

# بررسی آزمایشگاهی فرآیند آشام خودبه‌خودی در مخازن گازی شکاف‌دار

فاطمه قاسمی<sup>۱</sup>، مهدی اسکروچی<sup>۱\*</sup> و مجتبی قائدی<sup>۲</sup>

۱- گروه نفت، دانشکده مهندسی شیمی و نفت، دانشگاه شیراز، ایران

۲- پژوهشکده ازدیاد برداشت دانشگاه شیراز، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۲/۳۱ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۰۶/۰۴

## چکیده

آشام خودبه‌خودی مکانیزم تولیدی مهمی در مخازن شکاف‌دار است. تلاش‌های بسیاری به منظور مطالعه برهم‌کنش محیط ماتریکس و شکاف در شرایطی که ماتریکس‌های اشباع از گاز یا نفت با شکاف اشباع از آب احاطه شده‌اند، صورت گرفته است. برخلاف مطالعات صورت گرفته به منظور شناسایی، ارتقاء مقیاس و ارزیابی فرآیند آشام خودبه‌خودی در مخازن نفتی، مخازن گازی کمتر مورد توجه قرار گرفته‌اند. در این پژوهش، با مطالعه فرآیند آشام و عوامل و شرایط مؤثر بر این فرآیند، آزمایش‌های آشام خودبه‌خودی در مخازن گازی در شرایط مشخص طراحی و اجرا شده است. در آزمایشات انجام شده، تاثیر عوامل مختلف مانند میزان اشباع آب، شرایط مرزی و نوع سنگ در میزان آشام مورد بررسی قرار گرفته است. سپس با آنالیز داده‌های حاصل از مطالعه آزمایشگاهی و ارتقاء مقیاس داده‌ها، فرآیند آشام خودبه‌خودی در مخازن گازی شکاف‌دار ارزیابی شده و توانایی گروه‌های مقیاسی از پیش ارائه شده برای ارتقاء مقیاس در سیستم‌های گازی مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهد که برخلاف موفقیت نسبی گروه‌های بدون بعد موجود در ارتقاء مقیاس داده‌های آشام خودبه‌خودی، نیاز به رابطه جامع‌تری در این زمینه وجود دارد.

**کلمات کلیدی:** مخزن گازی، آشام خودبه‌خودی، مخزن شکاف‌دار، ارتقاء مقیاس، مخزن کربناته

## مقدمه

می‌تواند به تولید از این‌گونه مخازن کمک کند [۷-۱۰]. روش‌های متعددی جهت توصیف و ارزیابی فرآیند آشام خودبه‌خودی در این‌گونه مخازن مورد توجه قرار گرفته است [۱۱-۱۵]. یکی از روش‌های ارزیابی فرآیند آشام خودبه‌خودی در مخازن شکاف‌دار، اجرای تست‌های آزمایشگاهی در مقیاس مغزه‌های آزمایشگاهی است [۱۰، ۱۶-۱۸]. با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی و تحلیل مناسب نتایج در واقع رفتار فرآیند آشام خودبه‌خودی و انتقال جرم بین محیط ماتریکس و شکاف در مقیاس مخزن قابل پیش‌بینی

بخش قابل توجهی از ذخایر هیدروکربنی در مخازن شکاف‌دار وجود دارد [۱]. وجود ناهمگنی‌های شکاف با تراوایی بالا، چالش‌های زیادی را در این‌گونه مخازن به‌وجود می‌آورند [۲]. از جمله مکانیزم‌های عمده تولید در این‌گونه مخازن، آشام است [۳-۶]. زمانی که بلوک‌های حاوی هیدروکربن توسط شکاف‌های پر از آب احاطه می‌شوند، این مکانیزم

\*مسئول مکاتبات

آدرس الکترونیکی: escrochi@shirazu.ac.ir  
شناسه دیجیتال: (DOI: 10.22078/pr.2019.3789.2729)

خواهد بود. رفتار فرآیند آشام خودبه‌خودی وابسته به عوامل و پارامترهای مختلفی شامل خواص سنگ و سیال و برهم‌کنش بین آنها است [۱۴]. می‌توان با انتخاب و آماده‌سازی نمونه مغزه‌هایی با خواص مشخص و اجرای تست‌های آشام خودبه‌خودی در شرایط آزمایشگاهی اثر عوامل مختلف بر فرآیند آشام را تحلیل کرد. در مطالعات پیشین اثر هریک از عوامل مؤثر بر فرآیند آشام این مورد آزمایش قرار گرفته است [۱۰، ۱۲، ۱۹ و ۲۰]. کارهای زیادی در رابطه با ارتقاء مقیاس آشام خودبه‌خودی در مخازن نفتی انجام شده است [۲۰-۲۴]. در این مطالعات سعی شده است که با در نظر گرفتن پارامترهای مؤثر بر فرآیند آشام، روابط مقیاسی جهان‌شمول ارائه شود. در بیشتر این کارها روابط مقیاسی تحلیلی ارائه شده بر مبنای فرض‌های ساده شونده هستند و بعضاً پارامترهای مهمی مانند گرانشی را نیز در نظر نمی‌گیرند. بررسی‌ها نشان می‌دهد که برخلاف سیستم‌های نفتی، فرآیند آشام خودبه‌خودی در سیستم‌های گازی کمتر مورد توجه قرار گرفته است. این در حالی است که بخش قابل توجهی از ذخایر گاز دنیا در مخازن شکاف‌دار گازی واقع بر سفره آبی فعال قرار گرفته است [۲۵] و با توجه به افزایش نرخ مصرف و تولید گاز طبیعی توجه به این دسته از مخازن ضروری و در حال افزایش است. لی و هورن با استفاده از معادله دارسی رابطه مقیاسی زیر را برای ارتقاء مقیاس داده‌های آشام مخازن گازی ارائه نمودند [۲۶]:

$$t_{D,MP} = \left( \frac{\sqrt{K_m}}{H^2 \mu_w} \sigma t \right)^{0.5} + \left( \frac{\Delta \rho g K_m t}{\phi_m H \mu_w} \right) \quad (5)$$

در این رابطه، زیرنویس‌های  $m$  نشان‌دهنده ماتریکس و  $\sigma$  نشان‌دهنده کشش سطحی است. همان‌طور که پیش‌تر اشاره شد، فرآیند آشام در مخازن گازی برخلاف مخازن نفتی بسیار کمتر مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین، داده‌های آزمایشگاهی مربوط به نحوه رفتار فرآیند آشام در مخازن گازی نیز محدود می‌باشد. بنابراین با توجه به ضرورت تعریف شده، در این مقاله با طراحی و راه‌اندازی دستگاه آزمایشگاهی مناسب، فرآیند آشام در مخازن گازی مورد بررسی قرار گرفته است. بخش آزمایش‌های آشام خودبه‌خودی آب به محیط متخلخل اشباع از هوا در دما و فشار محیط انجام شده و اثر عوامل مختلف مانند اشباع اولیه آب بر نرخ آشام، اشباع گاز نهایی و بازیافت بررسی خواهد شد. همچنین، جامعیت دو رابطه مقیاسی مطرح شده در ارتقاء مقیاس مخازن گازی مورد بحث قرار می‌گیرد.

### بخش آزمایشگاهی

در این پژوهش سه دسته آزمایش آشام خودبه‌خودی مربوط به اعمال شرایط مرزی و اشباع اولیه آب انجام شده است که دسته آزمایش‌های اول و دوم مربوط به انجام آزمایش با تغییر اشباع اولیه آب و دسته آزمایش سوم مربوط به اعمال شرایط مرزی است:

- آزمایش آشام در اشباع آب کاهش نیافتنی: به دلیل تأثیر قابل توجه نیروی موئینه و تراوایی نسبی بر فرآیند آشام، اشباع اولیه آب یکی از عوامل کنترل‌کننده رفتار جریان بین ماتریکس و شکاف خواهد بود. با تغییر اشباع اولیه آب، تأثیر این پارامترها بر فرآیند آشام قابل تحلیل و نتیجه‌گیری

خواهد بود. رفتار فرآیند آشام خودبه‌خودی وابسته به عوامل و پارامترهای مختلفی شامل خواص سنگ و سیال و برهم‌کنش بین آنها است [۱۴]. می‌توان با انتخاب و آماده‌سازی نمونه مغزه‌هایی با خواص مشخص و اجرای تست‌های آشام خودبه‌خودی در شرایط آزمایشگاهی اثر عوامل مختلف بر فرآیند آشام را تحلیل کرد. در مطالعات پیشین اثر هریک از عوامل مؤثر بر فرآیند آشام این مورد آزمایش قرار گرفته است [۱۰، ۱۲، ۱۹ و ۲۰]. کارهای زیادی در رابطه با ارتقاء مقیاس آشام خودبه‌خودی در مخازن نفتی انجام شده است [۲۰-۲۴]. در این مطالعات سعی شده است که با در نظر گرفتن پارامترهای مؤثر بر فرآیند آشام، روابط مقیاسی جهان‌شمول ارائه شود. در بیشتر این کارها روابط مقیاسی تحلیلی ارائه شده بر مبنای فرض‌های ساده شونده هستند و بعضاً پارامترهای مهمی مانند گرانشی را نیز در نظر نمی‌گیرند. بررسی‌ها نشان می‌دهد که برخلاف سیستم‌های نفتی، فرآیند آشام خودبه‌خودی در سیستم‌های گازی کمتر مورد توجه قرار گرفته است. این در حالی است که بخش قابل توجهی از ذخایر گاز دنیا در مخازن شکاف‌دار گازی واقع بر سفره آبی فعال قرار گرفته است [۲۵] و با توجه به افزایش نرخ مصرف و تولید گاز طبیعی توجه به این دسته از مخازن ضروری و در حال افزایش است. لی و هورن با استفاده از معادله دارسی رابطه مقیاسی زیر را برای ارتقاء مقیاس داده‌های آشام مخازن گازی ارائه نمودند [۲۶]:

$$t_{D, Li \& Home} = c^2 \frac{k}{\phi} \frac{P_c}{\mu_w} \frac{(S_{wf} - S_{wi})}{L_a^2} \quad (1)$$

$$a = A \frac{P_c k_w (S_{wf} - S_{wi})}{\mu_w L} \quad (2)$$

$$b = A \frac{k_w \Delta \rho g}{\mu_w} \quad (3)$$

$$c = \frac{b}{a} \quad (4)$$

در این رابطه،  $k$  تراوایی،  $\phi$  تخلخل،  $P_c$  فشار موئینه،  $\mu_w$  گرانشی آب،  $S_{wf}$  اشباع آب در جبهه حرکت آب،

رخ‌نمون مخازن آهکی ایندین کانادا دریافت شده و پس از اندازه‌گیری خواص نمونه مغزه‌ها، چند نمونه برای انجام آزمایش‌ها انتخاب شده‌اند. مشخصات نمونه سنگ‌های انتخابی در جدول ۱ آورده شده است. قابل ذکر است که برای انجام آزمایش‌ها هوا به‌عنوان فاز گازی و آب شور به‌عنوان فاز مایع در نظر گرفته شده است.

#### شست و شوی مغزه‌ها

پیش از انجام هر مرحله از آزمایش‌ها لازم است مغزه‌ها شسته شوند. نوع این شست و شوها با توجه به نوع مواد آزمایش شده بر روی مرحله قبل تعیین می‌شود. در مورد نمونه مغزه‌هایی در تماس با آب شور و گاز لازم است مغزه‌ها در سوکسله با استفاده از الکل مناسب (معمولاً اتانول) شسته شوند.

#### اندازه‌گیری خواص روتین مغزه‌ها

خواص روتین مغزه‌ها شامل ابعاد، تخلخل و تراوایی، با دقت بالا به‌ترتیب با استفاده از ریزسنج، دستگاه تخلخل‌سنج هلیومی (HPR-PR01) و دستگاه اندازه‌گیری تراوایی گاز (SGP-PR01)، اندازه‌گیری شده است. تراوایی‌های مطلق نهایی با حذف اثر کلیک‌برگ گزارش شده است.

#### تنظیم اشباع اولیه آب

پس از شست و شوی کامل مغزه‌ها در دستگاه سوکسوله، مغزه‌ها در آن قرار داده شده و خشک می‌شوند. در مرحله بعد، مغزه‌ها حدود ۴ h تحت خلاء قرار می‌گیرند.

است. همچنین با توجه به شرایط اولیه در شروع جریان در محیط مخزن، در این بخش تلاش خواهد شد، آزمایش‌های آشام بر روی نمونه‌هایی با اشباع آب کاهش نیافتنی صورت گیرد.

• آزمایش آشام در اشباع آب صفر: در این بخش از آزمایش‌ها، آزمایش آشام بر روی مغزه‌هایی با اشباع اولیه آب صفر تکرار خواهد شد.

• اعمال شرایط مرزی: با توجه به چگونگی توزیع شکاف‌ها در محیط مخزن، شرایط مرزی جریان بین ماتریکس و شکاف متفاوت خواهد بود. با تغییر شرایط مرزی، نوع و رفتار جریان آشام تحت تاثیر قرار خواهد گرفت. در این بخش با اعمال شرایط مرزی مناسب اثر تغییر این پارامتر بر رفتار جریان بررسی و تحلیل خواهد شد.

#### روش انجام آزمایش‌ها

روش انجام و دستگاه‌های مورد استفاده هر بخش از آزمایش‌ها در بخش مربوط به همان آزمایش به تفصیل بیان شده است.

#### انتخاب نمونه سنگ و سیال

هدف از انجام آزمایش‌های آشام در واقع بررسی و تحلیل اثر پارامترهای مؤثر بر این فرآیند و ارائه الگویی واحد به منظور پیش‌بینی رفتار جریان است. بدین منظور، انتخاب نمونه سنگ و سیال باید به گونه‌ای باشد که حتی‌الامکان بتوان آزمایش‌هایی با تغییر پارامترهای مختلف تعیین نمود. در این بخش از مطالعه نمونه سنگ‌هایی از

جدول ۱ خواص مغزه‌های انتخابی مورد آزمایش

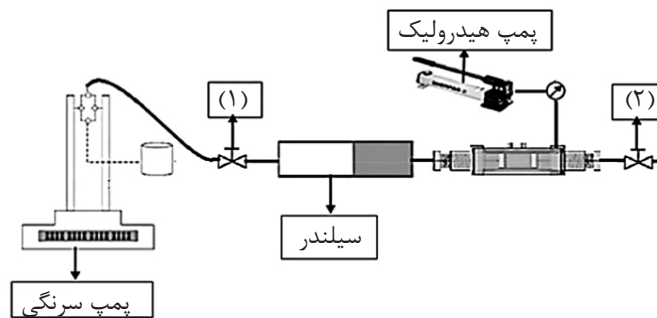
نمونه	H(cm)	D (cm)	(mD)	[-]Ø	$\rho_{gr}$ (gr/cm <sup>3</sup> )	جنس سنگ
۱	۷/۶	۳/۸	۸۴	۰/۲۱	۲/۸۳	دولومیت
۲	۷/۷	۳/۸	۲۵/۹۱	۰/۲۲	۲/۸۳	دولومیت
۳	۷/۳	۳/۸	۱۶/۹۸	۰/۱۹	۲/۸۳	دولومیت
۴	۷/۵	۳/۸	۱۱/۱۳	۰/۲	۲/۸۳	دولومیت
۵	۸/۹	۳/۸	۶/۶۰	۰/۱۸	۲/۸۲	دولومیت
۶	۴/۶	۳/۸	۴/۶۹	۰/۱۴	۲/۷۳	آهک

کنترل دبی جریان (MFC)، بعد از این دستگاه شیر یک طرفه جریان قرار گرفته است. گاز از شیر یک طرفه عبور کرده و وارد سیستم مغزه دار خواهد شد. با اندازه‌گیری حجم آب و گاز خروجی و ثبت زمان، تراوایی نسبی حالت تخلیه قابل اندازه‌گیری است. جریان گاز تا پایان تولید آب ادامه می‌یابد. در نهایت، نمونه از سیستم خارج شده و وزن نمونه اندازه‌گیری شده و با مقایسه با وزن نمونه در حالت خشک، اشباع اولیه آب قابل اندازه‌گیری است.

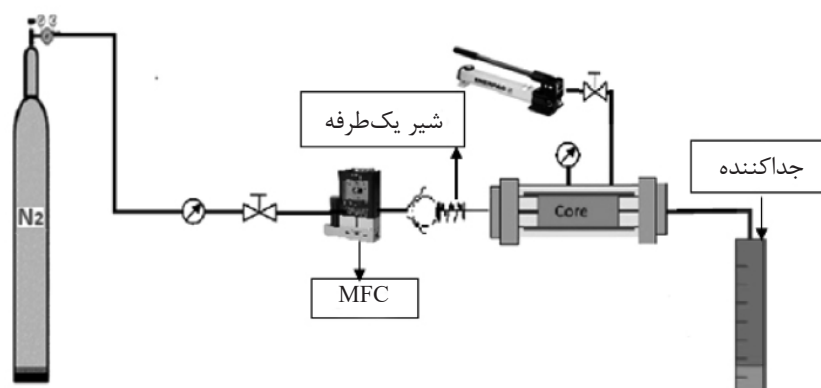
#### آزمایش آشام در اشباع آب کاهش نیافتنی

شماتیک سیستم آزمایش فرآیند آشام در دما و فشار محیط در شکل ۳ نشان داده شده است. نمونه‌های مغزه با اشباع اولیه آب مشخص وارد سیستم آشام آب شده، و با استفاده از کیت مخصوص اندازه‌گیری دانسیته به زیر ترازو مدل AND با دقت  $g/0.01$  و حد اکثر وزن قابل اندازه‌گیری  $g/1000$  آویزان می‌شوند.

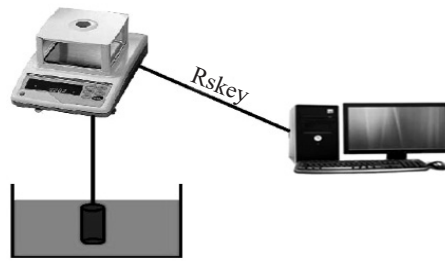
به دلیل استفاده از پمپ سرنگی لازم است سیلندری مشابه شکل ۱ به منظور جلوگیری از اختلاط آب شور و آب مقطر موجود در پمپ به سیستم اضافه شود. سپس، با فشار ثابت  $700 \text{ psi}$  آب از پمپ سرنگی به سیستم وارد شده و سنگ به صورت کامل با آب اشباع می‌شود. پس از آن، جریان آب قطع شده و فشار سیستم کاهش می‌یابد و شیر شماره ۲ باز شده و جریان سیال با دبی ثابت  $2 \text{ cc/min}$  ادامه می‌یابد. در مرحله بعد، سیستم از پمپ سرنگی جدا شده و به کپسول گاز جهت سیلاب‌زنی با گاز متصل می‌گردد. در این مرحله، اندازه‌گیری تراوایی تسبی تخلیه برای مقایسه نوع جریان آشام و تخلیه قابل انجام است. دستگاه سیلاب‌زنی با گاز در شکل ۲ نشان داده شده است. با توجه به شکل، فشار از سمت کپسول فشار با استفاده از اندازه‌گیر تنظیم شده و دبی جریان ورودی به سیستم با استفاده از دستگاه کنترل دبی جریان گاز تنظیم می‌شود. برای جلوگیری از برگشت جریان آب به دستگاه



شکل ۱ دستگاه سیلاب‌زنی با آب



شکل ۲ دستگاه سیلاب‌زنی با گاز



شکل ۳ دستگاه آزمایش آشام خودبه‌خودی

### بحث و نتایج آزمایشگاهی

#### نمودارهای بازده برحسب زمان آنالیز آزمایشگاهی

براساس مشاهدات آزمایشگاهی، آشام آب به درون مغزه‌های اشباع از گاز در ابتدا با سرعت بالا صورت می‌گیرد. با گذشت زمان این سرعت کاهش یافته و در نهایت، متوقف می‌شود. نتایج حاصل از آزمایش آشام بر یک نمونه مغزه در مقیاس کارتیزین در شکل ۵ نشان داده شده است. سایر نتایج آزمایشگاهی در ادامه در قسمت ارتقاء مقیاس داده‌های آزمایشگاهی نشان داده خواهد شد. همچنین، به منظور سهولت در بررسی و مقایسه این نمودارها در ادامه به‌صورت نیمه لگاریتمی ترسیم خواهند شد.

#### ارتقاء مقیاس داده‌های آزمایشگاهی آشام

##### خودبه‌خودی

نتایج حاصل از تست‌های آزمایشگاهی آشام خودبه‌خودی به‌صورت نمودارهای باز یافت برحسب زمان گزارش می‌شود. همان‌طور که پیش از این گفته شد به‌دلیل تاثیر پارامترهای زیادی شامل خواص سنگ و سیال و شرایط مرزی و اولیه بر رفتار جریانی این فرآیند و عدم امکان شبیه‌سازی تمام این شرایط در مقیاس آزمایشگاه، نیاز است نمودارهای مذکور برای تبدیل به نمودارهای نماینده رفتار مخزنی ارتقاء مقیاس یابند. پیش از استفاده از رابطه مقیاسی مورد نظر نیاز است توانایی و ظرفیت رابطه برای در نظر گرفتن اثر تمام پارامترهای مؤثر مورد ارزیابی قرار گیرد.

با تنظیم حالت ترازو به حالت اندازه‌گیری خودکار، وزن نمونه معلق با فاصله زمانی مشخص ثبت شده و با استفاده از نرم‌افزار RsKay در رایانه متصل به سیستم ذخیره می‌شوند. به محض قرار گرفتن مغزه درون مخزن آب شور، اندازه‌گیری وزن آغاز شده و تغییرات وزن نسبت به زمان ثبت می‌شوند.

#### آزمایش آشام آب در اشباع اولیه آب صفر

پس از شستشو کامل مغزه‌ها در دستگاه سوکسوله، مغزه‌ها در آن قرار داده شده و خشک می‌شوند. وزن نمونه‌های خشک ثبت شده و وارد سیستم آشام می‌شوند. مجدداً آزمایش آشام بر روی این مغزه‌ها تکرار می‌شود.

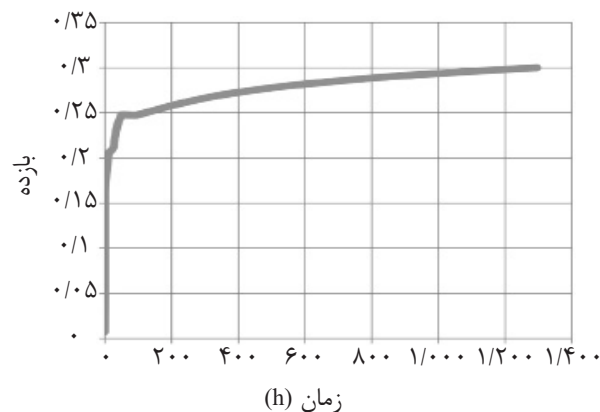
#### اعمال شرایط مرزی

در این بخش پس از شست و شو و خشک شدن، مرزهای ورود فاز ترکنده به مغزه با استفاده از عایق جریان محدود می‌شوند و جریان آشام خلاف جهت با شرایط مرزی متفاوت اعمال خواهد شد (شکل ۴).



شکل ۴ اعمال شرایط مرزی و عایق‌بندی مغزه

این نمونه عایق‌کاری با استفاده از روکش عایق‌کننده متناسب با قطر مغزه انجام شده است.



شکل ۵ نمونه‌ای از نتایج آزمایشگاهی بازده گاز برحسب زمان آشام

خودبه‌خودی در شرایط اولیه و مرزی و خواص متفاوت در ادامه آورده شده است.

#### با اشباع آب اولیه صفر

شکل ۶، نمودار باز یافت برحسب زمان در مغزه‌ای با خواص متفاوت و اشباع اولیه صفر حاصل از آنالیز آزمایشگاهی آشام خودبه‌خودی را نشان می‌دهد. به منظور تسهیل بررسی اثر پارامترهای مختلف بر نمودار آشام، خواص هر نمونه مغزه در این نمودار به ترتیب از سمت چپ به راست به صورت طول، تراوایی، تخلخل و جنس نمونه مغزه آورده شده است. شکل ۷ نتایج حاصل از ارتقاء مقیاس داده‌های آزمایشگاهی این قسمت را با استفاده از زمان بدون بعد  $t_{D, Li\&Hom}$  (شکل ۷ الف)) و زمان بدون بعد  $t_{D,MP}$  (شکل ۷ ب)) نشان می‌دهد. همان‌طور که این شکل‌ها نشان می‌دهند، رابطه‌های بدون بعد معرفی شده موفقیت چندان در ارتقاء مقیاس این داده‌های آزمایشگاهی ندارند. با توجه به شکل شماره ۷ الف)، در نتیجه ارتقاء مقیاس با استفاده از گروه بدون بعد  $t_{D, Li\&Hom}$  نمونه‌های شماره ۵ و ۶ رفتار متفاوتی نسبت به سایر نمونه‌ها دارند. این موضوع می‌تواند نشان‌دهنده ظرفیت پایین گروه بدون بعد مورد نظر در ارتقاء مقیاس داده‌های آشام نمونه‌هایی با محدوده متفاوتی از تخلخل و تراوایی و جنس متفاوت باشد. دقت شود که نمونه ۶ از مخزنی متفاوت است و همچنین، طول کمتری نسبت به بقیه نمونه‌ها دارد.

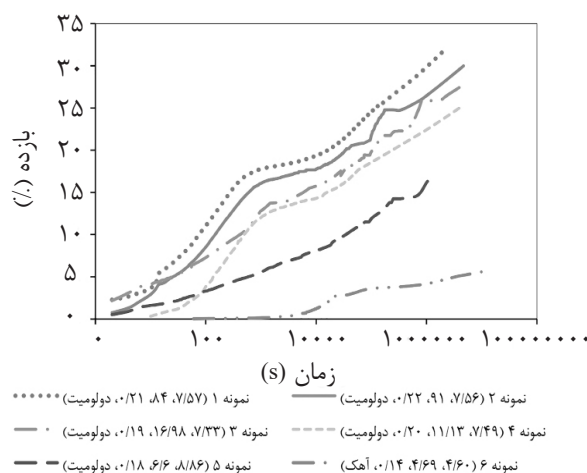
بدین منظور، در این بخش در ابتدا نتایج حاصل از آنالیز آزمایشگاهی نمونه‌هایی با محدوده گسترده‌ای از تغییرات ارائه شده و رابطه مقیاسی ارائه شده اعتبارسنجی می‌گردد و نمودارهای حاصل از نتایج آزمایشگاهی به مقیاس مخزن ارتقاء می‌یابند. داده‌های آشام خلاف جهت خودبه‌خودی آب نمونه‌های آزمایشگاهی تعیین شده در بخش قبل، با دو حالت تغییر اشباع اولیه و شرایط مرزی در این بخش ارائه شده و با استفاده از مدل‌های ارتقاء مقیاس پیشین، ارتقاء مقیاس می‌یابند. علاوه بر آزمایش اشباع اولیه صفر که برای تمام نمونه‌ها انجام شده است، در نمونه ۱ اشباع اولیه ۰/۰۲، در نمونه ۲ اشباع اولیه ۰/۱، در نمونه ۳ اشباع اولیه ۰/۲۵، در نمونه ۴ اشباع اولیه ۰/۲ و در نمونه ۵ اشباع اولیه ۰/۳۷ نیز مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین، جدول ۲ مشخصات نمونه‌های آزمایش آشام با اعمال شرایط مرزی را نشان می‌دهد.

جدول ۲ مشخصات نمونه‌های آزمایش آشام با تغییر شرایط مرزی

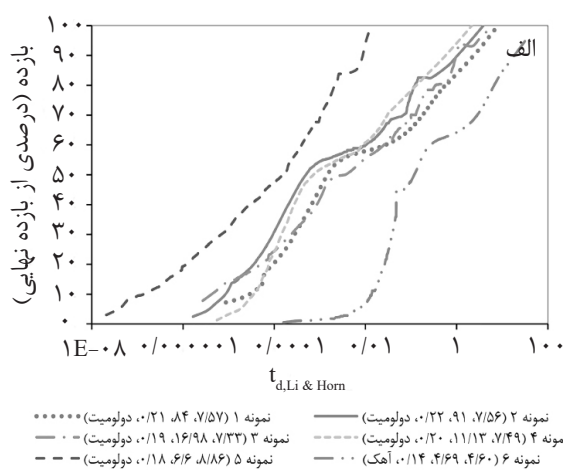
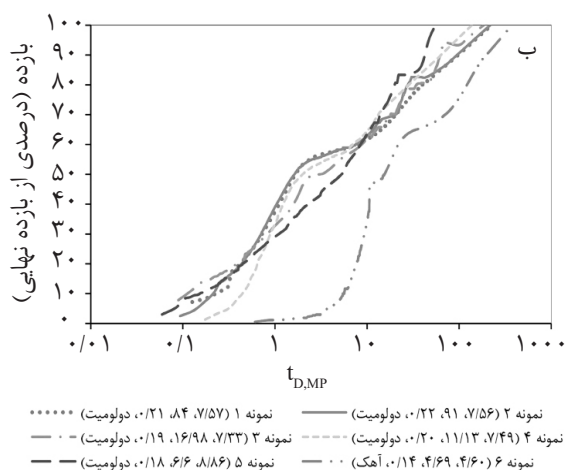
نوع شرط مرزی	اشباع اولیه آب	نمونه
۲	۰/۰۱۴	۱
۲	۰/۲۶	۳
۲	۰	۶

#### نتایج ارتقاء مقیاس

نتایج ارتقاء مقیاس داده‌های آزمایشگاهی آشام



شکل ۶ نمودار بازیافت برحسب زمان نمونه‌های با خواص متفاوت و اشباع اولیه صفر حاصل از آنالیز آزمایشگاهی آشام خودبه‌خودی



شکل ۷ الف) نتایج ارتقاء مقیاس داده‌های آشام خودبه‌خودی با اشباع آب اولیه صفر با استفاده از زمان بدون بعد ارائه شده توسط [۲۶] و ب) ارائه شده توسط [۱۰]

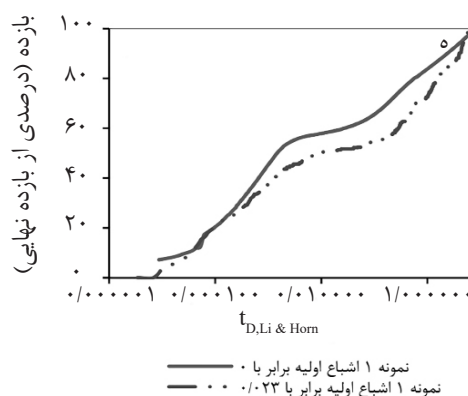
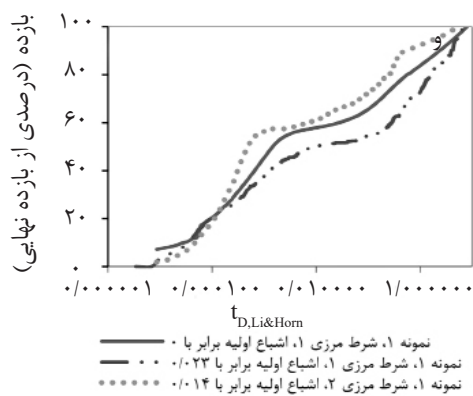
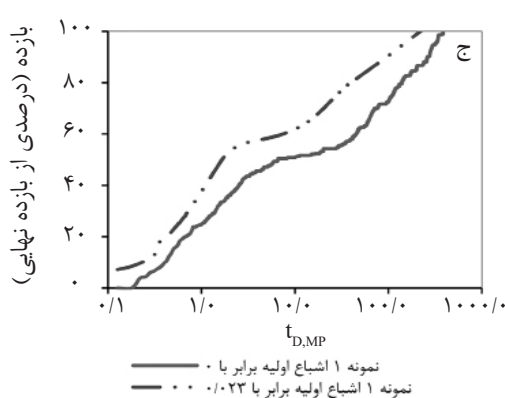
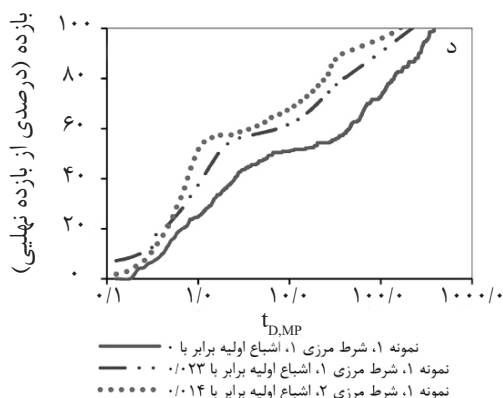
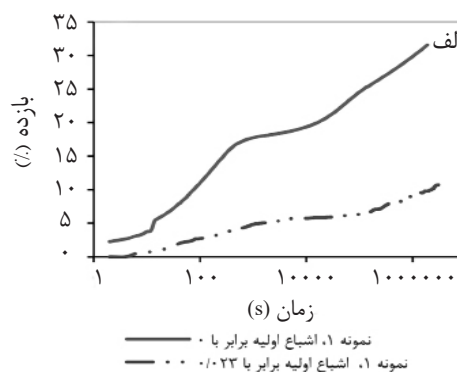
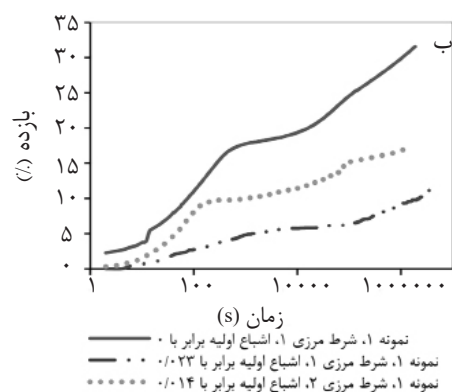
بازیافت نهایی کاهش پیدا کرده است. با توجه به اینکه شیب نمودارهای آشام، بیانگر سرعت آشام می‌باشند، می‌توان گفت که افزایش اشباع اولیه بر میزان سرعت آشام نیز تاثیر دارد و باعث کاهش آن نیز می‌شود. همچنین، با تغییر شرایط مرزی کاهش فضای عبور برای عبور سیال، میزان بازیافت نفت کاهش پیدا کرده است. با تغییر شرایط مرزی سرعت آشام و همچنین میزان بازده نهایی نیز مورد تاثیر قرار گرفته است. ارتقاء مقیاس این دو نمونه توسط زمان بدون بعد  $t_{D,MP}$  به ترتیب در شکل‌های ۸ (ج) و ۸ (د) نشان داده شده است. به علاوه، شکل‌های ۸ (ه) و ۸ (و) نتایج ارتقاء مقیاس این داده‌ها را با زمان بدون بعد  $t_{D, Li & Hom}$  به تصویر می‌کشد.

به علاوه، در مورد نتیجه ارتقاء مقیاس با استفاده از گروه مقیاسی  $t_{D,MP}$  نشان داده شده در شکل ۷ (ب)، رفتار متفاوت نمونه شماره ۶ می‌تواند نتیجه ظرفیت پایین گروه مقیاسی در ارتقاء مقیاس داده‌های آشام نمونه‌هایی با جنس متفاوت باشد.

#### با اشباع اولیه و شرایط مرزی متفاوت

در ادامه نتایج حاصل از تغییر اشباع اولیه و همچنین، تغییر شرایط مرزی مورد بررسی قرار می‌گیرد. شکل ۸ نتایج حاصل از شام خودبه‌خودی برای نمونه ۱ با تغییر اشباع آب اولیه (۸ (الف)) و همچنین، تغییر شرایط مرزی در اشباع اولیه مشخص (۸ (ب)) را نشان می‌دهد. همان‌طور که این شکل‌ها نشان می‌دهند، با زیاد شدن اشباع اولیه، زمان و مقدار





شکل ۸ الف) نتایج آشام خودبه‌خودی برای نمونه ۱ با تغییر اشباع آب اولیه، ب) تغییر شرایط مرزی در اشباع اولیه مشخص، ج) ارتقاء مقیاس داده‌های آشام خودبه‌خودی با تغییر اشباع اولیه و با زمان بدون بعد  $t_{D,MP}$ ، د) ارتقاء مقیاس داده‌های آشام خودبه‌خودی با تغییر شرایط مرزی و با زمان بدون بعد  $t_{D,MP}$ ، ه) ارتقاء مقیاس داده‌های آشام خودبه‌خودی با تغییر اشباع اولیه و با زمان بدون بعد  $t_{D,Li\&Hom}$ ، و) ارتقاء مقیاس داده‌های آشام خودبه‌خودی با تغییر شرایط مرزی و با زمان بدون بعد  $t_{D,Li\&Hom}$

است. از طرف دیگر، هدف از توسعه زمان بدون بعد  $t_{D,Li\&Hom}$  مخازن گازی بوده است، بنابراین عملکرد بهتری هم از این زمان بدون بعد انتظار می‌رفت. در نهایت، با وجود موفقیت نسبی این دو زمان بدون بعد در ارتقاء مقیاس آشام خودبه‌خودی در مخازن گازی، نیاز به توسعه رابطه‌ای که از جامعیت بهتری

براساس این نتایج به نظر می‌رسد که رابطه مقیاسی  $t_{D,Li\&Hom}$  عملکرد نسبی بهتری در ارتقاء مقیاس داده‌های آزمایشگاهی حاصل دارند. رابطه مقیاسی  $t_{D,MP}$  اگر چه براساس روابط تحلیلی به‌دست آمده است ولی بیشتر برای مخازن نفتی توسعه داده شده و هدف آن بررسی آشام در مخازن نفتی بوده



گزارش شده است. این نتایج نشان می‌دهند سرعت فرآیند آشام درون مغزه‌های اشباع از گاز به عوامل مختلفی از جمله تخلخل، تراوایی، جنس سنگ، اشباع آب اولیه و شرایط مرزی وابسته است. بیشترین میزان تغییرات سرعت آشام مربوط به تغییر تراوایی مغزه‌ها بوده است. در نهایت با استفاده از گروه‌های ارتقا مقیاس، نمودارهای حاصل به نمودارهای شرایط مخزن ارتقاء یافته‌اند. براساس ارزیابی توانایی این گروه‌ها برای ارتقاء مقیاس، می‌توان نتیجه گرفت که نیاز است بررسی‌های دقیق‌تری به منظور ارائه رابطه ارتقاء مقیاس با جامعیت بیشتر برای مخازن گازی شکاف‌دار ارائه گردد.

برخوردار باشد، احساس می‌شود. داده‌های ارائه شده در این مقاله می‌تواند در بررسی عملکرد رابطه مقیاسی جدید معرفی شده مورد استفاده قرار گیرند.

### نتیجه‌گیری

در این پژوهش، با انتخاب نمونه مغزه‌هایی با خواص متفاوت و با تغییر شرایط مرزی و اولیه مؤثر بر فرآیند آشام، آزمایش آشام آب به درون فضای متخلخل اشباع از گاز طراحی و اجرا شده است. نتایج آزمایشگاهی به صورت نمودارهای بازده برحسب زمان به منظور تحلیل آشام در شرایط آزمایشگاه

### مراجع

- [۱]. محسن م. "مهندسی مخازن شکاف‌دار با روی‌کرد مدل‌سازی و شبیه‌سازی"، پژوهشگاه صنعت نفت، تهران، ۱۳۹۶.
- [2]. Ghaedi M. and Riazi M., "Scaling equation for counter current imbibition in the presence of gravity forces considering initial water saturation and SCAL properties," J. Nat. Gas Sci. Eng., Vol. 34, pp. 934-947, 2016.
- [3]. Behbahani H. S., Di Donato G. and Blunt M. J., "Simulation of counter-current imbibition in water-wet fractured reservoirs," Journal of Petroleum Science and Engineering, Vol. 50, pp. 21-39, 2006.
- [4]. Behbahani HS. Z., "Analysis, scaling and simulation of counter-current imbibition," Doctoral Thesis, Imperial College London, pp. 1-233, 2004.
- [5]. Abbasi J., Riazi M., Ghaedi M. and Mirzaei-Paiaman A., "Modified shape factor incorporating gravity effects for scaling countercurrent imbibition," Journal of Petroleum Science and Engineering, Vol. 150., pp. 108-114, 2017.
- [6]. Andersen PØ., Evje S. and Kleppe H., "A Model for Spontaneous Imbibition as a Mechanism for Oil Recovery in Fractured Reservoirs," Transp Porous Media, Vol. 101, pp. 299-331, 2014.
- [7]. Cai J., Yu B., Zou M. and Luo L., "Fractal characterization of spontaneous Co-current imbibition in porous media," Energy and Fuels, Vol. 24, pp.1860-1867, 2010.
- [8]. Hamidpour E., Mirzaei-Paiaman A., Masihi M. and Harimi B., "Experimental study of some important factors on nonwetting phase recovery by cocurrent spontaneous imbibition," Journal of Natural Gas Science and Engineering, Vol. 27, pp.1213-1228, 2015.
- [9]. Hatiboglu CU. and Babadagli T., "Experimental and visual analysis of co- and counter-current spontaneous imbibition for different viscosity ratios, interfacial tensions, and wettabilities," Journal of Petroleum Science and Engineering, Vol. 70, pp. 214-228, 2010.
- [10]. Mirzaei Paiaman A., "Analysis of counter-current spontaneous imbibition in presence of resistive gravity

- forces: Displacement characteristics and scaling,* Journal of Unconventional Oil Gas Resources, Vol. 12, pp. 68–86, 2015.
- [11]. Mirzaei-Paiaman A. and Masihi M., “Scaling of Recovery by Cocurrent Spontaneous Imbibition in Fractured Petroleum Reservoirs,” Energy Technol, Vol. 2. pp.166–175, 2014.
- [12]. Morrow N. R. and Xie X., “Oil Recovery by spontaneous imbibition from weakly water-wet rocks,” Petrophysics, Vol. 42, Issue 04, 2001.
- [13]. Rapoport L. A., “Scaling laws for use in design and operation of water-oil flow models,” Vol. 204, pp.143–150, 1955.
- [14]. Tavassoli Z., Zimmerman R. W. and Blunt M. J., “Analysis of counter-current imbibition with gravity in weakly water-wet systems,” Journal of Petroleum Science and Engineering, Vol. 48, pp. 94–104, 2005.
- [15]. Morrow N. R. and Mason G., “Recovery of oil by spontaneous imbibition,” Curr. Opin. Colloid Interface Sci., Vol. 6, pp.321–337, 2001.
- [16]. Cil M. and Reis J. C., “A multi-dimensional, analytical model for counter-current water imbibition into gas-saturated matrix blocks,” Journal of Petroleum Science and Engineering, Vol. 16, pp.61–69, 1996.
- [17]. Hatiboglu C.U. and Babadagli T., “Experimental analysis of primary and secondary oil recovery from matrix by counter-current diffusion and spontaneous imbibition,” In: SPE Annual Technical Conference and Exhibition. Society of Petroleum Engineers, September, Houston, Texas 2004.
- [18]. Meng Q., Liu H., Wang J. and Zhang H., “Effect of wetting-phase viscosity on cocurrent spontaneous imbibition,” Energy and Fuels, Vol.30, Issue 2, pp.835-843 2016.
- [19]. Li K. and Horne R. N., “Generalized scaling approach for spontaneous imbibition: an analytical model,” SPE Reservoir Evaluation & Engineering, Vol. 9, pp.251–258, 2013.
- [20]. Mirzaei-Paiaman A. and Masihi M., “Scaling equations for oil/gas recovery from fractured porous media by counter-current spontaneous imbibition: from development to application,” Energy & Fuels, Vol. 27, pp. 4662–4676, 2013.
- [21]. Rasmussen M. L. and Civan F., “Analytical solutions for waterfloods in fractured reservoirs obtained by an asymptotic approximation,” SPE Journal, Vol. 3, pp. 249–252, 2013.
- [22]. Standnes D. C., “Scaling group for spontaneous imbibition including gravity,” Energy and Fuels, Vol. 24, pp. 2980–2984, 2010.
- [23]. Zhou D., Jia L., Kamath J. and Kovscek A., “Scaling of counter-current imbibition processes in low-permeability porous media,” Journal of Petroleum Science and Engineering, Vol. 33, pp.61–74, Apr. 2002.
- [24]. Zimmerman R. and Bodvarsson G., “A simple approximate solution for horizontal infiltration in a Brooks-Corey medium,” Transp Porous Media, Vol.6, Issue 2, 195-205, 2002.
- [25]. Pow M., Allan V., Mallmes R. and Kantzas A., “Production of gas from tight naturally-fractured reservoirs with active water,” In: Annual Technical Meeting. Petroleum Society of Canada, Vol. 38, Issue 07 1997.
- [26]. Li K. and Horne R. N., “An analytical scaling method for spontaneous imbibition in gas/water/rock systems,” SPE Journal, Vol. 9, pp.322–329, 2004.



# Experimental Analysis of Spontaneous Imbibition in Naturally Fractured Gas Reservoirs

Fatemeh Ghasemi <sup>1</sup>, Mehdi Escrochi <sup>1,2\*</sup> and Mojtaba Ghaedi <sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Department of Petroleum Engineering, School of Chemical and Petroleum Engineering, Shiraz University, Iran

<sup>2</sup> IOR-EOR Research Institute, Shiraz University, Iran

escrochi@shirazu.ac.ir

DOI: 10.22078/pr.2019.3789.2729

Received: May/21/2019

Accepted: August/26/2019

## Introduction

One of the methods for evaluating the spontaneous imbibition process in fractured reservoirs is to perform laboratory tests on the scale of laboratory cores. By using experimental data and proper analysis of the results, the behavior of the SI process in the reservoir scale is predictable. The behavior of the SI process depends on various factors and parameters, including the properties of rock and fluid, and the interaction between them. By choosing and preparing core samples with specific properties and performing SI tests, the effects of various factors on the SI process can be analyzed. In the previous studies, considering the effect of each of the factors affecting the SI process, this process has been tested [1]. Investigations show that, despite oil systems, the SI in gas systems has been less considered. This is despite the fact that a significant portion of the world's gas reserves exists in gaseous reservoirs located on the active aquifer. Due to the increased consumption and production of natural gas, attention to this category of reservoirs is necessary and increasing.

In this work, spontaneous water imbibition into air-saturated porous medium tests is carried out at ambient temperature and pressure, and the effects of various factors such as initial water saturation on the rate of SI, final saturation and recovery, are investigated.

## Experimental Procedures

### *Experimental Categories*

Three categories of experiments including SI with and without initial water saturation and with changing boundary conditions were carried out. The experimental steps are described below.

### **Steps of the Experiment**

#### *Selection and preparation of core samples*

The schematic of the apparatus of analyzing the SI process at ambient temperature and pressure is given in Figure 1. Core samples with adjusted initial water saturation are installed into the SI system, and using a special density measuring kit under the AND scale with a precision of 0.001 grams and a maximum of 1000 grams of measurable weight. By adjusting the balance mode to the automatic measurement mode, the suspended core sample's weight is recorded at a specified interval and stored using the RsKay software on a computer connected to the system. As soon as the core is in the saline reservoir, the weight measurement is started and the weight changes are recorded versus the time.

**Selection and preparation of core samples**

The purpose of the experiments is to investigate and analyze the effect of the effective parameters on this process and provide a unified model for predicting flow behavior. In this regard, the selection of rock samples should be such that experiments can be carried out as well by changing various parameters. In this part of the study, carbonate rocks were sampled from one of Iran's gas fields and one of the Canadian fields. After measuring the core properties, several samples were selected for testing. The properties of the selected samples are shown in Table 1.

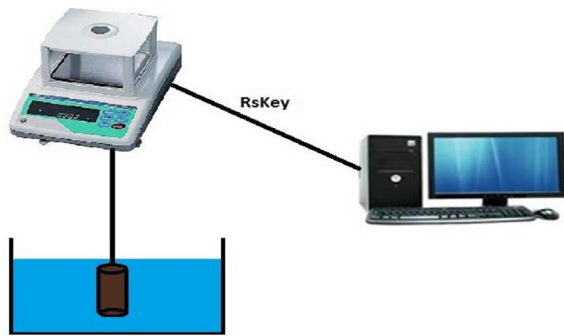


Fig. 1. Schematic of spontaneous imbibition test apparatus.

Table 1: Selected rock properties.

sample	Pgr (gr/cm <sup>3</sup> )	∅	K (mD)	D (cm)	H ((cm
1	2.83	0.21	84	3.8	7.57
2	2.83	0.22	25.	3.8	7.56
3	2.8	0.19	16.9	3.8	7.33
4	2.8	0.2	11.1	3.79	7.49
5	2.82	0.18	6.6	3.8	8.86
6	2.73	0.14	4.6	3.83	4.6

**Results And Discussion**

The results are shown in Figures 2-4. Figure 2 shows the recovery vs. time and the scaled recovery curves by available scaling equations. Figure 3 illustrates the effect of initial water saturation. Also, the impacts of boundary conditions are presented in Figure 4.

**Conclusions**

These results indicate that the velocity of the process in the gas saturation cores depends on several factors such as porosity, permeability, rock fabric, initial water saturation, and boundary conditions. Based on the analysis of the ability of scaling groups, it can be concluded that more precise studies are needed to provide a comparable scaling equation for gas systems.

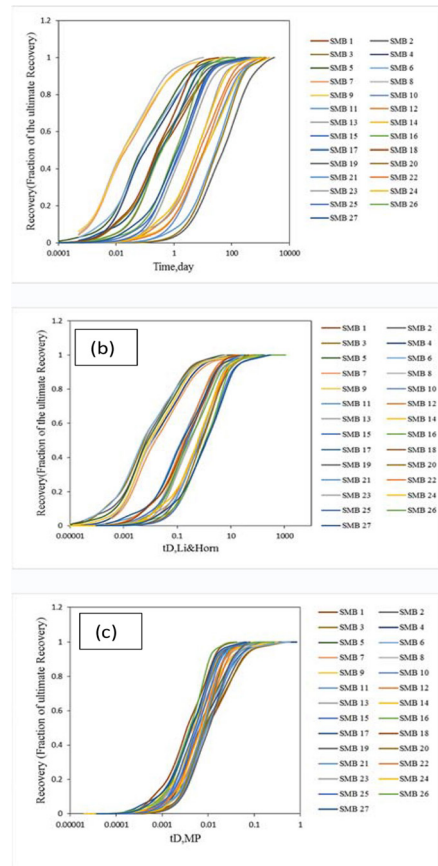


Figure 2. Recovery vs time (a) and normalized

Fig. 2: Recovery vs time (a) and normalized recovery vs tD,Li&Horn(b)[2] and tD,MP(c)[3].

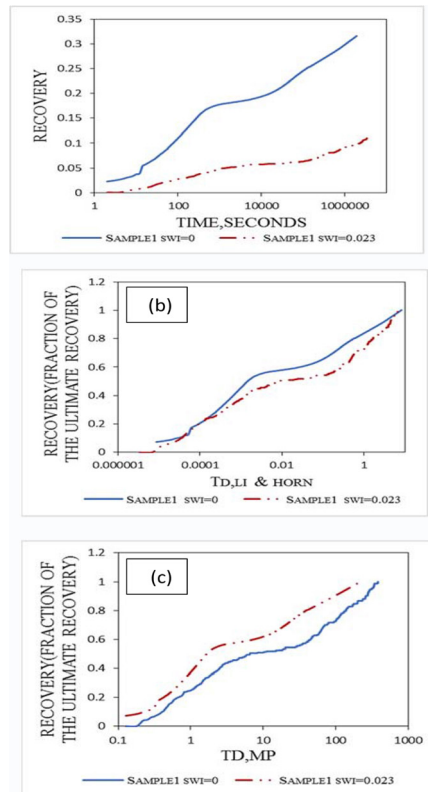
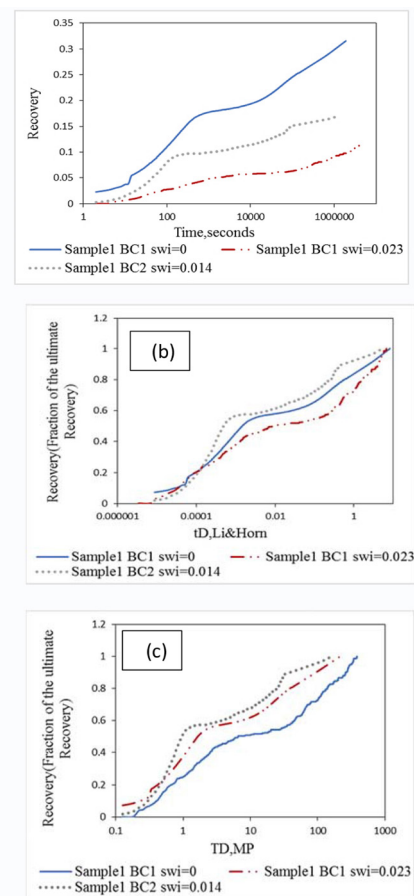


Fig. 3: Recovery vs time (a) and normalized recovery vs tD,Li&Horn(b)[2] and tD,MP(c)[3], varying water saturation.



**Fig. 4:** Recovery vs time (a) and normalized recovery vs  $tD, Li\&Horn$ (b)[2] and  $tD, MP$ (c)[3] varying water saturation and BC.

## REFERENCES

1. Meng Q (2016) Effect of wetting-phase viscosity on cocurrent spontaneous imbibition, Energy and Fuels, 30(2): 835-843.
2. Li K, Horne R N (2004) An analytical scaling method for spontaneous imbibition in gas/water/rock systems, Spe Journal, 9(03):, 322-329.
3. Mirzaei Paiaman A (2015) Analysis of counter-current spontaneous imbibition in presence of resistive gravity forces: displacement characteristics and scaling, Journal of Unconventional Oil and Gas Resources, 12, 68-86.