

بررسی مکانیسمی ذخیره‌سازی گاز کربن دی اکسید با استفاده از منحنی‌های تراوایی نسبی

شایان فقیهی، جمشید مقدسی*، محمد جامی‌الاحمدی

دانشکده مهندسی نفت، دانشگاه صنعت نفت، اهواز، ایران

چکیده: یکی از مشکل‌های حال حاضر که جامعه‌های جهانی به آن گرفتار هستند، آلودگی محیط‌زیست ناشی از آزادسازی گازهای گلخانه‌ای می‌باشد. جداسازی و ذخیره‌سازی کربن یکی از مطمئن‌ترین راه‌حل‌های کوتاه تا بلند مدت برای کاهش گازهای اسیدی مخاطره‌آمیز تولید شده در صنایع گوناگون می‌باشد. هرچند که سفره‌های آب نمک عمیق کاندید مناسبی برای ذخیره‌سازی حجم بالایی از گاز کربن دی اکسید می‌باشند، ولی مخزن‌های تخلیه شده نفت و گاز نیز می‌توانند هم‌زمان گزینه مناسبی برای ذخیره گاز و هم روشی مطمئن برای افزایش تولید هیدروکربن‌ها باشند. برای آن که یک عملیات ذخیره‌سازی موفقیت‌آمیز باشد، ضروری است که توان ذخیره‌سازی مخزن، تزریق پذیری، و فاکتور نگهداری آن مورد بررسی قرار گیرد. هرچند تاکنون پژوهش‌های آزمایشگاهی کمی به‌ویژه روی بحث تزریق‌پذیری مخزن انجام شده است؛ به طوری که این فاکتور به طور مستقیم توسط ویژگی‌های سنگ و سیال مانند تراوایی مطلق و نسبی کنترل می‌شود. بنابراین، تعیین و اندازه‌گیری منحنی‌های تراوایی نسبی و نقطه‌های پایانی آن‌ها در فهم ویژگی‌های جریانی درون محیط متخلخل الزامی می‌باشد. در اولین بخش این پژوهش، منحنی‌های تراوایی نسبی آب/کربن دی اکسید برای سه نمونه سنگ با تراوایی مطلق متفاوت اندازه‌گیری شده است. برای این منظور ارزیابی‌های آزمایشگاهی در بعد مغزه روی سنگ‌های کربناته انجام گرفته است. در ادامه برای تعیین مکانیسم‌های پیش‌رو در تزریق گاز کربن دی اکسید به یک لایه، و همچنین ارزیابی درصد گاز حبس شده، از گاز نیتروژن با همان شرایط اولیه با تقریب بسیار خوبی استفاده شده است.

واژه‌های کلیدی: ذخیره‌سازی کربن دی اکسید، تراوایی نسبی، گازهای گلخانه‌ای، سیلاب زنی، مکانیسم.

KEYWORDS: CO₂ Sequestration, Relative Permeability, Greenhouse Gases, Core flooding

مقدمه

کربن دی اکسید، بخار آب، متان، و ازون می‌داند [۳، ۴]. مقدار مشخصی از این گازها برای جلوگیری از یخ زدن کره زمین الزامی می‌باشند، اگرچه افزایش این مقدار موجب افزایش نگرانی زیست محیطی جدی می‌شود.

پژوهش‌ها نشان‌دهنده افزایش ناگهانی دمای زمین در ۱۵۰ سال اخیر، با عنوان گرمایش جهانی^۱ می‌باشند [۱، ۲]. مجمع بین‌المللی بررسی تغییرهای آب و هوایی^۲ این افزایش دما را مربوط به انتشار گازهای گلخانه‌ای مانند

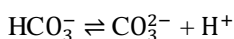
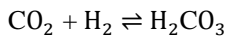
+ E-mail: j.moghadasi@put.ac.ir

* عهده دار مکاتبات

(۱) Global Warming

(۲) International Panel on Climate Change (IPCC)

حس انحلالی^۷ نوع دیگری از مکانیسم‌ها می‌باشد که بیانگر کل کربن دی اکسید به دام افتاده از طریق انحلال آن در آب سازند به صورت تابعی از فشار، دما و شوری می‌باشد. این فرایند با واکنش‌های شیمیایی و فیزیکی به صورت سه مکانیسم مجزا (نفوذ^۸، ادغام همرفتی^۹، انحلال شیمیایی) تعریف می‌شود. در مکانیسم نفوذ، کربن دی اکسید به سبب اختلاف پتانسیل شیمیایی با آب سازند، در آن با فرایند انتقال جرم حل می‌شود. در نتیجه انحلال کربن دی اکسید فوق بحرانی در آب، آب گاز زده شده دانسیته بیشتری (حدود ۱٫۵-۱ درصد) نسبت به آب خالص خواهد داشت، به طوری که این اختلاف دانسیته موجب حرکت جبهه‌ی آب/کربن دی اکسید به سمت پایین، با نیروهای بایانسی، و حرکت آب بدون کربن دی اکسید^{۱۰} به سمت بالا می‌شود. در این حالت ترمودینامیکی که با عنوان ادغام همرفتی شناخته می‌شود، مقدار چشمگیری از کربن دی اکسید، در مقایسه با سایر مکانیسم‌های انحلال، حس خواهد شد. در مکانیسم انحلال شیمیایی طی یک واکنش تعادلی دو مرحله‌ای (معادله (۱))، کربنیک اسید تولید و کربن دی اکسید مصرف می‌شود.



در نتیجه تشکیل کربنیک اسید، pH محیط کاهش یافته و با اسیدی شدن آب، امکان انحلال سنگ و تغییر تخلخل و تراوایی آن محتمل می‌شود. این مکانیسم که حس مینرال^{۱۱} نامیده می‌شود، آهسته‌ترین مکانیسم شناخته شده برای حس کربن دی اکسید، به‌ویژه در سنگ‌های ماسه سنگی می‌باشد.

گزینه‌های گوناگونی برای عملیات جداسازی و ذخیره گاز، متناسب با بازدهی ذخیره سازی^{۱۲} آن‌ها موجود می‌باشد. تزریق گاز کربن دی اکسید می‌تواند در مخزن‌های آب شور زیرزمینی^{۱۳} و همچنین مخزن‌های درحال تخلیه نفت و گاز انجام گیرد [۷]؛ به طوری که اولین تجربه مربوط به عملیات ازدیاد برداشت مخزن‌های درحال تخلیه یا تخلیه شده نگراس آمریکا، آبرتا کانادا،

بسیاری از پژوهش‌های بیانگر این موضوع هستند که گاز کربن دی اکسید اصلی‌ترین گاز گلخانه‌ای مخرب محیط‌زیست می‌باشد. پژوهش‌های اخیر روش‌های درمانی گوناگونی ارائه کرده‌اند، که از این میان می‌توان به ذخیره‌سازی در اعماق اقیانوس‌ها [۵]، جداسازی به روش کربناته کردن معدنی^۶ [۶]، جایگزینی سوخت‌های فسیلی با انرژی‌های تجدیدپذیر، و جداسازی و ذخیره کربن^۳ [۱۶] اشاره کرد. در روش ذخیره سازی در آب‌های عمیق، مقدار مشخصی از گاز اسیدی به اعماق اقیانوس‌ها تزریق شده و به دلیل قرار گرفتن کربن دی اکسید در فاز فوق بحرانی^۴، طبق نیروهای بایانسی به دام می‌افتد. نکته قابل توجه در این روش امکان آلوده کردن آب‌ها و درصد موفقیت‌آمیز بودن این روش می‌باشد که نیاز به بررسی‌های بیش‌تری دارد. در روش کربناته کردن، روی مکانیسم‌ها و واکنش‌های محتمل برای تغییر حالت کربن دی اکسید به کربنات‌های جامد غیرمضر تمرکز می‌شود. به تازگی در کشورهای توسعه‌یافته تمرکز روی کاهش درصد مصرف سوخت‌های فسیلی و در برابر استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر می‌باشد، که این روش نیز به دلیل وابستگی شدید جامعه‌ها به سوخت‌های فسیلی، در بلند مدت ممکن است عملی و فراگیر شود. بنابراین، روش ذخیره‌سازی در مخازن زیرزمینی به عنوان بهترین روش درمانی برای کاهش گازهای مخاطره‌آمیز شناخته می‌شود.

کربن دی اکسید توسط دو مکانیسم حس^۵ فیزیکی و شیمیایی، در مقیاس زمانی و حجمی متفاوت می‌تواند در مخازن زیرزمینی به دام افتد. از آن جهت که عمق تزریقی به طور معمول بیش‌تر از ۸۰۰ متر می‌باشد کربن دی اکسید در فاز فوق بحرانی (دمای °C ۳۱٫۱ و فشار ۱۰۷۰ psi) خود قرار خواهد داشت. کربن دی اکسید فوق بحرانی از دید دانسیته همانند مایع و از دید گرانشی همانند گاز رفتار می‌کند؛ که به سبب آن دانسیته بیش‌تری نسبت به فاز گازی خود دارد، و بنابراین پس از تزریق به لایه مورد نظر با توجه به نیروهای بایانسی و تأثیر فشار، کربن دی اکسید به بالا مهاجرت کرده تا زمانی که به یک لایه ناتراوا برسد و در زیر آن تجمع یابد (حس هیدرودینامیکی). در برابر، زمانی که نیروهای مویینه در منافذ غالب باشند به سبب فرایند آشام، فیلم نازکی از آب روی لبه منافذ تجمع کرده و با اتصال آن‌ها، جریان پیوسته کربن دی اکسید منقطع شده و حس می‌شود. به این مکانیسم کربن دی اکسید توسط فاز آب به دام می‌افتد، حس باقیمانده یا مویینه^۶ گویند.

(۱) Ocean Storage

(۳) Carbon Capture and Storage

(۵) Trapping Mechanism

(۷) Dissolution Trapping

(۹) Convective Mixing

(۱۱) Mineral Trapping

(۱۳) Deep Saline Aquifers

(۲) Mineral Carbonation

(۴) Super Critical

(۶) Residual or Capillary Trapping

(۸) Diffusion

(۱۰) Non-rich Water

(۱۲) Storage Efficiency

با بررسی نقطه‌های پایانی منحنی‌های تراوایی نسبی آب/کربن دی اکسید در دوفاز مایع و فوق بحرانی، پتانسیل حبس گاز و تأثیر تزریق پذیری بر روی بازدهی ذخیره‌سازی کربن دی اکسید را تعیین کردند. یانگ و همکاران^[۱۴] در سال ۲۰۱۷ میلادی پژوهش‌های آزمایشگاهی روی نمونه‌های ماسه سنگی با تراوایی پایین به منظور تعیین منحنی‌های تراوایی نسبی سامانه آب/کربن دی اکسید با استفاده از روش تزریق شبه پایا انجام داده‌اند. آن‌ها با استفاده از عکس برداری با پرتو ایکس توانستند توزیع سیال درون مغزه را ببینند و رفتار سیال را به منظور درک بهتر درصد کربن دی اکسید حبس شده تعیین کنند.

هدف این پژوهش بررسی و ارزیابی آزمایشگاهی منحنی‌های تراوایی نسبی سامانه آب/کربن دی اکسید در دوفاز مایع و فوق بحرانی آن، روی سه نمونه سنگ کربناته با گستره تراوایی مطلق و تخلخل مناسب، مربوط به یکی از میدان‌های نفتی جنوب غرب ایران، می باشد. منحنی‌های تراوایی نسبی از طریق آزمایش‌های سیلاب‌زنی مغزه در سامانه آب/کربن دی اکسید انجام گرفته است؛ اما از این جهت که در روش تزریق ناپایا ممکن است مفاد‌های تراوایی نسبی متعلق به اشباع‌های کم آب و کربن دی اکسید به‌طور دقیق به‌دست نیاید، همه آزمایش‌ها در شرایط ترمودینامیکی یکسان با سامانه آب/کربن دی اکسید، برای سامانه آب/نیتروژن نیز انجام شده است. با استفاده از گاز نیتروژن به عنوان گازی بی اثر، از واکنش با آب جلوگیری کرده و در نتیجه به سبب طولانی بودن آزمایش‌های، ویژگی‌های سنگ تغییر نخواهد کرد.

بخش تجربی

نمونه مغزه

تاکنون بیش‌تر پژوهش‌ها بر روی بررسی تراوایی نسبی دوفازی درون نمونه‌های ماسه سنگی بوده‌است، درحالی که در این پژوهش بر روی نمونه مغزه‌های کربناته (با گستره تراوایی مطلق ۱۰-۰٫۳ میلی داری و تخلخل ۲۴-۱۹٪) تهیه شده از یکی از میدان‌های جنوب غرب ایران، مطالعه انجام گرفته است. شکل ۱ نتیجه آزمون پراش پرتو ایکس^۸ انجام شده روی یکی از نمونه‌ها را نشان می‌دهد. با تحلیل این آزمون، مشخص شد که بیش از ۹۸ درصد سنگ از دولومیت تشکیل شده است. از آن جا که بیش‌تر سنگ‌های دولومیتی ساختار ناهمگن دارند، مطالعه روی آن‌ها ارزشمند خواهد بود.

و همچنین میدان‌های خاورمیانه می‌باشد^[۸]. هرچند با توجه به حجم قابل ذخیره آن‌ها در مقایسه با سفره‌های آب شور، از اهمیت کم‌تری برخوردارند. تاکنون عملیات جداسازی و ذخیره گاز به صورت موفقیت آمیز در میدان‌های آلبرتا کانادا، اسلیپنر دریا شمال، و مخزن آبی داگر در فرانسه انجام گرفته‌است^[۹].

از دید زمین‌شناسی برای این که یک مخزن کاندید ذخیره گاز شود، باید ظرفیت ذخیره‌سازی^۱، تزریق‌پذیری^۲، و فاکتور نگهداری^۳ را داشته باشد^[۱۰، ۱۳]. نخست مخزن باید دارای حجم متخلخل کافی به منظور نگهداری مقدار چشمگیر از کربن دی اکسید باشد، تراوایی کافی برای عبوردهی سیال در محیط متخلخل و توانایی پذیرش شدت جریانی چشمگیر داشته‌باشد، و سرانجام مخزن باید دارای لایه ناتراوا برای حفظ گاز تزریق شده و جلوگیری از فرار آن از لایه‌های بالایی باشد. از سوی دیگر همه این پژوهش‌های مخزنی همراه با مسئله‌های اقتصادی بررسی می‌شوند. همان‌گونه که گفته شد، به منظور تزریق کربن دی اکسید به مخزن‌های زیرزمینی، شناخت ویژگی‌های جریانی مربوط به گاز تزریق شده در محیط آبی درجای مخزن الزامی می‌باشد. افزون بر این، شناخت و اندازه‌گیری این ویژگی‌های در ایجاد یک مدل مربوط به تزریق‌پذیری کربن دی اکسید در مخازن، مهم جلوه می‌کند. به‌طوری که مهم‌ترین عنصرهای تأثیرگذار بر تزریق‌پذیری کربن دی اکسید، تراوایی نسبی، اشباع گاز حبس شده، و فشارهای مویینه می‌باشند^[۱۱]؛ بنابراین، تعیین شکل منحنی‌های تراوایی نسبی و نقطه‌های پایان^۴ آن‌ها در درک راندمان فرایند جایجایی سیال، توزیع جبهه کربن دی اکسید در فضای متخلخل، پیش‌بینی شدت جریان قابل تزریق، و سرانجام طراحی مناسب عملیات ذخیره‌سازی کربن دی اکسید در مخزن‌های زیرزمینی ضروری می‌باشند. ولی تاکنون پژوهش‌های آزمایشگاهی محدودی، به‌ویژه روی سنگ‌های کربناته انجام گرفته است و بیش‌تر پژوهش‌ها روی پژوهش‌های مدل‌های ریاضی و شبیه‌سازی‌ها تمرکز داشته‌اند. بنیون و باکو^۵ [۳، ۱۲] طی پژوهش‌های آزمایشگاهی، به کمک روش سیلاب زنی ناپایا روی نمونه سنگ‌های گوناگون میدان‌های کانادا، منحنی‌های تراوایی نسبی برای سامانه آب/کربن دی اکسید ارائه داده‌اند. آن‌ها تلاش کردند تا بین تراوایی مطلق نمونه سنگ‌ها و قطر میانگین ذره‌ها با اشباع سیال درون مغزه با هدف کشف معادله‌ای ارتباط برقرار کنند. لوین و همکاران^[۱۳] در سال ۲۰۱۳ میلادی

(۱) Storage efficiency

(۳) Containment

(۵) Benion and Bachu

(۷) Zhang *et al.*

(۲) Injectivity

(۴) End-point relative permeability

(۶) Levine *et al.*

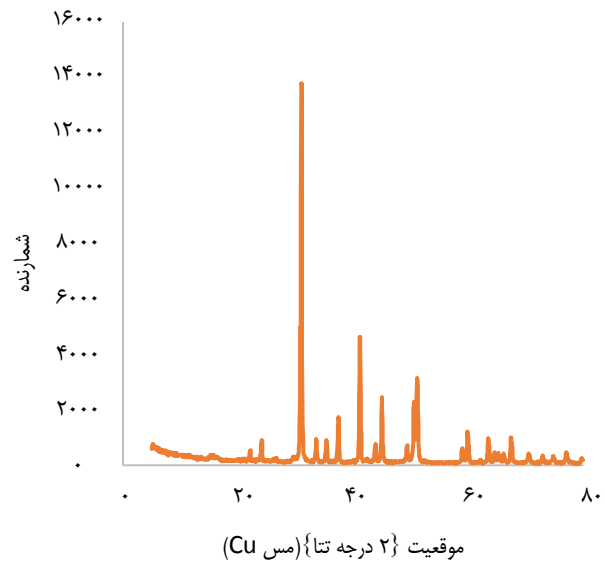
(۸) X-Ray Diffraction

جدول ۱- ویژگی های سیال استفاده شده در این پژوهش

| سیال | دانسیتته (kg/m ³) | اختلاف دانسیته آب و کربن دی اکسید (kg/m ³) | گرانروی (cp) | گرانروی نسبی آب و کربن دی اکسید |
|--|-------------------------------|--|--------------|---------------------------------|
| حالت اول | CO ₂ | ۸۰۱,۶۵ | ۲۱۳,۰۵ | ۰,۰۷۱ |
| | آب نمک | ۱۰۱۴,۷ | | ۰,۹۳ |
| | N ₂ | ۱۰۲,۶۷ | | ۰,۰۱۹۶ |
| حالت دوم | CO ₂ | ۲۸۹,۷۹ | ۷۱۵,۰۸ | ۰,۰۲۴ |
| | آب نمک | ۱۰۰۴,۹ | | ۰,۴۹۹ |
| | N ₂ | ۹۹,۰۰۱ | | ۰,۰۲۱ |
| حالت اول: دما = ۲۵°C فشار = ۱۳۲۰ (psi) | | حالت دوم: دما = ۶۰°C فشار = ۱۴۵۰ (psi) | | |

دستگاه مورد استفاده در آزمایش‌ها

شکل ۲ شمایی از دستگاه طراحی شده به منظور سیلاب‌زنی در فشارهای بالا، موجود در دانشکده نفت، دانشگاه صنعت نفت می‌باشد. محفظه‌های سیال، مغزه نگهدار، و رگلاتور تثبیت فشار^۱ در یک گرم‌کن^۲ با قابلیت تنظیم دما قرار گرفته‌اند. همه تجهیزات از جنس فولاد، مناسب برای سیال خورنده ساخته شده‌اند. نمونه مغزه تخت توسط دو لایه تفلون و روکش گرمایی از درون به بیرون، به منظور جلوگیری از فرار سیال از مغزه، پوشیده شده و سپس در مغزه نگهدار دارای تیوب از جنس وایتون قرار می‌گیرد. تجهیزات همگی توانایی تحمل فشار تا ۱۵۰۰ psi را دارند. سپس سیال مورد نظر توسط پمپ با شدت جریان ثابت از محفظه سیال به مغزه تزریق می‌شود. دو سمت مغزه نگهدار از طریق اتصالات به یک فشار سنج اختلافی متصل شده‌است که در طول زمان وظیفه نمایش اختلاف فشار دوسر مغزه را به عهده دارد. رگلاتور تثبیت فشار در خروجی وظیفه ثابت نگاه داشتن فشار سیال درون مغزه را به عهده دارد. فشار مخزن همواره حداقل ۵۰۰ psi کم‌تر از فشار روی مغزه می‌باشد تا از فرار سیال از مغزه جلوگیری شود. سیال خروجی سرانجام با عبور از یک جداکننده سه فاز (آب، بخار آب و گاز) جمع‌آوری و نرخ تولیدی گزارش می‌شود. بخار آب همراه با گاز پس از عبور از یک محفظه سیلیکا ژل به دام افتاده که مقدار آن با ترازوی دقیقی به دست می‌آید، و گاز خروجی نیز به وسیله یک گازسنج^۳ اندازه‌گیری می‌شود. از یک سامانه جمع‌آوری داده^۴ به منظور گزارش اطلاعاتی همچون فشار تزریق، اختلاف فشار دو سر مغزه، دمای گرم‌کن نسبت به زمان استفاده شده‌است.



شکل ۱- نتیجه آزمون پراش پرتو ایکس بر روی نمونه سنگ مورد استفاده در این پژوهش

ویژگی های سیال

آب نمک (۳۰۰۰۰ ppm)، کربن دی اکسید خالص (درصد خلوص ۹۹,۹۹٪) و نیتروژن خالص (درصد خلوص ۹۹,۹۹٪) برای آزمایش‌های سیلاب‌زنی تهیه شدند. به منظور فراهم‌سازی هر دو فاز مایع و فوق‌بحرانی کربن دی اکسید، از دید ترمودینامیکی آزمون‌ها در دو بخش قرار گرفته‌اند. در حالت اول، آزمایش‌های در دمای معمولی اتاق و فشار ۱۳۲۰ psi، و در حالت دوم در دمای ۶۰ درجه سلسیوس و فشار ۱۴۵۰ psi انجام گرفته‌اند. جدول ۱ گزارشی از شرایط سیال‌های در آزمایش‌های ارایه می‌کند.

(۱) Back Pressure Regulator (BPR)

(۲) Oven

(۳) Gasometer

(۴) Data acquisition

به طوری که بالانویس 0 مربوط به نقطه‌های پایانی، S_w^* عدد اشباع آب نرمالیزه شده از رابطه (۱) و λ شاخص توزیع اندازه ذره‌ها می‌باشد. در حالت اول دمای معمولی اتاق و فشار ۱۳۲۰ psi برای فشار مخزن و فشار ۲۰۰۰ psi به عنوان فشار محدود کننده^۶ انتخاب شده است. در گروه دوم آزمایش‌ها پس از تعیین تراوایی مطلق مغزه، سامانه در دمای ۶۰ درجه سلسیوس به مدت ۸ ساعت قرار گرفته است تا از تعادل گرمایی اطمینان شود و سپس فشار ۱۴۵۰ psi به عنوان فشار مخزن و فشار ۲۰۰۰ psi به عنوان فشار محدود کننده انتخاب شده است. روش تزریق ناپایا برای تعیین تراوایی نسبی آب و گاز در دوفاز کربن دی‌اکسید مایع و فوق‌بحرائی انجام گرفته است. فرایند تخلیه تا زمانی ادامه پیدا کرده که آبی تولید نشود و اختلاف فشار دو سر مغزه پایدار شود. در طول فرایند تخلیه، حجم آب تولیدی، عدد ترازو، اختلاف فشار، و حجم گاز خروجی نسبت به زمان اندازه‌گیری شده است. همه مرحله‌های این فرایند با گاز نیتروژن نیز انجام گرفته است تا اطمینان از انجام نشدن واکنش انحلال و تغییر کانی در مغزه به دست آید و نقطه‌های پایانی تراوایی نسبی و همچنین درصد آب و گاز حبس شده پس از هر دو سیکل تخلیه و آشام به دست آید. رویه یکسانی برای سایر نمونه مغزه‌ها در دو حالت ترمودینامیکی یاد شده انجام گرفته شده است.

نتیجه‌ها و بحث

تراوایی مطلق

به منظور تعیین تراوایی نسبی سامانه توسط نرم افزار سندرا، یکی از اصلی‌ترین داده‌های مورد نیاز به منظور پارامتر تنظیم کننده برای تطبیق داده‌های آزمایشگاهی و شبیه‌سازی، تراوایی مطلق نمونه مغزه می‌باشد. بعد از تزریق آب با شدت جریان‌های متفاوت و ثبت داده‌های اختلاف فشار دو سر مغزه، تا رسیدن به مقدار ثابت برای هر شدت جریان، با رسم نمودار اختلاف فشار تثبیت شده بر حسب شدت جریان و تعیین شیب خط، می‌توان تراوایی مطلق مغزه را با استفاده از معادله داری به دست آورد.

شکل‌های ۳ و ۴ به ترتیب داده‌های اختلاف فشار نسبت به زمان، و اختلاف فشار تثبیت شده بر حسب شدت جریان را برای مغزه شماره ۲ نشان می‌دهد. نتیجه‌های آرایه شده در جدول ۲ شامل مشخصه‌های فیزیکی مغزه، پیش از آزمون تراوایی نسبی در دمای اتاق و فشار اتمسفری، با فشار محدود کننده ۲۰۰۰ psi به دست آمده است.

تراوایی نسبی و تعیین درصد حبس گاز تزریق شده در دو مکانیسم آشام و تخلیه استفاده شده است. به طوری که پس از اشباع مغزه توسط آب نمک، در شرایط ترمودینامیکی حالت اول (دمای معمولی اتاق و فشار ۱۳۲۰ psi) نیتروژن به مغزه با شدت جریان ۰.۵ mL/min تزریق شده و آزمایش تا جایی ادامه پیدا می‌کند که دیگر آب نمک از مغزه خارج نشود. در این حالت با اندازه‌گیری آب و گاز خارج شده در جداکننده، و به کمک محاسبات تعادل جرمی می‌توان اشباع باقیمانده آب و درصد گاز حبس شده در سامانه را اندازه‌گیری کرد؛ سپس با تزریق دوباره آب نمک به سامانه با شدت جریان ۰.۵ mL/min به مدت حداقل یک روز (تا جایی که گاز خروجی در گازسنج دیده نشود) آزمایش ادامه می‌یابد. همه مرحله‌های گفته شده برای شرایط ترمودینامیکی حال دوم (دمای ۶۰ درجه سلسیوس و فشار ۱۴۵۰ psi) نیز انجام شد.

برای رسم منحنی‌های تراوایی نسبی سیالات می‌توان از هر دو روش ضمنی و صریح با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی استفاده کرد روش JBN^[۱۵] یکی از شناخته‌شده‌ترین روش‌های صریح برای محاسبه و رسم منحنی‌های تراوایی گاز و نفت یا آب و نفت، برای داده‌های سیلاب زنی در محیط متخلخل خطی می‌باشد. از سوی دیگر، روش ضمنی نیاز به تطبیق^۲ داده‌های آزمایشگاهی اختلاف فشار و تولیدی با استفاده از روش‌های عددی موجود دارد [۱۶]. در این پژوهش از نرم افزار سندرا^۳ به منظور تطبیق داده‌های آزمایشگاهی با مدل‌های موجود استفاده شد. سندرا یک نرم افزار شبیه‌ساز یک بعدی بر پایه مدل نفت سیاه است، که مناسب برای آنالیز آزمون‌های ویژه مغزه^۴ می‌باشد ورودی‌های مورد نیاز نرم افزار شامل داده‌های اختلاف فشار دوسر مغزه، مقدار آب و گاز تولیدی نسبت به زمان می‌باشد. پس از وارد کردن داده‌ها به نرم افزار، شبیه‌ساز با استفاده از مدل‌های موجود و تطبیق داده‌های آزمایشگاهی و شبیه‌سازی، بهترین نمودار تراوایی نسبی سامانه را گزارش می‌دهد. در طول پژوهش‌های ما مدل‌های گوناگون تعیین تراوایی نسبی و فشار موینگی بررسی شده‌اند و بهترین نتیجه‌ها با مدل بردین^[۱۷] به دست آمدند رابطه‌های زیر فرمول‌های ریاضی آرایه شده توسط بردین برای سامانه آب و گاز می‌باشند نخست برای تعیین اشباع آب نرمالیزه شده داریم:

$$S_w^* = \frac{S_w - S_{wi}}{1 - S_{wi} - S_{gr}} \quad (2)$$

رابطه‌های تراوایی نسبی آب و گاز به ترتیب در زیر آرایه شده‌اند:

$$K_{rw} = K_{rw}^0 (S_w^*)^{\frac{r+\lambda}{\lambda}} \quad (3)$$

$$K_{rg} = K_{rg}^0 (1 - S_w^*)^r [1 - (1 - S_w^*)^{\frac{r+\lambda}{\lambda}}] \quad (4)$$

(۱) Johnson-Bossler-Naumann (JBN)

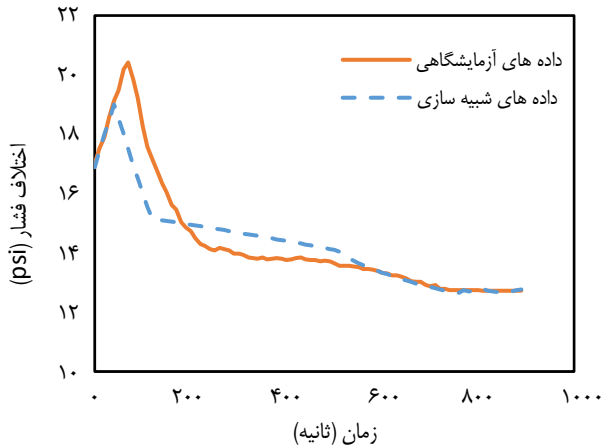
(۳) Sendra

(۵) Burdin

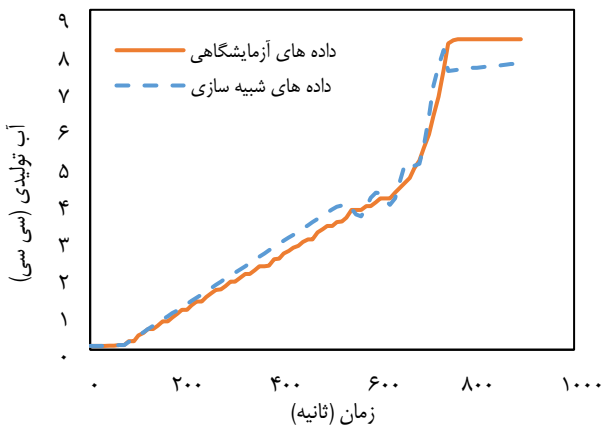
(۲) History matching

(۴) Special Core Analysis (SCAL)

(۶) Confining pressure



شکل ۵- داده‌های اختلاف فشار نسبت به زمان تطبیق شده توسط نرم افزار برای مغزه شماره ۱



شکل ۶- داده‌های آب تولیدی نسبت به زمان تطبیق شده توسط نرم افزار برای مغزه شماره ۱

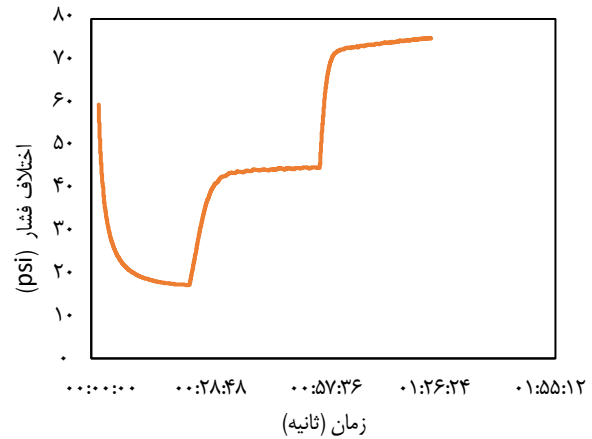
سایر منحنی‌های تراوایی نسبی برای سامانه آب و کربن دی اکسید در شرایط ترمودینامیکی حالت اول (دمای معمولی اتاق و فشار ۱۳۲۰ psi) در شکل‌های ۸ و ۹ به تصویر کشیده شده‌اند. با هدف درک بهتر از اشباع-های باقیمانده و مقدارهای تراوایی نسبی متناظر با آن‌ها، همراه با منحنی‌های تراوایی نسبی در مقیاس معمولی، نمودارهای مقیاس لگاریتمی نیز ترسیم شده‌اند. با تحلیل نمودارهای تراوایی نسبی می‌توان اطلاعات ارزشمندی در مورد نحوه توزیع سیالات درون مغزه‌ها به دست آورد. افزون بر این، ورودی همه شبیه‌سازهای مخزنی داده‌های تراوایی نسبی نسبت به اشباع می‌باشد.

نتیجه‌های حالت دوم

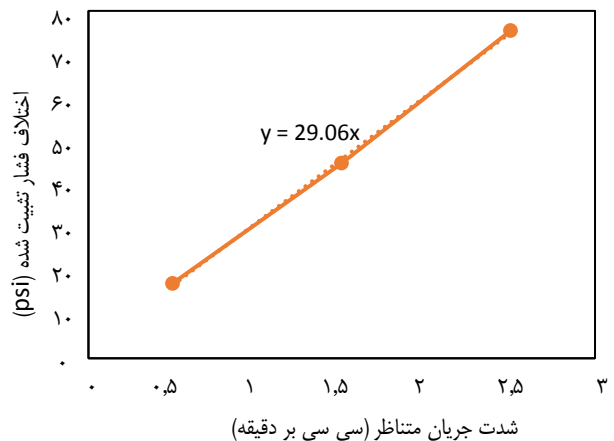
برای سامانه آب و کربن دی اکسید در فاز فوق بحرانی، رویه بالا برای همه مغزه‌ها انجام گرفته است و نتیجه‌ها تشریح شده‌اند (شکل ۱۰ تا ۱۲).

جدول (۲) ویژگی‌های فیزیکی نمونه سنگ‌ها

| نمونه مغزه | لیتولوژی | تراوایی مطلق | حجم فضای متخلخل |
|------------|----------|------------------|-----------------|
| ۱ | دولومیت | ۹,۳۱ میلی دارسی | ۲۰,۴۹ سی سی |
| ۲ | دولومیت | ۴,۶۸ میلی دارسی | ۱۴,۶ سی سی |
| ۳ | دولومیت | ۰,۳۳۲ میلی دارسی | ۱۱,۲۴ سی سی |



شکل ۳- داده‌های اختلاف فشار بر حسب زمان برای سه شدت جریان گوناگون

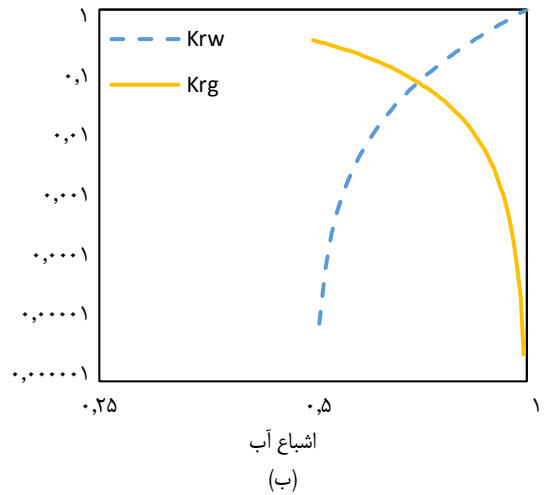
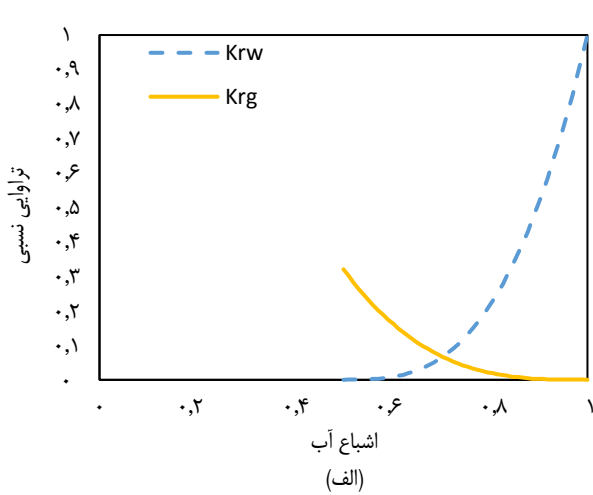


شکل ۴- داده‌های اختلاف فشار تثبیت شده بر حسب شدت جریان متناظر

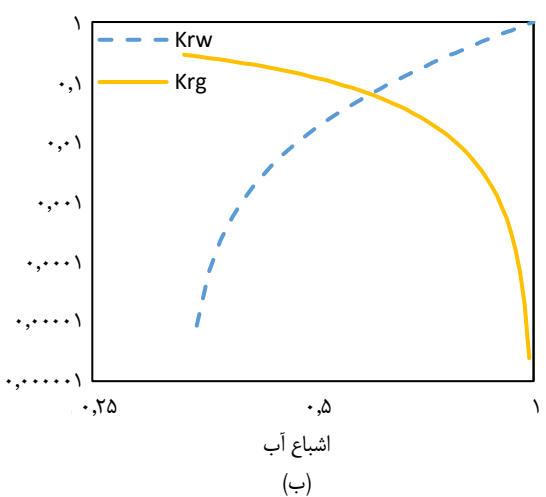
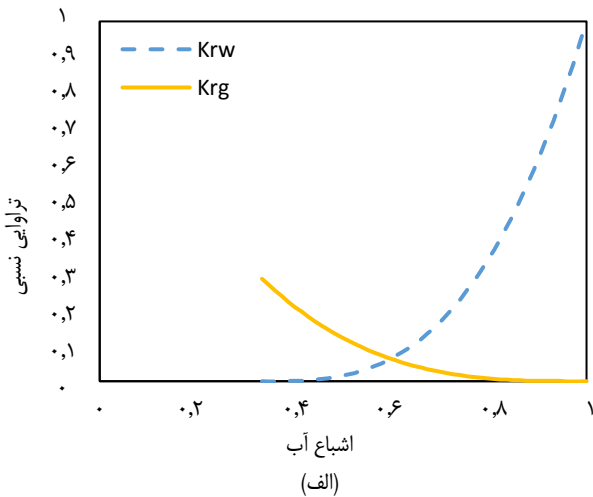
نتیجه‌های تراوایی نسبی

نتیجه‌های حالت اول

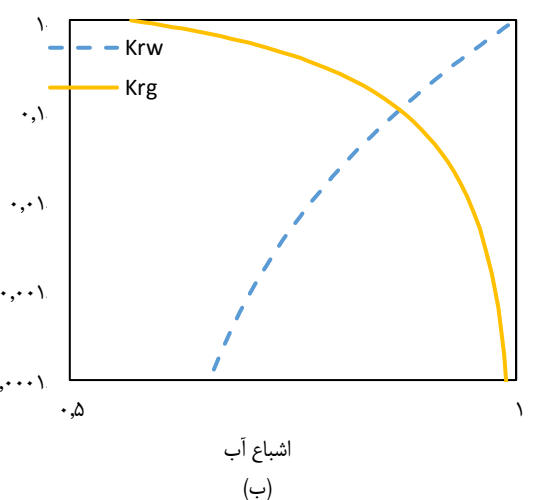
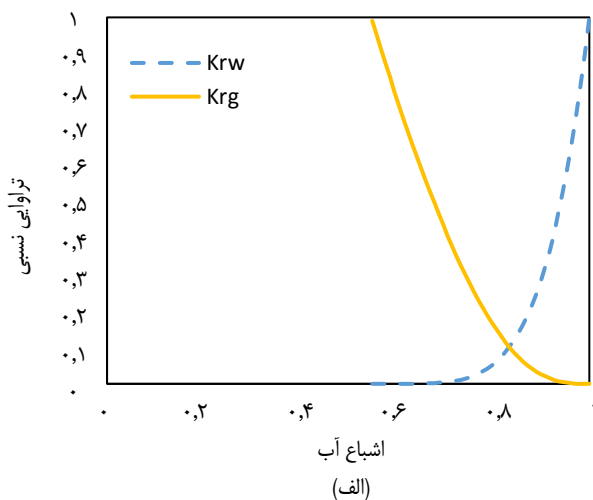
به منظور تعیین تراوایی نسبی آب و کربن دی اکسید در هر مغزه، متناسب با تراوایی مطلق آن‌ها، تطبیق نتیجه‌ها توسط شبیه‌ساز نرم‌افزار سندرا، برای داده‌های اختلاف فشار و سیال‌های خروجی طی فرایند تخلیه ناپایا با تزریق گاز با شدت جریان ۰,۵ میلی لیتر بر دقیقه انجام گرفته است. شکل‌های ۵ و ۶ به‌عنوان نمونه نتیجه‌های تطبیق داده‌های مغزه ۱ می‌باشند که توسط مدل بردین روی داده‌های آزمایشگاهی انجام گرفته‌است، و شکل ۷ تراوایی نسبی آب و گاز متناسب با آن را نمایش می‌دهد.



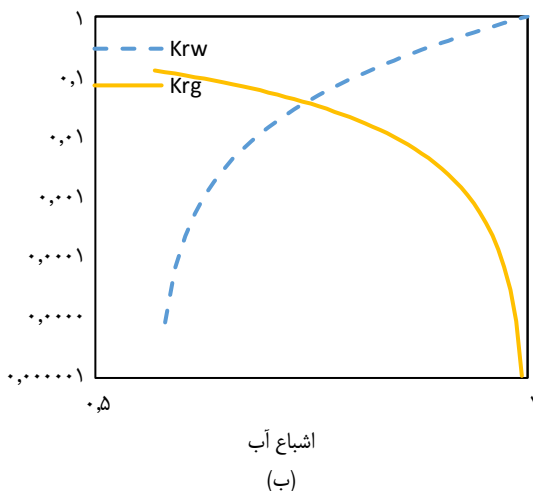
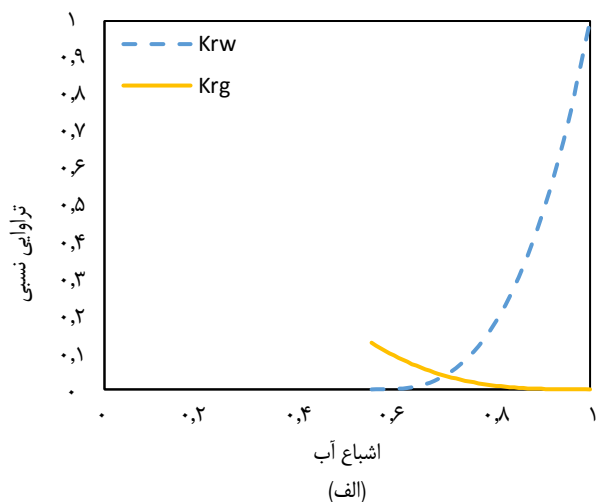
شکل ۷- منحنی‌های تراوایی نسبی برای سامانه آب و کربن دی اکسید در فاز مایع برای مغزه شماره ۱: (الف) مقیاس معمولی (ب) مقیاس لگاریتمی



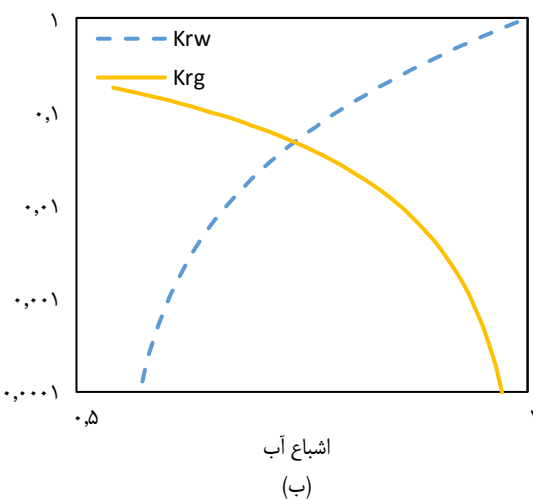
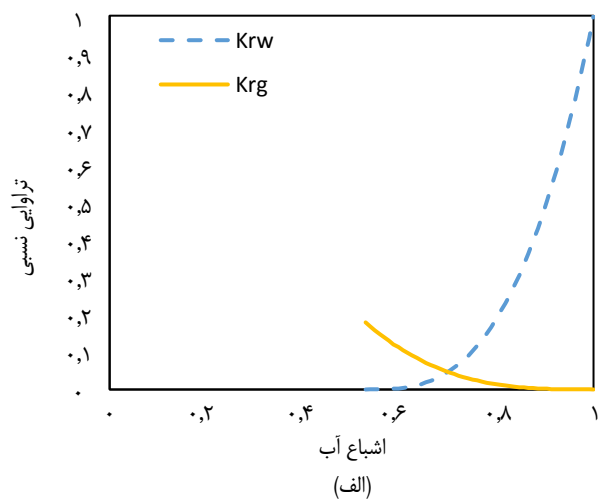
شکل ۸- منحنی‌های تراوایی نسبی برای سامانه آب و کربن دی اکسید در فاز مایع برای مغزه شماره ۲: (الف) مقیاس معمولی (ب) مقیاس لگاریتمی



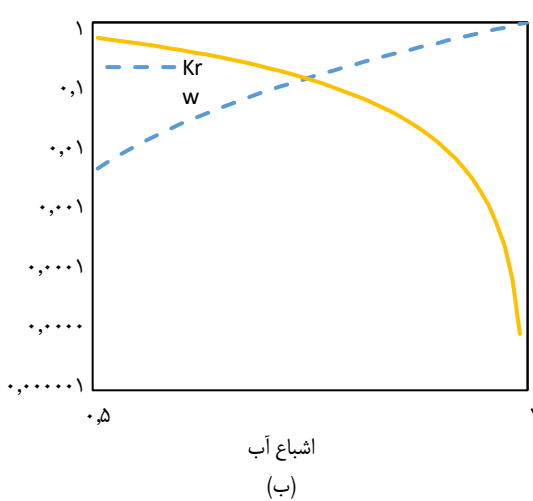
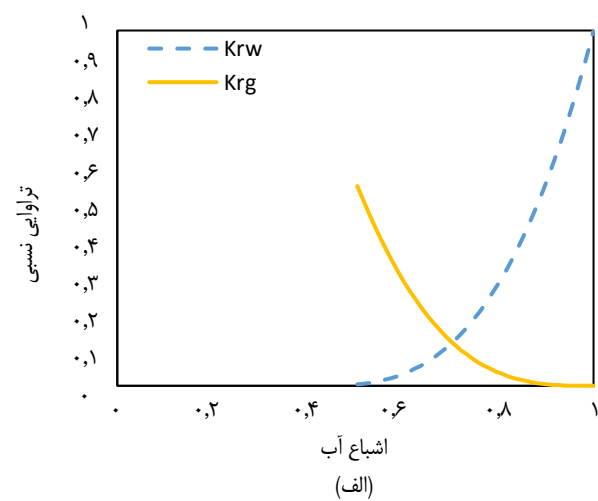
شکل ۹- منحنی‌های تراوایی نسبی برای سامانه آب و کربن دی اکسید در فاز مایع برای مغزه شماره ۳: (الف) مقیاس معمولی (ب) مقیاس لگاریتمی



شکل ۱۰- منحنی‌های تراوایی نسبی برای سامانه آب و کربن دی اکسید در فاز فوق بحرانی برای مغزه شماره ۱: (الف) مقیاس معمولی (ب) مقیاس لگاریتمی



شکل ۱۱- منحنی‌های تراوایی نسبی برای سامانه آب و کربن دی اکسید در فاز فوق بحرانی برای مغزه شماره ۲: (الف) مقیاس معمولی (ب) مقیاس لگاریتمی



شکل ۱۲- منحنی‌های تراوایی نسبی برای سامانه آب و کربن دی اکسید در فاز فوق بحرانی برای مغزه شماره ۳: (الف) مقیاس معمولی (ب) مقیاس لگاریتمی

بحث

جدول‌های ۳ و ۴ به ترتیب بیانگر نتیجه‌های آزمایش‌های تراوایی نسبی روی سامانه آب/کربن دی‌اکسید و مکانیسم حبس برای سامانه آب/نیتروژن می‌باشد. جدول (۳) نتیجه‌های به دست آمده از آزمایش‌های تخلیه ناپایا روی سه نمونه سنگ است. داده‌های ارائه شده در این جدول، اطلاعات مهمی برای تعیین توزیع سیال در سامانه و همچنین به عنوان داده‌های لازم شبیه‌سازها و مدل‌های مخزنی در اختیار قرار می‌دهد. از آن‌جا که در این آزمون‌ها ممکن است نقطه‌های پایانی تراوایی نسبی به طور کامل دقیق نباشد، نتیجه‌های سیکل تخلیه و آشام با گاز نیتروژن روی مغزه‌های مشابه در جدول ۴ آورده شده است. داده‌های ارائه شده در جدول ۴ متعلق به آزمایش‌های سامانه آب/نیتروژن، درصد اشباع‌های باقی‌مانده و همچنین گاز حبس شده، پس از سیکل تخلیه و آشام را نشان می‌دهد. بیش‌تر گاز حبس شده در مغزه با مکانیسم حبس مویینه بوده است. افزون بر بررسی منحنی‌های تراوایی نسبی سامانه آب/دی‌اکسیدکربن در دو فاز مایع و فوق‌بحرانی به منظور تعیین ویژگی‌های جریانی آن‌ها، هدف دیگر بررسی امکان وجود ارتباطی منطقی بین درصد اشباع‌های باقی‌مانده با مغزه‌ها با تراوایی گوناگون در این دو فاز بوده است. در فرایند تخلیه آب توسط کربن دی‌اکسید، در حالت کلی ارتباطی بین مغزه‌ها در تراوایی گوناگون مشاهده نشده است. ولی طبق نتیجه‌ها در جدول‌های ۳ و ۴ در فاز فوق‌بحرانی کربن دی‌اکسید که دما و فشاری بالاتر از آزمایش‌های حالت اول دارد، درصد آب تخلیه شده از مغزه بیش‌تر بوده و در نتیجه مقدار گاز حبس شده با مکانیسم مویینه بیش‌تر خواهد بود. بین تراوایی مغزه‌ها و درصد آب تخلیه شده و گاز حبس شده در سامانه آب/نیتروژن ارتباطی منطقی مشاهده می‌شود، به طوری که در حالت اول با افزایش تراوایی درصد آب تخلیه شده بیشتر و در نتیجه گاز بیش‌تری حبس شده است، درحالی که در حالت دوم آزمایش‌های در فرایند تخلیه، طبق آنچه در مورد سامانه آب/کربن دی‌اکسید گفته شد، با افزایش تراوایی درصد حبس گاز کمتر خواهد بود. این اختلاف در درصد حبس گاز به دلیل تغییر فاز گاز تزریقی می‌باشد. به طوری که طبق آنچه پیش از این گفته شد، کربن دی‌اکسید در فاز فوق‌بحرانی دانسیته همانند مایع و گرانشی همانند گاز دارد؛ که این ویژگی‌های ویژه در توزیع جریان آن تأثیر خواهد گذاشت.

از نتیجه‌های آزمون‌های تراوایی نسبی و نقطه‌های پایانی آن‌ها موجود در جدول‌های ۳ و ۴، به منظور مدل‌سازی و شبیه‌سازی‌های میدانی و عملیاتی می‌توان استفاده نمود و با دقت بالا در مورد فرایند

تزریق کربندی‌اکسید به لایه آب شور و حتی مخزن هیدروکربوری تخلیه شده، با هدف کاهش آلاینده‌گی و افزایش برداشت از میدان‌های نفت و گاز، تصمیم‌گیری و برنامه‌ریزی نمود. همان‌گونه که پیش از این اشاره شد، حبس مویینه کربن دی‌اکسید مهم‌ترین عامل به دام افتادن سیال تزریق شده و افزایش بازدهی فرایند ذخیره‌سازی می‌باشد که مهم‌ترین فاکتور کنترل‌کننده، بررسی منحنی‌های تراوایی نسبی جهت تعیین چگونگی توزیع سیالات درون محیط متخلخل و همچنین تعیین مقدار گاز حبس شده می‌باشد. افزون بر این مکانیسم حبس، مکانیسم انحلال کربن دی‌اکسید و به دنبال آن تغییر کانی‌سنگ در بررسی‌های عملیات تزریق میدانی و شبیه‌سازی‌ها و مدل‌های ریاضی مهم می‌باشد؛ اگرچه از آن‌جا که این دو مکانیسم تابعیت شدید زمانی دارند، در بلندمدت مهم جلوه می‌کنند و در عمل در مقیاس آزمایشگاهی کوچک‌ترین سهم را در حبس گاز دارا می‌باشند. نتیجه‌های جدول ۵ داده‌های بدست آمده از مدل‌های ریاضی موجود روی بررسی درصد انحلال کربن دی‌اکسید در آب، به صورت تابعی از دما، فشار، و شوری آب در شرایط آزمایشگاهی این پژوهش می‌باشد. همان‌گونه که از این نتیجه‌ها مشخص می‌باشد، درصد انحلال کربن دی‌اکسید بسیار پایین بوده و می‌توان از تأثیر آن در نتیجه‌ها به‌ویژه در نتیجه‌های آزمون‌های تراوایی نسبی صرف نظر کرد. همچنین می‌توان با اطمینان بالایی پذیرفت که در مدت زمان تزریق کربن دی‌اکسید به مغزه، تغییری در لیتولوژی سنگ، حاصل از تشکیل کربنیک‌اسید رخ نداده است. در نتیجه می‌توان با اطمینان بالایی نتیجه گرفت که مهم‌ترین عامل به دام افتادن کربن دی‌اکسید در این آزمایش‌های، مکانیسم حبس باقیمانده یا همان مویینه می‌باشد.

نتیجه‌گیری

از آن جهت که تولید و مصرف فراورده‌های نفتی و سوزاندن بخش زیادی از آن‌ها در مراکز صنعتی گوناگون موجب آلودگی‌های زیست‌محیطی شدیدی در ایران شده است، این مطالعه راهکاری مناسب برای بررسی‌های جدی‌تر در عملی شدن تزریق و ذخیره‌سازی گازهای اسیدی در مخازن ایران خواهد بود. در این پژوهش با هدف تعیین ویژگی‌های جریانی سیال کربن دی‌اکسید در زمان تزریق به یک آب‌ده، آزمایش‌های سیلاب زنی انجام گرفت و منحنی‌های تراوایی نسبی برای نمونه مغزه‌ها با ویژگی‌های فیزیکی گوناگون، معرف یک لایه زمین‌شناسی جنوب غرب ایران، تعیین شدند. از آن‌جا که منحنی‌های تراوایی نسبی و اشباع سیالات جز مهم‌ترین داده‌های

جدول ۳ - نتیجه‌های به دست آمده از آزمون تراوایی نسبی سامانه آب و کربن دی‌اکسید با مکانیسم تخلیه

| مقدارهای نهایی | | | | فاز کربن دی‌اکسید | شرایط آزمایش | | |
|-----------------|-------------------|-----------------|-----------------|-------------------|--------------|----------|------------|
| S _{gr} | S _{wirr} | K _{fg} | K _{rw} | | شماره مغزه | دما (°C) | فشار (psi) |
| ۰ | ۰,۵۹۸ | ۰,۱۶۱ | ۱ | مایع | ۱ | ۱۳۲۰ | ۲۵ |
| ۰ | ۰,۴۱۷ | ۰,۱۹۳ | ۱ | | | | |
| ۰ | ۰,۵۵۱ | - | ۱ | | | | |
| ۰ | ۰,۵۵۲ | ۰,۱۲۷ | ۱ | فوق بحرانی | ۱ | ۱۴۵۰ | ۶۰ |
| ۰ | ۰,۴۰۲ | ۰,۰۷۱ | ۱ | | | | |
| ۰ | ۰,۴۹۵ | ۰,۵۲۲ | ۱ | | | | |

جدول ۴ - نتیجه‌های به دست آمده از آزمایش تعیین درصد حبس گاز و اشباع نقاط انتهایی سامانه آب و نیتروژن با مکانیسم سیکل تخلیه و آشام

| مقدارهای نهایی | | فاز نیتروژن | شرایط آزمایش | | |
|-------------------------------|----------------------------------|-------------|--------------|----------|------------|
| S _{gr} (فرایند آشام) | S _{wirr} (فرایند تخلیه) | | شماره مغزه | دما (°C) | فشار (psi) |
| ۰,۱۱ | ۰,۴۸ | فوق بحرانی | ۱ | ۱۳۲۰ | ۲۵ |
| ۰,۱۵ | ۰,۵۷ | | | | |
| ۰,۱۲ | ۰,۳۹ | | | | |
| ۰,۳۲ | ۰,۴۶ | فوق بحرانی | ۱ | ۱۴۵۰ | ۶۰ |
| ۰,۵۲ | ۰,۴۵ | | | | |
| ۰,۴۵ | ۰,۳ | | | | |

تخلیه با کربن دی‌اکسید در هر دو فاز مایع و فوق بحرانی، اختلاف زیادی بین اشباع آب باقی‌مانده در مغزه‌های یکسان دیده نشده است؛ اگرچه در فاز فوق بحرانی کربن دی‌اکسید درصد آب تخلیه شده از مغزه بیش تر بوده و در نتیجه مقدار گاز حبس شده بیش تر خواهد بود. طبق آنچه گفته شد، از آن‌جا که بیش تر مخزن‌های کاندید دارای فشار و دمای بالاتر از بازه فوق بحرانی کربن دی‌اکسید می‌باشند، نتیجه به دست آمده تا حد قابل قبولی نشان دهنده عملی بودن عملیات حبس گاز در مخزن‌های ایران می‌باشد و بر اساس این نتیجه‌گیری لایه‌ها با تراوایی مطلق پایین تر پتانسیل و ظرفیت بیش تری برای حبس کربن دی‌اکسید همراه با سایر گازهای اسیدی دارد.

• به دلیل این‌که روش تزریق ناپایا ممکن است نتیجه‌های غیر دقیق از نقطه‌های پایانی تراوایی نسبی دهد، با توجه به اهمیت این نقطه‌ها، اشباع‌ها و تراوایی نسبی به دست آمده از آزمایش‌های سامانه آب / نیتروژن در سیکل تخلیه و آشام نتیجه‌های قابل پذیرش و ارزشمندی برای درک بهتر فرایند تزریق و همچنین مناسب برای سایر پژوهش‌های آتی ارائه می‌دهد.

جدول ۵ - مقدار انحلال کربن دی‌اکسید در آب، متناسب با

مدل دوان و سان^۱ (۲۰۰۳ میلادی) [۱۸]

| فاز آزمایش | دما (سلسیوس) | فشار (psi) | شوری (ppm) | گاز حل شده (مول بر کیلوگرم آب) |
|------------|--------------|------------|------------|--------------------------------|
| حالت اول | ۲۵ | ۱۳۲۰ | ۳۰۰۰ | ۱,۳۶۱۱ |
| حالت دوم | ۶۰ | ۱۴۵۰ | ۳۰۰۰ | ۱,۰۲۷۵ |

ورودی مدل‌ها و شبیه‌سازیهای مخزنی می‌باشد، با استفاده از داده‌های به دست آمده از این آزمایش‌های می‌توان با دقت بالا شبیه‌سازی‌های میدانی و مدل‌سازی‌های ریاضی را انجام داد تا یک سناریو تزریق موفقیت آمیز به دست آید. در ادامه آزمایش‌های، در شرایط ترمودینامیکی همانند دو سیکل تخلیه و آشام با استفاده از تزریق آب و نیتروژن در مغزه‌ها، با هدف تعیین درصد گاز حبس شده، اشباع سیالات در مغزه‌ها و نقطه‌های انتهایی تراوایی نسبی انجام گرفت. با تحلیل آزمایش‌های نتیجه‌های زیر به دست آمد:

• با توجه به بازه اختلاف تراوایی مطلق و تخلخل مغزه‌ها امکان وجود رابطه بین این ویژگی‌های با درصد اشباع گاز محبوس شده بررسی شد؛ طبق نتیجه‌های این آزمایش، در فرایند

(۱) Duan and Sun

از آن جا که با بررسی های انجام گرفته در این پژوهش امکان تزریق و حبس کربن دی اکسید، به عنوان اصلی ترین گاز مخرب محیط زیست بررسی شد، در ادامه این مسیر بررسی های گسترده ای روی مخزن های نفت و گاز تخلیه شده جنوب غرب ایران، به عنوان راهکاری برای حبس کربن دی اکسید همزمان با ازدیاد برداشت نفت/گاز از این مخازن انجام خواهد گرفت. در این مسیر پتانسیل مخزن های برای ازدیاد برداشت ثالثیه با تزریق کربن دی اکسید، همزمان با حبس آن در این مخزن ها بررسی خواهند شد.

فهرست نمادها

| | |
|-----------|--------------------------|
| K_{rw} | تراوایی نسبی آب |
| K_{rg} | تراوایی نسبی گاز |
| S_w | اشباع آب |
| S_{wi} | اشباع آب اولیه |
| S_{gr} | اشباع گاز باقی مانده |
| S_w^* | اشباع آب میانگین |
| λ | شاخص توزیع اندازه ذره ها |

• طبق بررسی های انجام گرفته و با در نظر گرفتن مکانیسم های گوناگون حبس کربن دی اکسید در مخزن، مکانیسم حبس باقی مانده یا مویینه که جبهه کربن دی اکسید توسط فاز تر مخزن و از طریق نیروهای مویینی بصورت قطعه قطعه در درون آن به دام می افتد، بیش ترین سهم را در محبوس شدن کربن دی اکسید درون سامانه را داشته است. همان گونه که از نتیجه های مدل *دوان* و *سان* دیده شد، مکانیسم انحلال به دلیل کوتاه بودن آزمون های آزمایشگاهی و در نتیجه آن مکانیسم حبس مینرال از طریق تغییر ویژگی های کانی، کوچک ترین سهم را در حبس کربن دی اکسید در زمان تزریق داشته اند.

• در تزریق نیتروژن، در هر دو شرایط ترمودینامیکی این پژوهش، فاز نیتروژن فوق بحرانی بوده است. بر اساس نتیجه های به دست آمده از این بخش، در فرایند تخلیه مرحله اول آزمایش ها، با افزایش تراوایی درصد اشباع گاز درون مغزه بیش تر بوده است در حالی که در شرایط ترمودینامیکی حالت دوم عکس این قضیه رخ داده است. ولی سرانجام بعد از فرایند آشام، مانند آن چه که در تزریق کربن دی اکسید در فاز فوق بحرانی تعیین شد، در شرایط ترمودینامیکی حالت دوم گاز بیش تری نسبت به شرایط دمایی اتاق و فشار ۱۳۲۰ psi که در آن کربن دی اکسید فاز مایع دارد، به دام می افتد و بازدهی بیش تری خواهد داشت.

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۰۸/۲۸، تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۰۱/۲۶

مراجع

- [1] Miri R., [Effects of CO₂-Brine-Rock Interactions on CO₂ Injectivity–Implications for CCS](#). (2015).
- [2] Miri R., Hellevang H., [Salt Precipitation During CO₂ Storage-A Review](#). *International Journal of Greenhouse Gas Control*, **51**(Supplement C): 136-147 (2016).
- [3] Bennion D.B., Bachu S., [Drainage and Imbibition CO₂/Brine Relative Permeability Curves at Reservoir Conditions for High-Permeability Carbonate Rocks](#), in: "*SPE Annual Technical Conference and Exhibition*". Society of Petroleum Engineers: Florence, Italy. (2010).
- [4] Stocker T.F., Qin D., Plattner G.-K., Tignor M., Allen S.K., Boschung J., Nauels A., Xia Y., Bex V., Midgley P.M., ["Technical Summary, in Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change"](#), Editors., Cambridge University Press: Cambridge, NY, USA. 33–115. (2013).
- [5] Thomas H., Bozec Y., Elkhayal K., J. W. de Baar H., [Enhanced Open Ocean Storage of CO₂ from Shelf Sea Pumping](#). *Science*, **304**(5673): 1005-1008. (2004).
- [6] Benson S.M., Orr F.M., [Carbon Dioxide Capture and Storage](#). *MRS Bulletin*, **33**(4): 303-305. (2008).

- [۷] صفرزاده، محمد امین؛ مطهری، مهدیا؛ بهینه‌سازی همزمان ذخیره‌سازی زیرزمینی گاز و ازدیاد برداشت نفت در فرایند تزریق گاز کربن دی‌اکسید با استفاده از روش الگوریتم ژنتیک چند هدفه، نشریه شیمی و مهندسی شیمی ایران، (۳)۳۳: ۸۵ تا ۹۷ (۱۳۹۳).
- [8] Bennion B., Bachu S., "Relative Permeability Characteristics for Supercritical CO₂ Displacing Water in a Variety of Potential Sequestration Zones", in *SPE Annual Technical Conference and Exhibition*, Society of Petroleum Engineers: Dallas, Texas. (2005).
- [9] Bandara U.C., Tartakovsky A.M., Palmer B.J., *Pore-scale Study of Capillary Trapping Mechanism During CO₂ Injection in Geological Formations. International Journal of Greenhouse Gas Control*, **5(6)**: 1566-1577. (2011).
- [10] Zeidouni M., Pooladi-Darvish M., Keith D., *Analytical Solution to Evaluate Salt Precipitation During CO₂ Injection in Saline Aquifers. International Journal of Greenhouse Gas Control*, **3(5)**: 600-611. (2009).
- [۱۱] جدی زاهد، جواد؛ رستمی بهزاد، بررسی تغییرهای تراوایی به دلیل رسوب نمک در فرایند ترسیب گاز کربن دی‌اکسید، نشریه شیمی و مهندسی شیمی ایران، (۳)۳۶: ۱۸۷ تا ۱۹۷ (۱۳۹۶).
- [12] Bachu S., Bennion B., *Effects of in-Situ Conditions on Relative Permeability Characteristics of CO₂-Brine Systems. Environmental Geology*, **54(8)**: 1707-1722. (2008).
- [13] Levine, J.S., Goldberg, D.S., Lackner, K.S., Matter, J.M., Supp, M.G., Ramakrishnan, T.S., *Relative Permeability Experiments of Carbon Dioxide Displacing Brine and Their Implications for Carbon Sequestration. Environmental Science & Technology*, **48(1)**: 811-818. (2014).
- [14] Zhang Y., Nishizawa O., Park H., Kiyama T., Xue Z., *Relative Permeability of CO₂ in a Low-permeability Rock: Implications for CO₂ Flow Behavior in Reservoirs with Tight Interlayers. Energy Procedia*, **114**: 4822-4831. (2017).
- [15] Johnson E.F., Bossler.P. D., Bossler V.O.N., "Calculation of Relative Permeability from Displacement Experiments", Society of Petroleum Engineers. 3. (1959).
- [16] Richmond P.C., Watson A.T., *Comparison of Implicit and Explicit Methods for Interpreting Displacement Data. SPE Reservoir Engineering*, **5(03)**: 389-392. (1990).
- [17] Burdine, N.T., *Relative Permeability Calculations from Pore Size Distribution Data. Journal of Petroleum Technology*, **5(03)**: p. 71-78. (1953).
- [18] Duan Z., Sun R., *An Improved Model Calculating CO₂ Solubility in Pure Water and Aqueous NaCl Solutions from 273 to 533 K and from 0 to 2000 Bar. Chemical Geology*, **193(3-4)**: p. 257-271. (2003).