

## استراتژی و چالش‌های توسعه و تولید گاز متان لایه‌های زغالی (CBM)

رویا گراوند، شرکت نفت و گاز پارس ■ علی نخعی، انستیتو مهندسی نفت دانشگاه تهران

در جهان را نشان می‌دهد. منابع زغال سنگ ایران در رسوبات تریاس، ژوراسیک زیرین و میانی به نام "گروه شمشک" قرار دارد. این گروه در شمال، مرکز و شرق ایران گسترش داشته و در سه منطقه اصلی کرمان، طبس و البرز متمرکز است. [۱] با توجه به وجود مخازن متعارف فراوان در کشورمان، تاکنون توجه خاصی جهت اکتشاف، ارزیابی و تولید گاز متان لایه‌های زغالی نشده است. در این مطالعه ابتدا به‌طور مختصر به مقایسه مخازن CBM با مخازن متعارف و نحوه ذخیره‌سازی گاز متان در زغال سنگ پرداخته می‌شود. سپس استراتژی و چالش‌های توسعه و تولید گاز متان لایه‌های زغالی از جمله ارزیابی پتروفیزیکی، حفاری و سیمان کاری، تکمیل چاه، تولید و بهره‌برداری، ازدیاد برداشت، مسائل قراردادی و چشم‌انداز مخازن مذکور مورد بررسی قرار می‌گیرد.

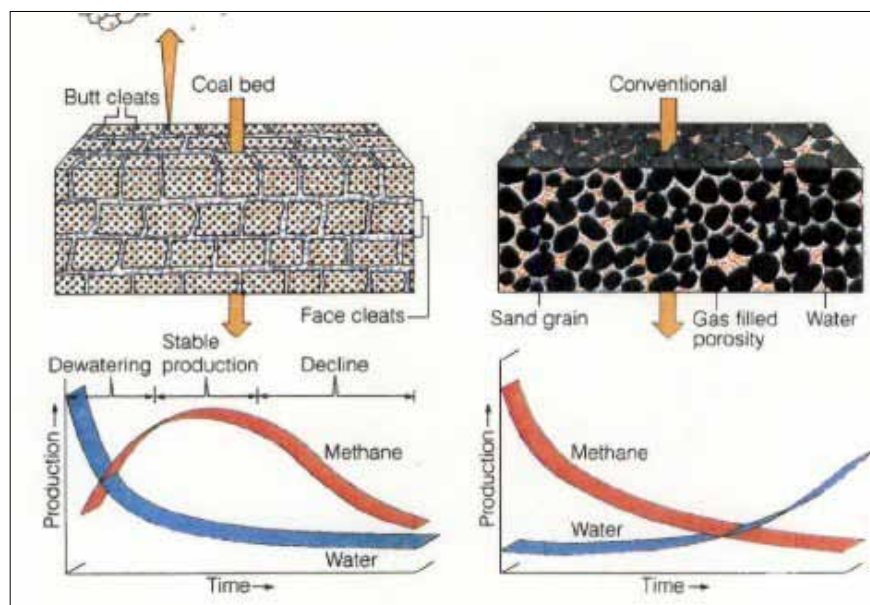
برخلاف مخازن گازی متعارف، لایه‌های زغال سنگ به‌عنوان یک سیستم نفتی کامل یعنی سنگ منشأ، سنگ مخزن و پوش سنگ عمل می‌کند. [۳] مطالعه نشان می‌دهد تفاوت‌های زیادی بین خواص مخزنی، مکانیسم‌های ذخیره، مکانیسم‌های جریان و پروفایل تولید این دو نوع مخزن وجود دارد. مخازن CBM دارای یک مجموعه شکستگی اورتوگونال به نام Cleats هستند که عمود بر جهت لایه‌بندی می‌باشند. ماتریکس لایه‌های زغالی اساساً تراوایی ندارد و تنها در صورت داشتن تراوایی شکستگی مناسب، تولید اقتصادی از آن میسر خواهد شد. بنابراین انگیزش چاه<sup>۲</sup> با استفاده از شکست هیدرولیکی یا تکمیل Cavitation در این چاه‌ها لازم است. در مخازن کربناته و ماسه‌سنگی متعارف، گاز در سیستم تخلخل آنها ذخیره می‌شود.

کاهش سریع منابع متعارف در جهان، پیشرفت در دانش و فناوری‌های اکتشافی و بهره‌برداری و همچنین افزایش قیمت گاز باعث شده است تولید از مخازن غیرمتعارف<sup>۲</sup> مورد توجه خاص کشورهای دارنده این نوع مخازن قرار گیرد. [۱] شکل ۱ نقشه گسترش منابع CBM

گاز در مقایسه با زغال سنگ و نفت به‌عنوان سوختی پاک در جهان مطرح است، زیرا به ازای هر واحد انرژی مقدار کمتری دی‌اکسید کربن تولید می‌کند. گاز متان لایه‌های زغالی<sup>۱</sup> یکی از منابع مهم هیدروکربنی غیرمتعارف در دنیا است. افزایش روزافزون تقاضا برای انرژی و



شکل ۱ | نقشه گسترش منابع CBM در جهان [۲] مقایسه مخازن CBM با مخازن گازی متعارف



شکل ۲ | مقایسه مخازن CBM با مخازن گازی متعارف

استراتژی بهینه آگیری به همراه تکنیک‌های سیمان کاری و انگیزش چاه مناسب می‌تواند باعث حرکت سریع‌تر آب به خارج از شبکه تراوایی شکستگی‌های زغال سنگ و افزایش بهره‌دهی چاه<sup>۷</sup> شود. طول عمر چاه‌های CBM حدود ۵ تا ۱۵ سال است و تولید گاز بیشینه آنها، یک تا ۶ ماه پس از آگیری اتفاق می‌افتد. [۳]

### ذخیره گاز متان در لایه‌های زغالی

زغال سنگ سنگی است مرطوب که از تجمع رسوبات آلی منشأ گرفته از گیاهان (پیت)، در طی تدفین و سپری کردن مراحل به نام زغالی شدن تشکیل می‌شود. تشکیل گاز متان تابعی از نوع ماسرال (مواد آلی تشکیل دهنده زغال سنگ) و فرآیند بلوغ حرارتی است. گاز متان تولید شده، به سه صورت در لایه‌های زغالی ذخیره می‌شود:

- ۱- گاز جذب شده سطحی<sup>۸</sup> و داخل ماتریکس<sup>۹</sup> زغال سنگ
- ۲- گاز آزاد در خلل و فرج و شکستگی‌های زغال سنگ
- ۳- گاز حل شده در سیالات زغال سنگ

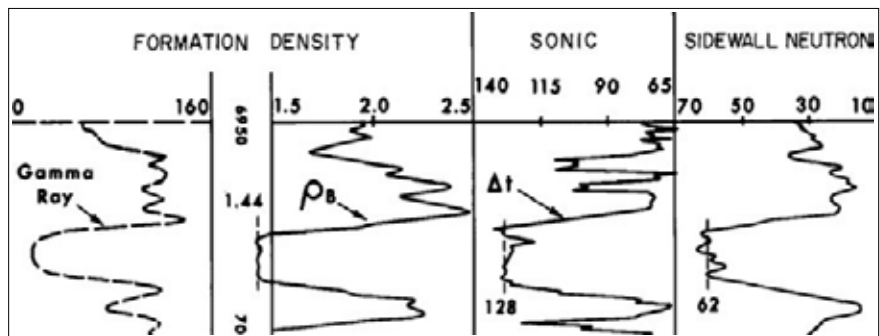
در بین این گازها، گاز جذب شده سهم بسیار قابل توجهی دارد. به‌طور کلی با کاهش فشار مخزن، گاز متان از حالت حل شده خارج و به گاز آزاد تبدیل می‌شود. تعیین مقدار نسبی گاز ذخیره شده در زغال سنگ، معیار اصلی ارزیابی این مخازن و طراحی راهکارهای تولید مناسب و موثر از آنها است. به‌منظور تعیین گاز متان درجا در حوضه‌های زغال دار بایستی مساحت مخزن، ضخامت لایه‌های زغالی، متوسط دانسیته زغال و متوسط محتوای گاز ذخیره شده در زغال را مشخص کرد. [۴]

### ارزیابی پتروفیزیکی و مخزنی لایه‌های زغالی

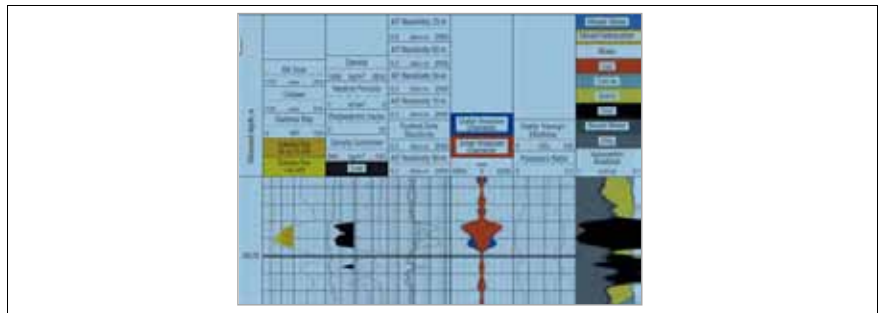
به‌طور کلی شرکت‌های اپراتور منابع CBM در حال جستجوی روش‌های بهینه جهت ارزیابی، حفاری، تکمیل و تولید مخازن CBM هستند. پس از بررسی حوضه‌های بزرگ زغال دار<sup>۱۰</sup> و اطمینان از پتانسیل

را در خود نگه دارند. در ابتدا شکستگی‌ها با آب و گاز پر می‌شوند و فشاری ایجاد می‌کنند که باعث جذب گاز به زغال سنگ می‌شود. آگیری چاه‌های تولیدی، باعث کاهش فشار در شکستگی‌ها و واجذب گاز از ماتریکس زغال می‌شود. برخلاف چاه‌های گازی متعارف، بیشتر چاه‌های CBM در ابتدا حجم بزرگی از آب و میزان کمی گاز تولید می‌کنند. به‌مرور در طی زمان، حجم آب تولیدی کاهش یافته و نرخ تولید گاز افزایش می‌یابد. (شکل ۲)

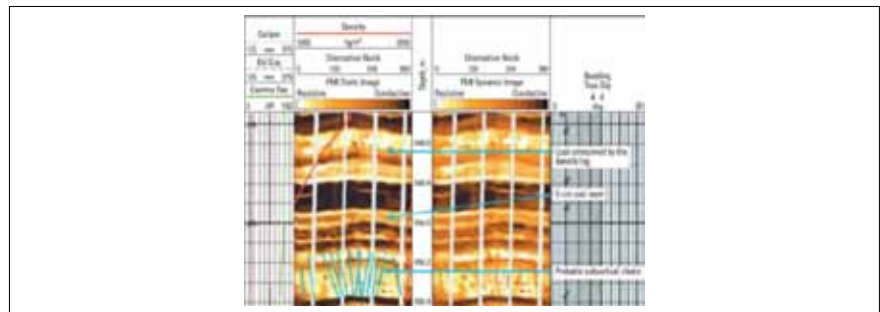
اما در زغال سنگ، متان توسط جذب سطحی ذخیره می‌شود. گاز متان به‌صورت درجا تشکیل<sup>۴</sup> می‌شود، سپس به‌طور فیزیکی جذب لایه‌های زغالی می‌شود. زغال سنگ به‌خاطر داشتن تخلخل‌های ریز<sup>۵</sup> زیاد، مساحت سطح<sup>۶</sup> در دسترس بسیار بزرگی دارد. یک کیلوگرم زغال سنگ می‌تواند مساحت سطح بزرگتر از ۱۰۰ هزار مترمربع داشته باشد. در یک فشار یکسان، مخازن CBM نسبت به مخازن ماسه‌سنگی می‌توانند ۲ تا ۳ برابر گاز بیشتری



شکل ۳ | آنالیز لاگ زغال سنگ: تخلخل نوترون بالا، تخلخل صوتی بالا و تخلخل دانسیته بالا (دانسیته پایین)، مقاومت بالا و پرتوگاما تمیز [۵]



شکل ۴ | پروفایل زون رخنه و خواص مکانیکی لایه زغالی [۶]



شکل ۵ | تصویر کلیت‌ها و رگه زغالی نازک روی لاگ تصویری [۶]

زیادی چاه قائم اقتصادی تر از حفاری افقی است زیرا حفاری چاه دفع آب با استفاده از تجهیزات موجود امکان پذیر است. فشار مخزن و مشخصات زغال سنگ به انتخاب نوع سیال حفاری کمک می کند. حفاری چاه های CBM با هوا، باعث به حداقل رساندن آسیب به سیستم شکستگی های زغال سنگ می شود. حفاری با سیالات پایه آبی آسیب بیشتری به زغال سنگ وارد می کند. اما زمانی که gas kick وجود دارد، ایمن بوده و آسیب وارده می تواند با تحریک شکستگی رفع شود. حفاری *underbalance* نیز سبب به حداقل رساندن آسیب سازندی می شود. متداول ترین نوع دکل های حفاری در چاه های CBM، دکل حفاری *conventional rotary* است. انواع دیگر شامل دکل *top drive*، دکل های معدن کاری و یونیت های حفاری *coil-tubing* است. انتخاب دکل حفاری، تجهیزات همراه و سیالات حفاری اغلب به روش تکمیل چاه بستگی دارد. به عنوان مثال وقتی تکمیل نوع *dynamic-cavity* مدنظر باشد دکل حفاری *reciprocating* جهت گردش، *power* بوده و گردش در طی تمیزسازی به *swivel* مجهز باشد. تجهیزات جانبی برای تکمیل شامل بوسه ها و کمپرسورهای هوا، یک سرچرخان، *manifold* و *flow line* طراحی شده برای تست تولید می باشد.

### عملیات سیمان کاری چاه های CBM

به خاطر وجود شکستگی های موجود در زغال سنگ، سیمان کاری مناسب یکی از بزرگ ترین چالش های چاه های CBM است. به عنوان مثال ممکن است در هنگام عملیات سیمان کاری، سیمان برگشتی<sup>۱۳</sup> به سطح وجود نداشته که باعث *low top cement* و ریسک بالای مهاجرت گاز می شود. اپراتورها قبلا با افزایش پمپاژ سیمان، با این مسئله مقابله می کردند اما یک راهکار جدید معروف به سیمان فیبری پیشرفته *Cem NET* نتایج بسیار خوبی را ارائه کرده است.

تطابق آن با داده های مغزه و در نهایت تعیین درجه بندی زغال و حجم گاز جذب شده  
۴- تشخیص درجه ی شکستگی های طبیعی و به کارگیری آنها در مدل کردن سیستم شکستگی حوضه CBM  
۵- تعیین جهت شکستگی ها و تنش های درجا (طرح توسعه میدان، طراحی مسیری چاه ها و انگیزش)

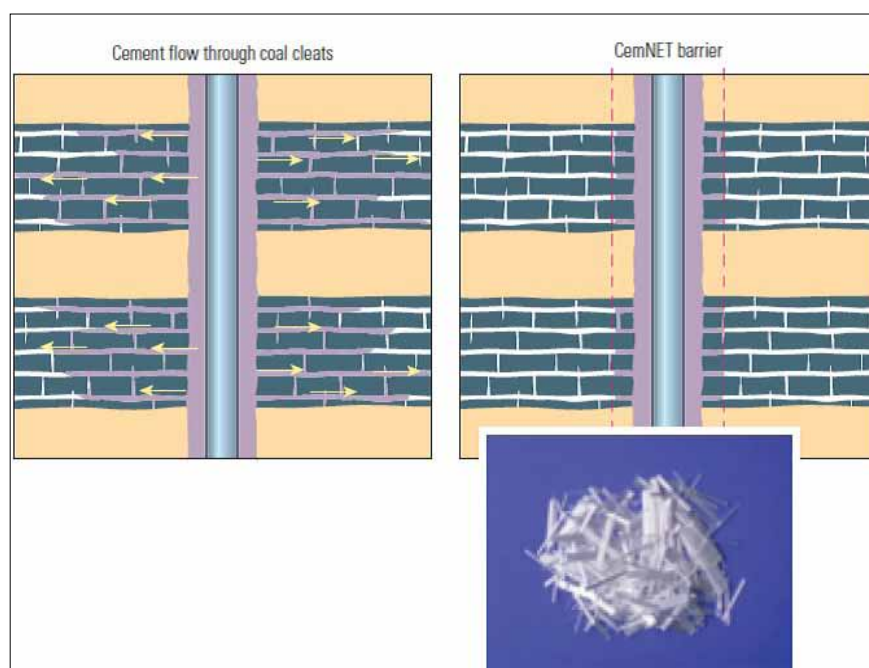
### عملیات حفاری چاه های CBM

اولین گام در طراحی برنامه حفاری یک چاه CBM، جمع آوری اطلاعات چاه های ناحیه مجاور است. این اطلاعات شامل عمق و فشار مخزن، تاریخچه حفاری و مسائل زیست محیطی است. حفر چاه های قائم و به صورت دسته ای در مخازن CBM رایج است. چاه های چند پایه<sup>۱۲</sup> نیز به ویژه جهت تخلیه گاز رگه های زغالی در بالای معدن کاری انجام می شود. حفاری این نوع مخازن در اعماق ۸۰۰ تا ۱۲۰۰ متر مرسوم است ولی گاهی تا عمق کمتر از ۱۰۰ متر نیز می رسد. در حفاری های کم عمق، حفاری تعداد

تولیدی گاز متان در آنها، حفاری آغاز می شود. جهت ارزیابی دقیق مخزنی این چاه ها معمولا مغزه گیری و نمودارهای پتروفیزیکی و مخزنی از جمله نوترون، دانسیته، پرتوگاما و مقاومت، لاگ های تصویری، لاگ های صوتی پیشرفته و لاگ های مینرالوژی از جمله ECS در چاه رانده می شود. (اشکال ۳، ۴ و ۵) [۵-۶]

مغزه های به دست آمده از زغال سنگ جهت آنالیز *proximate* (تخمین محتوی کربن، کربن ثابت، رطوبت، خاکستر و هیدروکربن) و تعیین درجه بندی زغال و مقدار گاز جذب شده به کار می روند. به طور کلی، کاربرد لاگ ها در ارزیابی لایه های زغالی شامل این موارد است:

- ۱- تخمین تراوایی، تراوایی فرکچرها و زون رخنه<sup>۱۱</sup>، تعیین لیتولوژی و پارامترهای ژئومکانیکی
- ۲- تعیین اشباع گاز (محتوی گاز)، پروفایل اشباع آب و در نهایت تعیین پتانسیل تولیدی زغال سنگ ها
- ۳- تخمین درصد مواد فرار، کربن ثابت، رطوبت و خاکستر با استفاده از آنالیز *proximate* و





گاز تولیدی نسبت به چاه‌هایی که شکست هیدرولیکی شده‌اند، نیز بیشتر شود. (شکل ۷) زغال سنگ‌ها معمولاً در مجاورت ماسه سنگ‌های تولیدی هستند و خواص مکانیکی بسیار متفاوتی از همدیگر دارند. زغال سنگ ضریب پواسون بالاتر و مدول یانگ پایین‌تری نسبت به ماسه سنگ دارند، بنابراین تمایل دارد فشار طبقات بالایی<sup>۱۸</sup> را به‌طور جانبی منتقل کرده و گرا دیان شکستگی بالاتری ایجاد کند.

شکستگی‌ها، کلیت‌های زغال سنگ سناریوی شکست هیدرولیکی پیچیده‌ای دارند و مدل کردن آنها بسیار مشکل است. تعیین دقیق بزرگی و جهت تنش‌های درجا با استفاده از لاگ‌های صوتی پیشرفته، باعث بهبود و ارتقا طراحی شکست هیدرولیکی می‌شوند. علاوه بر این، صفحه شکستگی<sup>۱۹</sup> تعیین شده از لاگ‌های تصویری منعکس‌کننده شرایط کنونی استرس در دیواره چاه است. این اطلاعات در استراتژی مشبک کاری نیز به کار می‌روند. ارتباط بین کلیت‌های زغال سنگ و استرس‌های افقی مهم است و بیانگر تغییرات تولید گاز متان لایه‌های زغالی بین چاه‌ها و نواحی تولیدی است. در مناطقی که زغال سنگ‌ها در مجاورت ماسه سنگ‌های تولیدی هستند، استراتژی مشبک کاری و انگیزش چاه در هر دو مخزن مورد بررسی مجدد قرار می‌گیرد. یک تکنیک شکستگی عمودی غیرمستقیم IVF<sup>۲۰</sup> جهت اطمینان از توزیع<sup>۲۱</sup> مناسب شکستگی‌ها استفاده می‌شود. این تکنیک در زغال سنگ‌ها موفقیت‌آمیز است زیرا تراوایی عمودی آن نسبت به تراوایی افقی بیشتر است. [۷]

یک مشخصه دیگر برخی از رگه‌های زغالی، نازک و چندگانه بودن آنهاست. با به‌کارگیری تحریک چاه<sup>۲۲</sup> Coil FRAC با استفاده از تکنولوژی Coil tubing، می‌توان هر کدام از زون‌ها را به‌طور جداگانه و اقتصادی مشبک کاری کرده و شکستگی ایجاد کرد. [۷]

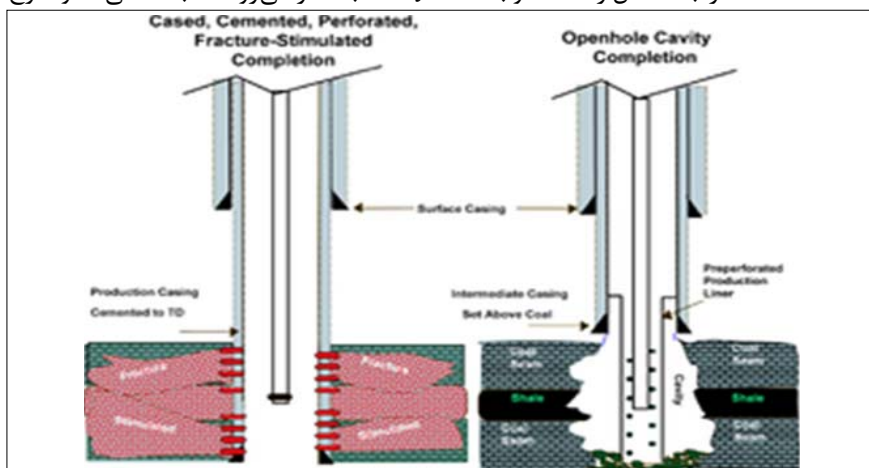
پوشش<sup>۱۵</sup> بهتر سیمان می‌شود. همچنین در هنگام انگیزش شکستگی<sup>۱۶</sup>، به کاهش screenout کمک کرده و از مشکلات مرتبط با استراتژی تکمیل چاه نیز جلوگیری خواهد کرد. [۲]

### استراتژی تکمیل چاه‌های CBM

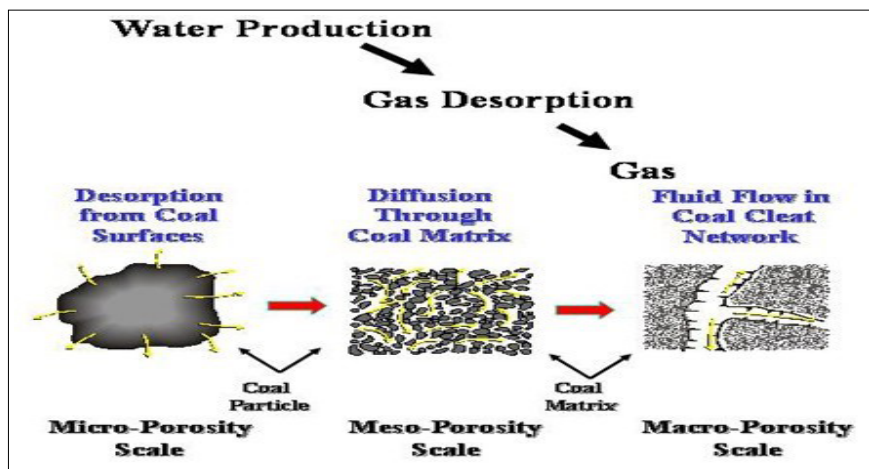
راندن لوله جداری، مشبک کاری و شکست هیدرولیکی زغال متداول‌ترین نوع تکمیل است. اگر تراوایی به اندازه کافی بالا باشد و زغال سنگ‌ها در حین حفاری دچار آسیب نشده باشند، ممکن است تکمیل حفره باز<sup>۱۷</sup> کافی باشد. در این مورد تکمیل dynamic cavity به کار می‌رود که باعث می‌شود نرخ

(شکل ۶) دوغاب Cem NET حاوی فیبرهای سیلیسی است که باعث bridge و پلاگ شدن نواحی lost-circulation می‌شوند و در نتیجه دوغاب<sup>۱۴</sup> از میان آنالوس به سطح می‌آید. [۲] این تکنولوژی از دو جنبه حائز اهمیت است: ۱- پمپ سیمان کمتر به‌ویژه کاهش هزینه ۲- کاهش آسیب احتمالی به زغال سنگ

در نواحی که lost-circulation در آنها خیلی مشکل ساز است، فیبرهای CemNET همراه با سیستم دوغاب LiteCRETE به کار می‌روند. نتایج موفقیت‌آمیز این تکنیک در آمریکا و ایومینگ استرالیا دیده شده است. سیمان LiteCRETE چاه‌های CBM، مشکلات lost-circulation را به حداقل رسانده و باعث



شکل ۷ | روش‌های تکمیل چاه‌های CBM



شکل ۸ | مراحل مختلف آزاد شدن گاز متان جذب شده از زغال سنگ و جریان آن به داخل چاه [۵]

### روش تولید گاز متان از لایه‌های زغالی/آبگیری

همانطوری که قبلاً گفته شد تولید گاز متان لایه‌های زغالی، با تولید از مخازن متعارف تفاوت دارد و عامل اصلی به تله افتادن گاز در لایه‌ها، فشار داخل شکستگی‌های طبیعی زغال است. برخلاف مخازن متعارف، فشار پوش سنگ و بستگی ساختمانی، عوامل بازدارنده نمی‌باشند و برای تولید گاز، بایستی فشار داخل کلیت‌ها کم شود.<sup>۲۳</sup> این کار به صورت طبیعی در اثر بالا آمدگی رسوبات<sup>۲۴</sup> و فرسایش<sup>۲۵</sup> رخ می‌دهد یا به‌طور مصنوعی بر اثر فعالیت‌های معدن کاری و آبگیری لایه‌های زغالی انجام می‌شود. آبگیری لایه زغالی باعث می‌شود گاز طی سه مرحله، از حالت جذب

آزاد شده و از چاه خارج شود: (شکل ۸) [۳]

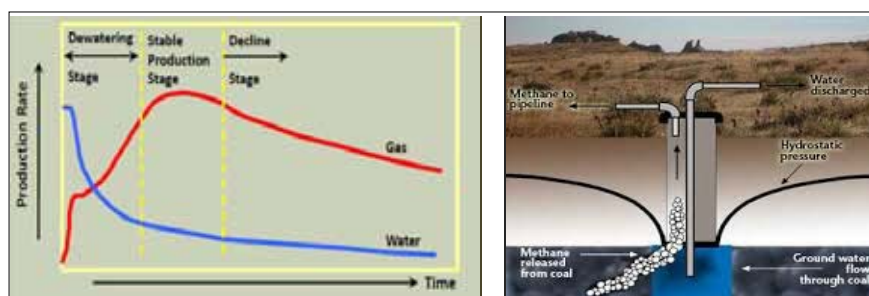
۱- مرحله واجذب گاز از ماتریکس  
۲- انتشار گاز واجذب شده به داخل شکستگی‌های طبیعی زغال  
۳- جریان گاز به‌همراه آب در داخل شکستگی‌ها به سمت چاه  
عملیات تولید در چاه‌های CBM به‌جز یک مورد خاص، خیلی متفاوت از سایر چاه‌های گازی نیست. در این چاه‌ها، در ابتدا آب زیادی تولید می‌شود و با گذشت زمان، نسبت گاز به آب<sup>۲۶</sup> زیاد می‌شود. در اغلب چاه‌های CBM تولید آب به‌منظور تولید حداکثری گاز، حیاتی است و تابع تراوایی متوسط زغال سنگ و قدرت آبد<sup>۲۷</sup> است. آبگیری موفقیت‌آمیز نیازمند

پمپاژ بی‌وقفه جهت کاهش فشار انتهایی چاه<sup>۲۸</sup> است که نهایتاً باعث واجذب گاز از ماتریکس، انتشار آن به داخل سیستم شکستگی‌های زغال و تولید گاز می‌شود و پروفایل کاملاً بی‌نظیر تولید گاز متان را ارائه می‌دهد. (شکل ۹) تولید اولیه این مخازن بیشتر آب است. سرعت آبگیری مخزن به عوامل مختلفی از جمله اشباع آب و گاز، تخلخل شکستگی‌ها، تراوایی مطلق و نسبی گاز، مقدار آب زغال و فاصله چاه‌ها از هم بستگی دارد. با ترسیم ایزوترم جذب گاز می‌توان مقدار کاهش فشار مورد نیاز، زمان واجذب و تولید گاز از چاه را تخمین زد. [۸]

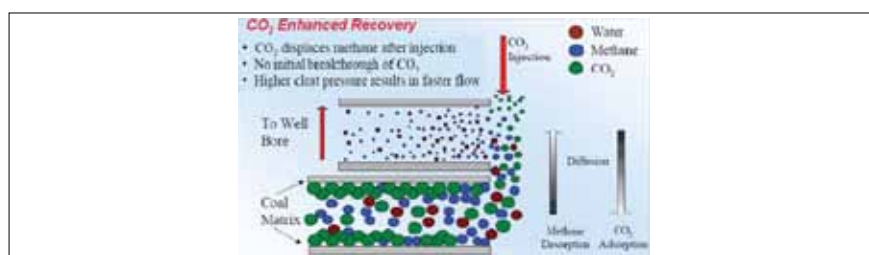
### چالش‌های عملیات تولید چاه‌های CBM (دفع آب تولیدی)<sup>۲۹</sup>

آبگیری چاه‌های CBM نیازمند تجهیزات و امکانات لازم جهت مهار آب تولیدی و دفع آن در ابتدای پروژه است که به تامین مالی و طراحی نیاز دارد. برداشت اطلاعات مخزنی از جمله فشار اولیه مخزن، یکی از مهم‌ترین موارد عملیات تولید است. این اطلاعات درون چاهی<sup>۳۰</sup> با اندازه‌گیری سطح سیال استاتیک چاه به‌دست می‌آید. داده‌های مشابه بایستی تحت شرایط تولید نیز ثبت شود. جهت اطمینان از pumed off شدن چاه‌ها، فشار ته چاهی و استاتیک هر چاه جدید بایستی هر چند ماه یک‌بار اندازه‌گیری شود. علاوه بر این نمودارهای تولید<sup>۳۱</sup> جهت اطلاع از میزان مشارکت لایه‌های زغالی بایستی در چاه رانده شوند. این ابزار محدود به چاه‌های تولیدی و چاه‌هایی که ابزارهای ته‌چاهی همانند ESP<sup>۳۲</sup> دارند، می‌باشد. در هر صورت نرخ دقیق تولید گاز بسیار مهم است و بایستی به‌طور مداوم اندازه‌گیری شود. [۷]

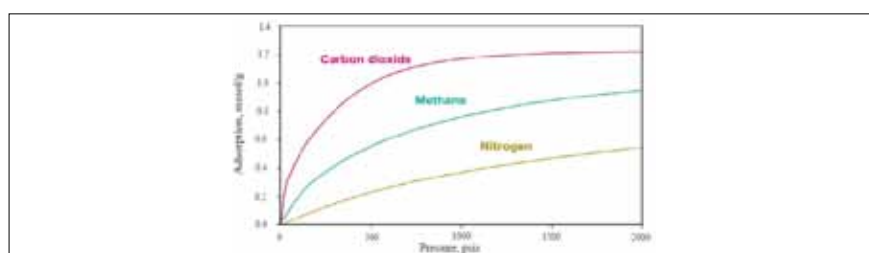
به‌عبارت دیگر، دفع آب یکی از مهم‌ترین چالش‌های توسعه CBM است. هزینه ساخت امکانات مهارکننده آب<sup>۳۳</sup>، حفاری چاه‌های دفعی و دست‌وپنجه نرم کردن با مسائل زیست‌محیطی بسیار پرهزینه است بنابراین



شکل ۸ | آبگیری و پروفایل تولید گاز متان از مخازن CBM



شکل ۹ | از دید برداشت گاز متان از لایه‌های زغالی با تزریق CO<sub>2</sub>



شکل ۱۰ | منحنی هم‌دمای جذب گازهای CO<sub>2</sub>، متان و نیتروژن در زغال سنگ

عملیاتی، بازاریابی گاز و مسائل اقتصادی بستگی دارد. در پروژه‌های گازی متعارف، قبل از توسعه، نرخ گاز با استفاده از آزمایش چاه<sup>۲۷</sup> تعیین می‌شود و هزینه‌های پردازش و دفع آب تا انتهای عمر مخزن به تعویق می‌افتد. بنابراین با توجه به حفظ نرخ دوره تولید پایدار چند ساله گاز، قراردادهای بزرگ گازی منعقد می‌شود. برخلاف مخازن متعارف، در ابتدا تولید گازی از مخازن CBM وجود ندارد یا اینکه نرخ تولید گاز بسیار پایین است. در نتیجه در ابتدای پروژه تعهدات بزرگی جهت حفاری، انگیزش و مهار آب مورد نیاز است. به‌خاطر اینکه جهت نیل به نرخ تولید گاز اقتصادی ممکن است چندین سال زمان لازم باشد، تامین مالی و بستن قراردادهای بلندمدت بسیار مشکل است. بنابراین مدیریت ریسک‌های فنی و مالی بسیار حائز اهمیت است. با به‌کارگیری آنالیز داده‌های مخزنی، پروژه‌های pilot و توسعه مرحله‌ای مخازن می‌توان ریسک‌های فنی را کاهش داد. [۷]

### چشم‌انداز مخازن CBM

در سال‌های اخیر، با کاهش حجم ذخایر هیدروکربنی متعارف، افزایش تقاضا و از طرفی افزایش قیمت گاز، تولید از لایه‌های زغالی در جهان مقرون به‌صرفه و اقتصادی شده است. اگرچه دانش صنعتی زغال سنگ بسیار گسترده و در حال رشد است اما مدل‌سازی رفتار مخازن CBM چالش بزرگی است. پیشرفت تکنولوژی در ارزیابی سازندگی و حفاری، تکمیل چاه، تحریک چاه، تولید و مدل‌سازی مخزنی تاثیر بسزایی در توسعه این مخازن دارد. با توجه به حجم ذخایر گسترده CBM در جهان و رشد زیرساخت‌های استخراجی و اقتصادی، زغال سنگ می‌تواند در آینده جزء صدر لیست سوخت‌های غیرمتعارف قرار گیرد. همچنین ممکن است صنعت CBM مسیر کاملاً جدیدی را در پیش گرفته و نقش اساسی در ذخیره کربن<sup>۲۸</sup> ایفا کند. به‌منظور

به تراوایی کم زغال سنگ، بدون انگیزش چاه کارآیی پایینی دارند. [۹] مشابه مخازن هیدروکربنی متعارف، روش‌های مختلفی جهت ازدیاد برداشت گاز از لایه‌های زغالی وجود دارد. حفاری افقی، شکست هیدرولیکی<sup>۳۶</sup>، تزریق CO<sub>2</sub>، شکست نیتروژن و Cavitation از جمله روش‌های انگیزش هستند. [۱۰] حفاری افقی در این مخازن زیاد معمول نیست، گاهی اوقات چاه‌های عمیق‌تر از ۴۰۰ متر و عمود بر جهت دسته شکستگی‌ها حفر می‌شود. [۵] شکست هیدرولیکی به‌طور گسترده جهت انگیزش مخازن CBM به‌کار می‌رود و باعث اتصال شبکه کلیت‌ها به چاه و تولید آب و گاز می‌شود. البته به‌خاطر خواص فیزیکی متفاوت زغال سنگ، این روش عملکرد پایینی تری نسبت به مخازن متعارف دارد. شکست هیدرولیکی باید قبل از حفاری برنامه‌ریزی شود، زیرا نیاز به تأسیسات سطح‌الارضی دارد. برخلاف سایر مخازن نامتعارف، شکست هیدرولیکی لایه‌های زغالی یک مرحله‌ای است. با توجه به بالا بودن ظرفیت جذب CO<sub>2</sub> زغال سنگ نسبت به متان، تزریق CO<sub>2</sub> سبب واجذب متان از سطح زغال و افزایش تولید آن می‌شود. (اشکال ۱۰ و ۱۱) این روش در زغال‌های با درجه بلوغ کم، موثرتر است، زیرا نسبت جذب CO<sub>2</sub> در آنها بیشتر است. [۱۱-۱۲] مزیت دیگر این روش، کاهش مقدار CO<sub>2</sub> اتمسفر است که یکی از مهم‌ترین گازهای گلخانه‌ای محسوب می‌شود. در روش Cavitation، چاه به‌صورت حفره‌باز تا بالای رگه‌های زغالی هدف تکمیل می‌شود. پنج نوع مختلف Cavitation که امروزه استفاده می‌شود عبارت است از: حفاری، طبیعی، مکانیکی، تزریقی و jetting.

### چالش‌های قراردادی و توسعه پروژه‌های CBM

موفقیت مالی هر پروژه گازی به فاکتورهای مهمی از جمله نرخ گاز تولیدی، هزینه‌های

از منظر اقتصادی، هزینه‌های دفع آب فاکتور تصمیم‌گیرنده‌ای در خصوص توسعه پروژه‌های CBM است. در واقع، تولید آب چاه‌های CBM یک مسأله کوتاه‌مدت است که باید در اول پروژه بر آن فائق آمد تا اینکه تولید اقتصادی گاز میسر شود. جهت تصمیم‌گیری در خصوص نوع روش دفع، باید آنالیز کامل شیمیایی نمونه آب انجام شده و نرخ آب تولیدی نیز تعیین شود.

سه تکنیک رایج جهت دفع آب تولیدی در صنعت CBM مرسوم است که عبارتند از: تزریق زیرسطحی، تبخیر سطحی و تخلیه stream.

در روش تزریق زیرسطحی<sup>۳۴</sup> جهت دفع سیالات تولیدی به زون دفعی مورد تایید، بایستی یک چاه حفر شود. به‌خاطر اینکه مخازن CBM کم‌عمق هستند، بیشتر چاه‌های دفعی باید تا افق‌های عمیق حفاری شوند. بنابراین هزینه چاه‌های دفعی بیشتر از چاه‌های توسعه‌ای می‌شود. در روش تبخیر سطحی<sup>۳۵</sup>، از حوضچه‌های تبخیر فعال و یک سیستم spray/mist جهت تبخیر آب تولیدی استفاده می‌شود. روش سوم نیازمند یک سیستم پایش و تصفیه جهت اطمینان از کاهش کلریدها، جامدات حل شده و سایر ناخالصی‌ها به سطحی قابل قبول است. گاز تولیدی زغال سنگ به‌ندرت شامل H<sub>2</sub>S است اما ممکن است ناخالصی‌های دیگری از جمله N<sub>2</sub> و CO<sub>2</sub> به‌همراه داشته باشد. پس از جداسازی آب تولیدی از گاز و دفع ناخالصی‌های آن، گاز متان از طریق خط لوله به یک کمپرسور فرستاده می‌شود که معمولاً در خشکی قرار دارد. پس از تراکم گاز به فشار خط مناسب و قبل از تحویل، آب‌زدایی نهایی مورد نیاز است. [۷]

### ازدیاد برداشت مخازن CBM و کاهش CO<sub>2</sub> اتمسفر

چاه‌های CBM غالباً قائم هستند. با توجه

سبب ارتقا جایگاه ایران در بین کشورهای بزرگ دارنده ذخایر گازی جهان و شکوفایی اقتصادی مناطق محروم خواهد شد. بنابراین، با توجه به حجم ذخایر قابل توجه این منبع انرژی در کشورمان، رفع تحریم‌های اقتصادی و امکان دسترسی به تکنولوژی‌های روز دنیا، ضروری است اکتشاف، ارزیابی و توسعه مخازن CBM و به تبع بهره‌برداری از این سوخت پاک مدنظر قرار گیرد. ■

لایه‌های زغالی نشده است. حجم ذخایر قطعی زغال‌سنگ ایران ۱,۱ میلیارد تن تخمین زده شده است. از نظر بلوغ، درجه نیمه‌بیتومینه تا آنتراسیت و از نظر ترکیب نوع هومیک و غنی از ماسرال ویتیرینیت (کرسزون نوع III) است. [۱۴] ایران دارنده رتبه دوم ذخایر بزرگ گازی متعارف در جهان و تنها کشور دارای مخازن عظیم زغال‌سنگ در میان کشورهای خاورمیانه است. مدنظر قرار دادن این منابع

کاهش CO<sub>2</sub>/کاهش گازهای گلخانه‌ای از اتمسفر و افزایش تولید گاز طبیعی متان پروژه‌های ECBM<sup>۳۹</sup> زیادی به مطالعه لایه‌های زغالی غیرقابل معدن کاری اختصاص یافته است. [۱۳] به‌طور کلی، کشورهای زیادی در حال بررسی این منابع هستند. با توجه به وجود مخازن هیدروکربوری متعارف فراوان در کشورمان، تاکنون توجه خاصی جهت اکتشاف، ارزیابی، توسعه و تولید گاز متان از

## پانویس‌ها

1. Coalbed methane
2. Unconventional reservoirs
3. Stimulation
4. Generate
5. Microporosity
6. Surface area
7. Productivity
8. Adsorbed
9. Absorbed
10. Coal-bearing basin
11. Invasion
12. Multilateral
13. Return
14. Slurry
15. Coverage
16. Fracture Stimulation
17. Open hole
18. Overburden
19. Fracture plan
20. Indirect Vertical Fracturing
21. Propagation
22. Stimulation
23. Depressurization
24. Uplift
25. Erosion
26. Gas water ratio
27. Aquifer strength
28. Bottom hole pressure
29. Water disposal
30. Downhole
31. Production Logging Tools
32. Electrical-submersible pump
33. Water-handeling facilities
34. Subsurface injection
35. Surface evaporation
36. Hydrolic fracturing
37. Well test
38. Carbon storage
39. Enhanced CBM

## 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]. Schlumberger Oil Field Review, Coalbed methane: Clean Energy for the World, 2009, pp 4-13.
- [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]. Aminian, K., and Rodvelt, G. "Evaluation of coalbed methane reservoirs." Coal Bed Methane. Elsevier, 2014. 63-91.
- [5]. Crain's Petrophysical Handbook, coal analysis and coalbed methane, pages 8-23.
- [6]. Schlumberger Oil Field Review, Coalbed methane Reservoirs Fracture Restimulation Building Gas Wells, 2003, pp.10-31.
- [7]. Development of the Coalbed Methane Industry, [http://petrowiki.org/CBM\\_reservoir\\_fundamentals](http://petrowiki.org/CBM_reservoir_fundamentals).
- [8]. 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.
- [9]. Coal Mine Methane Recovery: A Primer, U.S. Environmental Protection Agency, EPA-430-R-09-013, 2009.
- [10]. Iskhakov, R., Coal-Bed Methane, Submitted as coursework for PH240, Stanford University, fall 2013.
- [11]. 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.
- [12]. 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.
- [13]. 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.
- [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.
- [۱۴]. ایران بزرگ‌ترین دارنده ذخایر زغال‌سنگ در خاورمیانه، سایت خبر پژوهشگاه صنعت نفت (ripinews). ۱۳۹۲/۰۶/۲۵، (۱۲