

مخازن زغال سنگ و شیل گازی

علی اصغر جولاپور^۱، مدیرت اکتشاف شرکت ملی نفت ایران

چکیده

تولید سالیانه‌ی گاز از مخازن زغال سنگ و شیل گازی^۱ در ایالات متحده بیش از ۲/۷ میلیارد فوت مکعب است که ۱۵ درصد از کل تولید سالیانه‌ی این کشور را شامل می‌شود. از این مقدار حدود ۱/۷ میلیارد فوت مکعب از بیش از چهار هزار چاه گازی در زغال سنگ‌های بیست حوضه‌ی مختلف به دست می‌آید و یک میلیارد فوت مکعب باقیمانده نیز حاصل بیش از چهار هزار چاه حفاری شده در شیل‌های گازی پنج حوضه‌ی دیگر است. با وجود اینکه تعداد حفاری‌ها در زغال سنگ‌های گازی در حال کاهش است. شیل‌های گازی هم‌اکنون از جمله جذاب‌ترین اهداف اکتشافی در ایالات متحده بوده و حفاری آنها به‌ویژه در نواحی مرکزی جنوب این کشور (شیل بارنت^۲ و معادل‌های آن)، حوضه‌ی آپالاچین^۳ و حوضه‌های متعددی در کوه‌های راکي^۴ به سرعت رو به افزایش است. به غیر از ایالات متحده در بیش از چهار کشور دیگر نیز توان زغال سنگ‌های گازی مطالعه شده که حاصل آن پروژه‌های تجاری در استرالیا، کانادا، چین و هند بوده است. کوشش‌ها برای شناخت ذخایر جدید و همچنین تولید بیشتر از منابع موجود ادامه دارد. با توجه به اینکه منابع زغال سنگ و شیل گازی در جهان به ترتیب بالغ بر ۹۰۰۰ و ۱۶۰۰۰ تریلیون فوت مکعب تخمین زده می‌شود واضح است که پتانسیل عظیمی برای رشد این صنعت در آینده وجود دارد.

اطلاعات مقاله

تاریخ ارسال نویسنده: ۹۷/۰۲/۱۱

تاریخ ارسال به داور: ۹۷/۰۲/۲۴

تاریخ پذیرش داور: ۹۷/۰۴/۱۸

واژگان کلیدی:

زغال سنگ، مخازن زغال سنگ گازی، حفاری و تکمیل چاه، آبدایی، ارزیابی مخزن

مقدمه

حاضر گزیده‌ای از سری انتشارات مؤلفین برتر^۵ انجمن مهندسين نفت^۶ و سایر منابع معتبر در این زمینه است. با توجه به بررسی نسبتاً جامع این نوشتار از کل فرآیند ارزیابی، توسعه و تولید، روش‌ها و فن‌آوری‌های مورد استفاده و مسائل اقتصادی و مالی این منابع هیدروکربنی، امید است این مقاله بتواند راهنم‌ای مناسبی برای سیاست‌گذاری‌ها و تدوین نقشه‌ی راهی جهت آغاز مطالعه این‌گونه ذخایر باشد.

با افزایش قیمت جهانی گاز در دو دهه‌ی اخیر منابع غیرمتعارف گاز از جمله زغال سنگ‌ها و شیل‌های گازی بسیار مورد توجه قرار گرفته‌اند. با توجه به منابع عظیم گازی کشورمان شناسایی این ذخایر در ایران تاکنون مورد غفلت واقع شده‌اند. این در حالی است که به دلیل حضور ذخایر متعارف هیدروکربنی در جنوب و جنوب غرب کشور، انتقال به‌موقع و مطمئن سوخت در گستره‌ی کشور همواره مسئله‌ای جدی و پرهزینه بوده است. با توجه به پتانسیل موجود شاید زمان آن فرارسیده باشد تا سیاست‌گذاران دیدگاه خود را از تمرکز بر توسعه‌ی مخازن عظیم هیدروکربنی، به توجه بیشتر در زمینه‌ی مطالعه و توسعه‌ی منابع کوچک‌تر و غیرمتعارف (دست کم برای مصارف داخلی و محلی) سوق دهند. رسوبات زغال دار ایران از دیدگاه زمانی از تریاس پسین تا ژوراسیک میانی گسترش دارند و محدوده‌ی وسیعی از شمال، مرکز و شرق کشور را در برمی‌گیرند. اکثر ذخایر زغال سنگی کشور از نوع حرارتی (گازدار و گازدار چرب) هستند که تاکنون از نظر توان تولید گاز مطالعه شده‌اند. از سوی دیگر نگاهی به میادین گازی در حوضه‌ی ایران مرکزی از جمله میدان سراجه (شرق قم)، اهداف اکتشافی تلخه (جنوب گرمسار) و سیلک (شمال کاشان) نشان می‌دهد که با توجه به تخلخل اولیه و تراوایی ناچیز سنگ مخزن این میادین (سازند قم) می‌توان آنها را در زمره‌ی شیل‌های گازی به حساب آورد. همین ویژگی در سازند گرو در حوضه‌ی زاگرس از دیرباز مورد توجه بوده است. نوشتار

۱- اصول و ضروریات مخزن

زغال سنگ، سنگی رسوبی است که بیش از ۵۰ درصد وزنی آنرا مواد آلی تشکیل می‌دهند؛ در صورتی که شیل حاوی کمتر از ۵۰ درصد مواد آلی است و در اثر تغییر و تبدیل مواد آلی توسط فرآیندهای میکروبی (گاز بیوژنیک^۷) و ژئوشیمیایی (گاز ترموژنیک^۸) در طول تدفین گاز متان حاصل می‌شود. گاز حاصل توسط ساز و کارهای متعددی ذخیره می‌شود که شامل گاز آزاد^۹ درون منافذ ریز و گاز جذبی^{۱۰} روی سطوح داخلی مواد آلی است. تقریباً تمامی گاز حاصل از زغال سنگ از نوع جذبی است؛ در حالی که گاز تولیدی از شیل‌ها مخلوطی از گاز جذبی و آزاد است.

مخازن زغال سنگی یک‌سری شکستگی ارتوگونال به نام کلیت^{۱۱} دارند که با جهت‌یافتگی عمود بر لایه‌بندی، مجرای اولیه‌ای را برای جریان سیال مهیا می‌کنند. گاز از ماتریکس به کلیت‌ها منتشر شده و

* نویسنده‌ی عهده‌دار مکاتبات (a.julapour@nioc.ir)

از این طریق به درون چاه جریان می‌یابد. در مخازن شیل گازی، گاز از لایه‌های تراوتر ماسه یا سیلت که به‌صورت متناوب با لایه‌های شیل قرار دارند یا از طریق شکستگی‌های طبیعی یا از ماتریکس شیل تولید می‌شود. در پاره‌ای موارد شکستگی‌های طبیعی با کانی‌های ثانوی پر شده‌اند که باید با انگیزش چاه به روش شکافت هیدرولیکی^{۱۲} باز شوند. همچنین ممکن است هر دو نوع طبقات زغال‌سنگ و شیل به‌صورت بین‌لایه‌ای در یک مخزن حضور داشته باشند که گاز حاصل از هر دو سنگ، نشأت می‌گیرد.

متغیرهای کلیدی کنترل‌کننده‌ی گاز در مخازن زغال‌سنگ گازی عبارتند از ضخامت لایه‌ی زغال‌سنگ، ترکیب زغال‌سنگ، محتوای گاز و ترکیب گاز. ترکیب گاز وابسته به مقدار و نوع متشکلین آلی زغال‌سنگ است که اثر مهمی بر مقدار گاز جذبی دارد. محتوای گاز در رگه‌های زغال‌سنگ تغییرات وسیعی داشته (از کمتر از یک تا بیش از ۲۵ مترمکعب در تن) و تابعی از ترکیب زغال‌سنگ، بلوغ حرارتی، تاریخچه‌ی تدفین و بالای‌آمدگی و افزوده شدن گازهای مهاجر ترموژنیک یا بیوژنیک است. ترکیب گاز عموماً بیش از ۹۰ درصد متان همراه با مقادیر جزئی هیدروکربن‌های مایع، دی‌اکسید کربن و نیتروژن است.

تولید گاز از مخازن زغال‌سنگی تابع تراوایی و وضعیت اشباع گاز است. در نواحی در حال تولید تراوایی اغلب در محدوده‌ی چند میلی‌داریسی تا چند ده میلی‌داریسی است. گرچه مقادیر بیش از یک داریسی نیز گزارش شده است. تراوایی مطلق طی زمان افزایش می‌یابد. چراکه خروج گاز از زغال‌سنگ موجب تراکم ماتریکس و گشاد شدن کلیت‌ها می‌گردد. گرچه این فرآیند ممکن است با کاهش بازشدگی کلیت‌ها به‌دلیل افزایش تنش خالص حاصل از تخلیه‌ی فشار مخزن همراه باشد. زغال‌سنگ‌های اشباع از گاز بلافاصله گاز تولید می‌کنند. در حالی که انواع تحت اشباع تا زمانی که فشار مخزن به کمتر از فشار اشباع نرسد گازی تولید نمی‌کنند و این امر ممکن است مستلزم سال‌ها تخلیه‌ی آب از مخزن باشد.

نظارت و نحوه‌ی کنترل حجم و توان تولید در مخازن زغال‌سنگ و شیل گازی یکسان است. اما مخازن شیل گازی عموماً ضخیم‌تر (۳۰-۳۰۰ فوت) بوده، حاوی گاز جذبی کمتر (کمتر از ۱۰ مترمکعب در تن) هستند و در منافذ خالی خود حجم بسیار بیشتری گاز آزاد دارند. به‌علاوه این مخازن نسبت به مخازن زغال‌سنگی غالباً تراوایی بسیار کمتری (در محدوده‌ی نانو تا میکروداریسی) دارند. برای حصول مقادیر تجاری گاز از چنین تراوایی ناچیزی اغلب در عملیات تکمیل چاه فواصل طولانی‌تری باز می‌شود و انگیزش چاه

به‌روش شکافت هیدرولیکی ضروری است.

مخازن زغال‌سنگ و شیل گازی تجمعات گازی پیوسته‌ای را تشکیل می‌دهند، شامل طبقات گازداری هستند که فاقد لایه‌بندی بر حسب چگالی و سطح آب-گاز است و در محدوده‌ی بسیار وسیعی از جغرافیا گسترش دارند. در چنین منابعی چالش اصلی یافتن گاز نیست؛ بلکه یافتن مناطقی است که مقدار تولید گاز در حد تجاری باشد. چنین چالشی گاهی مشکل‌آفرین خواهد بود. به‌دلیل تغییرات عمودی و افقی در این مخازن، برای تعیین ویژگی‌های مخزن وجود مغزه، نمودارهای الکتریکی، مقاطع لرزه‌ای و داده‌های آزمایش چاه به مقدار کافی ضروری است. جدول ۱- نشان‌دهنده‌ی خلاصه‌ای از ضروری‌ترین اطلاعات مورد نیاز برای ارزیابی این مخازن است.

۲- روش‌های حفاری، تکمیل چاه و تولید

تاکنون اکثر فعالیت‌های حفاری در مخازن زغال‌سنگ و شیل گازی در چاه‌های عمودی بوده است. حفاری‌ها معمولاً کم‌عمق (۱۰۰۰-۱۵۰ متر) بوده و به روش‌های زیرتعدادلی دورانی-ضربه‌ای^{۲۳} انجام می‌شود که حاصل آن نرخ حفاری سریع (تا ۱۵ متر در ساعت) و حداقل خسارت به سازند است. در اعماق بیشتر (۱۰۰۰ تا بیش از ۲۵۰۰ متر) که فشارهای بالای مخزن، جریان‌های فراوان آب و مشکلات پایداری دیواره چاه انتظار می‌رود، از حفاری چرخشی متعارف با سیستم‌های گل سبک (تعادلی یا زیرتعادلی^{۲۴}) استفاده می‌شود.

با پیشرفت‌های اخیر در فن‌آوری‌های درون‌چاهی و به‌تبع آن کاهش هزینه‌ها، حفاری افقی جایگزین جذابی به شمار می‌رود. نخستین کاربرد گسترده از چاه‌های افقی تک‌حفره‌ای در مخازن زغال‌سنگی در اواسط دهه‌ی ۹۰ در حوضه‌ی آرکوما^{۲۵} ایالت اوکلاهاما^{۲۶} صورت گرفت. در پی آن روش چندحفره‌ای در حوضه‌ی آپالچین مرکزی واقع در ویرجینیای غربی^{۲۷} ابداع شد. در این روش ابتدا یک چاه عمودی اولیه حفر و سپس رگه‌ی زغال‌سنگی مد نظر توسط یک چاه افقی قطع می‌شود [۲۳]. از حفره‌ی افقی چندین شاخه‌ی جانبی منشعب می‌گردد تا آرایه‌ای سوزنی مثل الگوی رگ‌برگ‌های درختان حاصل شود. معمولاً شاخه‌های افقی به‌صورت حفره باز تکمیل شده و یک پمپ در چاه عمودی نصب می‌گردد. پس از معرفی و آزمایش سیستم مذکور، در بسیاری از حوضه‌ها سایر آرایه‌های چندحفره‌ای نیز توسعه یافتند. کاربرد روش‌های حفاری افقی و چندحفره‌ای در مخازن شیل گازی نیز به‌سرعت توسعه یافته است؛ به‌ویژه در شیل بارنت که بیش از ۹۰ درصد چاه‌های جدید در آن از نوع افقی

۱ خلاصه‌ای از اطلاعات اساسی مورد نیاز جهت ارزیابی مخازن زغال‌سنگ و شیل‌گازی

نوع آزمایش	نتایج مورد انتظار
محتوای گاز موجود	حجم گاز آزاد شده (از نمونه‌ی زغال‌سنگ قرار داده شده در یک طرف در بسته)، گاز باقیمانده (حاصل از زغال‌سنگ خرد شده) و گاز نهان (حاصل از محاسبه) را معین می‌کند. حاصل جمع این سه رقم محتوای گاز درجای رگه‌ی زغال‌سنگ را نشان می‌دهد
پیرولیز راک‌اول ^{۱۳}	جهت ارزیابی توان نفت‌زایی و بلوغ حرارتی مواد آلی در نمونه، تعیین بخشی از مواد آلی که قبلاً به هیدروکربن تبدیل شده و مقدار کل هیدروکربنی که می‌توانسته در اثر تغییر و تبدیل کامل حرارتی نمونه حاصل شود استفاده می‌گردد
کربن آلی کل	بیانگر محتوای کل کربن در سنگ و شامل کربن موجود در هیدروکربن‌های آزاد و مقدار کروژن است
ترکیب گاز	تعیین‌کننده‌ی درصد متان، دی‌اکسید کربن، نیتروژن و اتان در گاز آزاد شده است. برای تعیین خلوص گاز و تهیه‌ی ایزوترم‌های مرکب گاز آزاد شده ^{۱۴} به‌کار می‌رود
توصیف مغزه	مشاهده‌ی متغیرهایی مثل درخشندگی زغال‌سنگ، لایه‌بندی، فواصل کلیت‌ها، کانی‌شناسی، ضخامت زغال‌سنگ و ... را ممکن می‌سازد. اطلاعاتی در مورد ترکیب، تراوایی و ناهمگنی رگه‌ی زغال‌سنگ را نیز در بر دارد
ایزوترم جذبی ^{۱۵}	بیانگر ارتباط فشار با حجم گازی است که می‌تواند در دمای ثابت جذب یک سطح شود. در واقع نشان می‌دهد یک رگه‌ی زغال‌سنگ قادر به نگهداری چه مقدار گاز بوده و با چه سرعتی این گاز را آزاد می‌سازد
تجزیه‌ی مستقیم	مشخص‌کننده‌ی درصد خاکستر، رطوبت، کربن ثابت و مواد فرار است. برای اصلاح محتوای گاز و ایزوترم‌های جذبی با فرض حالت بدون خاکستر به‌کار می‌رود. همچنین در تصحیح ایزوترم‌ها نسبت به رطوبت و تعیین بلوغ زغال‌سنگ‌های مرغوب کاربرد دارد
تجزیه‌ی کانی‌شناسی	کانی‌شناسی کل توده از طریق مطالعه‌ی میکروسکوپی یا پراش اشعه‌ی ایکس و تشخیص نوع کانی‌های رسی توسط پراش اشعه‌ی ایکس یا تصویربرداری میکروسکوپ الکترونی امکان‌پذیر است
انعکاس ویتترینایت ^{۱۶}	این عدد نشانگر انعکاس نور تابیده شده به ماسرال‌های ^{۱۷} ویتترینایت است و راهی سریع و ارزان برای تعیین درجه‌ی بلوغ زغال‌سنگ‌های مرغوب به‌شمار می‌رود
ارزش گرم‌زایی ^{۱۸}	حرارت ایجاد شده در اثر سوختن زغال‌سنگ است که جهت تعیین درجه‌ی بلوغ زغال‌سنگ‌های نامرغوب به‌کار می‌رود
تجزیه‌ی ماسرال‌ها	تعیین‌کننده‌ی نوع، فراوانی و روابط مکانی انواع گوناگون ماسرال‌هاست. این تفاوت‌ها گویای اختلاف در توان جذب گاز و شکنندگی سنگ هستند که بر محتوای گاز و تراوایی اثر دارند
چگالی توده	رابطه‌ی چگالی توده و سایر متغیرها (از جمله محتوای خاکستر و گاز) را می‌توان برای تعیین مقدار چگالی آستانه ^{۱۹} در محاسبه‌ی ضخامت زغال‌سنگ و شیل در نمودارهای الکتریکی به‌کار برد
نمودارهای الکتریکی متعارف	نمودارهای خودالقایی، پرتوگاما، مقاومت کم‌عمق و عمیق، میکرولاگ، کالیپر، چگالی، نوترون و سونیک در شناخت زغال‌سنگ و شیل و نیز تعیین تخلخل و اشباع در شیل‌ها به‌کار می‌روند
نمودارهای الکتریکی ویژه	نمودارهای تصویری برای تحلیل شکستگی‌ها و نمودارهای طیف‌سنجی جهت تعیین محتوای گاز درجا کاربرد دارند
آزمایش‌های افزایش فشار ^{۲۰}	آزمایش‌های افزایش فشار ^{۲۱} یا افت تزریق (تزریق و بست) ^{۲۲} برای تعیین فشار مخزن، تراوایی، عامل سطحی و شناخت رفتار مخازن شکافدار کاربرد دارند
لرزه‌نگاری سه‌بعدی	در شناسایی محل گسل‌ها، عمق مخزن، تغییرات ضخامت، گسترش جانبی و ویژگی‌های زغال‌سنگ یا شیل به‌کار می‌رود

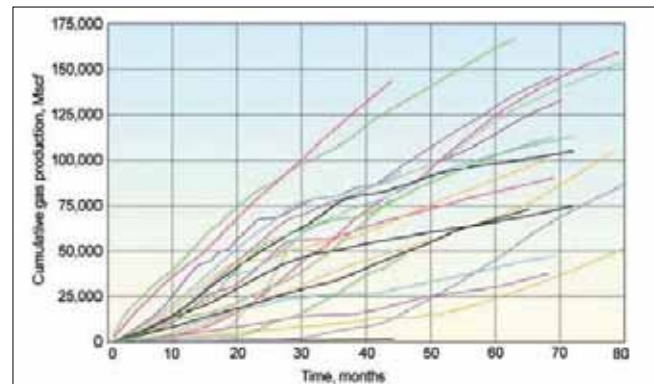
هستند.

اکثر مخازن زغال‌سنگ و شیل‌گازی (مثل شیل‌انتیریم^{۳۹} در حوضه میسینگان^{۴۰}) اشباع از آب هستند و تولید اولیه آنها مملو از آب همراه با مقدار کمی گاز است. از آنجا که تولید آب از سیستم شکاف‌های طبیعی باعث کاهش فشار مخزن و آزاد شدن گاز از ماتریکس می‌شود همزمان با کاهش تولید آب شاهد افزایش تولید گاز خواهیم بود. سپس تولید گاز به مقدار حداکثر یا پلاتو^{۴۱} می‌رسد و سرانجام پس از طی یک دوره‌ی زمانی و در اثر متغیرهای کلیدی مخزن (به‌ویژه تراوایی) و اثر تداخلی چاه‌های مجاور، به‌میزان معینی کاهش می‌یابد. اما مخازن زغال‌سنگ و شیل‌گازی خشک مثل مخازن گازی معمولی عمل می‌کنند. یعنی تولید در مراحل اولیه حداکثر است و پس از آن در حین آزاد شدن گاز، سیستم شکاف‌های طبیعی دوباره پر شده و شاهد کاهش آهسته‌ی تولید خواهیم بود. یکی از ویژگی‌های عمومی در تمامی مخازن زغال‌سنگ و شیل‌گازی تغییرات فراوان در توان تولید آنهاست که نمونه‌ی آن توسعه‌ی شیل‌گازی حوضه‌ی بلک واریر^{۴۲} ایالت آلاباما^{۴۳} در میدانی به‌وسعت یک مایل مربع با ۲۳ حلقه چاه است. در این میدان تمامی چاه‌ها به‌روش مشابهی در یک رگه‌ی زغال‌سنگی خاص حفاری و تکمیل شده‌اند اما تغییرات زیادی در تولید آنها مشاهده می‌گردد (شکل-۱). دلایل اولیه‌ی چنین تغییراتی در مقدار تولید را به تغییرات محلی تراوایی که حاصل فراوانی شکاف‌ها و پهنای بازشدگی آنهاست نسبت داده‌اند [۴].

۳- منابع و مخازن

به‌دلیل ماهیت ناهمگن مخازن شیل و زغال‌سنگ گازی و عدم قطعیت در جمع‌آوری و تحلیل داده‌ها، تعیین صحیح مقادیر گاز در جای آنها فرآیندی مشکل و زمان‌بر است. در مخازن زغال‌سنگی مقدار گاز درجا معمولاً برابر گاز جذبی در نظر گرفته می‌شود. گاز درجا (مترمکعب) تابع ضخامت زغال‌سنگ (متر)، وسعت آن (مترمربع)، چگالی (تن بر مترمکعب) و محتوای گاز آن (مترمکعب بر تن) است. برای تعیین ضخامت زغال‌سنگ اغلب محدوده‌ی چگالی محافظ کارانه‌ای در حد ۱/۷۵ گرم بر سانتی‌مترمکعب در نظر گرفته می‌شود. البته این حد ممکن است تا ۲/۵ گرم بر سانتی‌مترمکعب نیز افزایش یابد تا بتوان همه‌ی شیل‌های گازی را که به‌صورت بین‌لایه‌ای با زغال‌سنگ قرار دارند نیز به‌حساب آورد. میانگین چگالی در جای زغال‌سنگ را می‌توان از روی نمودار الکتریکی چگالی یا با اندازه‌گیری مستقیم مغزه‌ها تعیین نمود. محتوای گاز با اندازه‌گیری مقادیر گاز آزاد شده از نمونه‌های مغزه در آزمایشگاه به‌دست می‌آید. البته مقادیر

روش‌های گوناگونی برای انگیزش چاه‌ها و شکاف‌زایی در مخازن زغال‌سنگی استفاده شده است. در حوضه‌ی ریتن^{۳۸} واقع در نیومکزیکو^{۳۹} چاه‌های چندشاخه‌ای لوله‌گذاری شده و شکاف‌زایی در رگه‌های نازک و مجزا توسط لوله‌ی مغزی سیار^{۴۰} با استفاده از سیال ژله‌ای (همراه با ماسه به‌عنوان نگهدارنده) اجرا می‌گردد. در حوضه‌ی پاورریور^{۳۱} ایالت وایومینگ^{۳۲} که تراوایی زغال‌سنگ زیاد است چاه‌ها به‌صورت حفره باز تکمیل می‌شوند. سپس زغال‌سنگ را توسط جریان آب با نرخ بیش از ۵ بشکه در دقیقه شستشو می‌دهد تا ذرات ریز آن خارج گردد. کلیت‌ها باز و حفره‌ی چاه به‌نحو مؤثری به مخزن مرتبط شود. در زغال‌سنگ‌های دره‌ی هورس‌شو^{۳۳} در کانادا که آبی تولید نمی‌کنند تحریک چاه‌ها به‌روش شکافت با نیتروژن^{۳۴} صورت می‌گیرد تا مانع آسیب رساندن مایعات به زغال‌سنگ از جمله از طریق انبساط رس‌ها، مهاجرت ذرات ریز و سازوکارهای دیگر شود. به‌طور کلی عمومی‌ترین روش تکمیل این چاه‌های گازی، لوله‌گذاری و مشبک‌کاری همراه با شکافت هیدرولیکی یک یا چندمرحله‌ای است. در شیل‌های گازی برای ارتباط شکاف‌های طبیعی به حفره‌ی چاه تقریباً همه‌ی چاه‌ها نیازمند انگیزش به روش شکافت هیدرولیکی هستند. گرچه بعضی از چاه‌های افقی در شیل نیوآلبانی^{۳۵} حوضه‌ی ایلینوی^{۳۶} به‌صورت حفره باز تکمیل شده‌اند اما اکثر اوقات تکمیل این‌گونه چاه‌ها به‌روش لوله‌گذاری، سیمان شدن و با مشبک‌کاری چندمرحله‌ای در امتداد مقطع افقی انجام می‌شود. برای کنترل این اعمال و تنظیم زمان‌بندی پمپاژ جهت شکاف‌زایی در زمان کوتاه، فن‌آوری‌های جدیدی شامل تیلتمترها^{۳۷} و ریزلرزه‌ها^{۳۸} استفاده می‌شود. چنین فن‌آوری‌هایی به‌ویژه در شیل بارنت اهمیت زیادی دارند؛ زیرا جلوگیری از رشد شکاف‌ها به داخل طبقات آبدار زیرین بسیار حیاتی است.



تغییرات تولید متان در ۲۳ چاه موجود در میدان زغال‌سنگ گازی حوضه‌ی بلک واریر ایالت آلاباما

در متغیرهای کلیدی مخزن، ترکیب مؤلفه‌های مهمی مثل تراوایی جهت‌دار، مقدار گاز آزاد و جذبی، بررسی تأثیر راهکارهای مختلف توسعه‌ی میدان از جمله فاصله‌ی چاه‌ها، الگوی چاه‌ها و طراحی انگیزش شکاف‌ها، کمک شایانی برای درک کمی رفتار چاه خواهد بود. بلافاصله پس از ایجاد مدل می‌توان به‌طور منظم آنرا با داده‌های تولیدی، فشار استاتیک مخزن و فشار درون چاهی به‌روز کرد و از این طریق عملکرد آینده‌ی چاه را بهتر درک و پیش‌بینی نمود.

پس از آبدزایی مخزن (در صورت نیاز) می‌توان عملکرد تولید و ذخیره را به روش‌های مرسوم مانند تحلیل موازنه‌ی مواد^{۴۳} و منحنی کاهش^{۴۴} ارزیابی کرد. یکی از عناصر مهم در به حداکثر رساندن ذخیره در این مخازن، حداقل کردن فشار تخلیه است. ویژگی ذخیره در مخازن گاز جذبی به‌گونه‌ای است که در فشار مخزن کمتر، حجم بیشتری گاز آزاد می‌شود. شکل ۲- نشان می‌دهد که در زغال‌سنگ‌هایی با بلوغ متفاوت، با کاهش فشار میانگین مخزن از ۱۰۰ به ۵۰ پوند بر اینچ مربع گاز بیشتری نسبت به کاهش فشار از ۲۰۰ به ۱۵۰ پوند بر اینچ مربع آزاد خواهد شد.

۴- استراتژی‌های ارزیابی و جنبه‌های اقتصادی ذخایر

چالش اصلی در ارزیابی ذخایر زغال‌سنگ و شیل گازی، تعیین بهترین نواحی مورد انتظار و توسعه‌ی مؤثر آنهاست. پروژه‌های موفق تشابه زیادی دارند که از جمله‌ی آنها می‌توان به دسترسی به فن‌آوری و بازارهای گاز، منابع گازی متمرکز و ویژگی‌های مطلوب مخزن اشاره کرد (جدول‌های ۳- و ۲).

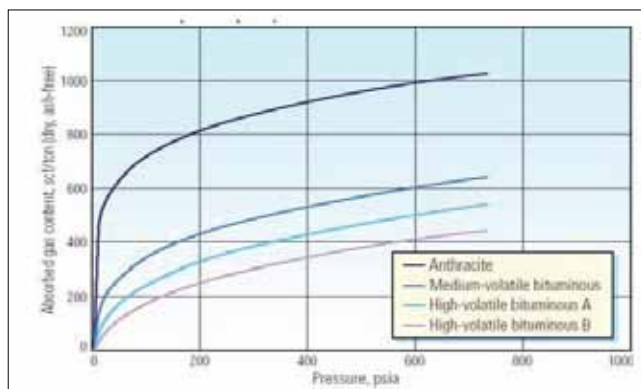
قدم نخست در ارزیابی منطقه‌ای جدید شامل جمع‌آوری اطلاعات چاه‌های موجود، مطالعات زمین‌شناسی و عملیات ژئوفیزیکی است. یک منبع اطلاعاتی ارزشمند اما غالباً مورد غفلت، داده‌های حاصل از معدن‌کاری مثل نقشه‌های زیرزمینی، ویژگی‌های زغال‌سنگ و اطلاعات حفاری‌های معدنی (مغزه‌ها) است. چنین داده‌هایی را می‌توان جهت شناسایی زغال‌سنگ‌ها و شیل‌هایی با بلوغ حرارتی، غنای مواد آلی، ضخامت، عمق و گسترش ناحیه‌ای مطلوب به کار برد. در مرحله‌ی بعد می‌توان با حفر چاه‌های توصیفی با فواصل زیاد محتوای گاز، مقدار اشباع گاز، ویژگی مواد آلی و تراوایی را ارزیابی کرد. برای شناسایی تغییرات مخزنی به‌ویژه تراوایی، حفر چاه توصیفی به تعداد کافی اهمیت حیاتی دارد. چنین خصوصیتی ممکن است به‌مقدار قابل‌ملاحظه‌ای حتی در بین چاه‌های نزدیک به هم تغییر کنند.

اگر ویژگی‌های چاه‌های توصیفی امیدوارکننده باشد چند انتخاب

اندازه‌گیری شده با توجه به گاز نهان^{۴۴} و باقیمانده^{۴۵} اصلاح می‌شود. طیف‌سنج لیزری درون‌چاهی^{۴۶} روش جایگزینی است که توسط آن می‌توان گاز جذبی را به‌صورت درجا اندازه‌گیری کرد.

در مخازن شیل گازی تعیین هر دو مؤلفه‌ی گاز جذبی (به روش‌های مشابه با مخازن زغال‌سنگی) و گاز آزاد ضروری است. گاز آزاد را می‌توان توسط نمودارهای الکتریکی متعارف ارزیابی کرد. گرچه این روش به‌دلیل تخلخل ماتریکس کم، آب محبوس فراوان و مناطق حد واسط^{۴۷} نسبتاً عریض، پیچیده خواهد بود. مطالعه‌ی مغزه‌ها به‌ویژه اندازه‌گیری فشار موئین تخلیه^{۴۸} و تخلخل برای ارزیابی ویژگی‌های مخزنی ماتریکس اهمیت زیادی دارد. تخلخل شکاف‌ها نیز مؤلفه‌ی مهمی در ذخیره‌ی گاز است. گرچه این نوع تخلخل معمولاً ناچیز در نظر گرفته می‌شود (کمتر از ۲ درصد حجم کل مخزن) اما در شیل‌هایی با تخلخل ماتریکس کم می‌تواند تا بیش از ۱۰ درصد از حجم ذخیره را تشکیل دهد. نسبت دادن ذخیره‌ی اثبات‌شده^{۴۹} به مخازن زغال‌سنگ و شیل گازی مستلزم تولید گاز در مقادیر تجاری است. معمولاً چنین امری تنها در صورت وجود گاز در جای کافی، تراوایی مناسب، آبدزایی^{۵۰} موفق، بهای زیاد گاز و هزینه‌های مناسب حفاری، تکمیل چاه و عملیات تولید ممکن خواهد بود. همچنین برای اثبات ذخیره‌ی تهیه‌ی پروفایل تولید^{۵۱} ضروری است که پیش‌بینی آن در طول فاز آبدزایی (یعنی زمان افزایش تولید گاز) مشکل خواهد بود. برخی تولیدکنندگان از پروفایل تولید مخازن مشابه استفاده می‌کنند؛ در صورتی که سایرین به روش‌های پیچیده‌تری مثل شبیه‌سازی عددی^{۵۲} تکیه دارند.

شبیه‌سازی عددی ابزار توانمندی است که با تلفیق داده‌های مغزه، نمودارهای الکتریکی و آزمایش چاه‌ها، از طریق ارزیابی تأثیر تغییرات



شکل ۲ | ایزوترم لانگمور^{۵۵} نشان‌دهنده‌ی تغییرات توان جذب متان در انواع کوناگون زغال‌سنگ (از نظر بلوغ حرارتی) است. شکل ایزوترم بیانگر آنست که به‌ازای افت فشار ثابت، در فشارهای کم، گاز بسیار بیشتری نسبت به فشارهای زیاد آزاد خواهد شد.

کم عمق و پیوسته هستند که از ابتدا با حفر چاه‌های افقی توسعه می‌یابند. زغال سنگ‌های خشک مانند آنچه در حوضه‌ی دره‌ی هورس شو در آلبرتا^{۶۰} کانادا وجود دارند نیز نیازی به آب‌زدایی نداشته و بر اساس نرخ گاز تولیدی در چاه‌های توصیفی توسعه داده می‌شوند. در هر دو حالت نیاز یا عدم نیاز به حفر چاه‌های راهنما، ارزیابی فنی هر هدف اکتشافی زغال سنگ یا شیل گازی فرآیندی چندمرحله‌ای است که مستلزم استراتژی جامعی همراه با معیار بسیار روشن موفقیت و خروج^{۶۱} است. بسیاری از شرکت‌ها پروژه‌های تجاری خود را رها کرده‌اند؛ زیرا در ارزیابی جامع آن ناموفق بوده یا قادر به ادامه‌ی سرمایه‌گذاری نبوده‌اند. علاوه بر آن به محض تجاری شدن یک پروژه، شرکت‌ها تمایل به توسعه‌ی مداوم از طریق فرآیند تولید گاز دارند که هدف اولیه‌ی آن حداقل کردن هزینه‌هاست. این استراتژی مانع از جمع‌آوری سایر اطلاعات حیاتی و به‌کارگیری نوآوری‌های فنی می‌گردد که کسب آنها افزایش سودآوری را در پی خواهد داشت. استراتژی‌های محاسبه و کاهش ریسک اقتصادی در پروژه‌های زغال سنگ و شیل گازی باید همزمان با کار روی کاهش ریسک فنی پیگیری شوند. از جمله‌ی این استراتژی‌ها می‌توان به استفاده از محرک‌های مالی دولتی و بهره‌گیری از منابع مالی بین‌المللی بانک جهانی یا سایر منابع اشاره کرد. جنبه‌ی مهم دیگری از کاهش ریسک شامل توسعه‌ی شراکت در جهت کاهش ریسک هر یک از اعضا، ایجاد تجارت متعادل و هم‌افزایی^{۶۲} عملیاتی است. برای مثال تبادل

داریم؛ الف) تولیدی کردن چاه‌های توصیفی که ممکن است در صورت عدم نیاز به آب‌زدایی مقادیر قابل توجهی گاز تولید کنند؛ ب) حفر چاه‌های افقی یا چندشاخه‌ای برای آب‌زدایی سریع مخزن و تولید گاز و ج) حفر یک‌سری چاه عمودی راهنما^{۵۷}. روش اخیر یعنی پروژه‌های با چند چاه راهنما عمومی‌ترین شیوه‌ی توسعه است. زیرا اکثر مخازن نیازمند آب‌زدایی است و چاه‌های افقی در ابتدای پروژه برای این منظور راهگشا نیستند. این امر به‌ویژه در مواردی صحت دارد که با ارزیابی مخازن مرکب و تردیدهای متعددی از جمله گسل خوردگی، تغییرات جانبی رخساره و پایداری دیواره‌ی چاه مواجه باشیم.

در اغلب این پروژه‌ها، چاه‌های راهنما در فواصل نزدیک به یکدیگر با آرایش ۵ یا ۹ نقطه‌ای حفر می‌گردند. هدف اصلی چنین آزمایشی اینست که دریابیم آیا می‌توان به تولید تجاری گاز دست یافت و آیا توسعه‌ی میدان در مقیاس اصلی اقتصادی خواهد بود یا خیر؟ به‌عنوان قاعده‌ای کلی، چاه‌های راهنما باید در فواصل کمتر از ۸۰ جریب^{۵۸} از یکدیگر حفر شده و حداقل ۹-۶ ماه تولید کنند. به‌عنوان بخشی از این عملیات، داده‌هایی از جمله حجم سیالات تولید شده، فشارها و مشاهدات سیالات ورودی^{۵۹} باید به‌طور مستمر جمع‌آوری شوند.

همه‌ی مخازن زغال سنگ گازی نیاز به آزمایش‌های راهنما با چندین چاه ندارند. پاره‌ای از این نوع مخازن مانند موارد موجود در حوضه‌ی آپالاچین ایالات متحده شامل رگه‌های زغال سنگی ضخیم،

۲ | مقایسه‌ی خصوصیات چند پروژه‌ی تجاری زغال سنگ گازی در جهان

نام حوضه و محل آن	نام میدان	مساحت (sq miles)	ضخامت زغال سنگ (ft)	درجه‌ی زغال سنگ	محتوای گاز (scf/ton)	تراوایی (md)	فواصل چاه‌ها (acres)	تعداد چاه‌ها	نرخ تولید گاز در چاه (Mscf/D)	گاز در جای اولیه (Bscf)	ضریب بازیافت (%OGIP)	ذخیره (Bscf/well)
San Juan (USA)	Ignacio Blanco	60	70-40	بیتومینوس	300-600	50-50+	60-320	130	1500	1760	66	3-15
Uinta (USA)	Drunkard's Wash	120	4-48	بیتومینوس	425	5-20	160	450	500	1571	57	4-1.5
Black Warrior (AUS)	Cedar Cove	65	25-30	بیتومینوس	250-500	25-1	80	520	100	809	53	0.5-1.5
Powder River (USA)	Recluse Rawhide Butte	75	40-90	ساب بیتومینوس	30-70	5+	80	600	150	288	62	0.2-0.5
Western Canadian Sedimentary (Alberta)	Horseshoe Canyon	620	35-100	ساب بیتومینوس	55-100	0.1-100	80-160	3300	45	4393	28	0.5-0.25
Bowen (Australia)	Fairview	430	50-100	بیتومینوس	200-400	100	250	80	700	450	60	2.5-3.5
Qinshui (China)	Yangcheng-Qinshui	22	20-40	آتراسیت	300-900	<1-5	80	40	140-70	100	20	0.4-0.8

اما مجموعه‌ی فن‌آوری‌های خاص مورد نیاز برای هر یک از این نوع مخازن بستگی به درجه‌ی ناهمگنی مخزن، ویژگی‌های مکانیکی سنگ و نوع سیالات موجود دارد. علاوه بر این نرخ تولید گاز و اندازه‌ی ذخیره نقش مهمی در انتخاب آنها دارد؛ چراکه برخی از فن‌آوری‌های بسیار مفید مثل لرزه‌نگاری سه‌بعدی از نظر هزینه مانعی جدی به حساب می‌آیند.

توسعه‌ی زغال‌سنگ‌های گازی در کشورهایی غیر از ایالات متحده به دلایل مختلفی از جمله ویژگی نامناسب مخزن، زیرساخت‌های ناکافی و رقابت با مخازن گازی متعارف رشد بسیار کندی دارد. در پاره‌ای موارد یک قرارداد چندین دست جابه‌جا می‌شود. بدون آنکه شرکت عامل با مجموعه‌ی کاملی از سازمان حقوقی، دانش فنی و مدت زمان قراردادی بتواند پروژه‌ای را به سرانجام موفق برساند. گرچه افزایش بهای گاز باعث تشویق سرمایه‌گذاری در پروژه‌هایی شده که تا یک دهه قبل به صرفه نبوده‌اند.

ظاهراً بیشترین شانس برای یافتن یک پروژه‌ی تجاری شیل گازی در خارج از ایالات متحده مربوط به غرب کاناداست که تشابهات چینه‌شناسی زیادی با حوضه‌های غرب ایالات متحده داشته و به نظر می‌رسد محتوی بیش از ۱۰۰۰ تریلیون فوت مکعب منابع گاز حاصل از شیل‌ها باشد. در واقع این‌طور به نظر می‌رسد که زمان زیادی تا تولید تجاری از شیل‌های گازی در خارج از ایالات متحده باقی نمانده است.

از جمله روندهای آینده در این صنعت تلفیق توسعه‌ی زغال‌سنگ و شیل‌های گازی با تزریق دی‌اکسید کربن است. زغال‌سنگ و محتویات آلی شیل، متان جذبی را به‌طور انتخابی نسبت به دی‌اکسید کربن آزاد می‌کنند که این فرآیند باعث افزایش بازیافت متان و جایگزینی

سود یک پروژه‌ی زغال‌سنگ گازی با سود مشابه در یک پروژه‌ی گازی متعارف می‌تواند ترکیبی از جریان گاز را برای ایجاد نرخ پلاتوی معین طی ۲۵ سال تضمین کند. بیشترین مقدار گاز در سال‌های نخستین توسط پروژه‌ی گازی متعارف و در سال‌های بعد توسط پروژه‌ی زغال‌سنگ گازی تأمین خواهد شد.

از آنجا که تجاری شدن منابع گازی غیرمتعارف در بسیاری از کشورها هنوز فرآیندی جدید محسوب می‌شود شرکت‌های خارجی با مسائل متعددی در خصوص ریسک مالی روبرو هستند که از جمله‌ی آنها می‌توان به رقابت میان سازمان‌های مختلف نظارتی و حاکمیتی، موانع متعددی در مذاکرات قراردادهای مشارکت در تولید، فقدان خدمات نفتی قابل اعتماد و بازار دائمی برای گاز تولیدی اشاره کرد. چنین ریسک‌هایی مشارکت با شرکت‌های با تجربه در کشور مدنظر را با مشکل مواجه می‌کند.

۵- آینده و روندهای فن‌آوری

در بیست سال اخیر به دلیل پیشرفت‌های قابل ملاحظه در فن‌آوری‌های بالادستی، منابع زغال‌سنگ و شیل‌های گازی توسعه‌ی سریعی یافته‌اند. این فن‌آوری‌ها شامل حفاری افقی، روش‌های خاص تکمیل چاه و روش‌های جدید آب‌زدایی است. با توجه به وابستگی زیاد به فن‌آوری، آشکار است که نوآوری‌های آینده تأثیر زیادی بر توسعه‌ی یافتگی و نرخ رشد این صنعت خواهد داشت.

تمامی نیازهای فن‌آوری برای توسعه‌ی زغال‌سنگ‌ها و شیل‌های گازی (مانند روش‌های تعیین خصوصیات مخزن، حفاری، تکمیل چاه و عملیات تولید) در اساس مشابه مخازن گازی متعارف است (جدول-۴).

مقایسه‌ی ویژگی‌های چند نمونه از پروژه‌های تجاری شیل گازی در ایالات متحده											
نام میدان	نام حوضه	ضخامت مفید (ft)	محتوای گاز (scf/ton)	تراوایی بر حسب ضخامت ^۵ (md-ft)	فشار مخزن (psia)	فواصل چاه‌ها (acres)	نرخ تولید گاز در چاه (Mcf/D)	نرخ تولید آب در چاه (B/D)	گاز در جای اولیه (Bscf/ sq mile)	ضریب بازیافت (%OGIP)	ذخیره (Bscf/well)
Antrim	Michigan	120-70	100-40	5000-1	400	160-30	550-20	1500-5	35-5	60-20	1.8-0.2
Ohio	Appalachian	100-30	100-60	50-0.2	2000-500	160-40	500-30	0	10-5	20-10	0.6-0.15
New Albany	Illinois	150-50	80-40	1800-1	700-300	80	100-30	1000-5	10-7	20-10	0.6-0.15
Barnet	Fort Worth	200-50	350-150	2-0.01	4000-3000	160-80	3000-100	0	40-30	20-5	3.0-0.5
Lewis	San Juan	300-200	45-15	400-6	1500-1000	320-80	500-100	0	50-8	15-5	2.0-0.6

می‌گردند. پیشرفت‌های بیست سال اخیر در شناخت این پیچیدگی‌ها با توسعه‌ی اساسی در صنایع حفاری، تکمیل چاه و فن‌آوری‌های تولید همراه بوده است. از نتایج این پیشرفت‌ها می‌توان به آب‌زدایی سریع‌تر، نرخ تولید بیشتر، دستیابی سریع‌تر به حداکثر نرخ تولید، ارزیابی صحیح‌تر منابع و مخازن و در نهایت اقتصاد شکوفاتر اشاره کرد. این موفقیت‌ها مشوق شرکت‌های زیادی برای کسب فرصت‌های بین‌المللی جدید است. در نتیجه بسیاری از مخازن زغال‌سنگ گازی کوچک تا متوسط در خارج از ایالات متحده طی دهه‌ی گذشته توسعه‌یافته‌اند و سرمایه‌گذاری

آن با کربن می‌گردد. گرچه این عملیات عاری از معضلات فنی نیست (مثلاً زغال‌سنگ در اثر جذب دی‌اکسید کربن متورم شده و تراوایی آن کاهش می‌یابد) اما پروژه‌های زیادی به این روش طراحی شده یا در حال طراحی است.

نتیجه‌گیری

در مقایسه با مخازن گازی متعارف، مخازن زغال‌سنگ و شیل‌های گازی با ناهمگنی بیشتر، سازوکارهای چندگانه‌ی تجمع گاز و ویژگی‌های منحصر به فردی که توان تولید را کنترل می‌کند متمایز

۴ | نیازهای اصلی فن‌آوری و کاربردهای آنها در مخازن زغال‌سنگ و شیل‌گازی

نوع و کاربردهای آن	نیازهای فن‌آوری	زمینه‌های اصلی فن‌آوری
لرزه‌نگاری سه‌بعدی و چهار بعدی ابزارهای تصویربرداری از حفره چاه ژئوشیمی سطحی	■ شناخت کمی سیستم‌های شکستگی و تغییرات آنها ■ شناسایی نواحی با تراوایی زیاد	تعیین ویژگی‌های مخزن
تجزیه‌ی طیف‌سنجی درون‌چاهی نمودارگیری ژئوشیمیایی	اندازه‌گیری محتوای گاز جذبی	
تحلیل ریزدرزه‌ها قبل و بعد از بسته شدن سیستم‌های کابلی جداسازی/تزریق	اندازه‌گیری تراوایی	
تجزیه و تحلیل از درون لوله‌ی جداری الگوریتم‌های تفسیری پیشرفته	شناخت مخازن پشت لوله‌ی جداری	
سیستم‌های پر فشار لوله‌ی مغزی سیار همراه با جت ^{۳۳} لوله‌های حفاری تله‌متریک و ترکیبی سیالات سازگار با محیط زیست	حفاری سریع با هزینه‌ی کمتر	عملیات حفاری
چاه‌های چندشاخه‌ای استخراج از قاعده‌ی مخزن	کاهش آثار حفاری و تعداد چاه‌ها	
سیستم‌های ترکیبی حفاری و نصب لوله‌ی جداری سیستم‌های لوله‌ی جداری مکانیکی	پایدارسازی چاه‌های افقی	
سیمان‌های فوق سبک سیستم تزریق آب همراه با جت مشیک سازی با لیزر پر انرژی	سیمان‌کاری بدون خسارت به سازند دسترسی به سازند	عملیات تکمیل چاه
سیستم‌های همراه با لوله‌ی مغزی سیار با کاربرد در چاه‌های افقی تحلیل شکستگی‌ها شامل ریزلرزه‌ها و تیلت‌مترها سیالات سازگار با محیط زیست	افزایش کارایی شکاف‌زایی هیدرولیک	
افزایه‌های (نگهدارنده) فوق‌سبک ^{۳۵}		
جداسازی آب و گاز درون چاه و تزریق مجدد فیلتراسیون پیشرفته یا جذب آلودگی‌ها عوامل بهبود سطحی	فراز‌آوری مصنوعی/تخلیه آب	عملیات تولید
سیستم‌های پیشرفته و چاه هوشمند تزریق دی‌اکسیدکربن و نیتروژن	افزایش تولید	
طراحی بهینه‌ی چاه‌های افقی افزایش تولید گاز به روش‌های میکروبیال		

مخازن زغال‌سنگ و شیل‌های گازی بیشتری در آینده‌ی نزدیک توسعه خواهند یافت و جریان گاز تولیدی از آنها جزء مهمی از مصرف جهانی انرژی را تشکیل خواهد داد. ■

قابل ملاحظه‌ای برای شناسایی حوضه‌های مناسب شیل‌های گازی در دنیا انجام شده است. با فرض ثابت ماندن سرعت نوآوری در فن‌آوری‌ها و بهای مناسب گاز تمامی شواهد حاکی از آنست که

پانویس‌ها

- | | |
|---|------------------------------------|
| 1. Coalbed and Shale gas | 34. nitrogen-only fracturing |
| 2. Barnett | 35. New Albany |
| 3. Appalachian basin | 36. Illinois |
| 4. Rocky Mountain | 37. tiltmeters |
| 5. Distinguished Author Series | 38. microseismics |
| 6. Society of Petroleum Engineers (SPE) | 39. Antrim shale |
| 7. biogenic | 40. Michigan |
| 8. thermogenic | 41. plateau |
| 9. free gas | 42. Black Warrior |
| 10. sorbed gas | 43. Alabama |
| 11. cleat | 44. lost gas |
| 12. hydraulic-fracture stimulation | 45. residual gas |
| 13. Rock-Evaluation Pyrolysis | 46. downhole laser spectrometer |
| 14. composite desorption isotherms | 47. transition zones |
| 15. sorption isotherm | 48. drainage capillary pressure |
| 16. vitrinite reflectance | 49. proved reserve |
| 17. maceral | 50. dewatering |
| 18. calorific value | 51. production profile |
| 19. cutoff | 52. numerical simulation |
| 20. Pressure-Transient Tests | 53. material balance |
| 21. Pressure buildup | 54. decline curve |
| 22. injection fall-off | 55. Langmuir isotherm |
| 23. underbalanced rotary-percussion | 56. permeability-thickness product |
| 24. balanced or underbalanced | 57. pilot |
| 25. Arkoma | 58. acre |
| 26. Oklahoma | 59. fluid-entry |
| 27. West Virginia | 60. Alberta |
| 28. Raton | 61. success and exit |
| 29. New Mexico | 62. synergies |
| 30. coil-tubing | 63. jet-assisted |
| 31. Powder River | 64. high energy laser perforating |
| 32. Wyoming | 65. ultralightweight proppants |
| 33. Horseshoe Canyon | |

منابع

- [1] Curtis J.B., Fractured Shale-Gas Systems, AAPG Bulletin 85, 2002, p. 19211938-.
- [2] Kawata Y. and Fujita K., Some predictions of possible unconventional Hydrocarbons availability until 2100, Paper SPE 68755, Asia Pacific oil and gas conference, Jakarta, 2001.
- [3] Von Schoenfeldt, H., Zupanik, J., Wight, D.R., Stevens, S.H., Unconventional drilling methods for unconventional reservoirs in the US and overseas, Paper 0441 in International Coalbed Methane Symposium, University of Alabama, 2004.
- [4] Weida, S.D., Lambert, S.W., Boyer, C.M. II, Challenging the traditional Coalbed Methane exploration and evaluation model, Paper SPE 98069, Eastern regional meeting, West Virginia, 2005.
- [5] Creties D. Jenkins, Charles M. Boyer, Coalbed-and Shale-Gas Reservoirs, SPE Distinguished Author Series, Paper 10351, 2008