

# تأثیر پسماند اشباع شدگی و ترشوندگی در محاسبه نمای اشباعی

تاریخ دریافت مقاله: ۸۹/۴/۲۰ ؛ تاریخ پذیرش مقاله ۹۰/۱۲/۲۱

عزت اله کاظم زاده\*، کاظم سعادت، حسام آلوکی بختیاری، جعفر ولی و محمدرضا اصفهانی

پژوهشگاه صنعت نفت،

Kazemzadehe@ripi.ir

پژوهش نفت

سال بیست و دوم

شماره ۶۹

صفحه ۶۳-۵۳ ۱۳۹۱

## چکیده

تعیین اشباع سیالات از پارامترهای اساسی جهت تخمین هیدروکربور در جای مخازن است که مبنای تصمیم‌گیری‌های اقتصادی تولید از مخازن می‌باشد. روابط آرچی متداول‌ترین روابطی است که در تعیین اشباع سیالات به کار گرفته می‌شود. یکی از پارامترهای مهم در این روابط، نمای اشباعی است که با اندازه‌گیری مقاومت ویژه سنگ در اشباع جزئی تعیین می‌شود. نمای اشباعی با دو پارامتر دیگر رابطه آرچی که ضریب سیمان‌شدگی و پیچاپیچی می‌باشند، تفاوت‌های اساسی دارد. ضرایب سیمان‌شدگی و پیچاپیچی بیشتر به نوع سنگ بستگی دارد، ولی نمای اشباعی به نحوه توزیع سیالات در محیط متخلخل و در نتیجه به پسماند اشباع‌شدگی طی فرایندهای آشام و تخلیه و نیز ترشوندگی وابسته است. هدف از این تحقیق، بررسی تأثیر پسماند اشباع‌شدگی و ترشوندگی بر روی نمای اشباعی می‌باشد. بدین منظور با استفاده از سیستم چهار الکترودی اندازه‌گیری مقاومت الکتریکی، نمای اشباعی طی سیکل‌های مختلف اشباع‌شدگی از حالت تخلیه اولیه تا ثانویه در دمای مخزن و با استفاده از نفت مخزن برای پنج نمونه مغزه اندازه‌گیری شده است. روش مورد استفاده، صفحه متخلخل و دینامیکی است که در آن همزمان منحنی‌های کامل فشار موینگی و ترشوندگی نمونه‌ها تعیین می‌گردند. نتایج

بیان‌گر تأثیر پسماند اشباع‌شدگی بر روی نمای اشباعی در نمونه‌های مختلف مورد آزمایش طی مراحل تخلیه اولیه، آشام خود به خود و اجباری و تخلیه خود به خود و اجباری است که تغییراتی را از ۰/۱ تا ۰/۶۶ در مقدار نمای اشباعی به وجود می‌آورد، به طوری که این تغییرات در نمونه‌های نفت تر بیشتر از نمونه‌های آب تر روی می‌دهد.

واژه‌های کلیدی: نمای اشباعی، ترشوندگی، پسماند، فشار موینگی، معادله آرچی

## مقدمه

معادله دوم آرچی جهت تعیین اشباع آب سازند به صورت

$$S_w = \left( \frac{R_o}{R_f} \right)^n = I^{-1/n} \quad (1)$$

در رابطه ۱،  $R_o$  مقاومت ویژه سنگ صددرد صد اشباع از آب سازند،  $R_f$  مقاومت ویژه سنگ با اشباع جزئی از هیدروکربور و آب،  $I$  شاخص مقاومت و  $n$  نمای اشباعی می‌باشند. مقادیر  $R_o$  و  $R_f$  در آزمایشگاه اندازه‌گیری می‌شوند.

محققین زیادی بر روی عوامل مؤثر بر ضرایب اشباع‌شدگی

مجدد این متغیر، پاسخ به دنبال همان پاسخ اولیه و نه لزوماً همان مسیر اولیه خواهد بود. با تکرار تغییرات، نمودار پاسخ-متغیر در یک حلقه بسته‌ای خواهد بود. در مخازن هیدروکربوری به وجود آمدن پسماند مقاومت الکتریکی به دلیل تکرار مکانیسم‌های آشام و تخلیه طی عمر مخزن است. در ابتدای عمر مخزن، فاز ترشونده (آب) توسط فاز غیرترشونده (نفت) جا به جا می‌گردد (فرآیند تخلیه). در هنگام تولید از یک مخزن مجدداً سطح تماس آب و نفت تغییر می‌کند و آب جایگزین نفت می‌شود در این حالت اشباع فاز ترشونده افزایش و اشباع فاز غیرترشونده کاهش می‌یابد (فرآیند آشام). بنابراین، طی فرآیندهایی نظیر تزریق آب، تزریق گاز، انبساط بستر آبه و انبساط کلاهک گازی، مکانیسم‌های تخلیه و آشام مرتباً تکرار می‌شوند.

نمای اشباعی وابسته به پسماند اشباع شدگی طی سیکل‌های مختلف اشباع‌شدگی از مرحله تخلیه اولیه تا ثانویه می‌باشد. در اکثر تحقیقات انجام شده، اثر پسماند اشباع شدگی بر روی نمونه‌های مصنوعی یا ماسه سنگی بررسی شده است. ال‌کعبی و همکاران [۱۰] تأثیر پسماند اشباع‌شدگی را بر روی دو نمونه ماسه سنگی با انجام آزمایشات در دمای  $65^{\circ}\text{C}$  و فشار همه‌جانبه  $2000$  پام بررسی کردند. آنها نمای اشباعی را در مراحل تخلیه اولیه، آشام خود به خود آب و به دنبال آن آشام اجباری و همچنین تخلیه ثانویه خود به خود و به دنبال آن تخلیه ثانویه اجباری به ترتیب  $1/8$ ،  $2/72$  و  $2/14$  گزارش نمودند. ویی و لیل [۱۱] برای نه نمونه پلاگ ماسه سنگی بریبا، تأثیر پسماند اشباع‌شدگی را بر مقاومت ویژه الکتریکی در نمونه‌های آب‌تر و نفت‌تر بررسی کردند. نتایج حاصل بیان‌گر آن است که پسماند اشباع‌شدگی، تأثیری روی ارتباط بین شاخص مقاومت الکتریکی و اشباع در نمونه‌های آب‌تر ندارد. اما در نمونه‌های نفت‌تر، مقاومت ویژه الکتریکی تنها تابعی از میزان اشباع آب در نمونه نیست و به شدت تحت تأثیر مراحل اشباع‌شدگی (آشام و تخلیه) قرار دارد. در نمونه‌های نفت‌تر نمای اشباعی در حدود ۳ برای حالت تخلیه اولیه گزارش شده است، در حالی که در مرحله آشام و تخلیه ثانویه در اشباع‌های پایین، نمای اشباعی بالاتر از ۶ نیز مشاهده شده است. این محققین جهت توصیف پدیده

مطالعه نموده‌اند. آنها مهم‌ترین عوامل تأثیرگذار بر روی ضرایب سیمان‌شدگی ( $m$ ) و پیچاییچی ( $a$ ) را در معادله اول آرچی ( $F=R_o/R_w=a/\Phi^{-m}$ ) شکل دانه‌ها و منافذ، نوع دانه‌ها، سیستم تخلخل، سطح داخلی ویژه و ناهمسان‌گردی تشخیص داده‌اند [۲-۵]. تحقیقات انجام شده بیان‌گر این مطلب است که درجه وابستگی ضریب سیمان‌شدگی به شکل هندسی خلل و فرج در سنگ‌های کربناته، بیشتر از وابستگی آن به میزان سیمان‌شدگی می‌باشد. به طوری که آن را به جای ضریب سیمان‌شدگی ضریب شکل هندسی منافذ نامیده‌اند. ولی نمای اشباعی به نحوه توزیع سیالات در محیط متخلخل و در نتیجه به پسماند اشباع‌شدگی طی فرایندهای آشام و تخلیه و ترشوندگی بستگی دارد. بنابراین انجام آزمایشات در شرایط دما و فشار مخزن و با استفاده از نمونه‌هایی با ترشوندگی حفظ شده یا بازگردانی شده به شرایط مخزن ضروری است. تأثیر شرایط آزمایش توسط محققینی نظیر لانگرون و همکاران [۶] لیل و میلز [۷] گری و همکاران [۸] و آندرسون [۹] بررسی شده است. نتایج تحقیقات آنها، به استفاده از نفت مخزن و اعمال شرایط دما و فشار در آزمایشات نمای اشباعی تأکید می‌کند. آنها همچنین به منظور کاهش خطا در اندازه‌گیری نمای اشباعی، استفاده از سیستم چهار الکترودی را پیشنهاد نموده‌اند و در هر مرحله از اندازه‌گیری شاخص مقاومت الکتریکی به اطمینان یافتن از اشباع یکنواخت در طول نمونه به منظور کاهش خطا تأکید کرده‌اند. لیل و میلز [۷] نشان دادند در صورتی که نمونه به اشباع یکنواخت نرسد، نمودار شاخص مقاومت برحسب اشباع، به ویژه در سیستم دو الکترودی دارای انحنا خواهد بود. گری و همکاران [۸] دو روش صفحه متخلخل و تزریق پیوسته با دبی ثابت را برای تعیین شاخص اشباع در نمونه‌های آب‌تر به کار بردند. آنها عنوان کردند که با روش تزریق با دبی ثابت نمی‌توان به اشباع یکنواخت در نمونه‌های نفت‌تر رسید.

پسماند در تعریف برگشت ناپذیری یک فرآیند است. وقتی یک پارامتر در یک فرآیند افزایش می‌یابد، پاسخ آن در یک جهت خاص تغییر می‌کند که به وسیله یک نمودار پاسخ-متغیر مشخص می‌شود. وقتی متغیر کاهش می‌یابد، پاسخ در همان مسیر قبلی نخواهد بود. با افزایش

اشباع، تأثیر بسزایی در توزیع مجدد سیالات در فضای منافذ دارند. ترشوندگی نقش مهمی در حرکت سیالات، توزیع و هدایت الکتریکی در طی فرآیندهای کاهش اشباع دارد.

مورگان و پیرسون [۱۵] نمای اشباعی را بر روی نمونه‌های فشرده کروی از جنس شیشه با تغییر غلظت محلول سیلیکون اندازه‌گیری نمودند. آنها مقادیر  $n$  را از ۲/۵ برای نمونه‌های قویاً آب‌تر تا ۲۵ برای نمونه‌های قویاً نفت‌تر گزارش کردند. لویز و همکاران [۱۶]، از کوبولون  $C$  جهت تغییر ترشوندگی نمونه‌های ماسه سنگی بریبا استفاده کردند. ایشان عدد ۲ را برای نمونه‌های آب‌تر بریبا و عدد ۵/۲ را برای نمونه‌های نفت‌تر بریبا تعیین نمودند. ویی و لیل [۱۷] با استفاده از سیستم‌های دو الکترودی و چهار الکترودی مقادیر نمای اشباعی را در ماسه سنگ‌ها مورد مطالعه قرار داده‌اند. نتایج تحقیقات آنها بیان‌گر تغییرات ناچیز نمای اشباعی طی فرآیندهای آشام و تخلیه برای نمونه‌های آب‌تر می‌باشد. ولی این تغییرات در نمونه‌های نفت‌تر قابل ملاحظه است.

سویینی و جنینگز [۱۸] منحنی‌های شاخص مقاومت را در سنگ‌های کربناته مورد مطالعه قرار دادند. آنها با تغییر ترشوندگی نمونه‌ها از ترشوندگی متوسط به آب‌تر و سپس نفت‌تر، مقادیر نمای اشباعی را اندازه‌گیری کردند. ایشان از آشام جذب خود به خود برای تعیین ترشوندگی اولیه نمونه‌ها استفاده نمودند و پس از اندازه‌گیری‌های مقاومت الکتریکی با قرار دادن نمونه‌ها در کوره تا حرارت  $450^{\circ}C$  تمام مواد آلی موجود در نمونه را از بین برده و در نتیجه نمونه‌ها را قویاً آب‌تر نمودند و سپس در این شرایط مقاومت ویژه الکتریکی را اندازه‌گیری کردند. مقادیر نمای اشباعی در این دو حالت یعنی ترشوندگی متوسط و مغزه‌های آب‌تر به ترتیب ۱/۹ و ۱/۶ گزارش گردید. سپس به کمک اسیدهای نفتنیک نمونه‌ها را به شرایط نفت‌تر تبدیل نمودند و با توجه به درجات مختلف اشباع آب در نمونه‌های مختلف، مقدار نمای اشباعی را بین ۸ تا ۱۲ گزارش کردند.

در این تحقیق، مطالعه پسماند اشباع‌شدگی بر روی نمای اشباعی طی سه مرحله شامل تخلیه اولیه، آشام خود به خود

پسماند در نمونه‌های نفت‌تر دو عامل به تله افتادن و انگشتی شدن جریان را در حالت‌های مختلف اشباع‌شدگی مطرح نمودند. نایت [۱۲] طی فرآیندهای آشام و تخلیه بر روی سه نمونه ماسه سنگی، نمای اشباعی را بررسی نمود. نایت با استفاده از هوا اشباع آب را کاهش داد. و در یک سیستم دو الکترودی مقاومت الکتریکی را اندازه‌گیری کرد. نتایج تحقیقات نشان می‌دهد که در حالتی که اشباع آب پایین است، یک حالت تقریباً یکتا و برگشت‌پذیر بین مقاومت و اشباع آب وجود دارد. ولی طی یک پسماند کامل، مقاومت اندازه‌گیری شده در هر میزان از اشباع آب در حالت آشام کمتر از حالت تخلیه است.

توهیو و همکاران [۱۳] با انجام آزمایشاتی روی نمونه‌های گچی دریای شمال، تأثیرات پسماند بر فشار موئینگی، تراوایی نسبی و نمای اشباعی را مطالعه نمودند. این آزمایشات بدون استراحت دادن نمونه‌ها در شرایط مخزن با استفاده از نرمال دکان و آب مصنوعی سازند صورت گرفته است. آنها سطوح مختلفی از پسماند را برای منحنی‌های فشار موئینگی، تراوایی نسبی و شاخص مقاومت ارائه نمودند، در حالی که پسماند بر شاخص مقاومت الکتریکی تأثیر کمتری داشت. آزمایشات انجام شده توسط ایشان در شرایط محیطی بوده و بازگردانی نمونه‌ها به شرایط مخزن نیز صورت نگرفته بود. بنابراین، همان گونه که انتظار می‌رفت، شاخص ترشوندگی آموت [۱۴] بیان‌گر شاخص‌های ترشوندگی مثبت بوده و نقاط انتهایی منحنی‌های تراوایی نسبی و میزان اشباع آب در نقطه تقاطع منحنی‌های نفوذپذیری نسبی، همگی بیان‌گر آب‌تر بودن متوسط نمونه‌ها می‌باشد. همچنین تأثیر پسماند در مقاومت ویژه الکتریکی و تراوایی نسبی فاز ترشونده، به دلیل آب‌تر بودن نمونه‌ها ناچیز بوده است. آنها مقادیر نمای اشباعی دو نمونه را طی فرآیندهای آشام و تخلیه به ترتیب ۱/۶ تا ۱/۴ و ۱/۷ تا ۱/۶ گزارش نمودند و در نمونه سوم طی فرآیندهای آشام و تخلیه مقدار نمای اشباعی را ۱/۴ تعیین کردند.

از عوامل کنترل‌کننده پسماند طی فرآیندهای آشام و تخلیه می‌توان از هندسه منافذ، اشباع اولیه و توزیع ترشوندگی در مقیاس منافذ نام برد. ترشوندگی و پسماند

جاگذاری شده و صفحات متخلخل اشباع در دو طرف نمونه قرار داده شدند. در مرحله بعد الکترودهای جریان و پتانسیل نصب گردید. به منظور کاهش خطا در اندازه‌گیری مقاومت از سیستم چهار الکترودی استفاده شده است.

پس از پایداری مقاومت ویژه الکتریکی و میزان جابه‌جایی پمپ‌ها، مقاومت ویژه نمونه صددرصد اشباع از آب سازند تعیین گردید. همزمان مقاومت ویژه الکتریکی آب نمک توسط محفظه‌ای مخصوص پر شده از آب نمک اندازه‌گیری شد. سپس مراحل افزایش فشار مویینگی از ۵ پام تا ماکزیمم ۱۴۰ پام طی چند مرحله صورت گرفت. به منظور اطمینان از حصول اشباع یکنواخت در طول نمونه در هر فشار مویینگی بعد از تثبیت مقاومت و همچنین قطع تزریق، مرحله افزایش فشار مویینگی انجام گرفت. رسیدن به شرایط تعادل در میزان مقاومت ویژه و اشباع، سبب طولانی شدن زمان آزمایش در هر مرحله از افزایش فشار شده است.

در مرحله بعد، آشام خود به خود و به دنبال آن آشام اجباری با تغییر فشار مویینگی از ماکزیمم ۱۴۰ پام تا صفر پام (آشام خود به خود) و سپس از فشار مویینگی صفر تا می‌نیمم ۱۴۰- پام (آشام اجباری) صورت گرفته است. پس از افزایش فشار از می‌نیمم ۱۴۰- پام به صفر و سپس از صفر به ماکزیمم ۱۴۰ پام، تخلیه خود به خود و تخلیه ثانویه صورت گرفته است. سطوح زیر منحنی‌های فشار مویینگی، معرف کار لازم برای جابه‌جایی یک فاز توسط فاز دیگر است و نسبت لگاریتم سطوح زیر منحنی فشار مویینگی در حالت‌های تخلیه ثانویه و آشام اجباری شاخص ترشوندگی به روش USBM می‌باشد. در این تحقیق با انجام سیکل کامل، منحنی‌های فشار مویینگی (شکل‌های ۱ تا ۵) شاخص ترشوندگی USBM و شاخص ترشوندگی آموت تعیین گردیده است.

### نتایج و بحث

نتایج حاصل از تعیین خواص پتروفیزیکی و پتروگرافی نمونه‌ها در جدول ۱ خلاصه شده است. همچنین نتایج حاصل از تست SARA مورد استفاده در جدول ۲ آمده است.

و به دنبال آن آشام اجباری و همچنین تخلیه خود به خود و به دنبال آن تخلیه اجباری صورت گرفته است. جهت مطالعه پسماند اشباع‌شدگی از روش صفحه متخلخل و دینامیکی استفاده گردیده که با اندازه‌گیری‌های فشار مویینگی طی سیکل‌های تخلیه اولیه تا تخلیه ثانویه، با استفاده از روش ترکیبی آموت و USBM<sup>۱</sup>، ترشوندگی نمونه‌ها نیز به صورت همزمان تعیین گردیده است.

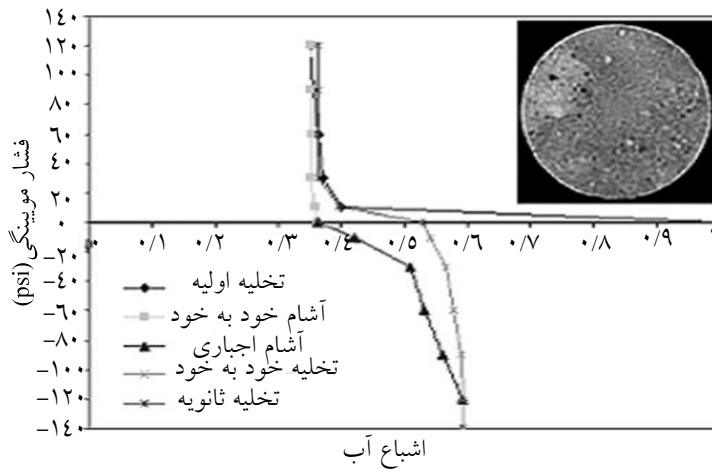
### روش کار

با توجه به این نکته که توزیع اشباع سیالات در منافذ سنگ از مهم‌ترین عوامل تأثیرگذار بر روی نمای اشباعی می‌باشد، به منظور لحاظ نمودن دما فشار و حصول اشباع یکنواخت در طول مغزه، از روش دینامیکی و صفحه متخلخل استفاده شده است. همچنین به منظور لحاظ نمودن ترشوندگی، آزمایشات با استفاده از نفت مخزن در دمای ۸۰ °C انجام گرفته است. فشار همه‌جانبه ۳۰۰۰ پام و فشار منفذی ۱۰۰۰ پام جهت انجام آزمایشات در نظر گرفته شد.

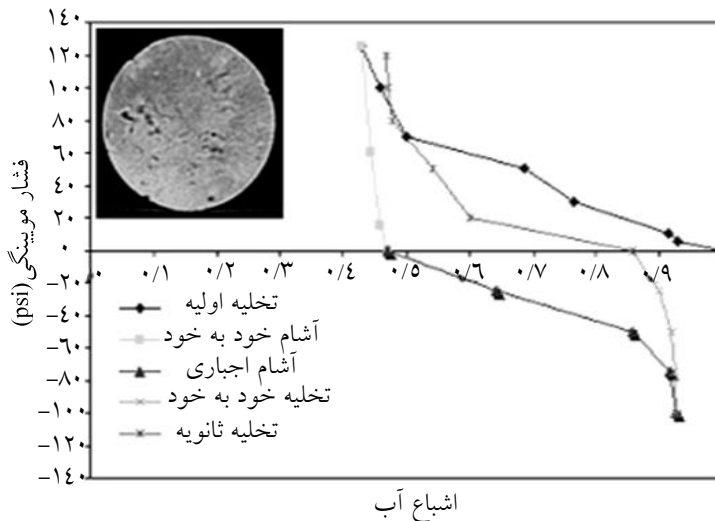
در این روش برای رسیدن به شرایط توزیع اشباع یکنواخت در طول نمونه و در هر فشار مویینه، حداقل یک هفته زمان لازم است، به طوری که برای یک سیکل کامل فشار مویینگی و شاخص مقاومت، حداقل سه ماه زمان صرف شده است. در این روش ضمن تعیین منحنی‌های کامل فشار مویینگی و نمای اشباعی طی سیکل‌های مختلف آشام و تخلیه، ترشوندگی نمونه‌ها از سطوح زیر منحنی‌های فشار مویینگی در حالت‌های تخلیه ثانویه و آشام اجباری و محل برخورد منحنی‌های فشار مویینگی با محور اشباع آب، تعیین گردید. تأثیر پسماند اشباع‌شدگی طی سیکل‌های آشام و تخلیه و ترشوندگی نمونه‌ها بر روی نمای اشباعی مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. برای این منظور چهار نمونه سنگ کربناته با انواع مختلف بافت و تخلخل و یک نمونه ماسه‌سنگی با تخلخل بین‌دانه‌ای جهت مقایسه انتخاب گردیدند.

مراحل انجام کار برای نمونه‌ها تقریباً مشابه است. ابتدا نمونه با آب سازند و دو صفحه متخلخل یکی با آب سازند و دیگری با نفت مخزن اشباع گردیدند و پس از پر نمودن پمپ‌های تزریق آب و نفت، نمونه اشباع از آب سازند

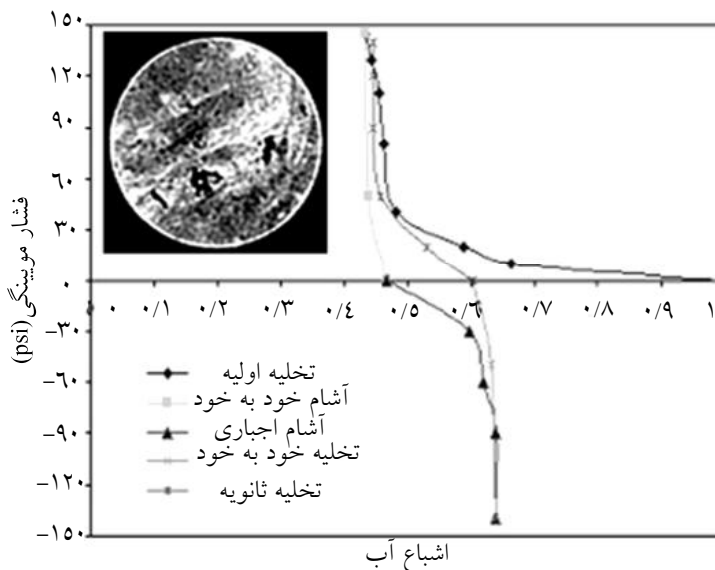
1. United States Bureau of Mines



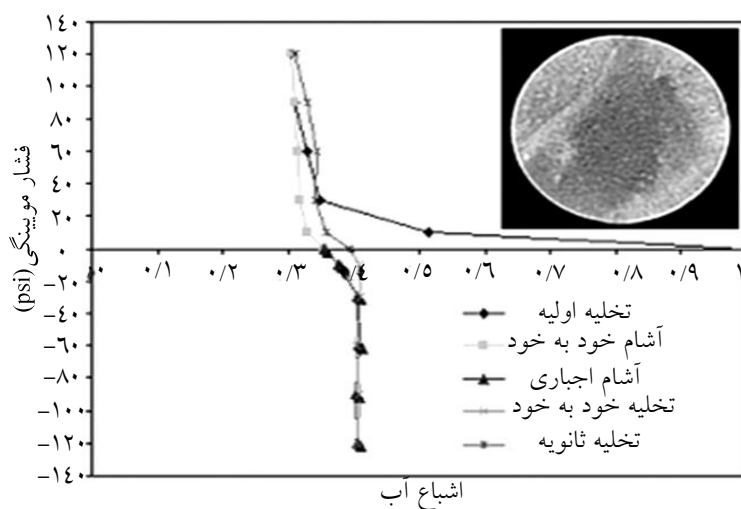
شکل ۱- منحنی کامل فشار مویبگی همراه با تصویر سی تی اسکن نمونه شماره یک



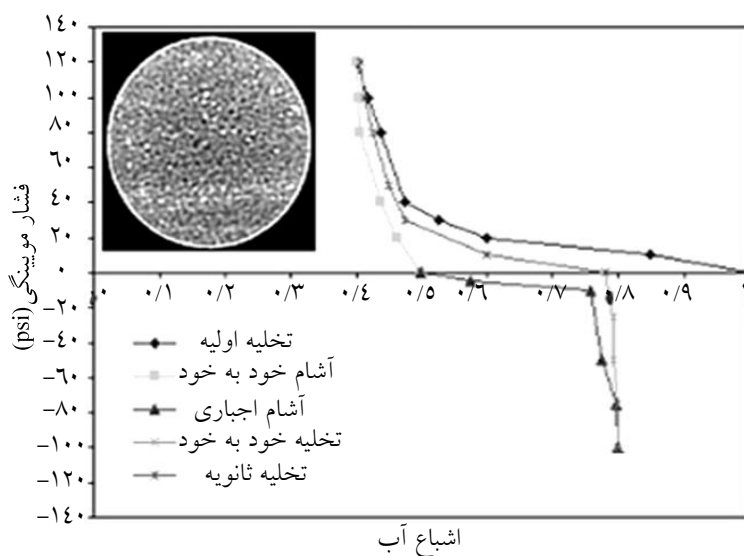
شکل ۲- منحنی کامل فشار مویبگی همراه با تصویر سی تی اسکن نمونه شماره دو



شکل ۳- منحنی کامل فشار مویبگی همراه با تصویر سی تی اسکن نمونه شماره سه



شکل ۴- منحنی کامل فشار موئینگی همراه با تصویر سی تی اسکن نمونه شماره چهار



شکل ۵- منحنی کامل فشار موئینگی همراه با تصویر سی تی اسکن نمونه شماره پنج

جدول ۱- مشخصات پتروگرافی و پتروفیزیکی نمونه‌ها

نمونه	بافت	نوع تخلخل	درصد تخلخل	تراوایی نسبت به هوا (mD)
۱	دولوپکستون	حفره‌ای - بین کریستالی	۱۴	۱۱/۷۰
۲	پکستون	قالبی - حفره‌ای	۲۲	۱۴/۷۰
۳	دولوپکستون	حفره‌ای - بین کریستالی	۱۹	۲/۰۸
۴	پکستون	شکستگی - بین کریستالی	۱۶	۲۱/۱۵
۵	ماسه سنگ	بین دانه‌ای	۱۸	۹/۴۴

جدول ۲- درصد ترکیبات نفت خام مورد استفاده

اشباع	آروماتیک‌ها	رزین‌ها	آسفالتین
۷۵/۲۲	۱۸/۸۳	۵/۴۲	۰/۴۳

۰/۶۶ متغیر است، ولی برای نمونه ماسه سنگی با خاصیت آب‌تری در حالت‌های مختلف آشام و تخلیه، نمای اشباعی برابر ۰/۱ می‌باشد. مقادیر نمای اشباعی در مرحله تخلیه اولیه کمتر از مقادیر نمای اشباعی در سایر حالت‌ها است که دلیل عمده آن را می‌توان افزایش خاصیت نفت‌تری نمونه‌ها پس از اتمام مرحله تخلیه اولیه دانست. زیرا شستشوی اولیه نمونه‌ها با تولوئن، خواص آب‌تری نمونه‌ها را افزایش می‌دهد. همچنین با توجه به زمان طولانی آزمایش در مرحله تخلیه اولیه (حدود یک ماه) و استفاده از نفت مخزن در شرایط فشار و دمای مخزن، بازگردانی نمونه‌ها به شرایط مخزن در این مرحله انجام شده که باعث افزایش خواص نفت‌تری نمونه‌ها شده است.

افزایش خاصیت نفت‌تر شدن نمونه‌ها علاوه بر طولانی‌تر کردن مسیر جریان الکتریکی، سبب ایجاد فضاهای منقطع از جریان آب نمک طی سیکل‌های بعدی شده و در نتیجه سبب افزایش مقاومت ویژه الکتریکی نمونه و همچنین شاخص مقاومت و نمای اشباعی می‌شود. مقادیر نمای اشباعی در نمونه‌های کربناته بیشتر متأثر از ترشوندگی و پسماند اشباع‌شدگی است، به طوری که تغییرات در نمای اشباعی در حالت‌های تخلیه اولیه، آشام خود به خود و آشام اجباری و تخلیه خود به خود و تخلیه اجباری در نمونه‌های کربناته بیشتر از نمونه ماسه سنگی می‌باشد. همان‌گونه که اشاره گردید، خاصیت نفت‌تری نمونه‌های کربناته و پیچیده‌تر بودن سیستم تخلخل در سنگ‌های کربناته را می‌توان از دلایل عمده این تفاوت‌ها عنوان نمود. نتایج همچنین نشان می‌دهد که پسماند اشباع‌شدگی بین سیکل‌های آشام و تخلیه روی نمای اشباعی تأثیر قابل ملاحظه‌ای دارد.

به منظور مطالعه تاثیر ترشوندگی بر روی نمای اشباعی، بعد از اتمام آزمایشات همزمان فشار موینگی و نمای اشباعی، مقادیر ترشوندگی به روش‌های آموت و USBM محاسبه گردید. نتایج آزمایشات ترشوندگی در جدول ۳ ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهد که ترشوندگی نمونه‌ها از آب‌تر تا نفت‌تر تغییر می‌کند و روش‌های آموت و USBM دارای نتایج سازگار می‌باشند. بیشترین خاصیت نفت‌تری در نمونه شماره یک و بیشترین خاصیت آب‌تری در نمونه شماره چهار می‌باشد.

همچنین با توجه به اندازه‌گیری مقاومت نمونه در هر یک از حالت‌های تخلیه اولیه، آشام خود به خود و اجباری و تخلیه خود به خود و اجباری، مقادیر نمای اشباعی از رابطه سوم آرچی ( $I_p = SW^n$ ) با رسم نمودار  $I_p$  بر حسب Sw در مقیاس لگاریتمی تعیین گردید (شکل‌های ۶ تا ۱۰).

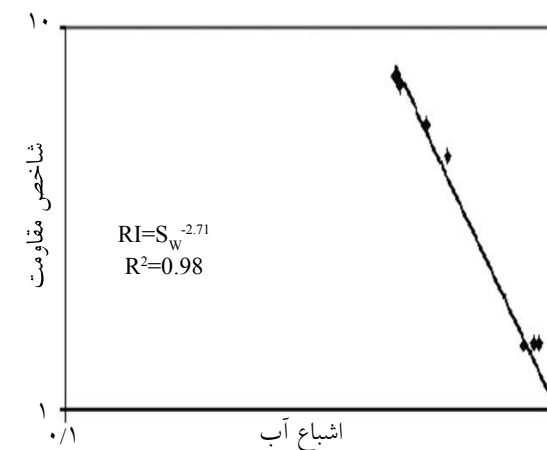
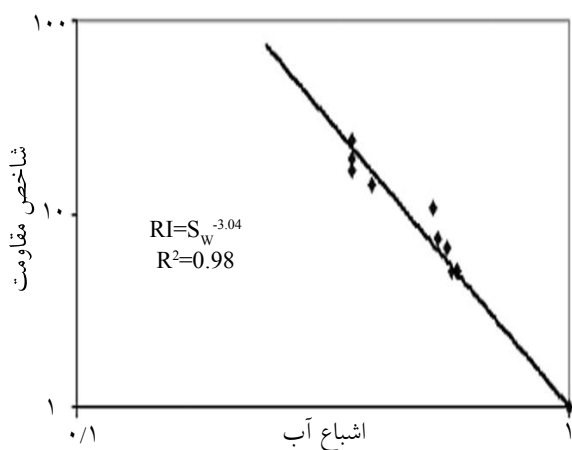
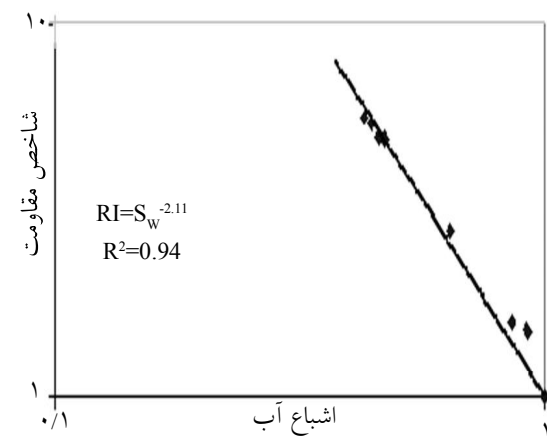
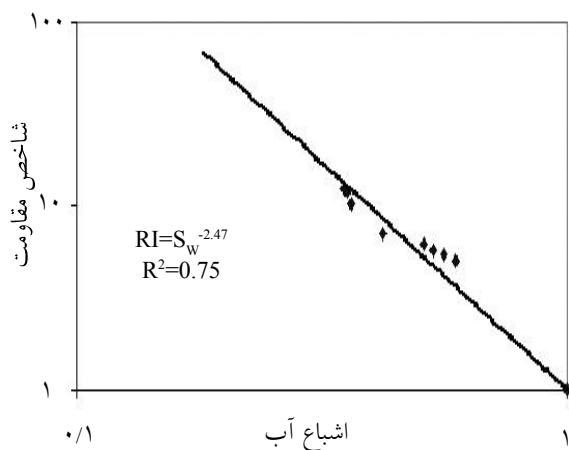
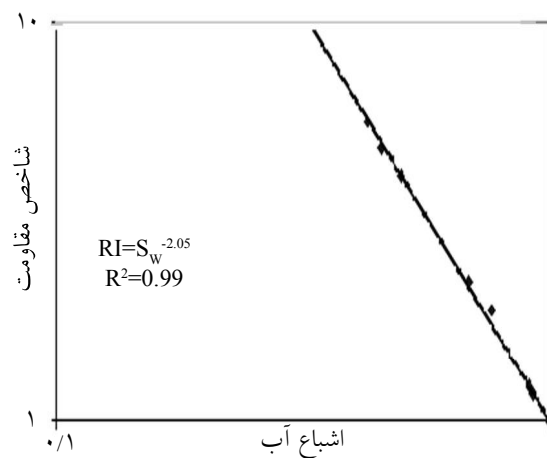
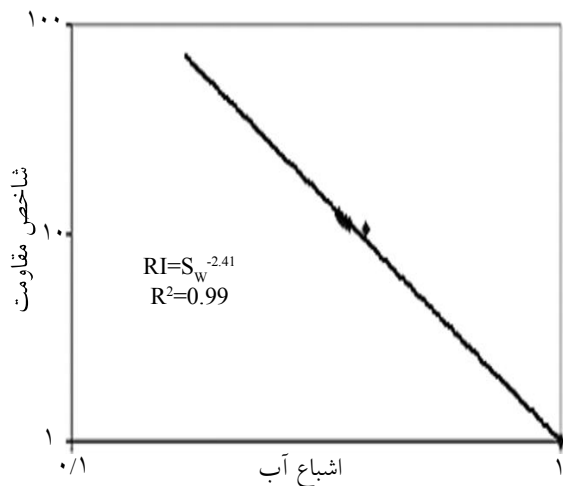
جدول ۳- نتایج حاصل از ترشوندگی نمونه‌ها

شماره نمونه	شاخص آموت - هاروی	شاخص USBM
۱	-۰/۲۱	-۰/۵۴
۲	-۰/۱۴	-۰/۱۸
۳	-۰/۰۲	-۰/۰۳
۴	۰/۳۴	۰/۴۱
۵	۰/۱۹	۰/۳۱

تغییرات نمای اشباعی طی مراحل مختلف شامل تخلیه اولیه، آشام خود به خود و اجباری و تخلیه خود به خود و اجباری در جدول ۴ آمده است. نتایج حاصل نشان می‌دهد که در نمونه‌ها پسماند بین سیکل‌های تخلیه و آشام وجود دارد. در نمونه‌های کربناته مورد آزمایش، تغییرات نمای اشباعی طی حالت‌های مختلف آشام و تخلیه از ۰/۴ تا

جدول ۴- نمای اشباعی طی سیکل‌های مختلف اشباع‌شدگی

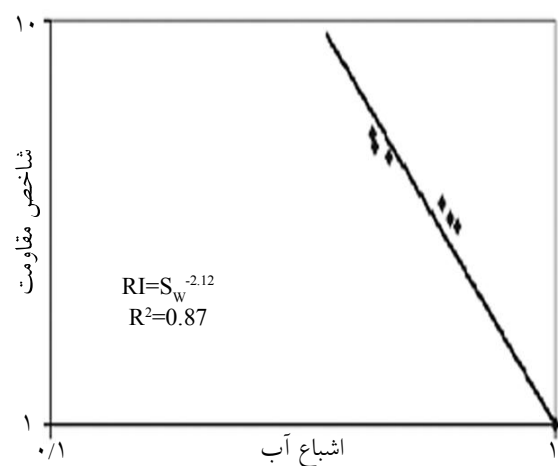
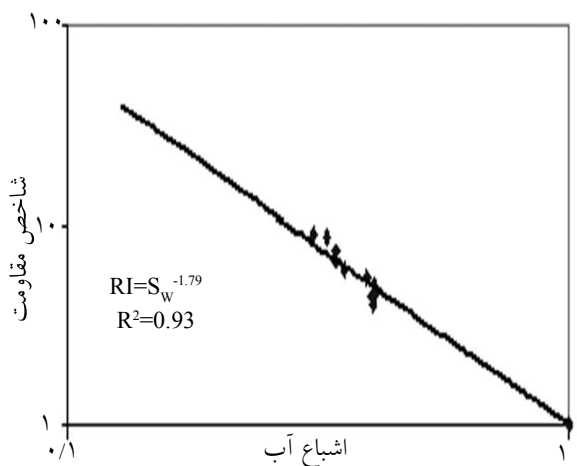
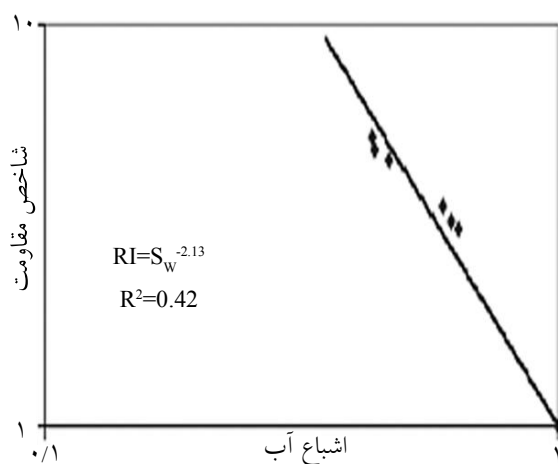
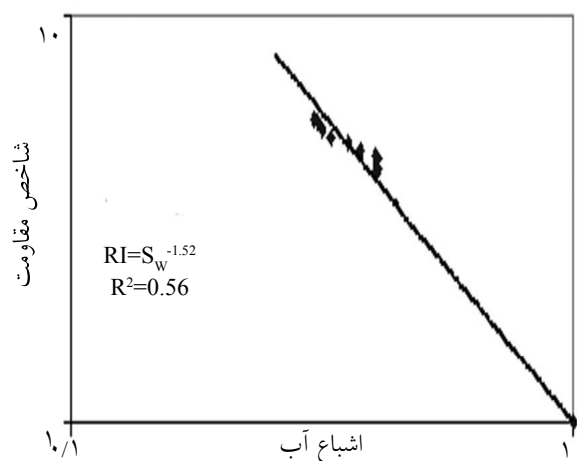
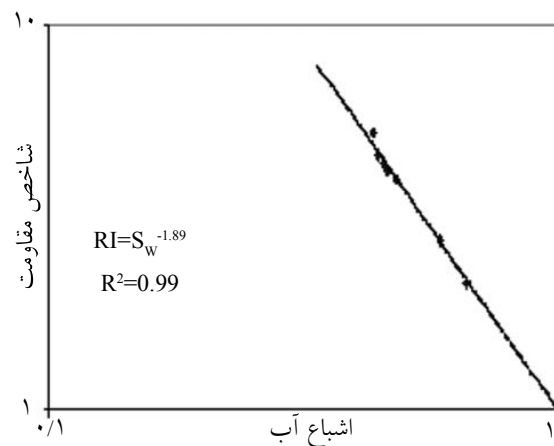
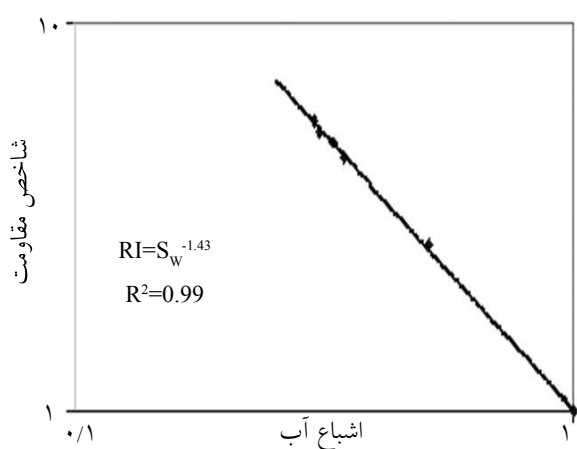
شماره نمونه	تخلیه اولیه	آشام اجباری و خود به خودی	تخلیه اجباری و خود به خودی
۱	۲/۴۱	۲/۴۷	۳/۰۴
۲	۲/۰۵	۲/۱۱	۲/۷۱
۳	۱/۸۹	۲/۱۳	۲/۱۲
۴	۱/۴۳	۱/۵۲	۱/۷۹
۵	۱/۷۰	۱/۷۸	۱/۸۰



شکل ۷- ارتباط شاخص مقاومت بر حسب اشباع آب به ترتیب از بالا به پایین در حالت‌های تخلیه اولیه، آشام خود به خود و آشام اجباری، تخلیه خود به خود و اجباری (در حالت  $b=1$ ) برای نمونه شماره یک

شکل ۶- ارتباط شاخص مقاومت بر حسب اشباع آب به ترتیب از بالا به پایین در حالت‌های تخلیه اولیه، آشام خود به خود و آشام اجباری، تخلیه خود به خود و اجباری (در حالت  $b=1$ ) برای نمونه شماره دو





شکل ۹- ارتباط شاخص مقاومت بر حسب اشباع آب به ترتیب از بالا به پایین در حالت‌های تخلیه اولیه، آشام خود به خود و آشام اجباری، تخلیه خود به خود و اجباری (در حالت  $b=1$ ) برای نمونه شماره چهار

شکل ۸- ارتباط شاخص مقاومت بر حسب اشباع آب به ترتیب از بالا به پایین در حالت‌های تخلیه اولیه، آشام خود به خود و آشام اجباری، تخلیه خود به خود و اجباری (در حالت  $b=1$ ) برای نمونه شماره سه

اجباری برای نمونه یک تا پنج به ترتیب برابر  $۰/۶۳$ ،  $۰/۶۶$ ،  $۰/۲۴$ ،  $۰/۳۶$  و  $۰/۱$  می‌باشند. همان‌گونه که روند تغییرات نشان می‌دهد، به طور متوسط بیشترین تغییرات مربوط به نمونه‌های نفت‌تر و کمترین تغییرات مربوط به نمونه‌های آب‌تر می‌باشد.

### نتیجه‌گیری

- روش‌های USBM و آموت در تعیین ترشوندگی نمونه‌های مورد مطالعه دارای نتایج سازگار می‌باشند.

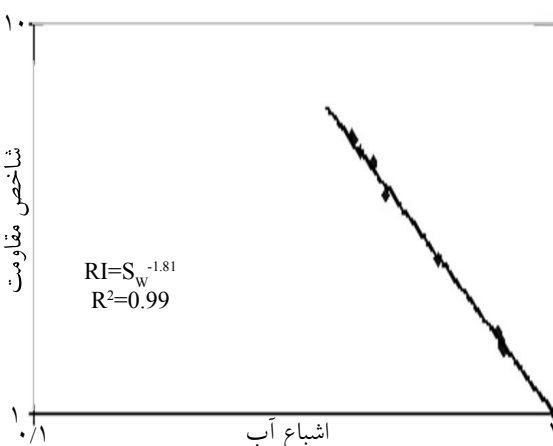
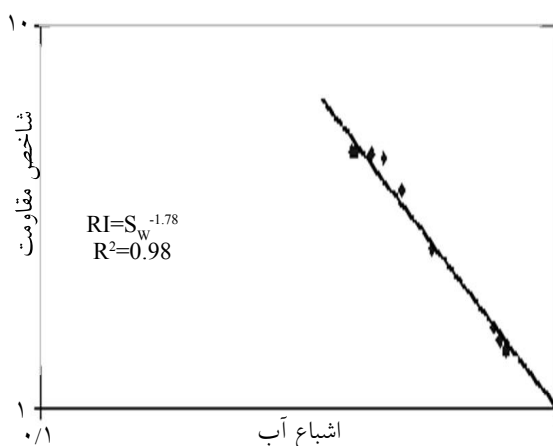
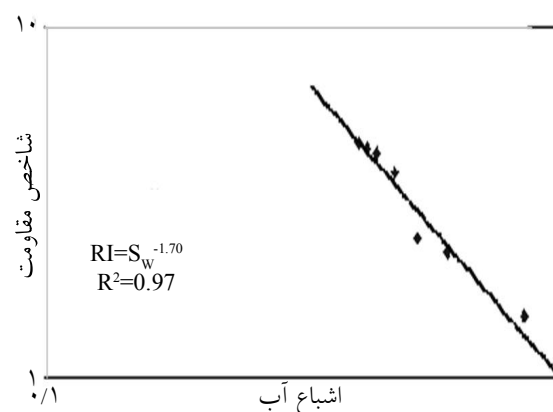
- با افزایش خاصیت نفت‌تری، تغییرات در نمای اشباعی طی فرایندهای آشام و تخلیه محسوس‌تر می‌گردد.

- به منظور تخمین میزان اشباع سیالات مخصوصاً میزان نفت و گاز در جای مخزن، لازم است آزمایشات تعیین نمای اشباعی در شرایط دمایی مخزن و با استفاده از نفت مخزن صورت گیرد. تأثیر پسماند اشباع‌شدگی طی فرایندهای آشام و تخلیه بر روی نمای اشباعی در نمونه ماسه سنگی با خواص آب‌تری کمتر از تمامی نمونه‌های کربناته، حتی نمونه کربناته با خاصیت آب‌تری می‌باشد. در نتیجه میزان انحراف از معادله سوم آرچی در نمونه ماسه سنگی کمتر از نمونه‌های کربناته است.

- مقادیر نمای اشباعی اندازه‌گیری شده با استفاده از روشی که در آن از نمونه‌های شسته شده با حلال استفاده می‌شود و جهت انجام آزمایشات هوا به عنوان فاز ترشونده به کار می‌رود، دارای اعتبار لازم خصوصاً در نمونه‌های نفت‌تر نمی‌باشد و استفاده از این روش در نمونه‌های ماسه سنگی آب‌تر به علت تأثیر ناچیز پسماند اشباع‌شدگی در این حالت، دارای دقت بیشتری در مقایسه با نمونه‌های کربناته می‌باشد.

- با توجه به تأثیر ترشوندگی و پسماند اشباعی‌شدگی توزیع اشباع سیالات، لازم است آزمایشات تعیین نمای اشباعی و فشار موینگی خصوصاً در نمونه‌های نفت‌تر با استفاده از نمونه‌هایی که ترشوندگی آنها حفظ شده یا نمونه‌های برگردانی شده به شرایط مخزن با در نظر گرفتن پسماند اشباع‌شدگی، انجام گیرد.

- پیشنهاد می‌شود در مخازن آب‌تر که نمونه مغزه آن توسط حلال شسته شده است، به جای استفاده از نفت خام در روش‌های متداول اندازه‌گیری نمای اشباعی، از هوا به عنوان فاز غیر ترشونده استفاده شود.



شکل ۱۰: ارتباط شاخص مقاومت بر حسب اشباع آب به ترتیب از بالا به پایین در حالت‌های تخلیه اولیه، آشام خود به خود و آشام اجباری و تخلیه خود به خود و اجباری (در حالت  $b=1$ ) برای نمونه شماره پنج

تأثیر هیستریزس اشباع‌شدگی طی فرایندهای آشام و تخلیه بر روی نمای اشباعی در نمونه ماسه سنگی با خواص آب‌تری کمتر از تمامی نمونه‌های کربناته، حتی نمونه کربناته با خاصیت آب‌تری می‌باشد. در نتیجه میزان انحراف از معادله سوم آرچی در نمونه ماسه سنگی کمتر از نمونه‌های کربناته است. مقدار متوسط تغییرات نمای اشباعی طی مراحل تخلیه اولیه، آشام خود به خود و اجباری و تخلیه خود به خود و

## مراجع

- [1] Archie G.E., "The electrical resistivity log as aid in determining some reservoir characteristics", Trans, AIME, 146, pp. 54-62, 1942.
- [2] Focke J.W. and Munn D., "Cementation exponents in Middle Eastern carbonate reservoirs", SPE paper No. 13735, SPE Formation Evaluation, 2, pp. 155-167, 1987.
- [3] Salem H.S. and Chilingarian G.V., "Determination of specific surface area and mean grain size from well log and their influence on the physical behavior of offshore reservoir", JPSE, 22, pp. 241-252, 1999.
- [4] Byrnes A.P., Franseen E.K., Watney W.L., and Dobois M.K., *The role of moldic porosity in Paleozoic Kansas reservoirs and the association of original depositional facies and early diagenesis with reservoir properties*, AAPG, Annual Convention in Salt Lake City Utah, 2003.
- [5] Hirasaki G.J., *Flow and transport through porous media*, Course note, 2005.
- Jackson P.D., Taylor Smith D., Stanford P.N., "Resistivity-porosity-particle shape relationships for marine sands", Geophysics, 43, pp. 1250-1262, 1978.
- [6] Longeron D.G., Argaud M.J., and Bouvier L., "Resistivity index and capillary pressure measurements under reservoir conditions using crude oil", SPE paper No. 19589, presented at the 64rd Annual Technical Conference, San Antonio, TX, October 8-11, 1989.
- [7] Lyle W.D., and Mills W.R., "Effect of nonuniform core saturation on laboratory determination of the Archie saturation exponent", SPE Formation Evaluation, pp. 49-52, 1989.
- [8] Gray R., Trewin B., Pallatt N., and Mitchell P., "Comparison of saturation exponent data by the porous plate and the countineous injection technique with in-situ saturation monitoring", Third European Core Analysis Symposium, Paris, September 14-16, 1992.
- [9] Anderson W.G., "Wettability literatures survey-part 3, the effect of wettability on the electrical properties of porous media", JPT, 38, 1371-1378, 1986.
- [10] Al-Kaabi A.U., Mimoune K., and Al-Yousef H.Y., "Effect of hysteresis on the Archie saturation exponent", SPE, paper No. 37738, pp. 497-520, 1997.
- [11] Wei j.Z., and Lile O.B., *Hysteresis of the resistivity index in Berea sandstone*, Advanced in Core Evaluation Accuracy and Precision in Reservoir Estimation, Reviewed Proc, in First Society Core Analysts, European Core Analysis Symposium, P.F., 1990.
- [12] Knight R., "Hysteresis in the electrical resistivity of partially saturated sandstone", Geophysics, 56, 2139-2147.
- [13] Tweheyo, M.T., Talukdar, M.S., and Torsaeter, O., 2001, Hysteresis effect in capillary pressure, relative permeability and resistivity index of North Sea chalk, SCA, paper No. 65, 1991.
- [14] Amott E., "Observation relating to the wettability of porous rock", Trans, AIME, 216. pp. 156-162, 1959.
- [15] Morgan W.B., and Pirson S.J., "The effect of fractional wettability on the Archie saturation exponent", Trans, SPWLA, Fifth Annual Logging Symposium, Midland, TX, Sec. B., 1964.
- [16] Lewis M.G., Sharma M.M., Dunlop H.F., and Dorfman M.H., "Techniques for measuring the electrical properties of sandstone cores", 63rd SPE Annual Technical Conference and Exhibition, SPE paper No. 18178, Houston, Texas, 1988.
- [17] Wei j.Z., and Lile O.B., "Influence of wettability on two and four electrode resistivity measurements on Berea sandstone plugs", SPE formation evaluation, 6, 470-476, 1991.
- [18] Sweeney S.A., and Jennings H.V., "Effect of wettability on electrical resistivity of carbonate rock from petroleum reservoir", J. Phys. Chem, 64, 551-553, 1960.