

تزریق گازهای اسیدی در سازندهای زمین‌شناسی با هدف ازدیاد برداشت و حفاظت از محیط زیست: مروری بر سازوکارهای آسیب سازند، زمینه‌ها و اصول پژوهش آزمایشگاهی

سیدمحمد رضا میرفروغی، شاهین کرد* و جمشید مقدسی

دانشکده مهندسی نفت اهواز، دانشگاه صنعت نفت، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۶/۵ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۸/۶

چکیده

با کشف میدین بزرگ گاز ترش در سال‌های اخیر و کاهش قیمت گوگرد، به مشکلات عملیاتی و زیست محیطی روش‌های شیمیایی بازیافت گوگرد، عدم جذابیت اقتصادی این روش‌ها نیز افزوده گردیده است. راهکار جایگزین جهت دفع جریان مشکل‌ساز گاز اسیدی حاصل از فرآیندهای شیرین‌سازی گاز ترش، تزریق گاز اسیدی به سازندهای زمین‌شناسی است که نه تنها باعث حفاظت از محیط زیست در مقابل انتشار گازهای سمی و گلخانه‌ای خواهد شد، بلکه فرصت‌های جدیدی در زمینه ازدیاد برداشت مخازن نفت و گاز ارائه خواهد کرد. جذابیت‌های اقتصادی این روش و الزامات زیست محیطی تشدید شده در سال‌های اخیر منجر به اقبال بیش از پیش پژوهشگران به موضوعات مختلف تحقیقاتی در زمینه گازهای اسیدی گردیده است. با توجه به عدم وجود نوشتاری جامع در تاریخچه که بتواند به عنوان راهنمایی جامع و سریع در زمینه مطالعاتی گاز اسیدی در دسترس پژوهشگران علاقه‌مند به این حوزه باشد، در این نوشتار مروری با هدف روشن شدن چالش‌ها و الزامات پیش روی محققین در زمینه انتخاب تکنیک مطالعاتی و تجهیز آزمایشگاهی مناسب در پژوهش‌های گاز اسیدی، سعی داریم پس از پرداختن به برهم‌کنش‌های سنگ و سیال مخزن با گاز اسیدی و مکانیسم‌های محتمل آسیب سازند در پروژه‌های تزریق، به تبیین اهمیت آزمایش‌های سیلاب‌زنی مغزه به منظور شبیه‌سازی انتقال گاز اسیدی در سازندهای زمین‌شناسی و حوزه‌های تحقیقاتی قابل پژوهش با این آزمایش‌ها پرداخته و تجهیزات و تکنیک‌های آزمایشگاهی مطرح به منظور درک و مطالعه جریان چندفازی و پایش سیستم داخلی سنگ و سیال مخزن حین عملیات ازدیاد برداشت و ذخیره‌سازی گاز اسیدی را مورد بررسی، مقایسه و تحلیل قرار دهیم. در پایان ملاحظات خاص ایمنی مربوط به آزمایشگاه‌های مطالعاتی گاز اسیدی نیز ارائه خواهد گردید.

کلمات کلیدی: تزریق گاز اسیدی، ذخیره‌سازی گاز اسیدی، آسیب سازند، سیلاب‌زنی مغزه، روش‌های آزمایشگاهی

*مسئول مکاتبات

آدرس الکترونیکی sh.kord@put.ac.ir

شناسه دیجیتال: (DOI: 10.22078/pr.2020.4274.2934)

مقدمه

به گاز طبیعی حاوی معمولاً بیش از چهار قسمت در میلیون (ppm) حجمی از هیدروژن سولفید (H_2S) در دما و فشار محیط، گاز ترش گفته می‌شود. از آنجا که هیدروژن سولفید در غلظت کمتر از ۳۰ ppm بویی شبیه به بوی تخم مرغ گندیده دارد، به گاز حاوی هیدروژن سولفید گاز ترش اطلاق می‌شود [۱]. ایجاد هیدروژن سولفید در مخازن ترش می‌تواند حاصل کاهش انواع سولفات به صورت ژئوشیمیایی یا زیستی (حاصل از فعالیت باکتری‌ها) باشد [۲]. در شرایط محیطی، هیدروژن سولفید گازی بی‌بو (غلظت بالای ۱۰۰ ppm)، بی‌رنگ، اشتعال‌پذیر و بسیار سمی است. هیدروژن سولفید در ۵۰۰ ppm با چند دقیقه تنفس کشنده است و غلظت بالاتر از ۱۰۰۰ ppm منجر به مرگ فوری می‌شود [۳]. انتشار هیدروژن سولفید در هوا کره منجر به اکسید شدن توسط اکسیژن، واکنش با بخار آب، تشکیل اسید سولفوریک و بارش باران‌های اسیدی می‌گردد [۴]. این گاز با آهن، مس و بسیاری از پلاستیک‌ها واکنش می‌دهد و در حضور آب باعث خوردگی زیادی می‌گردد. کربن دی‌اکسید نیز در حضور آب، اسیدی ضعیف و خورنده ایجاد می‌کند و از گازهای گلخانه‌ای و عوامل کلان تغییر آب و هوا و گرم شدن کره زمین به‌شمار می‌رود [۵].

فرآیند پاکسازی گاز ترش از هیدروژن سولفید، فرآوری یا شیرین‌سازی گاز ترش نام دارد. به هر مخلوط گازی از هیدروژن سولفید و کربن دی‌اکسید که معمولاً حاوی مقادیر کمی گازهای هیدروکربنی و بخار آب نیز می‌باشد "گاز اسیدی" گفته می‌شود. چرایی این نام‌گذاری، تولید اسیدهای ضعیف هنگام حل شدن این گازها در آب است [۶]. در پی عملیات شیرین‌سازی گاز ترش، جریان گاز اسیدی ایجاد می‌شود که روش‌های مختلفی برای دفع یا تبدیل آن بسته به شدت جریان و مقدار هیدروژن سولفید وجود دارد. با افزایش نگرانی‌های زیست‌محیطی و

ممنوعیت سوزاندن هیدروژن سولفید، این گاز باید مورد فرآوری بیشتر قرار گیرد یا به اعماق زمین تزریق گردد. روش‌های فرآوری بیشتر یا بازیافت گوگرد یعنی تبدیل هیدروژن سولفید به گوگرد را می‌توان به چهار دسته اصلی فرآیندهای کلاوس اصلاح شده، فرآیندهای اکسیداسیون مستقیم، فرآیندهای مایع و فرآیندهای زیستی تقسیم کرد. با توجه به مشکلات زیاد فرآیندهای شیمیایی بازیافت گوگرد و عدم جذابیت اقتصادی این روش‌ها، همچنین ظرفیت پایین تبدیل هیدروژن سولفید به گوگرد در فرآیندهای زیستی، تزریق گازهای اسیدی به سازندهای زمین‌شناسی راهکار عملی و جذاب به لحاظ اقتصادی و زیست محیطی است که نه تنها باعث حفاظت از محیط زیست در مقابل انتشار گازهای سمی و گلخانه‌ای خواهد شد، بلکه فرصت‌های جدیدی در زمینه ازدیاد برداشت مخازن نفت و گاز ارائه خواهد کرد. آبدده‌های بزرگ، مخازن ترش در حال تولید، مخازن هیدروکربنی تخلیه‌شده، و مخازن گاز متان در لایه‌های ذغال سنگ گزینه‌های مناسبی جهت تزریق گاز اسیدی می‌باشند. قبل از تزریق لازم است ظرفیت حجمی مخزن، میزان گستردگی و مقاومت پوش سنگ، تزریق پذیری سازند، رفتار فازی و چگونگی برهم‌کنش گاز اسیدی با سنگ و سیال مخزن در آزمایشگاه بررسی گردند [۷]. نویسندگان قبلاً در نوشتاری دیگر [۷] به تفصیل به تعاریف اولیه، روش‌های مختلف شیرین‌سازی گاز ترش، انواع روش‌های بازیافت گوگرد، چرایی و اهمیت تزریق گاز اسیدی به سازندهای زمین‌شناسی، شرح فرآیند تزریق، ملاحظات انتخاب سازندهای مناسب جهت تزریق، و سازوکارهای به‌دام‌افتادگی و ذخیره‌سازی گاز اسیدی در سازندهای زمین‌شناسی پرداخته‌اند. چگونگی برهم‌کنش گاز اسیدی با سنگ و سیال مخزن و آسیب سازند حین تزریق گاز اسیدی را می‌توان در سه دسته عمده برهم‌کنش‌های گاز اسیدی با سنگ مخزن [۸-۱۰]، آسیب‌های مرتبط

وجود نداشت که به طور کامل به تکنیک‌های مطالعاتی موجود، همچنین ماهیت و ملزومات طراحی آزمایش‌های مطالعاتی فرآیند ذخیره‌سازی و ازدیاد برداشت گاز اسیدی پرداخته باشد و بتواند به عنوان راهنمایی جامع و سریع در زمینه مطالعاتی گاز اسیدی در دسترس پژوهشگران باشد. با هدف فراهم آوردن چنین راهنمایی، در این نوشتار سعی بر آن است با ارائه مروری جامع بر تکنیک‌های مطالعات آزمایشگاهی در زمینه گاز اسیدی، چالش‌ها و الزامات پیش‌روی پژوهشگران در زمینه انتخاب تکنیک مطالعاتی و تجهیز آزمایشگاهی مناسب تبیین گشته و الگوی مفهومی جامعی از تجهیز آزمایشگاهی-مطالعاتی گاز اسیدی به‌همراه آنالیز نقاط قوت، نقاط ضعف و کاربرد روش‌های مختلف پایش سیستم داخلی سنگ و سیال حین تزریق گاز اسیدی ارائه گردد. در بخش دوم از این نوشتار اهمیت، چگونگی وقوع و راهکار اجتناب یا درمان هریک از آسیب‌های محتمل سازند بر اثر تزریق گاز اسیدی بیان گردیده است. در ابتدای بخش سوم به تبیین اهمیت آزمایش‌های سیلاب‌زنی مغزه در مطالعات گاز اسیدی و ارائه زمینه‌های مطالعاتی قابل پژوهش به کمک این آزمایش‌ها پرداخته‌ایم و در ادامه، روش‌های موجود جهت رصد و بررسی مهاجرت چندفازی گاز اسیدی/آب/نفت، کاهش تزریق پذیری، و نحوه توزیع اشباع سیالات در محیط متخلخل معرفی، مقایسه و تحلیل شده‌اند. در قسمت پایانی، الزامات و تمهیدات ایمنی مورد نیاز جهت کار در آزمایشگاه‌های گاز اسیدی ارائه گردیده است.

آسیب سازند و کاهش تزریق پذیری در ناحیه اطراف چاه در پروژه‌های تزریق گاز اسیدی

برهم‌کنش‌های گاز اسیدی سنگ مخزن

تماس گاز اسیدی با آب (قبل و بعد از تزریق) منجر به حل شدن گاز در فاز آبی، تشکیل اسید و کاهش pH، حل شدن موقتی/دائمی ماتریس و سیمان

با شرایط فازی و نوع تزریق [۸] و برهم‌کنش‌های گاز اسیدی با سیال مخزن [۱۵، ۱۴، ۱۱، ۸] طبقه‌بندی نمود. قبل از تزریق گاز اسیدی ابتدا شدت، چگونگی و احتمال وقوع کلیه آسیب‌ها توسط آزمون‌های آزمایشگاهی و شبیه‌سازی‌های عددی بررسی می‌گردد.

آزمایش‌های سیلاب‌زنی مغزه ابزاری مؤثر جهت حداکثرسازی بازیافت نفت در پروژه‌های ازدیاد برداشت، تخمین دقیق بازده ذخیره‌سازی، اطمینان از امنیت فرآیند ذخیره‌سازی و پیش‌بینی اثرات بلند مدت تزریق با توجه به برهم‌کنش‌های محتمل بین سنگ و سیال مخزن با گاز اسیدی می‌باشند [۱۶ و ۹]. لذا، طراحی هوشمندانه این آزمایش‌ها با توجه به حوزه‌های مختلف تحقیقاتی در زمینه گاز اسیدی اهمیت زیادی دارد. در آزمایش‌های روتین سیلاب‌زنی مغزه، محیط متخلخل به عنوان یک جعبه سیاه با ساختاری همگن در نظر گرفته می‌شود، اما مطالعه فرآیند مهاجرت چندفازی گاز اسیدی/آب/نفت، کاهش تزریق پذیری و توزیع اشباع سیالات حین تزریق گاز اسیدی از نظر مکان و زمان، مستلزم استفاده از روش‌هایی جهت پایش دینامیک حرکت سیالات و توزیع آنها در محیط متخلخل است. این روش‌ها را می‌توان در دو دسته کلی روش‌های تصویربرداری (مقیاس آزمایشگاهی) و تکنیک‌های ژئوفیزیکی (مقیاس آزمایشگاهی و میدانی) طبقه‌بندی کرد. روش‌های تصویربرداری شامل "تصویربرداری با پرتو ایکس" با انواع سی‌تی‌اسکنرهای پزشکی [۱۷]، صنعتی [۱۸]، میکروسی‌تی‌ها [۹]، و "نگار رزونانس مغناطیسی هسته‌ای" [۱۹] بوده؛ و روش‌های ژئوفیزیکی شامل "نقشه‌برداری بررسی لرزه‌ای" [۲۰] و "ارزیابی مقاومت الکتریکی" [۲۱] می‌باشند.

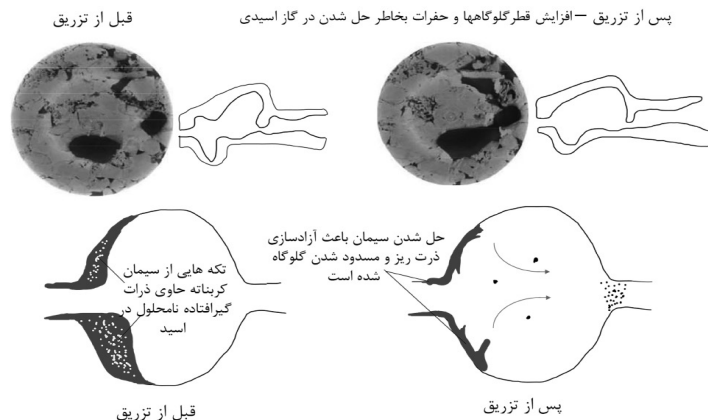
با وجود اقبال روزافزون به کارهای تحقیقاتی در زمینه مطالعاتی گاز اسیدی و بالا بودن تعداد مقالات منتشره در این زمینه، نوشتاری در تاریخچه

[۲۲]. مروری بر پژوهش‌های آزمایشگاهی مربوط به تعادل بخار-مایع برای مخلوط گاز اسیدی و هیدروکربن [۲۲] و تأثیر شرایط فازی بر مقدار آب در مخلوط گاز اسیدی [۲۳] در منابع موجود است. نمودار فازی مخلوط گاز اسیدی حالتی موزی شکل دارد (شکل ۲). حالت دوفاز ایجاد شده حین فشرده‌سازی از فاز گاز به فاز مایع/فوق‌بحرانی می‌تواند منجر به حفره‌زایی و خوردگی در سیستم فشرده‌سازی گردد، لذا لازم است دمای جریان ورودی به کمپرسورها چنان باشد که فشرده‌سازی بدون گذر از ناحیه دوفازی انجام شود. وقتی فشار اولیه مخزن پایین باشد، تزریق اولیه در ناحیه "گازی" نمودار فازی شروع می‌شود و با افزایش تدریجی فشار در مخزن، شرایط فازی سیال اطراف چاه به ناحیه "دوفازی" وارد می‌شود که اجتناب‌ناپذیر است.

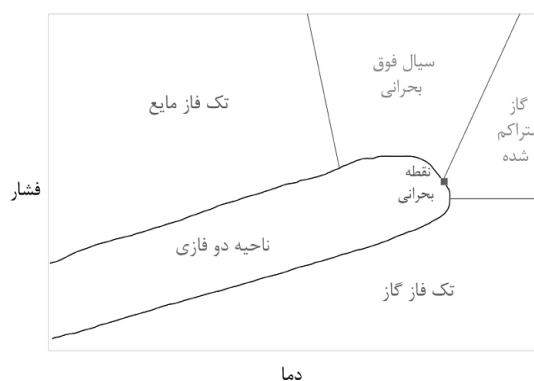
بین‌دانه‌ای از جنس دولومیتی/آهکی، و بروز عدم سازگاری با آب ذاتی مخزن (تشکیل رسوب) می‌گردد. حل شدن جزئی ماتریس یا سیمان بین‌دانه‌ای در اطراف چاه می‌تواند باعث آزادسازی و مهاجرت ذرات ریز غیرقابل‌حل در آب گردد (شکل ۱)، تصاویر میکروسی‌تی مربوط به تزریق آب اشباع شده با کربن دی‌اکسید می‌باشند (۹ و ۸). با اشباع شدن جریان تزریقی در مسیر حرکت از کانی‌هایی که در خود حل می‌کند، در مناطق دورتر رسوبات مختلفی از محلول خارج شده که می‌توانند منجر به کاهش تراوایی گردند (رسوب‌گذاری مجدد) [۱۰].

آسیب‌های مرتبط با شرایط فازی و نوع تزریق

در طراحی برنامه تزریق به اطلاعات زیادی در دامنه‌های گسترده دما و فشار راجع به تعادل فازی مخلوط گاز اسیدی (که معمولاً دارای مقادیری پروپان، اتان، متان و آب نیز می‌باشد) نیاز داریم



شکل ۱ تغییر تراوایی با تزریق گاز اسیدی؛ تصاویر میکروسی‌تی مربوط به تزریق آب اشباع شده با دی‌اکسید کربن هستند [۸ و ۹]



شکل ۲ نمونه نمودار فازی گاز اسیدی [۱۱]

به حل کردن هیدروژن سولفید نسبت به کربن دی اکسید دارد و حجم آب زیادی در این روش مورد نیاز است. افزایش غلظت هیدروژن سولفید، افزایش فشار، کاهش دما و کاهش شوری آب منجر به افزایش حلالیت گاز اسیدی در آب می‌گردند [۸].

مروری بر حلالیت کربن دی اکسید [۳۰ و ۲۹] و هیدروژن سولفید [۳۲ و ۳۱] در آب در منابع موجود است.

آسیب‌های مربوط به برهم‌کنش‌های گاز اسیدی سیال مخزن

تورم (افزایش حجم) سیالات مخزن

اگر فشار به اندازه کافی بالا باشد، تزریق گاز اسیدی منجر به جابه‌جا کردن امتزاجی نفت باقی‌مانده از ناحیه اطراف چاه، افزایش تراوایی نسبی گاز در این ناحیه و بالا رفتن تزریق‌پذیری می‌گردد. اگر ترکیب گاز اسیدی، دانسیته نفت، دما، و فشار درون چاهی به‌گونه‌ای نباشد که شرایط امتزاج فراهم آید، بخشی از گاز اسیدی به خاطر حلالیت بالا جذب هیدروکربن مایع شده و منجر به افزایش حجم آن می‌گردد که این تورم در فشار اشباع میعانات گازی تا بالای ۲۷٪ حجم اولیه هیدروکربن نیز مشاهده شده است. با تورم نفت، اشباع نفت افزایش می‌یابد و اگر این افزایش باعث رسیدن اشباع نفت به بالاتر از اشباع بحرانی و متحرک شدن نفت نگردد، منجر به گرفتگی حفرات و کاهش تزریق‌پذیری می‌گردد (شکل ۳) [۸].

رسوب آسفالتین

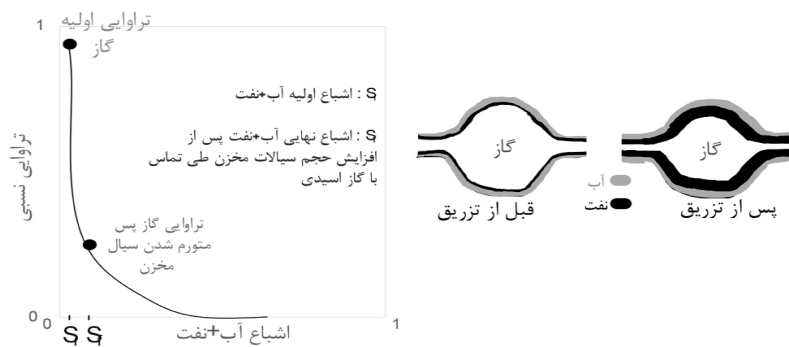
تماس نفت با گازهای دوآتمی مانند کربن دی اکسید و هیدروژن سولفید در بسیاری موارد منجر به جداسازی ذرات آسفالتین موجود در نفت می‌شود. رسوب این ذرات جدا شده باعث بسته شدن حفرات و کاهش تزریق‌پذیری در ناحیه اطراف چاه می‌گردد. لذا قبل از عملیات تزریق، لازم است آزمون‌های سازگاری نفت زنده مخزن با گاز اسیدی انجام شوند [۳۳ و ۱۱].

فازهای مایع و گاز حاصله سطح تماس مشخص دارند و در مخازن با تراوایی پایین به‌خاطر اثرات نامطلوب تراوایی نسبی باعث کاهش موقتی یا دائمی تزریق‌پذیری می‌گردند [۸].

جهت پیش‌بینی رفتار فازی گاز اسیدی نمی‌توان از معادلات حالت مرسوم از قبیل PR و SRK قبل از تنظیم پارامترهای این معادلات (به منظور انطباق پیش‌بینی‌ها بر نتایج آزمایشگاهی) استفاده کرد. تنها به کمک داده‌های آزمایشگاهی رفتار فازی و تنظیم کردن معادلات حالت با این سری داده‌ها می‌توان به پیش‌بینی درستی از رفتار فازی گاز اسیدی دست یافت [۲۵ و ۲۴، ۱۱]. خطای معادلات حالت قبل از تنظیم پارامترهای تعامل دوتایی^۱ برای پیش‌بینی نقطه حباب و شبنم می‌تواند تا چند هزار کیلوپاسکال باشد [۱۱]. با تنظیم معادلات PR و SRK برای مخلوط دوتایی کربن دی اکسید/هیدروژن سولفید، این معادلات تنها با دارا بودن پارامترهای دوتایی، قابلیت پیش‌بینی خوبی از مخلوط‌های سه تایی گاز اسیدی و هیدروکربن نیز دارند [۲۶ و ۲۲]. با ورود آب به مخلوط گاز اسیدی، استفاده از معادله حالت تغییر یافته (مانند PRSV [۲۷])، قوانین اختلاط جدید [۲۸]، و قانون هنری برای فاز آبی و معادلات حالت برای فاز غیرآبی [۲۳] پیشنهاد شده است. برای پیش‌بینی خواص فیزیکی گاز اسیدی نیز از روابط تجربی معمول نمی‌توان استفاده کرد [۱۱].

در تزریق غیرمستقیم طی تماس گاز اسیدی با آب در برج فشار بالا در سطح، آب ترش حاصل شده و به مخزن تزریق می‌گردد. حرکت آب ترش در مخزن تنها تا پایان تزریق ادامه دارد. این روش باعث نگره‌داشت بهتر گاز و کاهش حجم فوران احتمالی می‌گردد. به‌خاطر تزریق آب ترش با پمپ ضدخوردگی معمول، هزینه‌های فشرده‌سازی کاهش می‌یابد، اما میزان خوردگی و نتیجتاً هزینه تجهیزات سطحی و ادوات تزریق بالا خواهد بود. به‌خاطر احتمال تشکیل هیدرات، آزمایش‌های رفتار فازی آب ترش نیاز خواهد بود. باید مطمئن شد با بالا رفتن دمای آب در مخزن، گاز اسیدی از آب خارج نمی‌شود. آب تمایل بیشتری

1. Binary Interaction Parameter



شکل ۳ کاهش تراوایی به خاطر تورم (انبساط) نفت زیر اشباع کاهش نیافتنی حین عملیات تزریق گاز اسیدی [۸]

و دی‌آریل‌دی‌سولفید استفاده می‌شود. آزمون‌هایی قبل از تزریق در شرایط مختلف دما و فشار فشرده‌سازی گاز اسیدی انجام می‌شود تا از پایداری جریان گاز اسیدی، تک فاز ماندن و عدم رسوب گوگرد عنصری در شرایط محتمل پیش‌رو اطمینان حاصل شود [۱۳].

رسوبات معدنی

رسوب نمک (خشک شدن سازند)

به منظور کاهش ریسک، هزینه‌ها و آسیب‌های خوردگی، تزریق گاز اسیدی معمولاً در حالت فوق بحرانی و خشک (زیر اشباع از آب) به سازند دارای آب ذاتی یا آبدۀ انجام می‌شود (تزریق مستقیم). با حل شدن (تبخیر) آب سازند در سیال تزریقی عاری از آب، غلظت نمک در آب باقی‌مانده به طور مداوم افزایش می‌یابد تا جایی که منجر به ایجاد رسوب کلرور سدیم و گرفتگی حفرات و گلوگاه‌ها گردد. به این پدیده خشک‌شدن سازند گفته می‌شود [۳۶]. با پایین بودن تحرک آب سازند (مخازن هیدروکربنی تخلیه‌شده)، جبهه تبخیر آب با به‌جا گذاشتن اندک رسوب نمکی پیش می‌رود (مشکل حداقلی)، اما با تحرک بالای آب سازند (آبدۀ)، به‌خاطر تبخیر بیشتر آب در ناحیه اطراف چاه و گرادیان منفی اشباع آب، گرادیان فشار موئینه ایجاد شده و جریانی از شورآب به سمت چاه تزریقی برای جبران تبخیر آب به‌وجود خواهد آمد. این جریان مرتباً جبهه تبخیر را با شورآب تازه تغذیه کرده و با انتقال نمک‌های حل‌شده به نزدیک چاه منجر به خشک

1. Formation Dry Out

تشکیل هیدرات

هیدرات‌های گازی ترکیبات یخی کریستال مانند می‌باشند که بر اثر تماس گاز اسیدی با آب در دامنه دما و فشار مشخصی به وجود می‌آیند و می‌توانند باعث مسدود شدن تجهیزات سطحی و درون چاهی گردند. در دماهای تا 10°C برای کربن دی‌اکسید و تا 30°C برای هیدروژن سولفید، تشکیل هیدرات حتی در عدم حضور آب آزاد محتمل است [۱۲]. به دلیل بالا بودن دمای درون چاهی در اکثر موارد، تشکیل هیدرات بیشتر یک مشکل سطح الارضی است [۸]. راهکارهای متداول برای حل مشکل هیدرات عبارتند از آب‌زدایی از گاز اسیدی قبل از انتقال و قبل از تزریق (از بین بردن یا کاهش آب آزاد یا محلول در جریان گاز اسیدی)، کاهش فشار خطوط انتقال به کمتر از فشار تشکیل هیدرات، گرم کردن سیال انتقالی با حفظ موارد ایمنی و حفظ دمای خطوط انتقال به کمک عایق بندی و استفاده از گرم‌کن‌های بخار داغ یا برقی دور لوله؛ و استفاده از بازدارنده‌های شیمیایی (ترمودینامیکی، سینتیکی و ضد انعقاد) [۳۵ و ۳۴، ۲۳].

رسوب گوگرد عنصری

محلول‌های آبی حاوی هیدروژن سولفید پایدار نیستند و واکنش با اکسیژن جذب شده می‌تواند باعث رسوب گوگرد و بسته شدن حفرات در ناحیه تزریق و مشبک‌ها گردد [۸]. همچنین، رسوب گوگرد از برخی جریان‌های گاز اسیدی با تغییر دما و فشار گزارش شده است. برای رفع این رسوب و به‌خصوص گرفتگی مشبک‌ها از دی‌متیل‌دی‌سولفید

متخلخل موضوعی جذاب اما پرچالش در حیطه علوم زمین‌شناسی و مهندسی نفت است. هدف از طراحی آزمایش‌های سیلاب‌زنی مغزه درک جابه‌جایی، جریان و رفتار گاز اسیدی در محیط متخلخل به‌منظور حداکثر کردن بازیافت نفت، به دست آوردن تصویری از چگونگی پخش شدن و سرنوشت گاز اسیدی در مخزن، اطمینان از امنیت فرآیند ذخیره‌سازی، چگونگی و میزان کاهش تزریق‌پذیری حین تزریق گاز اسیدی، و مطالعه همزمان تعاملات شیمیایی/فیزیکی سنگ مخزن و سیالات واکنش‌گر به‌منظور پیش‌بینی اثرات بلندمدت تزریق گاز اسیدی است [۱۶ و ۹]. آبددهای عمیق و شور به‌خاطر وجود داشتن در اکثر مناطق زمین و داشتن بالاترین ظرفیت ذخیره [۴۰ و ۳۹] از اهمیت و جذابیت بالاتری جهت ذخیره‌سازی گاز اسیدی برخوردارند. از مهمترین زمینه‌های تحقیقاتی قابل پژوهش به‌کمک آزمایش‌های سیلاب‌زنی مغزه با گاز اسیدی می‌توان به موارد زیر اشاره کرد: ۱. مطالعه کاهش استحکام مکانیکی سنگ ناشی از واکنش گاز اسیدی با سنگ مخزن و مخاطرات آن، ۲. کمی‌سازی میزان بازیافت نفت در عملیات ازدیاد برداشت به‌کمک تزریق گاز اسیدی و ایجاد استراتژی‌های تولید [۹] ۳. بررسی مهاجرت چندفازی گاز اسیدی/شورآب در مقیاس مغزه طی فرآیندهای آشام و تخلیه به‌منظور پیش‌بینی اثرات بلندمدت ذخیره‌سازی، ۴. اطمینان از امنیت ذخیره‌سازی و ارزیابی بازدهی آن، ۵. آنالیز چگونگی پخش و شکل جبهه پیش‌رونده گاز اسیدی در مخزن، ۶. تخمین پارامترهای پتروفیزیکی و تغییر پروفایل آنها به‌خاطر تزریق گاز اسیدی، ۷. بررسی تاثیر حل شدن گاز اسیدی در سیال مخزن بر جابه‌جایی سیال در غلظت‌های مختلف گاز اسیدی [۴۱]، ۸. تعیین و شناسایی شرایط لازم تشکیل، نرخ رشد، الگوهای مختلف تشکیل و دانسیته کرم‌چاله‌های ایجادشده به‌خاطر تزریق گاز اسیدی، و بررسی چگونگی تأثیر الگوهای تشکیل و

شدن متمرکز سازند در ناحیه اطراف چاه می‌گردد [۳۷]. در دبی تزریق بحرانی، میزان آب جابه‌جا شده توسط نیروهای موئینه با میزان آب جابه‌جا شده به‌خاطر تزریق برابر می‌کند. در دبی تزریق کمتر از دبی بحرانی، مرتباً ناحیه اطراف چاه با آب شور برگشتی تغذیه شده و خشک شدن مشکل‌زا در این ناحیه اتفاق می‌افتد. راه معمول و پرهزینه برای مقابله با این آسیب، تزریق آب تازه است. در سازند کربناته دو نوع تخلخل میکرو و ماکرو وجود دارد. گاز اسیدی در حفرات ماکرو حرکت می‌کند و حفرات میکرو به علت فشار موئینه بالا به‌صورت یک مخزن آب شور عمل می‌کنند که مرتباً حفرات ماکرو حاوی گاز اسیدی را با آب شور تغذیه کرده و خشک شدن سازند در سنگ‌های کربناته در حفرات ماکرو عملاً شدیدتر از سازندهای ماسه‌سنگی اتفاق می‌افتد [۱۴].

رسوبات معدنی بر پایه آهن

وجود مقادیر قابل‌توجهی آهن در سیالات مخزن، وجود مواد معدنی حاوی آهن در سنگ مخزن و راه‌یافتن آهن ناشی از خوردگی تجهیزات به مخزن، از عوامل وجود آهن در مخزن می‌باشند. با حضور آهن، احتمال تشکیل سولفید آهن حاصل از واکنش هیدروژن سولفید با آهن وجود دارد که می‌تواند منجر به گرفتگی حفرات و کاهش تزریق‌پذیری گردد [۱۵]. انواع رایج‌تر رسوبات سولفیدی آهن، ترویلایت و پیرایت می‌باشند. اینکه با چه نوعی از سولفید آهن مواجه شویم بستگی به دمای مخزن و مدت زمان تشکیل رسوب دارد. در تجهیزات تزریق گاز اسیدی، جایی که غلظت اکسیژن از غلظت هیدروژن سولفید کمتر باشد، رسوب سولفید آهن در پی واکنش هیدروژن سولفید با رسوبات خوردگی تشکیل می‌شود [۳۸].

آزمایش‌های سیلاب‌زنی مغزه به منظور شبیه‌سازی و بررسی انتقال گاز اسیدی در سنگ مخزن
بررسی انتقال سیالات واکنش‌گر در محیط

گرفته شده با پرتو ایکس از زوایای مختلف است که به آن «مقطع‌نگاری رایانه‌ای با اشعه ایکس» یا به اصطلاح «سی‌تی‌اسکن» گفته می‌شود. این روش غیرمخرب بوده و سابقه کاربرد چندین دهه در صنعت نفت را دارد [۵۱]. تصویربرداری از نمونه حین انجام آزمایش به پژوهشگران امکان می‌دهد پروفایل اشباع سیالات درون مغزه را به‌منظور پیدا کردن درک درستی از جریان سیالات و ویژگی‌های آن در لحظات مختلف آزمایش پیش کنند [۵۲] و [۹]. و پروفایل تغییرات تخلخل و تغییرات دانسیته نمونه بر حسب مکان و زمان حین فرآیند تزریق را به‌دست آورند تا درک درستی از تغییرات ساختاری و تا حدی تغییرات ترکیبی ماتریس سنگ بر اثر تزریق سیالات واکنش‌گر داشته باشند [۹]. با به‌دست آوردن نقشه‌های اشباع داخل مغزه در جریان‌های کسری مختلف به‌کمک سی‌تی‌اسکن، می‌توان به درک درستی از ناهمگونی‌های موجود در سنگ مغزه رسید [۴۹] و مشکلات موجود در آزمایش‌های سیلاب‌زنی مغزه از جمله روراندگی ثقلی و اثرات انتهایی را شناسایی و برطرف نمود [۵۳].

با استفاده از سی‌تی‌اسکن پزشکی امکان تصویربرداری سریع از حجم بزرگتری از مغزه نسبت به دیگر روش‌های سی‌تی‌اسکن (سی‌تی‌اسکن‌های صنعتی و میکروسپی‌تی‌ها) فراهم است [۵۵ و ۵۴]. لذا، سی‌تی‌پزشکی برای تشخیص تغییرات در ساختار لایه‌ای سنگ و توصیف تغییرات گذرا در توده سنگ حین تزریق سیالات خورنده کاربرد دارد [۵۶]. در سی‌تی‌پزشکی منبع و شناساگر اشعه ایکس حول یک نمونه ثابت می‌چرخند و دقت مکانی پایین‌تر از میلیمتر دارند [۵۷]. در این روش به منظور افزایش تمایز جذب پرتو ایکس بین فاز آبی و گاز اسیدی، و آسان‌تر شدن محاسبات اشباع، معمولاً به فاز آبی یک عامل تمایز با عدد اتمی بالا مانند ید [۵۹ و ۵۸، ۵۶]، یا ترکیبات ید [۵۴ و ۵۲، ۴۲] اضافه می‌گردد.

واکنش‌های ژئوشیمیایی بر جریان چندفازی [۴۲] ۹. یافتن ارتباط بین تغییرات تخلخل و تغییرات تراوایی بر اثر تزریق گاز اسیدی، تأثیر بر ازدیاد برداشت و پیش‌بینی پتانسیل تزریق و ظرفیت ذخیره‌سازی مخزن در دراز مدت [۴۳]، ۱۰. به‌دست‌آوردن روابط توصیف‌کننده جریان در محیط متخلخل حین تزریق گاز اسیدی و پیش‌بینی سرنوشت سیالات تزریقی بر مبنای داده‌های آزمایشگاهی با دقت بالا جهت کالیبره کردن مدل [۴۴ و ۴۳، ۹]، ۱۱. شناسایی واکنش‌های محتمل سنگ و سیال مخزن با گاز اسیدی به‌همراه سازوکارهای مربوطه و پارامترهای اثرگذار، بررسی چگونگی تأثیر هر پارامتر از قبیل دما، فشار و شوری [۴۵]، ۱۲. تعیین شدت و نوع آسیب سازند بر اثر تزریق گاز اسیدی حین فرآیندهای مختلف تخلیه و آسام، ارزیابی احتمال تغییر تزریق‌پذیری در طول پروژه و کمی‌سازی فرآیندهای مختلف حین تزریق گاز اسیدی [۸]، ۱۳. پیش‌بینی رفتار فازی گاز اسیدی در شرایط مختلف [۱۱]، ۱۴. اندازه‌گیری تراوایی نسبی برای مخلوط‌های مختلف گاز اسیدی و افزایش مقیاس نتایج آزمایشگاهی به‌منظور ارزیابی مهاجرت این گازها در اعماق زمین توسط شبیه‌سازهای رایانه‌ای [۴۶ و ۴۷]، ۱۵. بررسی چگونگی تغییر ترشوندگی سنگ مخزن بر اثر تزریق گاز اسیدی [۴۸]، ۱۶. بررسی تأثیر قابل توجه ناهمگونی‌های سنگ مخزن بر موارد مختلف ذکر شده در بالا و کمی‌سازی این اثرات [۵۰ و ۴۹] و [۱۷]. مطالعات ترکیبی گاز/مایع (تزریق متناوب آب و گاز و تزریق آب کربناته). مهاجرت چندفازی گاز اسیدی/آب/نفت، کاهش تزریق‌پذیری و نحوه توزیع اشباع سیالات در محیط متخلخل حین تزریق گاز اسیدی از نظر زمانی و مکانی را می‌توان به کمک روش‌های مختلفی رصد و بررسی کرد. پرکاربردترین تکنیک جهت پایش سیستم داخلی مغزه، بازسازی مدل سه‌بعدی سنگ‌وسیال و تغییرات آن حین تزریق با رایانه به کمک مجموعه عکس‌های دوبعدی

آزمایشگاهی با سی تی پزشکی به دو صورت حلقه باز و حلقه بسته انجام شده‌اند (جدول ۱). در سیستم حلقه باز، سیالات خروجی از مغزه پس از جداسازی مورد آنالیز بیشتر قرار گرفته و دیگر به ابتدای مغزه بازگردانده نمی‌شوند، در حالی که در سیستم حلقه بسته این سیالات پس از جداسازی در یک جداکننده، به ابتدای مغزه بازگردانده می‌شوند.

اگر سیال آزمایش از تمایز جذب بالایی برخوردار باشد (مانند دی‌سولفیدکربن) دیگر نیازی به افزودن عامل تمایز وجود ندارد [۶۰]. از آنجا که طراحی سی تی پزشکی برای تصویربرداری از بدن انسان است، دقت زمانی این روش به کمتر از صد میلی‌ثانیه کاهش یافته اما دقت مکانی آن در حد چند صد میکرومتر باقی مانده است [۱۸]. مطالعات

جدول ۱ تجهیزات آزمایشگاهی شاخص جهت مطالعه فرآیندهای ازدیادبرداشت و ذخیره‌سازی گاز اسیدی به کمک سی تی پزشکی

مشخصات و بخش‌های مختلف تجهیز تجهیز شماره ۱ (سیستم حلقه باز) [۶۰، ۶۵، ۷۱]	نگهدارنده مغزه	بالادست و خوراک دهی	دو نوع آرایش گزارش شده است: ۱- ایجاد تعادل اولیه بین سیالات تزریقی به کمک راکتور همزن‌دار؛ وجود دو پمپ بعد از راکتور برای تزریق در شدت جریان ثابت، هر کدام مخصوص یک سیال (دی‌اکسیدکربن و آب) که در راکتور پس از برقراری تعادل به خاطر اختلاف دانسیته جدا شده‌اند. اگر نیاز به حداقل‌سازی برهم‌کنش‌های شیمیایی بین سیال تزریقی و سنگ باشد می‌توان در راکتور در مرحله متعادل‌سازی، خرده‌های سنگ نیز اضافه نمود. ۲- دو پمپ تزریق مختلف که به یک میکسر متصل‌اند و حاصل اختلاط توسط پمپ سوم به مغزه تزریق می‌شود.
		جنس غلاف مغزه	فلزی نازک از جنس هستلوی-سی با آستر تفلونی (جنس فلزی ولو نازک غلاف می‌تواند بر پایین آوردن کیفیت تصویر موثر باشد).
		شبیه‌سازی فشار مخزن	به کمک یک پمپ پیستونی دارای دو سیلندر، یا دو کنترل‌کننده فشار معکوس به صورت سری، حداکثر تا ۱۰ MPa
		شبیه‌سازی دمای مخزن	دمای آزمایش‌ها: ۴۵ تا ۵۰ °C؛ بالا بردن دمای سیال تزریقی در خطوط تزریق تا دمای مدنظر؛ گرم کردن و حفظ دما در سیال مورد استفاده برای تنظیم فشار همه‌جانبه
		شبیه‌سازی فشار همه‌جانبه	تنظیم فشار بین غلاف و دیواره نگهدارنده با پمپ در ۱۵ MPa (سیال نرمال دکان)
		جنس نگهدارنده	کامپوزیت کربن (الیاف کربن تقویت شده با اپوکسی)، شفاف در برابر پرتو ایکس
		پایین دست، جداسازی، نمونه‌گیری و آنالیز سیال	آنالیز ترکیب سیالات تولیدی و انجام موازنه جرم توسط چگالی‌سنج و یک طیف‌سنج مادون قرمز انتقالی ^۱ پس از آن
		روش پایش سیستم داخلی سنگ و سیال طی تزریق گاز اسیدی	سیستم حلقه باز و سی تی اسکن پزشکی؛ تنظیمات: ۱۲۰ kv، ۱۲۰ mA/s، نرم‌افزار ایمیج‌جی ^۲ جهت پردازش داده، تبدیل تجسم سه‌بعدی به تصویر با نرم‌افزار پاراوو
		جنس شیرها، خطوط انتقال سیال و پمپ‌ها	هستلوی سی (بخش‌های در تماس با سیال خورنده)
		توضیحات دیگر	قرارگیری مغزه به صورت افقی، جنس آب‌بندها از تفلون یا ویتون-آ به منظور جلوگیری از خراب شدن درزبندها با کاهش فشار در صورت تماس قبلی با دی‌اکسیدکربن، وجود انشعاب کنارگذر نگهدارنده مغزه به منظور اطمینان از پایداری شدت جریان پمپ‌ها قبل از شروع آزمایش
		کاربرد مطالعاتی	مطالعه جابه‌جایی سیالات واکنش‌دهنده، سیالات خورنده و سمی در حالت مایع، دی‌اکسیدکربن فوق بحرانی، پروژه‌های ازدیاد برداشت با سیالات خورنده، مطالعات ذخیره‌سازی گاز اسیدی

۱. به منظور آنالیز سیالات مایع تولیدی، به جای طیف سنج مادون قرمز انتقالی از طیف سنج جرمی پلاسمای جفت‌شده القایی نیز استفاده شده است [۵۶].

۲. نرم‌افزارهای دیگر برای بازسازی حجم سه‌بعدی مغزه و به دست آوردن نتایج کمی عبارتند از [18]: MAVI, Max VGStudio, Avizo, Fiji, +Morpho, Rock-3DMA, Pore3D, Blob3D

ادامه جدول ۱ تجهیز آزمایشگاهی شاخص جهت مطالعه فرآیندهای ازدیادبرداشت و ذخیره‌سازی گاز اسیدی به کمک

سی تی پزشکی

تجهیز شماره ۲ (سیستم حلقه بسته) [۴۹، ۵۰، ۵۶ و ۶۸]	مشخصات و بخش های مختلف تجهیز	تعداد مغزه	بالادست و خوراک دهی	- سیستم پمپ دوتایی جهت تزریق بی‌وقفه سیالات، دو پمپ برای کربن دی اکسید و دو پمپ برای شورآب، پمپ‌های کربن دی اکسید دارای پوشش خنک کننده توسط آب به‌منظور حفظ دمای پمپ در دمای آزمایش - اختلاط و تعادل سیالات تزریقی قبل از شروع آزمایش با چرخش در خطوط لوله به مدت ۷ ساعت الی دو روز
			جنس غلاف مغزه	فویل نازک نیکل روی غلاف تفلون، غلاف چندلایه ^۱ : تفلون/ فویل نیکل/ تفلون، لاستیک ویتون
			شبیه‌سازی فشار مخزن	با یک پمپ تنظیم کننده فشار بعد از جداکننده و قبل از سیستم پمپاژ شورآب در فشار ۹ تا ۱۲/۴ MPa
			شبیه‌سازی دمای مخزن	- گرم کردن آب درون نگهدارنده مغزه با دو گرم‌کن برقی روی دیواره بیرونی نگهدارنده - حمام آب (مبدل حرارتی) برای رساندن دمای سیالات ورودی به مغزه تا دمای موردنظر (دمای آزمایش از ۲۵ تا ۶۳ °C)
			شبیه‌سازی فشار همه‌جانبه	تزریق آب اطراف غلاف با یک پمپ جابه‌جایی/ سرنگی، با فشار ۱/۴ (غلاف تفلونی) تا ۳ MPa (غلاف چندلایه یا نیکل-تفلون) بالاتر از فشار حفرات
			جنس نگهدارنده	آلومینیوم ^۲ ، نحوه قرارگیری افقی
			پایین دست، جداسازی، نمونه گیری و آنالیز سیال	جداسازی سیالات پس از مغزه در یک جداکننده بر اساس گراویته در فشار بالا و دمای محیط، پس از جداکننده کربن دی اکسید به سیستم پمپاژ کربن دی اکسید و شورآب به سیستم پمپاژ شورآب فرستاده می‌شوند. پایش سطح سیالات در جداکننده به کمک سیگنال‌های صوتی.
			روش پایش سیستم داخلی سنگ و سیال طی تزریق گاز اسیدی	سیستم حلقه بسته ^۳ و سی تی اسکن پزشکی؛ مشخصات: ۱۲۰ کیلوولت، ۲۰۰ میلی آمپر، سایز واکسل: از ۵۰۰*۵۰۰*۱۰۰۰ الی ۲۰۶۲*۲۰۶۲*۲۵۰۰ یا ۲۵۰۰ میکرومتر (سایز اصلی واکسل دستگاه: ۱۸۷/۵*۱۸۷/۵*۱۰۰۰)
			جنس شیرها، خطوط انتقال سیال و پمپ‌ها	---
			توضیحات دیگر	دارای سیستم اکتساب داده برای ثبت دمای نگهدارنده مغزه، افت فشار مغزه، شدت جریان تزریق، فشار تزریق، و حجم تزریق هر پمپ.
کاربرد مطالعاتی	آزمایش‌های سیلابزنی دوفازی شورآب و کربن دی اکسید بحرانی، مطالعات ذخیره‌سازی کربن دی اکسید			

۱. ساختار چند لایه با هدف جلوگیری از نشت کربن دی اکسید (۱٪ تا ۲٪ در روز به‌خاطر نفوذ ملکولی در شرایط استاتیک در صورت استفاده از تنها تفلون) طراحی گردیده است.

۲. جهت کم کردن اثرات پدیده سخت شدن پرتو، بیرونی‌ترین لایه‌ها در واکسل‌های تصویر مغزه بریده شده و تنها با واکسل‌هایی کار می‌شود که نزدیک مرکز هستند.

۳. در یک طراحی مشابه، سیستمی برای آزمایش‌های حلقه بسته با سه فاز آب، نفت، و گاز گزارش شده است. در قسمت خوراک دهی از سه پمپ دوسیلندر، برای تأمین فشار معکوس از یک پمپ دو سیلندر تنظیم فشار، و از یک جداکننده سه فازی صوتی استفاده شده است. پمپ‌های تزریق از جداکننده تغذیه می‌شوند و پمپ فشار معکوس نیز جداکننده را تغذیه می‌کند. تثبیت فشار جداکننده توسط یک پمپ تنظیم فشار دو سیلندر با حجم بالا با مکانیسم تزریق یا دریافت سنگین‌ترین فاز به‌از جداکننده به‌منظور افزایش/ کاهش فشار صورت می‌گیرد. حفظ دمای بخش خوراک‌دهی، انباره‌ها و جداکننده توسط آون‌های همرفت مکانیکی، دیگر پمپ‌ها توسط نوار حرارتی، و نگهدارنده مغزه توسط نوار حرارتی در دو سر (آزمایش‌های ناپایدار) و فویل گرم‌کن نازک (آزمایش‌های پایدار) صورت می‌گیرد. جنس بخش‌های در تماس با گاز اسیدی از هستلوی و نگهدارنده مغزه از آلومینیوم می‌باشد. غلاف مغزه از جنس معمول اما دارای پوشش چندلایه متناوب از فویل آلومینیوم و نوار تفلون بوده است [۷۹ و ۱۷].

نمونه می‌چرخند [۶۲]. به لحاظ منبع پرتو ایکس، میکروسی‌تی‌ها با منبع سینکروتون و همچنین، لوله پرتو ایکس ساخته شده‌اند. شدت تابشی به مراتب بالاتر، و نتیجتاً وضوح مکانی و نسبت سیگنال به نویز بهتر، یا زمان کاهش یافته اندازه‌گیری از ویژگی‌های منبع سینکروتون هستند [۱۸]. در جدول ۲ تجهیز آزمایشگاهی شاخص با تکنیک میکروسی‌تی آورده شده است.

برای داشتن درک درستی از ساختار حفرات ماسه‌سنگ‌ها، معمولاً به دقت ده میکرومتر و کمتر نیاز است [۶۳]. میکروسی‌تی در سنگ‌های مخزنی با تراوایی بالا دقت تصویر خوبی ارائه می‌دهد، در حالی که در برخی سنگ‌های کربناته و مخازن غیرمتعارف فضاهای خالی با اندازه‌های کمتر از یک میکرون وجود دارند که معمولاً با میکروسی‌تی قابل دیدن نمی‌باشند [۵۳]. در این موارد می‌توان از نانوسی‌تی استفاده نمود که وضوح تصویر بالاتر و نتیجتاً تصویر دقیق‌تری از حفرات و نحوه اتصال آنها به همدیگر در ازای هزینه محاسباتی بالاتر و کوچک شدن حجم مورد بررسی ارائه می‌دهد [۶۴]. روش "باریکه یونی متمرکز/میکروسکوپ الکترونی روبشی" جهت تصویربرداری سه‌بعدی با دقت نانومتری از نمونه سنگ‌هایی با ضخامت در حد چند میکرومتر وجود دارد که علی‌رغم تخریب نمونه، دارای دقتی بهتر از ده نانومتر جهت توصیف سه‌بعدی دقیق از تخلخل میکرو و کوچکترین حفرات در کربناته‌ها می‌باشد. به خاطر کوچک بودن حجم بررسی در این روش، انتخاب محل مناسب جهت نمونه‌برداری بسیار حیاتی است [۵۳]. به علت نبود پروتکل‌های پذیرفته شده برای سی‌تی‌اسکن اشیای غیرجاندار به دلیل گستردگی در اندازه، شکل و ترکیب آنها [۱۸]، وحدت رویه‌ای در زمینه انتخاب و لناژ تیوب، نحوه فیلتر کردن پرتو و مقدار کلی اشعه ایکس تولید شده در آزمایش‌های صورت گرفته به کمک سی‌تی‌اسکن [۶۶ و ۶۵، ۵۹، ۵۸، ۵۶] وجود ندارد.

جهت ایجاد امکان آنالیز سیالات تولیدی، در مطالعات گاز اسیدی از جداکننده‌ها به جای پمپ فشار ثابت استفاده می‌شود. در کلیه تجهیزات مطالعاتی گاز اسیدی، اندازه‌گیری اختلاف فشار دو سر مغزه توسط سنسور فشار با هدف به دست آوردن تراوایی، تراوایی نسبی و فشار موئینه به عنوان تابعی از اشباع، مکان و زمان صورت می‌گیرد. از آنجا که ضریب جذب فوتوالکتریک مواد متناسب با عدد اتمی به توان چهار افزایش می‌یابد [۶۱]، مواد به کاررفته جهت ساخت نگهدارنده مغزه باید سبک و همچنین، مقاوم در برابر فشار و دمای مورد نیاز باشند. مواد سنگین تر نه تنها پرتوها را تضعیف می‌کنند بلکه به خاطر پدیده سخت شدن پرتو (جذب فوتون‌ها با انرژی کمتر حین عبور از نگهدارنده)، وضوح قابل دستیابی در سی‌تی‌اسکن را نیز پایین آورده و منجر به ایجاد درست‌نمایی در تصویربرداری می‌شوند [۹]. تصحیحات نرم‌افزاری برای این پدیده پیشنهاد شده، اما زمانی که جنس نمونه متشکل از چندین ماده باشد این تصحیحات نتایج خوبی به دست نمی‌دهند [۱۸]. اولویت در اجتناب از روبروشدن با این پدیده با انتخاب درست جنس نگهدارنده است. محاسبه خواص مؤثر سنگ، تجسم توزیع سیالات در حفرات، و آگاهی از نحوه تغییر ساختار حفرات در طول آزمایش نیازمند وضوح مکانی بالاتر از سی‌تی پزشکی یا صنعتی است [۶۲ و ۵۵]. از میکروسی‌تی جهت تصویربرداری سه‌بعدی با کیفیت بالا در مقیاس میکرون از ماتریس سنگ و توزیع سیالات درون آن استفاده می‌شود. در میکروسی‌تی معمولاً منبع و شناساگر اشعه ایکس ثابت‌اند و نمونه می‌چرخد. علت این چرخش رسیدن به پایداری مکانیکی بالاتر است که در تصویربرداری با وضوح بالا مورد نیاز است [۱۸]. به ازای بالا رفتن دقت مکانی تصویر، حجم نمونه‌ای که می‌توان مورد بررسی قرار داد [۵۱] و دقت زمانی تصویربرداری [۹] کاهش می‌یابند. در طراحی میکروسی‌تی با دهانه چرخنده، نمونه ثابت است و منبع و شناساگر حول

جدول ۲ تجهیز آزمایشگاهی شاخص جهت مطالعه فرآیندهای ازدیادبرداشت و ذخیره سازی گاز اسیدی به کمک میکروسی تی [۹ و ۸۰]

<p>دو بخش خوراک دهی، یکی برای تزریق مایعات و دیگری تزریق سیالات فوق بحرانی با امکان اتصال به همدیگر به منظور طراحی سناریوی تزریق همزمان گاز و مایع و چرخش سیالات داخل مغزه به منظور شبیه سازی حالت اولیه تعادل در مخزن یا تعادل بین سیالات چندگانه تزریقی</p> <p>هر قسمت خوراک دهی دارای دو پمپ تک ضربه، پمپها دارای پوشش آب، امکان تزریق همزمان چند سیال و ایجاد تعادل سریع با تعبیه یک همزن استاتیک قبل از نگهدارنده مغزه</p>	<p>بالادست و خوراک دهی</p>	
<p>فلزی نازک با آستر تفلونی</p>	<p>جنس غلاف مغزه</p>	<p>نگهدارنده مغزه</p> <p>مشخصات و بخش های مختلف تجهیز</p>
<p>ایجاد فشار ثابت در جداکننده به کمک شیر کنترل فشار اتوماتیک و تامین فشار معکوس مغزه از همین طریق تا حداکثر ۱۵ Mpa</p>	<p>شبیه سازی فشار مخزن</p>	
<p>روغن چرخان بین غلاف و پوشش بیرونی نگهدارنده که در یک حلقه حرارتی گرم می شود.</p>	<p>شبیه سازی دمای مخزن</p>	
<p>هیدرولیکی با روغن چرخان بین غلاف و پوشش بیرونی نگهدارنده</p>	<p>شبیه سازی فشار همه جانبه</p>	
<p>سه لایه فلزی- کامپوزیتی (آلومینیوم-سیانیت استر تقویت شده با الیاف شیشه-سیانیت استر تقویت شده با الیاف کربن)</p>	<p>جنس نگهدارنده</p>	
<p>دو جداکننده، اولی جهت جداسازی سیالات تولیدی از مغزه در دما و فشار آزمایش و دومی جهت عاری نمودن مایع جدا شده در جداکننده اول از گاز در دما و فشار محیط؛</p> <p>-آنالیز و پایش آنالیز غلظت سولفید هیدروژن در جریان های پاک سازی، پایش ترکیب شیمیایی گاز حین فرآیند تزریق، شناسایی و تعیین سرعت واکنش ها، و موازنه جرم به کمک آنالیز آنالیز گاز توسط دستگاه کروماتوگراف گازی و اسپکترومتر جرمی؛</p> <p>-نمونه گیری به کمک کیسه گاز از دی اکسید کربن و ظرف ته نشینی از سولفید هیدروژن با هدف تعیین ترکیب ایزوتوپیک گاز؛</p> <p>-نمونه گیری از مایع خروجی جداکننده دوم به منظور آنالیز ترکیبی، شناسایی و تعیین واکنش ها، سرعت واکنش ها و موازنه جرم؛</p> <p>-اندازه گیری دانسیته سیال به کمک کوریولیس جهت تعیین حالت سیال و موازنه جرم؛</p> <p>-اندازه گیری دما و فشار به کمک نشان گرهای دما و فشار با هدف تعیین شرایط ترمودینامیکی.</p>	<p>پایین دست، جداسازی، نمونه گیری و آنالیز سیال</p>	
<p>سیستم حلقه بسته و سی تی اسکن پزشکی؛</p> <p>مشخصات: ۱۲۰ kW، ۲۰۰ mA، سایز واکسل: از ۵۰۰*۵۰۰*۱۰۰۰ الی ۲۰۶۲*۲۰۶۲*۲۰۰ الی ۲۵۰۰ μm (سایز اصلی واکسل دستگاه: ۱۸۷/۵*۱۸۷/۵ μm (۱۰۰۰)</p>	<p>روش پایش سیستم داخلی سنگ و سیال طی تزریق گاز اسیدی</p>	
<p>هستلوی C276 (آلیاژ ضد خوردگی از کروم، مولیبدن و نیکل)</p>	<p>جنس شیرها، خطوط انتقال سیال و پمپها</p>	
<p>- قرارگیری مغزه به صورت عمودی و نگهدارنده مغزه به صورت چرخان - سوار شدن کل دستگاه سی تی روی پایه گرانیته</p>	<p>توضیحات دیگر</p>	
<p>- کار با سیالات خورنده و واکنش دهنده از قبیل دی اکسید کربن فوق بحرانی، سولفید هیدروژن فوق بحرانی، و آب کربناته</p> <p>- ارزیابی ریسک عملیات ذخیره سازی گاز اسیدی و ازدیاد برداشت به کمک گاز اسیدی</p>	<p>کاربرد مطالعاتی</p>	

نقشه اشباع سیالات و رفتار جبهه پیش‌رونده سیال تزریقی [۷۸-۷۲] در مقیاس کمتر از یک میلی‌متر [۷۸ و ۶۹] استفاده گردیده است. استفاده از این روش در مغزه‌های واقعی به‌خصوص از نوع ماسه‌سنگی با محدودیت‌هایی عمدتاً از نوع ایجاد گرادیان‌های میدان مغناطیسی داخلی به‌خاطر مغناطیس‌پذیری سیال داخل حفرات و دانه‌های سنگ و وجود ناخالصی‌های فرومغناطیس و پارامغناطیس مواجهه است [۷۷]. جهت مطالعه ناحیه اختلاط کربن دی‌اکسید و نفت، استفاده از محیط متخلخل شیشه‌ای به علت ضعف تشخیصی پرتوگیری ایکس صرفاً در این ناحیه، اولویت دارد [۷۳]. نکته مهم در طراحی تجهیزات، جنس نگهدارنده و سیال به‌کاررفته جهت تأمین فشار همه جانبه و حفظ دمای مغزه است که باید با میدان مغناطیسی قوی سازگار بوده [۶۹] و با موج مغناطیسی تجهیز حین آزمایش تداخل ایجاد نکند [۷۵]. تعیین پروفایل اشباع و جبهه سیال به‌کمک آنالیز تصاویر حاصل از پروفایل شدت سیگنال رزونانس مغناطیسی انجام می‌شود [۷۳]. جهت تأمین فشار داخل نگهدارنده معمولاً از سیالی بر پایه فلئوروکربن استفاده می‌شود که به‌خاطر نداشتن اتم هیدروژن خللی در تصویربرداری ایجاد نمی‌کند و به‌خاطر خواص دی‌الکتریک پایین، کاهش فرکانس رادیویی حداقل می‌گردد [۶۹]. استفاده از سیال تأمین‌کننده فشار جهت تأمین و حفظ دمای مغزه، راه حل متداول در تجهیزاتی است که از جنس پلیمری نگهدارنده استفاده می‌کنند [۷۸ و ۶۹، ۱۹].

در صورت فلزی بودن جنس نگهدارنده، به‌خاطر هدایت گرمایی بالای فلزات و عمل کردن لایه بیرونی نگهدارنده به‌عنوان سپر فرکانس رادیویی، راه حلی اقتصادی می‌تواند استفاده از گاز نیتروژن جهت تأمین فشار همه جانبه و چرخش لوله‌های آب حول لایه بیرونی نگهدارنده برای تنظیم دمای سیال داخل آن باشد. فلزات و آلیاژی‌هایی مانند آلومینیوم، تیتانیوم، مس و برنج به‌لحاظ خواص

لذا کلیه کارهای تحقیقاتی با یک تجهیز خاص در تنظیمات ثابت صورت می‌گیرد تا نتایج قابل مقایسه باشند (سری مقالات [۷۰-۶۶] یا سری مقالات [۷۱ و ۶۵، ۶۰]).

به همراه سی‌تی‌اسکن از روش‌های دیگری نیز به‌صورت مکمل استفاده شده که عبارتند از: جمع‌بندی نتایج آزمایش با گرفتن تصاویر "میکروسکوپ الکترونی روبشی" از ورودی و خروجی مغزه قبل و بعد از آزمایش [۶۷ و ۵۸، ۵۶]، بررسی تغییر در کانی‌شناسی یا بلورینگی قبل و بعد از آزمایش به کمک "پراش پرتو ایکس" [۵۹ و ۵۸، ۵۶]، آنالیز مقاطع نازک مغزه قبل از انجام آزمایش با هدف ریخت‌شناسی و به‌دست‌آوردن توزیع اولیه کانی‌ها در سنگ با تکنیک‌های سنگ‌نگاری به‌کمک "میکروسکوپ پلاریزان" [۶۷ و ۵۶]، و مطالعه ساختار کلی و به‌دست‌آوردن توزیع اندازه حفرات با "نگار رزونانس مغناطیسی هسته‌ای" [۵۹ و ۵۸].

تکنیک‌های تصویربرداری با پرتو ایکس پرکاربردترین روش‌ها برای مطالعه جریان چندفازی پایدار و ناپایدار هنگام آزمایش‌های سیلاب‌زنی مغزه با گاز اسیدی در شرایط مخزن می‌باشند. در ماسه‌سنگ‌ها با استفاده از میکروسی‌تی می‌توان به دید درستی از پدیده‌ها در مقیاس حفرات رسید، اما در سنگ‌های کربناته از آنجا که دارای ساختاری بسیار پیچیده با ناهمگونی‌هایی در مقیاس‌های طولی مختلف می‌باشند، می‌توان گفت به‌دست‌آوردن دیدی یکپارچه مستلزم استفاده از کلیه روش‌های تصویربرداری با پرتو ایکس شامل سی‌تی پزشکی، میکروسی‌تی و نانوسی‌تی (یا باریکه یونی متمرکز/ میکروسکوپ الکترونی روبشی) جهت آنالیز کمی سنگ‌های کربناته است.

روش دیگر جهت پایش دینامیک و پیوسته سیلاب‌زنی، نگار رزونانس مغناطیسی هسته‌ای است که از آن برای رصد جریان چندفازی، بررسی سازوکارهای بازیافت نفت و ذخیره‌سازی کربن دی‌اکسید، به‌دست‌آوردن نقشه جابه‌جایی سیال،

بر "نقشه برداری بررسی لزره‌های با گذشت زمان" و "ارزیابی مقاومت الکتریکی" بوده و علاوه بر مقیاس آزمایشگاهی در مقیاس میدانی نیز جهت پایش مهاجرت کربن دی اکسید کاربرد دارند. در بررسی لزره‌های با هدف پایش حرکت، حجم و محل تجمع گاز اسیدی، توزیع فضایی سرعت صوت در مغزه با توجه به تغییر غلظت گاز اسیدی در نقاط مختلف اندازه‌گیری و رصد می‌شود [۲۰]. حضور گاز اسیدی در سنگ باعث تأثیراتی بر سرعت موج "و موج" می‌گردد. تغییرات سرعت موج اولتراسونیک به خاطر تغییر در اشباع گاز اسیدی اندازه‌گیری شده و پروفایل اشباع و مهاجرت کربن دی اکسید با مکان و زمان در آزمایشگاه و میدان تخمین زده می‌شود. به عبارت ساده، این مطالعات به دنبال روشن کردن پاسخ صوتی سنگ به تزریق گاز اسیدی در شرایط مخزن می‌باشند [۸۱]. جدول ۳ تجهیز آزمایشگاهی شاخص با این تکنیک را نشان می‌دهد. پاسخ صوتی سنگ حاوی سیال، تابعی از الاستیسیته توده سنگ، تخلخل، و مدول حجمی سیالات داخل حفرات است که این پارامترها خود تابع دما، تنش‌های مؤثر بر توده سنگ، فشار سیالات و توزیع اشباع سیالات داخل حفرات می‌باشند. در واقع تغییر در اشباع سیالات باعث تغییر در مدول حجمی سیالات و نتیجتاً تغییر در سرعت صوت می‌گردد [۲۰]. طبق مطالعات صورت گرفته بیشترین اثر تغییر اشباع سیالات بر سرعت موج "بوده است [۸۲ و ۸۱، ۲۰]، البته اندازه‌گیری سرعت موج " نیز جهت محاسبه مدول حجمی و مدول برشی ضروری است [۸۲]. نحوه توزیع سیالات در حفرات بر روابط به دست آمده برای اشباع کربن دی اکسید-سرعت صوت مؤثر بوده و باعث به وجود آمدن عدم قطعیت در این روابط می‌گردد [۸۳]. از این رو مطالعاتی به منظور بررسی اثرات توزیع اشباع سیالات (رصد شده توسط سی تی اسکن) بر سرعت امواج الاستیک در فرکانس‌های اولتراسونیک تا لزره‌های در محیط متخلخل تحت تزریق کربن دی اکسید انجام شده‌اند.

مغناطیسی مناسب در ساخت تجهیزات رزونانس مغناطیسی هسته‌ای قابلیت کاربرد دارند. تیتانیوم و فولاد ضدزنگ نیترونیک ۶۰ با دارا بودن ۴۰۰ MPa تاب ارتجاعی، دو برابر آلومینیوم، چهار برابر برنج و کمتر از هفت برابر مس مقاومت تسلیم دارند [۷۶]. در همه موارد از کاوشگر فرکانس رادیویی، داخل محفظه پرفشار (نگهدارنده فلزی) یا خارج از محفظه پرفشار (نگهدارنده پلیمری) جهت برانگیختن و آشکارسازی سیگنال استفاده می‌شود. بسته به ضرورت آزمایش با افزایش غلظت یون‌های پارامغناطیس مانند منگنز در آب، سیگنال فاز آبی را می‌توان تضعیف کرد تا حدی که در غلظت‌های بالا تنها سیگنال فاز نفتی توسط تجهیز شناسایی گردد [۶۹].

بیشترین کاربرد نگار رزونانس مغناطیس هسته‌ای در پژوهش‌های گاز اسیدی به دست آوردن نقشه اشباع و جابه‌جایی سیال و رفتار جبهه پیش‌رونده سیال تزریقی بوده است. این روش به لحاظ دقت مکانی با سی تی پزشکی قابل مقایسه است و در مطالعاتی که صرفاً با دقت میکروسی تی قابلیت انجام دارند کارایی ندارد. جهت کاهش خطا و عدم قطعیت به خاطر گرادیان‌های مغناطیسی داخلی در صورت استفاده از مغزه‌های واقعی، در اکثر مطالعات از محیط‌های متخلخل شیشه‌ای یا مغزه‌های رخنمون نسبتاً عاری از ناخالصی استفاده شده که معرف سنگ مخزن نبوده و تنها با آن مشابهت دارد. استفاده از میدان مغناطیسی غیرقوی جهت انجام آزمایش‌ها نیز تلاشی برای کاهش اثرات گرادیان‌های مغناطیسی داخلی بوده است. با توجه به محدودیت‌ها و دقت کمتر نگار رزونانس مغناطیسی هسته‌ای نسبت به تکنیک سی تی اسکن، این روش از محبوبیت و دامنه کاربرد کمتری در پژوهش‌های آزمایشگاهی گاز اسیدی برخوردار است. دسته دیگر روش‌های پایش سیستم داخلی سنگ و سیال حین تزریق گاز اسیدی روش‌های ژئوفیزیکی می‌باشند. این روش‌ها مشتمل

جدول ۳ تجهیز آزمایشگاهی شاخص جهت مطالعه فرآیندهای ازدیادبرداشت و ذخیره‌سازی گاز اسیدی به کمک نقشه‌برداری بررسی لرزه‌ای با گذشت زمان [۸۷ و ۲۰].

تزریق سیالات به کمک دو پمپ سرنگی یکی برای تزریق شورآب و یکی برای تزریق کربن دی‌اکسید	بالادست و خوراک دهی	مشخصات و بخش‌های مختلف تجهیز
ویتون	جنس غلاف مغزه	
کنترل فشار معکوس مغزه توسط یک پمپ سرنگی فشار ثابت در ۱۰ MPa (امکان تنظیم تا حداکثر ۶۰ MPa)	شبیه‌سازی فشار مخزن	
تامین و حفظ دمای سیال با استفاده از گرم‌کن پوشش لاستیکی-سیلیکونی ^۱ حول پمپ‌ها و تامین دمای کل سیستم سیلابزنی با گرم‌کن فرورسرخ و فن‌های چرخش هوا در یک حمام دما ثابت، دمای آزمایش‌ها: ۴۰ °C (امکان کار تا ۱۸۰ °C)	شبیه‌سازی دمای مخزن	
به کمک پمپ هیدرولیکی تا حداکثر ۷۰ MPa (مقدار در آزمایش‌ها: ۱۲ MPa)، امکان شبیه‌سازی تنش محوری توسط دو پیستون متحرک کنترل شونده با فشار هیدرولیکی	شبیه‌سازی فشار همه‌جانبه	
دو سر انتهایی از تیتانیوم	جنس نگهدارنده	
شورآب تولیدی از مغزه درون یک ظرف جداکننده بخار-مایع جمع‌آوری و توزین می‌گردد.	پایین دست، جداسازی، نمونه‌گیری و آنالیز سیال	
نقشه‌برداری بررسی لرزه‌ای با گذشت زمان ^{۲،۳} ، تجهیز دو سر تیتانیومی نگهدارنده مغزه به سنسورهای پیزوالکتریک ^۴ جهت دریافت پاسخ سرعت موج‌های اولتراسونیک نمونه سنگ حین آزمایش: فرکانس طبیعی بین ۰/۲۵ تا ۱ MHz، شناسایی امواج SH و SV.	روش پایش سیستم داخلی سنگ و سیال طی تزریق گاز اسیدی	
مشخصات ارتعاش‌دهنده/ارتعاش‌گیرنده: پالس‌های مربعی ۱۰۰ تا ۴۰۰ ولت، زمان صعود پالس کمتر از ۱۰ ^{-۸} ، حداکثر پهنای باند: ۳۵ KHz		
مشخصات اسیلوسکوپ: پهنای باند: ۱۰۰ MHz، وضوح عمودی: ۸ بیت، سرعت نمونه‌گیری بلادرنگ: ۱۰ ^۹ بر ثانیه.		
مجهز به سیستم ثبت اتوماتیک داده‌ها به کمک رایانه	توضیحات دیگر	
مطالعات ذخیره‌سازی کربن دی‌اکسید در آبد	کاربرد مطالعاتی	

1. Silicon rubber blanket heater

2. Time-lapsed seismic survey mapping

۳. استفاده از دو تکنیک ژئوفیزیکی "نقشه‌برداری بررسی لرزه‌ای با گذشت زمان" و "ارزیابی مقاومت الکتریکی" به‌همراه مقطع نگاری پرتو ایکس با میکروسی تی نیز گزارش شده است. جنس نگهدارنده از پلی‌اتراترکتون به‌منظور جلوگیری از نشست جریان الکتریکی حین اندازه‌گیری‌ها بوده و از سیگنال الکتریکی ۱۰ V در فرکانس یک کیلوهرتز استفاده شده است. سنسورهای موج پی و سنسورهای مقاومت الکتریکی در سه ردیف در امتداد ارتفاع مغزه و در آرایش شعاعی روی غلاف از جنس نیتریل جاگذاری شده‌اند. دو سنسور پیزوالکتریک نیز در دو سر نگهدارنده جهت اندازه‌گیری مقاومت محوری و سرعت محوری موج P و S قرار گرفته‌اند [۸۱].

۴. سنسورهای پیزوالکتریک توسط ارتعاش‌دهنده/ارتعاش‌گیرنده برانگیخته می‌شوند و موج‌گونه‌های لرزه‌ای توسط اسیلوسکوپ به سیگنال‌های دیجیتالی تبدیل می‌شوند. آرایش دیگر این سنسورها می‌تواند قرارگیری پیرامون مغزه باشد [۸۲]. به‌طور کلی دو نوع آرایش محوری و شعاعی برای سنسورها متصور است که بسته به نوع آرایش میزان تغییرات متفاوتی در سرعت صوت ثبت می‌گردد. در برخی مطالعات نیز از هر دو آرایش استفاده شده است [۸۱].

بررسی میدانی انتخاب شوند بستگی به میزان تغییر در سرعت صوت و مقاومت الکتریکی دارد. در مطالعه‌ای که روی مخازن شکافدار متراکم ماسه‌سنگی صورت گرفته است، از آنجا که به‌خاطر تغییر در اشباع سیالات، میزان تغییر در مقاومت الکتریکی بیش از شش برابر تغییر در سرعت امواج صوتی بوده، پیشنهاد شده در خصوص این‌گونه مخازن از روش ارزیابی مقاومت الکتریکی در بررسی میدانی استفاده شود [۸۱]. از آنجا که روش‌های تصویربرداری تنها در مقیاس آزمایشگاهی کاربرد دارند و روش‌های ژئوفیزیکی علی‌رغم قابلیت کاربرد در مقیاس میدانی با عدم قطعیت‌های زیادی همراهند، می‌توان با بررسی اثرات توزیع اشباع سیالات (رصد شده توسط سی‌تی‌اسکن) بر پاسخ صوتی و الکتریکی محیط متخلخل تحت تزریق کربن دی‌اکسید، مدلی قابل اطمینان جهت به‌دست آوردن نقشه اشباع کربن دی‌اکسید در میدان تزریقی با توجه به اندازه‌گیری‌های میدانی روش‌های ژئوفیزیکی ایجاد و کالیبره نمود.

نظر به کثرت مقالات منتشره با هر تجهیز، در جداول ۱ تا ۳ و در متن صرفاً به مطالعه‌ای استناد گردید که جزئیات کامل هر تجهیز آزمایشگاهی را بیان کرده باشد، مگر آنکه جزئیات ارائه شده با تجمیع اطلاعات چندین منبع به‌دست آمده باشند. در بررسی‌های به‌عمل آمده، تجهیزات آزمایشگاهی گوناگونی در مراکز تحقیقاتی مختلف وجود داشتند که از یک تکنیک مشترک برای انجام مطالعات گاز اسیدی استفاده می‌کردند. جهت جلوگیری از طولانی شدن جداول ۱ تا ۳، در هر جدول که معرف یکی از تکنیک‌های مطالعه پدیده‌های مختلف حین تزریق گاز اسیدی بودند، تجهیز با بیشترین اطلاعات منتشره و امکانات پژوهشی بعضاً بالاتر ارائه گردید و اختلافات عمدتاً جزئی دیگر تجهیزات با این تجهیز خاص در متن یا پانویس جداول مورد اشاره قرار گرفتند. دیگر روش‌ها با دامنه کاربرد کمتر در متن مورد اشاره قرار گرفته‌اند. جدول ۴ به‌طور خاص به جنس مواد به‌کاررفته در تجهیزات آزمایشگاهی گاز اسیدی در مطالعات مختلف می‌پردازد.

هدف از این بررسی‌ها ساخت مدل قابل اطمینان جهت به‌دست آوردن نقشه اشباع کربن دی‌اکسید در میدان تزریقی با توجه به اندازه‌گیری‌های میدانی روش بررسی لزه‌ای بوده است [۸۲ و ۸۱]. روش دیگر ژئوفیزیکی جهت رصد توزیع سیالات درون مغزه حین آزمایش‌های سیلاب زنی کربن دی‌اکسید، "ارزیابی مقاومت الکتریکی" با توجه به اختلاف بسیار زیاد هدایت الکتریکی کربن دی‌اکسید و شورآب است [۸۴]. از معادله آرچی برای ربط دادن اشباع آب در یک ناحیه به مقاومت الکتریکی اندازه‌گیری شده استفاده می‌گردد. دقت این روش بستگی زیادی به درستی پارامترهای دیگر معادله آرچی دارد که به‌صورت تجربی برای هر نمونه سنگ تنظیم می‌شوند یا از مفروضات قبلی استفاده می‌شود [۸۵]. البته همه داده‌های مقاومت الکتریکی نیز با این معادله ساده توجیه نمی‌شوند که به آن رفتار غیرآرچی گفته می‌شود [۸۶]. برای اندازه‌گیری مقاومت الکتریکی، غلاف لاستیکی مغزه با تعدادی الکتروود تزریق جریان و اندازه‌گیری مقاومت الکتریکی پیرامون مغزه و در چند حلقه تجهیز می‌گردد. به‌کمک این الکتروودها می‌توان ناهمگونی‌های موجود در مغزه را تشخیص داد [۸۵ و ۸۳، ۸۱]. این روش با عدم قطعیت‌های زیادی در تفسیر نتایج مواجه است، لذا مطالعاتی جهت یافتن ارتباط بین الگوهای اشباع سیالات -به‌دست‌آمده توسط سی‌تی‌اسکن- و پاسخ‌های دریافت شده از اندازه‌گیری مقاومت الکتریکی و امپدانس انجام شده‌اند. هدف از این مطالعات در برخی موارد یافتن نقش ضریب شکلی سیال بر رفتار غیرآرچی [۸۶] و در نهایت استفاده از روابط به‌دست آمده جهت ارزیابی اطمینان بخش اشباع کربن دی‌اکسید در مناطق مختلف میدان تزریقی بوده است [۸۶ و ۸۱، ۲۱]. این روش به‌خاطر تفاوت اندک مقاومت الکتریکی در سنگ اشباع با نفت و اشباع با کربن دی‌اکسید، در مطالعات ازدیاد برداشت کربن دی‌اکسید کارآیی ندارد [۲۱].

اینکه کدام یک از روش‌های ژئوفیزیکی ذکر شده جهت

جدول ۴ مواد به کاررفته در ساخت تجهیزات آزمایشگاهی به تفکیک روش‌های پایش سیستم سنگ و سیال حین تزریق گاز اسیدی

روش‌های ژئوفیزیکی		روش‌های تصویربرداری		
ارزیابی مقاومت الکتریکی	نقشه برداری بررسی لرزه‌ای	نگار رزونانس مغناطیسی هسته‌ای	مقطع نگاری پرتو ایکس	
پلی‌اتراکرتون [۸۱]	پلی‌اتراکرتون [۸۱]	پلیمری (مانند پلی‌ایمید [۶۹] و پلی‌آمیدایمید [۷۸]) یا از جنس فلزی غیر مغناطیسی (مانند هستلوی C۲۷۶ [۷۷] و فولاد ضد زنگ نیترونیک ۶۰ [۷۶])	سه لایه آلومینیوم-کامپوزیت- کامپوزیت [۹]، آلیاژهای آلومینیوم [۸۸]، پلیمرها شامل پلی‌اتراکرتون [۸۸ و ۸۹] و پلی‌آمیدایمید [۵۴] و [۵۲]، دولایه آلومینیوم-الیاف کربن [۵۸]، کامپوزیت کربن [۷۱ و ۶۵]، ۶۰، و آلومینیوم [۹۱ و ۹۰، ۸۸، ۵۹، ۵۶، ۱۷]	جنس نگهدارنده
لاستیک نیتریل [۸۱]	ویتون [۲۰]، لاستیک نیتریل [۸۱]	جمع شونده با حرارت [۶۹، ۷۰ و ۷۸-۷۲]	فلزی نازک از جنس هستلوی-سی با آستر تفلونی [۷۱ و ۶۵، ۶۰]، [۹]، چندلایه تفلون/فویل نیکل/تفلون [۵۰]، جنس معمول اما دارای پوشش چندلایه متناوب از فویل آلومینیوم و نوار تفلون [۱۷]، ویتون [۹۰]، دولایه پلی‌اتیلن ترفتالات و رزین ساران [۵۴]، و سه لایه جمع‌شونده با حرارت/فویل آلومینیوم/جمع‌شونده با حرارت [۹۱]	جنس غلاف مغزه
جنس معمول (مطالعات کربن دی اکسید)	جنس معمول (مطالعات کربن دی اکسید)	لوله‌ها: پارامغناطیسی مانند برنج [۷۴] یا مس [۷۰]	تیتانیوم [۴۶]، هستلوی [۷۹] و [۶۵، ۶۰، ۱۷، ۹]، و جنس معمول (مطالعات صرفاً کربن دی اکسید)	جنس لوله‌ها، پمپ، و شیرآلات

مایعات ترش (NACE TM0296) و کربن دی اکسید گازی در دما و فشار بالا (NACE TM0297) ارائه کرده است.
۴- الزامات و تمهیدات ایمنی در آزمایشگاه‌های گاز اسیدی

از آنجاکه تأثیر هیدروژن سولفید بر الاستومرها قابل پیش‌بینی نیست، جنس بخش‌های الاستومری تجهیز لازم است توسط آزمایش تعیین گردد [۹۲]، یا بر پایه نتایج آزمایش‌های معتبر قبلی تصمیم‌گیری شود. انجمن ملی مهندسان خوردگی^۱ روش‌های آزمون استاندارد جهت ارزیابی سازگاری الاستومرها با گازهای ترش (NACE TM0187)،

1. National Association of Corrosion Engineers

از طریق تنفس است، از آنجا که بر اثر تماس با پوست نیز باعث خارش می‌گردد، بهتر است اپراتور از لباس مخصوص استفاده کرده و جهت اطمینان بیشتر آشکارساز گازی همراه، با خود داشته باشد [۹۳]. جهت انتخاب، استفاده و مراقبت از ماسک تنفسی می‌توان از استانداردهای مختلف موجود در این زمینه به‌عنوان مثال استاندارد CSA Z94.4-۲۰۰۲ استفاده کرد. آزمایشگاه گاز اسیدی باید دارای کتابچه قوانین نوشته شده مشتمل بر سیاست‌های آزمایشگاه، اشخاص مسئول اجرای قوانین، رویه‌های کار ایمن، تجهیزات حفاظت فردی مورد نیاز، الزامات آموزشی پرسنل، رویه‌های دفع مواد زائد، رویه تهویه مطبوع و رویه‌های اضطراری باشد [۹۴]. جهت آگاهی از ملزومات آشکارسازهای گازی می‌توان از استانداردهای انجمن بین‌المللی اتوماسیون ۱ که به الزامات عملکرد برای آشکارسازهای گاز هیدروژن سولفید (ISA-92.0.1-Part 1)، و طریقه نصب، عملکرد و نگهداری از این آشکارسازها (ISA-RP92.0.2, Part II) می‌پردازند استفاده کرد. برای ایمنی در برابر تابش پرتو ایکس، اتاق استقرار سی‌تی‌اسکنر مجهز به سپر سربی می‌گردد. در صورت کار با سیالاتی چون کربن‌دی‌سولفید که امکان اشتعال و انفجار در دماهای نزدیک دمای آزمایش دارند بهتر است از پمپ‌ها یا ادوات ضد انفجار استفاده گردد [۶۰]. می‌توان از هیدروژن سولفید به‌کمک ظرف ته‌نشینی جهت آنالیزهای بعدی به‌صورت ایمن نمونه‌گیری کرد. جریان حاوی گاز هیدروژن سولفید به‌درون محلول آبی درون ظرف دمیده شده و گوگرد در محلول نقره نیترات با تشکیل رسوب نقره سولفید رسوب داده می‌شود [۹].

نتیجه‌گیری

با توجه به عدم جذابیت اقتصادی، پیامدهای زیست محیطی و مشکلات عملیاتی روش‌های بازیافت گوگرد، مطالعات در زمینه بررسی جوانب مختلف پروژه‌های

با توجه به سمیت بالای گاز هیدروژن سولفید و به‌منظور باز کردن ایمن قطعات پس از انجام آزمایش‌ها، ایجاد خطوط پاک‌سازی یا جاروب نیتروژن برای کلیه قسمت‌های تجهیز توصیه می‌گردد. علاوه بر لزوم وجود جریان پاک‌سازی نیتروژن در تمامی قسمت‌های تجهیز به‌منظور مقابله با نشت احتمالی ترکیبات سمی، لازم است کل تجهیز داخل یک کابین ایزوله دارای تهویه قرار گیرد که خروجی تهویه به یک فیلتر روی اکسید [۹] یا کربن فعال تقویت‌شده با یک ترکیب سوزآور مانند پتاسیم هیدروکسید [۶۰] جهت حذف هیدروژن سولفید و مرکپتان‌ها وارد شود. به‌منظور رهاسازی کنترل شده و ایمن، جریان‌های گازی پاک‌سازی با نیتروژن، جریان‌های گازی خروجی از شیرهای اطمینان و جریان‌های گازی خروجی از جداکننده‌ها پس از انجام آزمون‌های مورد نیاز، در نهایت در یک کوره جمع‌آوری و سوخته شوند [۹]. از آنجا که آزمون‌ها ممکن است از چند ساعت تا چندین روز و حتی چند هفته طول بکشند لازم است تجهیز با استفاده از میکروکنترلر و نرم‌افزارهای مربوطه (مانند لیبویو) به‌صورت کاملاً اتوماتیک درآمده باشد. اپراتور فشار، دما، سطوح سیالات در ظروف و همچنین، دبی‌های جریان را به‌کمک سیستم کنترل اتوماتیک از خارج از کابین تنظیم و کنترل می‌کند [۹،۶۰]. در برخی مطالعات که صرفاً با مایعات خورنده و سمی سروکار داشته‌اند، بخش‌های خوراکی و تأمین فشار معکوس زیر دودکش‌های بخار با شدت تهویه بالا قرار گرفته‌اند [۶۰]. جهت ایمنی بیشتر، اتاق حاوی تجهیز، ایزوله، ضد انفجار، دارای فشار منفی به‌همراه تهویه مطمئن و مجهز به آشکارسازهای گازی و پایش از راه دور بوده و تجهیزات حفاظت فردی در اختیار اپراتور قرار می‌گیرد. در صورتی که اپراتور مجبور به کار در اتاق حاوی هیدروژن سولفید باشد، استفاده از ماسک تمام صورت تحت فشار مثبت^۲ الزامی است [۱۵]. گرچه راه اصلی ورود هیدروژن سولفید به بدن

1. Positive Pressure Self-contained Breathing Apparatus (SCBA)

و پتانسیل ذخیره‌سازی و ازدیاد برداشت به کمک گاز اسیدی، وجود داده‌های آزمایشگاهی با کیفیت بالا امری ضروری است. در راستای ارائه الگوی مفهومی جامع از تجهیز مطالعاتی گاز اسیدی مطابق با فناوری روز دنیا، مروری جامع بر روش‌های پایش دینامیک سیستم داخلی سنگ و سیال مخزن حین آزمایش‌های سیلاب‌زنی مغزه با گاز اسیدی به همراه کاربردها، نقاط قوت و نقاط ضعف هر روش ارائه گردید. با توجه به سمیت و خوردگی بالای گاز اسیدی، ملاحظات ایمنی و فنی خاص تجهیزات آزمایشگاهی گاز اسیدی بیان گردید و حوزه‌های پژوهشی در زمینه مطالعاتی گاز اسیدی معرفی گردیدند. با توجه به حجم بالای تولید گوگرد و انتشار گازهای گلخانه‌ای در ایران و قوانین روزبه‌روز سخت‌گیرانه‌تر بین‌المللی در خصوص جلوگیری از انتشار گازهای گلخانه‌ای، همچنین وجود امکان ازدیاد برداشت به کمک گاز اسیدی، سرمایه‌گذاری جهت ساخت و توسعه مراکز تحقیقاتی ازدیاد برداشت و ذخیره‌سازی گاز اسیدی در دانشگاه‌ها و مراکز تحقیقات صنعتی، اقدامی هوشمند و اجتناب‌ناپذیر به نظر می‌رسد.

تزریق گاز اسیدی در سازندهای زمین‌شناسی به منظور جلوگیری از انتشار این گازها در اتمسفر و استفاده از گاز اسیدی در عملیات ازدیاد برداشت با اقبال روزافزون مواجه شده‌اند. بررسی فرآیندهای مهاجرت/جابجایی چندفازی گاز اسیدی/نفت/شورآب با توجه به برهم‌کنش‌های سنگ و سیال مخزن با گاز اسیدی جهت حداکثرسازی بازیافت نفت در پروژه‌های ازدیاد برداشت، تخمین ظرفیت ذخیره‌سازی، اطمینان از امنیت فرآیند ذخیره‌سازی و پیش‌بینی اثرات بلندمدت تزریق گاز اسیدی کاملاً ضروری است. طرح‌های معمول سیلاب‌زنی مغزه برای گازهای اسیدی با توجه به خوردگی و سمیت بالای این گازها و همچنین تعاملات پیچیده سنگ و سیال مخزن با گاز اسیدی قابل استفاده نیستند. لذا، به‌کارگیری روش‌های مختلف پایش دینامیک سیستم داخلی سنگ و سیال در آزمایش‌های سیلاب‌زنی مغزه ابزار اصلی پژوهشگران در انجام مطالعات گاز اسیدی در شرایط شبیه‌سازی شده مخزن می‌باشند. به منظور کمیت بخشیدن به پارامترهای مدل‌سازی انتقال واکنش‌دهنده گاز اسیدی در سازندهای زمین‌شناسی و ارزیابی ریسک

مراجع

- [1]. Maddox R N, Sheerar L F (1982) Gas conditioning and processing, Gas And Liquid Sweetening, Campbell Petroleum Series, 4.
- [2]. Orr W L (1974). Changes in sulfur content and isotopic ratios of sulfur during petroleum maturation—study of Big Horn Basin Paleozoic oils, AAPG bulletin, 58, 11: 2295-2318.
- [3]. Mirforughy S M, Kord S, Moghadasi J (2021) A Review on acid gas injection into geological formations with the aim of enhanced oil recovery and environmental protection: theoretical foundations, journal of Petroleum Research, 30, 99-6: 116-132..
- [4]. Fong M W (2004) A demonstration of acid rain, Presented at the Asia-Pacific Forum on Science Learning and Teaching.
- [5]. Mokhtab S, Poe W A, Mak J Y (2019) Chapter 7 - Natural gas treating, Handbook of Natural Gas Transmission and Processing, Fourth Edition, Gulf Professional Publishing, 231-269.
- [6]. Falcao L d S M (2016) Simulation study of acid gas injection into the Cherry Canyon Formation, Delaware Basin, New Mexico: New Mexico Institute of Mining and Technology.
- [7]. کرد ش.، میرفروغی س. م.، و مقدسی، ج. (۱۳۹۹) مروری بر تزریق گازهای اسیدی در سازندهای زمین‌شناسی با هدف ازدیاد برداشت و حفاظت از محیط زیست: مبانی تئوری، پژوهش نفت.
- [8]. Bennion D B, Thomas E, Bennion D W, Bietz R (1996) Formation screening to minimize permeability impairment associated with acid gas or sour gas injection/disposal, Paper presented at the Annual Technical Meeting.

- [9]. Ott H, de Kloe K, van Bakel M, Vos F, van Pelt A, Legerstee P, Bauer A, Eide K, van der Linden A, Berg S (2012) Core-flood experiment for transport of reactive fluids in rocks, *Review of Scientific Instruments*, 83, 8: 084501.
- [10]. Ribeiro A S, Mackay E J, Guimarães L (2016) Predicting calcite scaling risk due to dissolution and re-precipitation in carbonate reservoirs during CO₂ injection, Paper presented at the SPE International Oilfield Scale Conference and Exhibition.
- [11]. Bennion D, Thomas F, Schulmeister B, Imer D, Shtepani E, Becker L (2002) The phase behavior of acid disposal gases and the potential adverse impact on injection or disposal operations, Paper presented at the Canadian International Petroleum Conference.
- [12]. Bachu S, Gunter W D (2005) Overview of acid-gas injection operations in Western Canada, *Greenhouse Gas Control Technologies*, 7: 443-448, Oxford: Elsevier Science Ltd.
- [13]. Longworth H, Dunn G, Semchuck M (1996) Underground disposal of acid gas in Alberta, Canada: regulatory concerns and case histories, Paper presented at the SPE Gas Technology Symposium.
- [14]. Ott H, Snippe J, De Kloe K, Husain H, Abri A (2013) Salt precipitation due to Sc-gas injection: single versus multi-porosity rocks, *Energy Procedia*, 37: 3319-3330.
- [15]. Carroll J J (2010) Acid gas injection and carbon dioxide sequestration, 42, John Wiley and Sons.
- [16]. Chang C, Zhou Q, Guo J, Yu Q (2014) Supercritical CO₂ dissolution and mass transfer in low-permeability sandstone: Effect of concentration difference in water-flood experiments, *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 28: 328-342.
- [17]. Piri M (2012) Recirculating, constant backpressure core flooding apparatus and method, Patent WO2012082797A1. US Patent and Trademark Off, Washington, DC.
- [18]. Cnudde V, Boone M N (2013) High-resolution X-ray computed tomography in geosciences: A review of the current technology and applications, *Earth-Science Reviews*, 123: 1-17.
- [19]. Ma J, Petrilli D, Manceau J C, Xu R, Audigane P, Shu L, Jiang P, Le-Nindre Y M (2013) Core scale modeling of CO₂ flowing: identifying key parameters and experiment fitting, *Energy Procedia*, 37: 5464-5472.
- [20]. Gutierrez M, Katsuki D, Almrabat A (2012) Effects of CO₂ injection on the seismic velocity of sandstone saturated with saline water, *International Journal of Geosciences*, 3, 5: 908.
- [21]. Adebayo A R, Kandil M E, Okasha T M, Sanni M L (2017) Measurements of electrical resistivity, NMR pore size and distribution, and x-ray CT-scan for performance evaluation of CO₂ injection in carbonate rocks: A pilot study, *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 63: 1-11.
- [22]. Carroll J (2002) Phase equilibria relevant to acid gas injection, part 1-Non-aqueous phase behaviour, *Journal of Canadian Petroleum Technology*, 41: 06.
- [23]. Carroll J (2002) Phase equilibria relevant to acid gas injection: Part 2-Aqueous phase behaviour, *Journal of Canadian Petroleum Technology*, 41: 07.
- [24]. Chapoy A, Burgass R, Tohidi B, Hajiw M, Coquelet C (2015) Thermophysical Properties, hydrate and phase behaviour modelling in acid gas-rich systems, acid gas extraction for disposal and related topics, 115139.
- [25]. Clark M, Svrcek W, Monnery W, Jamaluddin A, Bennion D, Thomas F, Wichert E, Reed A, Johnson D (1998) Designing an optimized injection strategy for acid gas disposal without dehydration, Paper Presented at the Proceedings of the Annual Convention-gas Processors Association.
- [26]. Huron M J, Dufour G N, Vidal J (1977) Vapour-liquid equilibrium and critical locus curve calculations with the soave equation for hydrocarbon systems with carbon dioxide and hydrogen sulphide, *Fluid Phase Equilibria*, 1, 4: 247-265.
- [27]. Stryjek R, Vera J (1986) PRSV: An improved peng—robinson equation of state for pure compounds and mixtures, *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 64, 2: 323-333.
- [28]. Wong D S H, Sandler S I (1992) A theoretically correct mixing rule for cubic equations of state, *AIChE Journal*, 38, 5: 671-680.
- [29]. Carroll J J, Slupsky J D, Mather A E (1991) The solubility of carbon dioxide in water at low pressure, *Journal of Physical and Chemical Reference Data*, 20, 6: 1201-1209.
- [30]. Scharlin P, Cargill R W (1996) Carbon dioxide in water and aqueous electrolyte solutions, Oxford University Press, 62.
- [31]. Peter G (1988) Hydrogen sulfide, deuterium sulfide and hydrogen selenide, *Solubility data series*; 132.
- [32]. Carroll J J, Mather A E (1989) The solubility of hydrogen sulphide in water from 0 to 90 C and pressures to 1 MPa. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 53, 6: 1163-1170.
- [33]. Kalantari-Dahaghi A, Gholami V, Moghadasi J, Abdi R (2008) Formation damage through asphaltene precipitation resulting from CO₂ gas injection in Iranian carbonate reservoirs, *SPE Production and Operations*, 23, 02: 210-214.

- [34]. Hajiw M (2014) Hydrate mitigation in sour and acid gases, (PhD), Heriot-Watt University.
- [۳۵]. باهری ع، جوزیان س، و کمال م. (۱۳۹۴) بررسی مضرات هیدرات گازی و ارائه راه‌حلهایی برای کاهش آنها، پنجمین کنفرانس انرژی و محیط زیست، مرکز همایش‌های صدا و سیما، تهران، ایران.
- [36]. Rathnaweera T, Ranjith P, Perera M (2016) Experimental investigation of geochemical and mineralogical effects of CO₂ sequestration on flow characteristics of reservoir rock in deep saline aquifers, *Scientific reports*, 6: 19362.
- [37]. Giorgis T, Carpita M, Battistelli A (2007) 2D modeling of salt precipitation during the injection of dry CO₂ in a depleted gas reservoir, *Energy Conversion and Management*, 48, 6: 1816-1826.
- [38]. Gamal H, Abdelgawad K, Ikatatny S (2019) New environmentally friendly acid system for iron sulfide scale removal, *Sustainability*, 11, 23: 6727.
- [39]. Bacci G, Korre A, Durucan S (2011) Experimental investigation into salt precipitation during CO₂ injection in saline aquifers, *Energy Procedia*, 4: 4450-4456.
- [40]. Li Y, Ranjith P G, Perera M S A, Yu Q (2017) Residual water formation during the CO₂ storage process in deep saline aquifers and factors influencing it: A review, *Journal of CO₂ Utilization*, 20: 253-262.
- [41]. Shi J Q, Xue Z, Durucan S (2009) History matching of CO₂ core flooding CT scan saturation profiles with porosity dependent capillary pressure, *Energy Procedia*, 1, 1: 3205-3211.
- [42]. Snippe J, Berg S, Ganga K, Brussee N, Gdanski R (2020) Experimental and numerical investigation of wormholing during CO₂ storage and water alternating gas injection, *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 94: 102901.
- [43]. Smith M M, Hao Y, Carroll S A (2017) Development and calibration of a reactive transport model for carbonate reservoir porosity and permeability changes based on CO₂ core-flood experiments, *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 57: 73-88.
- [44]. Ott H, Oedai S, Pentland C, Eide-Engdahl K, van der Linden A, Gharbi O, Bauer A, Makurat A (2013) CO₂ reactive transport in limestone: flow regimes, fluid flow and mechanical rock properties, Paper presented at the International Symposium of the Society of Core Analysts, Napa Valley, California, USA.
- [45]. Assayag N, Matter J, Ader M, Goldberg D, Agrinier P (2009) Water-rock interactions during a CO₂ injection field-test: Implications on host rock dissolution and alteration effects, *Chemical Geology*, 265, 1: 227-235.
- [46]. Bennion B, Bachu S (2008) Drainage and imbibition relative permeability relationships for supercritical CO₂/brine and H₂S/brine systems in intergranular sandstone, carbonate, shale, and anhydrite rocks, *SPE Reservoir Evaluation and Engineering*, 11, 03: 487-496.
- [47]. Zhang Y, Kogure T, Chiyonobu S, Lei X, Xue Z (2013) Influence of heterogeneity on relative permeability for CO₂/brine: CT observations and numerical modeling, *Energy Procedia*, 37: 4647-4654.
- [48]. Farokhpour R, Bjørkvik B J A, Lindeberg E, Torsæter O (2013) CO₂ Wettability behavior during CO₂ sequestration in saline aquifer -an experimental study on minerals representing sandstone and carbonate, *Energy Procedia*, 37: 5339-5351.
- [49]. Perrin J C, Benson S (2010) An experimental study on the influence of sub-core scale heterogeneities on CO₂ distribution in reservoir rocks, *Transport in Porous Media*, 82, 1: 93-109.
- [50]. Pini R, Krevor S C M, Benson S M (2012), Capillary pressure and heterogeneity for the CO₂/water system in sandstone rocks at reservoir conditions, *Advances in Water Resources*, 38: 48-59.
- [51]. Wildenschild D, Sheppard A P (2013) X-ray imaging and analysis techniques for quantifying pore-scale structure and processes in subsurface porous medium systems, *Advances in Water Resources*, 51: 217-246.
- [52]. Zhang Y, Nishizawa O, Kiyama T, Chiyonobu S, Xue Z (2014) Flow behaviour of supercritical CO₂ and brine in Berea sandstone during drainage and imbibition revealed by medical X-ray CT images, *Geophysical Journal International*, 197, 3: 1789-1807.
- [53]. Crawshaw J P, Boek E S (2013) Multi-scale imaging and simulation of structure, flow and reactive transport for CO₂ storage and EOR in carbonate reservoirs, *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 77, 1: 431-458.
- [54]. Zhang Y, Kogure T, Nishizawa O, Xue Z (2017) Different flow behavior between 1-to-1 displacement and co-injection of CO₂ and brine in Berea sandstone: Insights from laboratory experiments with X-ray CT imaging, *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 66: 76-84.
- [55]. Zhang Y, Nishizawa O, Park H, Kiyama T, Lei X, Xue Z (2017) The pathway-flow relative permeability of CO₂: measurement by lowered pressure drops, *Water Resources Research*, 53, 10: 8626-8638.
- [56]. Dávila G, Dalton L, Crandall D M, Garing C, Werth C J, Druhan J L (2020) Reactive alteration of a Mt. Simon Sandstone due to CO₂-rich brine displacement, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 271: 227-247.
- [57]. Pini R, Madonna C (2016) Moving across scales: a quantitative assessment of X-ray CT to measure the porosity of rocks, *Journal of Porous Materials*, 23, 2: 325-338.

- [58]. Seyyedi M, Giwelli A, White C, Esteban L, Verrall M, Clennell B (2020) Effects of geochemical reactions on multi-phase flow in porous media during CO₂ injection, *Fuel*, 269: 117421.
- [59]. Xu L, Myers M, Li Q, White C, Zhang X (2020) Migration and storage characteristics of supercritical CO₂ in anisotropic sandstones with clay interlayers based on X-CT experiments, *Journal of Hydrology*, 580: 124239.
- [60]. Berg S, Oedai S, Landman A J, Brussee N, Boele M, Valdez R, van Gelder K (2010) Miscible displacement of oils by carbon disulfide in porous media: Experiments and analysis, *Physics of Fluids*, 22, 11: 113102.
- [61]. Als-Nielsen J, McMorrow D (2011) X-rays and their interaction with matter Elements of Modern X-ray Physics, John Wiley and Sons, Ltd .
- [62]. Boone M A, Bultreys T, Masschaele B, Loo D V, Hoorebeke L V, Cnudde V (2016) In-situ, real time micro-CT imaging of pore scale processes, the next frontier for laboratory based micro-CT scanning.
- [63]. Bazaikin Y, Gurevich B, Iglauer S, Khachkova T, Kolyukhin D, Lebedev M, Lisitsa V, Reshetova G (2017) Effect of CT image size and resolution on the accuracy of rock property estimates, *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 122, 5: 3635-3647.
- [64]. Menke H P, Gao Y, Andrew M (2018) Using nano-CT and high-contrast imaging to inform microporosity permeability during Stokes-Brinkman flow simulations on μ CT images, In AGU Fall Meeting Abstracts, H41K.
- [65]. Ott H, Berg S, Oedai S (2012) Displacement and Mass Transfer of CO₂/Brine in Sandstone *Energy Procedia*, 23: 512-520.
- [66]. Ni H, Boon M, Garing C, Benson S M (2019) Predicting CO₂ residual trapping ability based on experimental petrophysical properties for different sandstone types, *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 86: 158-176.
- [67]. Krevor S C M, Pini R, Zuo L, Benson S M (2012) Relative permeability and trapping of CO₂ and water in sandstone rocks at reservoir conditions, *Water Resources Research*, 48: 2.
- [68]. Perrin J C, Falta R W, Krevor S, Zuo L, Ellison K, Benson S M (2011) Laboratory experiments on core-scale behavior of CO₂ exolved from CO₂-saturated brine, *Energy Procedia*, 4: 3210-3215.
- [69]. Zhao Y, Zhang Y, Lei X, Zhang Y, Song Y (2020) CO₂ flooding enhanced oil recovery evaluated using magnetic resonance imaging technique, *Energy*, 203: 117878.
- [70]. Song Y, Jiang L, Liu Y, Yang M, Zhao Y, Zhu N, Dou B, Abudula A (2012) An experimental study on CO₂/water displacement in porous media using high-resolution magnetic resonance imaging, *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 10: 501-509.
- [71]. Berg S, Oedai S, Ott H (2013) Displacement and mass transfer between saturated and unsaturated CO₂-brine systems in sandstone. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 12: 478-492.
- [72]. Wei B, Zhang X, Wu R, Zou P, Gao K, Xu X, Pu W, Wood C (2019). Pore-scale monitoring of CO₂ and N₂ flooding processes in a tight formation under reservoir conditions using nuclear magnetic resonance (NMR): A case study, *Fuel*, 246: 34-41.
- [73]. Song Y, Zhu N, Zhao Y, Liu Y, Jiang L, Wang T (2013) Magnetic resonance imaging study on near miscible supercritical CO₂ flooding in porous media, *Physics of Fluids*, 25, 5: 053301.
- [74]. Liu Y, Teng Y, Jiang L, Zhao J, Zhang Y, Wang D, Song Y (2017) Displacement front behavior of near miscible CO₂ flooding in decane saturated synthetic sandstone cores revealed by magnetic resonance imaging, *Magnetic Resonance Imaging*, 37: 171-178.
- [75]. Jiang L, Song Y, Liu Y, Yang M, Zhu N, Wang T, Zhao Y (2013) Magnetic resonance imaging of CO₂/water two phase flow in porous media, *Energy Procedia*, 37: 6839-6845.
- [76]. Han H, Ouellette M, MacMillan B, Goora F, MacGregor R, Green D, Balcom B J (2011) High pressure magnetic resonance imaging with metallic vessels, *Journal of Magnetic Resonance*, 213, 1: 90-97.
- [77]. Afrough A, Shakerian M, Zamiri M S, MacMillan B, Marica F, Newling B, Romero-Zerón L, Balcom B J (2018) Magnetic-resonance imaging of high-pressure carbon dioxide displacement: fluid/surface interaction and fluid behavior, *SPE Journal*, 23, 03, 772-787.
- [78]. Suekane T, Soukawa S, Iwatani S, Tsushima S, Hirai S (2005) Behavior of supercritical CO₂ injected into porous media containing water. *Energy*, 30, 11: 2370-2382.
- [79]. Akbarabadi M, Piri M (2013) Relative permeability hysteresis and capillary trapping characteristics of supercritical CO₂/brine systems: An experimental study at reservoir conditions, *Advances in Water Resources*, 52: 190-206.
- [80]. Ott H, Oedai S (2015) Wormhole formation and compact dissolution in single- and two-phase CO₂-brine injections, *Geophysical research letters*, 42, 7: 2270-2276.
- [81]. Nooraiepour M, Bohloli B, Park J, Sauvin G, Skurtveit E, Mondol N H (2018) Effect of brine-CO₂ fracture flow on velocity and electrical resistivity of naturally fractured tight sandstones, *GEOPHYSICS*, 83, 1: WA37-WA48.

- [82]. Zhang Y, Nishizawa O, Kiyama T, Xue Z (2015) Saturation-path dependency of P-wave velocity and attenuation in sandstone saturated with CO₂ and brine revealed by simultaneous measurements of waveforms and X-ray computed tomography images, *GEOPHYSICS*, 80, 4.
- [83]. Falcon-Suarez I, Papageorgiou G, Chadwick A, North L, Best A I, Chapman M (2018) CO₂-brine flow-through on an Utsira Sand core sample: Experimental and modelling, Implications for the Sleipner storage field, *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 68: 236-246.
- [84]. Falcon-Suarez I, North L, Amalokwu K, Best A (2016) Integrated geophysical and hydromechanical assessment for CO₂ storage: shallow low permeable reservoir sandstones, *Geophysical Prospecting*, 64(Advances in Rock Physics), 828-847.
- [85]. North L, Best A I, Sothcott J, MacGregor L (2013) Laboratory determination of the full electrical resistivity tensor of heterogeneous carbonate rocks at elevated pressures, *Geophysical Prospecting*, 61(2-Rock Physics for Reservoir Exploration, Characterisation and Monitoring), 458-470.
- [86]. Zhang Y, Park H, Nishizawa O, Kiyama T, Liu Y, Chae K, Xue Z (2017) Effects of fluid displacement pattern on complex electrical impedance in Berea sandstone over frequency range 104–106 Hz. *Geophysical Prospecting*, 65, 4: 1053-1070.
- [87]. Katsuki D, Gutierrez M, Almrabat A (2019) Stress-dependent shear wave splitting and permeability in fractured porous rock, *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 11, 1: 1-11.
- [88]. Fusses F, Steeb H, Xiao X, Zhu W I, Butler I B, Elphick S, Mäder U (2014) A low-cost X-ray-transparent experimental cell for synchrotron-based X-ray microtomography studies under geological reservoir conditions, *Journal of synchrotron radiation*, 21, 1: 251-253.
- [89]. Zhang Y, Xue Z, Park H, Shi J Q, Kiyama T, Lei X, Sun Y, Liang Y (2019) Tracking CO₂ plumes in clay-rich rock by distributed fiber optic strain sensing (DFOSS): a laboratory demonstration, *Water Resources Research*, 55, 1: 856-867.
- [90]. Shi J Q, Xue Z, Durucan S (2011) Supercritical CO₂ core flooding and imbibition in Tako sandstone—Influence of sub-core scale heterogeneity, *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 5, 1: 75-87.
- [91]. Chen X, DiCarlo D A (2016) A new unsteady-state method of determining two-phase relative permeability illustrated by CO₂-brine primary drainage in berea sandstone, *Advances in Water Resources*, 96: 251-265.
- [92]. Ray T W, Ivey C E (1979) Evaluation of seal materials for high-temperature H₂S service *Journal of Canadian Petroleum Technology*, 18, 01.
- [93]. H₂S (hydrogen sulfide) – Knowledge can save lives (2013) Booklet, Dräger.
- [94]. Hodgson G (2020) H₂S Code of Practice, <https://www.ualberta.ca/vice-president-finance/media-library/ualberta/vice-president-finance/environment-health-safety/documents/h2s-code-of-practice.pdf>.



Acid Gas Injection into Geological Formations with The Aim of Enhanced Oil Recovery and Environmental Protection: A Review of Formation Damage Mechanisms, Areas and Principles of Experimental Research

Sayed Mohammadreza Mirforughy, Shahin Kord *, and Jamshid Moghadasi

Petroleum Engineering Department, Ahwaz Faculty of Petroleum, Petroleum University of Technology, Iran

Shkord@yahoo.com

DOI: 10.22078/pr.2020.4274.2934

Received: August/26/2020

Accepted: October/27/2020

Introduction

Potential formation damage in acid gas projects can be classified into three main categories: acid gas interactions with reservoir rock [1-3], damage related to the injection type and phase behavior [1], and acid gas interactions with reservoir fluid [1,4-8]. Before injecting acid gas, the severity and probability of all potential damage mechanisms must first be checked by laboratory tests and numerical simulations. In the next section, we discuss the importance, occurrence reasons, and avoiding or treating formation damage in acid gas injection projects.

Core-flood experiments are useful tools to maximize oil recovery, accurately estimate the storage efficiency, ensure the storage process's security, and predict the long-term injection effects considering the possible interactions between reservoir rock and fluid with the acid gas injected [2,9]. The porous media is considered as a black box with a homogeneous structure in routine core-flood experiments. However, the study of multi-phase acid gas/brine/oil migration, injectivity reduction, and fluid saturation distribution during acid injection in space and time requires dynamic monitor-

ing of fluid motion and distribution in porous media. After discussing formation damage in acid gas injection projects, we will review techniques for dynamic tracking of the acid gas flow in porous media. These techniques are divided into two general categories of imaging methods (laboratory scale) and geophysical techniques (both laboratory and field-scale). Imaging methods involve "X-ray tomography" and "nuclear magnetic resonance imaging" [10], while geophysical methods include "seismic survey mapping" [11] and "electrical resistivity tomography" [12].

This paper tries to provide a comprehensive overview of the nature and requirements of designing core-flood experiments to study acid gas sequestration and enhanced oil recovery. We shall discuss challenges and requirements for researchers in terms of selecting appropriate study techniques, a comprehensive conceptual model of acid gas research apparatus, analysis of strengths, weaknesses, and application of various methods of monitoring the internal system of rock and fluid during acid gas injection, and safety guidelines in designing acid gas laboratory equipment.

Formation Damage and Injectivity Reduction

Contact of acid gas with water leads to the dissolution of gas in the aqueous phase, acid formation, and pH decrease. Temporary or permanent dissolution of the dolomitic/calcareous matrix and intergranular cement and occurrence of incompatibility with the reservoir's connate water (scale formation) could then happen. Partial dissolution of the matrix/intergranular cement around the wellbore can cause the release and migration of fine particles previously entrapped within the cement (Fig. 1) [1,2]. Over time, as the injected stream gets saturated with the dissolved rock surface, different minerals drop out of the solution in more distant areas, leading to scale formation and reduction in pore-throat diameter and permeability. This phenomenon is called re-precipitation [3].

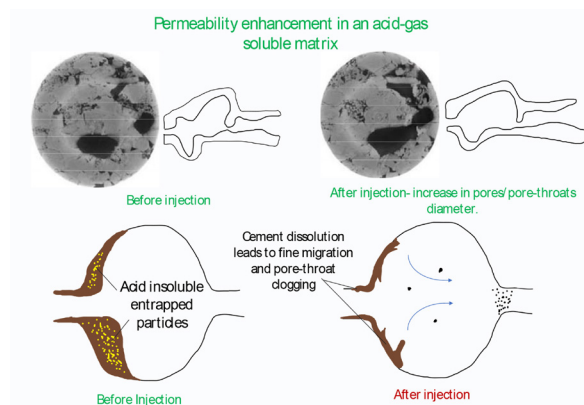


Fig. 1 Permeability reduction or enhancement due to acid gas injection [1,2].

The phase diagram of the acid gas mixture is usually banana-shaped (Fig. 2) [4]. Entering the two-phase region during compression from the gas phase to the liquid/supercritical phase can lead to cavitation and corrosion in the compression system. Therefore, the compressors' inlet flow temperature must be such that the compression to the supercritical level would happen without passing through the two-phase area. In some cases, two-phase flow is unavoidable, especially in the area near the wellbore. When the injection reservoir's initial pressure is low, the initial injection begins in the "gas" area of the phase diagram. With the gradual increase in the reservoir pressure, the fluid around the injection well enters the two-phase area of the phase diagram. The liquid and gas phases have a vivid interface and measurable surface tension. Due to the adverse effects of relative permeability in low-permeability reservoirs, they cause a temporary or permanent reduction in injectivity. In the case of indirect injection (dissolving acid gas in water and sour water injection), one should consider the probability of severe corrosion and hydrate formation, along with the need for conducting extensive sour water phase behavior experiments before injection [1].

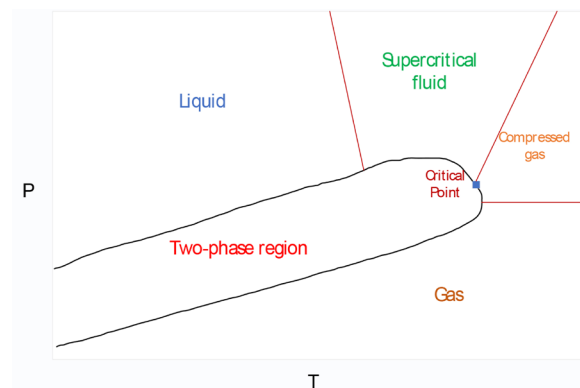


Fig. 2 Typical acid gas phase diagram [4].

Because of the interactions of reservoir fluids and the injected acid gas, there will be a probability of reservoir fluids swelling because of acid gas high solubility in these fluids [1], asphaltene precipitation [13], hydrate formation [5], elemental sulfur precipitation [6], formation dry-out [7], and precipitation of iron-based scales [8]. All these phenomena could lead to injectivity reduction, and their occurrence probability should be investigated through laboratory experiments and numerical simulations before injection.

Core Flood Experiments to Investigate the Transfer of Acid Gases in the Reservoir Rock

The study of reactive fluid transfer, including acid gas in porous rocks, is an exciting but challenging topic in geology and petroleum engineering. Core-flood experiments aim to understand the movement and flow of fluids in porous media to maximize oil recovery and simultaneously study the chemical/physical interactions of reservoir rock and reactive fluids. With the help of these experiments, the process of injecting acid gas can be analyzed for storage and EOR operations [2]. Other areas of research that can be investigated through acid gas core-flood experiments are as follows:

1. Quantification of oil recovery from EOR operations by injecting acid gas and creating production strategies.
2. Investigation of acid gas/brine multi-phase migration on a core scale during imbibition and drainage processes to predict the long-term effects of acid gas storage, ensuring storage security, and evaluating storage efficiency.
3. Analysis of injection potential and storage capacity of geological formations.
4. Estimating petrophysical properties and their profile changes in multi-phase flow due to acid gas injection [9].
5. Determining the growth rate and density of wormholes created by acid gas injection, the necessary conditions for creating wormholes, identifying possible patterns of formation of these wormholes, and examining how each of these patterns affects the

multi-phase flow [14].

6. Finding a relationship between porosity changes and permeability changes due to acid gas injection, the effect of these changes on enhanced hydrocarbon recovery, and predicting long-term reservoir storage capacity [15].

7. Obtaining mathematical relationships describing fluid flow in porous media during acid gas injection (reactive transport modeling) [16].

8. Identifying the formation damage due to acid gas injection, determining the severity and type of damage during various imbibition and drainage processes, and assessing the possibility and extent of injectivity reduction during the project [1].

9. Obtaining fluid flow parameters in the process of injecting acid gas or a mixture of acid gas and water with the help of the saturation profile inside the core [2].

10. Predicting the phase behavior of acid gases [4].

11. Measurement of relative permeability for different mixtures of acid gas and upscaling laboratory results to evaluate the migration of these gases in the depths of the earth by computer simulators [17,18].

12. Investigating the significant effect of reservoir rock heterogeneities on the various research items mentioned above [19].

13. Combined gas/liquid studies such as “water alternating gas” and “carbonated water injection” studies.

During core-flood experiments, multi-phase migration of acid gas/brine/oil, injectivity reduction, and fluid saturation distribution in the core could be observed or measured over time and space using different techniques.

One of the most widely used techniques for monitoring the internal rock and fluid system during acid gas injection is the reconstruction of a three-dimensional model of rock and fluid and its changes during injection with a computer’s help through a set of two-dimensional X-ray images from different angles. This technique is called “X-ray computed tomography” or “CT scan.” The method is non-destructive, and it has a history of application in the oil industry for decades [20]. Using a medical CT scanner will help detect changes in the rock layer structure and describe transient rock mass changes during corrosive fluids injection [21]. It provides quick imaging of a larger core volume than other CT scan methods (industrial CTs and micro CTs) [22,23]. The medical CT’s spatial accuracy is on a scale below one millimeter, and the X-ray source and detector revolve around a fixed sample [24]. Calculating the effective properties of the rock, visualizing the distribution of fluids in the pore space, and knowing how the pore structure changes during the experiment require a higher spatial resolution than the medical or industrial CT resolution [23,25]. The micro-CT provides high-quality three-

dimensional micron-scale imaging of the rock matrix and its fluid distribution. In a micro-CT, the X-ray source and detector are usually fixed, and the sample rotates. The reason for this rotation is to achieve higher mechanical stability, which is required in high resolution [26].

Micro-CTs provide good image accuracy in high permeability reservoir rocks. In contrast, in some carbonate rocks and unconventional reservoirs, some voids are less than one micron in size, and they are usually not visible to micro-CTs [27]. In these cases, nano-CTs provide a higher image resolution and, as a result, a more accurate image of the void space for a higher computational cost and a smaller volume of investigation [28]. Nuclear magnetic resonance imaging provides dynamic and continuous multi-phase flow monitoring, fluid displacement and saturation maps, and progressive fluid injection front behavior on a spatial scale of less than one millimeter [29,30]. Nuclear magnetic resonance imaging use in real cores, especially sandstone ones, is limited mainly by the creation of internal magnetic field gradients due to the magnetic susceptibility of the pore fluid and rock grains, so most studies have been conducted in glass bead porous environments [31].

Another category of monitoring the internal rock and fluid system during acid gas injection is geophysical methods. These methods include “time-lapsed seismic survey mapping” and “electrical resistivity tomography” used to monitor carbon dioxide migration in addition to laboratory-scale on a field scale. The seismic survey aims to track the movement, volume, and location of acid gas accumulation. The spatial distribution of sound velocity in the core is measured due to the changes in acid gas concentration at different points [11]. Observing the distribution of fluids within the core during carbon dioxide flooding experiments could also be done through “electrical resistivity tomography” due to the significant difference in the electrical conductivity of carbon dioxide and brine [32].

Common Safety Requirements in Acid Gas Laboratories

Due to the high toxicity of hydrogen sulfide and to safely open the parts after the tests, it is recommended to purge the apparatus parts with nitrogen. In addition to the nitrogen purging system, the entire setup is placed inside a cabin ventilated to a ZnO filter [2] or a caustic active carbon filter bed [33] to remove any H₂S gas present. After performing the required tests, the gas discharge of the safety valves, the separators’ gas outlets, and the nitrogen purge streams are finally collected and burned in a furnace. The operator adjusts and controls the pressure, temperature, containers’ fluid levels, and flow rates with the help of an automatic control system from outside the cabin

[2]. The room containing the apparatus is isolated, explosion-proofed, negative pressured with reliable ventilation, and equipped with gas detectors and remote monitoring for added safety [8].

Conclusions

Investigation of migration processes and multi-phase displacement of acid gas/oil/brine with respect to the interactions of reservoir rock and fluid with acid gas is crucial to maximizing oil recovery in enhanced recovery projects, estimating the storage capacity, ensuring the security of the storage process, and predicting the long-term effects of acid gas injection. Applying different methods for dynamically monitoring the internal rock and fluid system in core-flood experiments is the researchers' primary tool in conducting acid gas studies in simulated reservoir conditions. In order to quantify the parameters of acid gas reactive transfer modeling in underground formations and to assess the risk and potential of acid gas EOR/storage operations, the existence of high-quality experimental data is crucial. Conventional core-flood schemes are not suitable for acid gas injection studies due to the corrosiveness and toxicity of acid gas and the existence of complex interactions between reservoir rock and fluid and the acid gas injected. To provide a conceptual model of the acid gas study apparatus, we presented a comprehensive review of the methods of dynamic monitoring of internal rock and fluid system during acid gas core-flood tests, along with applications, strengths, and weaknesses of each method. Different areas of acid gas experimental research and common safety requirements in acid gas laboratories were also introduced. Since imaging methods are used only on a laboratory scale, and geophysical methods, despite their application at the field scale, are associated with many uncertainties, a reliable model for obtaining CO₂ saturation maps in the injection field could be obtained through investigating the effects of fluid saturation distribution (monitored by CT-scan) on the acoustic and electrical response of the rock. Due to the high volume of sulfur production and greenhouse gas emissions in Iran and the increasingly stringent international rules on preventing the emission of greenhouse gases, as well as the possibility of enhanced oil recovery through acid gas injection, investment in establishing or developing acid gas sequestration and EOR research centers in Iranian universities and industrial research centers seems to be smart and unavoidable.

References

- Bennion D B, Thomas E, Bennion D W, Bietz R (1996) Formation screening to minimize permeability impairment associated with acid gas or sour gas injection/disposal, paper presented at the Annual Technical Meeting.
- Ott H, de Kloe K, van Bakel M, Vos F, van Pelt A, Legerstee P, Bauer A, Eide K, van der Linden A, Berg S (2012) Core-flood experiment for transport of reactive fluids in rocks, *Review of Scientific Instruments*, 83, 8: 084501.
- Ribeiro A S, Mackay E J, Guimarães L (2016) Predicting Calcite Scaling Risk Due to Dissolution and Re-Precipitation in Carbonate Reservoirs During CO₂ Injection, Paper presented at the SPE International Oilfield Scale Conference and Exhibition.
- Bennion D, Thomas F, Schulmeister B, Imer D, Shtepani E, Becker L (2002) The phase behavior of acid disposal gases and the potential adverse impact on injection or disposal operations, paper presented at the Canadian International Petroleum Conference.
- Bachu S, Gunter W D (2005) Overview of acid- gas injection operations in Western Canada, *Greenhouse Gas Control Technologies 7* (pp. 443-448), Elsevier Science Ltd.
- Longworth H, Dunn G, Semchuck M (1996) Underground disposal of acid gas in Alberta, Canada: regulatory concerns and case histories, paper presented at the SPE Gas Technology Symposium.
- Ott H, Snippe J, De Kloe K, Husain H, Abri A (2013) Salt precipitation due to Sc-gas injection: single versus multi-porosity rocks, *Energy Procedia*, 37: 3319-3330.
- Carroll J J (2010) Acid gas injection and carbon dioxide sequestration, John Wiley and Sons.
- Chang C, Zhou Q, Guo J, Yu Q (2014) Supercritical CO₂ dissolution and mass transfer in low- permeability sandstone: Effect of concentration difference in water-flood experiments, *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 28: 328-342.
- Ma J, Petrilli D, Manceau J C, Xu R, Audigane P, Shu L, Jiang P, Le-Nindre Y M (2013) Core scale modelling of CO₂ flowing: identifying key parameters and experiment fitting, *Energy Procedia*, 37: 5464-5472.
- Gutierrez M, Katsuki D, Almrabat A (2012) Effects of CO₂ injection on the seismic velocity of sandstone saturated with saline water, *International Journal of Geosciences*, 3, 05: 908.
- Adebayo A R, Kandil M E, Okasha T M, Sanni M L (2017) Measurements of electrical resistivity, NMR pore size and distribution, and x-ray CT- scan for performance evaluation of CO₂ injection in carbonate rocks: A pilot study, *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 63: 1-11.
- Kalantari-Dahaghi A, Gholami V, Moghadasi J, Abdi R (2008) Formation damage through asphaltene precipitation resulting from CO₂ gas

injection in Iranian carbonate reservoirs, *SPE Production and Operations*, 23, 02: 210-214.

14. Snippe J, Berg S, Ganga K, Brussee N, Gdanski R (2020) Experimental and numerical investigation of wormholing during CO₂ storage and water alternating gas injection, *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 94: 102901.

15. Smith M M, Hao Y, Carroll S A (2017) Development and calibration of a reactive transport model for carbonate reservoir porosity and permeability changes based on CO₂ core-flood experiments, *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 57: 73-88.

16. Ott H, Oedai S, Pentland C, Eide-Engdahl K, van der Linden A, Gharbi O, Bauer A, Makurat A (2013) CO₂ reactive transport in limestone: flow regimes, fluid flow and mechanical rock properties, paper presented at the International Symposium of the Society of Core Analysts, Napa Valley, California, USA.

17. Bennion B, Bachu S (2008) Drainage and imbibition relative permeability relationships for supercritical CO₂/brine and H₂S/brine systems in intergranular sandstone, carbonate, shale, and anhydrite rocks, *SPE Reservoir Evaluation & Engineering*, 11, 03: 487-496.

18. Zhang Y, Kogure T, Chiyonobu S, Lei X, Xue Z (2013) Influence of heterogeneity on relative permeability for CO₂/brine: CT observations and numerical modeling, *Energy Procedia*, 37: 4647-4654.

19. Perrin J C, Benson S (2010) An experimental study on the influence of sub-core scale heterogeneities on CO₂ distribution in reservoir rocks, *Transport in Porous Media*, 82, 1: 93-109.

20. Wildenschild D, Sheppard A P (2013) X-ray imaging and analysis techniques for quantifying pore-scale structure and processes in subsurface porous medium systems, *Advances in Water Resources*, 51: 217-246.

21. Dávila G, Dalton L, Crandall D M, Garing C, Werth C J, Druhan J L (2020) Reactive alteration of a Mt. Simon Sandstone due to CO₂-rich brine displacement, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 271, 227-247.

22. Zhang Y, Kogure T, Nishizawa O, Xue Z (2017) Different flow behavior between 1-to-1 displacement and co-injection of CO₂ and brine in Berea sandstone: Insights from laboratory experiments with X-ray CT imaging, *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 66: 76-84.

23. Zhang Y, Nishizawa O, Park H, Kiyama T, Lei X, Xue Z (2017) The Pathway-Flow Relative Permeability of CO₂: Measurement by Lowered Pressure Drops, *Water Resources Research*, 53, 10: 8626-8638.

24. Pini R, Madonna C (2016) Moving across scales:

a quantitative assessment of X-ray CT to measure the porosity of rocks, *Journal of Porous Materials*, 23, 2: 325-338.

25. Boone M A, Bultreys T, Masschaele B, Loo D V, Hoorebeke L V, Cnudde V (2016) In-situ, real time micro-CT imaging of pore scale processes, the next frontier for laboratory based micro-CT scanning, In 30th International symposium of the Society of Core Analysts, Society of Core Analysts (SCA).

26. Cnudde V, Boone M N (2013) High-resolution X-ray computed tomography in geosciences: A review of the current technology and applications, *Earth-Science Reviews*, 123: 1-17.

27. Crawshaw J P, Boek E S (2013) Multi-scale Imaging and Simulation of Structure, Flow and Reactive Transport for CO₂ Storage and EOR in Carbonate Reservoirs, *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 77, 1: 431-458.

28. Menke H P, Gao Y, Andrew M (2018) Using nano-CT and high-contrast imaging to inform microporosity permeability during Stokes- Brinkman flow simulations on μ CT images, In AGU Fall Meeting.

29. Zhao Y, Zhang Y, Lei X, Zhang Y, Song Y (2020) CO₂ flooding enhanced oil recovery evaluated using magnetic resonance imaging technique. *Energy*, 203: 117878.

30. Suckane T, Soukawa S, Iwatani S, Tsushima S, Hirai S (2005) Behavior of supercritical CO₂ injected into porous media containing water, *Energy*, 30, 11: 2370-2382.

31. Afrough A, Shakerian M, Zamiri M S, MacMillan B, Marica F, Newling B, Romero-Zerón L, Balcom B J (2018) Magnetic-Resonance Imaging of High-Pressure Carbon Dioxide Displacement: Fluid/Surface Interaction and Fluid Behavior, *SPE Journal*, 23, 03: 772-787.

32. Falcon-Suarez I, North L, Amalokwu K, Best A (2016) Integrated geophysical and hydromechanical assessment for CO₂ storage: shallow low permeable reservoir sandstones, *Geophysical Prospecting*, 64(Advances in Rock Physics), 828-847.

33. Berg S, Oedai S, Landman A, Brussee N, Boele M, Valdez R, Van Gelder K (2010) Miscible displacement of oils by carbon disulfide in porous media: Experiments and analysis, *Physics of Fluids*, 22, 11: 113102.