بخش اعظم آنها تخلخل ثانویه است خصوصیات همگن‌تری دارند. برای اندازه‌گیری کمی و مستقیم تخلخل، باید به نمونه‌های گرفته شده از سنگ اعتماد کرد (Calhoun, 1976).

چون تخلخل موثر مقداری است که در محاسبات در نظر گرفته می‌شود، باید به روش‌های تعیین تخلخل توجهی ویژه کرد. برای مثال، اگر تخلخل یک نمونه سنگی با اشباع صد در صد با سیالی با دانسیته معلوم انجام گیرد و اضافه وزن ناشی از این اشباع اندازه گرفته شود، تخلخل موثر به دست خواهد آمد. زیرا در این حالت سیال می‌تواند تنها وارد منافذی شود که با همدیگر مرتبط‌اند. به عبارت دیگر، اگر نمونه سنگی خرد و در هاون پودر شود، حجم حقیقی قسمت سنگی نمونه قابل اندازه‌گیری است. حال با کم کردن حجم به دست آمده از حجم کل نمونه و تقسیم آن بر حجم کل، تخلخل مطلق به دست می‌آید زیرا در پروسه خرد و پودر کردن سنگ مجزا بودن منافذ از بین می‌رود. (Cole and Frank, 1969)

¹ Primary and Secondary Porosity

۴-۳-۴ - اندازه گیری آزمایشگاهی تخلخل

روش‌های زیادی برای تعیین تخلخل سنگ‌های یکپارچه که دارای تخلخل بین ذره‌ای هستند ارائه شده است. اکثر این روش‌ها برای نمونه های کوچک به کارگرفته می‌شوند. از آنجا که اندازه حفره‌ها در این نمونه‌ها بسیار کوچک است، تعیین تخلخل آنها در واقع به اندازه‌گیری حجم هزاران روزنه کوچک مرتبط می‌شود. تخلخل بخش‌های بزرگتر به صورت آماری با توجه به نتایج مربوط به تعداد زیادی از نمونه های کوچک تعیین خواهد شد (میرجردوی و حریمی ۱۳۹۳).

در اندازه گیری های آزمایشگاهی تخلخل، لازم است که تنها دو پارامتر از سه پارامتر اصلی (حجم کل نمونه، حجم فضای خالی و روزنه‌های نمونه و حجم ذرات تشکیل دهنده نمونه) تعیین شوند. همه روش‌های اندازه‌گیری حجم کل نمونه هم برای تعیین تخلخل مؤثر قابل به‌کارگیری هستند.

الف - حجم کل^۱

اگرچه برای نمونه هایی که شکل هندسی منظمی دارند می‌توان با توجه به ابعاد نمونه حجم آن را تعیین کرد، معمولاً حجم کلی را با توجه به حجم سیال جابجا شده توسط نمونه اندازه می‌گیرند. این روش علاوه بر اینکه برای همه شکل‌های نمونه‌ها قابل استفاده است، از سرعت بالایی نیز برخوردار است. سیال جابجا شده توسط نمونه را هم از نظر حجمی و هم از نظر وزنی می‌توان ارزیابی کرد، که در هر حالت باید از نفوذ سیال به درون نمونه جلوگیری شود. این کار به سه طریق صورت می‌گیرد.

۱- پوشاندن سطح نمونه با پارافین و موادی مانند آن

۲- اشباع کردن نمونه از همان سیالی که قرار است درون آن جای بگیرد.

¹ Bulk Volume

۳- قرار دادن نمونه درون جیوه، چرا که جیوه با توجه به خصوصیات مربوط به کشش سطحی

معمولاً هیچ تمایل نفوذ درون روزنه‌های سنگ ندارد.

در بررسی‌های وزنی در واقع از قانون ارشمیدس استفاده می‌شود که می‌گوید تغییر وزن یک جسم جامد وقتی درون یک سیال قرار می‌گیرد، برابر با وزن سیالی است که جابجا می‌شود. در نتیجه با اندازه‌گیری تغییر وزن نمونه درون سیال می‌توان با توجه به چگالی سیال، حجم سیال جابجا شده که همان حجم کل نمونه است را به دست آورد.

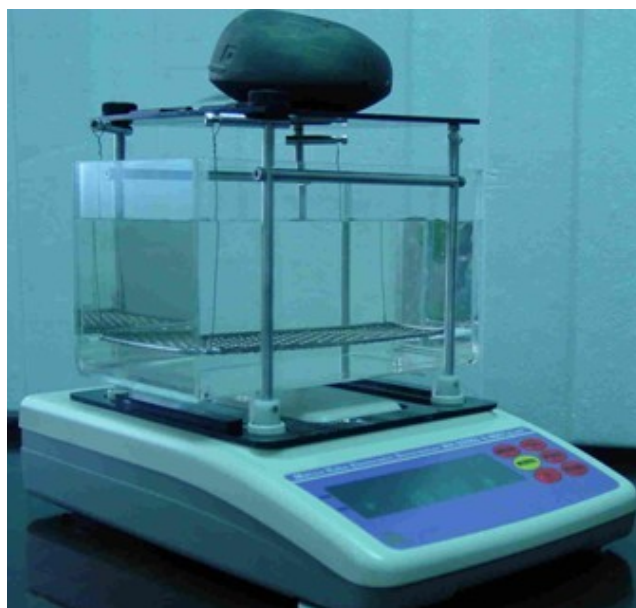
در تعیین حجم کلی نمونه به روش حجمی، از روش‌های حجم‌سنجی متنوعی استفاده می‌شود. در شکل ۴-۴ یک چگالی‌سنج الکتریکی نشان داده شده است که در آن هم از نمونه خشک و هم از نمونه اشباع می‌توان استفاده کرد. شکل ۳-۲ حجم سنج راسل^۱ را نشان می‌دهد که حجم نمونه را به صورت مستقیم می‌توان از روی آن خواند. در این دستگاه فقط از نمونه‌های اشباع و یا پوشیده شدن با پارافین می‌توان استفاده کرد (Mavko et al., 2009).

ب- حجم ذرات تشکیل‌دهنده سنگ

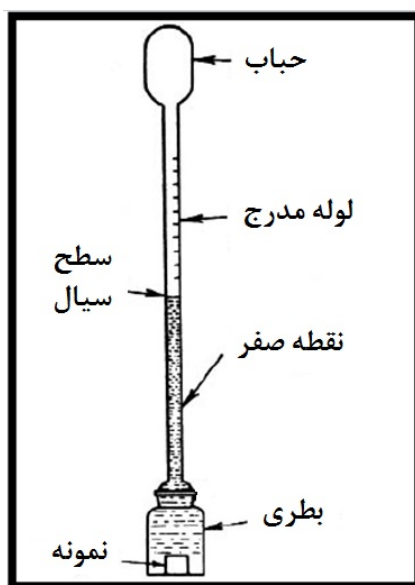
روش‌های متنوع اندازه‌گیری تخلخل، بر اساس روش‌های به کار گرفته شده برای اندازه‌گیری حجم حفره‌ها و یا ذرات سنگ از هم متمایز می‌شوند. حجم ذرات سنگ با توجه به چگالی ذرات سنگ و وزن نمونه خشک قابل محاسبه است. برای به دست آوردن نتایج دقیق‌تر روش‌های ملچر – ناتینگ^۲ و راسل قابل استفاده هستند (Russell and Smith, 2007; Muskat, 2004). در هر روش، ابتدا حجم کل نمونه اندازه‌گیری می‌شود و سپس نمونه را خرد کرده و حجم ذرات خرد شده را به دست می‌آورند.

¹ Russell

² Melcher- Nutting



شکل ۴-۴- چگالی سنج الکتریکی برای تعیین حجم کلی نمونه های کوچک مغزه

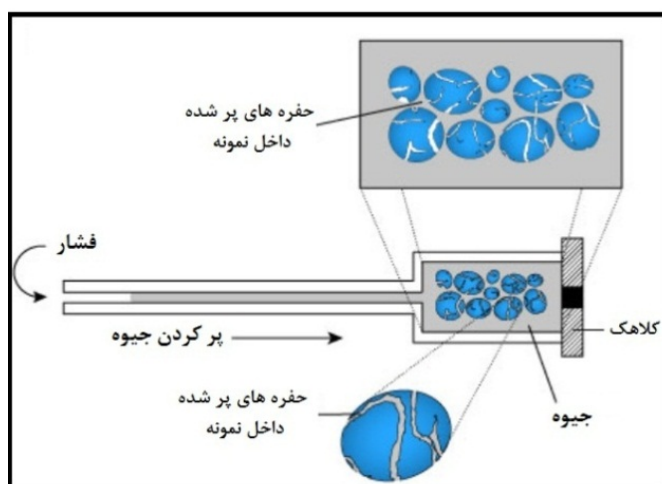


شکل ۴-۵- حجم سنج راسل برای تعیین حجم کلی و حجم ذرات نمونه های سنگ

در تکنیک ملچر- ناتینگ همه اندازه گیری ها به شکل وزنی و با توجه به قانون ارشمیدس انجام می شوند. در روش راسل از یک حجم سنج ویژه (شکل ۴-۵) استفاده می گردد و حجم کلی و حجم ذرات از روش حجمی به دست می آیند. در این روش ها تخلخل کلی محاسبه می شود و در ماسه سنگ هایی که ساختار نسبتاً همگونی دارند، چگالی ذرات با توجه به محاسبات این روش ها قابل

تعیین و به کارگیری برای سایر نمونه های مشابه (از نظر سنگ شناسی) می باشد و به این ترتیب برای سایر نمونه ها کافی است وزن نمونه خشک را داشته باشیم. همانطور که گفته شد، تعیین حجم ذرات به روش های مذکور، منجر به محاسبه تخلخل کلی می شود. تخلخل سنج استیون^۱ وسیله ای است که حجم موثر ذرات را اندازه می گیرد (شکل ۴-۶).

روش کار به این ترتیب است که یک نمونه را درون یک محفظه با حجم معین قرار می دهند. پس از آن هوای درون محفظه را خالی می کنند. به این ترتیب با توجه به اختلاف حجم هوای تخلیه شده و حجم محفظه می توان حجم اشغال شده توسط ذرات سنگ و حفره های بسته شده درون سنگ را اندازه گیری کرد. با تفریق این حجم از حجم کلی نمونه، حجم روزنه های متصل به هم حاصل می شود. روش استیون، حالت تغییر یافته روش واشبورن- بانتینگ^۲ است. تخلخل سنج مرکز توسعه گاز معادن^۳ (شکل ۴-۷) نیز حجم موثر ذرات تشکیل دهنده نمونه را اندازه گیری می کند و در نتیجه مقدار تخلخل موثر از این روش حاصل خواهد شد.

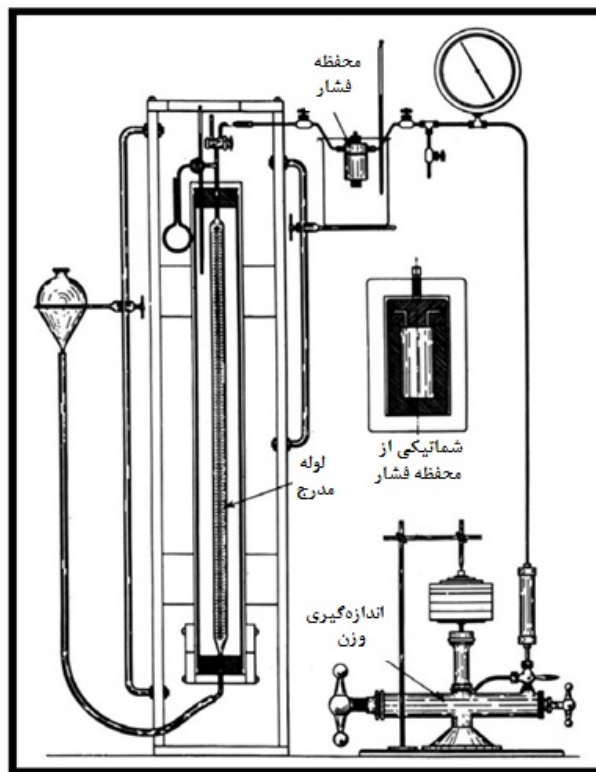


شکل ۴-۶- نحوه عملکرد تخلخل سنج استیون

¹ Steven

² Washburn-Bunting

³ Bureau of Mines gas expansion



شکل ۴-۷- تخلخل سنج مرکز توسعه گاز معادن

۴-۳-۵- تخلخل نمونه های زغال طبس

پس از بررسی تخلخل و انواع دستگاه‌های تعیین تخلخل، از دستگاه مستقر در انیستیتو مهندسی نفت دانشکده فنی دانشگاه تهران جهت انجام آنالیز تخلخل استفاده شد. نام این دستگاه پروپرم^۱ بوده و ساخت شرکت وینسی^۲ ایتالیا می‌باشد (شکل ۴-۸). روش تعیین تخلخل این دستگاه همانند روش دستگاه مرکز توسعه گاز معادن بوده و در این دستگاه پس از قرار گیری نمونه زغال تهیه شده و آماده سازی شده، ابتدا حجم کل نمونه محاسبه شده و سپس با ایجاد خلأ، میزان حجم هوا و گاز خارج شده از نمونه های زغال را اندازه‌گیری نموده و بر اساس آن میزان تخلخل موثر در نمونه زغال را محاسبه می‌نمایند.

¹ Poroperm

² Vinci



شکل ۴-۸- دستگاه تخلخل سنج پروپرم شرکت وینسی

۴-۳-۶- نفوذپذیری

نفوذپذیری^۱ (k) خاصیتی از محیط متخلخل است که ظرفیت و توانایی سنگ را برای انتقال سیالات اندازه‌گیری می‌کند و چون در جهات مختلف دبی جریان در سنگ را کنترل می‌کند، بسیار مهم است. هنری دارسی^۲ اولین بار در سال ۱۸۵۶ این خاصیت سنگ را به صورت ریاضی با یک معادله تعریف کرد. در حقیقت، این معادله نفوذپذیری را به صورت عباراتی از کمیت‌های قابل اندازه‌گیری تعریف می‌کند و اصطلاحاً قانون دارسی نامیده می‌شود (طارق، ۱۳۸۹). اما در زغال سنگ پارامترهایی مانند فشار مضاعف، فشار گاز، آب محتوای 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 زغالی برای گاز متان تاکنون محاسبه شده است که فنگ و همکاران آنها را مورد مطالعه قرار داده و در تحقیقات خود از آنها استفاده نموده است

¹ Permeability

² Henry Darcy

(Feng et al, 2012). معادلات زیادی برای نفوذپذیری جهت جریان گاز متان در لایه زغال ارائه شده است (Gray, 1987a; Harpalani and Zhao, 1991; Seidle and Huitt, 1995; Palmer and Mansoori, 1996; Gilman and Beckie, 2000; Shi and Durucan, 2004; Cui and Bustin, 2006)

دارسی معادله جریان سیالی را ارائه داده که تا به امروز یکی از ابزارهای ریاضی استاندارد مهندسی بوده است. اگر جریان خطی افقی یک سیال تراکم‌ناپذیر داخل یک نمونه مغزه به طول L و سطح مقطع A برقرار باشد، معادله جریان کنترل‌کننده حرکت سیال درون مغزه به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$v = -\frac{k}{\mu} \frac{dp}{dL} \quad (7-4)$$

که در آن:

V : سرعت ظاهری جریان سیال (cm/sec)

K : ثابت تناسب، یا نفوذپذیری (دارسی)

μ : ضریب گرانروی دینامیکی سیال در حال جریان (سانتی پواز)

dp/dL : افت فشار در واحد طول (atm/cm).

سرعت V در معادله ۷-۴ سرعت ظاهری نامیده می‌شود که از تقسیم دبی جریان بر سطح مقطعی که سیال از آن عبور می‌کند به دست می‌آید. با قرار دادن رابطه q/A به جای v در این معادله و حل آن نسبت به q رابطه زیر به دست می‌آید:

$$q = -\frac{kA}{\mu} \frac{dp}{dL} \quad (8-4)$$

که در آن:

q : دبی جریان در محیط متخلخل (cm³/sec)

A : مساحت سطح مقطع عبوری جریان (cm²).

واضح است که در صورت وجود دبی جریان یک سانتیمتر مکعب در ثانیه در سطح مقطع یک سانتیمتر مربع، سیالی با ضریب گرانشی دینامیکی یک سانتی پواز و گرادیان فشار یک اتمسفر در طول یک سانتی متر ، مقدار k برابر یک است. واحد k به احترام ارائه دهنده تئوری جریان درون محیط متخلخل داری نامیده شده است. بنابراین زمانی که مقادیر دیگر قسمت‌های معادله ۴-۸ یک باشند، k یک داری است.

یک داری نفوذپذیری نسبتاً بالایی است و نفوذپذیری اکثر سنگ‌ها کمتر از یک داری است. به خاطر اعشاری نشدن توصیف نفوذپذیری، از میلی داری استفاده می‌شود که برابر یک هزارم داری است.

زمانی که هندسه سیستمی که سیال در آن جریان دارد معلوم باشد، می‌توان از معادله ۴-۸ انتگرال گرفت. برای یک سیستم خطی ساده در شکل ۴-۹ ، انتگرال گیری به شکل زیر اجرا می‌شود:

$$q \int_0^L dL = -\frac{kA}{\mu} \int_{p_1}^{p_2} dp$$

در صورت تکمیل انتگرال گیری عبارت زیر به دست می‌آید:

$$qL = -\frac{kA}{\mu} (p_2 - p_1) \quad (4-9)$$

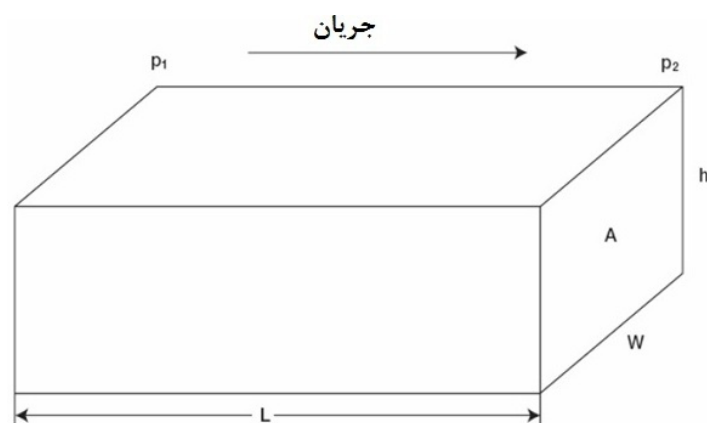
باید توجه داشت که دبی حجمی جریان q در مایعات ثابت است زیرا دانسیته با تغییر فشار تغییر قابل ملاحظه‌ای نمی‌کند. چون p_1 بزرگتر از p_2 است ، می‌توان شرایط فشار را دوباره آرایش و مقدار شرط منفی را در معادله حذف کرد:

$$q = kA \frac{(p_1 - p_2)}{\mu L} \quad (4-10)$$

این معادله به عنوان معادله جریان خطی معمولاً در محاسبات جریان سیال استفاده می‌شود.

فرآیندهای استاندارد تحلیل آزمایشگاهی داده‌های قابل اعتمادی از نفوذپذیری نمونه‌های مغزه به دست می‌دهند. اگر سنگ همگن نباشد، نتایج تحلیل کل مغزه احتمالاً از تحلیل قطعه‌های کوچک مغزه^۱ دقیق‌تر می‌باشند.

نفوذپذیری با فشار روباره^۲ کاهش می‌یابد. این ضریب را باید در تخمین نفوذپذیری سنگ بستر در چاه‌های عمیق در نظر گرفت. زیرا نفوذپذیری یک خاصیت آنیزوتروپ سنگ متخلخل در بعضی از نواحی تعریف شده سیستم است. معمولاً نمونه‌های حفاری شده در جهت موازی با صفحات لایه‌بندی تحلیل می‌شوند، بنابراین جهت جریان در آزمون نیز موازی با جهت جریان در سنگ بستر و نفوذپذیری حاصل از این آزمون نفوذپذیری افقی k_h است (طارق، ۱۳۸۹).



شکل ۴-۹- مدل جریان خطی داری

نفوذپذیری قطعه‌های کوچک حفاری شده عمود بر صفحات لایه‌بندی، نفوذپذیری عمودی k_v نامیده می‌شود. شکل ۴-۱۰ مفهوم مغزه کوچک مقیاس و نفوذپذیری آن را نمایش می‌دهد. در این شکل مشخص است که در تعیین نفوذپذیری سنگ باید چندین عامل را به عنوان منشأ خطا در نظر گرفت:

¹ Core plugs

² Overburden Pressure

- ممکن است که نمونه مغزه به خاطر هتروجن بودن^۱ محیط معرف سنگ بستر نباشند.
 - ممکن است بازیافت مغزه کامل نباشد.
 - ممکن است نفوذپذیری مغزه طی فرآیند برش یا در زمان شستشو و خشک کردن برای آزمایش تغییر کرده باشد. این مسأله زمانی که سنگ محتوی رس‌های واکنش‌پذیر باشد نیز رخ می‌دهد.
 - ممکن است فرآیند نمونه‌گیری نامنظم باشد و بهترین قسمت‌های مغزه برای آنالیز انتخاب شوند.
- نفوذپذیری با عبور سیال با ویسکوزیته معلوم μ از میان یک قطعه مغزه با ابعاد معلوم (A, L) و سپس اندازه‌گیری دبی جریان q و افت Δp اندازه‌گیری می‌شود. از حل معادله ۴-۱۰ نسبت نفوذپذیری رابطه زیر به وجود می‌آید:

$$k = \frac{q\mu L}{A\Delta p} \quad (4-11)$$

که در آن:

L : طول مغزه (cm)

A : مساحت سطح مقطع (cm^2)

شرایط زیر باید در حین اندازه‌گیری نفوذپذیری برقرار باشند:

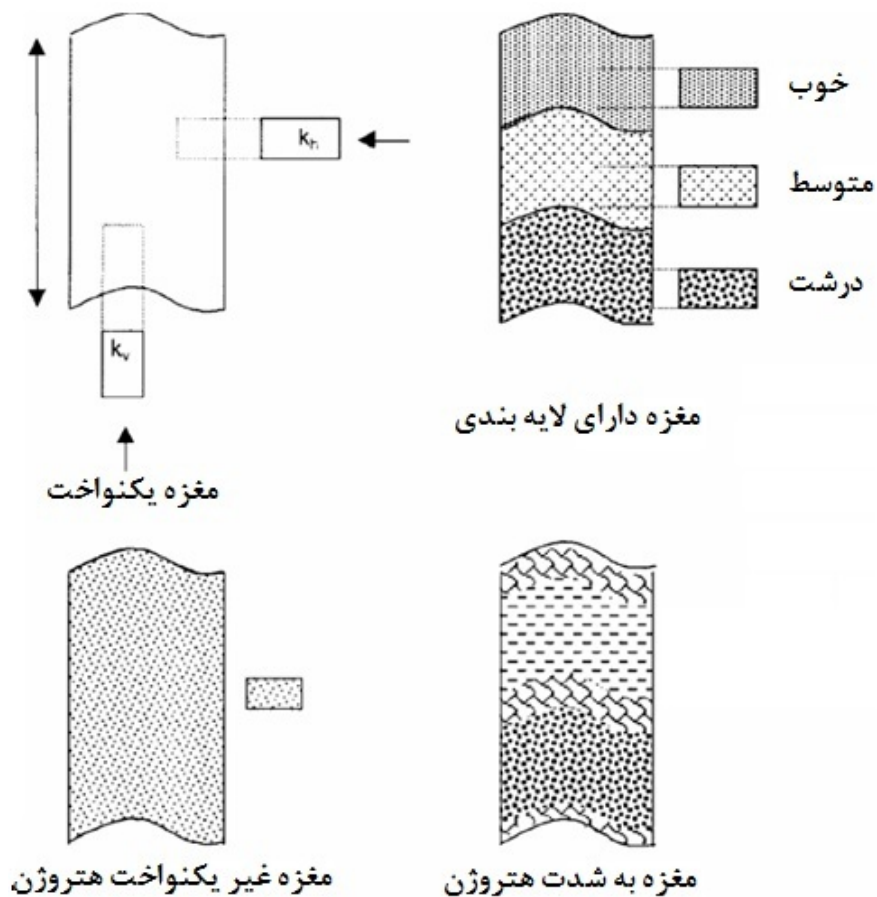
- جریان آرام^۲
- عدم انجام واکنش سنگ و سیال
- وجود تنها یک فاز مجرد با ۱۰۰٪ درجه اشباع درون منافذ.

¹ Heterogeneity

² Luminar (Viscose) Flow

نفوذپذیری اندازه‌گیری شده در درجه اشباع ۱۰۰٪ یک فاز مجرد اصطلاحاً نفوذپذیری مطلق

سنگ^۱ نامیده می‌شود.



شکل ۴-۱۰- نمونه‌ای معرف محیط متخلخل

معمولاً به خاطر کاربرد آسان، فراوانی و حداقل واکنش‌پذیری با سنگ از گازهای خشک (هوا،

نیتروژن و هلیوم) برای تعیین نفوذپذیری استفاده می‌شود.

اندازه‌گیری نفوذپذیری باید محدود به دبی جریان پایین (گران‌رو یا آرام) باشد زیرا جریان‌های

آشفته خطا ایجاد می‌کنند. در دبی‌های بالای جریان، معادله داریسی (معادله ۴-۹) برای توصیف رابطه

دبی جریان و افت فشار نامناسب است.

¹ Absolute Permeability

گاز یک سیال به شدت تراکم‌پذیر است، بنابراین اگر از گاز خشک برای اندازه‌گیری نفوذپذیری استفاده شود، دبی حجمی جریان گاز q با فشار تغییر می‌کند (Gash, 1991). بنابراین در معادله ۴-۸ باید از مقدار q در فشار متوسط در مغزه استفاده کرد. فرض کنید که گازهای استفاده شده در آزمایش رفتار گاز ایده‌آل را داشته باشند (در فشارهای کم)، در این صورت:

$$p_1 V_1 = p_2 V_2 = p_m V_m \quad (۱۲-۴)$$

در شرایطی از دبی جریان q ، معادله بالا معادل رابطه زیر خواهد بود:

$$P_1 q_1 = p_2 q_2 = p_m q_m \quad (۱۳-۴)$$

فشار متوسط در رابطه (۱۳-۴) به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$P_m = \frac{p_1 + p_2}{2} \quad (۱۴-۴)$$

که در آن:

P_1, P_2, P_m فشارهای ورودی، خروجی و متوسط (atm)

V_1, V_2, V_m حجم گاز ورودی، خروجی و متوسط (cm^3)

q_1, q_2, q_m دبی جریان گاز ورودی، خروجی و متوسط (cm^3/sec)

دبی جریان گاز معمولاً در فشار پایه (اتمسفر) p_b اندازه گرفته می‌شود. بنابراین عبارت Q_{gsc}

در معادله (۱۳-۴) اعمال می‌شود:

$$Q_{gsc} p_b = q_m p_m$$

که در آن:

Q_{gsc} : دبی جریان گاز در شرایط استاندارد (cm^3/sec)

P_b : فشار پایه (فشار اتمسفر) (atm).

با قرار دادن قانون دارسی در عبارت بالا:

$$Q_{gsc} p_b = kA \frac{(p_1 - p_2)}{\mu_g L} \left(\frac{p_1 + p_2}{2} \right)$$

یا:

$$Q_{gsc} = kA \frac{(p_1^2 - p_2^2)}{2\mu_g L p_b} \quad (۱۵-۴)$$

که در آن:

K: نفوذپذیری مطلق (داری)

μ_g : ویسکوزیته گاز (سانتی پواز)

P_b : فشار پایه (atm)

P_1 : فشار بالادستی (ورودی) (atm)

P_2 : فشار پایین دستی (خروجی) (atm)

L: طول مغزه (سانتی متر)

A: مساحت سطح مقطع (cm^2)

Q_{gsc} : دبی جریان گاز در شرایط استاندارد (cm^3/sec).

۴-۳-۷- اثر کلینکنبرگ^۱

کلینکنبرگ کشف کرد که نتایج نفوذپذیری‌های هوا به عنوان جریان عبوری از مغزه با نفوذپذیری سیال مایع متفاوت‌اند و نفوذ هوا همواره بزرگتر از نفوذ سیال مایع می‌باشد. کلینکنبرگ بر اساس تجارب آزمایشگاهی‌اش فرض کرد که سرعت سیالات مایع در سطح دانه‌های ماسه صفر و سرعت گازها محدود است. به عبارت دیگر، گازها روی سطح دانه ماسه می‌لغزند. این لغزندگی در دبی جریان بالاتر گازها تحت یک اختلاف فشار معلوم اتفاق می‌افتد. همچنین، کلینکنبرگ فهمید که در یک محیط متخلخل معین، با افزایش فشار متوسط، نفوذپذیری محاسبه شده کاهش می‌یابد. فشار متوسط از جمع دو فشار بالادستی و پایین‌دستی تقسیم بر دو به دست می‌آید: $(p_m = (p_1 + p_2)/2)$. اگر نموداری از نفوذپذیری اندازه‌گیری شده بر حسب $1/p_m$ رسم و تا نقطه $1/p_m = 0$ برونیابی شود ($p_m = \infty$)، این نفوذپذیری تقریباً برابر با نفوذپذیری سیال مایع است. نفوذپذیری مطلق به صورتی که در شکل ۴-۱۱ نشان داده شده تعیین می‌شود (Klikenberg, 1941).

¹ The Klikenberg Effect

بزرگی اثر کلینکنبرگ با نفوذپذیری مغزه و نوع گاز استفاده شده در آزمایش تغییر می کند

(شکل های ۱۲-۴ و ۱۳-۴). رابطه خط راست حاصل به صورت زیر بیان می شود (Jones, 1972):

$$k_g = k_L + c \left(\frac{1}{p_m} \right) \quad (۱۶-۴)$$

که در آن:

K_g : نفوذپذیری اندازه گیری شده گاز

P_m : فشار متوسط

K_L : نفوذپذیری معادل مایع یا نفوذپذیری مطلق k

C : شیب خط.

به نظر کلینکنبرگ شیب C تابعی از عوامل زیر است:

- نفوذپذیری مطلق k
- نوع گاز استفاده شده در اندازه گیری نفوذپذیری مثلاً هوا
- شعاع متوسط منافذ سنگ.

کلینکنبرگ شیب C را با رابطه زیر تعریف می کند:

$$C = bk_L \quad (۱۷-۴)$$

k_L : نفوذپذیری معادل مایع (نفوذپذیری مطلق) k

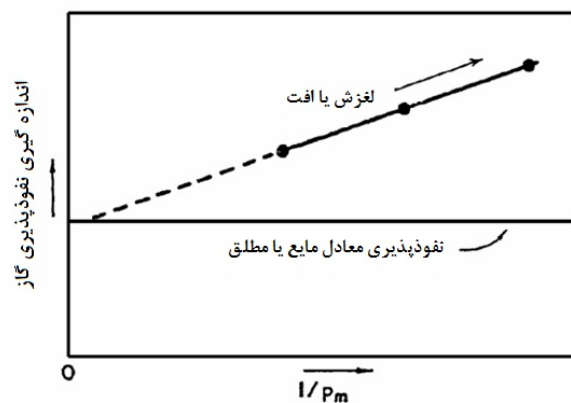
B : ثابتی که به اندازه دهانه منافذ وابسته و به صورت معکوس یا شعاع منافذ موئینه متناسب است.

با ترکیب دو معادله ۱۶-۴ و ۱۷-۴ معادله زیر حاصل می شود:

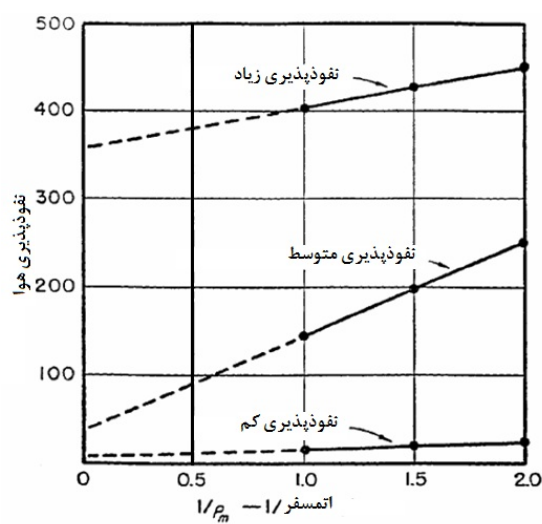
$$k_g = k_L + (bk_L) \left(\frac{1}{p_m} \right) \quad (۱۸-۴)$$

که در آن:

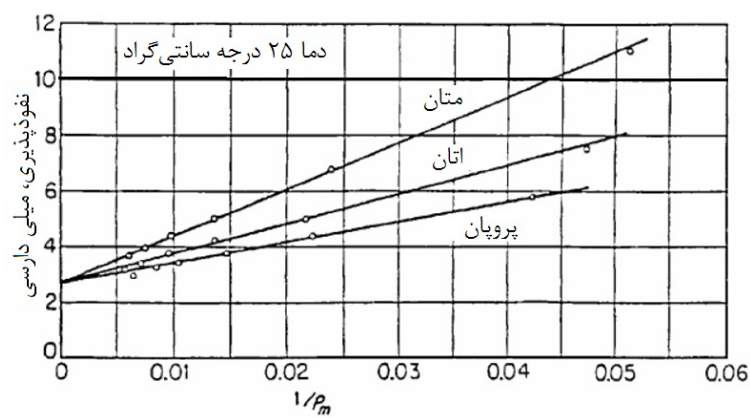
K_g : نفوذپذیری گاز اندازه گیری شده در فشار متوسط p_m است.



شکل ۴-۱۱- اثر کلینکنبرگ در اندازه گیری های نفوذپذیری گاز (Klikenberg, 1941)



شکل ۴-۱۲- اثر نفوذپذیری بر بزرگی اثر کلینکنبرگ (Klikenberg, 1941)



شکل ۴-۱۳- اثر فشار گاز بر نفوذپذیری های گازهای مختلف (Klikenberg, 1941)

جوز^۱ پدیده لغزیدن گاز^۲ را برای تعدادی مغزه با مقادیر نفوذپذیری مایع k_L (نفوذپذیری مطلق) و نفوذپذیری هوا مطالعه کرده است. او پارامتر b را با رابطه زیر به نفوذپذیری مایع ارتباط داده است:

$$b = 6.9k_L^{-0.36} \quad (۱۹-۴)$$

معمولاً نفوذپذیری با هوا در فشار متوسط تنها کمی بالاتر از فشار یک اتمسفر اندازه گرفته می‌شود. برای ارزیابی پدیده لغزش و اثر کلینکنبرگ نفوذپذیری گاز باید در حداقل دو سطح فشار متوسط اندازه‌گیری شود. در صورت نبودن این چنین اطلاعاتی، معادلات ۱۸-۴ و ۱۹-۴ با هم ترکیب می‌شوند تا رابطه زیر حاصل شود:

$$6.9k_L^{0.64} + p_m k_L - p_m k_g = 0 \quad (۲۰-۴)$$

که در آن:

p_m : فشار متوسط (psi)

k_g : نفوذپذیری هوا در p_m (psi)

k_L : نفوذپذیری مطلق (k) (میلی دارسی).

زمانی که تنها یک اندازه‌گیری نفوذپذیری گاز k_g برای یک نمونه مغزه در p_m موجود باشد، از

معادله ۲۰-۴ برای محاسبه نفوذپذیری مطلق استفاده می‌شود. این معادله غیرخطی را با روش تکرار نیوتن-رافسون می‌توان حل کرد:

$$k_{i+1} = k_i - \frac{f(k_i)}{f'(k_i)} \quad (۲۱-۴)$$

k_i : مقدار اولیه نفوذپذیری مطلق (میلی دارسی)

k_{i+1} : مقدار جدید نفوذپذیری برای استفاده در تکرار بعدی

I : سطح تکرار

$f(k_i)$: معادله ۲۰-۴، ارزیابی شده با مقدار فرض شده k_i

$f'(k_i)$: مشتق اول معادله ۲۰-۴، ارزیابی شده در k_i

¹ Jones

² Gas Slippage

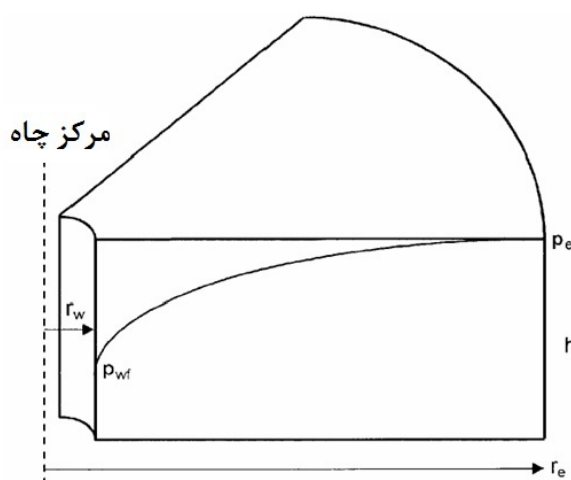
مشتق اول معادله ۴-۲۰ نسبت به k_i برابر است با :

$$f(k_i) = 4.416k_i^{-0.36} + p_m \quad (۲۲-۴)$$

فرآیند تکرار تا زمانی که $f(k_i)$ به صفر نزدیک شود با فرض اینکه هیچ تغییری در مقادیر محاسبه شده k_i مشاهده نشود، ادامه خواهد یافت.

می‌توان معادله ۴-۹ را برای توصیف جریان در هر محیط متخلخلی که ابعاد و هندسه سیستم برای انتگرال‌گیری زیاد پیچیده نباشد بسط داد. برای مثال، جریان درون یک چاه خطی نیست و اغلب شعاعی است. شکل ۴-۱۴ این نوع جریان را به صورت نمونه در نزدیکی یک چاه تولیدی نشان می‌دهد. برای جریان شعاعی^۱، قانون دارسی به شکلی متفاوت بیان می‌شود:

$$q = \frac{kA}{\mu} \frac{dp}{dr} \quad (۲۳-۴)$$



شکل ۴-۱۴ - مدل جریان شعاعی (طارق، ۱۳۸۹)

با انتگرال‌گیری از رابطه دارسی، رابطه زیر به دست می‌آید:

$$q \int_{r_w}^{r_e} dr = \frac{kA}{\mu} \int_{p_{wf}}^{p_e} dp \quad (۲۴-۴)$$

¹ Radial Flow

که در آن، عبارت dr به جای dL گذاشته شده زیرا در این حالت مقیاس طول به مقیاس شعاع تبدیل شده است. علامت منفی نیز لازم نیست زیرا شعاع در جهت یکسانی با فشار افزایش می‌یابد. در هر نقطه‌ای درون سنگ، مساحت سطح مقطعی که جریان از آن عبور می‌کند برابر مساحت سطح یک استوانه است (برابر با $2\pi rh$). با توجه به اینکه مساحت سطح مقطع به r وابسته است، A باید وارد علامت انتگرال شود:

$$q \int_{r_w}^{r_e} \frac{dr}{2\pi r h} = \frac{k}{\mu} \int_{p_{wf}}^{p_e} dp$$

با آرایش مجدد رابطه بالا:

$$\frac{q}{2\pi h} \int_{r_w}^{r_e} \frac{dr}{r} = \frac{k}{\mu} \int_{p_{wf}}^{p_e} dp \quad (۲۵-۴)$$

با انتگرال گیری از رابطه بالا:

$$\frac{q}{2\pi h} (\ln r_e - \ln r_w) = \frac{k}{\mu} (p_e - p_{wf}) \quad (۲۶-۴)$$

با حل این رابطه نسبت به دبی جریان q :

$$q = \frac{2\pi k h (p_e - p_w)}{\mu \ln\left(\frac{r_e}{r_w}\right)} \quad (۲۷-۴)$$

Q : دبی جریان سنگ (cm^3/sec)

K : نفوذپذیری مطلق (داریسی)

H : ضخامت (سانتی‌متر)

R_e : شعاع زهکشی (سانتی‌متر)

R_w : شعاع چاه (سانتی‌متر)

P_e : فشار در شعاع زهکشی (اتمسفر)

P_w : فشار ته چاه در حال جریان (اتمسفر)

μ : گرانیوی (سانتی پواز).

در معادله ۲۷-۴ فرض می‌شود که سنگ همگن و کاملاً با یک فاز سیال مایع اشباع شده است.

۴-۳-۸- اندازه گیری نفوذپذیری

در این مبحث به روش‌های تعیین نفوذپذیری در نمونه های کوچک پرداخته می‌شود. از دو روش عمده برای ارزیابی نفوذپذیری مغزه‌ها استفاده می‌شود. در روشی که برای سنگ‌های سالم و تقریباً همگن مورد استفاده قرار می‌گیرد، نمونه های کوچک^۱ با قطر حدوداً ۳/۴ اینچی به کار می‌روند که طول آنها حدوداً یک اینچ می‌باشد. در روش دوم، از نمونه مغزه با قطر کامل و طول ۱ تا ۱/۵ فوت استفاده می‌شود. سیال‌های مورد استفاده در این روش‌ها می‌توانند گاز و یا هر مایع غیر واکنشی باشند. البته باید ذکر نمود که سرعت وارد نمودن فشار و همچنین فشاری که در آن میزان نفوذپذیری اندازه‌گیری می‌شود مهم بوده و در فشارهای گوناگون مقادیر مختلفی از نفوذپذیری به دست خواهد آمد (Changbao et al, 2011).

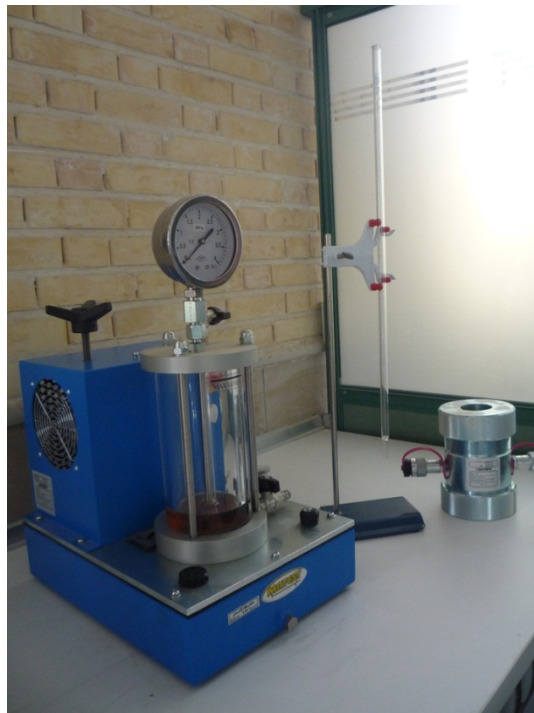
الف- روش نمونه های کوچک

از آنجا که نمونه های مغزه معمولاً حاوی مقداری آب و سیالات دیگر هستند باید قبل از تعیین نفوذپذیری تحت عملیات آماده‌سازی قرار بگیرند (Gash, 1991). نمونه های کوچک معمولاً از نمونه مغزه‌های بزرگ‌تر، موازی با بستر سنگ برداشته می‌شوند. نمونه های کوچک در یک اجاق، خشک شده و ممکن است قبل از خشک کردن درون دستگاه استخراج‌کننده^۲ قرار داده شوند. به این ترتیب سیالات درون نمونه خشک می‌شوند و نمونه ۱۰۰٪ از هوا اشباع می‌شود. پس از آن نمونه های کوچک به درون نگه‌دارنده مغزه^۳ فرستاده می‌شود. (شکل ۴-۱۵).

¹ Perm-Plug

² Soxhelt extractor

³ Core holder



شکل ۴-۱۵- دستگاه اندازه‌گیری نفوذپذیری

یک اختلاف فشار مناسب در طول نمونه‌های کوچک تنظیم می‌شود و دبی جریان هوا از درون آن بررسی می‌شود. لازمه تعیین نفوذپذیری در شرایط جریان ویسکوز^۱ به کار بردن دبی‌های مختلف می‌باشد. در شرایط جریانی ویسکوزیته نمودار رسم شده و حاصل یک خط راست می‌باشد که از مبدأ می‌گذرد. شیب این خط برابر با K/μ خواهد بود که با توجه به آن نفوذپذیری قابل محاسبه است.

در شکل ۴-۱۶ یک دستگاه تراوایی‌سنج که می‌تواند نفوذپذیری را برای هم‌گاز و هم‌مایع تعیین کند، نشان داده شده است. معمولاً داده‌های مربوط به این دستگاه با تنها یک دبی جریان، ارائه می‌شوند. برای اطمینان از وجود شرایط جریانی از کمترین دبی جریان که دقیقاً قابل اندازه‌گیری باشد استفاده می‌شود.

¹ Viscos Flow



شکل ۴-۱۶- دستگاه نفوذپذیری سنج AGP

از این دستگاه که به نام AGP^۱ بوده و در پژوهشکده مهندسی نفت پژوهشگاه صنعت نفت نگهداری می‌شود برای تعیین میزان نرخ نفوذپذیری نمونه های زغال طبس استفاده شده است. طرز کار این دستگاه شرح داده شد. البته در این دستگاه گاز ورودی به مخزن نگه‌دارنده زغال، گاز متان بوده تا میزان نرخ نفوذپذیری زغال در مقابل این گاز محاسبه شود. همچنین، با توجه به اینکه گاززدایی متان در زغال برجا صورت می‌گیرد از خشک کردن نمونه های زغال جهت خارج شدن سیال درون آنها جلوگیری می‌شود تا تمامی آزمایش در شرایط تقریباً طبیعی و برجای زغال صورت پذیرد. نتایج آزمایش نفوذپذیری در فصل‌های بعدی ارائه شده است.

ب- روش تمام مغزه^۲

در این روش نیز همانند آنچه در روش نمونه های کوچک گفته شد مغزه باید تحت آماده‌سازی قرار بگیرد. این نمونه مغزه ، سپس درون محفظه نگه‌دارنده مخصوص قرار خواهد گرفت.

¹ Automated Gas Permeameter

² Whole core method

مواردی که باید اندازه‌گیری شوند، مشابه با روش قبلی می‌باشند، اما نحوه محاسبات کمی متفاوت است. در مواردی که از تراوایی سنج نوع گیره‌ای^۱ استفاده می‌شود شکل هندسی مسیر جریان پیچیده است و برای محاسبات نفوذپذیری باید از یک فاکتور شکل^۲ مناسب استفاده شود. این فاکتور شکل در واقع تابعی از طول مغزه و اندازه روزنه‌های واشر چرمی^۳ که دور مغزه را می‌گیرد، محسوب می‌شود. نتایج اندازه‌گیری‌های روش نمونه‌های کوچک (که در واقع مربوط به ماتریس سنگ می‌شوند) و تمام مغزه (اندازه‌گیری‌های مربوط به نمونه‌های بزرگ مغزه) در جدول ۳-۴ با هم مقایسه شده‌اند.

جدول ۳-۴- مقایسه نفوذپذیری‌های مشاهده شده در ماتریس و مغزه کامل نمونه‌های سنگ آهک النبرگر^۴

شماره گروه‌های مختلف مغزه‌ها				
۴	۳	۲	۱	
۹۴	۲۳	۴۰۹	۱۰	ماکزیمم نفوذپذیری حاصله در روش تمام مغزه (میلی داری)
۳۸	۱۰	۱/۲	۰/۶	نفوذپذیری مغزه کامل در جریان عمود بر جهت نفوذپذیری ماکزیمم
۳/۷	۰/۳	۰/۲	۰/۳	نفوذپذیری ماتریس از روی نمونه‌های کوچک

اندازه‌گیری نفوذپذیری از مغزه‌های بزرگ، برای سنگ‌های آهکی نتایج بهتری دارند. با این حال با توجه به لحاظ نشدن بعضی از شکاف‌های سنگ در طی نمونه‌گیری (به علت شکسته شدن نمونه‌ها از نواحی شکاف‌ها) و سایر عوامل دیگر، معمولاً به جز در نمونه‌های کاملاً رسی، نتایج آزمایشگاهی مقدار حداقل نفوذپذیری را ارائه می‌کنند و درون سنگ عملاً مقدار نفوذپذیری بیشتر از مقدار اندازه‌گیری شده در آزمایشگاه می‌باشد.

^۱ Clamp type
^۲ Shape factor
^۳ Gasket opening
^۴ Ellenberger

۴-۳-۹- عوامل تاثیرگذار بر اندازه گیری های نفوذپذیری

در تکنیک های گفته شده در مورد اندازه گیری نفوذپذیری، به دست آوردن نتایج دقیق یک سری مراقبت های ویژه و مشخص باید اعمال شوند. در مواردی که از گاز به عنوان سیال در آزمایش ها استفاده می شود، برای حذف اثر سر خوردن گاز^۱، تصحیحاتی باید در محاسبات صورت بگیرد. در هنگام استفاده از مایعات، باید به گونه ای نوع سیال را انتخاب کرد که با سنگ واکنش نداده و خواص فیزیکی آنرا تغییر ندهد. همچنین تصحیحات مربوط به تغییر فشار محیطی نمونه نیز باید انجام شود.

۴-۳-۱۰- اثر سر خوردن گاز بر اندازه گیری های نفوذپذیری

کلینکنبرگ گزارش داده که در مقادیر نفوذپذیری تعیین شده توسط گازها، تفاوت هایی با مقادیر حاصل از کاربرد مایعات در اندازه گیری ها مشاهده می شود. این تفاوت ها به پدیده شناخته شده سر خوردن گاز درون لوله های موئینه نسبت داده می شود. پدیده سر خوردن هنگامی رخ می دهد که قطر روزه ها (لوله های موئینه) به مقدار میانگین مسیر آزاد گاز^۲ نزدیک شود (Calhoun, 1976). مقدار میانگین مسیر آزاد یک گاز تابعی از اندازه مولکول ها و انرژی جنبشی گاز می باشد. در نتیجه اثر موسوم به اثر کلینکنبرگ تابعی است از گازی که در اندازه گیری های نفوذپذیری استفاده می شود.

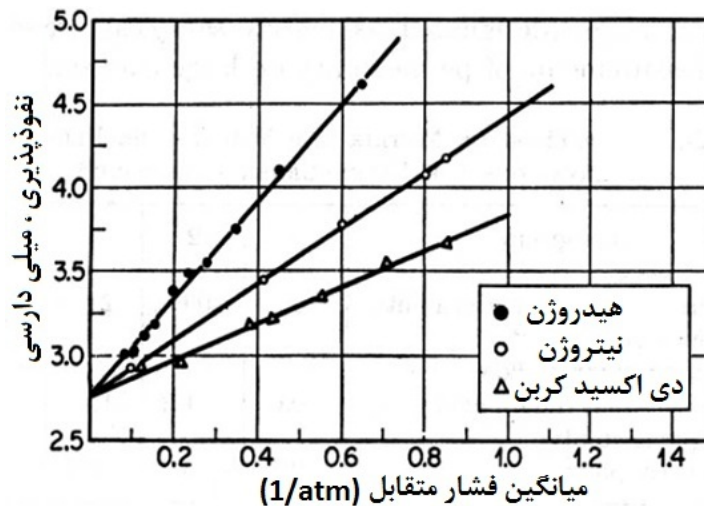
شکل ۴-۱۷ اندازه گیری های مختلف با استفاده از گازهای هیدروژن، نیتروژن و دی اکسید کربن را نشان می دهد.

توجه کنید که در هر سه مورد خط راست حاصل شده است و شیب خط مربوط به مولکول های سبک تر تندتر می باشد که نشان دهنده اثر بیشتر سر خوردن است. همه خط ها وقتی

¹ Gas slippage

² Mean free path of the gas

فشار بینهایت می‌رسند در یک نقطه مشترک که همان عرض از مبدأ خط‌ها می‌باشد، یکدیگر را قطع می‌کنند. این نقطه K_L و یا نفوذپذیری مایع معادل نامیده می‌شود.



شکل ۴-۱۷- اندازه گیری های مختلف نفوذپذیری با استفاده از گازهای هیدروژن، نیتروژن و دی اکسید کربن (Calhoun, 1976)

کلینکنبرگ و سایر محققان اثبات کرده‌اند که این مقدار K_L با مقدار نفوذپذیری حاصله از انجام آزمایش با یک مایع غیر واکنش دهنده برابر می‌باشد.

$$k_L = \frac{k_g}{1+(b/P)} = k_g - m \frac{1}{P} \quad (4-28)$$

$$b = m/k_L$$

که ثابت b در رابطه بالا به میانگین مسیر آزاد بستگی دارد که به نوعی مربوط به بزرگی روزنه‌های سنگ می‌شود. از آنجا که نفوذپذیری در واقع مقیاسی از بزرگی روزنه‌های سنگ می‌باشد، می‌توان ثابت b را تابعی از نفوذپذیری در نظر گرفت.

شکل ۴-۱۸ رابطه‌ای بین b و k_L را نشان می‌دهد که کلینکنبرگ با توجه به اندازه گیری های مربوط به ۱۷۵ نمونه ارائه کرده است. فاکتور b با کاهش k_L افزایش می‌یابد؛ چرا که در واقع با کاهش k_L اثر سر خوردن بیشتر می‌شود.



شکل ۴-۱۸- رابطه ریاضی بین فاکتور کلینکنبرگ و نفوذپذیری

۴-۳-۱۱- جمع بندی بخش دوم

در این فصل، تعاریف و معادله‌های مربوط به تخلخل و نفوذپذیری بیان گردید. برای اندازه‌گیری تخلخل دستگاه‌ها و روش‌های مختلفی وجود داشته که با سیال‌های ویژه و یا خلأ اقدام به اندازه‌گیری تخلخل می‌گردد. پس از ارائه اثر کلینکنبرگ در مورد نفوذپذیری و ارائه معادلات وابسته به نفوذپذیری، انواع دستگاه‌های تعیین نفوذپذیری با شیوه کار آنها بیان گردید. انواع دستگاه‌های تعیین تخلخل و نفوذپذیری معرفی شدند. معادلات حاکم بر روی جریان سیال و گاز درون ماتریس سنگی و چاه بیان شده و روش‌های گوناگون مورد بحث و بررسی قرار گرفت. در بخش بعدی در مورد ماسرال‌ها و نحوه شناسایی و تاثیر آنها در میزان نفوذپذیری زغال‌سنگ بحث می‌شود.

۴-۴- بخش سوم؛ ماسرال‌ها

در بیشتر تقسیم‌بندی‌ها، زغال‌سنگ به عنوان یک سامانه دو جزئی که شامل مواد آلی یا بخش ماسرالی و مواد غیرآلی یا بخش کانیایی است در نظر گرفته می‌شود (Gurdal, 2011; Liu et al, 2005; Vassileva and Vassileva, 2006). همچنین در تقسیم‌بندی دیگری زغال‌سنگ از سه بخش ماسرال آلی، مواد معدنی غیرآلی و رطوبت تشکیل شده است (Robeck and Huo, 2016). بخش

ماسرال پایه شناخت ماهیت زغال سنگ (نوع و رتبه) و تعیین ارزش آن برای کاربردهای مختلف است (Dai et al, 2009). زغال سنگ‌ها از نظر ماسرال شامل سه گروه لیپتینایت^۱، اینرتینایت^۲ و ویتترینایت^۳ هستند. خواص زغال سنگ از جمله کک‌شوندگی و نفوذپذیری تابعی از نوع و میزان ماسرال های تشکیل‌دهنده زغال سنگ است (Cui and Busten, 2006). همچنین زغال سنگ به عنوان سنگ منشأ و هم به عنوان سنگ مخزن گاز متان نیز عمل می‌کند. متان تولید شده در زغال به صورت جذب سطحی در ماتریکس زغال، گاز آزاد یا گاز حل شده دیده می‌شود. البته نوع اول، بیشترین حجم ذخیره را به خود اختصاص می‌دهد. مقدار این گاز به عوامل مختلفی نظیر مقدار ماده آلی، درجه بلوغ، ترکیب، فشار، حرارت، رطوبت و خاکستر زغال سنگ بستگی دارد. متان در طی مراحل مختلف زغالی شدن، تولید و در فشار بالا جذب سطحی زغال می‌گردد. اکتشاف و تولید این نوع گاز از چندین دهه قبل در بعضی از کشورها به ویژه در کشور آمریکا، شروع شده است. انفجار این گاز به عنوان یکی از مخاطرات مهم معدن کاری زیرسطحی زغال مطرح می‌باشد. این انفجارات در معادن بزرگ زغال سنگ، عمیق تر و با زغال‌هایی با درجه بلوغ بالاتر، بیشتر و خطرناک تر است. چون مقدار گاز بیشتری در آنها تولید و منتشر می‌شود (Chen et al, 2011). وجود این گاز در معادن نه تنها کار در معدن را سخت و خطرناک می‌کند، بلکه آن را پرهزینه می‌نماید. زیرا مالکان معدن، جهت تهویه این گاز از معدن و رهاسازی آن در اتمسفر، متحمل هزینه‌های اضافی قابل توجهی می‌شوند. همچنین، رهاسازی این گاز در هوا سبب آلودگی بیشتر اتمسفر و افزایش گازهای گل‌خانه‌ای می‌شود (Ojha et al, 2011).

جریان گاز متان از زغال سنگ به نفوذپذیری موثر زغال بستگی دارد. بنابر برخی از مدل‌های ریاضی و کامپیوتری گاززدایی متان، فاصله میان منافذ و درزه‌ها نقش اصلی را در جریان گاز متان از زغال سنگ بازی می‌کنند. در یک زغال سنگ دست نخورده، مولکول‌های متان در منافذ ریز از ماتریس

¹ Liptinite

² Inertinite

³ Vitritinite

زغال سنگ باقی مانده‌اند (Harpalani and Schraufnagel, 1990). نفوذپذیری در یک نمونه زغال برای گازهای مختلف متفاوت بوده و بر اساس قطر مولکول‌های گاز تغییر می‌کند (Aziz et al, 2010). در معادنی که گاز نیتروژن جهت تسریع در عملیات گاززدایی در زغال تزریق می‌شود نیز در تعیین نفوذپذیری و تخلخل مهم می‌باشد (Packham et al, 2012). همچنین نفوذپذیری، درزه‌ها و تخلخل زغال در انواع ماسرال‌ها با یکدیگر متفاوت بوده و در میزان گازخیزی و حرکت مولکول‌های گاز درون لایه زغال تأثیر بسزایی دارند.

تحقیقات صورت گرفته در زمینه تأثیر ماسرال‌ها در میزان نرخ نفوذپذیری نشان‌دهنده آن است که تاکنون بر روی زغال‌های مختلف آزمایش شناسایی ماسرال‌ها انجام پذیرفته و در تعدادی از آنها تأثیر بر روی میزان نفوذپذیری زغال بحث شده است. از آن جمله می‌توان به تحقیقات بر روی زغال معدن تاهمور استرالیا (Aziz et al, 2010)، لایه‌های زغالی در جنوب شرق پنسیلوانیا در آمریکا (Ulery, 1988)، چندین معدن زغال در استرالیا (John Black, 2011) و معدن جیانگ جیاهه در چین (Liu et al, 2011) اشاره نمود. اما تاکنون تأثیر ماسرال‌ها در میزان انتشار و گاززدایی متان مدل‌سازی نشده است.

در این بخش سعی شده است تا با انجام آزمایشات نفوذپذیری، میزان تأثیر انواع ماسرال‌های زغال را در مقدار نرخ نفوذپذیری به دست آورده تا در فصول بعد بر اساس این نرخ محاسبه شده، تأثیر هر یک از ماسرال‌ها را بر روی میزان گاززدایی و متان انتشار یافته بررسی نمود.

۴-۴-۱- مطالعات میکروسکوپی

مطالعات میکروسکوپی به دو روش زیر انجام می‌شود:

۱- روش مقطع نازک^۱ : یا عبوردهندگی نور که به طور عمده در ایالات متحده امریکا مورد

استفاده قرار می گیرد.

۲- روش انعکاس نور^۲ : یا مطالعه بر روی مقاطع صیقلی که توسط اروپاییان ابداع و مورد استفاده

قرار می گیرد.

روش مقطع نازک برای مطالعات مورفولوژی مناسب است در حالی که روش انعکاس نور یا مقطع

صیقلی برای اندازه گیری مقدار ترکیب (اجزاء زغال) در اولویت است. به طور مثال، از روش مقطع

صیقلی برای اندازه گیری موارد زیر استفاده می شود:

۱- اندازه گیری ارزش حرارتی و FSI زغال

۲- در تعیین محصولات جانبی از زغال مانند کک، گاز و روغن سبک، ارزش حرارتی و چگالی

۳- گازهای قابل استحصال از زغال

۴- گروه بندی زغال (درجه بندی) بر اساس قابلیت های احتراقی

که با توجه به دو روش گفته شده در مطالعات میکروسکپی جهت شناسایی ماسرال ها، در

نام گذاری نیز اختلاف وجود دارد.

الف- مطالعات میکروسکپی به روش مقطع نازک (خاصیت عبوردهندگی نور)

روش مقطع نازک در سال ۱۹۳۰ توسط اداره معادن آمریکا توسعه داده شده است. یکی از این

کارشناسان به نام تایشن^۳ و همکارانشان مقطع نازکی از زغال به ضخامت ۵ تا ۱۰ میکرون از

مغزه هایی که از رخنمون کامل یک لایه زغال تهیه شده بودند را زیر میکروسکپ مورد مطالعه

قرار دادند و براساس مقدار نوری که از ترکیب عبور داده می شود، آنها را نام گذاری نمودند. بر اساس

¹ Thin Section

² Reflected- Light Technique

³ Thiessen

این مطالعات سه ترکیب در نمونه‌ها قابل شناسایی بودند که عبارتند از: آنتراکسیلون^۱ اتریئوس^۲ و فیوزین. اما این روش فراگیر نشد و علت آن صرف وقت زیاد جهت تهیه مقاطع نازک و تخصص بالائی که برای اجرا روش مورد نیاز می‌باشد، ذکر شده است (اصائلو، ۱۳۷۸).

ب- مطالعات میکروسکپی به روش انعکاس نور

مطالعات میکروسکپی مقاطع زغال سنگ به روش انعکاس نور اولین بار توسط وینتر^۳ در سال ۱۹۱۳ پیشنهاد شد اما چون کامل نبود و قادر به رقابت با روش مقطع نازک در کسب اطلاع دقیق از نمونه های زغال نبود، مورد توجه قرار نگرفت. در سال‌های بعد از آن اصلاحاتی در دو زمینه بر روی این روش به عمل آمد. ۱- امکان اثرگذاری بر روی نمونه‌ها ۲- امکان غوطه ور کردن نمونه در روغن. اما طبقه‌بندی زغال سنگ بر اساس انعکاس نور به نام ماری سی استاپ^۴ به ثبت رسید.

استاپ زغال سنگ را از نظر سنگ‌شناسی در چهار نوع ماسرال شناسایی نمود که عبارتند از:

(۱) ویتترین^۵ (۲) کلارین^۶ (۳) دیورین^۷ (۴) فیوزین^۸

در این تقسیم‌بندی زغال روشن، ویتترین و زغال تیره، کلارین و دیورین و زغال چوب فسیلی فیوزین نامیده شدند (محمودی، ۱۳۹۰). جدول (۴-۴) تقسیم‌بندی زغال به روش استاپ و بعضی از خواص سنگ‌شناسی آنها را نشان می‌دهد (International Standard ASTM , 1999). مطالعات میکروسکپی نشان داده است که ویتترین و فیوزین هم جنس و از ترکیبات یکسان برخوردارند در حالی که باندهای کلارین و دیورین نامتجانس و از ساختار و ترکیب متفاوت برخوردار هستند ،

¹ Anthraxylon

² Attritus

³ winter

⁴ Marie C. Stopes

⁵ Vitrin

⁶ Clarain

⁷ Durain

⁸ Fusain

(International Standard ISO 7404-3 2003) و به طور کلی به صورتی که در زیر آمده می‌توان

آنها را تعریف کرد :

۱- ویتترین: اصطلاح ویتترین به لایه‌های براق و نازک زغال‌سنگ که با چشم غیر مسلح قابل تشخیص‌اند، اطلاق می‌شود. قسمت اعظم ماسرال‌های تشکیل دهنده ویتترین، ویتترینیت‌ها هستند. ویتترین‌ها جلای درخشان دارند و خیلی شکننده‌اند و به هنگام لمس کردن آنها اثری بر روی انگشت باقی نمی‌ماند. زغال‌سنگ‌های ویتترین در زیر میکروسکوپ حالت آمورف دارند و دارای ساخت بسیار ریز به هم پیوسته هستند که این درزه‌ها معمولاً پرشدگی سطحی نشان می‌دهند.

۲-کلارین: اصطلاح کلارین در مورد لایه‌های نیمه براق زغال‌سنگ‌های هوموسی به کار می‌رود. کلارین از ویتترین تیره‌تر و حد فاصل بین زغال‌سنگ براق و مات است. قسمت اعظم کلارین نیز از ماسرال‌های ویتترینیتی همراه با کمی لیپتینیت تشکیل شده است. هر چقدر ویتترینیت‌ها در کلارین بیشتر باشند به همان نسبت زغال‌سنگ شفاف‌تر و درخشان‌تر شده و به ویتترین نزدیک می‌شود.

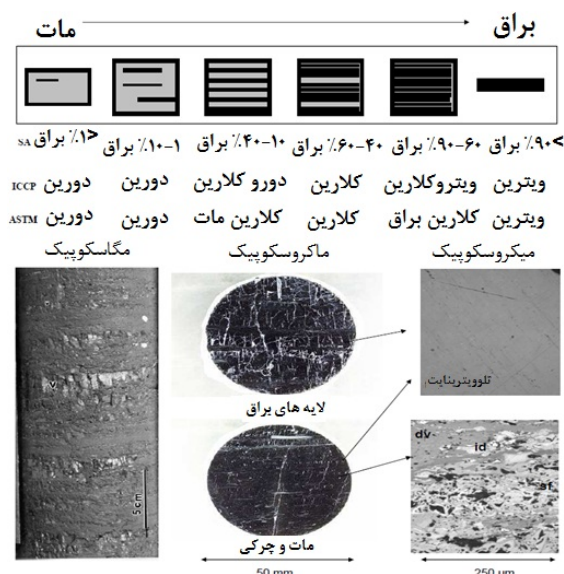
۳- دیورین: این اصطلاح در مورد باندهای مات زغال‌سنگ به کار می‌رود. از مشخصات دیورین سختی، فشردگی و مات بودن آن است و بافت مطبق در آن دیده نمی‌شود. مقطع و سطح شکست آن کاملاً صاف نیست بلکه دنداندار است. رنگ دیورین از مات با جلای چرب و خاکستری تا سیاه تغییر می‌کند. بخش اعظم ماسرال‌های تشکیل‌دهنده آن از گروه فوزینیت‌ها و لیپتینیت‌ها همراه با کانی‌های مختلف است. در نمونه دستی سیاه تا خاکستری متمایل به سربی است. در مطالعه میکروسکوپی، دیورین با زغال پرخاکستر و یا شیل‌های زغال‌دار قابل اشتباه است (Stach, 1982).

۴- فیوزین: این اصطلاح به باندهای سیاه با جلای ابریشمی موجود در زغال‌سنگ‌های هوموسی اطلاق می‌شود. قسمت اعظم فیوزین از ماسرال‌های گروه فوزینیت (اینرتینیت) تشکیل شده است. باندهای فیوزین در زغال‌سنگ، به زغال چوب شباهت دارد. این تیپ زغال نرم است و با دست به

آسانی خرد و پودر می‌شود. در مقاطع صیقلی در زیر میکروسکوپ، ساختار گیاهی آن به خوبی قابل رؤیت است. به هنگام خرد کردن زغال سنگ‌ها، فیوزین آنها زودتر خرد شده و باعث ایجاد گرد و غبار می‌شود (Han et al, 1999). شکل‌های (۴-۱۹) و (۴-۲۰) ماسرال‌ها را از حالت روشن تا تیره در بررسی ماکروسکپی و میکروسکپی نمایش می‌دهد (Schweinfurth, 2002).

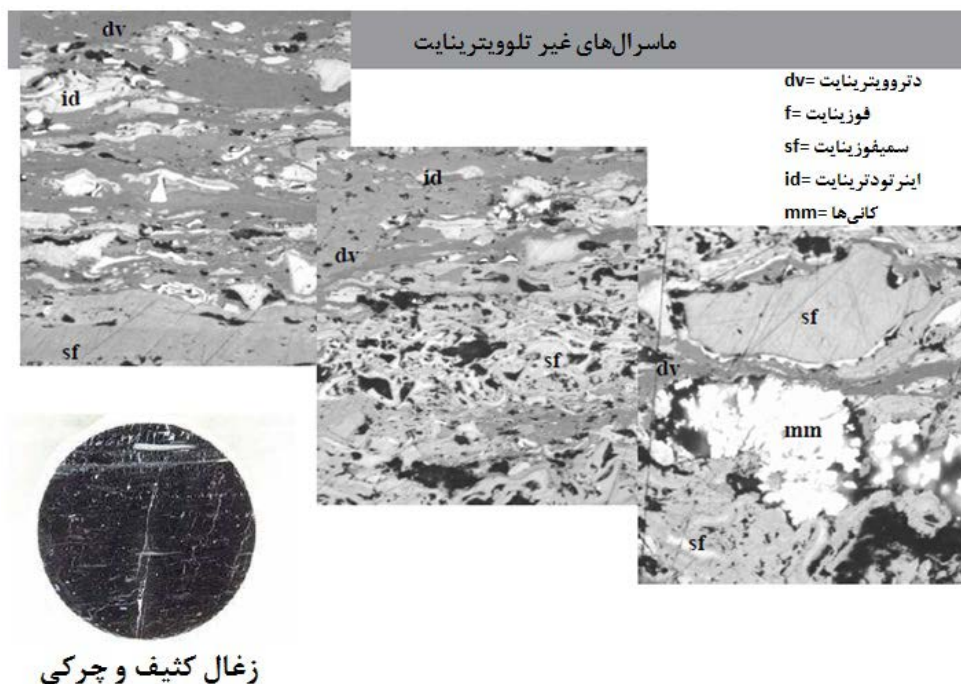
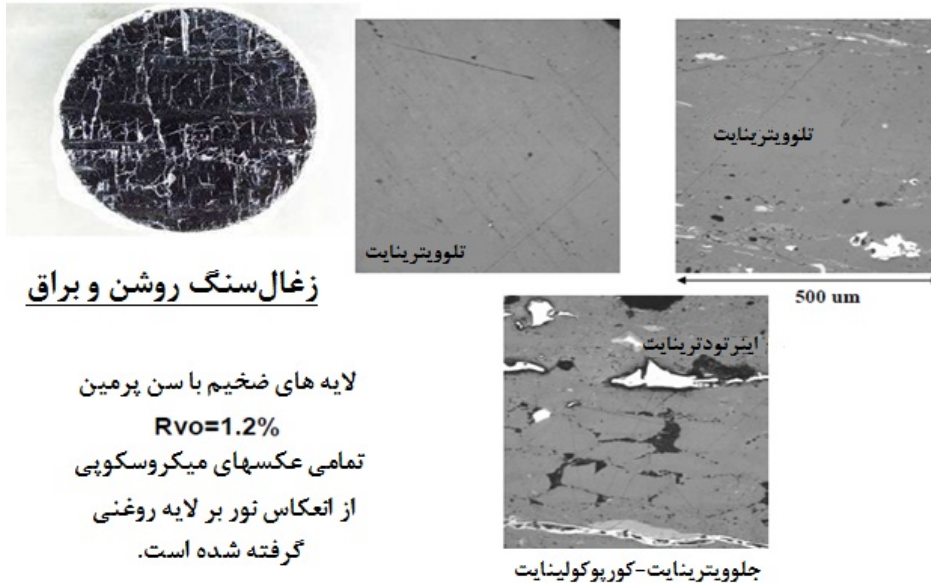
جدول ۴-۴- بعضی از خواص سنگ شناسی زغال به روش استاپ (International Standard ASTM, 1999).

نوع لیتوتایب	خواص ظاهری	جرم مخصوص gr/cm ³	خاکستر (%)	مواد فرار (%)	کربن ثابت (%)	ارزش حرارتی Kcal/Kgr	سختی نسبی
ویتترین	سیاه براق	۱/۳	۰/۵ - ۱	۳۵/۱	۶۴/۹	۱۴۴۳۸	۲
کلارین	لایه ای- ترکیبی از باندهای روشن و تیره	۱/۳	۰/۵ - ۲	۴۰/۳	۵۹/۷	۱۴۶۰۰	۳
دورین	تیره و فاقد نور عبوری- لایه بندی ضعیف	۱/۲۵ - ۱/۴۵	۱ - ۵	۵۳/۸	۴۶/۲	۱۵۳۷۱	۷/۵
فوزین	مشابه زغال چوب	نوع نرم ۱/۴۵ - نوع سخت ۱/۲۵ - ۱۰-۵ و بیشتر به بالا	۵ - ۱۰	۶/۵	۹۰/۵	۱۵۶۳۲	۱



شکل ۴-۱۹- اجزاء قابل رؤیت باندهای بیتومینی در بررسی میکروسکپی و ماکروسکپی (Schweinfurth, 2002)

خصوصیات در مقیاس میکروسکوپی



شکل ۴-۲۰- نمایش میکروسکوپی باندهای روشن و تیره (Schweinfurth, 2002)

بعدها استاپ در کنگره بین‌المللی پترولوژی زغال در هرلن^۱ هلند پیشنهاداتی ارائه نمود که تا حدودی نام‌گذاری فعلی اجزاء زغال برآن اساس می‌باشد، که به روش S-H که مخفف استاپ – هرلن می‌باشد شهرت دارد. در این روش، علاوه بر برداشت‌های میکروسکوپی از نمونه‌ها، میزان هم جنس بودن اجزاء تشکیل‌دهنده زغال نیز در نام‌گذاری مؤثرند که با توجه به این دو عامل اجزاء تشکیل‌دهنده زغال را ماسرال و زغال با توجه به ماسرال‌های مختلف، نوعی سنگ تلقی شد.

براساس روش S-H سه گروه ماسرال شناسایی و نام‌گذاری که عبارتند از: ویتترینایت^۲، اگزینایت^۳ و اینرتینایت^۴. با توجه به سه گروه یاد شده هرکدام شامل چندین زیر گروه می‌باشند.

نام‌گذاری به روش S-H در جدول (۴-۵) ارائه شده است. ویتترین و فیوزین تک ماسرال‌اند (تنها یک ماسرال دارند). ویتترین تنها از گروه ویتترینایت و فیوزین از اینرتینایت یا فیوزینات تشکیل شده‌اند اما ماسرال‌های دیگر نیز به مقدار کم در ترکیب موجود هستند و بر مبنای پیشنهادات ماری استاپ امکان تشابه در نام‌گذاری وجود دارد و تنها باید هماهنگی کلی بین آنها به وجود آید (محمودی، ۱۳۹۰).

جدول ۴-۵- روش پیشنهادی استاپ- هرلن جهت نام‌گذاری ترکیبات زغال (محمودی، ۱۳۹۰).

میکروسکوپی		ماکروسکوپی
زیرگروه ماسرال	گروه ماسرال	لیتولوژی
کلی نایت و تلی نایت	ویتترینایت	ویتترین
کلی نایت و تلی نایت، اسپورنایت، کوتی نایت، آلگی نایت، واکس رزین	عمدتاً ویتترینایت و به مقدار کم حاوی اگزینایت و اینرتینایت	کلارین
فیوزینایت، میکرونایت، اسکروینایت و نیمه فیوزینایت، کلی نایت و تلی نایت، اسپورینایت، اکوتینایت، آلگی نایت، واکس و رزین	عمدتاً شامل اینرتینایت و به مقدار کم ویتترینایت و اگزینایت	دیورین
فیوزینایت	اینرتینایت	فیوزین

¹ Hearlen

² Vittrinite

³ Exinite

⁴ inertinite

۴-۲- قابلیت انعکاس نوری زغال سنگ‌ها

این روش بر اساس خاصیت براقیت و درخشندگی ماسرال کولینایت^۱ از گروه ویتترینیت زغال سنگ‌ها استوار است. ثابت شده است که با افزایش درجه زغال‌شدگی یا متامورفیسم زغال به براقیت ویتترینیت افزوده می‌شود. یعنی قابلیت انعکاس نوری ویتترینیت افزایش می‌یابد (Bunch, 2008).

بر این اساس روشی جهت تعیین درجه زغال‌شدگی یا درجه متامورفیسم زغال ابداع شده است که با اندازه‌گیری قابلیت انعکاس نوری ویتترینیت عملی است. برای تعیین قابلیت انعکاس نوری از میکروسکپ‌های مجهز به فتوسل و گالوانومترهای دیجیتال استفاده می‌شود.

بر اساس قابلیت انعکاس نوری طبقه‌بندی برای زغال‌های آلمان صورت گرفته است:

زغال شعله بلند	٪ ۰/۶۶
گازدار شعله بلند	٪ ۰/۸۵-۰/۶۶
گازدار	٪ ۰/۸۵-۱/۱۴
چرب	٪ ۱/۵۳-۱/۱۴
کک ده	٪ ۱/۸۶-۱/۵۳
لاغر	٪ ۲/۲۲-۱/۸۶
آنتراسیت	٪ ۲/۲۲

قابلیت انعکاس مشخص کننده قدرت انعکاس، به ترتیب در زغال‌های با درجه پایین و آنتراسیت می‌باشند (اسدالله‌زاده، ۱۳۷۰).

¹ Collinite

۴-۳- انواع زغال سنگ ها از نظر تعداد ماسرال

زغال سنگ ها با توجه نوع ماسرال های تشکیل دهنده به گروه های متفاوت از نظر سنگ شناسی طبقه بندی می کنند:

الف - زغال سنگ های تک ماسرالی

اینرتیت

فوزینیت

لیپتینیت

ب - زغال سنگ های دو ماسرالی

کلاریت: زغال سنگ کلاریت از دو نوع ماسرال ویتترینیت و لیپتینیت تشکیل شده است. ویتترینیت ها سهم بیشتری در تشکیل این نوع زغال دارند. دوریت: حدود ۹۵ درصد ترکیب دوریت از دو ماسرال اینرتینیت و لیپتینیت تشکیل شده است. ویترااینرتیت : ترکیب اصلی این زغال سنگ از دو ماسرال اینرتینیت و ویتترینیت است. در درجات بالای زغال شدگی مقدار ماسرال اینرتینیت کمتر می شود (Tayler, 1967).

ج - زغال سنگ های سه ماسرالی

دیورودکلاریت: این زغال سنگ از ترکیب سه ماسرال ویتترینیت، لیپتینیت و اینرتینیت تشکیل شده است. اما در ترکیب آن ماسرال های ویتترینیت از دو ماسرال دیگر بیشتر است. کلارودیوریت: این زغال سنگ از سه ماسرال ویتترینیت، اگزینیت و اینرتینیت تشکیل شده است. اما در ترکیب این زغال سنگ ماسرال های اینرتینیت از دو ماسرال دیگر بیشتر است. ویترااینرتولپیتیت: این زغال سنگ از سه ماسرال ویتترینیت، اگزینیت و اینرتینیت تشکیل شده است. اما در ترکیب این زغال سنگ ماسرال های لیپتینیت دو ماسرال دیگر بیشتر است.

کربومینریتیت: نوعی زغال سنگ است که ۲۰ تا ۶۰ درصد حجمی آن از سیلیکات‌ها و یا کربنات‌ها تشکیل شده و یا ۲۰ تا ۵۵ درصد حجمی آن را سولفیدها تشکیل داده باشند (ISO, International Standard, 2003).

۴-۴-۴- ماسرال‌ها و ارتباط آنها با زغال سنگ

شناخت ماسرال‌ها می‌تواند در میزان گاز منتشر شده از زغال و همچنین، نحوه اجرا و بازدهی عملیات مؤثر واقع شود. در زیر به نوع و خواص ماسرال‌ها که در آماده‌سازی زغال مؤثر هستند، اشاره خواهد شد.

ویترینایت: ویترینایت فراوان‌ترین و مهم‌ترین گروه از ماسرال‌ها در زغال‌سنگ‌های بیتومینوس است که دارای درزه و شیارهای شیب‌دار است. ویترینایت در زیر میکروسکوپ شکاف‌هایی را نشان می‌دهد که در اثر انقباض و عوامل تکتونیکی به وجود آمده‌اند. تحت تأثیر فشارهای تکتونیکی میزان درزه و شکاف در ویترینایت نیز افزایش قابل محسوسی را نشان می‌دهد، که این امر در قابلیت شکنندگی و خردایش زغال سنگ بسیار مؤثر است (Leonard and Joseph, 1979).

آلپرن^۱ که شاخص شکنندگی^۲ زغال سنگ‌ها را ارائه داده معتقد است که شکنندگی زغال به مقدار ویترینایت موجود در زغال بستگی دارد. دانسیته ویترینایت بسته به میزان متامورفیسم بین ۱/۳ تا ۱/۸ متغیر است. سختی آن با افزایش درجه متامورفیسم تا ۱۵ درصد کاهش پیدا خواهد کرد. در مقایسه با اگزینایت، ویترینایت از شکنندگی زیادتری برخوردار است. تحت فشار درزه‌ها و شکاف‌های موجود در ویترینایت به راحتی نمونه را به ابعاد مکعبی، مکعب مستطیلی تا ابعاد بسیار ریز تبدیل می‌کند. مقاومت فشاری آن نیز به درجه متامورفیسم و مقدار مواد فرار بستگی دارد. مقدار آن در زغال بیتومینوس با مواد فرار کم، زیاد و با افزایش مواد فرار کاهش می‌یابد. در بیشتر موارد

^۱ Alpern

^۲ Fragility Index

تشخیص بین تلی نایت و کلی نایت با ماسرال ویتروینایت بسیار دشوار است و غالباً آنها را جزء ویتروینایت محسوب می کنند. ضمن آنکه تلی نایت خالص نیز نادر می باشد (اصانلو، ۱۳۷۸).

اسپورنایت: اسپورنایت سبکترین ترکیب زغال محسوب می شود. دانسیته آن با افزایش درجه متامورفیزم افزایش پیدا می کند و برای زغال بیتومینوس بسته به درجه متامورفیزم بین ۱/۱۸ تا ۱/۲۸ متغیر است. از نظر سختی مشابه ویتروینایت می باشد. مهمترین خاصیت اسپورنایت سفتی آن است که قابل قیاس با خاصیت شکنندگی ویتروینایت است.

کوتینایت: به طور کلی در زغال قهوه‌ای و زغال بیتومینوس به عنوان ماسرال فرعی مشاهده می شود. از نظر خواص فیزیکی مشابه اسپورینایت می باشد.

رزینات: رزینات در زغال بعضاً به دلیل ریز بودن به صورت پراکنده ظاهر می شود اما بعضاً به صورت لایه‌ای نیز دیده می شود. شکل رزینایت کروی، تخم مرغی یا دوکی است. از نظر سختی مشابه ویتروینایت است.

آلگینایت: آلگینایت در همه زغال سنگ‌ها مشاهده نمی شود و تنها در زغال سنگ‌های با سن پالئوزوئیک دیده شده است. آلگینایت دارای سختی زیاد اما دانسیته کم است (Bustin et al, 1983).
فیوزینایت: فیوزینایت از نظر کربن بسیار غنی است و در همه نوع زغال مشاهده می شود و منشأ آن زغال چوب می باشد.

در پیت، زغال قهوه‌ای و بیتومینوس مقدار آن متغیر است. در کل مقدار فیوزینایت در پیت و زغال قهوه‌ای به مراتب کمتر از زغال سنگ‌های سخت می باشد. فیوزینایت بسیار سخت و دانسیته آن ۱/۵ است. افزایش متامورفیزم تأثیر کمی در خاصیت فیوزینایت دارد (International Standard, 1999).

نیمه فیوزینایت: سختی نیمه فیوزینایت کمتر از فیوزینایت است از نظر خواص نیمه فیوزینایت ما بین فیوزینایت و تلی نایت قرارداد و دانسیته آن بین ۱/۳۵ تا ۱/۴۵ متغیر است.

میکرینایت: میکرینایت دارای شکل گرد و دانه‌های بسیار ریز در حد یک میکرون است و معمولاً در میان ویتترینایت و کلی‌نایت قرار دارد و به سختی سایر ماسرال‌ها نیست.

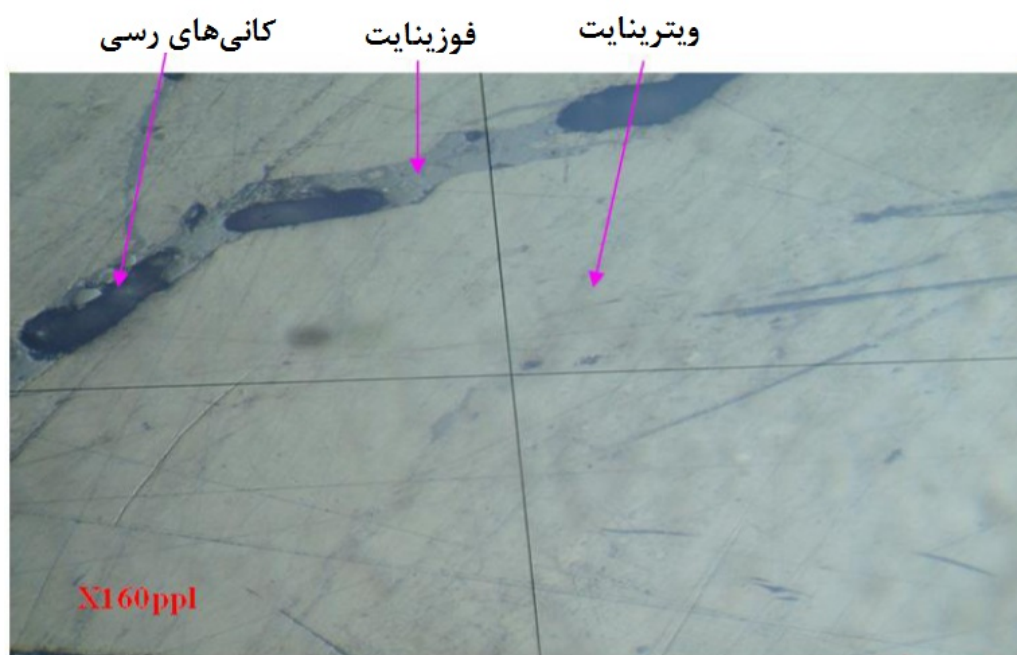
مک‌کیب^۱ در مطالعات خود نشان داد که قدرت مورد نیاز جهت شکستن فیوزین بسیار ناچیز و با کمترین نیرو شکسته خواهد شد در حالی که ویتترین به دو برابر قدرت مورد نیاز فیوزین، کلارین به ۳ برابر و دیورین به ۷/۵ برابر قدرت نیاز دارد (اصانلو، ۱۳۷۸).

شکل‌های (۲۱-۴) و (۲۲-۴) مقاطع میکروسکوپی، سه نوع ماسرال فیوزینیت و اینرتینیت و اگزینیت همچنین کانی‌های رسی را که به عنوان خاکستر، همراه با زغال می‌باشند، نشان داده شده است.



شکل ۴-۲۱- نمایش میکروسکوپی ماسرال‌های ویتترینایت و فیوزینیت و اینرتینیت (Schweinfurth, 2002)

¹ Mc Cabe

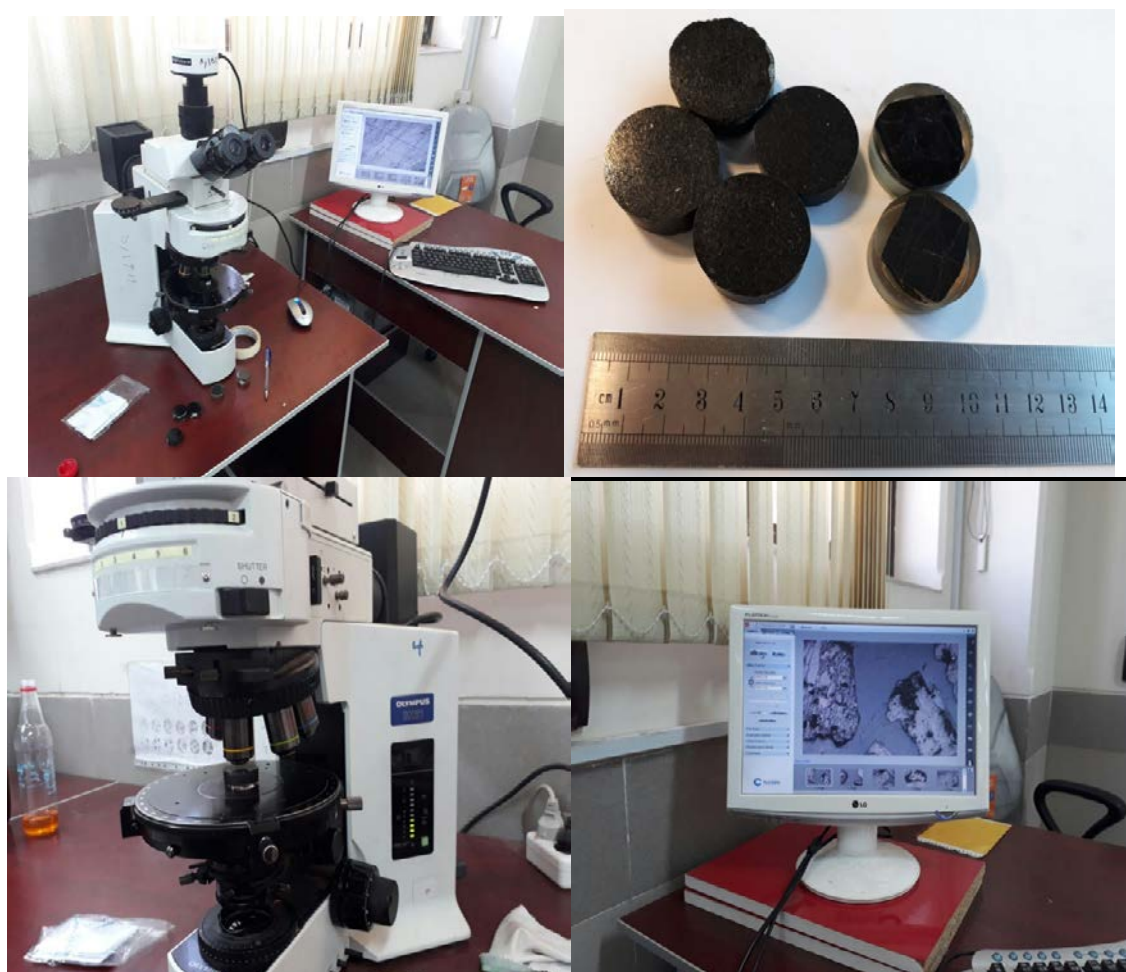


شکل ۴-۲۲- نمونه زغال حاوی ویترینایت، فوزینایت و کانی های رسی (یزدی و همکاران، ۱۳۸۷)

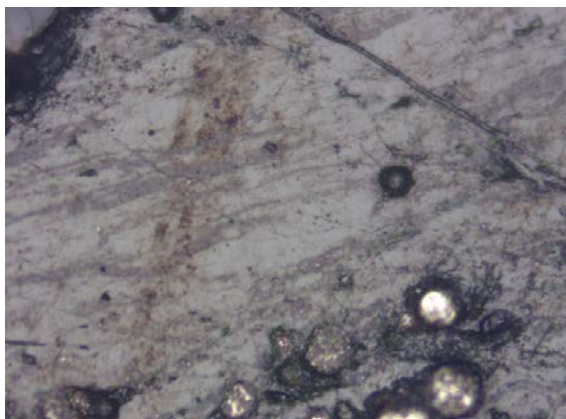
۴-۴-۵- تعیین نفوذپذیری زغال سنگ با توجه به ماسرال های آن

سهولت عبور جریان سیال از داخل حفره های سنگ ها (زغال سنگ) را نفوذپذیری می نامند. مقدار نفوذپذیری به اندازه حفره ها، ویسکوزیته سیال و نیروی کششی که با کاهش اندازه دانه ها کم می شود، کمترین میزان تراوایی لازم برای عمل گاززدایی لایه های زغال ۵ میلی دارسی است (Robert 2002). در ایران بزرگترین معادن زغال سنگ در بخش های شرقی، شمال شرق و جنوب شرق کشور قرار دارند که بزرگترین آن معادن پروده طبس می باشد. برای تعیین نفوذپذیری، مجموعاً ۲۵ نمونه برداشت شد که تعداد ۷ نمونه آن انتخاب گردیده و مورد بررسی قرار گرفت. نمونه های جمع آوری شده از مناطق بکر و دست نخورده جمع آوری شدند. ابتدا نمونه ها مورد شناسایی قرار گرفته تا ماسرال های آن تشخیص داده شود. بدین جهت ابتدا از آنها مقاطع صیقلی تهیه شده و توسط میکروسکوپ نوری در آزمایشگاه پترولوژی در آزمایشگاه مرکزی دانشگاه صنعتی شاهرود از نمونه ها عکس برداری شد. پس از آن، از طریق بازبینی عکس ها نسبت به تعیین میزان ماسرال های موجود در

زغال پرداخته شد (شکل ۴-۲۳). نتایج مربوط به تعیین نوع ماسرال های نمونه ها در جدول ۴-۶ نشان داده شده است. همچنین، تصاویر میکروسکوپی ماسرال های نمونه زغال ها در شکل ۴-۲۴ نشان داده شده است.



شکل ۴-۲۳- عکسبرداری از مقاطع نازک تهیه شده از زغال- آزمایشگاه پترولوژی دانشگاه صنعتی شاهرود



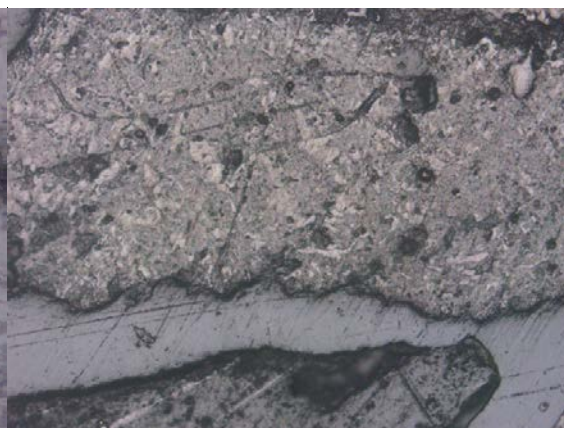
ویترینایت به همراه ذرات پیریت



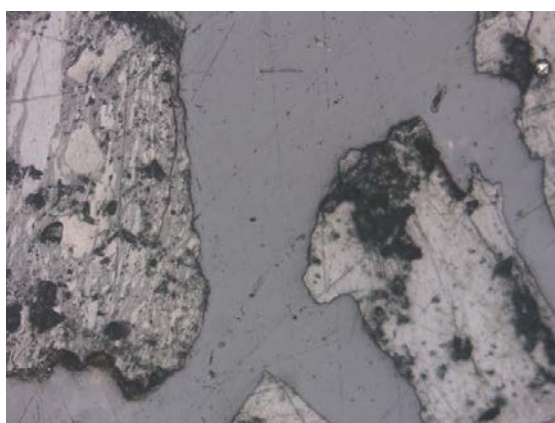
ویترینایت



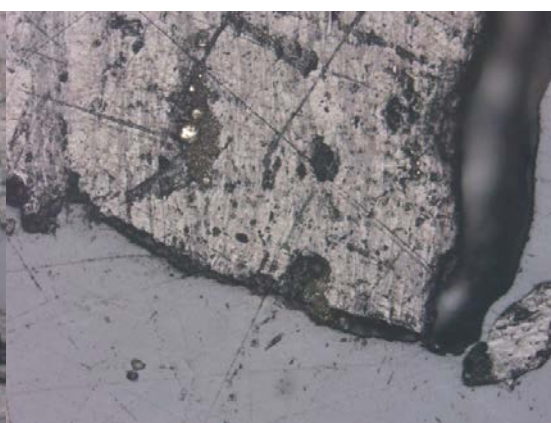
ویترینایت به همراه اینترتینایت



خاکستر زغال



ویترینایت و اینترتینایت



اینترتینایت به همراه ذرات پیریت

شکل ۴-۲۴- ماسرال‌ها و مواد معدنی موجود در یک نمونه زغال سنگ پروده طبس

جدول ۴-۶- نتایج حاصل از آزمایش‌های ماسرالی نمونه‌ها

شماره نمونه	ویترینایت (%)	اینرتینایت (%)	پیریت (%)	کربنات (%)	فضای خالی (%)	جمع (%)
۱	۸۲/۱	۷/۴	۳/۵	۲/۳	۴/۷	۱۰۰
۲	۷۸/۹	۱۱/۷	۲/۸	۲/۲	۴/۴	۱۰۰
۳	۷۵/۶	۱۶	۲/۹	۲/۲	۳/۳	۱۰۰
۴	۷۹/۴	۱۰/۸	۲/۷	۲/۸	۴/۳	۱۰۰
۵	۷۹/۸	۱۰/۲	۲/۲	۳	۴/۸	۱۰۰
۶	۸۱/۳	۱۱	۲/۶	۲/۱	۳	۱۰۰
۷	۸۳/۴	۱۱/۲	۲/۴	۱/۴	۱/۶	۱۰۰
میانگین	۸۰/۰۷	۱۱/۱۸	۲/۷۲	۲/۲۸	۳/۷۲	۱۰۰

بر اساس آزمایش‌های صورت گرفته، میزان ویترینایت معادن پروده حدود ۸۰ درصد بوده و میزان اینرتینایت هم برای معدن فوق ۱۱/۱۸ به دست آمد.

تحقیقات نشان داده است که ماسرال های زغال در مناطقی که از نظر شرایط تشکیل زغال و زمین شناسی شبیه به هم می باشند دارای ماسرال های با درصد نزدیک به هم هستند (Hower et al, 2012).

زغال‌های با ویترینایت بیشتر در مناطقی که فروپاشی شدید بافت های بنیادین و بافت های چوبی ساقه و برگ‌ها و ژله‌ای شدن محلول درون چوب‌ها رخ داده ایجاد می‌شوند در حالی که گروه ماسرالی اینرتینیت از دیواره‌های سلولی لیگنوسلولزی و بافت‌های قارچی و بافت‌های چوبی ساقه‌ها، گیاهان علفی و برگ‌ها و متابولیسم جلبک‌ها ایجاد می‌شوند

(Taylor et al, 1997; ICCP, 2007; Glasspool and Scott, 2001).

۴-۴-۶- نتایج آزمایش نفوذپذیری

در پدیده‌هایی همچون انفجار گاز و گاززدایی، نفوذپذیری نقش بسیار مهمی در تخمین فشار، توزیع تنش‌های کششی و میزان گازخیزی دارد. نفوذپذیری یکی از خواص مواد است که به صورت جریان سیال در نتیجه گرادیان فشار وارد بر جسم در امتداد سطح آن تعریف می‌شود. نفوذپذیری به طور معمول به توانایی لایه زغالی در انتقال گاز تحت تأثیر فشار آن اطلاق می‌شود

(Lama et al, 1996). زغال سنگ به طور طبیعی دارای ناپیوستگی‌هایی است که این ناپیوستگی‌ها تأثیر زیادی بر نفوذپذیری آن دارد. از طرفی تنش‌های موجود در منطقه نیز، مؤثرترین عامل بر نفوذپذیری زغال سنگ به شمار می‌آید. همچنین، با افزایش عمر زغال سنگ، ریز درزه و کلیت‌های آن‌ها تحت تأثیر تنش‌های موجود نیتروژنر شده نتیجتاً نفوذپذیری افزایش می‌یابد که با توجه به سن بالای زغال سنگ‌های ویتربایت دار که بیشتر تحت تنش قرار گرفته‌اند نفوذپذیری آن‌ها نیز بیشتر است. انتشار گاز در زغال سنگ‌های با نفوذپذیری بالاتر، نرخ رهایش بالاتری دارد (Gamson and Beamish, 1992).

روش‌های مختلفی برای تعیین نفوذپذیری زغال سنگ وجود دارد. در این تحقیق، آزمایش نفوذپذیری به وسیله دستگاه AGP انجام شد. مؤلفه‌های تشکیل دهنده دستگاه شامل محفظه فشار، جریان سنج و نیروسنج است. مراحل انجام آزمایش شامل قرار گرفتن نمونه داخل محفظه فشار، اجازه ورود گاز به داخل محفظه و خروج آن از سوراخ میانی تعبیه شده بر روی نمونه زغال است. بدین منظور نمونه‌های برداشت شده پس از خارج شدن از کارگاه استخراجی درون محفظه‌ای که مانع از خروج رطوبت از نمونه‌های زغال گردد، نگهداری می‌شود (شکل ۴-۲۵). پس از انتقال نمونه‌ها به آزمایشگاه مجهز انیستیتو نفت پردیس دانشکده‌های فنی دانشگاه تهران، ابتدا از آنها مغزه‌ای با قطر ۳۷ و طول ۵۰ میلی‌متر تهیه نموده و دوباره مغزه‌های به دست آمده را در محفظه‌ای قرار داده تا ساختار درزه‌ها و میزان نفوذپذیری آنها تغییر نکند (شکل ۴-۲۶).



شکل ۴-۲۵- نمونه های زغالی آماده شده از معدن زغال سنگ طبس

جهت محاسبه نرخ نفوذپذیری نمونه های زغالی، مغزه های آماده شده را به پژوهشکده مهندسی نفت پژوهشگاه صنعت نفت منتقل نموده و آنها را درون دستگاه AGP که در فصل قبل توضیح داده شده قرار داده و فشار گاز متان را در دو محدوده متفاوت ۱ و ۲ مگاپاسکال تنظیم نموده تا بتوان میزان نفوذپذیری را برای نمونه های زغالی محاسبه نمود (شکل ۴-۲۷).

برای بررسی نفوذپذیری نمونه های زغالی منطقه مورد مطالعه، نفوذپذیری نمونه ها تحت بارگذاری تک محوره ثابت تعیین و نتایج در جدول ۴-۷ ارائه شده است.



شکل ۴-۲۶- مراحل تهیه مغزه از نمونه های زغال، انیستیتو نفت پردیس دانشکده های فنی دانشگاه تهران

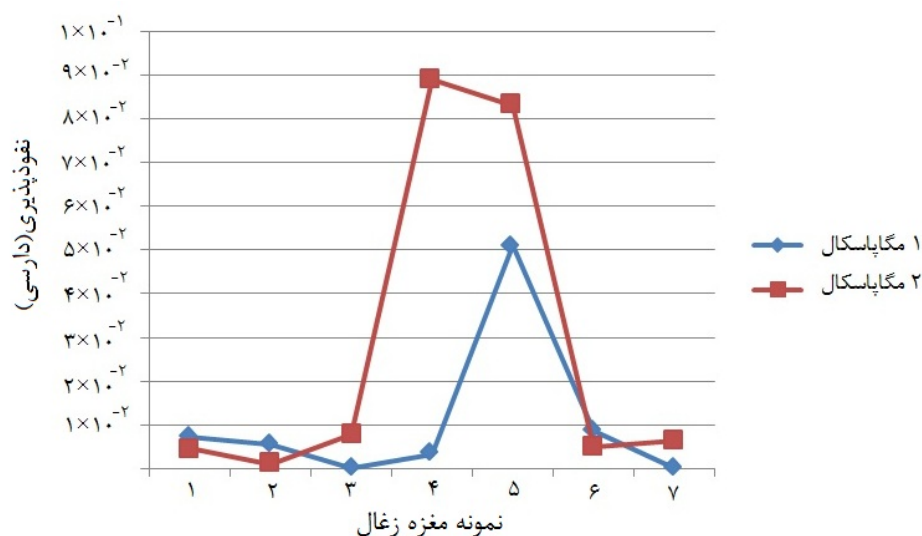


شکل ۴-۲۷- دستگاه تعیین نرخ نفوذپذیری AGP، آزمایشگاه مهندسی مخزن پژوهشکده مهندسی نفت پژوهشگاه صنعت نفت

جدول ۴-۷- نفوذپذیری (دارسی) نمونه های زغال سنگ پروده برای گاز زغال (متان) تحت بارگذاری محوری ثابت

فشار گاز (مگا پاسکال)	۱/۰	۲/۰
نمونه ۱	$7/3 \times 10^{-3}$	$4/7 \times 10^{-3}$
نمونه ۲	$5/5 \times 10^{-3}$	$1/1 \times 10^{-3}$
نمونه ۳	$1/2 \times 10^{-4}$	$7/8 \times 10^{-3}$
نمونه ۴	$3/4 \times 10^{-3}$	$8/9 \times 10^{-2}$
نمونه ۵	$5/1 \times 10^{-3}$	$8/3 \times 10^{-2}$
نمونه ۶	$8/7 \times 10^{-3}$	5×10^{-3}
نمونه ۷	1×10^{-4}	$6/5 \times 10^{-3}$
میانگین	$1/09 \times 10^{-2}$	$2/82 \times 10^{-2}$

همانگونه که در جدول ۴-۷ مشاهده می شود، در فشارهای مختلف گاز در محفظه فشار، نفوذپذیری نمونه زغال سنگ پروده به طور میانگین در حدود ۲۰ میلی دارسی می باشد که با توجه به نتایج پتروگرافی، نمونه زغال سنگ پروده دارای پیریت و اینرتینایت کم و ویتترینایت بالا می باشد می - توان به این نتیجه رسید که در زغال هایی که دارای ویتترینایت بالاتری نسبت به دیگر ماسرال های زغال می باشد نرخ نفوذپذیری بیشتری در این زغال ها مشاهده نمود (شکل ۴-۲۸).



شکل ۴-۲۸- نفوذپذیری محاسبه شده برای نمونه های زغال طبس در دو فشار متفاوت

۴-۴-۷- تخلخل نمونه های معدنی زغال طبس

همان طور که گفته شد، تخلخل عبارت است از تمام خلل و فرج های موجود در رسوب یا سنگ که به دو صورت کل یا موثر بیان می شود. تخلخل کل^۱ شامل تمام منافذ موجود در رسوب یا سنگ است که از نسبت حجم حفره های موجود در سنگ به حجم کل سنگ به دست می آید و آن را به درصد بیان می کنند. تخلخل موثر یا مفید^۲ شامل حفره های متصل به هم است که قادر است مایعات را از خود عبور دهد. این تخلخل از نسبت حجم حفره های متصل به هم به حجم کل سنگ به دست می آید. لازم به ذکر است که در سنگ حفره هایی وجود دارد که قادر نیستند مایعات را از خود عبور دهند. این حفره ها به نام تخلخل غیر مفید نامیده می شود و از تفاضل تخلخل مفید از تخلخل کل بدست می آید.

۴-۴-۸- طبقه بندی تخلخل

تخلخل ها را بر مبنای مختلفی همچون اندازه حفره ها و زمان تشکیل آنها طبقه بندی می کنند. در طبقه بندی بر مبنای اندازه حفره ها، تخلخل ها را به دو نوع ماکروسکوپی و میکروسکوپی تقسیم می کنند. در تقسیم بندی بر مبنای زمان تشکیل خلل و فرج موجود در سنگ یا رسوب، تخلخل را به انواع اولیه و ثانویه تقسیم می کنند.

۴-۴-۹- انواع تخلخل بر مبنای اندازه

الف- تخلخل ماکروسکوپی

در این تخلخل قطر منافذ از ۸ میکرون بیشتر است. در این منافذ، آب و مواد محلول دائماً و به آسانی جریان پیدا می کنند و حرکت آنها تابع نیروی جاذبه می باشد. منافذ موجود در این نوع تخلخل در اثر انحلال مواد عملکرد فشارهای تکتونیکی و یا شکستگی های ناشی از خشک شدن سنگ و

¹ Total Porosity

² Effective Porosity

رسوب به وجود می‌آیند. در رسوب‌های آبرفتی و در سنگ‌های با قابلیت انحلال زیاد (مثل آهک) به فراوانی قابل مشاهده هستند. شکستگی‌های ناشی از عمل کوهزایی یا انحلال آهک و رسوبات تبخیری حفره‌ها و مجاری قابل عبور مواد سیال را فراهم می‌کنند. در نتیجه، آب و نفت در آنها جریان پیدا می‌کنند. اگر طبقات بالا و پایین آن غیر قابل نفوذ باشند، مخازن بزرگ آب و نفت در چنین سنگ‌هایی حاصل می‌شود.

ب- تخلخل میکروسکوپی

در تخلخل میکروسکوپی قطر منافذ کوچکتر از ۸ میکرون می‌باشد. در این منافذ، آب و یا سایر سیالات به آسانی نمی‌توانند حرکت کنند. لذا در این نوع منافذ نیروی جاذبه در عبور و جریان مایعات موثر نیست و حرکت مایعات در این منافذ تابع قانون لوله‌های موئین می‌باشد. تخلخل میکروسکوپی در رسوبات رسی فراوان است. این رسوبات طبقات غیر قابل نفوذ هستند و آب را در منافذ کوچک خود جای داده و به زحمت آن را از دست می‌دهند. در واقع تخلخل موجود در رسوبات رسی از نوع غیر مفید بوده و منافذ و حفره‌های موجود در آنها به هم راه ندارند.

۴-۴-۱۰- عوامل موثر در تخلخل اولیه

الف- اندازه دانه

هر قدر اندازه دانه‌ها کاهش یابد، مقدار تخلخل زیاد ولی نفوذپذیری کم می‌شود. با افزایش اندازه دانه‌ها مقدار تخلخل مفید افزایش یافته و نفوذپذیری زیاد می‌گردد. زیرا در رسوبات دانه ریز، مجاری متصل کننده حفره‌ها بسیار کوچک است و فشار موئینه زیاد در دیوارهای این مجاری مانع عبور مایعات می‌شود.

ب- جور شدگی

هر قدر جورشدگی بهتر باشد تخلخل و نفوذپذیری زیادتر خواهد بود، زیرا در سنگ‌هایی که دارای جورشدگی بد هستند ذرات دانه ریز یا ماتریکس بین دانه درشت را پر می‌کنند و تخلخل و نفوذپذیری را کاهش می‌دهند.

ج- شکل دانه‌ها

اگر دانه‌ها دارای گردشدگی و کرویت خوبی باشند، طرز قرار گرفتن آنها به نحوی است که نزدیک‌تر بهم قرار می‌گیرند (آرایش متراکم) و مقدار تخلخل و نفوذپذیری را کاهش می‌دهد. لذا دانه‌هایی که کمی زاویه‌دار باشند برای تخلخل اولیه بهتر می‌باشند.

د- اثر فشار بر تخلخل

پس از پوشیده شدن رسوب به وسیله طبقات بالایی تخلخل در اثر سخت شدن و تراکم کاهش می‌یابد. افزایش زمان عمل، دیاژنز و تراکم به عنوان عوامل اصلی کم کننده تخلخل می‌باشند. اثر فشار بر روی رسوبات رسی تأثیر زیادی گذاشته و میزان تخلخل اولیه در هنگام رسوب‌گذاری را به مقدار زیادی کاهش می‌دهد. رسوبات ماسه‌ای با تخلخل اولیه خیلی کمتری از رس‌ها ته نشین می‌شوند. ولی در اثر افزایش فشار و ایجاد تراکم، تخلخل اولیه آنها کاهش چندانی نمی‌کند. در ماسه‌ها کاهش تخلخل در اثر پدیده سیمانی شدن و دیاژنز انجام می‌گیرد.

۴-۴-۱۱- محاسبه تخلخل نمونه زغال

تخلخل زغال نیز در فرآیند حرکت مولکول‌های گاز متان درون آن تأثیر داشته و در مراحل اکتشاف زغال مورد مطالعه قرار می‌گیرد می‌بایست این پارامتر نیز برای نمونه های زغال مشخص گردد. جهت این منظور نمونه‌ها را پس از آماده‌سازی و تهیه مغزه‌های استاندارد در انیستیتو مهندسی نفت پردیس دانشکده‌های فنی دانشگاه تهران درون دستگاه پروپرم قرار داده و تخلخل آنها با آزمایش

مربوطه محاسبه شد (شکل ۴-۲۹). در این آزمایش، تعداد ۵ مغزه تهیه شده را مورد آزمایش قرار داده که نتایج محاسبه شده از تخلخل ۴ نمونه زغالی در جدول شماره ۴-۸ نشان داده شده است. یکی از نمونه‌ها به علت داشتن درزه و ترک نامتعارف درون مغزه و یا دلایل دیگر، میزان تخلخل را بیش از آنچه که پیش‌بینی می‌شود نشان داده که به عنوان داده نادرست از نتایج حذف گردید.



شکل ۴-۲۹- دستگاه پروپرم، انیستیتو مهندسی نفت پردیس دانشکده‌های فنی دانشگاه تهران

جدول ۴-۸- تخلخل محاسبه شده از طریق دستگاه پروپرم، انیستیتو مهندسی نفت پردیس دانشکده‌های فنی دانشگاه تهران

شماره نمونه	تخلخل (درصد)
نمونه ۱	۴۰
نمونه ۲	۳۵
نمونه ۳	۶۰
نمونه ۴	۴۵

۴-۴-۱۲- جمع بندی بخش سوم

نتایج حاصل از انجام آزمایش تعیین میزان نفوذپذیری و تخلخل نمونه های زغالی را می توان به صورت ذیل بیان نمود:

- نمونه زغال دارای ویتروینایت بیشتر دارای نفوذپذیری بالاتری بوده و مولکول های گاز متان درون این نمونه دارای سرعت بیشتری در هنگام انتشار نسبت به نمونه دارای ویتروینایت کمتر می باشد.

- براساس نوع زغال، از آنجائی که زغال شدگی بیشتر باعث افزایش میزان گاز متان می - باشد می توان نتیجه گرفت آنتراسیت با ویتروینایت بالا بهترین زغال جهت گاززدایی متان می باشد.

- به همین ترتیب آنتراسیت با ویتروینایت کمتر دارای گاز متان بالا و نفوذپذیری کمتر بوده و احتمال انفجار حاصل از گازهای محبوس را درون زغال افزایش می دهد.

در این فصل در مورد معدن زغال سنگ طبس و نوع زغال آن بحث شد. سپس به خصوصیات فیزیکی زغال سنگ پرداخته و میزان تخلخل، نفوذپذیری ، نوع ماسرال و تاثیر ماسرال بر میزان نفوذپذیری پرداخته شد. در فصل بعدی در مورد میزان فاصله داری درزه های اصلی زغال سنگ بحث شده و از پردازش تصویر برای محاسبه میزان درزه داری استفاده می شود.

فصل پنجم

پردازش تصویر و درزه‌داری

۵-۱- آشنایی

درزه‌های زغال^۱ شکستگی‌ها و بازشدگی طبیعی در لایه‌های زغالی می‌باشد. این درزه‌ها نقش اساسی در تخلخل و نفوذپذیری لایه‌های زغال برای عملیات گاززدایی متان ایفا کرده و می‌توانند تأثیر مهمی در عملیات‌های مهندسی نظیر تبدیل به گاز نمودن زغال و ایجاد شکستگی‌های هیدرولیکی انجام دهند. به دلیل آنکه نفوذپذیری و وجود خلل و فرج عوامل اصلی در عملیات گاززدایی می‌باشند، به دست آوردن اطلاعات از خصوصیات درزه‌های زغالی تأثیر به سزایی در اکتشاف موفق و تولید گاز خواهد داشت. اگرچه درزه‌های زغالی در ۱۶۰ سال گذشته زیاد مورد بحث قرار گرفته‌اند، اما معدن‌کاری جدید نیاز به دست آوردن اطلاعات قوی‌تر و محدود کردن مشکلات و به دست آوردن اطلاعات قوی‌تر دارد. بخشی از اطلاعات از روزنه‌ها، طول، عرض، ارتباط بین درزه‌ها و عوامل تشکیل درزه‌های زغالی به دست آمده است ولی بسیاری از پارامترهای دیگر که در نفوذپذیری تأثیر عمده دارند هنوز نیاز به مطالعه دارند. به هر حال تحقیقات جدید بر روی الگوی درزه‌های زغالی و نوع شکستگی‌ها پیشنهاد می‌شود تا بتوان مطالعات بهتری جهت شناسایی پارامترهای تعیین‌کننده در نفوذپذیری زغال به دست آید. پیش‌بینی‌های تأثیرپذیر بر روی الگوی درزه‌ها از روی محل تشکیل زغال حاصل می‌شود. اگرچه شکل و نوع درزه‌های زغالی براساس فرآیندهای تکتونیک و شرایط تولید زغال ایجاد می‌شود ولی فرآیندهای مختلف مکانیکی نیز در نوع ساختار درزه‌ها تأثیر دارد. برنامه تحقیقاتی بر روی این مقوله در علوم مکانیک شکست و ژئوشیمی زغال در حال انجام می‌باشد.

۵-۲- درزه‌های زغال سنگ

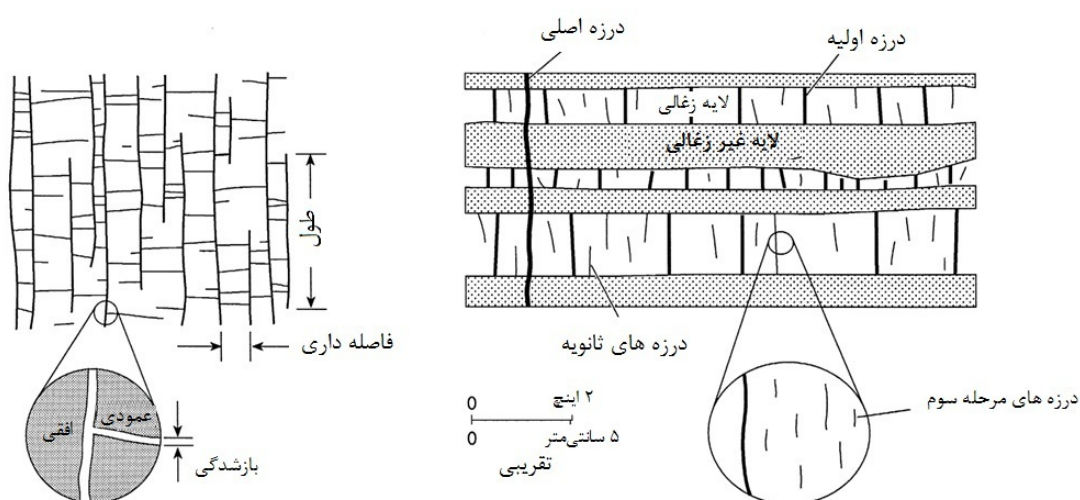
شکستگی‌ها تقریباً بر روی تمامی لایه‌های زغالی وجود دارد و می‌تواند بر روی خصوصیات پایداری زغال معدن‌کاری آن و جریان سیالات در آن تأثیر می‌گذارد. به همین علت شکستگی‌های

¹ Cleats

زغال مورد توجه قرار گرفته است از همان روزهایی که استخراج زغال شروع شد و مطالعات بر روی آن از اوایل قرن نوزدهم آغاز شد. (Mammatt,1834; Milne,1839; Kendall and Briggs,1933;) از اوایل قرن نوزدهم آغاز شد. (Laubach et al,1998; Tiegang et al, 2014) اگرچه معدنکاران مختلفی مطالعاتی بر روی شکستگی‌ها را در سال‌های مختلف انجام دادند ولی همگی آنها از منابع معدن‌کاری قدیمی استفاده کردند (Dron, 1925).

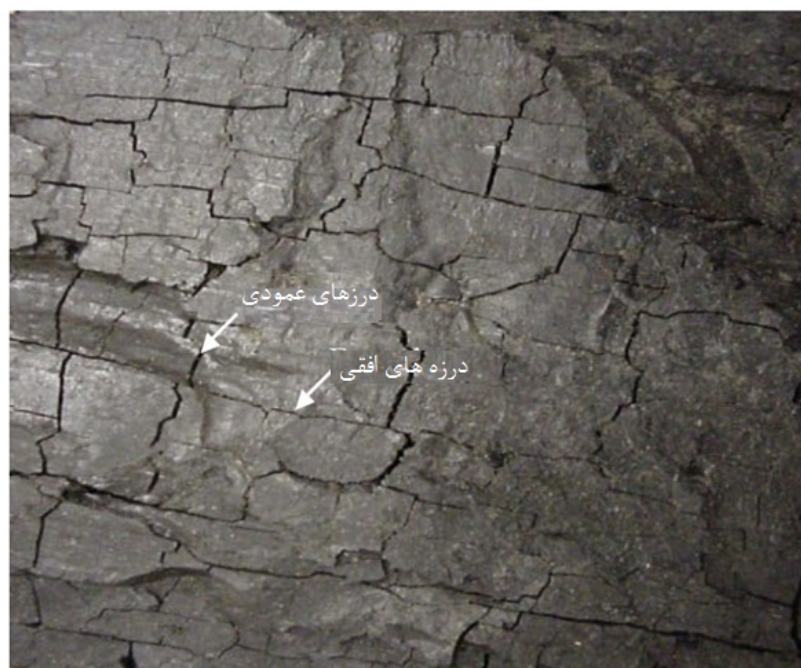
فشار به لایه زغالی و همچنین درزه‌ها نقش اساسی در میزان حرکت گاز درون زغال دارد. میزان مکش گاز از چاه‌های مکش و همچنین میزان آب تخلیه شده از چاه‌ها بر روی بازشدگی درزه‌های زغال تأثیر مستقیم دارند. (Yang et al, 2012)

درزه‌های زغالی شکستگی‌هایی هستند که معمولاً در دو جهت ایجاد می‌شوند یکی به صورت عرضی و دیگری به صورت طولی و درون لایه زغال. اگرچه قبل از سال ۱۹۹۰ ادبیات زمین‌شناسی و معدن‌کاری در حال اجرا، محاسبه این دسته درزه‌ها از اهمیت خاصی برخوردار بود اما تعیین آن مشکلات خاص خود را داشت. همانطور که در شکل ۵-۱ نشان داده شده ارتباط بین این درزه‌ها مشخص شده است.



شکل ۵-۱- درزه‌های فرعی و اصلی زغال سنگ و ارتباط میان آنها (Dron, 1925)

میان درزه‌های زغالی ارتباط وجود داشته و به همدیگر به صورت بندهای آجری متصل می‌باشند. بر اساس نحوه تشکیل زغال‌سنگ، ابتدا درزه‌های افقی و اصلی درون زغال پدیدار می‌شوند. سپس بر اثر تنش‌های محیطی و فشارهای وارده به لایه زغالی، درزه‌های عمودی نیز درون زغال ایجاد می‌گردند (Laubach and Tremain, 1991; Kulander and Dean, 1993). این درزه‌های ایجاد شده شبیه به دیوار آجری می‌باشد که تمامی نقاط توسط ۴ درزه اصلی محصور می‌باشند (شکل ۵-۲).



شکل ۵-۲- درزه‌های افقی و عمودی درون زغال (سرشکی، ۲۰۰۵)

این درزه‌ها در زمینه حرکت مولکول‌های متان و آب نقش اساسی ایفا می‌نمایند. این درزه‌ها همچنین باعث می‌شوند تا در صورت بالا بودن میزان گاز متان و استفاده از فشار هوا از چاه کناری برای خروج بیشتر گاز متان از چاه مجاور نیز استفاده شده و مولکول‌های هوا را درون خود جابه‌جا کرده تا باعث خروج گاز متان از درون درزه‌ها شود (Li et al, 2011). حرکت مولکول‌های گاز از درون این درزه‌ها باعث مهاجرت و جابه‌جایی گاز شده و از مکان‌هایی که فشار متان تجمع یافته در آن بالا باشد به محیط‌هایی که فشار کمتر و یا به اندازه اتمسفر می‌باشند جابه‌جایی انجام می‌گردد.

مولکول‌های گاز ابتدا به صورت جذبی و یا آزاد درون منافذ ریز و میکروسکوپی زغال درگیر می‌باشند. با حرکت مولکول‌ها از منافذ و رسیدن به درزه‌های جزئی راه برای ادامه حرکت مشخص می‌شود. درزه‌های جزئی به درزه‌های عمودی و از آنجا نیز به درزه‌های افقی و سپس به چاه مکش گاز و یا سینه‌کار استخراجی منتقل می‌شوند. از همین رو فاصله میان منفذ تا درزه‌ها و همچنین درزه‌ها از یکدیگر جهت عملیات گاززدایی متان بسیار مهم می‌باشد. به فاصله میان درزه‌های زغال که فاصله‌داری درزه‌ها^۱ گفته می‌شود جهت عملیات گاززدایی مورد نیاز می‌باشد. در ادامه با استفاده از پردازش تصاویر نسبت به تعیین فاصله‌داری درزه‌ها پرداخته شده است.

۵-۳- مقدمه‌ای بر پردازش تصویر دیجیتال

مفهوم استفاده از کامپیوترهای دیجیتالی به منظور پردازش تصویر از سال ۱۹۹۰ باز می‌گردد و پردازش تصویر دیجیتالی هم اکنون به عنوان یک فن‌آوری در مسیر درست خویش ظهور کرده است. امروزه سیستم‌های تصویری دیجیتالی قادر به اکتساب تصاویری هستند که گستره دینامیکی وسیع‌تری را نسبت به چشم انسان یا فیلم‌های تصویری دارند، چشم می‌تواند کمتر از ۱۰۰ سایه روشن خاکستری را مشاهده نماید و فیلم‌های سیاه و سفید معمولاً می‌توانند به ترتیب ۵۰ تا ۱۰۰ سایه روشن خاکستری بسته به کنتراست فیلم دوباره تهیه شوند. شبیه‌سازی دیجیتالی می‌تواند برای نمایش صدها و حتی هزارها سایه روشن خاکستری استفاده شود. یک تصویر دیجیتالی ساده می‌تواند مقدار بسیار زیادی اطلاعات را در یک شکل فشرده تفسیر شده ساده ارائه کند. یک تصویر دیجیتالی شامل میلیون‌ها بیت از اطلاعات، می‌تواند بر روی یک چاپ تصویری مجزا یا صفحه نمایش نشان داده شود. فرمت تصویری یک فرمت معمولی برای نمایش فشرده‌ای از حجم وسیعی از داده است که در هیچ روش دیگری به راحتی دیده نمی‌شود. استفاده از فرمت تصویر فواید بنیادی را در پردازش بصری انسان ایجاد می‌کند که شامل پردازش مغزی که جزء ذاتی درک انسان است، می‌باشد. شکل تصویری

¹ Cleat Spacing

حالت نمایش مؤثری را ایجاد می‌کند که می‌تواند توسط گستره وسیعی از مشاهده‌کنندگان با پیش زمینه‌ها و آموزش‌های مختلف تفسیر شود. تکنیک‌های دیجیتالی می‌تواند برای تحلیل‌هایی بر مبنای روابط داده تصویری با داده غیرتصویری نیز استفاده شود که شامل روابط شبیه‌سازی به دست آمده از راه دور، با پایگاه‌های داده مرجع زمینی غیرتصویری است.

تمام مراحل فن‌آوری محاسبه دیجیتالی، پیشرفت فن‌آوری پردازش تصویری را ممکن ساخته است. روند روبه رشد و ارزان عناصر محاسباتی، وسایل ذخیره سازی داده دیجیتالی با ظرفیت و تراکم بالا و پیشرفت تکنولوژی نمایش، پردازش و اصلاح و نمایش حجم وسیعی از شبیه سازی دیجیتالی را ممکن ساخته است.

۵-۳-۱- پردازش تصویر

به هرگونه عملیاتی که برای بهتر دیده شدن و درک اطلاعات بیشتر از تصویر بر روی آن انجام می‌شود، پردازش تصویر می‌گویند. پردازش تصویر امروزه بیشتر به موضوع پردازش تصویر دیجیتال گفته می‌شود. پردازش تصویر دیجیتال شاخه‌ای از کامپیوتر است که با پردازش سیگنال دیجیتال که در واقع همان تصاویر برداشته شده با دوربین دیجیتال یا دیگر ابزارهای اکتساب تصویر هستند، سر و کار دارد. در واقع در پردازش تصویر با تصاویر به عنوان یک سیگنال دو بعدی رفتار می‌شود. خروجی پردازشگر تصویر می‌تواند یک تصویر با یک مجموعه از نشان‌های ویژه یا متغیرهای مربوط به تصویر باشد.

۵-۳-۲- فضای رنگ

فضای رنگ ابزاری است که با استفاده از آن می‌توان رنگ‌ها را ایجاد کرد یا تشخیص داد یا در آن فضای خاص تجسم نمود. رنگ‌ها معمولاً سه پارامتر می‌باشند که این پارامترها مکان رنگ را در

فضای خاص مشخص می‌کنند. هر فضای رنگ دارای ویژگی‌های خاصی از جمله خطی یا غیر خطی بودن، یکنواخت یا غیریکنواخت بودن و وابسته به ابزار یا مستقل از ابزار بودن است.

۵-۳-۳- مراحل پردازش تصویر

مراحل پردازش تصویر را می‌توان به صورت زیر تعریف کرد:

- به دست آوردن و مدل‌سازی تصویر (دریافت تصویر ورودی).
- بهبود کیفیت تصویر و مشخص کردن مشخصه‌های متمایز (پیش‌پردازش تصویر).
- بازنگاری ویژگی‌های تصویر دلخواه یا استخراج مشخصه‌های موردنظر از تصویر (پردازش تصویر)
- مقایسه داده‌های تصویر (آنالیز تصویر)

الف- دریافت تصویر ورودی

در این مرحله، تصویر از ورودی خوانده شده و وارد سیستم می‌گردد. تصویر ورودی می‌تواند بر روی ابزار ذخیره‌سازی و یا از یک دوربین گرفته شود. تصاویر سنجش شده که از تعداد زیادی مربعات کوچک (پیکسل) تشکیل شده‌اند تصاویر رقومی نام دارند. بنابراین ماهیت داده‌های ما در آنالیز تصویر، تصاویر رقومی می‌باشند. هر پیکسل دارای یک شماره رقمی^۱ می‌باشد که بیان‌گر مقدار روشنایی آن پیکسل است. به این نوع تصاویر، تصاویر رستری می‌گویند. تصاویر رستری دارای سطر و ستون می‌باشند.

¹ Digital Number

ب- پیش پردازش تصویر و بهبود کیفیت تصویر

اهداف کلی این مرحله را می‌توان ارتقا تصویر و حذف مؤلفه‌های غیرضروری از تصویر دانست. به عنوان مثال، وجود لکه روی تصویر و یا مثلاً عناصری که در پردازش به کار نمی‌آیند. این عناصر و مؤلفه‌های غیرضروری قبل از پردازش تصویر باید با استفاده از تکنیک‌های پردازش تصویر حذف شوند.

ج- پیش پردازش تصویر

از نظر عملیات بر روی تصویر تبدیلات به دو دسته نقطه‌ای و گروهی تقسیم می‌شوند. در گروه نقطه‌ای همه عملیات پیکسل به پیکسل انجام می‌شود. در این گروه مقدار اصلاح شده یک پیکسل فقط وابسته به مقدار اولیه همان پیکسل است. اما در نوع گروهی پیکسل‌های همسایه نیز در مقدار اصلاح شده یک پیکسل تأثیر دارند. معمولاً ۹ نقطه به شکل یک مربع و یا ۷ نقطه به صورت یک لوزی حول یک پیکسل مورد اصلاح در نظر گرفته می‌شود. همه این روش‌ها منجر به ساده‌سازی داده‌های خام و بیرون کشیدن اطلاعات سطح بالا از آن می‌شود.

د- بهبود کیفیت تصویر

عملیات زیر طی فرآیند بهبود کیفیت تصویر انجام می‌گیرد:

نمایش لبه‌ها، رنگ نما، بهبود وضوح، فیلترکردن، افزودن و بزرگنمایی، ترمیم اثرات عوامل دخیل، تغییر سطح خاکستری و بهبود کنتراست.

ه- آنالیز و تفسیر تصویر

آخرین گام در پردازش تصویر تفسیرکردن تصویر است. به عنوان مثال در تصویر یک خیابان یا توقفگاه نشان دادن وضعیت ترافیکی و یا تعداد خودرو متوقف شده هدف از تفسیر تصویر است. بعضی وقت‌ها تفسیر تصویر نیاز به الگوریتم پیچیده فازی و عصبی دارد. در این مرحله با استفاده از

ویژگی‌های استخراج شده به آنالیز تصویر پرداخته می‌شود. آنالیز تصویر عموماً از تکنیک‌های هوش مصنوعی همچون شبکه‌های عصبی، درخت‌های تصمیم، کلاس‌بندی و ... استفاده می‌کند.

۵-۴- کاربرد پردازش تصویر در علوم زمین و اکتشاف ذخایر معدنی

- پردازش تصویر در مقیاس ماکروسکوپی
- پردازش تصویر در مقیاس میکروسکوپی

در مقیاس ماکروسکوپی با استفاده از عکس‌های هوایی و ماهواره در رشته‌ها و مطالعات مختلف از پردازش تصویر بهره می‌گیرند. امروزه کمتر مطالعه در زمینه زمین‌شناسی و اکتشاف در نقاط مختلف جهان بدون بهره‌گیری از داده‌های ماهواره‌ای انجام می‌شود. تفسیر داده‌های رقومی ماهواره‌ای منابع زمینی در طول موج‌های مختلف و قدرت تفکیک گوناگون و در پاره‌ای از آن‌ها با نفوذ در عمق کمی از رسوبات سطحی با بکارگیری نرم‌افزارها و سخت‌افزارهای ویژه پردازش این داده‌ها^۱ می‌تواند در حل مسائل زمین‌شناسی کمک بسیار ارزنده‌ای نماید.

۵-۵- نمونه‌گیری و تصویر برداری

جهت شناسایی و محاسبه فاصله‌داری درزه‌ها که موضوع اصلی این فصل می‌باشد از روش عکس‌برداری از نمونه‌های زغال و پردازش تصویر آنها توسط رایانه استفاده شده است. بدین منظور می‌بایست نمونه‌های بزرگ و خرد نشده زغال‌سنگ را انتخاب نموده و آنها را اسکن نمود. در این مورد از نمونه‌های زغال‌سنگ معدن زغال طبس در ایران استفاده شده است. نمونه‌هایی که از آنها استفاده شده از لایه‌های دست نخورده و در حال استخراج معدن زغال طبس گرفته شده است. از آنجائی که هدف از این فصل به دست آوردن فاصله‌داری درزه‌ها می‌باشد لذا می‌بایست نمونه‌ها بدون تغییری در ساختار آنها جمع‌آوری گردد. نمونه‌های بزرگ و دست نخورده زغال به آرامی از

¹ Image Processing

سینه‌کارها جدا شده و سپس آنها را بسته‌بندی نموده تا از خروج رطوبت زغال و همچنین ورود هوا جلوگیری شود. با این عملیات از بازشدگی درزه‌ها و خشک شدن زغال قبل از انجام عملیات تصویربرداری جلوگیری می‌شود. نمونه‌های گرفته شده از معدن زغال‌سنگ پروده I طبس در شکل ۳-۵ نشان داده شده است.



شکل ۳-۵- نمونه‌های گرفته شده از معدن زغال پروده I طبس جهت شناسایی فاصله‌داری درزه‌های زغال

نمونه‌های به دست آمده را پس از بررسی دقیق و مشاهده وضعیت ظاهری جداسازی کرده و نمونه‌های انتخاب شده برای عملیات تصویربرداری آماده می‌شوند. آماده‌سازی شامل جدا کردن قطعه‌های خرد شده از زغال بوده که بر اثر حمل یا عوامل دیگر از بلوک زغالی جدا شده‌اند و باعث بروز خطا در زمان انجام تصویربرداری می‌شود. سپس از نمونه‌های مشخص زغال سی تی اسکن^۱ گرفته و عملیات تصویربرداری را به گونه‌ای می‌بایست انجام داد که مقاطع سه بعدی عکسبرداری شده و سپس با انجام عملیات پردازش تصویر به بررسی آنها پرداخت (شکل ۴-۵).

¹ CT Scan

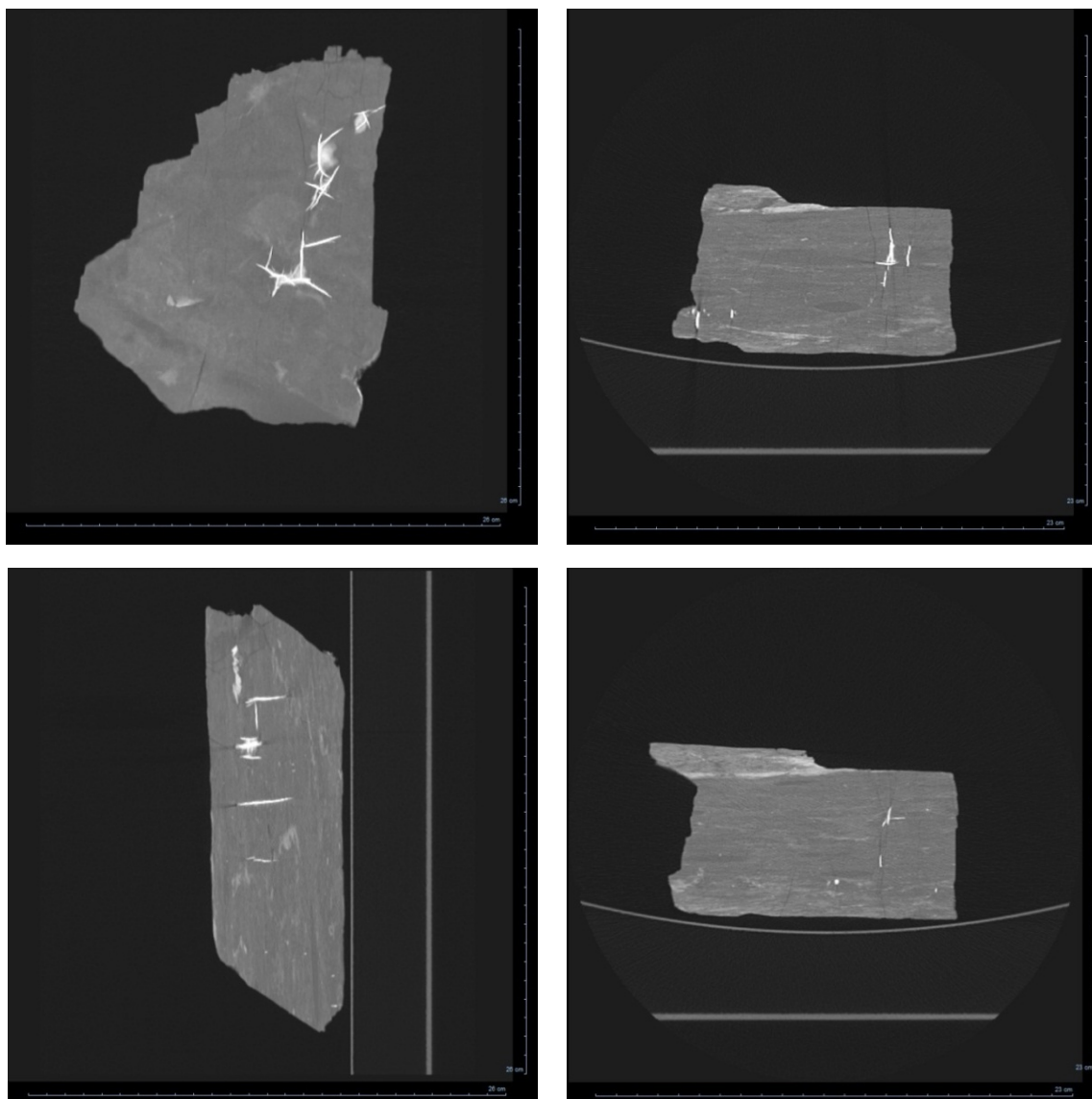


شکل ۵-۴- نمونه زغال در حال سی تی اسکن

پس از تهیه سی تی اسکن و گرفتن حدود ۱۵۰۰ عکس از مقاطع مختلف نمونه های زغال به بررسی عکس ها پرداخته و برای تعیین فاصله داری درزه ها از روش پردازش تصویر توسط رایانه استفاده شد. در شکل ۵-۵ نمونه هایی از سی تی اسکن انجام شده بر روی زغال نشان داده شده است. نکته جالبی که در بعضی از عکس های تهیه شده مشاهده می گردد پرشدگی بعضی از درزه ها درون زغال سنگ توسط پیریت، خاک رس و دیگر پرکننده های زغال می باشد. حال تصاویر مورد نیاز جهت پردازش تصویر آماده می باشد.

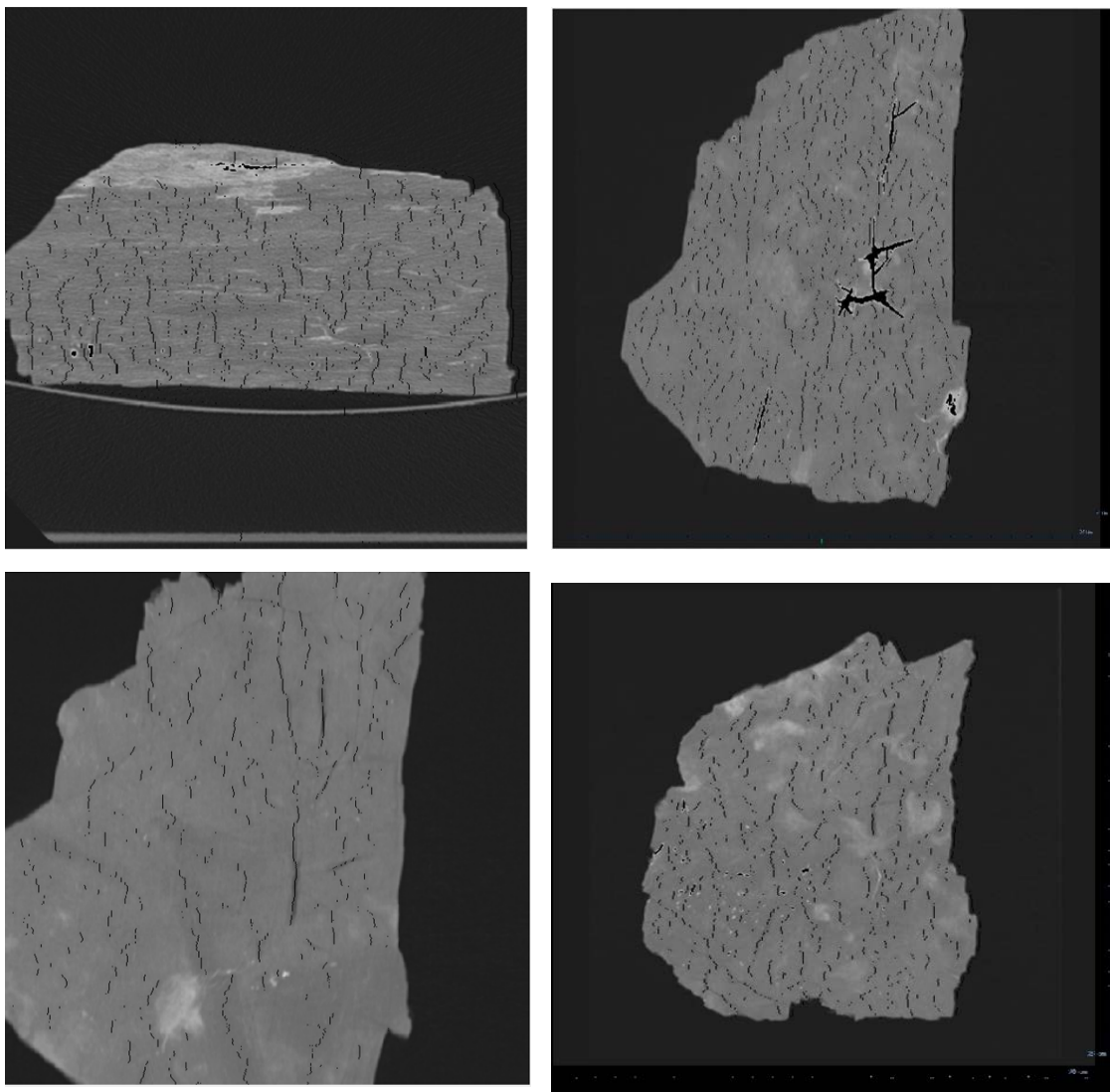
جهت پردازش تصاویر مقاطع زغال به دست آمده از سی تی اسکن، برنامه را در نرم افزار متلب R2014a^۱ نوشته شد و کدهای مربوط به شناسایی پیکسل های مشکی که به طور ممتد در تصویر ادامه دارند، وارد گردید. از تعداد ۱۵۰۰ عکس تهیه شده از مقاطع زغال، تعداد ۵۰ عکس را به طور تصادفی انتخاب کرده و عملیات پردازش تصاویر را بر روی آنها انجام شد. نتایج حاصل از پردازش تصاویر در تعدادی از مقاطع در شکل ۵-۶ نشان داده شده است.

^۱ MATLAB Software, R2014a



شکل ۵-۵- سی تی اسکن انجام شده بر روی مقاطع عمودی و افقی نمونه زغالی

از آنجائی که عکس‌ها دارای مقیاس بوده و طول و عرض آن مشخص می‌باشد و ابعاد زغال‌سنگ نیز مشخص است فاصله متوسط میان درزه‌های مشخص شده تعیین گردید. در ادامه برنامه نوشته شده در نرم افزار مطلب، دستورات لازم جهت تعیین فاصله میان پیکسل‌های مشخص شده از یک درزه تا درزه دیگر که کمترین فاصله را داشته وارد شد و نتایج به دست آمده در جدول ۵-۱ مشاهده می‌شود.

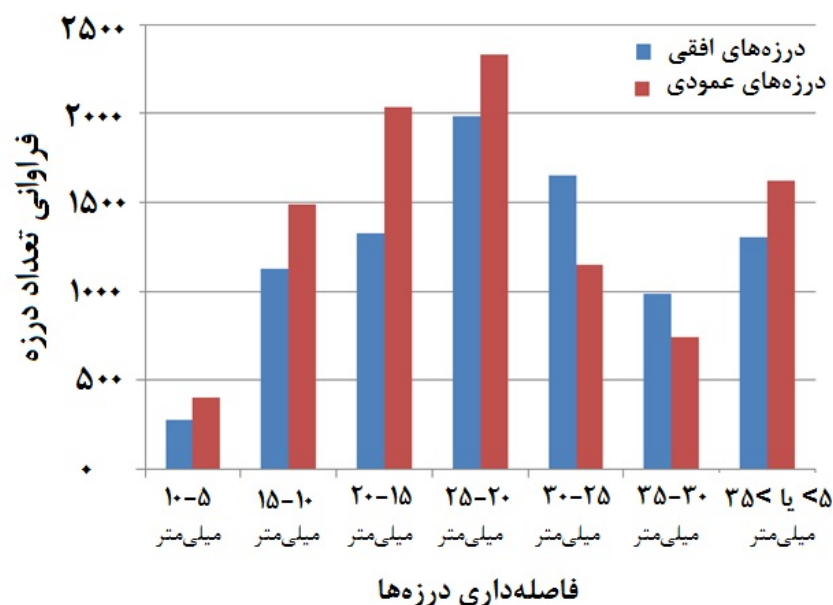


شکل ۵-۶- پردازش تصویر بر روی مقاطع زغال و درزه‌های مشخص شده بر روی عکس‌ها در یک مقطع

جدول ۵-۱- فاصله‌داری به دست آمده برای درزه‌های افقی و عمودی نمونه زغال‌سنگ پروده طبس ایران

درزه‌های عمودی		درزه‌های افقی	
تعداد	فاصله درزه ها (میلی‌متر)	تعداد	فاصله درزه ها (میلی‌متر)
۴۰۵	۵ الی ۱۰	۲۷۳	۵ الی ۱۰
۱۴۸۶	۱۰ الی ۱۵	۱۱۲۵	۱۰ الی ۱۵
۲۰۳۵	۱۵ الی ۲۰	۱۳۲۷	۱۵ الی ۲۰
۲۳۳۲	۲۰ الی ۲۵	۱۹۸۱	۲۰ الی ۲۵
۱۱۵۱	۲۵ الی ۳۰	۱۶۵۱	۲۵ الی ۳۰
۷۴۲	۳۰ الی ۳۵	۹۸۳	۳۰ الی ۳۵
۱۶۲۰	۳۵ و < (غیر قابل قبول)	۱۳۰۷	۳۵ و < (غیر قابل قبول)
۹۷۷۱	مجموع	۸۶۴۷	مجموع

با بررسی نتیجه حاصل از پردازش تصویر مشخص است که درزه‌های افقی در بازه بین ۲۰ الی ۳۰ میلی‌متر و درزه‌های عمودی در بازه ۱۵ الی ۲۵ میلی‌متر دارای بیشترین تعداد تکرار می‌باشند (شکل ۵-۷).



شکل ۵-۷- فاصله‌داری درزه‌های افقی و عمودی پس از پردازش تصاویر توسط رایانه

۵-۶- جمع بندی

در این فصل پس از انجام پردازش تصاویر توسط کامپیوتر از عکس‌های تهیه شده از مقاطع زغال‌سنگ ، مشخص گردید که فاصله درزه‌های افقی در نمونه زغال طبس در ایران ۲۰ الی ۳۰ میلی‌متر و این فاصله برای درزه‌های عمودی ۱۵ الی ۲۵ میلی‌متر می‌باشد. از این فاصله محاسبه شده می‌توان جهت مدل‌سازی بلوک زغالی جهت گاززدایی متان از زغال استفاده نموده و بر اساس نتایج مدل میزان فاصله چاه‌های مکش گاز و همچنین زمان مورد نیاز گاززدایی را تخمین زد. همچنین پردازش تصاویر توسط رایانه را می‌توان در دیگر مقاطع انواع سنگ‌ها استفاده نمود که تعیین میزان شکست هیدرولیکی در صنعت نفت و گاز از آن جمله می‌باشد. نتایج حاصل از این فصل نشان می‌دهد که پردازش تصویر توسط کامپیوتر می‌تواند کمک بزرگی در افزایش سرعت و دقت مدل‌سازی علوم معدنی نماید.

فصل ششم

مدل سازی

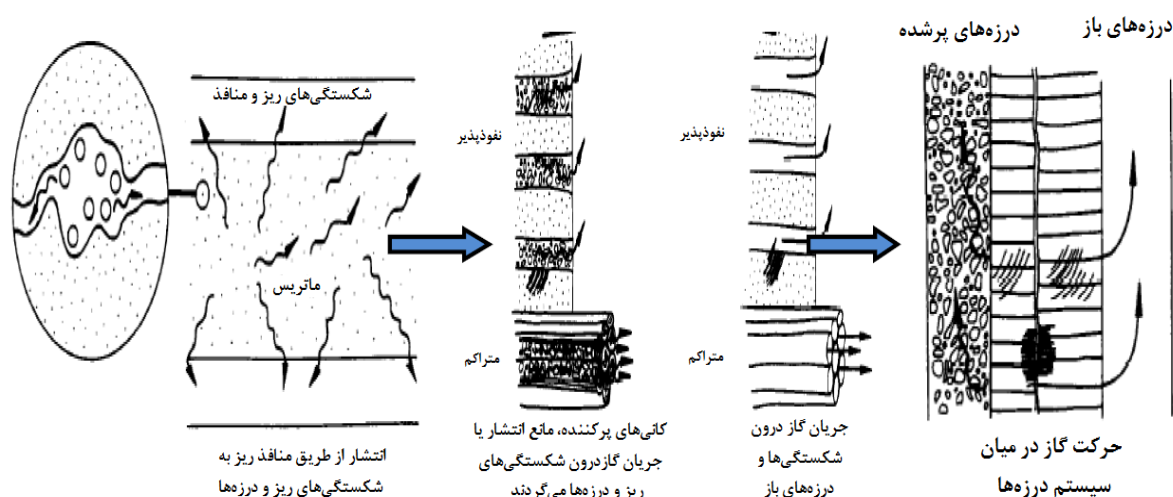
۱-۶- آشنایی

جریان گاز متان از زغال سنگ به نفوذپذیری مؤثر زغال بستگی دارد. بر طبق برخی از نتایج مدل‌های کامپیوتری و ریاضی، فاصله میان درزه‌ها و منافذ در زغال، نقشی اساسی را در گاززدایی متان از زغال ایفا می‌نماید (شکل ۱-۶) (Harpalani and Zhao, 1991; Gamson et al, 1992). برای بالا بردن جریان گاز در هر چاه نیاز به وارد نمودن تحریکاتی خاص به زغال می‌باشد. دو روش معمول برای افزایش تولید گاز متان به صورت زیر می‌باشد: الف- افزایش سطح تماس لایه‌ها با تعداد بیشتری از چاه‌های افقی ب- افزایش نفوذپذیری توسط ایجاد شکستگی در لایه زغال (Mazumder et al, 2001).

روند اولیه بهبود مقدار گاززدایی متان از زغال از طریق ایجاد تحریک و افزایش مقدار شکستگی‌های زغال به خوبی در اتصال چاه به سیستم درزه‌های زغال عمل می‌نماید (Anderson, 2003). هنگامی که فشار در چاه با پمپاژ آب از چاه و یا به وسیله یک مکانیسم دیگر، کاهش می‌یابد، فشار در شکستگی‌ها نیز کاهش یافته که به نوبه خود باعث کاهش فشار در سیستم شکستگی زغال سنگ طبیعی می‌گردد. در ابتدا، زمانی که عملیات آغاز شده است، در جهت فشار ایجاد شده، آب شروع به حرکت می‌نماید. هنگامی که فشار سیستم ایجاد شکستگی از فشار اولیه درون لایه‌ها بیشتر می‌شود، متانی که در زمان تخلخل اولیه قادر به انتشار نبود، به وسیله تخلخل ثانویه ایجاد شده از لایه زغال شروع به انتشار می‌نماید (Balan and Gumrah, 2009). در نتیجه، غلظت گاز جذب شده در سیستم تخلخل اولیه در نزدیکی شکستگی‌های طبیعی کاهش می‌یابد. این کاهش غلظت است که منجر به انتقال جرم توسط نفوذ از طریق میکرو منافذ و تخلخل می‌گردد (Anderson, 2003). جذب گاز از طریق ایجاد کاهش فشار در لایه‌های زغال انجام می‌شود.

از آنجا که در یک زغال سنگ دست نخورده، مولکول‌های متان در منافذ ریز از ماتریس زغال باقی مانده‌اند، می‌توان با تحقیق و بررسی بر روی منافذ و درزه‌های موجود در زغال و نحوه حرکت

گاز در این شکستگی‌ها، اطلاعات مفید و کاربردی در زمینه گاززدایی متان از لایه‌های زغالی به دست آورد و نحوه واجذب گاز متان را در لایه‌های زغال بررسی نموده تا میزان گاز بیشتری در عملیات گاززدایی ایجاد نمود (Alexeev et al, 2007).



شکل ۶-۱- جریان گاز متان درون تشکیلات ساختاری زغال (Gamson et al, 1992)

۲-۶- مدل‌سازی ریاضی

امروزه روش حجم‌های محدود رایج‌ترین روش در دینامیک سیالات محاسباتی است. استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی برای پیش‌بینی جریان‌های داخلی و خارجی در سه دهه گذشته پیشرفت چشم‌گیری داشته است. در دهه ۱۹۸۰ حل مسائل جریان سیال توسط CFD^۱ موضوع حوزه تحقیقات بسیاری از متخصصین شبیه‌سازی که چندین سال به طور اصولی دوره دیده‌اند درآمده است. سانگ و ژی حرکت مولکول‌های گاز متان را در مجاورت چال‌های حفاری شده درون زغال جهت گاززدایی در نرم افزار ANSYS مدل نموده‌اند و از آن جهت بهینه‌سازی میزان حفاری و

¹ Computational Fluid Dynamics

فاصله میان چال‌های حفاری استفاده کرده‌اند (Song and Xie, 2011). پرکو و همکاران در مورد مدل‌سازی حرکت یک سیال در محیط متخلخل و درزه‌دار برای تشعشعات هسته‌ای و همچنین نفوذ مواد نفتی در سنگ‌های درزه‌دار تحقیقاتی انجام داده است و مدل حرکتی این مواد را در محیطی خاص شبیه‌سازی نموده است (Song and Xie, 2011). شرکت کامسول نیز در بخش مدل‌های آموزشی و پیش‌ساخته خود که در سایت اینترنتی خود قرار داده نیز مدل حرکتی سیال در یک محیط درزه‌دار را به نمایش گذاشته است که از آن می‌توان استفاده نمود (COMSOL, 2016). مدل‌سازی ریاضی در دیگر علوم وابسته به زغال‌سنگ نیز وارد شده است. سیفی در تحقیقات خود، سیستم¹ UCG را مورد مطالعه قرار داده و نحوه تبدیل شدن به گاز را درون زمین و در لایه‌های زغال‌سنگ مدل نموده است (Seifi, 2014). همچنین چنین تحقیقی را ژانوسک و همکاران در مطالعات خود انجام داده است (Janoszek et al, 2013). آلونسو نیز نحوه تشکیل گاز درون لایه زغال را در آزمایشگاه مورد بررسی قرار داده و سپس از طریق مدل‌سازی آنرا در شرایط واقعی در درون لایه زغال و فشار سنگ بالاسری شبیه‌سازی نموده است (Alonso, 2012). قابلیت وسیع موقعیت‌های کاری مهندسی توأم با الگوریتم‌های حل مؤثر و پیشرفته شدن امکانات پیش‌پردازنده و پس‌پردازنده امکان استفاده از برنامه‌های CFD تجاری را برای مهندسين به منظور تحقیق، توسعه و طراحی در صنعت فراهم کرده است. در حالی که کاربرد برنامه‌های تجاری CFD بر اساس المان محدود اخیراً رو به ضعف و نزول می‌باشد، بازار به طور مستمر اختیار پنج برنامه STAR-CD، FLUENT، PHOENICS و COMSOL قرار گرفته است که همه آنها بر اساس روش عددی حجم‌های محدود مدل‌سازی می‌نمایند (Houcheng et al, 2012). در نرم‌افزارهای دیگر نیز می‌توان عملیات مدل‌سازی را انجام داد. کورنچو و فریاس عملیات مدل‌سازی گاززدایی لایه‌های زغال را در نرم افزار Fluent انجام داده و نتایج آنرا تفسیر نموده‌اند (Cornejo and Farias, 2011).

¹ Underground Coal Gasification

الگوریتم کار در روش حجم‌های محدود شامل سه مرحله به صورت زیر می‌باشد
(Xi-Sheng, 2012):

- ۱- انتگرال‌گیری کلی معادلات حاکم بر جریان سیال روی تمام حجم‌های کنترل مربوط به میدان حل
- ۲- گسسته‌سازی شامل جای‌گذاری نوعی از تقریب‌های اختلاف محدود برای عبارت‌های داخل معادله انتگرالی که فرآیندهای جریان مانند جابجایی، نفوذ و منبع‌ها را نشان می‌دهد، این عمل معادلات انتگرالی را به یک سیستم معادلات جبری تبدیل می‌کند.
- ۳- حل معادلات جبری با استفاده از یک روش تکرار.

۳-۶- نرم افزار کامسول

نرم‌افزار کامسول مولتی‌فیزیکس^۱ یک مجموعه کامل شبیه‌سازی است که می‌تواند معادلات دیفرانسیل سیستم‌های غیرخطی را توسط مشتق‌های جزئی به روش اجزاء محدود^۲ (FEM) در فضاها، یک، دو و سه بعدی حل نماید. این نرم‌افزار می‌تواند در حضور چالش‌هایی نظیر میدان‌های الکترومغناطیسی، کشش، دینامیک سیالات و دینامیک گاز به خوبی راهگشا باشد. کامسول همچنین فرصتی برای حل مشکل به عنوان یک فرمول ریاضی (در فرم معادلات) و فیزیکی (انتخاب مدل فیزیکی، به عنوان 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 فناوری استفاده کرد، مانند انواع روش‌های انتقال حرارت و برق، تئوری الاستیسیته، نفوذ مولکولی و انتقال جرم و انتشار، انتشار موج و جریان سیال.

^۱ COMSOL Multiphysics

^۲ Finite Element Method

با استفاده از نرم‌افزار کامسول می‌توان طراحی و شبیه‌سازی پروژه‌های مهندسی برق، مکانیک، علوم زمین، شیمی، فیزیک، نجوم و کوانتوم را انجام داد. همچنین، این برنامه امکان تعامل با نرم‌افزارهای مهندسی دیگر مانند کتیا^۱ و متلب^۲ را دارد.

این نرم‌افزار در سال ۱۹۸۶ توسط دانشجویان مؤسسه سلطنتی فناوری سوئد ایجاد شد و نام قبلی این نرم‌افزار FEMLAB بوده است و از سال ۲۰۰۵ به کامسول تغییر نام داده است.

قابلیت‌های کلیدی نرم‌افزار کامسول را می‌توان به صورت زیر بیان کرد:

- طراحی و شبیه‌سازی پروژه‌های مهندسی برق، مکانیک، علوم زمین، شیمی، فیزیک، نجوم و کوانتوم
- حل معادلات دیفرانسیل سیستم‌های غیرخطی، توسط مشتق‌های جزئی روش المان محدود در فضاها یک، دو و سه بعدی
- راه‌گشای خوبی در حضور چالش‌هایی نظیر میدان‌های الکترومغناطیسی، کشش، دینامیک سیالات و دینامیک گاز
- امکان تعامل با نرم‌افزارهای مهندسی دیگر مانند کتیا و مطلب
- قابلیت نصب در سیستم عامل Mac OS و Linux و بر روی ویندوزهای ۳۲ بیتی و ۶۴ بیتی

۴-۶- فرضیات مدل

برای انجام مدل‌سازی باید یک سری فرضیات را در نظر گرفت که در زیر تعدادی از آنها ارائه

شده است:

^۱ CATIA Software

^۲ MATLAB Software

- ماتریس زغال سنگ بصورت بلوک مستطیل شکلی مدل شده و درزه های طولی و عرضی را برای تخلیه گاز در اطراف آن در نظر گرفت.
- فرض بر این است که تعداد منافذ ریز در هر بلوک ماتریس زغال سنگ مشخص باشد.
- متان منتشر شده از طریق منافذ و درزه های ریز به درزه های اصلی رسیده و این درزه ها اجازه می دهند تا متان منتشر شده به چاه های مکش گاز برسند.
- شکستگی ها به طور گسترده و کافی وجود دارند و هیچ ذره زغال سنگی درون این درزه ها وجود ندارد. اگرچه آنها خیلی کوچک هستند اما به صورت مویرگی در کل زغال پخش شده اند.
- جریان گاز متان درون درزه ها به صورت آرام بوده و از قانون داری تبیت می کند.
- مقدار بازشدگی و عرض درزه ها در طول جریان گاززدایی ثابت می ماند.
- ماتریس زغال سنگ در تعامل مستمر با درزه ها است و تجمع گاز متان در شکستگی بوجود نمی آید.

۵-۶- معادلات مدل

گاز متان پس از انتشار و رسیدن به درزه ها جریان یافته و به سمت چاه های مکش گاز می روند. از آنجا که قانون داری و دیگر قوانین جریان گازها در این مدل سازی استفاده می شود، خلاصه ای از آن دوباره ذکر می گردد:

گاز متان موجود در زغال به دو حالت وجود دارد: گاز آزاد و گاز جذب شده. گاز آزاد در شکستگی ها و درزه های ریز زغال وجود دارد و رفتار این گاز به وسیله قانون بویل و نظریه جنبشی گازها شرح داده می شود. در حالت دیگر، مولکول های گاز به سطح روی زغال چسبیده اند و میزان آن از ۲۰ الی ۲۰۰ (Cm^3/g) متفاوت می باشد. در فشار طبیعی بستر زغال، حدود ۹۰ الی ۹۵ درصد کل

گاز به صورت جذب شده بوده و مابین گاز آزاد و گاز جذب شده یک انتقال طبیعی در جریان می‌باشد. میزان گاز جذب شده به تعادل فشار آزاد گاز در محیط هم دما بستگی دارد. در اینجا تعدادی مدل ریاضی برای توصیف روند جذب متان در زغال یا دفع زغال بیان شده است که از مدل لانگمویر بسیار استفاده شده است.

کیفیت گاز محبوس شده درون درزه‌های زغال از طریق قانون بویل محاسبه می‌شود:

$$PV = ZnRT \quad (۱-۶)$$

که در آن :

P: فشار (کیلو پاسکال)

V: حجم درزه ها (m^3)

n: تعداد مول

R: ثابت جهانی گاز

T: دمای مطلق کلوین

Z: ضریب انحراف گاز به عنوان نسبت حجم واقعی اشغال شده توسط یک گاز در درجه حرارت و فشار موجود به حجم اشغال شده در حالت ایده‌آل. در درجه حرارت موجود در بیشتر معادن ، مقدار Z در فشار کم ناچیز است. برای متان در معادله گاز ایده‌آل فشار تا ۴۰۰۰ کیلو پاسکال بالا می‌رود اما برای دی‌اکسیدکربن معادله گاز ایده‌آل تا ۱۱۰۰ کیلو پاسکال بیشتر قابل استفاده نیست. در زغال با تخلخل بالا Φ_M و در شرایط استاندارد از فشار و دما، مقدار گاز آزاد به حجم زغال C_V از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$C_V = \Phi_M \frac{P}{P_0} \frac{273}{T} \quad (۲-۶)$$

که در این رابطه:

Φ_M : تخلخل کلی زغال که به صورت فضای خالی موجود در زغال در کل زغال بیان می‌شود.

P_0 : فشار استاندارد اتمسفر (۱۰۱/۳ کیلو پاسکال)

T : دمای مطلق کلوین می‌باشد.

کاملاً مشخص شده است که گاز آزاد موجود در ترک‌های ریز (۵ الی ۱۰ درصد) از کل گاز را در بر می‌گیرد. C_v متناسب با تخلخل کلی Φ_M بوده و این مقدار با تغییرات بر روی فشار درجا و میزان رطوبت زغال یا سنگ تغییر می‌کند. Φ_M می‌تواند بین ۰/۰۱ و ۰/۱۵ (cm^3/cm^3) برای زغال تغییر کند (Song and Xie, 2011).

در حالت تعادل، رابطه منحصر به فردی بین مقدار جذب گاز و فشار گاز آزاد توسط معادله لانگمویر وجود دارد:

$$C_P = \frac{A B P}{1 + B P} \quad (3-6)$$

که در آن C_P مقدار گاز دفع شده در فشار P (cm^3/cm^3) از زغال می‌باشد و معمولاً به صورت m^3/ton از زغال بیان می‌شود. A و B ثوابت لانگمویر در واحدهای (cm^3/cm^3) و یا m^3/t و kPa^{-1} می‌باشند و برای زغال‌های مختلف از نظر نوع، دما و میزان رطوبت مقادیر مختلفی دارند.

در معادله لانگمویر شیوه جذب و دفع زغال شرح داده شده است و منحنی حاصل از آن ایزوترم جذب نامیده می‌شود. مکانیسم جریان متان در زغال سنگ ترکیبی از تعدادی فرآیند پیچیده می‌باشد که به طور معمول برای مدل نمودن این حرکت از قانون دارسی و قانون فیک استفاده می‌شود (Wu et al, 2009).

بر طبق قانون دارسی می‌توان شدت جریان سیال را درون یک محیط متخلخل متناسب با تغییرات فشار محاسبه نمود:

$$q_D = - \frac{K A_s}{\mu} \frac{\delta P}{\delta X} \quad (4-6)$$

که در آن A_s مقطع عرضی عمود بر بردار میکروسکوپی سرعت، K ضریب نفوذپذیری ذاتی متوسط، $\frac{\delta P}{\delta X}$ گرادیان فشار و μ ضریب گرانروی دینامیکی می باشد ($\mu = 10.87 \times 10^{-6} \text{ Ns/m}^2$) در 293°K اثر لغزش گاز، عموماً اثر کلیکنبرگ نامیده می شود که در یک مدل جدید جریان گزارش شده است. اثر کلیکنبرگ رسماً در فشارهای پایین بیان می شود و می تواند توسط تعدیل مقادیر تراوایی در معادله جریان یکی شود.

$$K = K_\infty (1 + a/p) \quad (5-6)$$

که در آن P فشار جریان، K_∞ تراوایی در فشار بسیار بالا، و a یک ثابت می باشند.
قانون فیک جریان ساطع را تحت یک گرادیان غلظت توصیف می کند که می تواند به صورت زیر بیان شود:

$$q_f = -DA_s \delta C / \delta X \quad (6-6)$$

که در آن C غلظت (cm^3/cm^3)، D ضریب انتشار (cm^2/s)، و علامت منفی مشخص می کند که انتقال گاز در جهت کاهش غلظت اتفاق می افتد.

معادله پیوستگی را نیز می توان برای یک سیال در فاز گاز بدین صورت نوشت:

$$-\left(\frac{1}{r}\right)\left(\frac{\partial}{\partial r}\right)\left[\frac{rP_a}{Z_{pa}}\vec{v}\right] + \underbrace{\frac{RT}{M}\frac{q_m}{V_{ba}} + \frac{RT}{M}\frac{q_{ai}}{V_{ba}}}_{\text{(به علت مقدار کم، صرفنظر می گردد)}} = \phi_a \frac{\partial}{\partial t} \left[\frac{P_a}{Z_{pa}}\right] \quad (7-6)$$

که در آن:

r : جهت شعاع

P_a : فشار اولیه لایه (N/m^2)

Z : ضریب فشردگی گاز

R : ثابت جهانی گاز

T: دما (K)

M: وزن مولکولی (kg/kmol^3)

Q_m : شدت جریان جرمی (kg/s)

V: حجم گاز

$\emptyset$: تخلخل

t: زمان (S)

بر طبق قانون دارسی برای جریان گاز در یک شکستگی:

$$\vec{v} = - \left[\frac{k}{\mu} \right] \left(\frac{\partial P_a}{\partial r} \right) \quad (۸-۶)$$

که در آن:

k: نفوذپذیری (میلی دارسی)

μ : ضریب گرانروی دینامیکی (سانتی پواز)

با جای گذاری معادله (۸-۶) در معادله (۷-۶) :

$$\left(\frac{1}{r} \right) \left(\frac{\partial}{\partial r} \right) \left[\frac{krP_a}{Z_{pa}\mu} \left(\frac{\partial P_a}{\partial r} \right) \right] + \underbrace{\frac{TP_{sc}}{T_{sc}} \frac{q_{sc}}{V_{ba}} + \frac{RT}{M} \frac{q_{ai}}{V_{ba}}}_{(به علت مقدار کم، صرف نظر می گردد)} = \phi_a \frac{\partial}{\partial t} \left[\frac{P_a}{Z_{pa}} \right] \quad (۹-۶)$$

(به علت مقدار کم، صرف نظر می گردد)

جریان گاز از منافذ ریز از قانون فیک تبعیت می کند. این قانون به صورت زیر است:

$$\left(\frac{1}{r} \right) \left(\frac{\partial}{\partial r} \right) \left[rD \left(\frac{\partial C}{\partial r} \right) \right] = \left(\frac{\partial C}{\partial t} \right) \quad (۱۰-۶)$$

که در آن:

D: ضریب انتشار (cm^2/sec)

C: غلظت گاز در ماتریس زغال (kg/m^3)

میزان جذب و دفع گاز در شرایط تعادل با معادله لانگمویر بیان می شود:

$$V_E = \frac{V_{\infty}P}{P+P_L} \quad (۱۱-۶)$$

که در آن:

V_{∞} : حجم ثابت لانگمویر (kg/m^3)

V_E : تعادل ایزوترم (kg/m^3)

میزان غلظت کل گاز ماتریس زغال به واحد حجم آن به قرار زیر است:

$$C = \left(\frac{PM\phi_i}{ZRT} \right) + \left[\frac{V_\infty P}{P+P_L} \right] \quad (۱۲-۶)$$

با قرار دادن مقدار C در معادله (۴-۶) خواهیم داشت:

$$\left(\frac{1}{r} \right) \left(\frac{\partial}{\partial r} \right) \left[rD \left(\frac{\partial}{\partial r} \left\{ \left(\frac{PM\phi_i}{Z_p RT} \right) + \left[\frac{V_\infty P}{P+P_L} \right] \right\} \right) \right] = \frac{\partial}{\partial t} \left[\left(\frac{PM\phi_i}{Z_p RT} \right) + \left[\frac{V_\infty P}{P+P_L} \right] \right] \quad (۱۳-۶)$$

قانون گاز واقعی به قرار زیر است (Zhao and Jin, 1994):

$$P = CZRT \quad (۱۴-۶)$$

که در آن:

P: فشار، psi (kpa)

C: غلظت گاز در ماتریس زغال (kg/m^3)

Z: فاکتور فشردگی گاز

R: ثابت گاز جهانی

T: دما (K).

۶-۶-۶ مدل سازی

با توجه به مطالب ارائه شده و بیان فرمول‌ها و معادلات مربوط به حرکت سیال در یک محیط متخلخل و همچنین با استفاده از نتایج حاصل از تعیین میزان نفوذپذیری زغال، میزان درزه‌داری، تعیین نوع و مقدار ماسرال‌های زغال‌سنگ طبس که در فصل‌های گذشته مورد بررسی و تحقیق قرار گرفت، می‌توان حرکت مولکول‌های گاز متان درون یک بلوک زغالی را مدل‌سازی نمود.

۶-۶-۱-۶ هندسه مدل

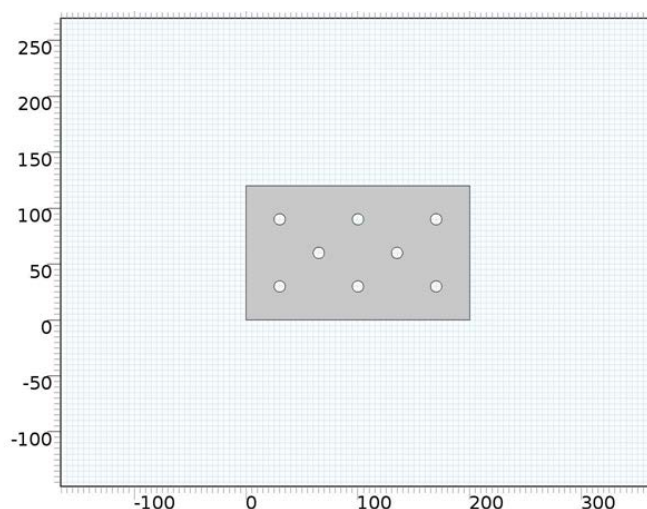
برای ایجاد مدل ابتدا می‌بایست مقادیر هندسی آن را به مدل وارد نمود. لذا در این قسمت منافذی که از آنها گاز منتشر می‌شود را درون بلوک زغال ترسیم نموده و فرض می‌کنیم تعداد ۸ منفذ گازی درون یک بلوک ۱۲۰×۲۰۰ میلی‌متر مربع زغال وجود دارد. هندسه و داده‌های مورد نیاز به

صورت شکل ۲-۶ وارد نرم افزار شده است. تعداد مرزهای موجود و ابعاد در جداول سمت چپ این شکل ارائه شده است.

Length unit	mm
Angular unit	deg

Name	Value
Width	200
Height	120

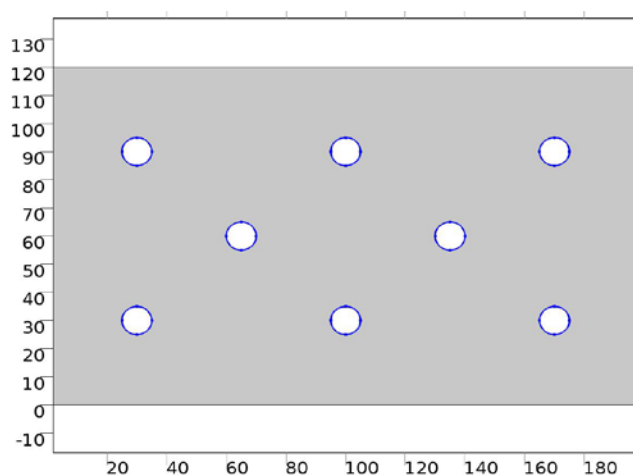
Property	Value
Space dimension	2
Number of domains	1
Number of boundaries	36
Number of vertices	36



شکل ۲-۶- هندسه و داده های مورد نیاز مدل

۲-۶-۶- جنس مواد

در این مدل منافذ دارای گاز متان بوده و از آن مقدار مشخصی گاز متان در حال تصاعد می باشد و بلوک مستطیلی زغال سنگ نشان داده شده است. (شکل ۳-۶)



شکل ۳-۶- منافذ دارای گاز متان و بلوک زغالی مدل شده

مشخصات و پارامترهای گاز متان درون نرم افزار به صورت پیش فرض موجود بوده و از آن برای سیال و یا گاز مورد نظر درون زغال استفاده می شود (جدول ۶-۱).

جدول ۶-۱- پارامترهای پیش فرض گاز متان در نرم افزار کامسول

پارامتر	مقدار
هدایت گرمایی ^۱	$\{k_{gas_2}(T[1/K])[W/(m*K)], 0, 0\}, \{0, k_{gas_2}(T[1/K])[W/(m*K)], 0\}, \{0, 0, k_{gas_2}(T[1/K])[W/(m*K)]\}$
ظرفیت حرارتی در فشار ثابت ^۲	$C_{gas_2}(T[1/K])[J/(kg*K)]$
HC	$HC_{gas_2}(T[1/K])[J/(mol*K)]$
VP	$VP(T[1/K])[Pa]$
ضریب گرانروی دینامیکی ^۳	$eta_{gas_2}(T[1/K])[Pa*s]$

از آنجائی که مشخصات و پارامترهای زغال سنگ درون نرم افزار به صورت پیش فرض نبوده و می بایست مقادیر آن وارد شود لذا از نتایج فصل های گذشته استفاده نموده و مقادیر نفوذپذیری، تخلخل، چگالی و ویسکوزیته دینامیکی که پارامترهای اصلی در میزان انتشار گاز می باشند به صورت جدول ۶-۲ وارد مدل تهیه شده می شوند.

جدول ۶-۲- پارامترهای موثر در میزان حرکت مولکول های گاز

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

¹ Thermal conductivity

² Heat capacity at constant pressure

³ Dynamic viscosity

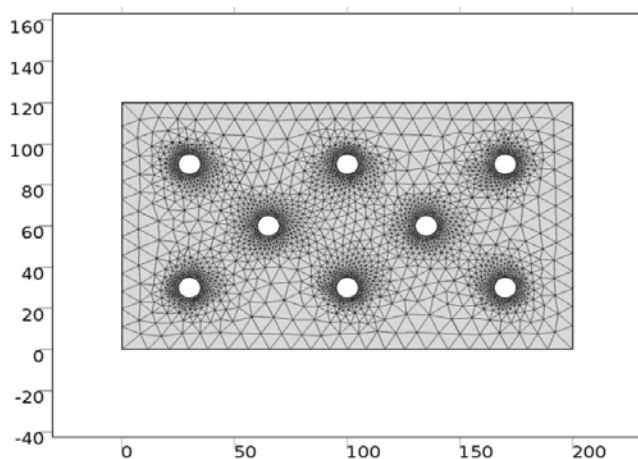
⁴ density

۳-۶-۶- معادلات عددی مدل

با وارد نمودن مشخصات زغال و گاز متان، می‌بایست نوع حرکت سیال درون بلوک متخلخل را برای نرم‌افزار مشخص نمود. بر اساس معادلات ذکر شده در ابتدای فصل در مورد انتشار گاز متان درون زغال که از قوانین داریسی و فیک و اصل کلینکنبرگ تبعیت می‌کنند، لذا درون نرم‌افزار گزینه جریان درون منافذ و درزه‌ها را انتخاب نموده و پس از مشاهده معادلات حاکم بر این جریان و تأیید آنها و وارد نمودن مقادیر مورد نیاز به ادامه مدل سازی پرداخته می‌شود.

۴-۶-۶- مش‌بندی مدل

پس از وارد شدن اطلاعات مورد نیاز و تکمیل نمودن داده‌ها برای حل مسأله، می‌بایست مدل شبکه‌بندی شود. از آنجائی که نرم‌افزار از طریق روش اجزاء محدود (FEM) عمل می‌نماید مش‌بندی به صورت شکل ۴-۶ بر روی مدل انجام گرفته است. در جدول ۳-۶ اطلاعات حاصل از مش‌بندی و پارامترهای به دست آمده بعد از عملیات به صورت کامل نشان داده شده است.



شکل ۴-۶- مش‌بندی انجام شده بر روی مدل توسط نرم افزار و اطلاعات مربوط به مش‌بندی

جدول ۳-۶- اطلاعات حاصل از مش‌بندی بر روی مدل

مقدار	مشخصات
۰/۶۳۱۸	حداقل کیفیت جزء ^۱
۰/۸۹۲۴	متوسط کیفیت جزء ^۲
۳۵۰۶	تعداد اجزا مثلثی ^۳
۲۰۶	تعداد نقاط مشترک اجزا مثلثی ^۴
۲۸	راس‌های اجزا ^۵
۱۳/۴	بیشترین ابعاد جزء ^۶
۰/۰۶	کمترین ابعاد جزء ^۷
۰/۳	فاکتور انحنا ^۸
۱/۳	حداکثر سرعت رشد جزء ^۹

۶-۶-۵- اجرای مدل و نتایج

پس از اجرای مدل و حل مسأله، نرم‌افزار نتایج به دست آمده را مانند شکل ۶-۵ و ۶-۶ به عنوان خروجی مدل نشان می‌دهد. معمولاً خروجی مدل دارای نمودار مربوط به سرعت و فشار در هر یک از بخش‌های مدل می‌باشد.

¹ Minimum element quality

² Average element quality

³ Triangular elements

⁴ Edge elements

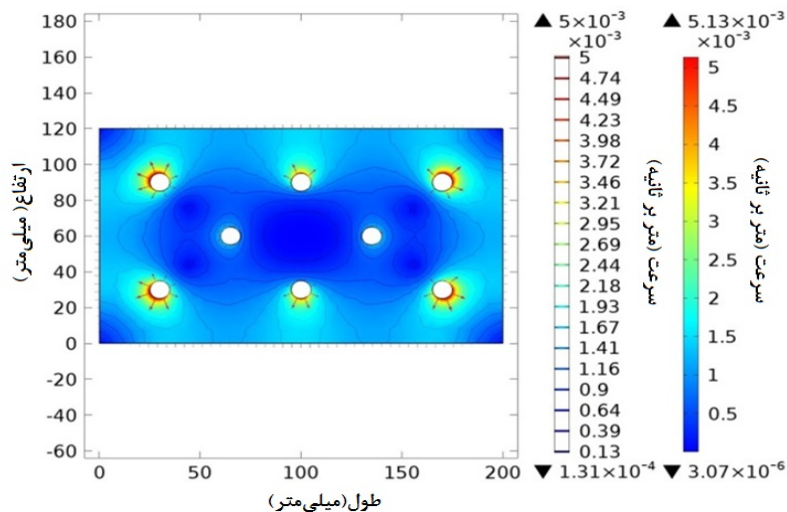
⁵ Vertex elements

⁶ Maximum element size

⁷ Minimum element size

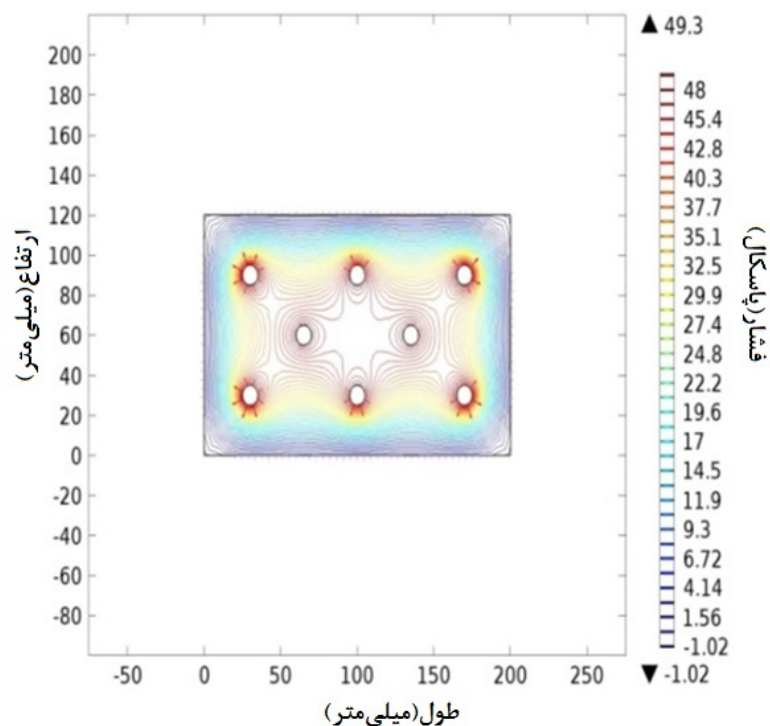
⁸ Curvature factor

⁹ Maximum element growth rate



شکل ۵-۶- سرعت مولکول‌های گاز متان درون بلوک زغالی پس از اجرای مدل

در شکل ۵-۶ مشخص است که سرعت گاز در هنگام خروج از بلوک زغالی ۰/۰۰۱۵ متر بر ثانیه می‌باشد در حالی که سرعت در هنگام انتشار از منافذ ۰/۰۰۵ متر بر ثانیه بوده و این اختلاف در سرعت حرکت مولکول‌ها در میزان فشار گاز خروجی نیز مشاهده می‌گردد. به طوری که فشار گاز از زمان انتشار تا ورود به درزه‌ها در حدود ۵ الی ۶ برابر کاهش یافته است. همچنین مشاهده می‌شود که بیشترین فشار گاز موجود در یک بلوک زغالی مربوط به فضای درونی زغال و محل تجمع منافذ منتشر کننده گاز می‌باشد. این فضا همان فضایی است که در صورت تخلیه نشدن گاز از آن باعث ایجاد انفجار ناگهانی گاز در معدن می‌گردند. از مدل مشخص است که مولکول‌های گاز کمترین فاصله را برای رسیدن به درزه‌ها و فضای آزاد انتخاب می‌کنند. لذا در صورت وجود درزه در یک منبع گازی درون زغال، میزان انتقال مولکول‌های گاز به فضای آزاد افزایش می‌یابد که این پروسه با انجام عملیات شکست هیدرولیکی برای افزایش میزان گاززدایی از زغال صورت می‌گیرد.

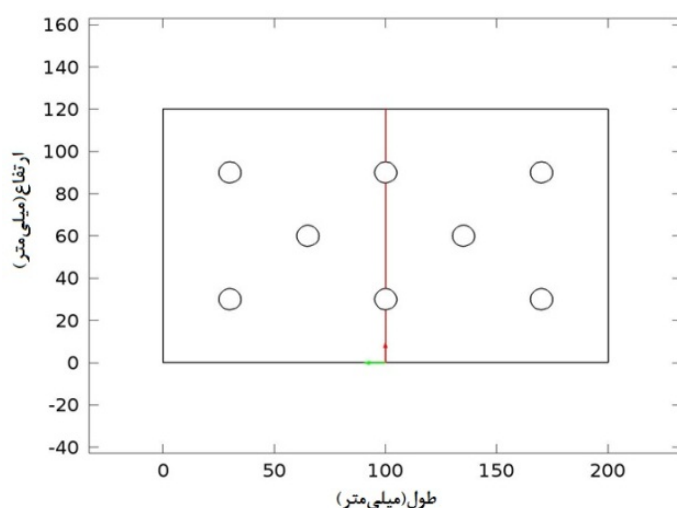


شکل ۶-۶- فشار مولکول‌های گاز متان درون بلوک زغالی پس از اجرای مدل

۶-۶-۶- اعتبار سنجی و مقایسه با نتایج تحقیقات قبلی

برای اعتبارسنجی میبایست مدل را برای معدنی که در حال گاززدایی می باشد اجرا نمود. اما از آنجائیکه در معدن زغال سنگ طبس، عملیات گاززدایی صورت نمی‌گیرد، لذا می بایست نتایج حاصل از مدل را با دیگر تحقیقات صورت گرفته مقایسه نمود تا از صحت مدل اطلاع پیدا کرد. بدین منظور برای مقایسه سنجی، در مدل نمودار سرعت و فشار بر روی یکی از منافذ و همچنین بر روی یکی از درزه‌های موجود در مرز بلوک زغال ترسیم شد. این نمودار میزان سرعت گاز را بر روی درزه نشان می‌دهد و می‌توان آن را با میزان انتشار گاز بر اساس نتایج برداشت شده از سینه‌کارهای استخراجی مقایسه نمود. همچنین، این مقایسه را می‌توان از طریق دیگر مدل‌های ریاضی صورت گرفته در مطالعات قبلی که اعتبار آنها سنجیده شده نیز انجام داد. مقایسه حاصل از این مقادیر نشان دهنده برابری تقریبی آنها می‌باشد.

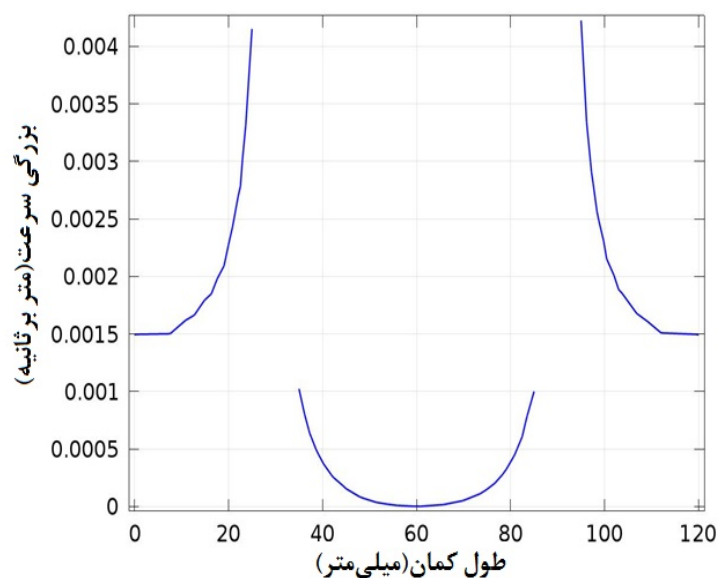
از قابلیت‌های نرم افزار کامسول می‌توان به نمایش تغییرات فشار و سرعت در یک مقطع از بلوک که کاربر مشخص می‌نماید اشاره نمود. در شکل ۶-۷ مقطعی از بلوک زغالی را انتخاب نموده که در این مقطع دو منفذ تولید گاز متان وجود دارد. برای مشاهده تغییرات ایجاد شده در فشار نقاط روی این مقطع و همچنین سرعت مولکول‌های گاز متان بر روی این خط آن را به نرم‌افزار وارد نموده و پس از اعمال تغییرات و اجرای دستورات لازم، نمودار مربوط به فشار و سرعت به صورت جداگانه نمایش داده می‌شود.



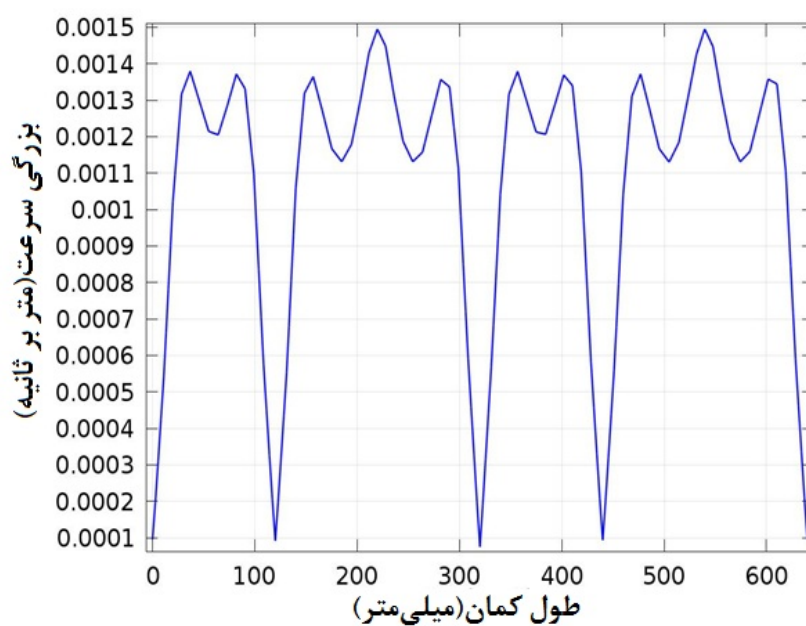
شکل ۶-۷- انتخاب مقطع بر روی زغال جهت نمایش تغییرات فشار و سرعت

نمودار سرعت خروج گاز از دو منفذ و یک درزه در دیواره بلوک زغالی طبس رسم شده است (شکل ۶-۸ و ۶-۹). در این نمودارها رابطه معقولی بین سرعت خروج از منفذ و درزه‌ها وجود دارد. برای اعتبارسنجی میزان سرعت و فشار درون منافذ زغال طبس محاسبه گردیده که سرعت حرکت درون منفذ 0.002 متر بر ثانیه و در درزه‌ها 0.007 متر بر ثانیه تخمین زده شده است (شکل ۶-۱۰) (Taheri and et al, 2016). همچنین مدل جریان گاز که توسط انجمن آمریکایی انرژی‌های مرکب (American Society of Composite Energy, 2014) منتشر شده در شکل ۶-۱۱

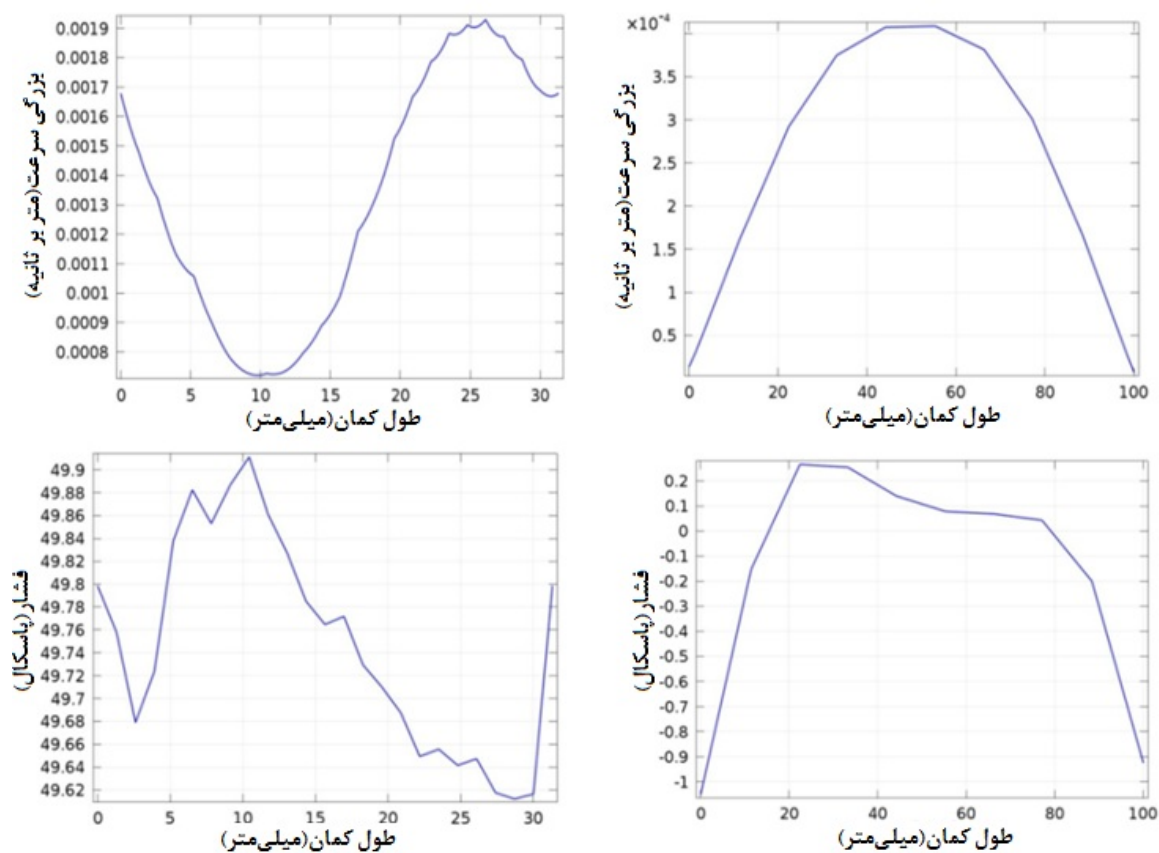
نشان می‌دهد که حرکت مولکول‌های گاز درون یک درزه در یک مدل آنالیز شده به طور متوسط 0.005 متر بر ثانیه می‌باشد (Society of Composite Energy, 2014).



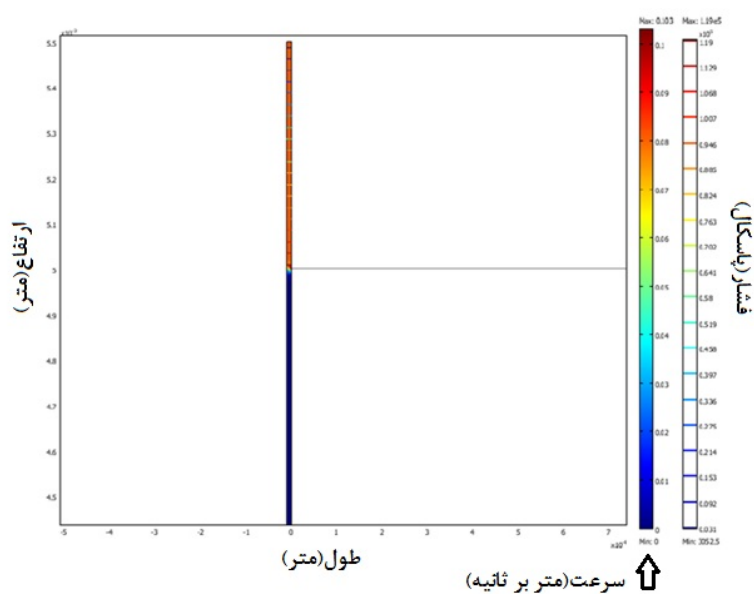
شکل ۶-۸- نمودار سرعت برای یک منفذ در نمونه زغال طبس



شکل ۶-۹- نمودار سرعت برای یک درزه در نمونه زغال طبس



شکل ۶-۱۰- نمودارهای سرعت و فشار برای یک منفذ و درزه در مدل آنالیز شده (Taheri and et al, 2016)



شکل ۶-۱۱- مدل نهایی از حرکت مولکول‌های گاز درون یک درزه برای اعتبارسنجی (Society of Composite Energy, 2014)

۶-۷- جمع بندی

در این فصل، پس از بررسی پارامترهای مورد نیاز برای مدل سازی جریان مولکول های گاز متان در بلوک زغالی، مدل عددی ایجاد شد. نتایج مهم به دست آمده از این مدل را می توان به صورت ذیل بیان نمود:

سرعت حرکت مولکول های گاز متان در نمونه زغال طبس 0.00269 متر بر ثانیه بر اساس پارامترهای ورودی محاسبه گردید.

بر اساس نتایج حاصل از فصول قبل، نمونه زغال دارای ویتروینایت بیشتر دارای نفوذپذیری بالاتری بوده و مولکول های گاز متان درون این نمونه دارای سرعت بیشتری در هنگام انتشار نسبت به نمونه دارای ویتروینایت کمتر می باشد.

بر اساس نوع زغال، از آنجائی که زغال شدگی بیشتر باعث افزایش میزان گاز متان می باشد می توان نتیجه گرفت آنتراسیت با ویتروینایت بالا بهترین زغال جهت گاززدایی متان می باشد.

به همین ترتیب آنتراسیت با ویتروینایت کمتر دارای گاز متان بالا و نفوذپذیری کمتر بوده و احتمال انفجار حاصل از گازهای محبوس را درون زغال افزایش می دهد.

در صورتی که مقدار فشار گاز متان درون منافذ زغال 50 پاسکال (بدون تأثیر فشار اتمسفر) باشد، مقدار فشار گاز در هنگام انتشار به درون درزه ها در زغال با ویتروینایت بیشتر $9/75$ پاسکال برآورد شده است. نفوذپذیری کمتر باعث پائین آمدن فشار گاز خروجی می گردد.

فصل هفتم

نتیجه‌گیری و پیشنهادها

۷-۱- نتیجه گیری

در این رساله سعی بر آن بوده که روند حرکت مولکول‌های گاز متان درون یک بلوک زغالی مدل‌سازی گردد تا با استفاده از این مدل میزان انتشار و نحوه خروج گاز متان از زغال مشاهده شود. این مدل در معادن زغالی که انجام عملیات گاززدایی متان در آنها می‌بایست انجام شود کاربردی بوده و مهندسان معدن را در طراحی چاه‌های گاززدایی، میزان نرخ مکش از چاه و مدت زمان لازم برای مکش از هر چاه به طوری که راندمان بالایی در میزان گاززدایی به دست آید کمک می‌نماید. مدل همچنین توانایی تخمین میزان گاز متان منتشر شده از بلوک زغالی و از سینه کار استخراجی را نیز دارا می‌باشد. این تخمین میزان گاز منتشر شده، برای معادن زغال بسیار حائز اهمیت است. زیرا بر اساس آن می‌توان تهویه لازم برای دور کردن متان از سینه کار و تونل‌های معدن را طراحی نموده و دستگاه‌های تهویه معدن را مشخص کرد. البته تمامی این موارد به مشخص بودن میزان گاز متان درون زغال بستگی داشته که توسط عملیات اکتشافی قبل از باز شدن معدن، میزان گازخیزی مشخص می‌گردد. براساس بررسی‌های صورت گرفته تاکنون نحوه حرکت مولکول‌های گاز درون زغال مدل نشده و نیاز به درک حرکت مولکول‌های گاز در این زمینه وجود داشت. بر این اساس جهت انجام مدل‌سازی نیاز به یک سری پارامترهای مهم و ضروری مشاهده شد که باید تمامی آنها به صورت آزمایشگاهی به دست آمده تا پس از مدل‌سازی و استفاده از این پارامترها، نتایج مدل با واقعیت مطابقت داشته باشد. پارامترهای مورد نیاز شامل نفوذپذیری، تخلخل، میزان گازخیزی زغال، نوع و میزان ماسرال‌های موجود در زغال، درزه‌داری و فاصله درزه‌های زغال از یکدیگر و ... می‌باشد. تمامی این پارامترها به صورت آزمایشگاهی آنالیز شده و از نتایج به دست آمده در پارامترهای ورودی مدل‌سازی در نرم افزار استفاده گردید. مراحل انجام کار به صورت تهیه نمونه استاندارد زغال، تهیه مغزه و مقطع مناسب، انجام آنالیز نفوذپذیری زغال، انجام آنالیز تخلخل زغال، شناسایی ماسرال‌های زغال در مقاطع و تعیین میزان تأثیر آنها در نفوذپذیری، عکس‌برداری سه بعدی و تعیین فاصله درزه‌داری زغال و همچنین مطالعه میزان گازخیزی زغال می‌باشد. در فصل‌های قبلی تمامی این پارامترها به تفصیل توضیح داده شده و نحوه محاسبه هر یک بیان گردیده است. بر اساس آزمایشات انجام شده، میزان نفوذپذیری زغال معدن پروده طبس به طور میانگین

حدود ۲۰ میلی داری، میزان تخلخل حدود ۰/۴۲، ماسرال های زغال طبس به ترتیب شامل ۸۰/۰۷ درصد ویتروینایت و ۱۱/۱۸ درصد اینترتینایت و ۲/۷ درصد پیریت، فاصله درزه داری بر اساس عکس برداری سه بعدی برای درزه های افقی ۲۰ الی ۳۰ میلی متر و درزه های عمودی ۱۵ الی ۲۵ میلی متر محاسبه شد. پس از تعیین تمامی پارامترهای مورد اشاره، آنها را در مدل وارد نموده و پس از مشخص نمودن سیستم جابه جایی سیال و تعریف آن برای نرم افزار، نتایج به دست آمد. سرعت حرکت مولکول های گاز متان در نمونه زغال پروده طبس ۰/۰۰۲۶۹ متر بر ثانیه به دست آمد. نتایج مورد بررسی و تفسیر قرار گرفته و نقاط پرفشار و بحرانی و همچنین سرعت مولکول های گاز در زمان خروج از بلوک زغالی و همچنین وضعیت هر یک از مناطق بلوک زغالی نشان داده شد.

۷-۲- پیشنهادها

بر اساس آزمایش ها و تحقیقات صورت گرفته در این رساله، پیشنهادهای زیر مطرح می شود:

۱- پارامترهای دیگر زغال سنگ شامل بازشدگی درزه ها، میزان رطوبت محتوا، نوع گازهای موجود در زغال، عمق زغال درجا و فشار سنگ های روباره و ... در میزان انتشار گاز متان از زغال تاثیر دارند. لذا پیشنهاد می شود که در آینده تاثیر این گونه پارامترها نیز بر روی میزان انتشار و مدل ایجاد شده مورد مطالعه قرار گیرد.

۲- برای مشخص نمودن میزان تهویه لازم برای گاززدایی متان از سینه کار استخراجی، لازم است در معدن زغالی که عملیات گاززدایی در آن در حال انجام می باشد پارامترها مورد بررسی قرار گرفته و میزان تهویه لازم را بر اساس مدل ایجاد شده مورد آزمون سعی و خطا قرار گیرد و الگوریتم خاصی برای تهویه معادن زغال بر اساس تحقیقات به وجود آید.

۳- با توجه به اینکه مولکول های گاز از ریزدرزه ها به درزه های اصلی و سپس چاه مکش گاز منتقل می شوند، پیشنهاد می شود جریان حرکت گاز از درزه های اصلی به چاه مکش نیز با شناسایی پارامترهای موثر شبیه سازی شود.

۴- پیشنهاد می شود بر اساس یافته ها و پارامترهای به دست آمده از این تحقیق، پدیده وقوع تصاعد آنی گاز متان در زغال بررسی شود.

منابع

اسدالله زاده ک، (۱۳۷۰)، کیفیت زغالسنگ، طرح مطالعات تأمین زغالسنگ طرح های توسعه فولاد، وزارت معادن و

فلزات شرکت ملی فولاد ایران

اصانلو م، (۱۳۷۸)، مهندسی زغال سنگ، انتشارات ناقوس، تهران

آقانباتی س ع، (۱۳۸۳)، زمین شناسی ایران، سازمان زمین شناسی و اکتشافات معدنی کشور، تهران

برزگر ه، پورهنک، (۱۳۶۱)، گزارش اکتشافات تفصیلی زغال پروده I طبس، جلد چهارم صفحه ۲۸۹ الی ۳۱۲

توکلی م، سرشکی ف، (۱۳۸۵)، گاز زغال و روش های کاهش آن (گاززدایی) در معدن پروده طبس، پنجمین کنفرانس

دانشجویی مهندسی معدن، صفحات ۶۵۳-۶۶۴

دوست فاطمه م، (۱۳۸۱)، محدوده های زغال خیز ایران ونگرشی بر روش های استخراج و بررسی امکان پذیری

مکانیزاسیون در معادن زغالسنگ ایران، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشکده معدن، دانشگاه صنعتی شاهرود

رضایی ب، (۱۳۸۰)، تکنولوژی زغالشویی، انتشارات دانشگاه صنعتی امیرکبیر (پلی تکنیک تهران)

سرشکی ف، حسینی م ع، (۱۳۸۶)، بررسی عوامل سنگ شناسی موثر بر انفجار گرد زغال در معادن ایران، بیست و

ششمین گردهمایی علوم زمین، سازمان زمین شناسی و اکتشافات معدنی ایران

شرکت ملی ذوب آهن ایران، (۱۳۵۶)، نتایج تحقیقات اکتشافی منطقه پشکلات، جلد اول

طارق الف، مترجم قاسمی ص، (۱۳۸۹)، مهندسی مخازن هیدروکربوری (کتاب جامع)، شرکت ملی نفت ایران

طاهری ع، سرشکی ف، (۱۳۹۲)، افزایش ایمنی و راندمان اقتصادی با تولید انرژی از سوخت متان حاصل از عملیات

گاززدایی معدن زغال سنگ طبس، پنجمین کنفرانس سوخت و احتراق ایران، دانشگاه علم و صنعت ایران

گزارش عملیات اکتشاف ناحیه زغال دار پروده، (۱۳۷۶)، دفتر فنی معدن زغال سنگ پروده طبس

فضل م، بختیار الف، (۱۳۶۱)، گزارش اکتشافات تفصیلی زغال سنگ پروده I طبس، جلد سوم و چهارم صفحه ۱۶۱ الی

۲۸۸

محمدی ح، آقاجانی ح، نجفی م، (۱۳۹۰)، اولویت بندی بهره برداری از مناطق مستعد زه کشی گاز متان در حوضه زغالی

البرز شرقی با استفاده از فرآیند تحلیل سلسله مراتبی، فصل نامه زمین شناسی کاربردی، دانشگاه آزاد اسلامی

واحد زاهدان، سال ۷ شماره ۲ صفحات ۱۶۷-۱۷۶

محمودی خ، (۱۳۹۰)، بررسی تاثیر ماسرال های زغال سنگ در فرآیند فلوتاسیون زغال های مختلف منطقه البرز شرقی،

پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود

معین السادات س.ح ، رضوی ارمغانی م ب، (۱۳۷۲)، زمین شناسی ایران (زغال سنگ)، انتشارات سازمان زمین شناسی

و اکتشافات معدنی کشور

میرجردوی ن، حریمی ب، (۱۳۹۳)، مهندسی مخازن، جلد یک و دو ، انتشارات راهیان ارشد

یزدی م، (۱۳۸۲)، زغال سنگ (از منشاء تا اثرات زیست محیطی)، انتشارات جهاد دانشگاهی

Alexeev A.D, Feldman E.P, Vasilenko T.A, (2007), Methane desorption from a coal-bed, International Journal of Fuel, vol 86, pp. 2574-2580

Alonso A.L, (2012), Coal gasification in entrained flow gasifiers simulation & comparison, Master of Science Thesis, Munich University of Technology, Germany.

Andersen M.A, (2003), Oilfield Review Schlumberger Autumn

Arenas A.G, (2004), DEVELOPMENT OF GAS PRODUCTION TYPE CURVES FOR COALBED METHANE RESERVOIRS, Thesis Submitted to the College of Engineering and Mineral Resources At West Virginia University.

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

Aziz N, Porter I, Sereshki F, (2010), Impacts of coal shrinkage, permeability and petrography on gas regime in mines Case study: Tahmoor coal mine, NSW, Australia. International Journal of Mining & Environmental Issues, Vol 1, No 1

Balan H.O, Gumrah F, (2009), Assessment of shrinkage-swelling influences in coal seams using rank-dependent physical coal properties, International Journal of Coal Geology

Bing W, Mingguo H, Xiaoyan F, Shigang G, (2012), Study on methods of determining gas extraction radius with numerical Simulation, 2012 International Symposium on Safety Science and Technology, Procedia Engineering 45, pp. 345 – 351.

Black D, Aziz N, (2009), Reducing Coal Mine GHG Emissions through Effective Gas Drainage and Utilisation. 2009 Coal Operators Conference, Australian Institute of Mining and Metallurgy, Illawarra Branch, pp. 217-224

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

Bunch B.H, (2008), Current Science, Vol.94, No.1

- Bustin R.M, Cameron A.R, Grieve D.A and Kalkreuth W.D, (1983), Coal Petrology, Its Principles, Methods and Applications, Canadian Geological Association, St. Johns, Vol. 3, p. 230
- Calhoun J.R, (1976), Fundamentals of reservoir engineering, university of Oklahoma press
- Changbao J, Guangzhi Y, Wenpu L, Qixiang H,(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
- Chen K.C, Irawan S, Sum C.W, Tunio S.Q, (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, Vol. 1, No. 2, pp. 82-94
- Chui E.H, Majeski A.J, Lu Y, Hughes R, Gao H, McCalden D.J, Anthony E.J, (2009), Simulation of Entrained Flow Coal Gasification, Energy Procedia 1, pp. 503-509.
- Cole F, (1969), Reservoir engineering manual, Houston, Gulf publishing company
- COMSOL Multiphysics software, (2016), Discrete Fracture, Created in COMSOL Multiphysics 5.2.a, www.comsol.com/trademarks
- Cornejo P, Farias O,(2011), Mathematical Modeling of Coal Gasification in a Fluidized Bed Reactor Using a Eulerian Granular Description, International Journal of Chemical reactor engineering, vol 9, Article A2
- Creedy D.P, Phillips H.R, (1997), Methane Layering in Bord and Pillar Workings, Safety in Mines Research Advisory Committee (SIMRAC) Final Report, Project COL 409, Johannesburg, South Africa: Safety in Mines Research Advisory Committee
- Cui X, Bustin R, (2006), Controls of coal fabric on coalbed gas production and compositional shift in both field production and canister desorption tests, SPE Journal. Vol 11, p. 111-119
- Dai S, Zhao L, Peng S, Chou C.L, Wang X, (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
- Dalla Torre M, Mahlmann R.F, Ernst W.G, (1997), Experimental study on the pressure dependence of vitrinite maturation, Geochim. Cosmochim. Acta 61, p. 2921–2928
- Denis J, Pone N, Halleck P, Mathews J, (2009), Methane and Carbon Dioxide Sorption and Transport Rates in Coal at In-situ Conditions, Energy Procedia 1, pp. 3121-3128.
- Dhir R, Dern R.R, Mavor M.J, (1991), Economic and reserve evaluation of Coalbed Methane Reservoirs: Society of petroleum engineers, Paper No. 22024, Texas, USA

- Diamond, W.P, Levine J.R, (1981), Direct Method of Determination of the Gas Content of Coal: Procedures and Results. Report of Investigation 8515, Pittsburgh, PA (U.S.): United States Department of the Interior, Bureau of Mines.
- Janas, Opahle. Control of gas emissions in underground coal mines
- Diamond W.P, Schatzel S.J, (1998), Measuring the Gas Content of Coal: A Review. International Journal of Coal Geology 35, pp. 311 – 331. Amsterdam: Elsevier
- Dongling S, Qianting H, Fatian M, (2011), A Mathematical Model of Coal-gas Flow Conveying In the Process of Coal and Gas Outburst and Its Application, First International Symposium on Mine Safety Science and Engineering, Procedia Engineering 26, pp. 147 – 153.
- Dron R.W, (1925), Notes on cleat in the Scottish coalfield. Trans. Inst. Min. Eng. 70, 115–117.
- ECE Energy Series, 2010, Best Practice Guidance for Effective Methane Drainage and Use in Coal Mines, United Nation Publication, ISBN 978-92-1-117018-4
- ESMAP, (2007), a Strategy for Coal Bed Methane (CBM) and Coal Mine Methane (CMM) Development and Utilization in China: Formal Report 326/07, pp. 109. Washington, D.C.: The International Bank for Reconstruction and Development (IBRD)/WORLD BANK Energy Sector Management Assistance Program (ESMAP)
- Feng Q, Shi H, Zhang X, Du P, Zhang J, (2012), new inflow performance relationship for coalbed methane wells, Society of Petroleum Engineers, SPE 152163
- Gamson P.D, Beamish B.B, (1992), Coal type, microstructure and gas flow behavior of Bowen Basin coals, Symposium on Coalbed Methane Research and Development in Australia, Coalseam Gas Research Institute – James Cook University, Townsville, 19-21 November, v. 4, p 43-64
- Gamson P.D, Beamish B.B, Johnson D.P, (1992), Coal microstructure and micro permeability and their effects on natural gas recovery. Fuel Journal Vol. 72
- 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 , pp. 1456-1461.
- Gash B.W, (1991), Measurement of Rock Properties in coal for coalbed methane production, 66th annual technical conference and exhibition of the society of Petroleum Engineers, Dallas, USA
- Gaurav K, Husen A, Saada T, Kumar S, (2012), Performance Analysis in Coal Seam Gas, the SPETT 2012 Energy Conference and Exhibition held in Port of Spain, Trinidad.

- Gheisari N, Sereshki F, Rafie M, (2012), Evaluation of the effect of macerals on coal permeability, 1th Iranian Coal Congress.
- Gilman A, Beckie R, (2000), Flow of coal-bed methane to a gallery. *Transport in Porous Media* 41 (1), 1–16
- Gray I, (1987a), *Reservoir Engineering in Coal seams: The Physical process of gas storage in movement in coal seams: Society of petroleum engineers Reservoir Engineers*
- Gray I, (1987b), *Reservoir Engineering in Coal seams: Observations of gas movement in coal seams: Society of petroleum engineers Reservoir Engineers*
- Gurdal G, (2008), Geochemistry of trace elements in Can Coal (Miocene), Canakkale, Turkey. *International Journal of Coal Geology*. Vol 74, pp 28-40
- Hai-jin W, Bai-quan L, Qian Y, (2009), The theory model and analytic answer of gas diffusion, *The 6th International Conference on Mining Science & Technology, Procedia Earth and Planetary Science* 1, pp. 328-335.
- Han Z, Krug M.A, Crelling J.C, Bensley D.F, (1999), Classification of torbanite and cannel coal, I. Insights from petrographic analysis of density fractions, *International Journal of Coal Geology*, Vol. 38, Nos. 3-4, pp. 181-202
- 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, pp. 934-941.
- Harpalani S, Schraufnagel R.A, (1990), Shrinkage of Coal Matrix with Release of Gas and its Impact on Permeability of Coal. *Journal of Fuel*, Vol 69, pp. 551-556
- Harpalani S, Schraufnagel R.A, (1990), Cleats and their relation to geologic lineaments and coalbed methane potential in Pennsylvanian coals in Indiana. *International Journal of Coal Geology*
- Harpalani S, Zhao X, (1991), *Energy Sources*, Vol 13
- Hattangady N.V, Fridy J.M, Rao Vemuri K, Dick K.R, (1999), Image Processing to Automate Mesh Generation, *Journal of engineering with computers*, Volume 15, Issue 2, pp 127–136
- Holditch S.A, (1989), *Enhanced Recovery of Coalbed 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

- Hower J.C, Wagner N.J, O'keefe J.M.K, Drew J.W, Stucker J.D, Richardson A.R, (2012), Maceral types in some Permian southern African coals, International Journal of Coal Geology, Vol 100, pp 93- 107
- ICCP (International Committee for coal and organic petrology), (1998), the new vitrinite classification (ICCP System 1994), Fuel, Vol 77, pp. 349- 358
- ICCP (International Committee for coal and organic petrology), (2001), the new Inertinite classification (ICCP System 1994), Fuel, Vol 80, pp. 459- 471
- International Standard ASTM D4596, (1999), Standard Practice for collection of channel samples of coal in a mine, p.7
- International Standard, ISO 7404-3, (2003), Methods for the Petrographic analysis of bituminous coal and anthracite, Part 3; Method of determining maceral group composition, Praha; Cesky Normalization Institute, p. 12
- IPCC, (2007), Climate Change 2007: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, Pachauri, R.K and Reisinger, A. (Eds.)]. Geneva, Switzerland: International Panel on Climate Change (IPCC)
- Janas H.F, Opahle M, (1986), Improvement of Gas Content Determination. Glückauf-Forschh 47, pp. 83 – 89. Essen, Germany
- Janoszek T, Laczny M.J, Stanczyk K, Smolinski A, Wiatowski M, (2013), Modelling of gas flow in the underground coal gasification process and its interactions with the rock environment, 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.
- Jianlin X, Yangsheng Zh, Xiangchun L, Dong Zh, Chuantian L, Fei Zh, Qinqin Zh, (2011), The experiment of gas adsorption and desorption under the action of high temperature and high pressure water, First International Symposium on Mine Safety Science and Engineering, Procedia Engineering 26, pp. 1547- 1553.
- John Black D, (2011), Factors affecting the drainage of gas from coal and methods to improve drainage effectiveness, University of Wollongong Thesis collections
- Jones S.C, (1972), A rapid accurate unsteady state Klinkenberg parameter, SPEJ, Vol 12, No 5, pp. 383-397

- Karacan O.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.
- Karacan O.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 O.C, (2009), Reconciling longwall gob gas reservoirs and venthole production performances using multiple rate drawdown well test analysis, *International Journal of Coal Geology* 80, pp. 181–195.
- Karn F.S, Friedel R.A, Thames B.M, Sharkey A.G, (1969), Gas Transport through sections of solid coal.Pittsburgh Coal Research Centre Bureau of Mines US Department of the Interior
- Kendall P.F, Briggs H, (1933), the formation of rock joints and the cleat of coal. *Proc. Royal Society of Edinburgh* 53, 164–187
- Kissell F.N, (2006), Handbook for Methane Control in Mining. Pittsburgh, PA (U.S.): Pittsburgh Research Laboratory, National Institute for Occupational Safety and Health
- Klinkenberg L.J, (1941), the permeability of porous media to liquids and gases, *API drilling and production practice*, p.200
- Kulander B.R, Dean S.L, (1993), Coal-cleat domains and domain boundaries in the Allegheny Plateau of West Virginia. *AAPG Bull.* 77, 1374–1388
- Lama R.D, Bodziony J, (1996), Outburst of Gas, Coal and Rock in Underground Coal Mines, Westonprint Pub., Kiama, NSW, Australia, 499 P
- Lama R.D, Nguyen V.U, (1987), A Model for Determination of Methane Flow Parameters in Coal from Desorption Tests, the Twentieth International Symposium on the Application of Computers and Mathematics in the Mineral Industries. Volume 1: Mining. Johannesburg, SAIMM, pp. 275 - 282.
- Laubach S.E, Marrett R.A, Olsen J.E, Scott A.R, (1998), Characteristics and origins of coal cleat: A review. *International Journal of Coal Geology*, vol 35, pp 175-207
- Laubach S.E, Tremain C.M, Ayers W.B, (1991), Coal fracture studies: Guides for coalbed methane exploration and development. *Journal of Coal Quality*.vol 10, pp 81–88
- Laubach S.E, Tremain C.M, (1991), Regional coal fracture patterns and coalbed methane development. In: Roegiers J.-C, Ed. *Proc. 32nd U.S. Symp. Rock Mech.* Balkema, Rotterdam, pp. 851–859

- Le Y, Fei L, Xiaoping Zh, Xiaoke W, Xiaonan D, Binfeng S, (2014), Progress in the studies on the greenhouse gas emissions from reservoirs, *Acta Ecologica Sinica* 34. PP 204 – 212.
- Leisle A.V, Kovalski E.R, (2016), Complex Extraction of Methane and Coal from Thick Coal Seams, *Research Journal of Pharmaceutical, Biological and Chemical Sciences*, Vol 7, No 3, Page No. 1660
- LI G.j, (2009), Theoretical research and practice on coal mine methane extraction and ground development design, *Procedia Earth and Planetary Science* 1 .PP 94–99
- Li H, Cheng Y, Zhang 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, pp. 934-941
- 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, pp. 331 – 337.
- Liu H, Yu F, Yin R, Liu R, (2011), Effects of geologic condition to mine gas distribution and control measures, *Procedia Earth and Planetary Science* 3, pp. 355-363
- Liu Y, Gupta R, Sharma A, Wall T, Butcher A, Miller G, Gottlieb P, French D, (2005), Mineral matter-{organic matter association characterization by QEMSCAN and applications in Coal utilization. *Journal of Fuel*, Vol 84, 1259-1267
- 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.
- Lu J, (1998), a mathematical model of horizontal wells productivity and well testing analysis, *Master of Science in mathematics Thesis*, Virginia Polytechnic Institute and State University, USA
- Luke D.C, Zhejun P, Meng Sh, Michael C, David D, Carrasa J, Zhang W, Fu X, Guo B, Briggs C, Luptona N, (2013), Description of a CO₂ enhanced coal bed methane field trial using a multi-lateral horizontal well, *Energy Procedia* 37 , PP 6760 – 6768
- Lunarzewski L.W, (2001), Gas Drainage Practices, *Coal 2001, Coal Operators' Geotechnology Colloquium*, University of Wollongong & the Australasian Institute of Mining and Metallurgy, pp. 34-44
- MacDonald G.J, (1990), the future of methane as an energy resource, *Annual Review of Energy* Volume 15 Virginia (USA)
- Maps of world, (2017), Coal Mining: A Deadly Profession, Ten deadliest coal mining disasters, www.mapsofworld.com

- Markowski A.K, (1998), Coalbed methane resource potential and current prospects in Pennsylvania, *International Journal of Coal Geology* 38
- Mavko G, Mukerji T, Dvorkin J, (2009), the Rock Physics Handbook, Second edition – Tools for seismic analysis in porous media, Cambridge University Press
- Mazumder S, Herment P.V, Bruining J, Wolf K.H.A.A, (2001), a preliminary model of CO₂ sequestration in coal for improved coalbed methane production. The 2001 Alabama Coalbed Methane Symposium
- McCants C.Y, Spafford S, Stevens S.H, (2001), Five spot Production Pilot on Tight Spacing: Rapid Evaluation of Coalbed Methane Block in the Upp.er Silesian Coal Basin, Poland. The 2001 Alabama Coalbed Methane Symposium
- Methane to Market Partnership, (2009), International Coal Mine Methane Projects Database, www.methanetomarkets.org
- Moreby R, (2009), Private communications about Coal bed methane by United Nation
- Muskat M, (2004), A Note on the Melcher-Nutting Method for the Measurement of the Total Porosities of Consolidated Sands, *Review of scientific instruments*, vol 7, issue 12
- Najafi M, Mohammadi H, Aghajani H, (2012), Pre-Feasibility Study of Coal Bed Methane Drainage in Iran Coal Basins, 1th Iranian Coal Congress.
- Ojha K, Karmakar B, Mandal A, Pathak A.K, (2011), Coalbed methane in India: Difficulties and prospects, *International Journal of Chemical Engineering and Applications*, Vol.2, No. 4, pp. 256-260
- Orem W.H, Finkelman R.B, (2004), Coal Formation and Geochemistry In: Mackenzie, F.T. (Ed.) *Treatise on Geochemistry* 7, Elsevier, pp 191-222
- Ozdemir E, (2009), Modeling of coal bed methane (CBM) production and CO₂ sequestration in coal seams, *International Journal of Coal Geology* 77, pp. 145–152.
- Packham R, Connell L, Cinar Y, Moreby R, (2012), Observations from an enhanced gas recovery field for coal mine gas management, *International Journal of Coal Geology*, Vol 100 , pp 82- 92
- Palmer I, Mansoori J, (1996), How Permeability Depends on Stress and Pore Pressure in Coalbeds, a New Model, SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Society of Petroleum Engineers, Inc, Denver, Colorado
- Perko J, Seetharam S, Mallants D, (2011), Verification and validation of flow and transport in cracked saturated porous media, proceeding of the 2011 COMSOL conference in Stuttgart

- Pini R, Marx D, Burlini L, Storti G, Mazzotti M, (2011), Coal characterization for ECBM recovery: gas sorption under dry and humid conditions, and its effect on displacement Dynamics, *Energy Procedia*, pp. 2157-2161.
- 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.
- Rice D.D, (1993), Composition and origins of coalbed gas, chapter 7 of book: *Hydrocarbon from coal*, *Study in Geology*, v.38, p. 159-184
- Robeck E, Huo D, (2016), A more accurate method for estimating in situ coal density and mineral matter from ash and specific energy determinations, *International Journal of Coal Geology*, Vol 168, Part 2, pp 237- 252
- Robert M, (2002), Coal bed methane (CBM) and minemethane (CMM) in North America where and why, *Norwest Mine Services*, (www.ipeec.utulsa.edu)
- Rodrigues C.F, Laiginhas C., Fernandes M, Lemos de Sousa M.J, Dinis M.A.P, (2014), The coal cleat system: A new approach to its study, *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering* 6 , PP 208 – 218.
- Russell, B.H, Smith T, (2007), the relationship between dry rock bulk modulus and porosity – An empirical study: *CREWES Report*, Volume 19
- 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. 917–922.
- Schweinfurth S.P, (2002), Coal—A Complex Natural Resource An overview of factors affecting coal quality and use in the United States,u.s. geological survey, Eastern Region publication, p.39
- Seidle J.R, Huitt L.G, (1995), Experimental Measurement of Coal Matrix Shrinkage due to Gas Desorption and Implications for Cleat Permeability Increases. *SPE International Meeting on Petroleum Engineering*, Beijing, pp. 14-17
- Seifi M, (2014), Simulation and Modeling of Underground Coal Gasification Using Porous Medium Approach, PhD Thesis in Chemical and Petroleum Engineering, University of Calgary, Alberta, Canada

- Sereshki F, (2005), Improving coal mine safety by identifying factors that influence the sudden release of gases in outburst prone zones. University of Wollongong PhD Thesis collection
- Sevket D, Mustafa A, Amer S, Ji-Quan Sh, Anna K, (2013), Two phase relative permeability of gas and water in coal for enhanced coalbed methane recovery and CO₂ storage, Energy Procedia 37, PP 6730 – 6737.
- Shariat Nia H, (1993), Geological characteristics of the Parvadeh region of the Tabas coal – bearing basine, Central, Iran, Unpublished Tex, 22p
- Shi J.Q, Durucan S, (2004), Drawdown induced changes in permeability of coalbeds: a new interpretation of the reservoir response to primary recovery. Transport in Porous Media 56 (1), pp.1–16
- 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
- Smith M.L, Senjen R, (2011), Hydraulic Fracturing in Coal Seam Gas Mining: The Risks to Our Health, Communities, Environment and Climate, Working globally for a toxic free future, www.ntn.org.au, NSW, Australia
- Smoot L.D, Pratt D.T, (1979), Pulverized Coal combustion and Gasification, Theory and application for continuous flow processes, Book printed in Springer science and business media New York, USA
- Society of Composite energy, (2014), Mathematical Modeling of Methane Flow in Coal Matrix, Pennsylvania, USA
- Soeder D.J, (1991), the effects of overburden stress on coalbed methane production. Published In: Techbook, Geology in Coal Resources Utilization
- Song L, Dazhen T, Hao X, Zi Y, (2012), The pore-fracture system properties of coalbed methane reservoirs in the Panguan Syncline, Guizhou, China, GEOSCIENCE FRONTIERS 3(6) , PP 853- 862.
- 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
- Stach E, (1982), Coal Petrology, vol. 3, by Gebruder Borntraeger, Berlin, p. 471
- Taheri A, Sereshki F, Doulati F.A, Mirzaghobanali A, (2016), Numerical modeling of gas flow in coal pores for methane drainage, Journal of Sustainable Mining.Vol 15, Issue 3, pp. 95-99
- Tavakoli M, Sereshki F, (2009), Coal gas and Gas drainage methods for Tabas Coal Mine (Parvadeh), 5th Iranian Mining Students Congress.

- Taylor G.H, (1967), the behavior of inertinite during carbonization”, Fuel, Vol. 46, pp. 431-440
- Thakur P, Aminian K, Schatzel S, (2014), Coal Bed Methane from Prospect to Pipeline, Handbook, printed in Elsevier Publication center
- 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.
- Tiegang F, Guangqing Zh, Jinbang C, (2014), the impact of cleats on hydraulic fracture initiation and propagation in coal seams. Pet. Sci. (2014)11:532-539
- U.S. Environmental Protection Agency, (2009), Analysis of international best practices for coal mine methane recovery and utilization
- Ulery P.J, (1988), Geologic factors influencing the gas content of coal beds in Southwestern Pennsylvania, Report of investigations 9195, United state department of the interior, Bureau of Mines
- Uszko M, (2009), Monitoring of methane and rockburst hazards as a condition of safe coal exploitation in the mines of Kompania Węglowa SA, The 6th International Conference on Mining Science & Technology, Procedia Earth and Planetary Science 1 , PP 54–59.
- Vassileva C.G, Vassilev S.V, (2006), Behaviour of inorganic matter during heating of Bulgarian coals.2. Subbituminous and bituminous coals, Journal of Fuel Process.Technology.Vol 87, pp1095-1116
- Von Schoenfeldt H, (2008), Advanced CMM and CBM Extraction Technologies, CBM Conference, Singapore
- Wang F, Ren X.T, Hungerford F, Tu SH, Aziz N, (2011), Advanced directional drilling technology for gas drainage and exploration in Australian coal mines,Procedia Engineering 26 , pp. 25-36.
- WANG Zh, CHEN X, XING Sh, (2014), Study on stress field distribution characteristics under coal seam pre-splitting blasting, 2014 International Symposium on Safety Science and Technology, Procedia Engineering 84 .PP 913 – 919.
- Wenping J, Zhisheng Ch, Siqing S, Weicheng L, (2011), Variation of Gas Content in Coalbed Methane Development, Procedia Earth and Planetary Science 3 . PP 131 – 137.
- Wyman R.E, (1984), Gas resources in Elsworth coal seams, Elsworth: Case Study of a Deep Basin Gas Field, American Association of Petroleum Geologists Memoir

- Wu H, Lin B, Yao Q, (2009), the theory model and analytic answer of gas diffusion, the 6th International Conference on Mining Science & Technology, Procedia Earth and Planetary Science1, pp. 328-335
- Xi-sheng A, (2012), Theory of gas extraction from coal seams and its use, urnal of coal science & engineering, Vol.18 No.3 Sep. 2012, pp. 276–279
- Xiao C, Mingjin L, Tian L, Zhao Ch, Yanchen W, (2014), A New Method of Productivity Model for Coal bed Methane under Steady state Based on Equivalent Continuous Media Theory, Journal of Petroleum Science Research (JPSR) Volume 3 Issue 4, pp 189-196.
- 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, PP 338 – 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.L, Da-peng ZH, (2011), Prediction study on gas emission of the first face in the 11-2 coal seam in Liuzhuang Coal Mine , First International Symposium on Mine Safety Science and Engineering, Procedia Engineering 410, pp. 883-889.
- Yong ZH, Xibin ZH, Chunyuan L, Chuanan L, Zufa W, (2011), Methane moving law with long gas extraction holes in goaf, Procedia Engineering 26 , PP 357 – 365.
- Yu Y, Xiaodong P, Xin L, (2012), the Stress Sensitivity of Coal Bed Methane Wells and Impact on Production, Procedia Engineering 31 , PP 571 – 579
- 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, pp. 371–376.
- Zhang L, Aziz N, Ren T, Nemcik J, Wang Zh, (2012), Permeability testing coal under different Triaxial conditions, 2012 coal operators` Conference, The University of Wollongong
- 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, pp. 1430-1439

- Zhao Y, Jin Zh, (1994), Mathematical model for coupled solid deformation and methane flow in coal seams, *Journal of Applied Mathematical modeling*, Vol 18, pp. 328-333
- Zhao-feng W, Xiang-jun Ch, Hong-min Y, (2009), Gas control technology of working face in single, high-gas and medium -thick coal seam, *The 6th International Conference on Mining Science & Technology, Procedia Earth and Planetary Science* 1, pp. 90–93.
- Zhiming F, Xiaochun L, Haixiang H, (2011), Gas mixture enhance coalbed methane recovery technology: pilot tests, *Energy Procedia* 4, pp. 2144-2149.

Abstract

The sudden explosion of methane during underground coal mining is a major dilemma. To mitigate its occurrence and reduce the extent of methane diffusion, gas drainage operations are carried out before mining. This thesis investigates methane gas flow in a coal block in order to calculate the pressure of gas and its molecule velocity for methane gas drainage operation. The geometric model used in this study has similar assumptions about coal. For this purpose, samples of coal were selected from the studied mine, which is the Parvadeh Tabas coal mine in Iran. After coring, the permeability, porosity, and specific gravity were measured. Using microscopic imaging, it was also used to identify the masses in order to determine the effect of maceral on permeability. Using the CT scan, the distance between the coal cleats was determined. The parameters necessary for modeling were obtained through experimental analysis. A coal block surrounded by cleats was used for geometrical modeling and numerical simulation. Movements of fluid and gas molecules in a porous medium were successfully simulated. The numerical solution is based on COMSOL Multiphysics software. The velocity of methane gas molecules was obtained 0.0269 m / s in Tabas coal samples. In previous studies, this value is calculated to be 0.005 m / s, and the results are acceptable in terms of validation.

Keywords: Numerical simulation, Methane drainage, Gas flow, Porosity, Permeability, Maceral



Faculty of Mining, Petroleum and Geophysics Engineering

Ph.D. Thesis in Mining Exploitation

**Modeling of methane gas flow in coal pores for gas
drainage and its validation,
Case study: Parvadeh Tabas Coal Mine, Iran**

By: Adel Taheri

Supervisors:

Dr. Farhang Sereshki

Dr. Faramarz Doulati Ardejani

Advisor:

Dr. Ali Mirzaghobanali

October 2017