

بررسی تغییرات نفوذپذیری حاصل از تزریق دی‌اکسید کربن در مخازن کربناته (نمونه سنگ کربناته)

رامین حسینی ● مدیریت اکتشاف

محمد رضا اخوت*، علی مرادزاده، بهزاد رستمی ● دانشگاه تهران

چکیده

اطلاعات مقاله

* دریافت:

۱۳۹۳/۱۱/۱۳

* ارسال برای داوری:

۱۳۹۳/۱۲/۲۶

* پذیرش:

۱۳۹۴/۵/۲۶

واژگان کلیدی

تزریق دی‌اکسید کربن
مخازن کربناته
آب غیرقابل کاهش سازندگی
نفوذپذیری

تزریق دی‌اکسید کربن به‌عنوان یک روش موثر در عملیات ازدیاد برداشت نفت شناخته شده است. در عین حال، تزریق این گاز در مخازن کربناته می‌تواند به مجموعه واکنش‌های شیمیایی بین دی‌اکسید کربن و آب سازندگی در حضور سنگ مخزن منجر شود که کاهش یا افزایش نفوذپذیری سازند را به دنبال خواهد داشت. معمولاً به‌علت درصد کم آب غیرقابل کاهش سازندگی در مخازن نفتی و همچنین، عدم قدرت تحرک‌پذیری آن، اثر چنین واکنشی ناچیز در نظر گرفته می‌شود و تاکنون نیز مطالعه جامعی در مورد آن صورت نگرفته است. این مقاله در پی آن است که با طراحی آزمایش‌هایی در شرایط برابر و دبی‌های تزریق متفاوت، به مطالعه شدت اثر این واکنش‌ها بر روی نتایج تولید پرداخته و در عین حال، ارتباط شدت یا ضعف اثر گذاری آن‌ها را روی محیط آزمایش با دبی تزریق بررسی کند. در اینجا، فشار عملیاتی در تمام آزمایش‌ها به‌گونه‌ای مورد محاسبه قرار گرفته تا شرایط امتزاجی سیالات برقرار باشد. نتایج نشان می‌دهد که اثر واکنش‌های شیمیایی ایجاد شده بین گاز و آب سازندگی قابل توجه بوده و در صورت افزایش دبی تزریق، میزان اثر گذاری آن بر تغییرات نفوذپذیری بیشتر خواهد بود.

* نویسنده‌ی عهده‌دار مکاتبات (mohammadreza.okhovat@gmail.com)



مقدمه

خروجی رخ می‌دهد. در عین حال، واکنش‌های شیمیایی اتفاق افتاده در درون سازندهای کربناته در حین تزریق دی‌اکسید کربن در صورت وجود درصد بالایی از کلسیت می‌تواند به ایجاد رسوب در سازند و کاهش شدید نفوذپذیری منجر شود [۴]. به این ترتیب، در صورت عدم وجود واکنش شیمیایی بین دی‌اکسید کربن تزریقی و آب سازندی غیر قابل کاهش در سازند، در صورت افزایش میزان دبی در پایان آزمایش باید شاهد افزایش نفوذپذیری باشیم. در صورت کاهش قابل ملاحظه‌ی نفوذپذیری، می‌توان این تغییر را به واکنش‌های شیمیایی ایجاد شده در درون سازند وابسته دانست. به این ترتیب ۳ آزمایش با دبی‌های تزریق متفاوت برای بررسی اثر این تغییر بر روی نتایج آزمایش طراحی و اجرا گردید. در جریان آزمایش‌ها از نفت سفید استفاده شد تا از ایجاد واکنش‌های جانبی مانند رسوب آسفالتین در جریان آزمایش جلوگیری شده و تنها، اثر واکنش‌های شیمیایی بین گاز و آب سازندی بررسی شود. با توجه به شبیه‌سازی گاز انجام شده، حداقل فشار امتزاجی دی‌اکسید کربن با نفت سفید مورد استفاده ۱۵۶۰ پام بود. فشار آزمایش ۲۷۰۰ پام در نظر گرفته شد تا از شرایط امتزاجی سیالات اطمینان حاصل شود. انجام آزمایش‌ها در شرایط امتزاجی از آن جهت حائز اهمیت است

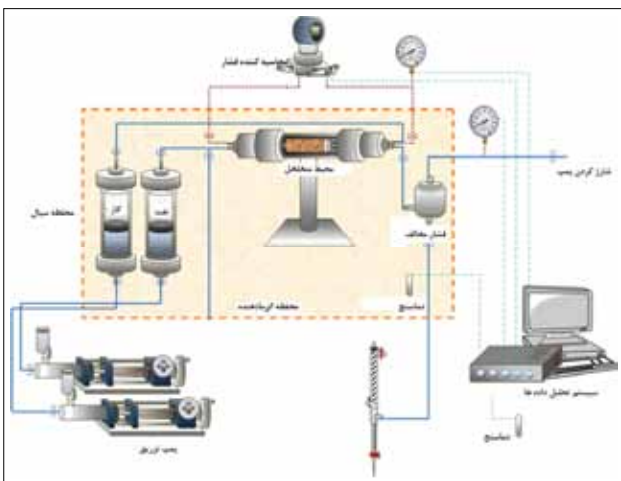
ذخیره‌سازی گاز دی‌اکسید کربن در سازندهای آب‌دار زیر سطح زمین یکی از روش‌های محبوس کردن دی‌اکسید کربن است. ذخیره‌سازی این گاز به این شکل می‌تواند از جوانب مختلف مورد بررسی قرار گیرد؛ یکی از جنبه‌های این عملیات که بیش‌تر در جریان تزریق دی‌اکسید کربن برای ذخیره‌سازی در سازندهای آب‌دار زیر سطح زمین مطرح می‌شود، واکنش‌های شیمیایی ایجاد شده بین گاز تزریقی و آب سازند در حضور سنگ سازندی است. این واکنش‌ها می‌تواند منجر به تولید اسید کربنیک در محیط متخلخل شده و بسته به نوع ذرات کانی موجود در محیط سنگی و ترکیبات آب سازندی، موجبات انحلال یا رسوب‌گذاری ذرات تشکیل شده در محیط متخلخل را ایجاد نماید که این خود می‌تواند به کاهش یا افزایش میزان تراوایی در محیط متخلخل منجر شود. اما نکته قابل توجه این است که در جریان ذخیره‌سازی دی‌اکسید کربن به این شکل، محیط سازند از اشباع بالای آب سازندی برخوردار است و به تبع آن، واکنش‌های ایجاد شده، سطح قابل توجه‌ای خواهند داشت. در سال‌های گذشته، مطالعات متنوعی در مورد نحوه تأثیرگذاری دی‌اکسید کربن در این شرایط و واکنش‌های احتمالی ایجاد شده به انجام رسیده است [۱]، [۲]. در مورد تزریق گاز دی‌اکسید کربن در مخازن نفتی، به دلیل کم بودن درصد آب سازندی در مخازن نفتی و همچنین، عدم امکان تحرک‌پذیری این آب، اثر واکنش‌های احتمالی حاصل از تزریق دی‌اکسید کربن عموماً در نظر گرفته نمی‌شود. در مقاله حاضر، با بررسی تغییرات میزان نفوذپذیری در تزریق گاز با دبی‌های متفاوت، میزان اثرگذاری این پارامتر بررسی گردیده، نحوه اثرگذاری دبی بر شدت واکنش‌ها و در نهایت، نتیجه نهایی مورد تحلیل قرار خواهد گرفت.

شرایط انجام آزمایش‌ها

شماره آزمایش	دبی تزریق (cc/hr)	فشار مخالف (Psi)	فشار سرپاره (Psi)
آزمایش-۱	۱۰	۲۷۰۰	۳۷۰۰
آزمایش-۲	۲۰	۲۷۰۰	۳۷۰۰
آزمایش-۳	۳۰	۲۷۰۰	۳۷۰۰

۱- روش تحقیق و طراحی آزمایش‌ها

برای مطالعه تأثیر شدت واکنش شیمیایی بر نتیجه نهایی تزریق گاز، از روش مطالعه آزمایشگاهی استفاده شد. فرض اولیه این بود که دی‌اکسید کربن در هنگام تزریق در سازند مخزنی به دلیل کم بودن درصد اشباع آب سازندی و عدم قدرت تحرک‌پذیری آن، قادر به ایجاد واکنش به‌میزانی که به ایجاد تغییرات در پارامترهای پتروفیزیکی سازند نظیر نفوذپذیری منجر شود، نخواهد بود. در صورت عدم وجود واکنش قابل ملاحظه در درون سازند در حین تزریق گاز، افزایش دبی تزریق باید به‌طور کلی به افزایش میزان نفوذپذیری در انتهای آزمایش منجر شود [۳]. چنین نتیجه‌ای به دلیل خروج میزان بیشتری از ذرات از محیط متخلخل بر اثر افزایش فشار



شکل ۱ | طرح‌واره سامانه تزریق گاز

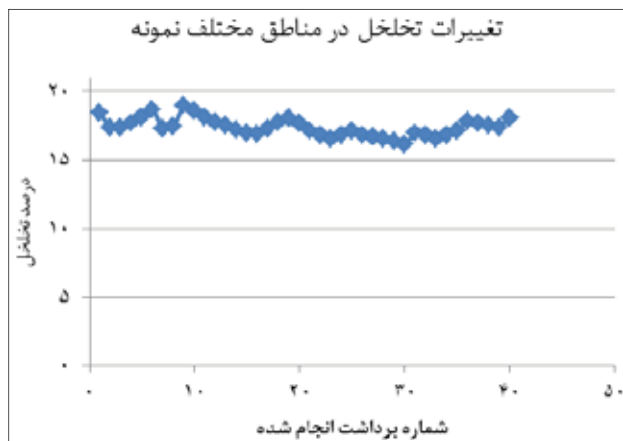
Mg و Fe دوظرفیتی عموماً از اولین ترکیباتی هستند که بعد از تزریق دی اکسید کربن تولید می شوند.



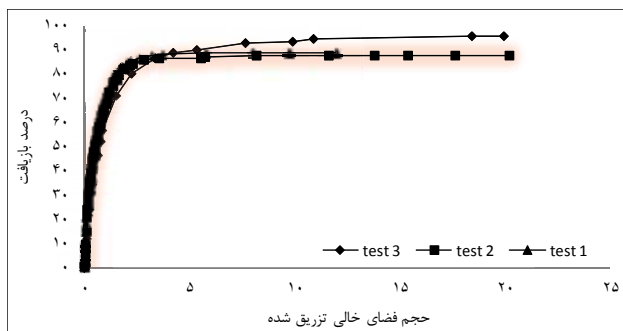
مکانیزمی که در جریان آن، رسوب گذاری نفوذپذیری را کاهش می دهد شامل رسوب گذاری کانی ها بر روی دیواره فضای خالی بین ذرات می باشد که به علت نیروی جذب کننده بین ذرات و سطح فضاهای خالی پدید می آید. به این ترتیب، قسمتی از کانی ها دهانه فضاهای خالی را مسدود می کند و قسمتی دیگر از ذرات از این دهانه ها عبور کرده و تولید می شود یا در داخل سنگ جابه جا می شود [۵]. در یک سازند کربناته مهمترین عامل کاهش تخلخل و نفوذپذیری، رسوب کربنات کلسیم و کلرید سدیم می باشد.

۳- آزمون های تشخیصی پیش از آزمایش

قبل از شروع آزمایش های این مطالعه لازم است مجموعه ای از



شکل ۲ | میزان تخلخل محاسبه شده از برش های مختلف برداشت شده از نمونه به کمک پویش سی تی اسکن



شکل ۳ | درصد بازیافت نفت سفید بر اثر تزریق دی اکسید کربن در نمونه سنگ های کربناته

که امکان بیشتری به دی اکسید کربن برای ممزوج شدن و ایجاد برهم کنش با آب سازندی غیر قابل کاهش که در منافذ ریز و مسدود حضور دارند، فراهم می کند. دمای آزمایش ۶۳ درجه سانتی گراد در نظر گرفته شد. آزمایش های طراحی شده در این مطالعه در جدول ۱- شرح داده شده است. همچنین، طرحواره سامانه ی تزریق گاز در این مطالعه در شکل ۱- آورده شده است.

۲- واکنش های شیمیایی حاکم بر محیط آزمایش

به طور کلی دی اکسید کربن چه در زیر زمین و چه در شرایط محیط در آب حل شده و یک اسید کربنیک ضعیف را تولید می کند. H_2CO_3 متعاقباً به HCO_3^- و CO_3^{2-} تفکیک می شود که مراحل این واکنش به شکل زیر است:



ترکیبات بی کربنات محلول با کانی های سنگ واکنش داده و کانی های کربناته رسوب می کنند. ترکیبات کربنات ها همراه با Ca،

۲ ترکیب کانی های نمونه های مورد آزمایش		
ترکیبات	فرمول شیمیایی	درصد
کلسیت	CaCO_3	۹۶/۱
ایلیت	$\text{Al}_2\text{Si}_3\text{AlO}_{10}(\text{OH})_2 \cdot (\text{KH}_3\text{O})$	۳/۹

۳ شرایط اولیه نمونه ها پیش از آزمایش				
شماره آزمایش	میزان حجم فضای نفوذپذیری اولیه (متخلخل (cc)	تخلخل اولیه (درصد)	میزان آب غیر قابل کاهش (درصد)	میزان آب غیر قابل
آزمایش-۱	۲۲/۶۶	۱/۹۵	۲۲/۸	۲۴
آزمایش-۲	۲۴/۶۲	۲/۳	۲۴/۷	۱۳
آزمایش-۳	۲۱/۷۶	۴/۷۲	۲۲	۲۰

۴ درصد تغییرات نفوذپذیری بعد از تزریق دی اکسید کربن		
شماره آزمایش	نفوذپذیری اولیه (md)	تغییرات نفوذپذیری (درصد)
آزمایش-۱	۱/۹۵	۸
آزمایش-۲	۲/۳	-۴۴
آزمایش-۳	۴/۷۲	-۱۷۸

میزان نفوذپذیری قبل و بعد از آزمایش مهم‌ترین بخش تحلیل نتایج می‌باشد. اهمیت محاسبه تغییرات تراوایی از آن جهت است که هرگونه واکنش شیمیایی یا تغییرات ساختاری در نمونه مورد آزمایش، بر تراوایی اثرگذار است. به این علت می‌توان با مطالعه تغییرات نفوذپذیری قبل و بعد از آزمایش به اثر واقعی متغیرها در جریان هر آزمایش پی‌برد. پس از پایان هر آزمایش، مغزه مورد مطالعه با ۱۰۰ سی‌سی حلال ایزوپروپانول خالص شسته شد. سپس، مجدداً مورد سنجش نفوذپذیری قرار گرفت. نتایج به‌دست آمده بر اساس مقایسه میزان نفوذپذیری مطلق نمونه‌ها قبل و بعد از هر آزمایش در شکل ۴- گزارش شده است.

۶- تحلیل نتایج

شکل ۳- نشان‌دهنده میزان و روند تولید نفت در طول آزمایش‌هاست. درصد بازیافت نهایی در این آزمایش‌ها چندان دستخوش تغییر نشده است. این نتیجه را می‌توان با امتزاج‌پذیری گاز و سیال نفتی موجود در نمونه توجیه کرد. بالا رفتن دبی باعث مقدار کمی افزایش در درصد تولید نهایی می‌گردد.

در طی این آزمایش‌ها، نحوه‌ی قرارگیری مغزه‌ها در داخل محفظه‌ی نگه‌دارنده به‌صورت عمودی بود و جریان از بالا به سنگ وارد می‌شد. این مسئله باعث می‌شود تا بر اثر فرایند انحلال در سیستم، ذرات در داخل مغزه از جای خود حرکت کنند. این حرکت به طرف انتهای مغزه بوده و سپس ممکن است که ذرات بتوانند از محیط خارج شوند که این امر به افزایش نفوذپذیری منجر خواهد شد، در غیر این صورت در انتهای مغزه اجتماع می‌کنند که به کاهش شدید نفوذپذیری خواهد انجامید. این مسئله در مقاله ایزکگ و همکاران (۲۰۰۶) بررسی شده است. در صورت وقوع این فرایند در داخل مغزه، با افزایش دبی تزریق میزان نفوذپذیری کاهش می‌یابد، زیرا در این حالت شدت حمل ذرات به انتهای مغزه افزایش پیدا کرده و چون ظرفیت خارج کردن ذرات از منافذ انتهایی مغزه محدود است، به کاهش بیش‌تر میزان نفوذپذیری منجر خواهد شد. این مسئله به میزان قطر دهانه خروجی ذرات نیز بستگی دارد؛ هرچه میزان قطر دهانه خروجی ذرات در محیط متخلخل کمتر باشد، احتمال کاهش شدید میزان نفوذپذیری با افزایش دبی تزریق افزایش پیدا می‌یابد. در این بین، این نکته حائز اهمیت است که سنگ‌های کربناته قطر دهانه خروجی کوچک‌تری نسبت به سنگ‌های ماسه‌ای داشته که این مسئله نیز در افزایش میزان مسدودشدگی حُفرات به خاطر خروج ذرات و کاهش نفوذپذیری موثر بوده است.

آزمون‌های تشخیصی انجام شوند تا از شرایط اولیه نمونه‌ها اطلاعات ضروری اولیه به‌دست آید. بر اساس اولویت مطالعه در پروژه، انجام دو آزمون اولیه ضروری به‌نظر می‌رسد؛ اولین آزمایش ضروری در این رابطه، آزمایش پرتوسنجی پراش پرتو ایکس^۲ است. این آزمون، کانی‌های سنگ و درصد هر یک را مشخص می‌کند. آزمایش دیگر در این زمینه، انجام پویش روی سنگ‌ها به‌وسیله دستگاه سی‌تی‌اسکن^۳ است که علاوه بر مشخص کردن تقریبی میزان تخلخل اولیه نمونه‌ها، اطلاعات مفیدی در مورد الگوهای خلل و فرج در داخل سنگ‌ها به دست می‌دهد. نتایج آزمایش پرتوسنجی پراش پرتو ایکس در جدول ۲- آورده شده است. همان‌طور که از جدول ۲ مشخص است، کلسیت درصد بسیار بالایی از ترکیبات کانی‌های سازند را به‌خود اختصاص داده است به گونه‌ای که می‌توان نمونه‌های مورد آزمایش را به‌صورت خالص از کلسیت در نظر گرفت.

نتایج آزمون سی‌تی‌اسکن می‌تواند همگن یا ناهمگن بودن نمونه را مشخص کند. میزان تخلخل محاسبه شده در برش‌های متفاوت برداشت شده از یک نمونه در شکل ۲- نشان داده شده است. همان‌گونه که در شکل ۲- مشخص است، تخلخل محاسبه شده در تمام برش‌های برداشت شده به کمک دستگاه سی‌تی‌اسکن، در یک بازه خاص قرار گرفته که می‌تواند به همگن بودن نمونه‌ی مورد آزمایش تعبیر شود. تمام نمونه‌ها از یک قطعه سنگ واحد جدا شده‌اند. بنابراین، این نتایج برای نمونه‌های دیگر قابل تعمیم است.

۴- شرایط اولیه نمونه‌ها

پیش از آغاز آزمایش‌ها تخلخل و نفوذپذیری نمونه‌ها محاسبه شد. هر سه نمونه دارای ۸/۸ سانتی‌متر طول و ۳/۴ سانتی‌متر قطر بودند. پس از این مرحله میزان آب غیرقابل کاهش سازندی در هر سه نمونه محاسبه شد. مشخصات نمونه‌ها در جدول ۳- گزارش شده است.

۵- شرایط انجام و نتایج آزمایش‌ها

همان‌گونه که بیان گردید، فشار مخالف در هر سه آزمایش برابر ۲۷۰۰ پام در نظر گرفته شد. نرخ تزریق در این آزمایش‌ها متفاوت است که مقدار آن‌ها در جدول ۱- آورده شده است. آزمایش‌ها پس از رسیدن دما و فشار سامانه‌ی تزریق گاز به دما و فشار آزمایش آغاز شد و تا زمانی که میزان تولید به صفر برسد، ادامه پیدا کرد. نمودارهای تولید این آزمایش‌ها در شکل ۳- نشان داده شده است. در آزمایش اول، به دلیل پایین بودن دبی نسبت به دو آزمایش دیگر، میزان حجم فضای خالی تزریق شده کمتر است. محاسبه

مختلف اطراف چاه باشد، به خوبی نشان می‌دهد که در صورت محاسبه دقیق میزان آسیب در هر دبی و یافتن دبی تزریق بهینه به صورتی که در مناطق مجاور اطراف چاه در تمام شعاع‌ها، تزریق با حداقل آسیب همراه باشد، می‌توان از ضررهای کلان اقتصادی در بخش حفاری و تولید این دسته مخازن جلوگیری کرد. همین طور رعایت دبی بهینه تزریق در چنین عملیاتی می‌تواند زمینه تولید صیانتی از اینگونه مخازن را نیز فراهم نماید.

نتیجه‌گیری

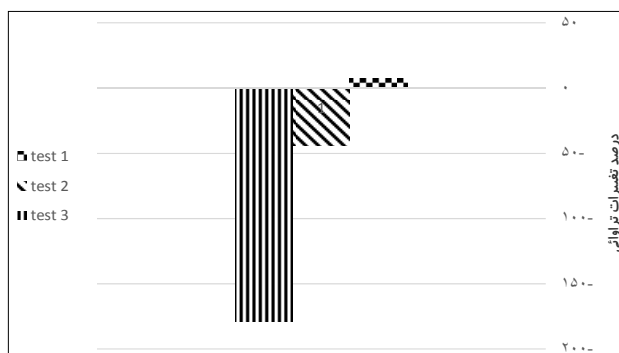
در این مطالعه واکنش‌های شیمیایی ایجاد شده بر اثر برهم کنش گاز و آب سازندی در حین تزریق دی‌اکسید کربن بررسی گردید. به همین جهت سه آزمایش طراحی و انجام شد که نتایج آن‌ها در ادامه آمده است.

۱. برهم کنش بین آب سازندی غیرقابل کاهش در سازند نفتی و دی‌اکسید کربن در عملیات ازدیادبرداشت پارامتری موثر در جریان واکنش‌ها بوده و می‌تواند بر روی سازند و جریان آزمایش‌ها اثرگذار باشد:

۲. کاهش نفوذپذیری با نرخ تزریق گاز رابطه مستقیم داشته و با افزایش دبی تشدید می‌شود. بنابراین، لازم است در هنگام تزریق گاز دی‌اکسید کربن در مخازن کربناته و به منظور جلوگیری از تخریب سازند به ویژه در نواحی اطراف چاه، نرخ تزریق بهینه مورد ارزیابی و آزمایش قرار گیرد.

۳. درصد بازیافت نهایی به دلیل تولید حجم زیادی از سیال نفتی در ۱ تا ۲ حجم فضای خالی اول چندان تحت تأثیر واکنش‌های شیمیایی درون محیط قرار نگرفته و با افزایش دبی، مقدار کمی افزایش پیدا می‌کند، لذا به نظر می‌رسد می‌توان با یافتن نرخ تزریق بهینه، هم از آسیب سازند جلوگیری نمود و هم به تولید صیانتی از مخازن نفتی پرداخت.

همان گونه که در شکل ۴- مشاهده می‌شود، درصد تغییرات نفوذپذیری با افزایش دبی سیر صعودی داشته و در آخرین آزمایش، میزان نفوذپذیری تقریباً به یک سوم کاهش پیدا کرده است. میزان تغییرات نفوذپذیری در آزمایش اول، که کمترین دبی را در بین آزمایش‌ها داشته، تقریباً ثابت است که این، نشان‌دهنده تعادل بین انحلال و رسوب گذاری در داخل مغزه می‌باشد. در آزمایش دوم، میزان نفوذپذیری دچار کاهش بیش تری شده که با افزایش دبی در این آزمایش قابل توجیه است. نتایج آزمایش سوم نشان‌دهنده کاهش بسیار شدید میزان نفوذپذیری مغزه است که اثرگذاری تغییر دبی تزریق بر نتایج آزمایش را به روشنی نشان می‌دهد. علت عدم حصول تغییرات بیش تر در آزمایش دوم، درصد آب سازندی کمتر نمونه مغزه‌ی مورد استفاده است. تغییرات شدید میزان نفوذپذیری در آزمایش سوم از این جهت اهمیت دارد که چنین آسیبی در محدوده تزریق در یک عملیات واقعی می‌تواند اثرات فاجعه‌باری بر روی مخزن مورد حفاری و به صورت خاص مناطق مجاور چاه تزریقی داشته باشد. این دبی‌ها که هر یک می‌تواند نشان‌دهنده میزان دبی واقعی اعمال شده از طرف گاز به محیط متخلخل در شعاع‌های



شکل ۴ | مقایسه میزان تغییرات نفوذپذیری در حین آزمایش

پانویس‌ها

¹ Kerosene

² XRD

³ CT Scan

منابع

- [1] Assayag, N., Matter, J., Ader, M., Goldberg, D. and Agrinier, P. (2009) Water-rock interactions during a CO₂ injection field-test: implications on host rock dissolution and alteration effects. *Chemical Geology*, 265 (1235-227), (2-).
- [2] Mohamed, I., Jia He2, and Hisham A. Nasr-El-Din. (2013) Effect of Brine Composition on CO₂/Limestone Rock Interactions during CO₂ Sequestration, *Journal of Petroleum Science Research (JPSR)*, 2(1).
- [3] Al-Abri, A., Hiwa, S., Robert, A. (2009) Experimental investigation of the velocity-dependent relative permeability and sweep efficiency of supercritical CO₂ injection into gas condensate reservoirs. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 1, 158-164.
- [4] Izgec, O., B. Demiral, H. Bertin, and S. Akin (2006) Experimental and numerical modeling of direct injection of CO₂ into carbonate formations, presented at the SPE Annual Technical Conference and Exhibition.
- [5] Pruess, K., T. Xu, J. Apps, and J. Garcia (2003) Numerical modeling of aquifer disposal of CO₂, *Spe J.*, 8(1), 4960-.