

بررسی آزمایشگاهی تغییرات تراوایی مخازن کربناته نفتی حین فرایند تزریق و ذخیره‌سازی کربن دی‌اکسید با روش تزریق پیوسته: مطالعه موردی

رضا خادمیان^{*}، دانشکده نفت اهواز ■ جمشید مقدسی، خلیل شهبازی، شاهین کرد، هیئت علمی دانشگاه صنعت نفت ■ نسیم مقیم‌زاده، شرکت مناطق نفت خیز جنوب

اطلاعات مقاله

تاریخ ارسال نویسنده: ۹۷/۱۲/۱۲

تاریخ ارسال به داور: ۹۷/۱۲/۱۵

تاریخ پذیرش داور: ۹۸/۰۱/۲۷

چکیده

فرایند ذخیره‌سازی دی‌اکسید کربن^۱ در منابع زیرزمینی یکی از موثرترین راه‌های کاهش مقدار دی‌اکسید کربن ساطع شده به اتمسفر است. این فرایند شامل گرفتن دی‌اکسید کربن از منابع صنعتی و تزریق زیرزمینی آن در محیط‌های متخلخل است. مخازن نفت و گاز، مخازن تخلیه شده ی نفت و گاز، آبدۀ ها، لایه های زغال سنگ و گودال های نمکی از جمله منابع پیشنهاد شده برای انجام این فرایند هستند. تزریق و ذخیره‌سازی گاز دی‌اکسید کربن در مخازن نفتی علاوه بر مزایای زیست‌محیطی، موجب افزایش تولید نفت و کاهش میزان نفت باقی‌مانده در این مخازن می‌شود.

انحلال سنگ مخزن توسط اسید کربنیک و رسوب مجدد این ذرات، رسوب آسفالتین، تغییر ترشوندگی ناشی از رسوب آسفالتین، رسوب نمک و تشکیل لجن^۲، برخی از مشکلاتی هستند که در طول فرایند ذخیره‌سازی دی‌اکسید کربن در سازند ایجاد می‌شوند. چندین عامل، از جمله دما، فشار، نرخ تزریق و... بر این فرایند اثر می‌گذارند و می‌توانند این فرایند را با چالش‌های جدی روبه‌رو کنند. بنابراین بررسی عوامل مختلف و تأثیر هر کدام از آنها بر روی آسیب سازند، ضروری است.

یک سیستم سیلابزنی برای انجام آزمایش‌های تزریق دی‌اکسید کربن و مطالعات آسیب سازند تهیه و ساخته شد. هدف این مطالعه، بررسی اثر پارامترهای مختلف شامل فشار، دما و نرخ تزریق گاز بر آسیب سازند ایجاد شده طی فرایند ذخیره‌سازی دی‌اکسید کربن است.

نتایج نشان داد که تزریق دی‌اکسید کربن در مخازن کربناته موجب کاهش تراوایی می‌شود و این کاهش تراوایی تحت تأثیر عوامل مختلف تغییر می‌کند. همچنین نتایج نشان داد که تزریق دی‌اکسید کربن گازی، آسیب سازند را افزایش می‌دهد در حالی که تزریق دی‌اکسید کربن فوق بحرانی، آسیب سازند کمتری ایجاد می‌کند. افزایش نرخ تزریق موجب کاهش آسیب سازند می‌شود. مقدار آسیب سازند، با افزایش دمای دی‌اکسید کربن، روند کاهشی را نشان داد.

واژگان کلیدی:

تزریق و ذخیره دی‌اکسید کربن، تغییر تراوایی، دی‌اکسید کربن فوق بحرانی، آسیب سازند، مخازن کربناته

مقدمه

نیترژن و ازن [۳]. بر اساس گزارش‌های جهانی در سه دهه گذشته، CO₂ به‌عنوان بزرگترین مشارکت‌کننده (۲۶٪-۹٪) در گرمای جهانی می‌باشد [۴]. ذخیره گاز دی‌اکسید کربن، موضوع بسیار امیدوارکننده و چالش‌برانگیزی است که در حال حاضر به‌عنوان یکی از بهترین روش‌های کاهش دی‌اکسید کربن ساطع شده به اتمسفر و کاهش گرمای جهانی مدنظر می‌باشد.

امروزه بسیاری از کشورها علاقه خود را برای توسعه پروژه‌های ذخیره دی‌اکسید کربن، به‌منظور پیاده‌سازی تکنیک‌هایی با صرفه اقتصادی نشان داده‌اند و پروژه‌های زیادی در مقیاس صنعتی انجام گرفته است [۵]. این فرایند شامل گرفتن CO₂ از منابع صنعتی و تزریق زیرزمینی آن در محیط‌های متخلخل است [۷،۶].

منابع زیرزمینی مناسب جهت ذخیره دی‌اکسید کربن عبارتند از:

پس از انقلاب صنعتی و رشد سریع اقتصاد جهان، مصرف انرژی و در نتیجه، تقاضا برای مصرف سوخت به ویژه سوخت‌های فسیلی افزایش یافت که این عامل موجب افزایش دمای سطح کره‌ی زمین و گرم شدن آن شده است. در طول سه دهه گذشته، با افزایش حدود ۰/۸ درجه سانتی‌گراد (۱/۴ درجه فارنهایت) دمای متوسط زمین، گرم شدن کره زمین بیشتر آشکار شده است [۱]. این افزایش درجه حرارت جهانی در اواخر قرن نوزدهم آغاز شد و طی سه دهه گذشته افزایش یافته است. طبق گزارش تحقیقات آب و هوا در IPCC، در طول دوره ۲۰۱۲-۱۸۸۰، میانگین دمای جهانی (زمین و اقیانوس) در حدود ۰/۸۵ درجه سلسیوس افزایش یافته است. [۲] منبع اصلی تغییرات عمده در دما، افزایش سطح غلظت گازهای گلخانه‌ای است. مهمترین گازهای گلخانه‌ای در جو عبارتند از: بخار آب، دی‌اکسید کربن، متان، اکسید

* نویسنده‌ی عهده‌دار مکاتبات (reza1994fe@gmail.com)

سیلابزنی مورد استفاده را نشان می‌دهد. اجزای این سیستم در برابر خوردگی دی‌اکسید کربن و دماهای بالا مقاوم بوده و می‌تواند تا فشار ۶۰۰۰ psi را تحمل کند.

۲-۱- شرایط تست‌ها

آزمایش‌ها در سه دمای ۷۰، ۱۴۰ و ۱۶۰ درجه فارنهایت (به ترتیب ۲۱، ۶۰ و ۷۰ درجه سانتی‌گراد)، سه فشار ۸۰۰، ۱۲۵۰ و ۱۵۰۰ پوند بر اینچ مربع (psi) و سه نرخ جریانی ۲، ۳ و ۴ سی سی بر دقیقه (cc/min) طراحی شده‌اند. با انتخاب این دماها و فشارها می‌توان کربن دی‌اکسید تزریقی را در سه حالت فوق بحرانی، مایع و گازی بررسی کرد. جدول ۴- غلظت یون‌های مختلف را در آب تزریقی نشان می‌دهد.

۳-۱- روش آزمایش

برای انجام آزمایش‌ها، ابتدا نمونه سنگ را در داخل مغزه نگهدارنده قرار می‌دهیم و فشار روپاره را به میزان ۷۰۰ تا ۱۰۰۰ psi بیشتر از فشار آزمایش تنظیم می‌کنیم. سپس تراوایی نمونه را اندازه می‌گیریم. بعد

۱ | برهمکنش‌های شیمیایی طی فرایند تزریق دی‌اکسید کربن

$CO_2 + H_2O \leftrightarrow H_2CO_3$ $H_2O \leftrightarrow OH^- + H^+$	Carbonic acid production and PH increasing
$C_3CO_3 + H_2CO_3 \leftrightarrow Ca^{2+} + 2HCO_3^-$	Calcite
$CaMg(CO_3)_2 + 2H_2CO_3 \leftrightarrow Ca^{2+} + Mg^{2+} + 4HCO_3^-$	Dolomite
$MgCO_3 + H_2CO_3 \leftrightarrow Mg^{2+} + HCO_3^-$	Magnesium carbonate

۲ | ترکیب نمونه سنگ استفاده شده در آزمایش‌ها

Dolomite	Calcite	Carbon	Shale	Iron carbide
83%	14%	1.5%	0.6%	0.003%

۳ | نتایج آنالیز ترکیب نفت

Saturates (%)	Aromatics (%)	Resins (%)
50.66	39.8	9.54

۴ | غلظت یون‌های مختلف در آب تزریقی استفاده شده در آزمایش‌ها

Ion	Cl-	Na+	Ca2+	Mg2+	SO4-	TDS
Value(mg/l)	22400	14700	470	1830	2650	42000

- ۱) لایه‌های آب شور زیرزمینی
- ۲) مخازن تخلیه شده‌ی نفت و گاز
- ۳) مخازن نفت و گاز در حال تولید
- ۴) لایه‌های زغال سنگ
- ۵) گودال‌های نمکی

تزریق دی‌اکسید کربن به مخازن نفت با هدف افزایش تولید نفت، از دهه ۱۹۷۰ میلادی آغاز شده است. CO₂-EOR دارای دو مزیت عمده است:

- ۱) افزایش تولید نفت از مخازن
- ۲) ذخیره‌سازی CO₂ برای کاهش دی‌اکسید کربن منتشر شده در جو [۸].

با این حال، انجام این عملیات در مخازن نفتی به خصوص مخازن کربناته، با چندین چالش همراه است [۹]. تعدادی برهمکنش فیزیکی و شیمیایی سیال-سیال و سنگ-سیال، این فرایند را تحت تاثیر قرار می‌دهد که در ادامه به آنها اشاره خواهد شد. بعد از تزریق دی‌اکسید کربن، این گاز با آب موجود در مخزن واکنش داده و کربنیک اسید تولید می‌شود. اسید تولیدی باعث انحلال سنگ سازنده شده و تراوایی سازنده را افزایش می‌دهد. اما ذرات انحلال یافته‌ی سنگ، بعد از جابه‌جایی در قسمت‌های دیگر مخزن رسوب کرده و موجب مسدود شدن برخی گلوگاه‌ها و کاهش تراوایی می‌شوند. پارامترهای مختلفی مانند دما، فشار، تراوایی و تخلخل اولیه سازنده، نرخ تزریق دی‌اکسید کربن و شوری آب تزریقی، این برهمکنش‌ها را تحت تاثیر قرار می‌دهند. خلاصه‌ای از مهمترین برهمکنش‌های شیمیایی طی این فرایند در جدول ۱- آمده است.

هدف از انجام این مطالعه بررسی تغییرات تخلخل و تراوایی سازنده طی فرایند تزریق و ذخیره‌سازی دی‌اکسید کربن تحت تاثیر سه پارامتر دما، فشار و نرخ تزریق دی‌اکسید کربن است. نمونه نفت و سنگ مخزن، از یکی از میادین جنوب غربی کشور تهیه شده است (جدول ۲- و ۳). نمونه نفت بدون آسفالتین بوده و به صورت سرچاهی تهیه شده است. همچنین عمده ترکیبات نمونه سنگ^۲ مخزنی را کلسیت و دولومیت تشکیل داده‌اند.

۱- مطالعات آزمایشگاهی

۱-۱- سیستم سیلابزنی

برای انجام آزمایش‌های مختلف به یک سیستم سیلابزنی با قابلیت تزریق گاز و همچنین تحمل فشارهای بالا نیاز بود که پس از تهیه و ساخته شدن مورد استفاده قرار گرفت. شکل ۱- شماتیک سیستم

۲- نتایج

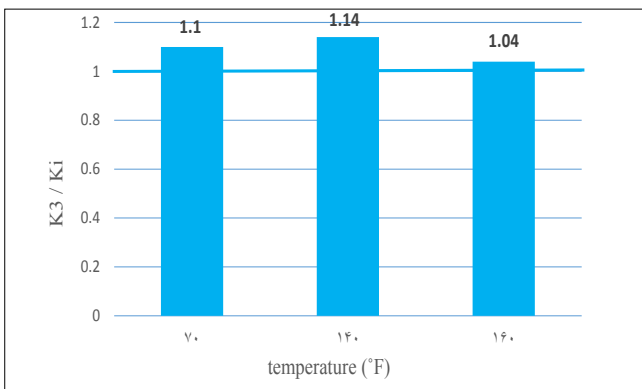
۲-۱- تأثیر دما

برای بررسی اثر دما در این فرایند، سه دمای ۷۰، ۱۴۰ و ۱۶۰ درجه فارنهایت را مورد بررسی قرار دادیم. دی اکسید کربن تزریقی در دمای ۷۰ درجه فارنهایت به صورت مایع و در دیگر دماها به صورت فوق بحرانی قرار دارد. افزایش دما موجب کاهش انحلال دی اکسید کربن در آب می شود. در نتیجه، اسید کمتری تولید شده و انحلال سنگ کمتری رخ می دهد. همچنین با افزایش دما، انحلال پذیری کلسیم بی کربنات افزایش می یابد. بنابراین، زمانی که دمای تزریق دی اکسید کربن افزایش می یابد، رسوب کلسیم کربنات کمتری اتفاق می افتد. مجموعه ای این عوامل باعث می شود، در دماهای بالا آسیب کمتری به سازند وارد شود. شکل ۲- نشان می دهد که در دماهای بالا، کاهش تراوایی کمتری اتفاق می افتد و در واقع آسیب سازند کمتر می شود.

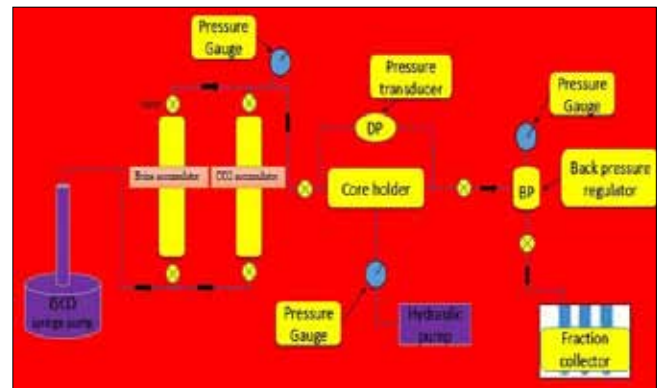
همان طور که مشاهده می شود در تمام آزمایش ها، تراوایی ثانویه کمتر از تراوایی اولیه است. اما این کاهش تراوایی در دمای ۷۰ درجه فارنهایت بسیار بیشتر از موارد دیگر می باشد. با کاهش تراوایی نمونه سنگ، تزریق پذیری آن کاهش می یابد. بنابراین، کاهش تزریق پذیری

از محاسبه تراوایی در شرایط محیطی، آون^۲ را روشن کرده تا تمام سیستم به دمای مورد نظر آزمایش برسد. برای انجام این فرایند، باید مراحل زیر را انجام داد:

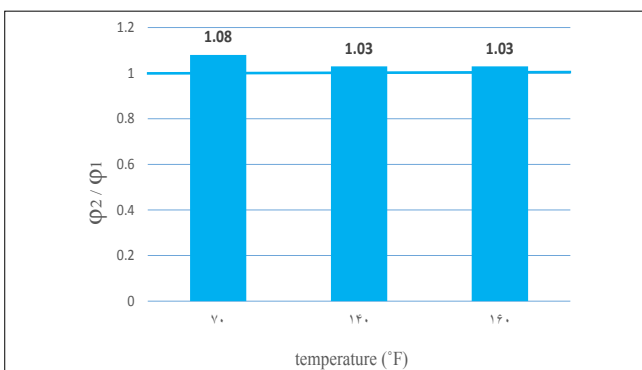
- ۱) پلاگ ها را ابتدا با تفلون، سپس با فویل آلومینیومی و در آخر با روکش حرارتی کاملاً می پوشانیم تا از فرار گاز دی اکسید کربن در حین تست ها جلوگیری شود.
- ۲) قرار دادن نمونه سنگ داخل مغزه نگهدار و محاسبه تخلخل و تراوایی آن.
- ۳) اشباع مغزه با آب و سپس تزریق نفت تا رسیدن به اشباع غیر قابل کاهش آب.
- ۴) تزریق دی اکسید کربن به صورت پیوسته و متناسب با شرایط هر تست.
- ۵) محاسبه تراوایی ثانویه و مقایسه با مقدار اولیه تراوایی جهت بررسی تغییرات تراوایی.
- ۶) شست و شوی مغزه با تولوئن و متانول.
- ۷) خشک کردن مغزه و محاسبه تخلخل ثانویه و تراوایی ثالثیه جهت بررسی انحلال سنگ.



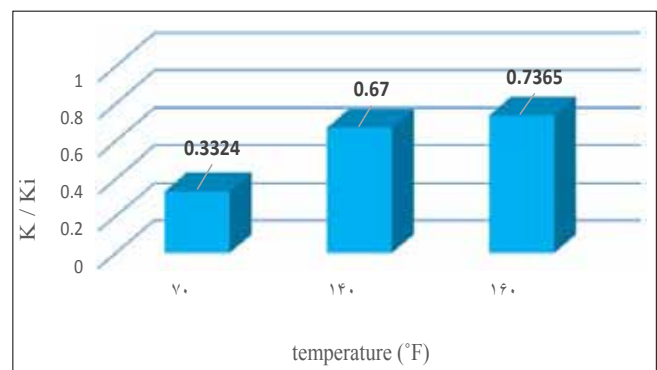
شکل ۳ | تغییرات تراوایی در اثر انحلال ترکیبات سنگ توسط کربنیک اسید



شکل ۱ | شماتیک سیستم سیالزنی ساخته شده



شکل ۴ | تغییرات تخلخل طی فرایند تزریق کربن دی اکسید



شکل ۲ | تغییرات تراوایی در دماهای مختلف

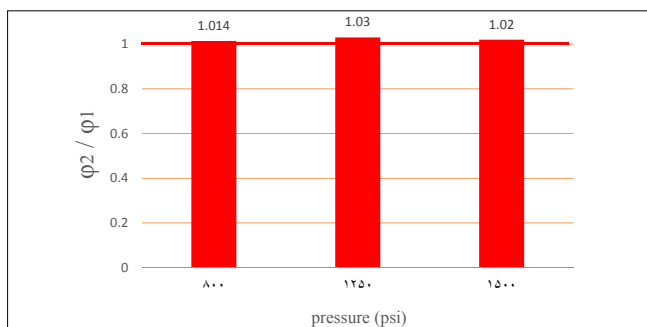
۱۲۵۰ تا ۱۵۰۰ psi، انحلال‌پذیری دی‌اکسید کربن در آب افزایش یافته و بنابراین، انحلال سنگ بیشتری رخ می‌دهد. در این حالت، با افزایش رسوب ذرات انحلال یافته، کاهش تراوایی بیشتری نسبت به فشار ۱۲۵۰ psi مشاهده می‌شود.

مهمترین مزیت تزریق دی‌اکسید کربن فوق بحرانی نسبت به دی‌اکسید کربن گازی در رابطه با چگالی سیالات است. در صورتی که حجم یکسانی از مخزن در دسترس باشد، در دما و فشار مشخص، میزان حجم قابل ذخیره دی‌اکسید کربن در حالت فوق بحرانی حدود ۲۰۰ برابر کربن دی‌اکسید گازی است [۱۰].

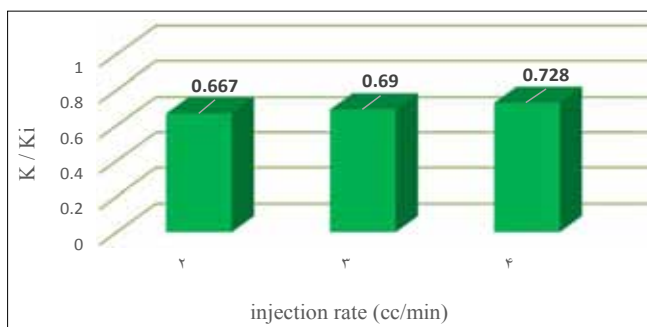
بعد از پایان هر تست و شست‌وشوی نمونه سنگ‌ها، تخلخل و تراوایی هر پلاگ اندازه‌گیری شد. انحلال کانی‌های سنگ توسط کربنیک اسید باعث افزایش تخلخل و تراوایی در نمونه سنگ‌ها شده است. شکل‌های ۶- و ۷، تغییرات تخلخل و تراوایی را در فشارهای مختلف بررسی می‌کنند.

۳-۲- تأثیر نرخ تزریق دی‌اکسید کربن

برای بررسی اثر نرخ تزریق دی‌اکسید کربن در فرایند تزریق و ذخیره‌سازی دی‌اکسید کربن، سه نرخ جریان ۲، ۳ و ۴ cc/min بررسی شدند. از آنجایی که زمان تماس بین کربن دی‌اکسید و آب موجود در سازند در نرخ‌های جریان بالا، کم است، بنابراین با افزایش نرخ تزریق، میزان تشکیل کربنیک اسید و در نتیجه انحلال سنگ کاهش می‌یابد. همچنین در



شکل ۷ | تغییرات تخلخل در فشارهای مختلف



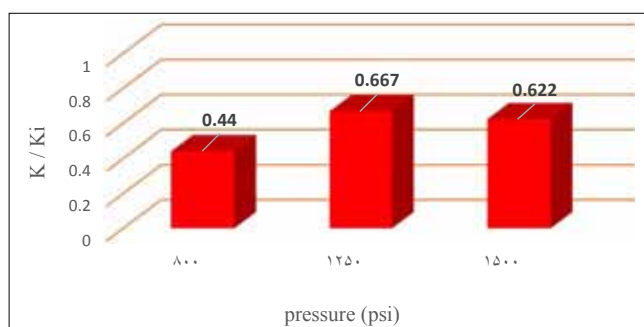
شکل ۸ | تغییرات تراوایی در نرخ‌های جریان مختلف

مخزن در همسایگی چاه، یکی از مهمترین مشکلاتی است که طی فرایند تزریق دی‌اکسید کربن رخ می‌دهد.

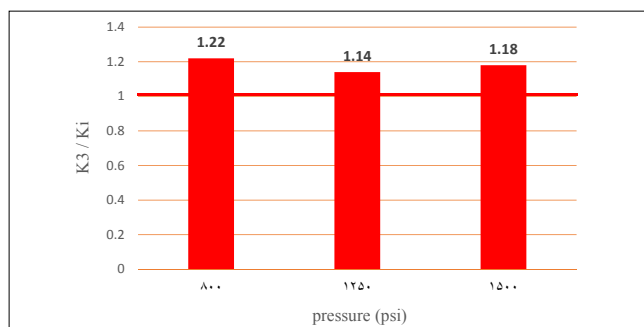
بعد از اتمام آزمایش، پلاگ‌ها به‌طور کامل توسط تولوئن و متانول شسته شدند و مجدداً تخلخل و تراوایی آنها اندازه گرفته شد. نتایج به‌دست آمده، افزایش تخلخل و تراوایی را در همه نمونه‌ها نشان داد که این موضوع انحلال نمونه سنگ توسط کربنیک اسید را تأیید می‌کند. شکل‌های ۳- و ۴، تغییرات تخلخل و تراوایی نمونه سنگ‌ها را بعد از شست و شو نشان می‌دهد.

۲-۲- تأثیر فشار

سه فشار ۸۰۰، ۱۲۵۰ و ۱۵۰۰ psi جهت بررسی اثر پارامتر فشار بر تغییرات تراوایی طی این فرایند در نظر گرفته شدند. نتایج آزمایش‌ها، کاهش تراوایی و تزریق‌پذیری در همه نمونه سنگ‌ها را نشان می‌دهد، اما این کاهش تراوایی در فشار ۸۰۰ psi، که دی‌اکسید کربن به‌صورت گاز است، قابل ملاحظه‌تر است. شکل ۵- تغییرات تراوایی را در فشارهای مختلف نشان می‌دهد. با کاهش فشار از ۱۲۵۰ تا ۸۰۰ psi، انحلال‌پذیری دی‌اکسید کربن در آب کاهش می‌یابد. در نتیجه، انحلال سنگ کمتر صورت می‌گیرد و بنابراین رسوب ذرات انحلال یافته کاهش می‌یابد. اما، وقتی دی‌اکسید کربن گازی تزریق شود، لجن تشکیل می‌شود که به‌شدت باعث کاهش تراوایی نمونه سنگ می‌شود. همچنین با افزایش فشار از



شکل ۵ | تغییرات تراوایی سنگ کربناته در فشارهای مختلف



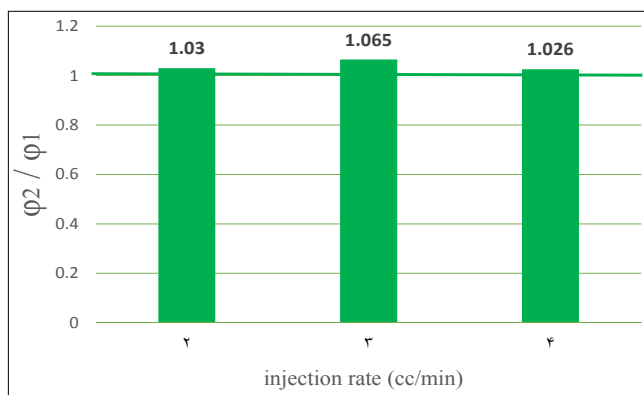
شکل ۶ | افزایش تراوایی نمونه سنگ‌ها طی فرایند تزریق دی‌اکسید کربن

خوردگی کانی‌های سنگ کربناته می‌شود که با اندازه‌گیری تخلخل و تراوایی هر نمونه سنگ بعد از تست، این موضوع تأیید شد.

۲- با افزایش دما و تزریق دی‌اکسید کربن فوق بحرانی، میزان آسیب سازند کاهش می‌یابد.

۳- در فشارهای پایین و زمانی که دی‌اکسید کربن گازی تزریق شد، میزان آسیب سازند افزایش یافت، درحالی‌که با افزایش فشار و تزریق دی‌اکسید کربن فوق بحرانی، میزان کاهش تراوایی، کاهش نشان می‌دهد. با این وجود، روند مشخصی بین تغییرات فشار و تغییرات تراوایی وجود نداشت.

۴- با افزایش نرخ تزریق دی‌اکسید کربن، میزان آسیب سازند کاهش می‌یابد. ■

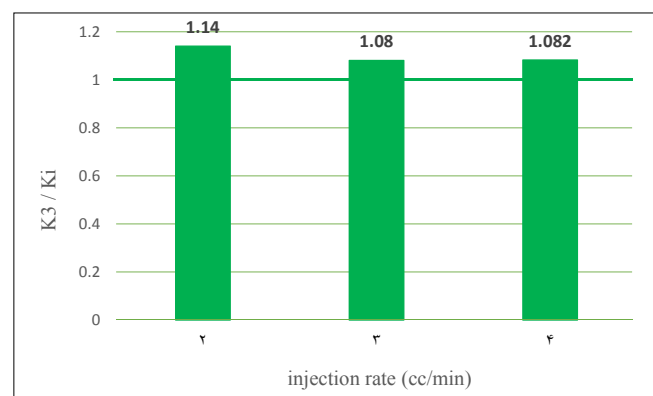


شکل ۱۰ | تغییرات تخلخل در نرخ‌های جریان مختلف طی فرایند تزریق دی‌اکسید کربن

نرخ‌های جریانی بالا، توانایی سیالات تزریقی در انتقال ذرات انحلال یافته افزایش می‌یابد که باعث می‌شود این ذرات در داخل پلاگ رسوب نکنند و در نتیجه، کاهش تراوایی را کمتر می‌کند. بنابراین مشاهده می‌شود که با افزایش نرخ تزریق دی‌اکسید کربن، میزان آسیب سازند کمتر شده است. شکل ۸، تغییرات تراوایی را در این آزمایش‌ها نشان می‌دهد. همچنین بعد از اتمام هر تست و شست‌وشوی نمونه سنگ‌ها، تخلخل و تراوایی هر نمونه اندازه‌گیری گردید (شکل‌های ۹- و ۱۰).

نتیجه‌گیری

۱- تزریق دی‌اکسید کربن و تشکیل کربنیک اسید، موجب انحلال و



شکل ۹ | افزایش تراوایی طی فرایند تزریق دی‌اکسید کربن

پانویس‌ها

1. CO₂ sequestration
2. Sludge
3. Interaction
4. Core sample

5. Core holder
6. Overburden pressure
7. Oven

منابع

- [1] Olivier, J. G. J., Peters, J. A. H. W., Janssens-Maenhout, G., and Muntean, M., "Trends in global CO₂ emissions. 2013 Report," 2013, Netherlands.
- [2] "IPCC (2015) Climate change 2014: mitigation of climate change, vol 3. Cambridge University Press, Cambridge and New York."
- [3] Karl, T. R., and Trenberth, K. E., "Modern Global Climate Change," 2003, Science, 302(5651), p. 1719.
- [4] Schlesinger, W. H., and Bernhardt, E. S., Biogeochemistry: an analysis of global change, Academic press, 2013.
- [5] Belhaj, H., and Bera, A., "A brief review of mechanisms for carbon dioxide sequestration into aquifer reservoirs," 2017, International Journal of Petroleum Engineering, 3(1), pp. 4966-.
- [6] Gharbi, O., "Fluid-Rock Interactions in Carbonates:

Applications to CO₂ storage." 2014.

- [7] Heesterma, A., "Replacing fossil fuels by renewables: It is urgent, technically straightforward and cost effective."
- [8] Verma, M. K., Fundamentals of carbon dioxide-enhanced oil recovery (CO₂-EOR): A supporting document of the assessment methodology for hydrocarbon recovery using CO₂-EOR associated with carbon sequestration, 2015, US Department of the Interior, US Geological Survey Washington, DC.
- [9] Miri, R., and Hellevang, H., "Salt precipitation during CO₂ storage—A review," 2016, International Journal of Greenhouse Gas Control, 51, pp. 136147-.
- [10] Mohamed, I., and Nasr-El-Din, H. A., "Fluid/rock interactions during CO₂ sequestration in deep saline carbonate aquifers: laboratory and modeling studies," 2013, SPE Journal, 18,(03), pp. 468485-.