



## گاز متان زغال سنگ - از تشکیل تا تولید

زینا زمانی\*، سیدعلی معلمی، نواب خدایی، پژوهشگاه صنعت نفت

### چکیده

با افزایش جمعیت جهان و سطح استانداردهای زندگی و همچنین توسعه صنایع مختلف محلی، تقاضای جهانی جهت استفاده از سوخت‌های فسیلی، به خصوص گاز، افزایش یافته است. لذا، با رو به کاهش نهادن مخازن هیدروکربنی متعارف، اکتشاف و تولید از مخازن غیرمتعارف، نظیر گاز زغال سنگ از نظر اقتصادی مقرون به صرفه شده است. یکی از این منابع هیدروکربنی، گاز متان تولید شده از لایه‌های زغالی است. اکتشاف، ارزیابی و تولید از این منبع انرژی در جهان، قدمتی بیش از ۵۰ سال دارد. ولی با توجه به غنی بودن کشورمان از نظر مخازن متعارف نفت و گاز، تاکنون به این نوع منابع توجهی نشده است. وجود منابع عظیم زغال سنگ در رسوبات تریاس بالایی تا ژوراسیک میانی (گروه شمشک) در گستره عظیمی از شمال تا مرکز و شرق کشور، نیاز به توجه و ارزیابی آن‌ها را نمایان می‌سازد؛ زیرا این منابع می‌تواند باعث افزایش قابل ملاحظه ذخایر گازی ایران و ارتقای جایگاه آن در بین کشورهای بزرگ دارنده منابع گازی شود.

زغال سنگ هم به‌عنوان سنگ منشاء و هم به‌عنوان سنگ مخزن گاز متان عمل می‌کند. متان تولید شده در زغال به‌صورت 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.

با کاهش فشار لایه‌های زغالی از طریق پمپاژ آب، تولید گاز از زغال طی سه مرحله‌ی واجذب گاز از ماتریکس، انتشار گاز به داخل شکستگی‌ها و جریان آن در سیستم شکستگی‌ها به سمت چاه رخ می‌دهد. گاز تولید شده می‌تواند به‌طور مستقیم خطوط لوله گاز را تغذیه کند. با توجه به اینکه لایه‌های زغالی تخلخل و تراوایی پایینی دارند، ازدیاد برداشت از این مخازن از طریق حفاری افقی، ایجاد شکستگی هیدرولیکی و یا تزریق گاز دی‌اکسید کربن امکان‌پذیر است.

واژگان کلیدی: زغال سنگ، گاز متان، ماده آلی، درجه بلوغ، جذب سطحی، تولید و ازدیاد برداشت

### مقدمه

افزایش روز افزون تقاضا برای انرژی و کاهش سریع منابع آن در جهان، باعث افزایش قیمت نفت و گاز شده است. این مسأله از یک طرف و پیشرفت در معلومات و فناوری‌های اکتشافی و بهره‌برداری از طرف دیگر، تولید هیدروکربن از مخازن غیرمتعارف<sup>۱</sup> را از نظر اقتصادی مقرون به صرفه کرده است. در دهه‌های اخیر، با افزایش قیمت گاز، تولید از این منابع مورد توجه خاص کشورهای دارنده این نوع مخازن قرار گرفته است. هم‌اکنون، گاز، در مقایسه با زغال سنگ و نفت،

به‌عنوان سوختی پاک در جهان مطرح است، زیرا به‌ازای هر واحد انرژی، مقدار کمتری دی‌اکسید کربن تولید می‌کند [1] و پیش‌بینی می‌شود در سال‌های آینده جزو منابع انرژی با تقاضای بالا در سطح جهان باشد [2].

متان تولید شده از لایه‌های زغالی<sup>۲</sup> یکی از منابع مهم هیدروکربنی غیرمتعارف در دنیاست. لایه‌های زغالی می‌تواند به‌عنوان یک سیستم نفتی کامل، یعنی هم به‌عنوان سنگ منشاء، هم سنگ مخزن و هم پوش سنگ عمل نماید. متان در طی مراحل مختلف زغالی شدن، تولید و در فشار بالا

جذب سطح زغال می‌گردد. اکتشاف و تولید این نوع گاز از چندین دهه‌ی قبل در بعضی از کشورها، به‌ویژه در کشور آمریکا، شروع شده است. از اوایل قرن هجده میلادی که در انگلستان معدن کاری زغال سنگ در اعماق شروع شد، انفجار این گاز به‌عنوان یکی از مخاطرات مهم معدن کاری زیرسطحی زغال سنگ مطرح گردید. این انفجارات در معادن بزرگ زغال سنگ، عمیق‌تر و با زغال‌هایی با درجه بلوغ بالاتر، بیشتر و خطرناک است. چون مقدار گاز بیشتری در آن‌ها تولید و منتشر می‌شود. آمار نشان می‌دهد در فاصله

\*نویسنده‌عهدہ دار مکاتبات (zamaniz@ripi.ir)



در سال ۱۹۷۸، دولت آمریکا با وضع قانونی، پول بیشتری در اختیار شرکت‌های فعال در زمینه مخازن هیدروکربنی نامتعارف، قرار داد. همچنین، در سال‌های ۱۹۸۴ تا ۱۹۹۲ به این شرکت‌ها اعتبار مالیاتی تعلق گرفت که همین امر سبب تولید و توسعه بیشتر این منابع و فناوری‌های مرتبط به آن شد. در سال ۲۰۰۱ تولید سالانه متان زغال‌سنگ آمریکا از ۱۵،۰۰۰ چاه در ۱۱ حوضه زغال‌سنگی، شامل ۱۰ درصد تولید گاز طبیعی آن کشور در آن سال بود [5]. در واقع، اعتبار مالیاتی اختصاص داده شده از طرف دولت آمریکا باعث جهشی در سرمایه‌گذاری و تولید گاز زغال‌سنگ شد، به طوری که در سال ۱۹۹۰ حدود ۱۰ درصد از چاه‌های هیدروکربنی آمریکا در این نوع مخازن حفر شده بود [6]. تا سال ۲۰۰۱، ۳۵ کشور از ۷۴ کشور دارای ذخایر زغال‌سنگ در جهان، در مورد بهره‌برداری و توسعه متان زغال‌سنگ مطالعاتی انجام داده بودند ولی فقط آمریکای شمالی در این زمینه هم از نظر توسعه و هم از نظر اقتصادی پیشرو بوده است [1 و 5]. در حال حاضر، کشورهای آمریکا، روسیه، کانادا، چین و استرالیا دارای بزرگترین منابع گاز متان زغال‌سنگ هستند و علاوه بر آن‌ها، کشورهای نظیر انگلستان، هند و اندونزی به‌طور گسترده از این منابع بهره‌برداری می‌کنند [3 و 4].

با توجه به این موارد و وجود منابع عظیم و گسترده زغال‌سنگ در کشورمان، فعالیت‌های اکتشافی، ارزیابی و تولید گاز متان از آن‌ها باید مورد توجه قرار گیرد. در این راستا، برای ورود به عرصه مطالعه، ارزیابی و تولید از این نوع ذخایر، اطلاع از نحوه تشکیل زغال‌سنگ، ایجاد گاز متان در آن، چگونگی ذخیره‌سازی، ارزیابی و نحوه تولید و ازدیادبرداشت از این مخازن ضروری است.

### ۱- تشکیل زغال‌سنگ و ایجاد گاز متان

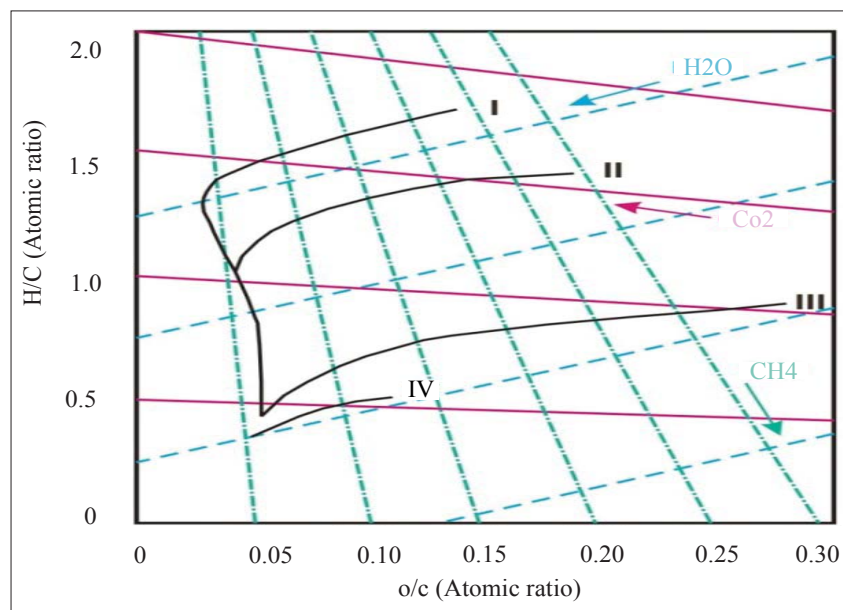
زغال‌سنگ، سنگی است مرطوب که از نظر وزنی پنجاه درصد و از نظر حجمی هفتاد درصد آن از مواد کربنی تشکیل شده است [7]. زغال‌سنگ، خود به‌عنوان یکی از منابع انرژی مهم در جهان به‌شمار می‌آید (شکل-۱). از طرفی، می‌تواند مولد انواع هیدروکربن، به‌خصوص گاز باشد.

می‌شود [4]. در قرن نوزدهم، برای اولین بار تولید و مصرف مستقیم از این گاز به‌منظور روشنایی خیابان‌های لندن در انگلستان صورت گرفت. در سال ۱۹۳۱، اولین چاه در غرب ویرجینیا، جهت بررسی و توسعه فناوری‌های مرتبط با استفاده از این گاز به‌عنوان منبع انرژی در آمریکا حفر گردید. بعد از آن، به مدت پنجاه سال فعالیت‌های حفاری جهت استفاده از این منابع بسیار اندک بود تا اینکه

سال‌های ۱۸۷۶ تا ۱۹۴۸، در هر سال حداقل یک انفجار مهم در معادن زغال‌سنگ آمریکا رخ داده است [3]. وجود این گاز در معادن نه تنها کار در معدن را سخت و خطرناک می‌کند، بلکه آن را پُر هزینه می‌نماید؛ زیرا معدن‌داران، 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

۱ | تقسیم بندی زغال سنگ‌ها، درجات و خصوصیات مربوط به آن‌ها [8]

| Coal Type and Peat  |                                 | Total Water Content (%) | Energy Content a.f.* (KJ/Kg) | Volatiles d.a.f.** (%) | Vitrinite Reflection in Oil (%) |
|---------------------|---------------------------------|-------------------------|------------------------------|------------------------|---------------------------------|
| UNECE               | USA (ASTM)                      |                         |                              |                        |                                 |
| Peat                | Peat                            | 75                      | 6,700                        |                        |                                 |
| Ortho-Lignite       | Lignite                         | 35                      | 16,500                       |                        | 0.3                             |
| Meta-Lignite        | Sub-bituminous Coal             | 25                      | 19,000                       |                        | 0.45                            |
| Sub-bituminous Coal |                                 | 10                      | 25,000                       | 45                     | 0.65                            |
| Bituminous Coal     | High Volatile Bituminous Coal   |                         | 36,000<br>Hard Coking Coal   | 40                     | 0.75                            |
|                     | Medium Volatile Bituminous Coal |                         |                              | 35                     | 1.0                             |
|                     | Low Volatile Bituminous Coal    |                         |                              | 20                     | 1.2                             |
| Anthracite          | Anthracite                      |                         |                              | 19                     | 1.6                             |
|                     |                                 |                         |                              | 14                     | 1.9                             |
|                     |                                 |                         |                              | 3                      | 36,000                          |



۱ | دیاگرام ون کروئل که نشان‌دهنده انواع کروژن، مسیر تکاملی آن‌ها در طی بلوغ و تولید انواع مواد فرار (متان، دی‌اکسید کربن و آب) می‌باشد [1 و 7].

این سنگ از پیت، یعنی تجمع رسوبات آلی منشاء گرفته از گیاهان، در طی تدفین و سپری کردن مراحل به نام مراحل زغالی شدن<sup>۳</sup> تشکیل می شود. زغالی شدن با نرخ ها و در محیط های مختلف رخ می دهد. آغاز کننده مرحله زغالی شدن، ارزش حرارتی<sup>۴</sup> و کربن ثابت<sup>۵</sup> و کاهش مواد فرار<sup>۶</sup> و رطوبت<sup>۷</sup> زغال می شود. البته این تغییرات با زمان زمین شناسی نیز در ارتباط می باشد [7].

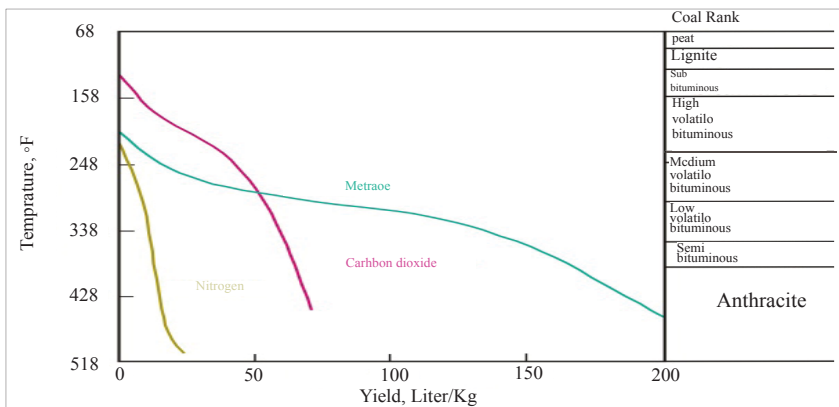
در طی مراحل زغالی شدن، همه انواع زغال افزایش در مقدار کربن و کاهش در مقدار اکسیژن و هیدروژن نشان می دهند. برای زغال های با درجه بلوغ پایین، کاهش اکسیژن در طی مراحل زغالی شدن غالب است، در حالی که برای زغال های با درجه بلوغ بالا، محتوای هیدروژن سریعاً کاهش می یابد [1] (شکل-۱). همراه با این تغییرات، مواد فراری مانند آب، گاز دی اکسید کربن، نیتروژن و متان با مقادیر مختلف آزاد می گردد (شکل های ۱- و ۲). در طی مراحل اولیه زغالی شدن، مقدار زیادی دی اکسید کربن تولید می شود ولی در مراحل بعدی، مقدار اندکی گاز نیتروژن و مقادیر زیادی گاز متان تولید می گردد [9، 10 و 11]، به نحوی که به طور متوسط از هر کیلو گرم زغال تا مرحله آنتراسیت حدود ۱۵۰ تا بیش از ۲۰۰ لیتر متان تولید می شود (شکل-۲).

گاز طبیعی زغال سنگ در طی دو مرحله بیوژنیک<sup>۸</sup> و حرارتی<sup>۹</sup> تولید می شود. مهمترین گاز بیوژنیک، گاز متان و دی اکسید کربن است که در مراحل اولیه تدفین رسوبات در باتلاق ها توسط تجزیه مواد آلی به وسیله باکتری ها و میکروارگانیزم های دیگر تولید می شود. شرایط لازم برای ایجاد گاز بیوژنیک، وجود محیط احیایی، سولفات کم در رسوبات، دمای پایین، مواد آلی فراوان، شرایط اسیدی، فضای متخلخل کافی و رسوب گذاری سریع است [7]. دو مکانیسم شناخته شده جهت تولید گاز متان بیوژنیک در این شرایط، از طریق احیای دی اکسید کربن<sup>۱۰</sup> و تخمیر نوع متیل<sup>۱۱</sup> است. اگرچه در محیط های عهد حاضر، هر دو مکانیسم عمل می نماید، ولی بر اساس مطالعات شیمیایی و ایزوتوپی انجام شده، بیشتر تجمعات قدیمی گاز متان احتمالاً از احیای گاز دی اکسید کربن ناشی می گردد [7].

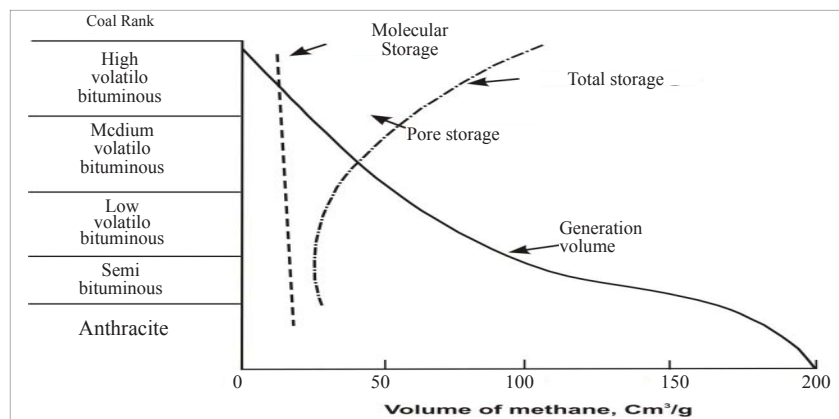
گاز بیوژنیک از نظر زمانی در طی دو مرحله اولیه<sup>۱۲</sup> و یا مرحله تأخیری<sup>۱۳</sup> می تواند تولید شود. مرحله اولیه، در طی مراحل ابتدایی تدفین و در زغال سنگ های نارس تر (از پیت تا زغال سنگ نیمه بیتومینه) ایجاد می شود، ولی گاز بیوژنیک

تجزیه بیوشیمیایی مواد آلی است. اما با افزایش عمق تدفین، دما و فشار زیاد شده و باعث ادامه تغییرات فیزیکی شیمیایی در زغال می شود و نهایتاً، زغال با درجات بلوغ مختلف را به وجود می آورد (جدول-۱). این تغییرات شامل افزایش

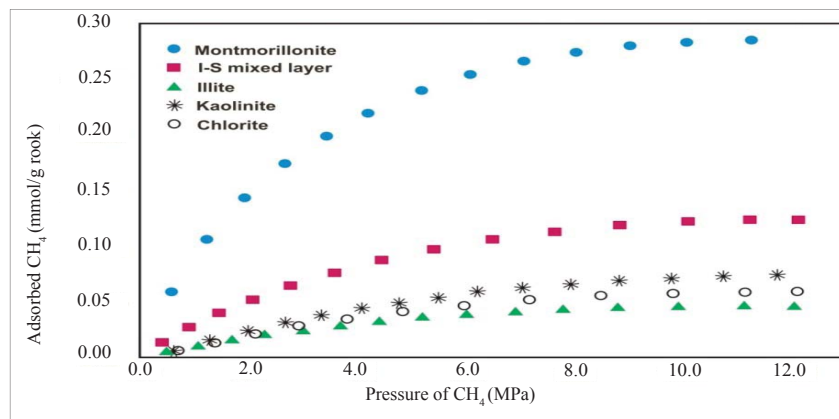
این سنگ از پیت، یعنی تجمع رسوبات آلی منشاء گرفته از گیاهان، در طی تدفین و سپری کردن مراحل به نام مراحل زغالی شدن<sup>۳</sup> تشکیل می شود. زغالی شدن با نرخ ها و در محیط های مختلف رخ می دهد. آغاز کننده مرحله زغالی شدن،



شکل ۲ | حجم انواع گاز های تولید شده در طی مراحل مختلف زغالی شدن [7].



شکل ۳ | حجم گاز متان تولید و ذخیره شده به ازای هر گرم زغال سنگ همراه با افزایش درجه بلوغ [7].



شکل ۴ | تأثیر انواع کانی های رسی در ظرفیت جذب گاز متان [13].



مرحله تأخیری، تحت تأثیر سیستم آب‌های فعال زیرزمینی و در هر نوع زغال و با هر درجه بلوغی می‌تواند ایجاد شود [7]. این مرحله معمولاً در حاشیه حوضه‌های رسوبی که تحت تأثیر بالا آمدگی<sup>۱۴</sup> یا فرسایش قرار گرفته‌اند، رخ می‌دهد.

مرحله تولید حرارتی گاز طبیعی که نتیجه تبخیر یا از دست رفتن مواد فرار لایه‌های زغالی است<sup>۱۵</sup>، از درجه زغال بیتومینه با مواد فرار زیاد شروع می‌شود و با افزایش درجه بلوغ زغال بیشتر می‌گردد. گاز حرارتی می‌تواند از شکستن مستقیم ساختمان کروژن یا هیدروکربن‌های سنگین‌تر که قادر به مهاجرت از زغال نیستند، به وجود آید. درجه بلوغ، ترکیب، عمق و حرارت لایه‌های زغالی، از مهمترین عوامل کنترل‌کننده اولیه ترکیب مولکولی و ایزوتوپی گازهای زغال به‌شمار می‌رود [7]. علاوه بر گاز متان، گازهای  $C_2$  تا  $C_6$  نیز در زغال سنگ تولید می‌شود و مقدار نسبی آن‌ها در گاز تولید شده به صورت زیر است:

$$C1 > C2 > C3 > C4 > C5 > C6$$

مقدار این گازها با افزایش بلوغ زغال تقریباً به‌طور یکسان زیاد می‌شود، لذا نسبت آن‌ها در گاز، ثابت می‌ماند [12]. مقدار گاز تولید شده از زغال سنگ در این مرحله، بستگی به ترکیب آن دارد، یعنی نوع و مقدار ماسرال‌های مختلف تشکیل‌دهنده زغال [12]، به نحوی که مقدار گاز تولید شده از ۱۰۰ تا ۳۰۰ سانتی‌متر مکعب بر گرم زغال می‌تواند متفاوت باشد [7]. نرخ تولید گاز متان حرارتی با افزایش درجه بلوغ زغال با سرعت افزایش می‌یابد. از طرفی، ظرفیت ذخیره‌سازی زغال به‌طور قابل

توجه با افزایش درجه بلوغ زغال کاهش یافته و افت می‌کند (شکل ۴-۴). علاوه بر این، در زغال‌های با درجه بلوغ بالاتر (از زغال بیتومینه با مواد فرار بالا و بیشتر)، زغال ممکن است بیش از مقداری که می‌تواند گاز ذخیره کند، گاز تولید کند. لذا در چنین مواردی، باید خروج گاز از لایه‌های زغالی به مخازن مجاور مورد توجه و ارزیابی قرار گیرد [10].

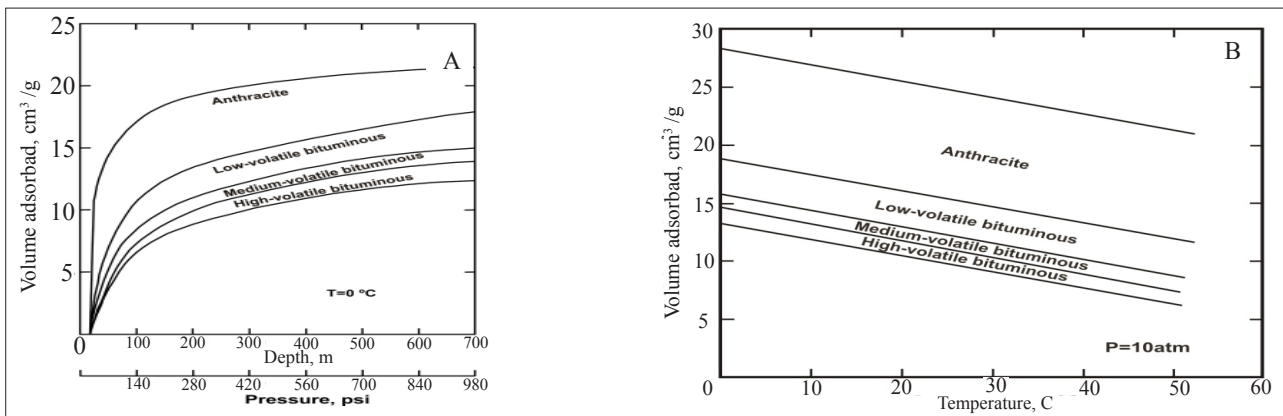
## ۲- نقش مخزنی زغال سنگ و عوامل موثر بر آن

گاز تولید شده در طی مراحل مختلف زغالی شدن، به سه صورت در لایه‌های زغالی ذخیره می‌گردد: ۱) گاز جذب شده روی<sup>۱۶</sup> و داخل ساختمان<sup>۱۷</sup> (زغال سنگ، ۲) گاز آزاد در خلل و فرج و شکستگی‌های زغال سنگ و ۳) گاز حل شده در سیالات زغال سنگ. در بین این گازها، گاز جذب شده سهم بسیار قابل توجهی را به خود اختصاص می‌دهد [7، 13، 14]. باید توجه داشت که قابلیت جذب گازهای مختلف توسط زغال سنگ متفاوت است [14]. مخازن هیدروکربنی ماسه‌سنگی و کربناته، گاز را به‌طور متراکم در سیستم تخلخل خود ذخیره می‌کنند، در حالی که متان در زغال‌ها با جذب سطحی ذخیره می‌شود. این عمل می‌تواند باعث شود که ظرفیت ذخیره گاز زغال سنگ به‌طور چشمگیری بیشتر از ماسه‌سنگ باشد [5].

مطالعات انجام شده نشان می‌دهد مقدار گاز جذب شده در روی سطح زغال سنگ به عوامل مختلفی بستگی دارد که در بین این عوامل، مقدار ماده

آلی موجود در لایه‌های زغالی یا به بیان دیگر، ضخامت رگه‌های زغالی، مهمترین عامل بوده و با مقدار جذب گاز رابطه مستقیم دارد، زیرا یک گرم ماده آلی زغال سنگ می‌تواند شامل سطحی بیشتر از چندین زمین فوتبال باشد [11]. البته نوع ماده آلی نیز مهم است، به طوری که در زغال سنگ‌ها با افزایش محتوای ویترنیت، مقدار گاز جذب شده بیشتر و با افزایش مقدار اینرتینیت کاهش می‌یابد [12، 13، 14]. جذب بالاتر ویترنیت به دلیل آروماتیکی بودن بیشتر ساختمان آن است که باعث می‌شود مقدار سطح در دسترس آن برای اتصالات بیشتر و قوی‌تر، زیادتر باشد [13]. البته در زغال‌های بیتومینه، ترکیب پتروگرافیکی، عامل موثر و مهمی در ظرفیت جذب متان نیست و به نظر می‌رسد درجه بلوغ زغال تأثیر قوی‌تری در مقدار گاز جذب شده آن‌ها داشته باشد [15]. باید توجه داشت که صرف نظر از نوع ماده آلی، با اکسید شدن، ظرفیت جذب آن‌ها کم می‌شود.

درجه بلوغ ماده آلی تأثیر مهمی بر مقدار کل گاز جذب شده ندارد، ولی با این وجود، موازنه جذب در زغال‌هایی که درجه بلوغ بالاتری دارند، سریع‌تر و در فشار کمتری صورت می‌گیرد [13]. این مسأله شاید به دلیل افزایش تخلخل‌های کوچکتر (میکرو و مزو تخلخل‌ها، یعنی تخلخل‌های کوچکتر) از ۱۰ و بین ۱۰ تا ۱۰۰۰ نانومتر) و کاهش رطوبت در درجه بلوغ بالاتر در زغال سنگ باشد [1 و 14]. به نظر می‌رسد رطوبت با اشغال سطوح و تخلخل‌های زغال سنگ، پتانسیل جذب گاز را به‌طور چشمگیری کاهش می‌دهد، به طوری که ۱



۵ | منحنی تغییرات جذب گاز متان در دمای ثابت (منحنی هم دما، A) و فشار ثابت (منحنی هم فشار، B) در زغال سنگ‌های با درجات بلوغ مختلف [18].

کانی‌های رُسی، شدیداً تحت تأثیر رطوبت موجود در سنگ می‌باشد. ظرفیت جذب گاز متان بر حسب نوع کانی رسی به صورت زیر است: (شکل-۴) [13 و 17]

مونت موریلونیت << کانی‌های رسی مخلوط لایه (اسمکتیت/ایلیت) >> کائولینیت < کلریت < ایلیت

در کانی‌های مونت موریلونیت و مخلوط لایه، میکرو و مزو تخلخل‌هایی در اندازه‌های نانومتر با سطح زیاد وجود دارد که ظرفیت جذب گاز متان را در آن‌ها بیشتر می‌کند [17].

از مهمترین عوامل ترمودینامیکی موثر در جذب گاز، حرارت و فشار است. با افزایش فشار، ظرفیت جذب گاز متان افزایش می‌یابد (شکل-۵: A)، ولی با افزایش دما ظرفیت جذب آن کم می‌شود (شکل-۵: B) [18] البته به نظر می‌رسد با افزایش بلوغ ماده آلی، حساسیت ظرفیت جذب با تغییرات دما کم می‌شود [4 و 14].

گاز متان در شکستگی‌ها و خلل زغال‌سنگ به صورت آزاد وجود دارد و با کاهش فشار می‌تواند به راحتی در لایه زغالی حرکت کند [1]. مقدار گاز آزاد موجود در زغال‌سنگ‌های با درجه بلوغ پایین، بیشتر است ولی با افزایش درجه بلوغ و تغییر ترکیب زغال، مقدار تخلخل و شکستگی‌ها که محل اصلی ذخیره گاز آزاد هستند، تغییر می‌کند [19]. با افزایش عمق، تخلخل اولیه زغال کم می‌شود ولی از درجه بلوغ معادل ۱/۲۳ درصد انعکاس ویترنیت (معادل کربن ثابت ۸۹ درصد) تخلخل ثانویه تشکیل می‌شود (شکل-۶).

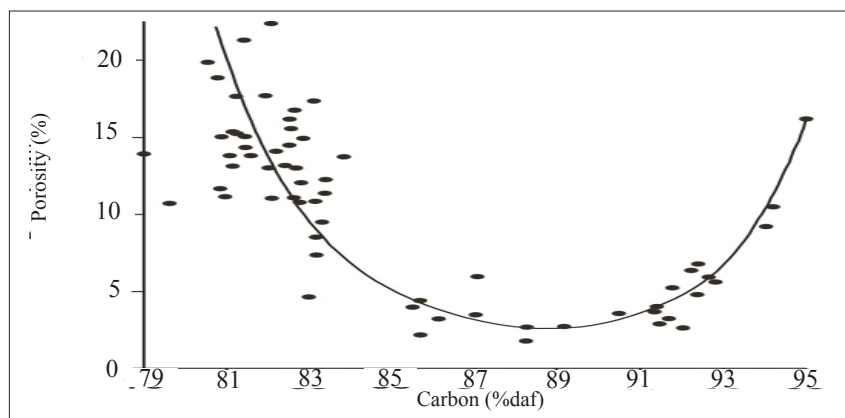
در انعکاس ویترنیت معادل ۲ درصد، این تخلخل‌ها در اثر متجانس شدن دوباره<sup>۸</sup> از بین می‌روند، ولی در درجه بلوغ بالاتر مجدداً ظاهر می‌شوند [12]. لذا، تخلخل مواد آلی به درجه بلوغ و نوع ماده آلی بستگی دارد [19]. به نظر می‌رسد در زغال‌سنگ‌های غنی از کانی‌های رسی، مقدار تخلخل بیشتری برای گاز آزاد موجود باشد [16]. همچنین، با افزایش عمق، خاصیت شکنندگی زغال‌ها بیشتر می‌شود و به افزایش تخلخل کمک می‌کند [4].

بخشی از گاز موجود در لایه‌های زغالی می‌تواند به صورت گاز حل شده باشد، البته مقدار آن

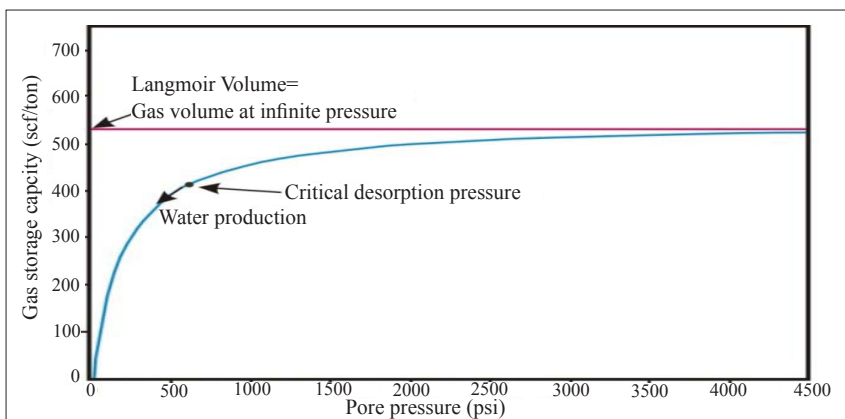
هیدروکربن‌های مایع در زغال‌های بیتومینه با مواد فرار بالا بسته شود و باعث کاهش ظرفیت جذب و ذخیره گاز زغال گردد. در اثر شکستگی حرارتی، این پُرشدگی‌ها از بین می‌روند و ظرفیت جذب زغال‌های بیتومینه با مواد فرار متوسط تا آنتراسیت زیاد می‌شود [7]. به طور کلی، با در نظر گرفتن کلیه پارامترها، زغال‌سنگ‌های بیتومینه با مواد فرار بالا و آنتراسیت دارای بالاترین حجم گاز متان جذب شده می‌باشند (شکل-۴) [15 و 14].

ممکن است در خاکستر همراه با زغال‌سنگ (بخش معدنی) مقدار قابل توجهی کانی رسی موجود باشد. کانی‌های رسی با توجه به سطح قابل توجهی که دارند، می‌توانند به عنوان جاذب گاز عمل نمایند، ولی هرگز ظرفیت جذب آن‌ها با ظرفیت جذب مواد آلی قابل مقایسه نخواهد بود. همچنین، سطح موجود جهت جذب در

درصد رطوبت ممکن است ظرفیت جذب را تا ۲۵ درصد و ۵ درصد رطوبت، آن را تا ۶۵ درصد کاهش دهد [4]. لذا، با افزایش بلوغ، مقدار رطوبت زغال‌سنگ کاهش و در نتیجه مقدار جذب سطحی گاز زیاد می‌گردد (شکل-۳). البته این افزایش به صورت ثابت و خطی نیست [16]. از طرفی، با افزایش درجه بلوغ، نسبت ظرفیت جذب گازها تغییر می‌کند؛ مثلاً، نسبت جذب دی‌اکسید کربن به متان در زغال‌سنگ نیمه بیتومینه ۱۰ به ۱ و در زغال‌سنگ بیتومینه با مواد فرار بالا ۲ به ۱ است [14]. همچنین، ظرفیت ذخیره گاز به طور معکوس تحت تأثیر حضور مولکول‌های هیدروکربنی سنگین نظیر نفت است. معمولاً، ساختمان مولکولی زغال می‌تواند مولکول‌های کوچکتر نظیر متان، آب و دی‌اکسید کربن را در خود جای دهد، ولی با این وجود، ساختمان میکرو و تخلخل‌ها ممکن است با



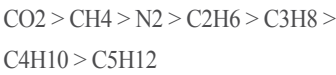
شکل ۶ | تغییرات تخلخل زغال سنگ با افزایش درجه بلوغ بر اساس مقدار کربن نمونه خشک بدون خاکستر<sup>۱۹</sup> [12]



شکل ۷ | منحنی هم‌دمای گاز متان در مقابل تغییرات فشار بر اساس تئوری لانگ مویر [6].



می‌شود. حجم این گاز به حجم آب موجود در مخزن، حرارت، فشار و شوری آب بستگی دارد، به طوری که با حرارت و شوری آب، رابطه معکوس و با فشار، رابطه مستقیم نشان می‌دهد [1]. به استثنای پیست و لیگنیت، مقدار آب داخل لایه‌های زغالی به طور طبیعی از ۵ درصد کمتر است [1]. ظرفیت حل شوندگی مولکول‌های مختلف گاز طبیعی متفاوت است؛ برای مثال، قابلیت حل شوندگی گاز دی‌اکسید کربن ۳۶ برابر بیشتر از گاز متان و گاز متان کمی بیش از نصف گاز اتان است [1]. بر اساس مطالعات آزمایشگاهی، قابلیت انحلال گازهای طبیعی به صورت زیر است:



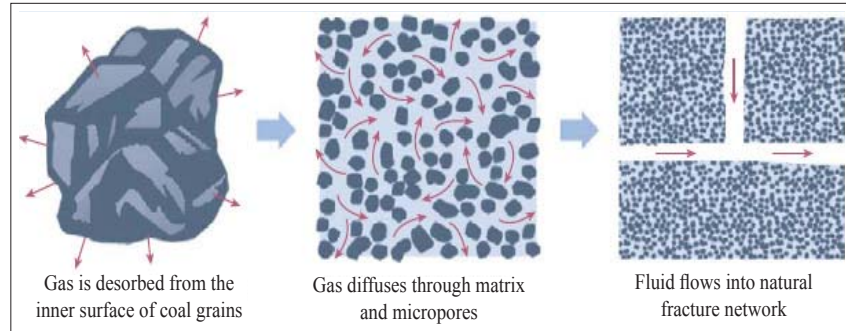
به طور کلی با کاهش فشار مخزن، گاز متان از حالت حل شده خارج و به گاز آزاد تبدیل می‌شود.

تعیین مقدار نسبی گاز ذخیره شده به شکل‌های مختلف در زغال‌سنگ، معیار اصلی ارزیابی این مخازن و طراحی راهکارهای تولید مناسب و موثر از آن‌هاست. به منظور تعیین گاز در جای ۱۰ متان در حوضه‌های زغال‌دار، باید مساحت مخزن، ضخامت لایه‌های زغالی، متوسط دانسیته زغال و متوسط محتوای گاز ذخیره شده در زغال را به دست آورد [10 و 20]. مساحت مخزن از اطلاعات چینه‌شناسی منطقه، تغییرات ساختمانی و داده‌های لرزه‌ای سه‌بعدی به دست می‌آید. همچنین ضخامت لایه‌های زغالی، از طریق مطالعات زمین‌شناسی و لاگ‌ها، و متوسط دانسیته زغال‌سنگ، از داده‌های آزمایشگاهی و لاگ قابل محاسبه است. روش‌های اندازه‌گیری مقدار گاز در لایه‌های زغالی برای اولین بار جهت تأمین ایمنی معادن زغال‌سنگ توسعه یافت [21]. به طور کلی ارزیابی محتوای گاز واحد توده زغال از سه طریق انجام می‌شود [11، 21 و 20]:

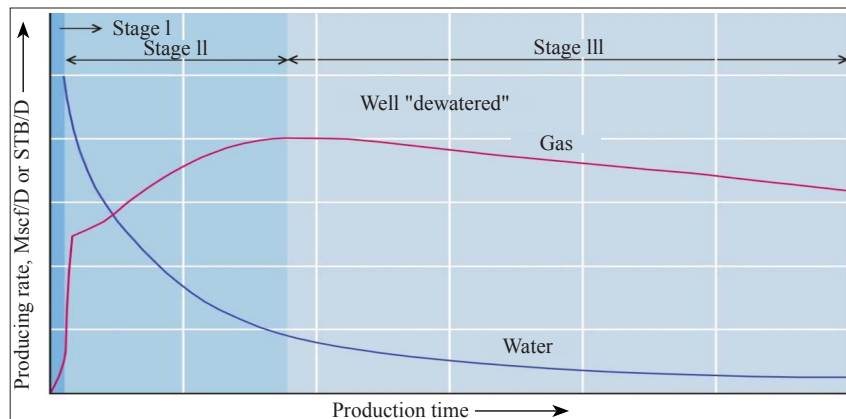
۱. روش اندازه‌گیری مستقیم<sup>۲۱</sup> از نمونه تازه گرفته شده از داخل چاه
۲. روش اندازه‌گیری غیرمستقیم<sup>۲۲</sup> یا آزمایشگاهی<sup>۲۳</sup> بر روی نمونه‌های موجود
۳. روش توریک<sup>۲۴</sup> با استفاده از مدل‌سازی در روش مستقیم، نمونه زغال تازه گرفته شده سریعاً در محفظه‌ای محبوس قرار داده می‌شود و در طول زمان، مقدار گاز واجذب شده از آن

ظرفیت حل کنندگی بیشتری نسبت به آب دارد، ولی به طور کلی در زغال‌سنگ‌ها مقدار آن کم است [1]. با این وجود، در بعضی از لایه‌های زغالی و به صورت محلی، مقدار گاز حل شده در بیتومین موجود در زغال‌سنگ می‌تواند قابل توجه باشد [14]. بخشی از گاز متان به صورت حل شده در آب موجود در لایه‌های زغالی دیده

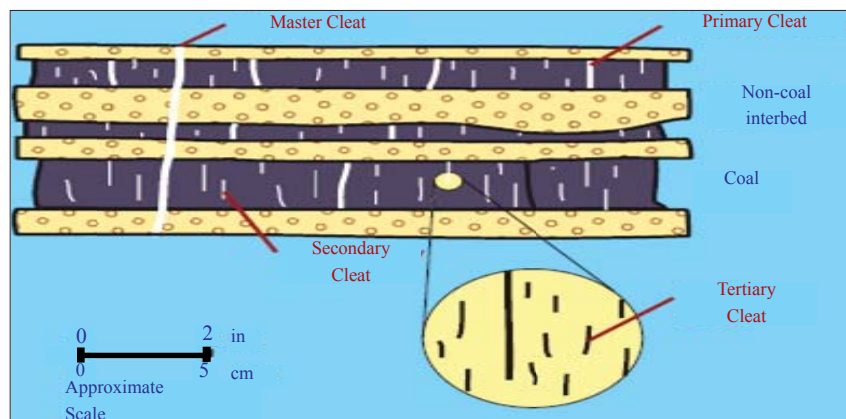
خیلی قابل ملاحظه نیست. به طور کلی، حجم گاز حل شده در مخازن زغالی تابع عواملی مانند حلالیت گاز، حجم خلل، اشباع آب و اشباع گاز متان است [1]. در مرحله‌ای که زغال‌سنگ، گاز هیدروکربن مایع تولید می‌کند (در انعکاس ویترنیت بین ۰/۵ تا ۱/۳ درصد)، گاز حل شده در نفت تولید شده هم وجود دارد. نفت،



شکل ۸ | مراحل مختلف آزاد شدن گاز متان جذب شده از زغال‌سنگ و جریان آن به داخل شکستگی‌ها که شامل مراحل واجذب، انتشار و جریان دارسی گاز می‌شود [1].



شکل ۹ | مراحل مختلف تولید گاز متان از زغال‌سنگ [5].



شکل ۱۰ | انواع مختلف شکستگی طبیعی یا کلیت در زغال‌سنگ [۱۱].

اندازه گیری می گردد. مرحله واجذب<sup>۲۵</sup> تا زمانی طول می کشد که نرخ آن به مقدار بسیار اندک و غیر قابل توجه برسد. این مرحله ممکن است تا دو ماه یا بیشتر طول بکشد. در این روش، از طریق روابط ریاضی و مطالعات آزمایشگاهی، مقدار گاز از دست رفته<sup>۲۶</sup> قبل از قرار گرفتن نمونه در محفظه و گاز باقی مانده<sup>۲۷</sup> که از نمونه واجذب نمی شود، مشخص می شود. باید توجه داشت که در این روش، مراحل تهیه، آماده سازی و حمل نمونه، از فاکتورهای اصلی در تعیین گاز جذب شده ی درجا در زغال سنگ می باشد.

در روش غیرمستقیم یا آزمایشگاهی، این مزیت وجود دارد که مغزه ها و خرده های حفاری موجود، استفاده می شود. لذا، این روش بسیار اقتصادی است. در این روش، جهت تعیین مقدار گاز جذب شده، از منحنی های هم دما<sup>۲۸</sup> بر اساس تئوری لانگمویر<sup>۲۹</sup> استفاده می شود [13]. بدین منظور، مقدار حجم گاز جذب شده روی زغال سنگ در

دمای ثابت و فشارهای مختلف اندازه گیری شده و فشاری که در آن، مقدار جذب گاز به حداکثر خود می رسد، تعیین می گردد (شکل-۷). در این روش، پودر زغال در درجه حرارت خاص (درجه حرارت مخزن)، با اندازه گیری حداقل شش نقطه فشاری از متان اشباع می شود و مقدار گاز جذب شده ی زغال خالص، بدون رطوبت و خاکستر گزارش می گردد.

در روش تئوریک از نرم افزارهای خاص مدل سازی حرارتی، تاریخچه تدفین و سینتیکی استفاده می شود تا حجم گاز تولید شده بازسازی شود. در این روش، فرض بر این است که کل گاز تولید شده توسط زغال جذب شده است.

دقیق ترین روش ارزیابی محتوای گاز متان، روش مستقیم است که بر روی نمونه مغزه زغال تازه گرفته شده انجام می شود، ولی روش غیرمستقیم عملی تر است. اگر داده های جذب موجود نباشد، ولی داده های استراتیگرافی موثق باشند، روش تئوریک

برای ساخت تاریخچه تدفین حوضه مناسب است. روش مستقیم، حداکثر و روش غیرمستقیم، حداقل مقدار گاز درجا را به دست می دهد، زیرا نمونه های استفاده شده در روش غیرمستقیم از رخنمون ها یا مغزه های قدیمی می باشد که ظرفیت جذب آن ها در اثر هوازده شدن کاهش یافته است. روش تئوریک، مقدار گاز در جای متوسط متان را نشان می دهد، چون حجم مدل شده ی گاز تولید شده از حجم گاز جذب شده تجاوز نمی کند [11].

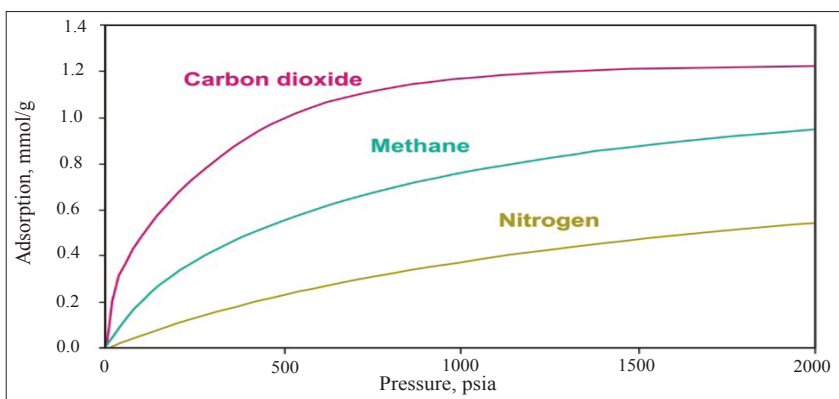
### ۳- تولید گاز متان از لایه های زغالی

تولید گاز متان از لایه های زغالی، با تولید از مخازن متعارف نفت و گاز تفاوت دارد؛ در این مخازن، عامل اصلی به تله افتادن و حفظ گاز در لایه ها، فشار هیدرولیکی حاکم بر آن ها می باشد و مانند مخازن متعارف، فشار پوش سنگ و بستگی ساختمانی، عامل بازدارنده نیستند. لذا، جهت تولید گاز از لایه های زغالی، فشار هیدرولیکی حاکم بر مخزن باید کم شود<sup>۳۰</sup>. این کار به صورت طبیعی در اثر بالا آمدگی رسوبات<sup>۳۱</sup> و فرسایش<sup>۳۲</sup> رخ می دهد یا به صورت مصنوعی بر اثر فعالیت های معدن کاری یا پمپ کردن آب و خارج کردن آن از لایه های زغالی انجام می شود [3].

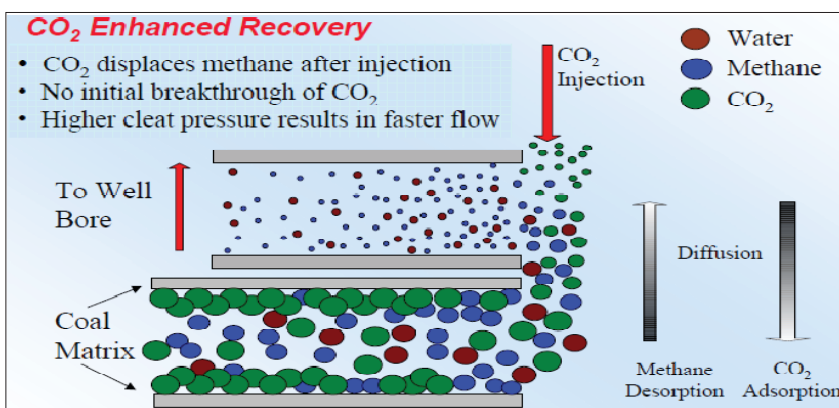
آبگیری<sup>۳۳</sup> از بعضی از چاه های حفر شده در لایه های زغالی اقتصادی نیست، زیرا ممکن است برای تولید گاز متان مجبور باشیم با صرف انرژی زیاد، مقدار زیادی آب را پمپاژ کنیم. از طرفی، در بعضی از لایه های زغالی ممکن است اصلاً آبی موجود نباشد. لذا، در این گونه موارد در مواردی که مخازن زغال سنگی گاز متان همراه با تله های گازی متعارف باشند، جریان گاز به آسانی و بعد از تکمیل چاه انجام می شود و نیازی به آبگیری لایه زغالی نیست [3 و 11]. آبگیری لایه های زغالی باعث می شود که طی سه مرحله گاز از حالت جذب، آزاد و از چاه خارج شود:

۱) مرحله واجذب گاز از ماتریکس<sup>۳۴</sup>، ۲) انتشار<sup>۳۵</sup> گاز واجذب شده به داخل شکستگی های طبیعی زغال<sup>۳۶</sup> و ۳) جریان گاز به همراه آب در داخل شکستگی ها به سمت چاه [4] (شکل ۸).

توانایی ذخیره سازی منحصربه فرد گاز، رفتار تولید زود هنگام را به زغال می دهد که ناشی از واجذب به دلیل کاهش فشار می باشد. آبگیری زغال،



شکل ۱۱ | منحنی هم دمای جذب گازهای دی اکسید کربن، متان و نیتروژن روی زغال سنگ در فشارهای مختلف [25].



شکل ۱۲ | ارزیابی برداشت گاز متان از لایه های زغال سنگ با استفاده از تزریق گاز دی اکسید کربن [۲۵].

تراوایی گاز را در شکستگی‌های طبیعی زغال افزایش می‌دهد و سبب می‌شود گاز ماتریکس، واجذب، منتشر و به سمت شکستگی‌ها حرکت کند و پروفایل کاملاً بی‌نظیر تولید گاز متان را ناشی شود (شکل-۹). تولید اولیه این مخازن بیشتر آب است. زمانی که آب به بیرون از شکستگی‌ها حرکت می‌کند، اشباع گاز و تولید آن زیاد می‌شود، ولی تولید آب کاهش می‌یابد (شکل-۹، مرحله-۱). سرانجام وقتی تراوایی گاز ثابت ماند، زغال، آنگیر شده در نظر گرفته می‌شود و تولید گاز به حداکثر خود می‌رسد (شکل-۹، مرحله-۲). از این مرحله به بعد، تولید آب و گاز به‌طور آهسته کم می‌شود ولی هنوز تولید گاز متان، تولید غالب خواهد بود (شکل-۹، مرحله-۳). برخلاف تولید نفت و گاز از مخازن متعارف که معمولاً ابتدا با افزایش تولید و سپس به‌طور پیوسته با کاهش تولید همراه است، وقتی یک لایه زغالی آنگیری می‌شود، سیستم شکستگی آن به‌طور پیوسته و پیشرونده به سمت چاه باز می‌شود. در طی این مرحله، پیوسته جریان گاز بیشتر می‌شود و تولید آب با گذشت زمان کاهش می‌یابد که باعث تولید گاز بیشتر از چاه و اقتصادی شدن تولید می‌گردد [3]. سرعتی که در آن، مخزن آنگیری می‌شود، به عوامل مختلفی بستگی دارد، از جمله: اشباع آب و گاز، تخلخل شکستگی‌ها، تراوایی مطلق و نسبی گاز، مقدار آب زغال و فاصله چاه‌ها [5]. با ترسیم ایزوترم جذب گاز می‌توان مقدار کاهش فشار مورد نیاز، زمان واجذب و تولید گاز از چاه را تخمین زد [21]. مثلاً در زغال‌های تحت اشباع، واجذب گاز در فشار بالای فشار بحرانی واجذب رخ نخواهد داد و با کاهش فشار مخزن تا زیر فشار بحرانی، تولید شروع می‌شود (شکل-۷). در مورد زغال‌های اشباع از گاز، فشار مخزن برابر با فشار واجذب خواهد بود و با آنگیری، سریعاً تولید گاز شروع می‌شود [11]. به‌طور کلی، زغال‌سنگ‌هایی توانمند متخلخل باشند، ولی تراوایی آن‌ها کم است. وجود شکستگی‌های طبیعی در زغال‌سنگ، بین تخلخل‌ها ارتباط برقرار کرده و تراوایی مناسب برای تولید گاز متان را ایجاد می‌کنند. لذا، اندازه، فاصله و تداوم سیستم شکستگی، نرخ جریان سیال را کنترل می‌کند. در طی تولید متان از زغال‌سنگ، جریان هم‌زمان متان

و آب در داخل سیستم شکستگی وجود دارد. تعیین مقدار تخلخل، تراوایی مطلق و تراوایی نسبی آب و گاز جهت پیش‌بینی نرخ تولید این دو سیال از مخازن زغال‌سنگی لازم است [23]. شکستگی‌های طبیعی زغال‌سنگ از نظر هندسی به دو دسته شکستگی‌های اولیه<sup>۳۸</sup> که شکستگی‌های بزرگتر و ممتدتری هستند و شکستگی‌های ثانویه<sup>۳۹</sup> که امتداد کمتری دارند، تقسیم می‌شود (شکل-۱۰). معمولاً شکستگی‌های ثانویه به شکستگی‌های اولیه ختم می‌گردند [3]. به‌طور کلی، سیستم این شکستگی‌ها با افزایش درجه زغالی شدن بیشتر توسعه می‌یابد و البته متأثر از استرس‌های ناحیه‌ای و محلی نیز می‌باشند [4]. تراوایی مطلق و نسبی سیستم شکستگی طبیعی، پارامترهای کلیدی موثر در تولید هستند. تراوایی دقیق سیستم شکستگی زغال‌ها فقط از طریق آزمایش چاه<sup>۴۰</sup> به دست می‌آید [20]. گاهی در بعضی مخازن گاز متان زغال‌سنگ، تولید از چاه‌های مختلف، متفاوت است که علت آن می‌تواند تغییر در مقدار دانسیته شکستگی‌های طبیعی زغال‌سنگ باشد [5]. تبدیل ماسرال‌ها در طی بلوغ به همدیگر و ایجاد هیدروکربن، حجم و فشار در لایه‌های زغالی را افزایش داده و باعث ایجاد شکستگی در آن‌ها می‌شود که با اتصال تخلخل‌ها، مسیر مناسبی را برای مهاجرت و جریان هیدروکربن ایجاد می‌کنند [12]. بنابراین، سیستم کلیت‌ها با افزایش درجه زغالی شدن بهتر توسعه می‌یابد. این شکستگی‌ها با میدان‌های استرس محلی و ناحیه‌ای پایدارند [4]. از طرفی، زغال‌ها در طی دفن‌شدگی، خاصیت پلاستیکی خود را از دست داده و خاصیت شکنندگی آن‌ها بیشتر می‌شود. لذا، تحت تأثیر استرس‌های داخلی و خارجی و با کاهش فشار داخل خلل و فرج در طی آنگیری، شکستگی‌ها توسعه می‌یابند. با توجه به اینکه مقدار تخلخل و تراوایی زغال کم است، نرخ تولید گاز از آن‌ها نیز کم می‌باشد. در طی تولید گاز و آنگیری از لایه‌های زغالی، خواص پتروفیزیکی با تغییر فشار داخل خلل تغییر می‌کند، به نحوی که بر خلاف مخازن هیدروکربنی متعارف، تا مدت زمانی با افزایش تولید، میزان تولید آب کمتر شده و تولید گاز بیشتر می‌گردد.

مثلاً، پس از واجذب گاز از ماتریکس زغال، ماتریکس منقبض می‌شود و متعاقباً باعث تغییر در تراوایی و تخلخل سیستم شکستگی می‌گردد. اثر انقباض در فشارهای پایین مشخص‌تر است. این عمل می‌تواند باعث شود که تولید در طی مراحل آخر بهتر شود. اثر انقباض ماتریکس زغال باعث پیشرفت و بهتر شدن تولید در طی زمان طولانی از مخازن زغال‌سنگ می‌شود [۲۰]. توضیحات فوق حاکی از این مسأله است که تولید موثر از لایه‌های زغالی نیاز به پایش تغییرات تخلخل، تراوایی و تراکم‌پذیری زغال در طول مدت زمان تولید دارد [۴]. بنابراین، فقط مطالعات استاتیک جذب-واجذب نمی‌تواند برای آنالیز تولید گاز متان از لایه‌های زغالی کافی باشد، چون این خواص به‌طور پیوسته در طی تولید تغییر می‌کنند، لذا تولید موثر و اقتصادی متان از لایه‌های زغالی نیاز به پایش مستمر و آنالیز سیستم توسط افراد با تجربه دارد.

حفر چاه‌های قائم و به‌صورت دسته‌ای در مخازن گاز متان زغال‌سنگ رایج است. حفاری در این نوع مخازن در اعماق ۸۰۰ تا ۱۲۰۰ متر معمول است ولی گاهی تا عمق کمتر از ۱۰۰ متر نیز می‌رسد. در حفاری‌های کم عمق، حفاری تعداد زیادی چاه قائم با صرفه‌تر از حفاری افقی است و با تجهیزات حفاری چاه آب نیز میسر می‌گردد. طول عمر چاه‌های مخازن گازی زغال‌سنگ در حدود ۵ تا ۱۵ سال است و حداکثر تولید آن‌ها ۱ تا ۶ ماه پس از آنگیری رخ می‌دهد [2].

همانند مخازن هیدروکربنی متعارف، روش‌های مختلفی جهت ازدیادبرداشت گاز از لایه‌های زغال‌سنگ وجود دارد. با توجه به تراوایی کم زغال‌سنگ، حفاری افقی و ایجاد شکستگی هیدرولیکی<sup>۴۱</sup>، از روش‌های اصلی و موثر ازدیادبرداشت در آن‌ها می‌باشد. البته حفاری افقی در این مخازن زیاد معمول نیست و در بعضی موارد، در چاه‌های عمیق‌تر از ۴۰۰ متر و عمود بر جهت دسته شکستگی‌ها حفر می‌شود [۵ و ۲]. با استفاده از روش ایجاد شکستگی هیدرولیکی، نه تنها تعداد شکستگی‌ها و تخلخل موجود در زغال زیاد می‌شود، بلکه با اتصال شکستگی‌های طبیعی زغال، تراوایی نیز افزایش می‌یابد. شکست هیدرولیکی



نیاز جهت بهره‌برداری از مخازن گازی زغالی از آنچه برای تولید از مخازن گازی متعارف مورد نیاز است، متفاوت نیست و مواردی مانند وجود گاز، تعیین مقدار گاز درجا، زمان آبیگری، مقدار گاز قابل استحصال در تولید اولیه، تصمیم‌گیری در مورد نیاز به افزایش بازیافت و هزینه‌های همزمان با بازیافت گاز را شامل می‌گردد. به‌منظور تولید گاز متان، باید فشار هیدرولیکی لایه‌های زغالی را با تولید آب از این مخازن کاهش داد تا گاز بتواند از ماتریکس زغال‌سنگ، واجذب شده، از طریق شکستگی‌ها به سمت چاه جریان یابد و به مرحله تولید برسد. روش‌های معمول از دیادبرداشت از این نوع مخازن، روش حفاری افقی، ایجاد شکستگی هیدرولیکی و تزریق گاز دی‌اکسید کربن می‌باشد، البته روش اخیر فقط در تعداد محدودی از کشورها اجرا شده است.

اگرچه کشور ما از نظر مخازن هیدروکربنی متعارف غنی است، ولی توجه به این منبع انرژی عظیم و گسترده، ضروری به نظر می‌رسد، چرا که اکتشاف و ارزیابی این منابع نه تنها سبب ارتقاء جایگاه و افزایش قدرت ایران به‌عنوان یکی از بزرگترین دارندگان منبع انرژی در جهان می‌شود، بلکه به‌طور مستقیم و غیرمستقیم در شکوفایی اقتصادی اقصی نقاط کشور می‌تواند نقش داشته و سوختی پاک را به مردم هدیه دهد.

زغال‌های با درجه بلوغ کم، موثرتر است، زیرا نسبت جذب دی‌اکسید کربن در آن‌ها بیشتر است [۱۳]. استفاده از این روش از دیادبرداشت، به کاهش مقدار دی‌اکسید کربن در اتمسفر به‌عنوان یکی از مهمترین گازهای گل‌خانه‌ای نیز کمک به‌سزایی می‌کند<sup>۴۴</sup>.

### نتیجه‌گیری

مدت‌زمان طولانی است که لایه‌های زغالی به‌عنوان سنگ‌منشاء مهمی برای گاز طبیعی و گاهی هیدروکربن مایع شناخته شده‌اند. در سال‌های اخیر، از یک طرف با کاهش حجم ذخایر هیدروکربنی متعارف و افزایش تقاضا و از طرفی، افزایش قیمت گاز، تولید از لایه‌های زغالی در جهان مقرون به صرفه شده و مورد توجه قرار گرفته است. فناوری‌های پیشرفته و تجربه‌های صنعتی به‌دست آمده در این زمینه اثر مثبتی در توسعه منابع گاز متان زغال‌سنگ گذاشته است.

گاز متان همراه با تدفین مواد گیاهی موجود در لایه‌های زغالی، در طی دو فرآیند بیوژنیک و حرارتی تولید می‌شود. بیشتر گاز متان تولید شده به‌صورت جذب سطحی در زغال ذخیره می‌شود که مقدار آن توسط عوامل مختلفی مانند حرارت، فشار، رطوبت، مقدار و نوع ماده آلی و درجه بلوغ آن کنترل می‌شود. اطلاعات اولیه و اصلی مورد

معمولاً در چاه‌های عمیق‌تر از چند صد متر انجام شده و باید قبل از حفاری، برنامه‌ریزی شود، زیرا نیاز به تأسیسات سطح‌الارضی دارد. بر خلاف سایر مخازن نامتعارف، شکست هیدرولیکی زغال، یک مرحله‌ای است. برای تحریک تولید گاز و آب بیشتر، آب چاه‌های تولیدی معاور می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد، چون این چاه‌ها معمولاً به‌صورت دسته‌ای حفر می‌شوند. برای ایجاد شکستگی هیدرولیکی یک چاه، به چند صد تا ۲۰۰۰۰ متر مکعب آب نیاز است [2].

با توجه به اینکه ظرفیت جذب دی‌اکسید کربن زغال‌سنگ بسیار بالاتر از متان است (شکل ۱۱)، لذا متان مجبور به واجذب از سطح زغال می‌شود و گاز دی‌اکسید کربن جای آن می‌نشیند، لذا تزریق این گاز سبب افزایش تولید متان می‌گردد (شکل ۱۲) [۱۴ و ۲۴]. با استفاده از این روش از دیادبرداشت، در یک فشار ثابت و بالا می‌توان زمان آبیگری و لذا، طول کل پروژه تولید متان زغال‌سنگ را کم کرد. همچنین، با استفاده از این روش، مشکلات مربوط به تغییرات خواص زغال‌سنگ که در رابطه با کاهش فشار رخ می‌دهد، ممکن است کم‌تر شود.

در سال‌های اخیر کشورهای نظیر آمریکا، استرالیا و چین استفاده از این فناوری را برای افزایش بازیافت گاز شروع کرده‌اند [۴]. این روش به خصوص در

### پانویس‌ها

- |                              |                         |                                   |
|------------------------------|-------------------------|-----------------------------------|
| 1. Unconventional reservoirs | 15. Devolatilization    | 29. Langmuir theory               |
| 2. Coal bed methane          | 16. Adsorbed            | 30. Depressurization              |
| 3. Coalification             | 17. Absorbed            | 31. Uplift                        |
| 4. Heating value             | 18. Rehomogenization    | 32. Erosion                       |
| 5. Fix carbon                | 19. Dry, ash free (daf) | 33. Dewatering                    |
| 6. Volatile matter           | 20. Gas-in-place        | 34. Desorption                    |
| 7. Moisture                  | 21. Direct method       | 35. Diffusion                     |
| 8. Biogenic                  | 22. Indirect method     | 36. Cleats                        |
| 9. Thermogenic               | 23. Experimental method | 37. Critical desorption pressure  |
| 10. Carbon dioxide reduction | 24. Theoretical method  | 38. Face cleats                   |
| 11. Methyl type fermentation | 25. Desorbed            | 39. Butt cleats                   |
| 12. Early stage              | 26. Lost gas            | 40. Well test                     |
| 13. Late stage               | 27. Residual gas        | 41. Hydrolic fracturing           |
| 14. Uplift                   | 28. Isotherm            | 42. CO2 capture and sequestration |



## منابع

- [1] Zou, C., Zhu, R., Tao, S., Hou, L., Yuan, X., Song, Y., Niu, J., Dong, D., Liu, S., Jiyang, L., Wang, S., Zhang, G., Unconventional petroleum geology, Petroleum Industry Press, Published by Elsevier Inc., 2013, 372 P.
- [2] IEA, Golden rules for a golden age of gas, world energy outlook, Special Report on Unconventional Gas, IEA, 2012, 143 P. [http://www.worldenergyoutlook.org/media/weowebiste/2012/goldenrules/weo2012\\_goldenrulesreport.pdf](http://www.worldenergyoutlook.org/media/weowebiste/2012/goldenrules/weo2012_goldenrulesreport.pdf)
- [3] Chen, K.C., Irawan, S., Sum, C.W., and Tunio, S.Q., 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, 2011, Vol. 1, No. 2, pp. 82-94.
- [4] Ojha, K., Karmakar, B., Mandal, A. and Pathak, A.K., Coal bed methane in India: Difficulties and prospects, International Journal of Chemical Engineering and Applications, 2011, Vol. 2, No. 4, pp. 256-260.
- [5] Anderson, J., Simpson, M., Basinski, P., Beaton, A., Boyer, C., Bulat, D., Ray, S., Reinheimer, D., Schlachter, G., Colson, L., Olsen, T., John, Z., Khan, R., Low, N., Ryan, B. and Schoderbek, D., Producing natural gas from coal, Oilfield Review, 2008, pp. 8-31.
- [6] Ahmed, U., Johnstone, D. and Colson, L., An advanced and integrated approach to coal formation evaluation, SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Dallas, Texas, 199, 1978-1-55563-522-0.
- [7] Rice, D.D., Composition and origins of coalbed gas, in: chapter 7 of book: Hydrocarbon from coal, AAPG Special Publication A180, Study in geology 38, 1993, pp. 159-184.
- [8] Stach, E., Mackowsky, M., Teichmuller, M., Taylor, G.H., Chandra, D. and Teichmuller, R., Stach's textbook of coal petrography, 2nd ed., Berlin, Gebruder Borutraeger, 1975, 425 P.
- [9] Pophare A.M., Mendhe V.A. and Varade A., Evaluation of coal bed Methane potential of coal seams of Sawang Colliery, Jharkhand, India, J. Earth Syst. Sci., 2008, Vol. 117, No. 2, pp. 121-132.
- [10] Meisner F.F., Cretaceous and Lower Tertiary coals as source for gas accumulations in the Rocky Mountain Area, in: Woodward J., Meisner F.F. and Clayton J.L. (Eds.), Hydrocarbon source Rocks of the Greater Rocky Mountain Region, Rocky Mountain Association of Geologists Guide Book, 1984, pp. 401-431.
- [11] Dallegge T.A. and Barker C.E., Coal-Bed methane gas-in-place resource estimates using sorption isotherms and burial history Reconstruction: An Example from the Ferron Sandstone Member of the Mancos Shale, Utah, in: Kirschbaum M.A., Roberts L.N.R. and Biewick L.R.H., Geologic Assessment of Coal in the Colorado Plateau: Arizona, Colorado, New Mexico, and Utah, U.S. Geological Survey Professional Paper 1625-B, 1994, pp. 1-26.
- [12] García-González, M., Surdam, R.C., and Lee, M.L., Generation and expulsion of petroleum and gas from Almond Formation Coal, Greater Green River Basin, Wyoming, AAPG Bulletin, 1997, Vol. 81, No. 1, P. 62-81.
- [13] Zhang, T., Ellis, G.S. and Ruppel, S.C., Effect of organic matter type and thermal maturity on gas adsorption in shale-gas systems, AAPG Search and Discovery Article #90122, Hedberg Conference, Austin, Texas (Abstract), 2012.
- [14] Bustin, R.M., Clarkson, C.R., Geological controls on coalbed methane reservoir capacity and as content, International Journal of Coal Geology 38, 1998, Vol. 1-2, pp. 3-26.
- [15] Chalmers, G.R.L., Bustin, R.M., On the effects of petrographic composition on coalbed methane sorption, Elsevier, International Journal of Coal Geology, 2007, Vol. 69, pp. 288-304.
- [16] Ross, D.J.K. and Bustin, R.M., Shale gas potential of the Lowe Jurassic Gordondale Member, Northeast British Colombia, Canada, The Society of Canada Petroleum Geologists, 2007, Vol. 55, No. 1, pp. 51-75.
- [17] Ji, L., Zhang, T., Milliken, K.L., Qu, J. and Zhang, X., Experimental investigation of main controls to methane desorption in clay-rich rick, Applied Geochemistry, 2012, Vol. 27, Issue 12, pp. 2533-2545.
- [18] Kim A.G., Estimating methane content of bituminous coalbeds from adsorption data, U.S. Bureau of Mines, Report of Investigations 8245, 1977, 22P.
- [19] Curtis, M.E., Cardott, B.J., Sondergeld, C.H. and Rai, C.S., Development of organic porosity in the Woodford Shale with increasing thermal maturity, International Journal of Coal Geology, 2012, Vol. 103, pp. 26-31.
- [20] Aminian, K., Evaluation of coalbed methane reservoirs, Petroleum and natural gas engineering department, West Virginia University. [http://karl.nrcce.wvu.edu/regional/CoalbedMethane\\_Aminian\\_Paper\\_2.pdf](http://karl.nrcce.wvu.edu/regional/CoalbedMethane_Aminian_Paper_2.pdf)
- [21] Waechter, N.B., Hampton, G.L. and Shipps, J.C., Overview of coal and shale gas measurement: field and laboratory procedures, Published in the Proceedings of the International Coalbed Methane Symposium, The University of Alabama, Tuscaloosa, Alabama, 2004, pp. 1-17.
- [22] Lin, W., Gas sorption and the consequent volumetric and permeability change of coal, A dissertation submitted to the Department of Energy Resources Engineering and the Committee on Graduate studies of Stanford University in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of Doctor of Philosophy, 2010, 215 P.
- [23] Gash, B.W., Measurement of rock properties in coal for coal bed methane production, conference paper, Society of Petroleum Engineering, 1991, Document No. 22909-MS.
- [24] Bend, S.L. and Frank, M.C., CO2 sequestration and coalbed-methane potential of lower Mannville Group (Lower Cretaceous) coals, southern Saskatchewan – preliminary investigations; in Summary of Investigations, Volume 1, Saskatchewan Geological Survey, Sask. Industry Resources, Misc. Rep. 2004-4.1, CD-ROM, Paper A-12, 2004, pp. 1-12.
- [25] Gasem, K. A. M., Pan, Z., Fitzgerald, J. E., Sudibandriyo, M., Robinson, R. L., 2002, Modeling of gas adsorption on coalbeds, Oklahoma State University, School of Chemical Engineering, 28 P. <http://www.coal-seq.com/Proceedings/Gasem-CO2-presentation.pdf>