

## مطالعه اثرات تغییرات فشار متوالی بر خواص پتروفیزیکی سنگ مخازن کربناته

یاسر سلیمی دلشاد<sup>۱</sup>، علی مرادزاده<sup>۲\*</sup>، عزت الله کاظم زاده<sup>۲</sup>، عباس مجدی<sup>۳</sup>  
<sup>۱</sup>دانشجوی دکتری دانشکده مهندسی معدن، پردیس دانشکده‌های فنی دانشگاه تهران  
<sup>۲</sup>پردیس صنایع بالادستی نفت، پژوهشگاه صنعت نفت، تهران  
<sup>۳</sup>استاد دانشکده مهندسی معدن، پردیس دانشکده‌های فنی دانشگاه تهران  
 \*a\_moradzadeh@ut.ac.ir

دریافت تیر ۱۳۹۷، پذیرش آذر ۱۳۹۷

### چکیده

امروزه صنعت نفت بسیار متکی به تعیین دقیق خصوصیات سنگ مخزن است که این مهم می‌تواند سبب کاهش هزینه‌ها و ریسک برنامه ریزی تولید شود. سنگ مخزن همواره با افت فشار منفذی ناشی از تولید متراکم می‌شود که این امر سبب افزایش تنش مؤثر، فشردگی مخزن و تغییرات در خواص مخزنی می‌گردد. از آنجاییکه این تغییرات فشار می‌تواند بر خواص پتروفیزیکی اثرگذار باشد، در این مطالعه، چندین نمونه سنگ مخزن کربناته با بافت و نوع تخلخل متفاوت براساس تصاویر سی‌تی اسکن و طبقه بندی آرچی تحت بارهای متوالی و کوتاه مدت، از ۶۰۰ تا ۶۰۰۰ پوند بر اینچ مربع قرار گرفته‌اند و خصوصیات پتروفیزیکی و تراکم آنها شامل حجم فضای منفذی، نفوذپذیری و تراکم‌پذیری توسط دستگاه CMS-300 مورد مطالعه قرار گرفته است. همچنین بررسی ساختاری و ناهمگنی نمونه مغزه‌ها توسط تصاویر سی‌تی اسکن مورد آنالیز قرار گرفته‌اند. در واقع به کمک این پژوهش شناسایی اندازه اثر پسماند بر روی نمونه سنگ مخزن در اثر افزایش و کاهش فشار، طی اعمال بار سیکلیک مقدور خواهد بود. نتایج حاصل نشان دادند که در اثر بارگذاری تغییرات حجم فضای منفذی و نفوذپذیری روند کاهشی از خود نشان می‌دهند، بطوریکه کاهش نفوذپذیری چندین برابر کاهش حجم منفذی است. همچنین این کاهش حجم فضای منفذی در نمونه‌های دارای تخلخل حفره‌ای با شدت کمتری است که اثر همگنی و نوع تخلخل بر میزان پدیده پسماند را نشان می‌دهد. همچنین نتایج به دست آمده از چگونگی رفتار سنگ مخزن تحت تنش‌های مختلف در این مطالعه، می‌تواند الگوی مناسب برای مطالعات مربوط به تزریق گاز به منظور ازدیاد برداشت و همچنین متناسب با اهداف مرتبط دیگر نظیر ذخیره‌سازی گاز طبیعی را فراهم آورد.

کلید واژه‌ها: سنگ مخزن کربناته، طبقه بندی آرچی، بارگذاری سیکلیک، تخلخل، تراوایی، تصاویر سی‌تی اسکن.

## ۱- مقدمه

تعیین دقیق پارامترهای مخزنی، یک مسأله اساسی در مطالعات و مدیریت مخازن هیدروکربوری است. یکی از مهم ترین و مؤثرترین این پارامترها، خواص پتروفیزیکی و تراکمی سنگ مخزن می‌باشند که در محاسبات و تخمین مخازن نقش بسیار مهمی دارند. از این رو مطالعه و بررسی این پارامترها به منظور تولید و صیانت از مخازن، از اهمیت خاصی برخوردار است. استفاده از داده‌های آزمایشگاهی نظیر مطالعات سنگ مخزن، همواره دقیق ترین و در عین حال تایید کننده روش‌های میدانی بوده است [۱، ۲ و ۳]. سنگ مخزن همواره با افت فشار منفذی متراکم تر می‌شود. این خاصیت تراکمی سنگ مخزن که انرژی لازم برای خروج نفت را فراهم می‌آورد از اهمیت زیادی در مطالعات مهندسی مخزن برخوردار است. از اینرو ضریب تراکم پذیری برای ارزیابی انرژی رانشی که سنگ در فرآیند تولید می‌تواند فراهم آورد، تعریف شده و برای اغلب مخازن دنیا محاسبه شده است [۴]. حال تراکم‌پذیری سنگ مخزن را یک فاکتور مهم در محاسبات مهندسی مخزن عنوان کرده که در برخی موارد نادیده گرفته می‌شود. او رابطه‌ای بین تراکم‌پذیری حجم منفذی و تخلخل اولیه را بر اساس نتایج اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی ارائه داد. برای سال‌ها از معادله‌ی هال به عنوان روش اصلی محاسبه‌ی تراکم‌پذیری در بسیاری از نرم‌افزارهای تجاری تفسیر چاه‌آزمایی و شبیه‌سازی عددی مخزن استفاده می‌شد [۵]. کاهش فشار سیال سازندی در اثر تولید از مخزن، باعث می‌شود فشار خالص روباره افزایش یابد، که این افزایش فشار خالص روباره سبب فشردگی فضای منفذی در سنگ مخزن می‌شود [۶]. لیو و همکاران با رویکرد تحلیلی و با استفاده از منحنی‌های تخلخل و تنش محصورکننده به دست آمده از آزمایش بر روی نمونه‌های سنگی، ضرایب رابطه‌ی تحلیلی تراکم‌پذیری منفذی و تخلخل با تنش را به دست آوردند. در این رویکرد، ابتدا رابطه‌ی تنش- کرنش مناسبی برای سنگ ارائه شده و سپس روابط رفتاری بین تنش و خصوصیات مکانیکی- هیدرولیکی سنگ مخزن استخراج می‌شود [۷].

درک تغییرات تراوایی و تخلخل حین تولید، نقش مهمی در استراتژی‌های تولید هیدروکربن مخزن بازی می‌کند. اثر پدیده پسماند روی استراتژی‌های تولید در مخازن با تراوایی بسیار کم مثل مخازن ماسه سنگی سفت، کربناته‌ی سفت و سازند- های شیلی دوچندان می‌باشد، زیرا تغییر در تنش همراه با تغییرات تخلخل و تراوایی می‌تواند روی جاذبه/دافعه و توزیع مکانیسم‌های انتقال که از مکانیسم‌های اصلی در مخازن با تراوایی کم یا بسیار کم هستند اثر گذار باشد [۸ و ۹]. همچنین الحرثی و همکاران تغییرات فشار منفذی را تحت بارگذاری هیدرواستاتیک با هدف بررسی میزان پدیده پسماند و اثر تراکم پذیری بر نفوذپذیری مطالعه نمودند. آنها نشان دادند که اثر فشار منفذی بر تغییرات تراوایی بشدت به مسیر تنش وابسته است، همچنین میزان پدیده پسماند در نمونه‌های با نفوذپذیری پایین واضح تر می‌باشد [۱۱]. هیوز گزارشاتی از روند کاهش گاز تولیدی از چاه‌های افقی ارائه نمود. این نرخ سریع کاهش در هیدروکربن تولیدی در کاهش سریع فشار جریانی ته چاهی نیز مشاهده شده است [۱۲]. گزارشاتی از کاهش سریع فشار در تحقیقات صورت گرفته توسط ایگر و همکاران و اندرسون و همکاران آورده شد. این کاهش سریع نرخ‌های نفت و گاز تولیدی و فشار جریانی ته چاهی عمدتاً به خاطر خروج سریع تر سیال از قسمت‌های تحریک شده‌ی مخزن در قیاس با سیال جایگزین شونده از ماتریکس (خمیره) سنگ می‌باشد. اگرچه این کاهش سریع در فشار و نرخ می‌تواند به علت آسیب سازند (کاهش تراوایی) ایجاد شده توسط افزایش تنش خالص در طول بازه‌ی تولید از مخزن هم قلمداد شود، اما کاهش تخلخل و تراوایی در تنش خالص (باربرداری خالص)، و پدیده پسماند آنها میان مسیرهای بارگذاری و باربرداری تنش بسیار مورد اهمیت است [۱۳ و ۱۴ و ۱۵ و ۱۶]. اسکینر و همکاران یک ارتباط و همبستگی بین عدد سی‌تی، تخلخل ماتریکس و نفوذپذیری ارائه دادند که امکان توصیف مشخصات سنگ‌های مخزنی با ناهمگنی بالا را فراهم می‌سازد [۱۷]. عبدباوی و همکاران در مطالعات خود از تصاویر پروفایل سی‌تی اسکن سنگ مخزن کربناته با ناهمگنی بالا در عملیات سیلابزنی مغزه جهت ازدیاد برداشت

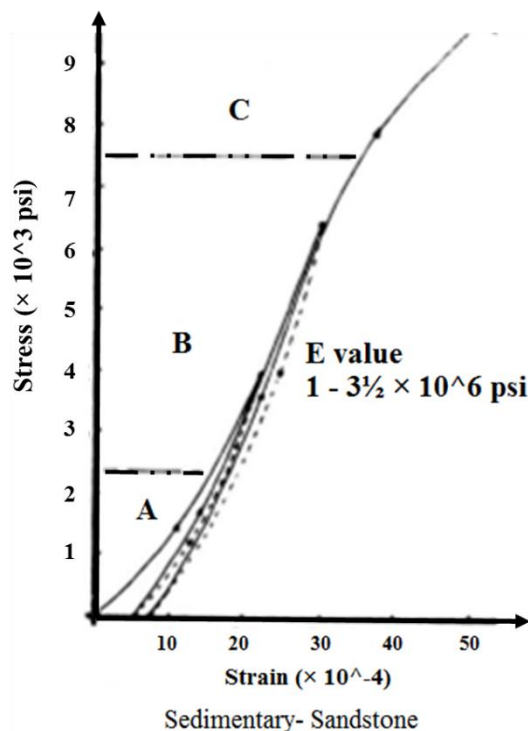
تحت تزریق دی اکسید کربن و ذخیره سازی بصورت زمان آنی بهره بردند تا بتوانند تغییرات توزیع اندازه دانه‌ها و منافذ در اثر واکنش بین سنگ و سیالات را بررسی کنند [۱۸]. سیوان رابطه ای را برای خواص سنگ مخزن وابسته به تنش بر مبنای ناپوستگی های شیب در محدوده بالا و پایین تنش تسلیم ارائه داد و به این نتیجه رسید که در مخازن با شکاف‌های طبیعی تحت فرآیندهای بارگذاری/باربرداری، تغییر شکل شکاف‌ها و ماتریکس، فاکتور غالب در بررسی‌های شیب در محدوده تنش موثر بحرانی می‌باشند [۱۹].

با توجه به پیشینه پژوهش، انجام مطالعات جامع خواص سنگی از این دست، پیش از انجام فرآیندهایی مثل تزریق گاز و تعیین فشار بهینه تولید از مخزن بیش از پیش ضروری است. از این رو مطالعه پدیده پسماند سنگ مخزن، بعنوان پارامتر کمتر بررسی شده، جزء ضروریات مطالعاتی و پژوهشی می‌باشد. در این مطالعه، ۱۳ نمونه سنگ مخزن کربناته تحت بارهای متوالی و کوتاه مدت ۶۰۰ تا ۶۰۰۰ psi با استفاده از دستگاه<sup>۱</sup> CMS-300 قرار گرفتند. بررسی ساختاری، نوع تخلخل، ناهمگنی و بررسی وجود شکستگی در نمونه مغزه‌ها توسط تصاویر سی تی اسکن مورد بررسی قرار گرفته است. خواص پتروفیزیکی (تخلخل و تراوایی) و تراکم پذیری نمونه‌ها در حین بارگذاری‌های مختلف اندازه گیری می‌شوند و با تغییرات مشاهده شده، میزان پدیده پسماند مورد تجزیه و تحلیل قرار می‌گیرد که این موضوع خود رویکردی متفاوت و جدید در این سطح از مطالعات در این زمینه است.

## ۲- پدیده پسماند و اهمیت آن در مخازن هیدروکربنی

سنگ‌ها برعکس بسیاری از مواد (مانند فلزات)، از استحکام کششی پایینی برخوردار می‌باشند. بنابراین با استفاده از آزمایشات تراکم پذیری و اعمال بار معمولاً می‌توان مدول‌های سنگ را بدست آورد. در هنگام تحت فشار قرار دادن یک نمونه سنگ با استفاده از تنش محوری، نمونه سنگ در برابر تنش تغییر شکل خواهد داد (شکل ۱). همان‌گونه که در شکل (۱) مشاهده می‌شود، در ابتدای افزایش تنش، تغییرات کرنش نسبت به تنش یک حالت خطی را دارد که حاکی از بسته شدن ترک‌های مؤین و فضای متخلخل می‌باشد و شیب نمودار در ابتدا (قسمت A) کمتر از سایر مراحل بارگذاری است که بیانگر بالا بودن تغییرات کرنش نسبت افزایش تنش است. پس از رسیدن تنش به یک مقدار، شیب نمودار به یک حالت تقریباً ثابت می‌رسد (قسمت B). در صورتی که پس از اتمام آزمایش، چرخه افزایش فشار بر روی سنگ را بر عکس کنیم و تنش وارد شده بر روی سنگ را بتدریج کاهش دهیم، منحنی تنش-کرنش، روال افزایش کرنش برحسب تنش را در حالت فشردگی نخواهد داشت. به این پدیده که منجر به عدم هم خوانی نمودار رفتار سنگ در حالت اعمال فشار (بارگذاری) و رفع فشار (بار برداری) است پدیده پدیده پسماند می‌نامند. موارد ذکر شده در ارتباط با سنگ‌های با مدول یانگ پایین بیشتر صادق است [۲۰].

<sup>1</sup> Core Measurement System



نمودار مرتبط با پدیده پسماند برای یک نمونه ماسه سنگ [۲۱]: شکل ۱

در سنگ‌های با مدول یانگ بالا نمودار رفتار سنگ در برابر افزایش فشار و بارگذاری تقریباً یک حالت خطی را دارا است. البته میزان خزش ایجاد شده در سنگ در حالت بارگذاری و باربرداری به نوبه‌ی خود تأثیر زیادی بر روی نمودار فوق در حالت معمولی و معکوس خواهند داشت. بر اساس آزمایشات انجام شده، یکی از عواملی که فرآیند بارگذاری را تحت تأثیر قرار می‌دهد میزان دامنه‌ی کرنش محلی است که این پارامتر نمایانگر نقاطی می‌باشد که در حالت معکوس کردن بارگذاری بر روی سنگ فعال شده‌اند. می‌توان یکی از دلایل تفاوت در بارگذاری و باربرداری را نیز همین مورد ذکر کرد و همان طور که در شکل ۱ ملاحظه می‌شود میزان شیب نمودار در حالت بارگذاری و باربرداری متفاوت است و با کاهش تنش در مراحل اولیه باربرداری میزان کاهش کرنش کمتری نسبت به حالت بارگذاری داریم. این موضوع می‌تواند بیانگر این باشد که نقاط کمتری در مراحل باربرداری فعال شده و تغییر شکل داده‌اند. میزان بزرگی اثر پدیده پسماند در سنگ مخزن به طور شاخصی به پارامترهایی مثل میزان تحکیم یافتگی و سیمان شدگی سنگ مخزن، فشار اولیه مخزن، تغییرات فشار منفذی و عمق مخزن بستگی دارد [۲۲]. یکی از موارد بسیار مورد بحث در هیسترسیس سنگ‌ها ذخیره سازی گاز طبیعی است. مخازن زیرزمینی ذخیره سازی گاز طبیعی به دلیل نوع استفاده از آن‌ها به شکل تزریق گاز در زمان مشخص و برداشت گاز در مواقع نیاز تحت شرایط بارگذاری و باربرداری سیکلیک قرار می‌گیرند که این امر ممکن است باعث تغییر پارامترهای پتروفیزیکی سنگ شود [۲۳].

### ۳- روش انجام آزمایشات

به منظور بررسی اثر تغییرات کوتاه مدت فشار بر خواص پتروفیزیکی سنگ مخازن کربناته، ۱۳ نمونه سنگ آهکی استوانه-ای به قطر حدود ۳٫۷ سانتی‌متر و طول ۵ سانتی‌متر از یکی از چاه‌های میدین نفتی جنوب غرب ایران تهیه و مورد

بارگذاری، استراحت در شرایط محیط و سپس بارگذاری مجدد قرار گرفته‌اند. روند انجام آزمایشات به صورت زیر می‌باشد:

خواص پتروفیزیکی مغزه‌ها پس از شستشوی بوسیله سیستم ساکسولت با استفاده از حلال‌های متانول و تولوئن، بوسیله دستگاه‌های تخلخل سنج هلیومی و هوا تراواسنج، اندازه‌گیری و ثبت می‌گردد. همچنین به منظور طبقه‌بندی نمونه‌ها از لحاظ فیزیکی و ظاهری از دسته بندی آرچی استفاده شده است. این دسته بندی توسط کارشناسان و به صورت مشاهده‌ی پلاگ با استفاده از لوپ مخصوص برای تعیین اندازه‌ی ظاهری حفرات سنگ و همچنین سختی ماتریکس سنگ صورت می‌گیرد. علائم و اختصارات مورد استفاده در این مطالعه به شرح است [۲۴]:

نوع I: ریز بلورین و متراکم

نوع II: ماتریکس چالکی

نوع III: ماتریکس گرانولار، دانه شکری

گروه A: تخلخل غیر قابل رویت

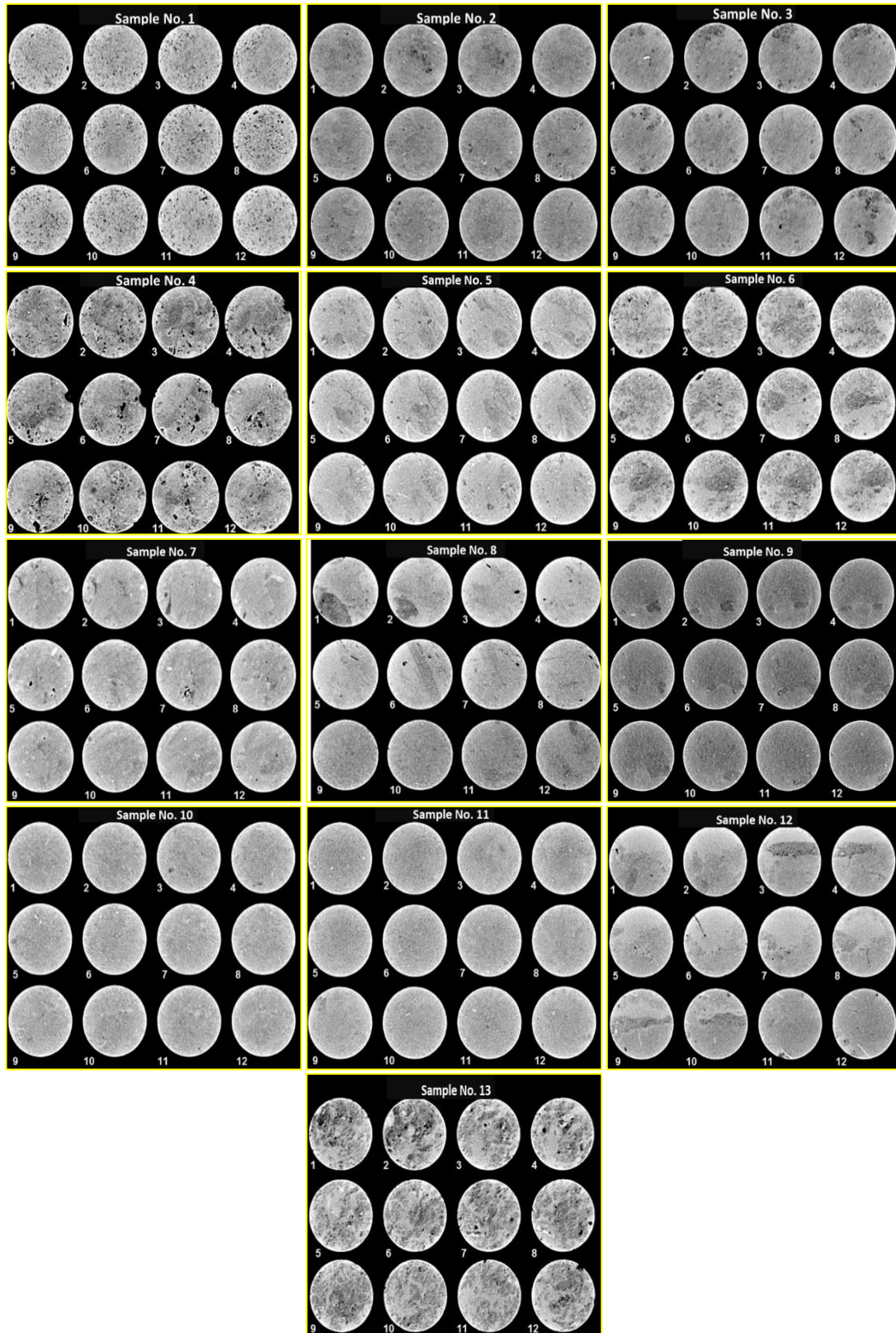
گروه B: تخلخل قابل رویت (اندازه حفرات بین ۰,۱ و ۰,۱ میلی‌متر)

گروه C: تخلخل قابل رویت (اندازه حفرات بین ۰,۱ و ۲ میلی‌متر)

گروه D: تخلخل قابل رویت (اندازه حفرات بزرگتر ۲ میلی‌متر)

سپس مغزه‌ها به منظور اطمینان از عدم حضور شکستگی و مشاهده نوع تخلخل داخلی، مورد تصویربرداری سی تی اسکن قرار گرفتند. تصویرنگاری سی تی اسکن تکنیک عکسبرداری رادیولوژی غیر مخرب است که بر اساس میزان تضعیف اشعه ایکس هنگام عبور از ماده شکل می‌گیرد. درصد رادیو اکتیو عبوری تابعی از ضخامت ماده، وزن مخصوص و ترکیب شیمیایی بوده و عدد سی تی نشان دهنده تضعیف اشعه ایکس می‌باشد. سی تی اسکن ساخت‌های رسوبی اولیه، ساختار موجود، ناهمگونی سنگ و نوع تخلخل را نشان می‌دهد. در کل می‌توان بخش مهم استفاده سی تی اسکن را تهیه‌ی مقاطع نازک سنگی بدون تخریب سنگ دانست [۱]. همگن یا غیر همگن بودن و عدم حضور شکاف و شکستگی در نمونه‌های انتخابی با استفاده از تصاویر سی تی اسکن، قابل مشاهده می‌باشد. هرچه تصویر سی تی اسکن روشن‌تر باشد بیانگر بالاتر بودن دانسیته و تیره‌تر بودن آن بیانگر پایین‌تر بودن دانسیته نمونه مورد بررسی خواهد بود [۲۵]. بنابراین هرچه که تعداد حفرات<sup>۲</sup> و شکاف‌ها در یک قسمت مورد بررسی بالاتر بوده تصویر اسکن شده از آن قسمت تیره‌تر خواهد بود. مغزه‌های مورد مطالعه از جنس کلسیت بوده و بر اساس تصاویر حاصل از سی تی اسکن، به لحاظ ناهمگنی، نوع تخلخل و خواص پتروفیزیکی دارای تنوع بوده و همچنین فاقد شکاف هستند. تصاویر سی تی اسکن نمونه‌های منتخب در شکل ۲ قابل مشاهده می‌باشد.

<sup>2</sup> vugs



شکل ۲: تصاویر سی تی اسکن ۱۲ برش از هر یک نمونه‌های مورد مطالعه (برگرفته شده از اف‌های مختلف)

مقادیر سی تی اسکن ۱۲ مقطع از نمونه‌های ۱۰ و ۱۳، که فضای متخلخل متفاوتی دارند به عنوان نمونه در جدول شماره ۱ آورده شده است.

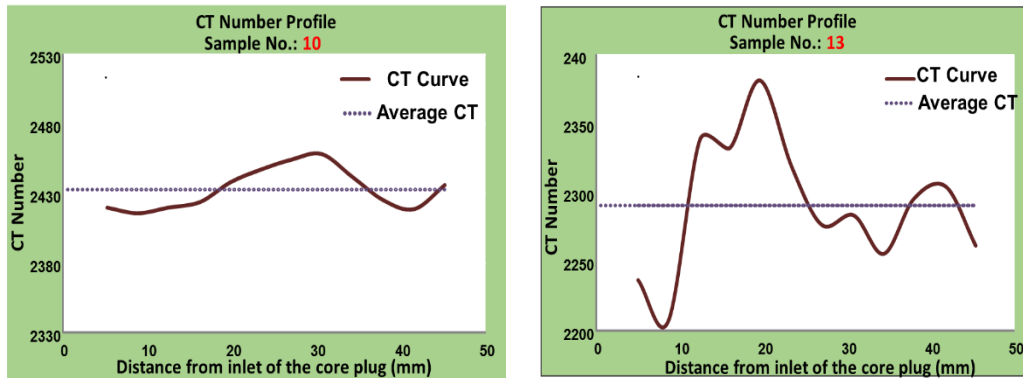
جدول ۱: مقادیر عدد سی تی برای نمونه‌های شماره ۱۰ و ۱۳

نمونه شماره ۱۰				نمونه شماره ۱۳			
شماره برش	فاصله از ابتدای نمونه (mm)	عدد سی تی	توضیحات	شماره برش	فاصله از ابتدای نمونه (mm)	عدد سی تی	توضیحات
۱	۴,۸۲	۲۲۳۵	ناهمگن و حفره‌ای	۱	۵,۱۰	۲۴۱۵	همگن
۲	۸,۵۲	۲۲۰۵		۲	۸,۷۰	۲۴۱۲	
۳	۱۲,۳۹	۲۳۴۰		۳	۱۲,۳۲	۲۴۲۵	
۴	۱۵,۹۰	۲۳۳۰		۴	۱۶,۱۸	۲۴۳۱	
۵	۱۹,۵۰	۲۳۸۵		۵	۱۹,۸۰	۲۴۳۱	
۶	۲۳,۳۸	۲۳۲۲		۶	۲۳,۳۵	۲۴۵۰	
۷	۲۶,۵	۲۲۷۵		۷	۲۶,۸	۲۴۴۹	
۸	۳۱	۲۲۸۰		۸	۳۰,۶۹	۲۴۵۵	
۹	۳۴,۵۱	۲۲۶۰		۹	۳۴,۲۹	۲۴۳۹	
۱۰	۳۷,۸۹	۲۲۸۹		۱۰	۳۸,۰۳	۲۴۲۹	
۱۱	۴۱,۶۰	۲۳۰۷		۱۱	۴۱,۵۸	۲۴۲۰	
۱۲	۴۵,۳۶	۲۲۵۹		۱۲	۴۵,۲۵	۲۴۳۳	

میانگین عدد سی تی: ۲۲۹۰,۵۸

میانگین عدد سی تی: ۲۴۳۲,۴۱

به عنوان مثال همان طور که مشاهده می‌گردد مغزه‌ی شماره ۱۰ دارای تصاویر یک دست و روشن تر می‌باشد. این روشنایی بالاتر تصویر بیانگر وجود ماتریکس سنگ به صورت یک دست و عدم وجود ناپیوستگی و حفره است. با بررسی نمودار مربوط به اعداد سی تی اسکن مربوط به ۱۲ مقطع عرضی نمونه‌ها (شکل ۲) می‌توان میزان ناهمگونی‌ها را تشخیص داد. شکل ۳ چنین نموداری را برای مغزه ۱۰ و ۱۳ نشان می‌دهد. این شکل نشان می‌دهد که تغییرات عدد سی تی در مقاطع نمونه مغزه ۱۰ تقریباً یکنواخت است و فاصله منحنی تغییرات عدد سی تی نسبت به عدد سی تی میانگین، دارای تغییرات پایین تری نسبت به نمونه ۱۳ می‌باشد. هرچه که میزان تغییرات عدد سی تی کمتر باشد نشان از همگن بودن نمونه دارد. بر خلاف مغزه ۱۰، مغزه ۱۳ دارای حفرات بیشتری می‌باشد. خلاصه مطالعات مبتنی بر تصاویر سی تی اسکن نمونه‌ها در جدول ۲ آورده شده است.



شکل ۳: نمودار سی تی اسکن نمونه‌های شماره ۱۰ (سمت چپ) و شماره ۱۳ (سمت راست)

به منظور بررسی اثر بارگذاری کوتاه مدت بر خواص پتروفیزیکی سنگ مخزن در اثر اعمال بار سیکلیک از دستگاه CMS-300 استفاده شد. در این دستگاه، سیال منفذی گاز هیلوم بوده و فشار قابل تامین توسط دستگاه تا ۱۰۰۰۰ psi و به صورت هیدرواستاتیک می‌باشد. سیستم دستگاه، یک سیستم خودکار اندازه‌گیری تخلخل و حجم منفذی در فشارهای هیدرواستاتیک متفاوت است. در این تحقیق نمونه‌های مورد مطالعه ابتدا طی ۸ مرحله از ۶۰۰ تا ۶۰۰۰ psi تحت فشار قرار گرفته و در هر مرحله تخلخل و تراوایی نمونه‌ها اندازه‌گیری شدند. سپس به منظور بررسی اثر این بارگذاری بر خواص پتروفیزیکی نمونه‌ها، همین فرآیند مجدداً تکرار شد و در نهایت برای هر مرحله فشاری دو مقدار تخلخل و تراوایی (یکی مربوط به بارگذاری حین اندازه‌گیری مرتبه اول و دیگری مربوط به بارگذاری و اندازه‌گیری مرتبه دوم) حاصل شدند.

جدول ۲: مشخصات مغزه‌های انتخاب شده جهت انجام آزمایشات

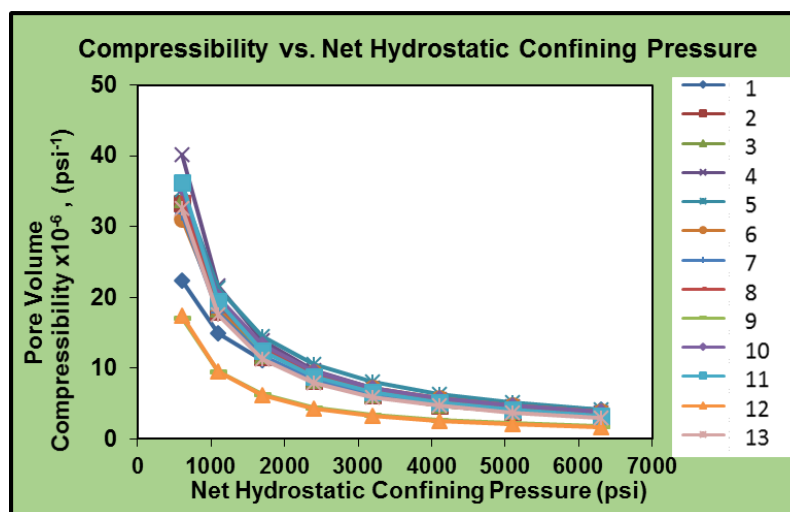
شماره نمونه	شماره نمونه	تخلخل (%)	دانسیته (gr/cc)	تراوایی نسبت به هوا (mD)	نتایج بررسی منحنی سی تی اسکن	طبقه بندی آرچی
۱	۶۰	۱۴,۶۵	۲,۷۱	۱,۶۶۵	Low Hetrogene, Vuggy	I,C/A,VUG
۲	۹۷	۲۱,۵۹	۲,۷۱	۶,۱۲۲	Low Hetrogen, Vug	I/II,C/A,VUG
۳	۹۸	۲۰,۳۶	۲,۷۱	۳,۶۳۸	Hetrogen, Vug	I/II,C/A,VUG
۴	۱۰۸	۱۷,۶۳	۲,۶۷	۹,۲۳۹	Hetrogen, Vug	I,A/C,VUG
۵	۱۵۷	۱۱,۰۱	۲,۷۴	۳,۵۴	Low Hetrogen	I,A/C
۶	۱۵۹	۱۵,۱۹	۲,۷۱	۱۹,۲۶۸	Low Hetrogen, Vug	I/II,C/A,VUG
۷	۱۶۲	۱۴,۴۵	۲,۷۱	۰,۶۳۸	Homogen, Vug	I,A/C,VUG
۸	۱۶۵	۱۸,۱۸	۲,۷۱	۱۶,۷۶۱	Hetrogen, Vug	I/II,C,VUG
۹	۱۶۶	۲۶,۳۳	۲,۷۱	۳۳۳,۷۰۴	Homogene	I,C/A
۱۰	۱۷۰	۱۴,۶۱	۲,۷	۶,۱۲۴	Homogen	I,A/C
۱۱	۱۷۱	۱۵,۱۳	۲,۷	۶,۷۷۲	Homogen	I,A/C



۱۲	۱۷۶	۱۷,۲	۲,۷	۷,۳۸۵	Homogen, Vug	I/II,C/A,VUG
۱۳	۲۱۱	۱۹,۷۵	۲,۷۲	۱۵,۷۱۴	Hetrogen, Vug	II/I,C/A,VUG

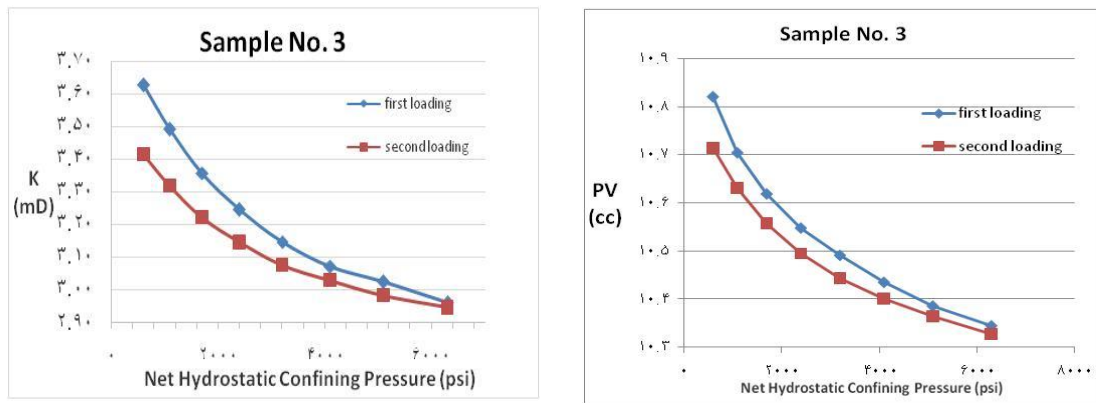
#### ۴- بحث و بررسی

همانطور که اشاره شد پس از اندازه‌گیری تخلخل و تراوایی نمونه‌ها، تصویربرداری سی تی اسکن از نمونه‌ها انجام شد که این تصاویر معیاری برای عدم وجود شکستگی، میزان ناهمگنی و نوع تخلخل در نمونه‌ها می‌باشد. سپس بار هیدرواستاتیک طی ۸ مرحله، با شروع از فشار ۶۰۰ psi و افزایش تدریجی آن تا ۶۰۰۰ psi به نمونه‌ها اعمال گردید که در هر مرحله فشاری میزان حجم داخلی منافذ با استفاده از دستگاه CMS-300 و تزریق گاز هلیوم و بر مبنای قانون بویل ماریوت، مورد اندازه‌گیری قرار گرفتند. زمان بارگذاری برای هر نمونه در هر مرحله فشاری بین ۵ تا ۱۰ دقیقه بوده است، بنابراین هر نمونه مجموعاً به مدت حدوداً یک ساعت، ۸ مرحله بارگذاری را به صورت افزایشی تجربه نمود. نمودار تراکم پذیری محاسبه شده در سیکل رفت نمونه‌های مورد مطالعه در شکل ۴ آورده شده است. برای تعیین فاکتور تراکم‌پذیری منفذی (C<sub>pc</sub>) لازم است که تجهیزات آزمایشگاهی به‌گونه‌ای باشد که بتوان هم‌زمان با اعمال فشار سیال منفذی، تغییر حجم منافذ را نیز به دست آورد. همانطور که مشاهده می‌شود، میزان تراکم‌پذیری بعضی نمونه‌ها نزدیک به هم و بعضی دیگر متفاوت از هم می‌باشد. نمونه‌هایی که بر اساس طبقه بندی آرچی دارای سختی بالاتری هستند (مانند نمونه های ۱، ۹ و ۱۲) دارای تراکم‌پذیری کمتر و نمونه‌هایی که سختی کمتری دارند و همچنین وجود حفرات در آنها مشهود است، دارای تراکم‌پذیری بیشتری می‌باشند.



شکل ۴: نمودار تراکم‌پذیری ۱۳ نمونه مورد مطالعه طی ۸ مرحله بارگذاری هیدرواستاتیک

همانطور که قبلاً اشاره شد، برای هر مرحله فشاری دو مقدار تخلخل و تراوایی (یکی مربوط به بارگذاری حین اندازه‌گیری مرتبه اول و دیگری مربوط به بارگذاری و اندازه‌گیری مرتبه دوم) اندازه‌گیری شده است. به منظور بررسی اثر تنش اعمال شده بر روی مغزه‌ها طی مرحله اول بارگذاری، پس از باربرداری و استراحت دادن نمونه‌ها، مراحل بارگذاری و اندازه‌گیری حجم داخلی منافذ مجدد به مانند مرحله اول بارگذاری، بر روی تمامی نمونه‌ها تکرار گردید. به دلیل تعدد نمونه‌ها و نمودارهای مربوطه، نمودار نتایج اندازه‌گیری حجم منافذ و تراوایی نمونه شماره ۳ به عنوان نمونه در شکل ۵ آورده شده است.



شکل ۵: نمودار اندازه‌گیری حجم منافذ (سمت راست) و تراوایی (سمت چپ) مراحل اول و دوم بارگذاری نمونه شماره ۳

جهت ارزیابی بزرگی پدیده پسماند خواص پتروفیزیکی نمونه‌های مورد مطالعه، میزان حجم فضای منفذی و تراوایی نمونه‌ها در اولین فشار (فشار ۶۰۰ psi) به عنوان مبنای ارزیابی تغییرات در نظر گرفته شده است و میزان کاهش حجم منافذ در سایر فشارها نسبت به این فشار ارزیابی گردیده است. بررسی تغییرات حجم منافذ نسبت به فشار اعمالی گویای این مطلب است که حجم منافذ در هر مرحله فشاری در مرتبه دوم اعمال کمتر از مرتبه اول می‌باشد و میزان و رفتار این کاهش برای نمونه‌های متفاوت، یکسان نمی‌باشد. مقادیر درصد پدیده پسماند حجم منافذ و تراوایی به صورت مرتب شده براساس میزان نمونه‌های مورد مطالعه در جدول ۳ آورده شده است.

جدول ۳: میزان کاهش حجم منافذ و تراوایی نمونه‌ها

شماره نمونه	میزان کاهش حجم منافذ (%)	میزان کاهش تراوایی (%)
۱	۰,۳۹	۹,۱۳
۲	۰,۷۷	۵,۳۵
۳	۰,۹۷۷	۵,۸۳
۴	۱,۰۶	۹,۱
۵	۱,۰۳۳	۱۰,۲
۶	۰,۹۱۹	۱,۹۳
۷	۱,۱۲۴	۶,۰۲
۸	۰,۹۸۲	۴,۸۴
۹	۱,۱۲۵	۱,۸۷
۱۰	۱,۵۹۵	۴,۲۱
۱۱	۱,۵۱۱	۵,۶۶
۱۲	۱,۱۳۴	۲,۸۳
۱۳	۰,۴۴	۴,۱۳

همانطور كه مشاهده مى‌شود، در اثر بارگذاري سيكلريك بر روى تمامى نمونه‌هاى سنگ مخزن مورد مطالعه، خواص مخزنى کاهش يافته است كه حداقل و حداكثر کاهش حجم منفذى به ترتيب ۰,۴ و ۱,۶ درصد و حداقل و حداكثر کاهش تراويى ۱,۹ و ۱۰,۲ درصد مى‌باشد. همانطور كه مشاهده مى‌شود کاهش تراويى چندين برابر کاهش حجم منفذى است. بيشترين کاهش حجم منفذى براى نمونه هاى ۹، ۱۰، ۱۱ و ۱۲ مى‌باشد و اين در حالى است كه پديده پسماند پارامتر تراويى اين نمونه‌ها نسبت به ساير نمونه ها كمتر مى‌باشد. هنگامى كه نمونه سنگ تحت بار قرار مى‌گيرد، سنگ دچار تغيير شكل مى‌گردد و از قدرت تراكمى آنها كاسته مى‌شود. همچنين بارگذاري متناوب اعمال شده باعث ايجاد آسيب به سنگ مى‌شود كه بر مقاومت تراكمى سنگ اثر مستقيم مى‌گذارد [۳].

بر اساس تصاوير سى تى اسكن، نمونه‌هاى مذكور داراى فضاى متخلخل يكنواخت بوده و بر مبنای طبقه بندى آرچى ساختارى محكم (كريستالى يا طبقه I) داشته و همچنين حفرات بسيار ريزى دارند، لذا بارگذاري باعث گرديده كه تمامى دانه‌ها تحت تاثير قرار گرفته و منافذ نمونه سنگ دچار کاهش شده و بعد از استراحت در شرايط محيط، همه نقاط نمونه، فعال نمايند و کاهش ماندگار حجم منفذى حاصل مى‌شود. بر خلاف انتظار نمونه‌هاى داراى تخلخل حفره‌اى کاهش حجم منفذى كمى داشته چرا كه انتظار مى‌رود كه در اثر اعمال بار، قسمتى از فضاى متخلخل در اثر متلاشى شدن منافذ<sup>۳</sup> شروع به از بين رفتن كرده و دوباره در حين استراحت بازيايى نشده و تنها، قسمت هاىى از بافت سنگ<sup>۴</sup> بازيايى شوند [۷]. اين تغييرات بسيار كم در ميزان حجم منافذ مى‌تواند به دليل ايجاد ريز ترك‌هاى<sup>۵</sup> كه باعث ايجاد فضاى خالى در ساختار سنگ شده، باشند. در نمونه شماره ۱، كمترين کاهش حجم منفذى و در عين حال بيشترين کاهش تراويى را شاهد هستيم. با توجه به دسته بندى آرچى و تصوير سى تى اسكن نمونه ۱، مى‌توان گفت كه بارگذاري بر نمونه مذكور بيشترين تاثير را بر گلوگاه‌هاى عبور جريان سيال داشته است. نمونه ۴ کاهش حجم منفذى متوسط، اما کاهش تراويى بالاىى داشته است كه با توجه حفره‌اى بودن و غير مرتبط بودن تخلخل نمونه، مى‌توان به اثر بارگذاري بر منافذ ريز مرتبط و بسته شدن آنها اشاره نمود. همچنين مشاهده گرديده است كه نمونه شماره ۱۰ و ۱۱ كه داراى ساختار و تصاوير سى تى اسكن مشابه هم مى‌باشند، تغييرات خواص پتروفيزيكي بسيار شبيه به هم دارند.

## ۵-نتيجه‌گيرى

با توجه به نتايج حاصل از اين مطالعه مى‌توان دريافت كه در اثر بارگذاري سيكلريك بر روى تمامى نمونه‌هاى سنگ مخزن مورد مطالعه، خواص مخزنى کاهش يافته است، بطوريكه در اثر بارگذاري نمونه سنگ دچار آسيب شده كه منجر به خستگى نمونه گشته و مقاومت تراكمى آن را تحت تاثير مستقيم قرار داده است. همچنين مشخص شد كه پديده پسماند براى نمونه‌هاى كه خواص پتروفيزيكي يكسانى دارند و بر اساس تصاوير سى تى اسكن همگن مى‌باشند، يكسان است. علاوه بر آن به طور كلى مى‌توان نتيجه گرفت كه مقدار پديده پسماند براى نمونه‌هاى داراى تخلخل حفره‌اى كمتر از نمونه‌هاىى مى‌باشند كه تخلخل حفره‌اى ندارند و همگن‌تر هستند. افزون بر اين مشخص شد كه کاهش و نوع رفتار كاهشى حجم منفذى نسبت به تغييرات فشار براى نمونه‌هاى با ناهمگنى و خواص مخزنى متفاوت، يكسان نيست. بنابراين همگنى و نوع تخلخل بر ميزان پديده پسماند اثرگذار مى‌باشد. از آنجايى كه مدت زمان اعمال بار بر روى نمونه‌ها در اين مطالعه بسيار كم بوده است و در اين مدت كم نيز پديده پسماند مشهود بوده است، لازم است جهت مطالعه دقيق‌تر، اثرات اعمال بار سيكلريك بلند مدت نيز مورد بررسى قرار گيرد.

<sup>3</sup> pore collapse

<sup>4</sup> fabric compaction

<sup>5</sup> fracture

## سپاس و قدردانی

از داوران مقاله آقایان دکترسید علی معلمی و مهندس محمد صادق کریم پولی تشکر و قدردانی می گردد.

## مراجع

- [۱] سعادت، کاظم؛ شریفی گلوپیک، حمید. "تعیین برخی خواص سنگ شناسی و پتروفیزیکی با استفاده از تکنولوژی سی تی اسکن". اولین کنفرانس و نمایشگاه تخصصی نفت، تهران
- [2] KARACAN, C. O., GRADER, A. S., & HALLECK, P. M. (2001, January 1). 4-D Mapping of Porosity and Investigation of Permeability Changes in Deforming Porous Medium. Society of Petroleum Engineers. doi:10.2118/72379-MS
- [3] FJAER, E., HOLT R. M., HORSRUD P., RAAEN A.M., RISNES R., "Petroleum Related Rock Mechanics", Elsevier, 1992
- [4] DAIM, F., EYMARD, R., HILHORST, D., MAINGUY, M., & MASSON, R. (2002). A preconditioned conjugate gradient-based algorithm for coupling geomechanical-reservoir simulations. *Oil & Gas Science and Technology*, **57(5)**, 515-523.
- [5] HALL, H.N., (1953). Compressibility of reservoir rocks. *Petroleum Transactions, Alme*, **198**, 309-311.
- [6] HARARI, Z., SHU-TEH, W., & SALIH, S. (1995). Pore-compressibility study of Arabian carbonate reservoir rocks. *SPE Formation Evaluation*, **10(04)**, 207-214.
- [7] LIU, H. H., RUTQVIST, J., & BERRYMAN, J. G. (2009). On the relationship between stress and elastic strain for porous and fractured rock. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, **46(2)**, 289-296.
- [8] TELKU, T. W., ZHOU, Z., Li, X., & ABASS, H. (2016, June 26). Cyclic Permeability and Porosity Hysteresis in Mudrocks & Experimental Study. *American Rock Mechanics Association*.
- [9] RANDOLPH, P. L., SOEDER, D. J., & CHOWIAH, P. (1984, January 1). Porosity and Permeability of Tight Sands. Society of Petroleum Engineers. doi:10.2118/12836-MS
- [10] TEKLU, T. W., LI, X., ZHOU, Z., & ABASS, H. (2017, October 1). Experimental Investigation on Permeability and Porosity Hysteresis of Tight Formations. Society of Petroleum Engineers. doi:10.2118/180226-PA
- [11] AL-HARTHY, S. S., DENNIS, J. W., JING, X. D., & MARSDEN, J. R. (1998, January 1). Hysteresis, True-Triaxial Stress-Path and Pore Pressure Effects on Permeability. Society of Petroleum Engineers. doi:10.2118/47269-MS
- [12] HUGHES, J. D. (2014). Drilling deeper. *Post carbon institute Mechanics*.
- [13] ANDERSON, D. M., NOBAKHT, M., MOGHADDAM, S., & MATTER, L. (2010). Analysis of production data from fractured shale gas wells. In SPE unconventional gas conference. *Society of Petroleum Engineers*.
- [14] EIA. (2016). "Drilling Productivity Report for Key tight oil and shale gas regions". Retrieved from <http://www.eia.gov/>.
- [15] EKER, I., KURTOGLU, B., & KAZEMI, H. (2014). Multiphase Rate Transient Analysis in Unconventional Reservoirs: Theory and Applications. In SPE/CSUR Unconventional Resources Conference–Canada. Society of Petroleum Engineers.
- [16] TEKLU, T. W., ZHOU, Z., LI, X., & ABASS, H. (2016). Experimental Investigation on Permeability and Porosity Hysteresis in Low-Permeability Formations. In SPE Low Perm Symposium. Society of Petroleum Engineers.
- [17] SKINNER, J. T., TOVAR, F. D., & SCHECHTER, D. S. (2015, November 18). Computed Tomography for Petrophysical Characterization of Highly Heterogeneous Reservoir Rock. *Society of Petroleum Engineers*. doi:10.2118/177257-MS

- [18] ADEBAYO, A. R., KANDIL, M. E., OKASHA, T. M., & SANNI, M. L. (2017). Measurements of electrical resistivity, NMR pore size and distribution, and x-ray CT-scan for performance evaluation of CO<sub>2</sub> injection in carbonate rocks: A pilot study. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, **63**, 1-11.
- [19] CIVAN, F. (2018, April 22). Effect of Stress Shock and Pressurization/Depressurization Hysteresis on Petrophysical Properties of Naturally-Fractured Reservoir Formations. *Society of Petroleum Engineers*. doi:10.2118/190081-MS
- [20] SHEERANG S. Ch., EDWARD M. B., SOMNATH S., MATTEW D. D., QUINN R. P., TIMOTHY E. Z., ALEX C. W., JEFF A. B., DANIEL W. B., SERGIO A. LEONARDI, and RYAN A. K. (2015). Steady-state stress-dependent permeability measurements of tight oil-bearing. ExxonMobil Upstream Research Company, *Petrophysics*, **56 (2)**: Page 116–124.
- [21] HUEVKEL, T., & NOVA, R. (1979). Some hysteresis effects of the behaviour of geologic media. *International Journal of Solids and Structures*, **15(8)**, 625-642.
- [22] HOLT, R. M., FLORENCE, O., Li, L., & FJAER, E. (2004). Consequences of Depletion-Induced Stress Changes On Reservoir Compaction and Recovery. In Gulf Rocks 2004, the 6th North America Rock Mechanics Symposium (NARMS). *American Rock Mechanics Association*.
- [23] DUSSEAULT, M. B., & SANTARELLI, F. J., 1989. A Conceptual Model for Massive Solids Production in Poorly-Consolidated Sandstones," Rock at Great Depth, Maury & Fourmantraux (Eds.), Balkema, Rotterdam, 789–797.
- [24] ROEHL, P. O., & CHOQUETTE, P. W. (Eds.). (2012). Carbonate petroleum reservoirs. *Springer Science & Business media*.
- [25] KARACAN, C. O., GRADER, A. S., & HALLECK, P. M. (2001, January 1). 4-D Mapping of Porosity and Investigation of Permeability Changes in Deforming Porous Medium. Society of Petroleum Engineers. doi:10.2118/72379-MS.

## Effect of sequential pressure on petrophysical properties of carbonate reservoir rocks

Y. Salimi Delshad, A. Moradzadeh, E. Kazemzadeh, A. Majdi

\*a\_moradzadeh@ut.ac.ir

Received: July 2018, Accepted: December 2018

### Abstract

Today, oil industry significantly relies on the precise determination of rock reservoir properties, which reduces the costs and risks of production planning. The reservoir rock always is compacted by pressure drop of the reservoir, which rises effective stress, reservoir compaction and alterations of reservoir properties. As these pressure variations can considerably affect petrophysical properties, in this study, several carbonate reservoir rock samples with different fabric and porosity type (according to CT scan and Archie classification analysis) subjected to cyclic and short-term loading from 600 to 6000 psi. Their petrophysical and compressive properties including pore volume, permeability and compressibility were measured using CMS-300 apparatus. Moreover, structural analysis and heterogeneity of core samples were analyzed by CT scan images. By performing this study, it will be possible to identify the value of the hysteresis effect on the reservoir rock samples as a result of increasing and decreasing of the pressure during cyclic loading. The obtained results show that, pore volume and permeability are both decreased due to loading, whereas reduction of the permeability is several times than the pore volume ones. Moreover, this reduction of pore volume is less severe in vuggy porous samples that shows the effect of heterogeneity and porosity type on hysteresis. Also, the results obtained from the behavior of the reservoir rock under various pressure conditions can provide a suitable design for gas injection studies to enhance oil recovery and also natural gas storage.

**Keywords:** Carbonate reservoir rock, Archie classification, Cyclic loading, Porosity, Permeability, CT scan images.