

# اثر بارگذاری هیدرواستاتیک بر خواص پتروفیزیکی، ژئومکانیکی و ساختاری سنگ مخزن کربناته

یاسر سلیمی دلشاد<sup>۱</sup>، علی مرادزاده<sup>۱\*</sup>، عزت‌اله کاظم‌زاده<sup>۲</sup>، پیمان پورافشاری<sup>۲</sup> و عباس مجدی<sup>۱</sup>

۱- دانشکده مهندسی معدن، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران، ایران

۲- پردیس پژوهش و توسعه صنایع بالادستی نفت، پژوهشگاه صنعت نفت، ایران

۳- گروه مهندسی معدن و نفت دانشگاه نظربایف، آستانا، قزاقستان

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۹/۱۸ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۴/۲۵

## چکیده

حین تولید از مخازن هیدروکربنی و فرآیند تزریق، تغییرات فشار منفذی باعث تراکم مخزن می‌گردد که منجر به اثرگذاری مستقیم روی خواص پتروفیزیکی سنگ مخزن می‌شود. بنابراین، شناخت تغییرات رفتار سنگ و خواص مخزنی وابسته به تنش مانند تخلخل و نفوذپذیری بسیار با اهمیت است. در این مطالعه، تلاش می‌شود اثر بارگذاری هیدرواستاتیک بر خواص پتروفیزیکی، ژئومکانیکی و ساختاری سنگ مخزن کربناته بررسی شده و تغییرات تخلخل، نفوذپذیری و توزیع اندازه حفرات مورد تجزیه و تحلیل قرار گیرند. جهت بررسی تغییرات صورت گرفته در رفتار ژئومکانیکی سنگ مخزن کربناته، سرعت موج برشی و تراکمی دو نمونه سنگ مخزن با خواص ظاهری و فیزیکی مشابه تحت بارهای مختلف اندازه‌گیری شد. همچنین، به‌منظور بررسی ساختار و تغییرات داخلی نمونه‌های سنگ مخزن از تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) استفاده شد. نتایج حاصل از این مطالعه حاکی از آن است که با افزایش بارگذاری، نفوذپذیری و تخلخل در آخرین مرحله بارگذاری به ترتیب ۳۶/۱۴٪ و ۷/۳۹٪ روند کاهشی از خود نشان می‌دهند. بررسی سرعت‌های موج برشی و تراکمی نشان دادند که با افزایش فشار آنها روند افزایشی داشته و این مسئله ناشی از میزان نسبت حجم فضای ماتریکس سنگ به فضای خالی آن است. تلفیق آنالیز تصاویر SEM و تغییرات اندازه حفرات نشان می‌دهد که در اثر بارگذاری، حفرات ریزتر و متراکم‌تر گشته و میانگین اندازه دانه‌ها کوچک‌تر می‌گردد، که این خردشدن و قرارگیری ذرات ریزتر در میان ذرات درشت‌تر میزان تخلخل و تراوایی را کاهش می‌دهد. شناخت روند تغییرات خواص پتروفیزیکی به‌همراه بررسی تغییرات ساختاری و ژئومکانیکی متناظر آنها در استراتژی‌های تولید از مخازن نفتی و فرآیندهای تخلیه سیالات از مخازن از اهمیت به‌سزایی برخوردار هستند.

**کلمات کلیدی:** بارگذاری هیدرواستاتیک، خواص ژئومکانیکی، سنگ مخزن کربناته، آنالیز میکروسکوپی،

سرعت امواج صوتی

\*مسئول مکاتبات

آدرس الکترونیکی: a\_moradzadeh@ut.ac.ir

شناسه دیجیتال: (DOI: 10.22078/pr.2019.3563.2627)

## مقدمه

سنگ مخزن کربناته از مهم‌ترین ساختارهای متخلخل مخازن هیدروکربوری است که به دلیل فرآیندهای مختلف دیاژنتیکی، دارای پیچیدگی بالایی در بافت و ساختار زمین‌شناسی، خواص مخزنی و نوع فضای متخلخل است. حین تولید از مخازن نفتی، با خارج شدن سیالات از محیط متخلخل تعادل سیستمی آن دچار اختلال شده و منجر به افزایش تنش مؤثر روی سنگ مخزن گشته و سنگ مخزن تحت تراکم، دچار تغییر شکل می‌شود.

تغییرات فشاری در مخزن می‌تواند بر تخلخل و نفوذپذیری اطراف دهانه چاه اثرگذار باشد. کرنش به وجود آمده به دلیل تغییرات تنشی، اگر از حد مجاز شکست سنگ فراتر نرود، قابل بازیابی است [۱]. کاراکان و همکاران تغییرات تخلخل و نفوذپذیری در سنگ مخزن متخلخل را تحت دو فشار محصورکننده<sup>۱</sup> ۳/۴ و ۲۰/۴۱ MPa اشباع از آب توسط آنالیز تصاویر سی تی اسکن مورد بررسی قرار دادند. آنها به این نتیجه رسیدند که تنش اعمالی به محیط متخلخل، خواص سنگ و انتقال سیال را نسبت به حالت بدون تنش تغییر می‌دهد و به کمک تصاویر سی تی اسکن می‌توان باندهای تراکمی<sup>۲</sup>، تعیین محل تغییرات تخلخل و تغییرات داخلی ساختار سنگ در حالت‌های مختلف را بررسی کرد. همچنین آنها دریافته‌اند که تراوایی نیز با شروع شکاف<sup>۳</sup> افزایش می‌یابد [۲]. اسکینر و همکاران رابطه‌ای بین عدد سی تی، تخلخل ماتریکس و نفوذپذیری ارائه دادند تا بتوان خواص پتروفیزیکی سنگ‌های مخزنی با ناهم‌گونی بالا را که در شرایط آزمایشگاهی قابل دست‌یابی نیستند، توصیف کنند. همچنین آنها دریافته‌اند که یک رابطه خطی بین تخلخل و عدد سی تی وجود دارد، و یک رابطه جدید برای توصیف نفوذپذیری بعنوان تابعی از تخلخل ارائه دادند [۳]. مطالعه صورت گرفته توسط عبدالکریم و عبدالطیف با بررسی تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی

و میکرو سی تی اسکن و سرعت امواج تراکمی<sup>۴</sup>، تغییرات دیاژنتزی و ساختاری نمونه سنگ را تحت فشارهای محصورکننده مختلف مورد تجزیه و تحلیل قرار دادند [۴]. توصیف صحیح خواص پتروفیزیکی سنگ مخزن کربناته مانند تخلخل و توزیع اندازه دانه‌ها بعلاوه این‌که این پارامترها ظرفیت مخازن جهت ذخیره‌سازی و انتقال هیدروکربن‌ها را کنترل می‌نمایند، حائز اهمیت است [۵].

آزمایشات تعیین سرعت صوت در تفسیر داده‌های لرزه‌ای، آنالیز نمودارهای صوتی چاه و تعیین مشخصات مخزن جایگاه ویژه‌ای دارد. با بررسی تغییرات سرعت امواج تراکمی و برشی تحت بارگذاری‌های متناوب، می‌توان تنوع در هندسه منافذ، نوع تخلخل و به‌خصوص ناهم‌گونی در بافت سنگ مخزن را مشاهده و ارزیابی نمود [۶ و ۷]. به‌طور کلی، رفتار سرعت صوتی کربنات‌ها به هندسه و نوع منافذ بستگی دارد [۸ و ۹]. در مطالعه انجام شده توسط صالح و همکاران ارتباط بین سرعت‌های لرزه‌ای و آنیزوتروپی نفوذپذیری برای نمونه‌های سنگ مخزن کربناته مورد بررسی قرار گرفته است و ارتباطی بین تراوایی و سرعت موج برشی<sup>۵</sup> در برخی سنگ‌های کربناته ارائه شد [۱۰]. همچنین، ولی و همکاران اثر شکل هندسی منافذ سنگ‌های کربناته را بر سرعت امواج صوتی با اندازه‌گیری سرعت امواج تراکمی و برشی بررسی کردند. آنها به این نتیجه رسیدند که سرعت امواج کشسان در سنگ‌های کربناته به پارامترهایی نظیر دیاژنتز، کانی‌شناسی، ساختار خلل و فرج، نوع سیال، فشار و دما و همچنین در کربنات‌های نامتراکم، به نسبت دانه به خمیره، شکل، اندازه و جورشدگی دانه‌ها بستگی دارد. بعلاوه، عامل اصلی پراکندگی در نمودارهای سرعت امواج برحسب تخلخل را می‌توان نوع منافذ تشکیل‌دهنده تخلخل در سنگ‌های کربناته دانست [۱۱].

1. Confining Pressure
2. Compaction Bands
3. Onset of Fracturing
4. Compressional Wave Velocity
5. Shear Wave Velocity

### خصوصیات نمونه مغزه‌های انتخابی

به منظور بررسی اثر بارگذاری بر خواص پتروفیزیکی، ژئومکانیکی و ساختار نمونه سنگ مخزن، دو نمونه کربناته از یکی از مخازن جنوب غربی ایران تهیه گردید. نمونه‌ها از یک عمق مشخص و در کنار هم تهیه شده و به این خاطر به لحاظ زمین‌شناسی، ساختار و خواص پتروفیزیکی مشابه یکدیگر می‌باشند. نمونه‌های انتخابی توسط تولوئن و متانول با استفاده از دستگاه ساکسولت شستشو شده‌اند، به طوری که فضای متخلخل آنها عاری از نمک‌ها، گل حفاری و مواد نفتی باشند. قبل از تعیین خواص پتروفیزیکی سنگ، لازم است نمونه‌ها خشک گردند که بدین منظور نمونه‌های سنگ به مدت ۲۴ h در آونسی با دمای  $60^{\circ}\text{C}$  قرار داده شدند. پس از عملیات شستشو و خشک کردن مغزه‌ها، تراوایی و تخلخل ماتریس اندازه‌گیری شد. اندازه‌گیری تخلخل با استفاده از انبساط گاز هلیوم و قانون بویل و نفوذپذیری سنگ نیز با استفاده از دستگاه اندازه‌گیری تراوایی هوا بر مبنای قانون دارسی انجام می‌شود. بررسی سنگ‌شناسی نمونه‌های انتخابی در جدول ۱ آورده شده است. مشخصات ظاهری، جنس و همین‌طور نتایج آزمایش‌های اندازه‌گیری تخلخل و تراوایی صورت گرفته روی نمونه‌ها در جدول ۲ نشان داده شده است. همچنین، تصویر سطح مقطع نازک نمونه در شکل ۱ نشان داده شده است.

### فرآیند انجام آزمایش

به منظور بررسی اثر بارگذاری بر روی محیط متخلخل و ساختار سنگ مخزن، در ابتدا از تصاویر سی‌تی اسکن جهت بررسی ساختاری نمونه‌ها استفاده گردید. سپس، خواص پتروفیزیکی شامل تخلخل و تراوایی به همراه سرعت امواج صوتی و برشی آنها اندازه‌گیری شد.

علاوه بر موارد گفته شده، تغییرات ژئومکانیکی ایجاد شده در سنگ تحت بارگذاری نیز بسیار مهم است. به طور کلی، مکانیزم‌های شکست ارتباط نزدیکی با تغییرات تخلخل دارد. در ناحیه قبل شکست<sup>۱</sup> نیز، نفوذپذیری تحت تراکم بشدت کاهش می‌یابد [۱۲]. نبود مطالعات جامع جهت بررسی خواص پتروفیزیکی و ساختاری سنگ مخزن وابسته به تنش مخصوصاً سنگ‌های کربناته تحت شرایط آزمایشگاهی ضرورت یک تحقیق ترکیبی کاملی را با رویکردهای متفاوت تر جهت توصیف بهتر ساختار فضای متخلخل و بررسی عملکرد مخزن ایجاد می‌کند.

در این مطالعه، اثر بارگذاری هیدرواستاتیک روی خواص پتروفیزیکی و ساختاری سنگ مخزن کربناته با استفاده از سرعت‌های موج تراکمی و برشی و نیز آنالیز سی‌تی اسکن مورد بررسی واقع شد تا بتوان تغییرات در فضای متخلخل را شناخته و ظرفیت ذخیره و انتقال سیالات مخزنی را در مطالعات پتروفیزیکی تخمین زد. برای این منظور، دو نمونه سنگ مخزن کربناته از یک عمق مشخص با شرایط رسوب‌گذاری و سنگ‌شدگی<sup>۲</sup> مشابه که دارای خواص پتروفیزیکی و ظاهری نزدیک هستند، با یک الگوی مشخص به دفعات تحت بارگذاری هیدرواستاتیک قرار گرفته و تغییرات تخلخل و نفوذپذیری نمونه‌ها توسط دستگاه CMS-300<sup>۳</sup> مورد مطالعه واقع شد. جهت توصیف بهتر تغییرات صورت گرفته تحت بارگذاری، قبل و بعد بارگذاری از نمونه تصاویر SEM تهیه و همچنین، توزیع و اندازه حفرات توسط دستگاه AutoporeIII بررسی گردید. با توجه به اهمیت مطالعه تغییرات ژئومکانیکی، سرعت موج تراکمی و برشی نمونه‌ها توسط دستگاه Sonic-Viewer مورد ارزیابی قرار گرفت. لازم به ذکر است که آنالیزهای ژئومکانیکی، پتروفیزیکی و نیز سرعت امواج صوتی در پژوهشگاه صنعت نفت و آنالیز میکروسکوپی در دانشگاه تهران انجام شده‌اند.

1. Pre-failure Region

2. Diagenesis

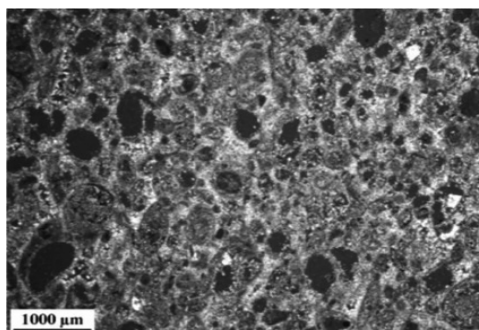
3. Core Measurement System

جدول ۱ سنگ‌شناسی نمونه‌های انتخابی

| B         | A         | شماره نمونه            |  |
|-----------|-----------|------------------------|--|
| عالی      | عالی      | ارتباط تخلخل - تراوایی |  |
| ۳۱۱۹/۶    | ۳۱۱۹/۵۴   | عمق (m)                |  |
| III,C     | III,C     | طبقه‌بندی آرچی         |  |
| dolomitic | dolomitic | لیتولوژی اصلی          | لیتولوژی (%)   |
| ٪۸۷       | ٪۸۵       | آهک                    |  |
| ٪۱۰       | ٪۱۰       | دولومیت                |  |
| ٪۳        | ٪۵        | انیدریت                |  |
| ٪۱۰۰      | ٪۱۰۰      | کل                     |  |
| ۰         | ۰         | گراول                  | اندازه دانه (۰-۴)<br>۰: خیلی ریز ۱: ریز<br>۲: دانه متوسط<br>۳: درشت دانه<br>۴: خیلی درشت |
| ۴         | ۴         | ماسه                   |  |
| ۰         | ۰         | خاکه (ماسه/سیلت)       |  |

جدول ۲ نتایج آزمایش‌های اندازه‌گیری تخلخل و تراوایی صورت گرفته روی نمونه‌ها

| شماره نمونه | طول (cm) | قطر (cm) | دانسیته (g/cm <sup>3</sup> ) | تخلخل (%) | تراوایی (md) |
|-------------|----------|----------|------------------------------|-----------|--------------|
| A           | ۵/۹۶۱    | ۳/۷۶۸    | ۲/۷۱                         | ۲۲/۱۷     | ۱/۳۱         |
| B           | ۵/۴۴۳    | ۳/۷۵۳    | ۲/۷۱                         | ۲۱/۸۷     | ۴/۲۰         |



شکل ۱ تصویر سطح مقطع نازک نمونه

می‌گیرد. درصد رادیواکتیو عبوری تابعی از ضخامت ماده، وزن مخصوص و ترکیب شیمیایی بوده و عدد سی‌تی نشان‌دهنده تضعیف اشعه ایکس است. در مطالعات سنگ مخزن، مهم‌ترین قابلیت استفاده از سی‌تی اسکن توانایی تصویربرداری به‌طور مستقیم حتی از درون پوشش‌های مورد استفاده معمول و سیال محصور بدون دست‌کاری است که باعث می‌گردد تجزیه و تحلیل قابل اعتمادتری داشته و

همچنین جهت آنالیز نتایج، از تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی و تغییرات اندازه ذرات با دستگاه تزریق جیوه بررسی گردید. روند انجام آزمایشات به‌شرح ذیل است:

#### عکس‌برداری سی‌تی اسکن

تصویرنگاری سی‌تی‌اسکن، تکنیک عکس‌برداری رادیولوژی غیرمخربی بوده که براساس میزان تضعیف اشعه ایکس هنگام عبور از ماده شکل

## اندازه‌گیری سرعت موج صوتی تراکمی و برشی

استفاده از روش‌های دینامیکی به عنوان یک تست غیرمخرب جهت ارزیابی دقیق و سریع ثابت‌های الاستیک در خواص ژئومکانیکی سنگ کاملاً پذیرفته شده است. در این روش، ویژگی‌های الاستیک سنگ مخزن از طریق اندازه‌گیری سرعت امواج تراکمی و برشی به‌دست می‌آید. سرعت امواج تراکمی و برشی به ساختار سنگ، تخلخل، جنس کانی‌ها، چگونگی تماس دانه‌ها با یکدیگر ارتباط دارد [۱۶]. همچنین، این پارامترها شاخص مناسبی جهت تعیین فشردگی سنگ می‌باشند. ضریب الاستیسیته یک ویژگی از ماده است که باعث مقاومت در برابر تغییر شکل در قبال وارد شدن تنش تک‌محوره می‌گردد. ضریب بالک یک ماده نشانگر میزان مقاومت ماده نسبت به تراکم حجمی در قبال فشار همه جانبه یکنواخت می‌باشد. معکوس ضریب بالک، تراکم‌پذیری ماده را نتیجه می‌دهد. ضریب برشی ماده نیز مقاومت ماده در برابر تنش برشی روی سطح ماده را نشان می‌دهد. معادلات ضریب‌های معرفی شده با استفاده از روابط شماره ۱، ۳ و ۴ بصورت دینامیکی محاسبه می‌شوند.

$$G = \rho V_s^2 \quad (۱) \text{ (ضریب برشی)}$$

$$\nu = \frac{V_p^2 - 2V_s^2}{2(V_p^2 - V_s^2)} \quad (۲) \text{ (نسبت پواسون)}$$

$$E = G * 2(\nu + 1) \quad (۳) \text{ (ضریب یانگ)}$$

$$K = \frac{E}{3(1 - 2\nu)} \quad (۴) \text{ (ضریب بالک)}$$

بنابراین با توجه به موارد ذکر شده، از آنجایی که بارگذاری می‌تواند بر روی عوامل مرتبط با سرعت اندازه‌گیری موج اثرگذار باشد لذا به منظور ارزیابی تغییرات حاصل از بارگذاری بر پارامترهای مرتبط با سرعت موج طولی و عرضی سنگ مخزن، سرعت این امواج قبل و بعد از بارگذاری مورد ارزیابی قرار گرفته است.

کمترین آسیب به نمونه وارد گردد [۱۴ و ۱۳]. همچنین به منظور اطمینان از عدم وجود شکستگی و مشاهده نوع تخلخل داخلی مغزه‌ها، تصویربرداری سی‌تی اسکن از نمونه‌ها انجام شده است.

## بررسی خواص پتروفیزیکی تحت بارگذاری

در این تحقیق تعیین خواص پتروفیزیکی سنگ مخزن با کمک دستگاه CMS-300 ساخت کشور آمریکا انجام شد. این دستگاه یک سیستم خودکار اندازه‌گیری تخلخل، تراوایی و حجم منفذی است. این دستگاه قادر به اندازه‌گیری تخلخل در بازه ۰/۰۱ تا ۰/۴۰٪، حجم منافذ، تراوایی معادل هوا در فشار متوسط، تراوایی کلینکنبرگ (تراوایی معادل مایع) در فشارهای طبقات بالایی متوالی از ۵۰۰ تا ۱۰۰۰۰ psi برای مغزه‌های به قطر ۱/۵ in است. در این سیستم حجم منافذ توسط قانون بویل تعیین می‌شود. بمنظور بررسی اثر بارگذاری بر روی نمونه سنگ مخزن از دو نمونه سنگ شبیه به هم استفاده شد. جهت اطمینان از تأثیر بارگذاری و همچنین قابلیت و امکان اندازه‌گیری تغییرات خواص پتروفیزیکی، نمونه‌ها تحت الگوی زیر مورد بارگذاری قرار گرفتند و نتایج آنها جهت اندازه‌گیری‌ها ادغام شد. علت این است که بارگذاری در این مطالعه دارای چهار مقطع است و به جهت اینکه از شدت اثرات بارگذاری/باربرداری روی نمونه‌ها کاسته شود، از دو نمونه با خواص فیزیکی مشابه استفاده شده و هر کدام تحت یک الگوی منظم بارگذاری قرار گرفتند.

• نمونه A: بارگذاری ۶۰۰۰ psi و ۸۰۰۰ psi هر کدام به مدت ۵ روز

• نمونه B: بارگذاری ۲۰۰۰ psi و ۴۰۰۰ psi هر کدام به مدت ۵ روز

از آنجایی که مغزه‌ها از اعماق بالایی گرفته شده‌اند و میلیون‌ها سال تحت تنش بوده‌اند، بنابراین تنش‌های ۵۰۰ psi و کمتر از آن تغییر خاصی در تخلخل و تراوایی اعمال نکرده و می‌توانند به‌عنوان معیار اندازه‌گیری محسوب گردند [۱۵].

کاربردهای بسیاری در سال‌های اخیر در تجزیه و تحلیل فرآیندهای آزمایشگاهی در صنعت نفت پیدا کرده است. میکروسکوپ‌های الکترونی به خاطر محدودیت میکروسکوپ‌های نوری توسعه پیدا کرده‌اند. در میکروسکوپ‌های الکترونی به جای نور از پرتوی الکترونی استفاده می‌شود. از آنجایی که طول موج الکترون می‌تواند بسیار کوتاه باشد، پس در میکروسکوپ‌های الکترونی می‌توان به بزرگ‌نمایی بسیار بالا دست یافت (تا حد یک میلیون برابر در بعضی از میکروسکوپ‌های الکترونی) [۲۰ و ۲۱]. به منظور بررسی دقیق اثر بارگذاری بر روی ساختار سنگ، هندسه و اندازه دانه‌ها از نمونه‌ها قبل و بعد از بارگذاری تصاویر SEM در بزرگ‌نمایی ۱۵۰۰ برابر از نمونه‌ها تهیه شده است.

### ارائه نتایج

#### آنالیز تصاویر سی تی اسکن

شکل ۲ تصاویر سی تی اسکن نمونه‌های منتخب را به صورت طولی نشان می‌دهد. براساس تصاویر حاصله می‌توان دریافت که نمونه‌های مغزه فاقد هرگونه شکاف و ناهم‌گونی می‌باشند که تصاویر توزیع عدد سی تی نیز مشابهت زیاد دو نمونه را نشان می‌دهد.

#### تغییرات خواص پتروفیزیکی

براساس شکل‌های ۳ و ۴، میزان تخلخل و تراوایی نمونه A بعد از بارگذاری ۶۰۰۰ psi برای ۵ روز دچار کاهش شده و با تکرار آزمایش پس از ۲۰ روز استراحت نمونه در شرایط محیط، مشخص گردید که این کاهش پایدار بوده است. سپس نمونه در فشار ۸۰۰۰ psi به مدت ۵ روز تحت بار هیدرواستاتیکی قرار گرفته و تست CMS روی آن انجام گردید که این بارگذاری نیز باعث کاهش مجدد تخلخل و تراوایی نمونه گردید.

در این مطالعه، جهت به دست آوردن سرعت امواج قبل و پس از بارگذاری، از دستگاه OYO Sonic View-er-SX ساخت کشور ژاپن استفاده شد. این دستگاه یک ابزار برای تشخیص سرعت موج تراکمی (P) و موج برشی (S) با اندازه‌گیری زمان گذر موج فراصوتی از درون نمونه سنگ با دقت بالا است.

#### بررسی توزیع اندازه حفرات<sup>۱</sup>

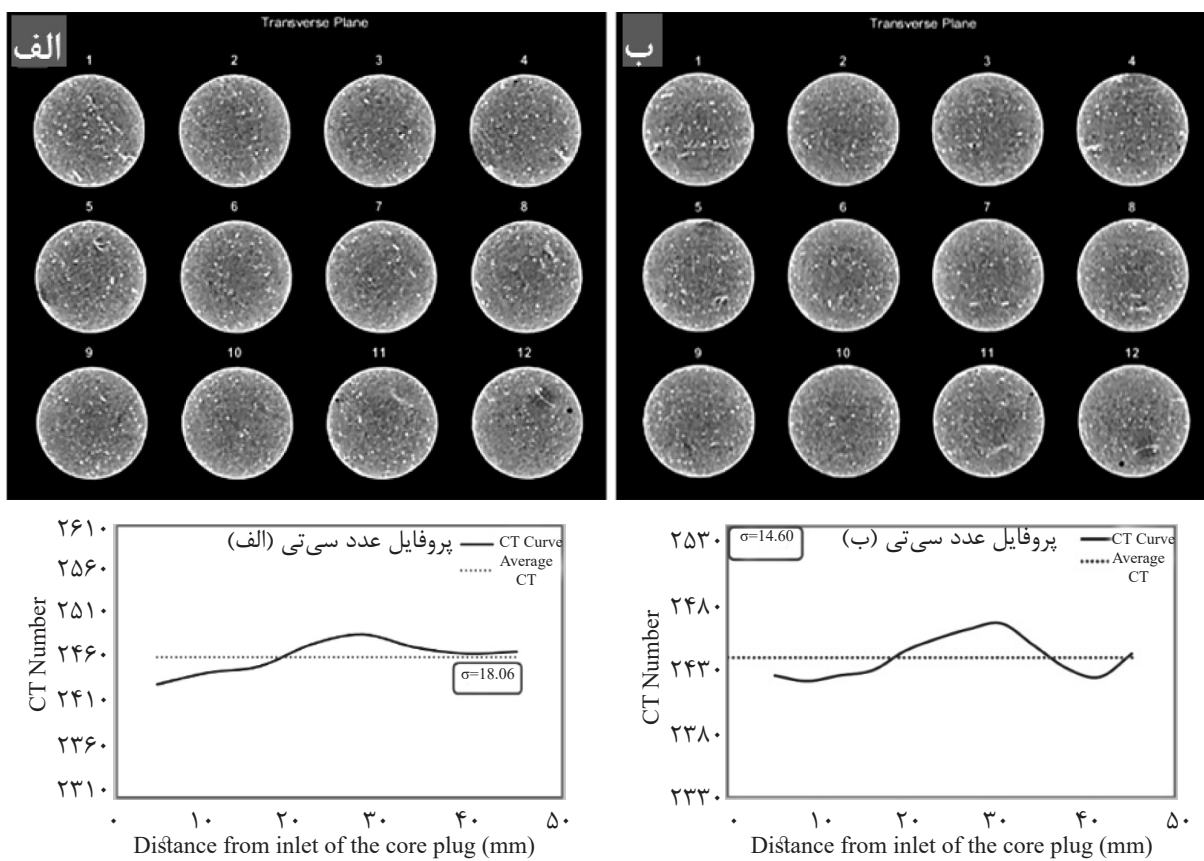
تزریق جیوه به درون محیط متخلخل به عنوان روشی شناخته شده جهت شناسایی توزیع اندازه حفرات و فضای متخلخل سنگ مورد استفاده قرار می‌گیرد [۱۷]. استفاده از روش تزریق جیوه برای اولین بار توسط پورسل ارائه شد که نشان داد می‌توان بین فشار موینگی جیوه و فشار موینگی هوا-آب رابطه‌ای برقرار نمود [۱۸]. در این روش، ابتدا نمونه درون سلول تزریق جیوه دستگاه Autopore III ساخت کشور آمریکا قرار گرفته و جیوه تحت فشارهای مختلف به درون آن تزریق می‌گردد. سپس، حجم جیوه‌ای که به همراه افزایش فشار به نمونه وارد می‌شود اندازه‌گیری می‌شود که این عملیات بسته به نوع فضای متخلخل ممکن است تا چندین ساعت زمان ببرد. با توجه به فشارهای اعمالی، میزان سیالات خروجی و نیز روابط ریاضی مربوطه می‌توان اندازه حفرات موجود در سنگ را تخمین زد. حفرات موجود در یک سنگ را می‌توان به سه دسته حفرات کوچک، متوسط و بزرگ تقسیم‌بندی کرد [۱۹]. بر مبنای نمودار فشار موینگی بدست آمده از تزریق جیوه می‌توان این سه دسته را به صورت سه ناحیه روی منحنی مشخص نمود. در این مطالعه به منظور بررسی اثر بارگذاری بر روی تغییرات محیط متخلخل، قبل از بارگذاری بر روی مقطعی از نمونه تهیه شده و بعد از بارگذاری بر روی نمونه مورد آزمایش، اندازه‌گیری توزیع حفرات انجام شد.

#### تصویربرداری میکروسکوپی

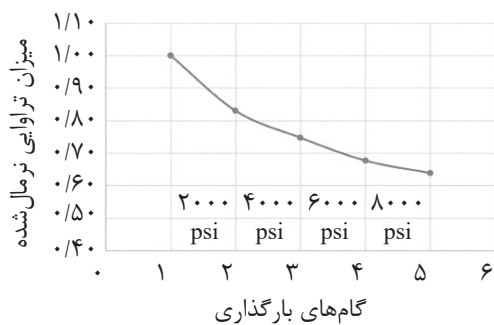
میکروسکوپ الکترونی روبشی<sup>۲</sup> یکی از انواع بسیار معروف میکروسکوپ‌های الکترونی است که خصوصاً

1. Pore Size Distribution

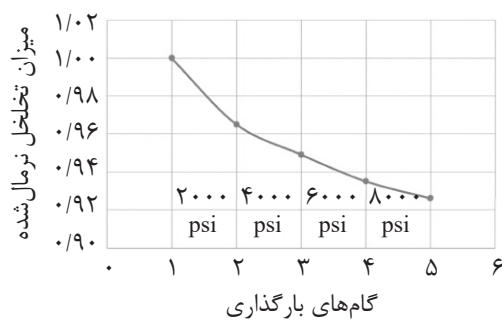
2. Scanning Electron Microscope (SEM)



شکل ۲ تصاویر سی تی اسکن و پروفایل عدد سی تی (الف) نمونه A و (ب) نمونه B



شکل ۴ روند تغییرات میزان تراوایی نرمال شده در طی فرآیند بارگذاری برای نمونه A



شکل ۳ روند تغییرات میزان تخلخل نرمال شده در طی فرآیند بارگذاری برای نمونه A

پس از اطمینان از تغییر خواص پتروفیزیکی در اثر بارگذاری و امکان اندازه‌گیری دقیق آن، نمونه B تحت بارگذاری‌های 2000 psi و 4000 psi هر کدام به مدت 5 روز توسط دستگاه CMS قرار گرفت به نحوی که بعد از گذر هر مرحله بارگذاری، اندازه‌گیری تخلخل و تراوایی روی نمونه انجام شد. سپس نمونه پس از استراحت 20 روزه، وارد بارگذاری در فشار بعدی شد. جهت بررسی تغییرات تخلخل و تراوایی نمونه‌های

پس از اطمینان از تغییر خواص پتروفیزیکی در اثر بارگذاری و امکان اندازه‌گیری دقیق آن، نمونه B تحت بارگذاری‌های 2000 psi و 4000 psi هر کدام به مدت 5 روز توسط دستگاه CMS قرار گرفت به نحوی که بعد از گذر هر مرحله بارگذاری، اندازه‌گیری تخلخل و تراوایی روی نمونه انجام شد. سپس نمونه پس از استراحت 20 روزه، وارد بارگذاری در فشار بعدی شد. جهت بررسی تغییرات تخلخل و تراوایی نمونه‌های

ابتدایی، بیشترین مقدار کاهش مشاهده می‌گردد.

رفته‌رفته با افزایش فشار اعمالی این شیب کاسته می‌شود. پیش‌بینی می‌شود که با افزایش فشار تغییرات به صفر میل کند. با توجه به آنچه گفته شد می‌توان اظهار داشت که نرخ تغییرات تراوایی و تخلخل برحسب فشار در مراحل نخستین بارگذاری که سنگ ساختار طبیعی خود را حفظ کرده است به حداکثر مقدار خود می‌رسد و پس از آن این نرخ کاهش می‌یابد. جزییات تغییرات خواص پتروفیزیکی سنگ طی بارگذاری‌های بلندمدت در شکل ۵ آورده شده است.

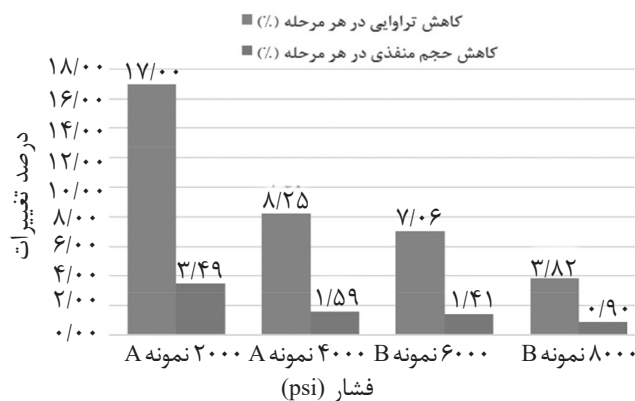
#### سرعت امواج صوتی و برشی

با توجه به نتایج حاصله از آزمایش Vs و Vp در جدول ۳ می‌توان دریافت که سرعت عبور موج بعد از بارگذاری نسبت به حالت قبل از بارگذاری برای هر دو نمونه حدود ۳۵٪ افزایش یافته و ضریب‌های دینامیکی سنگ تقریباً ۲ برابر شده است. با توجه به تغییرات ضریب‌ها قبل و بعد از بارگذاری می‌توان دریافت که مقاومت تراکمی در برابر تغییر شکل افزایش یافته است که این نتیجه تأیید کننده نتایج آزمایش CMS و کاهش خواص پتروفیزیکی سنگ است. در جدول ۳ نیز نتایج آزمایش Vs و Vp آورده شده است.

#### توزیع اندازه حفرات

بررسی سنگ‌شناسی اولیه نمونه‌ها نشان می‌دهد که اندازه تمامی دانه‌ها در حد ماسه<sup>۱</sup> است.

نکته قابل توجه شدت تغییرات متفاوت در دو پارامتر تخلخل و تراوایی است که این میزان تغییرات در شکل‌های ۳، ۴ و ۵ آورده شده است. تراوایی نمونه در برابر فشار تقریباً ۵ برابر میزان تخلخل نمونه بیشتر کاهش یافته است به طوری که با افزایش فشار تا ۸۰۰۰ psi بیش از ۳۶٪ کاهش تراوایی مشاهده می‌شود. رفتار سنگ با افزایش فشار تغییر کرده و میزان تخلخل و تراوایی آن با نرخ یکسانی کاهش نمی‌یابند. در ابتدای امر هنگامی که فشار تا ۲۰۰۰ psi افزایش یافته است سنگ با نرخ شدیدی ۱۷٪ از تراوایی اولیه و ۳/۴۹٪ از حجم منفذی را از دست می‌دهد و متراکم می‌گردد. با افزایش فشار به ۴۰۰۰ psi شدت تغییرات خواص پتروفیزیکی نسبت به مرحله قبل کاهش می‌یابد. نمونه ۸/۲۵٪ تراوایی اولیه و ۱/۵۹٪ تخلخل اولیه خود را در این مرحله از دست می‌دهد. با افزایش فشار به ۶۰۰۰ psi تخلخل و تراوایی نمونه مجدداً با نرخ کمتری متراکم شده و با افزایش فشار تغییرات کمتری حاصل می‌شوند به طوری که در این مرحله، ۱/۴٪ از حجم منفذی و ۷/۰۶٪ از تراوایی کاسته می‌شود. در مرحله بعدی با فشار ۸۰۰۰ psi سنگ با کمترین نرخ ممکن نسبت به مراحل پیشین متراکم شده و نمونه ۰/۹٪ از حجم منفذی و ۳/۸٪ از تراوایی خود را از دست می‌دهد. شکل‌های ۳ و ۴ نشان‌دهنده این مطلب است که با اعمال فشار، تراوایی و حجم منفذی با شیب زیادی کاهش می‌یابد اما



شکل ۵ تغییرات حجم فضای منفذی و تراوایی در اثر بارگذاری



جدول ۳ تغییرات خواص ژئومکانیکی در اثر بارگذاری

| شماره نمونه | شرایط بارگذاری  | سرعت موج برشی (m/s) | سرعت موج تراکمی (m/s) | ضریب پواسون (ν) | ضریب برشی (Gpa) G | ضریب یانگ (Gpa) E | ضریب بالک K |
|-------------|-----------------|---------------------|-----------------------|-----------------|-------------------|-------------------|-------------|
| A           | قبل از بارگذاری | ۱۳۴۳/۱۱۵            | ۲۳۱۶/۸۷۵              | ۰/۲۴۶           | ۴/۸۹۲             | ۱۲/۲۰۱            | ۲/۰۵۸       |
|             | بعد از بارگذاری | ۱۸۸۰/۳۸۰            | ۳۳۶۷/۹۰۰              | ۰/۲۷۳           | ۹/۵۹۰             | ۲۴/۴۴۴            | ۳/۶۹۶       |
| B           | قبل از بارگذاری | ۱۲۰۹/۷۵۴            | ۲۱۱۹/۲۵۱              | ۰/۲۵۸           | ۳/۹۶۹             | ۹/۹۸۸             | ۱/۶۰۹       |
|             | بعد از بارگذاری | ۱۶۴۸/۴۵۰            | ۳۰۷۴/۳۳۴              | ۰/۲۹۸           | ۷/۳۷۲             | ۱۹/۱۴۳            | ۲/۵۷۴       |

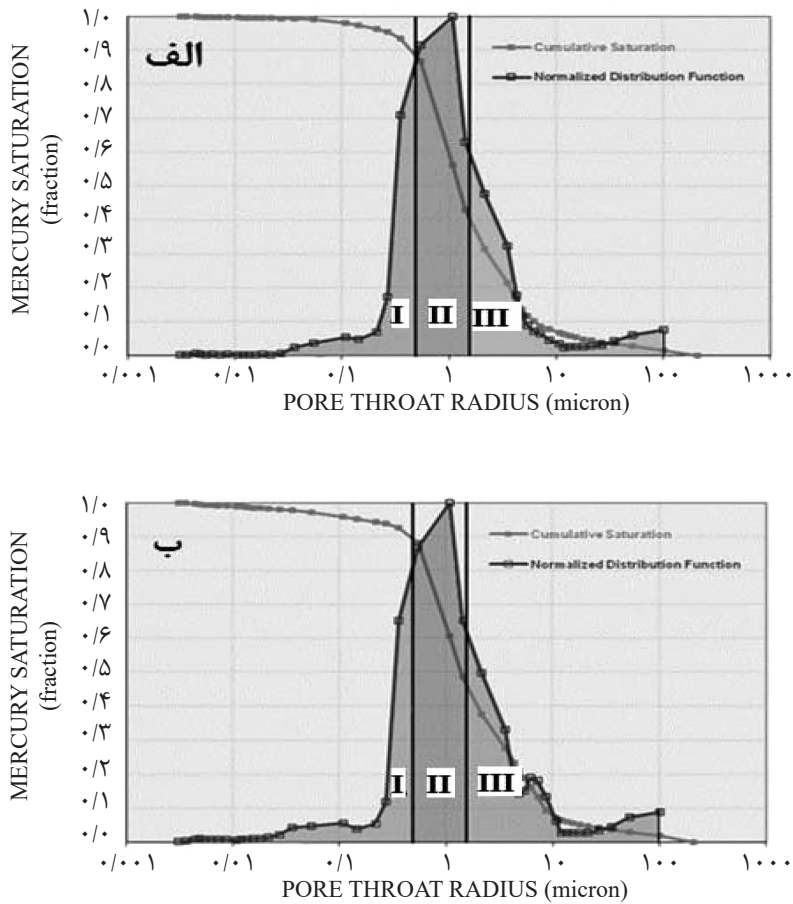
### آنالیز تصاویر میکروسکوپی

شکل ۸ تصاویر SEM نمونه‌های A و B را قبل و بعد از بارگذاری نشان می‌دهد. نواحی نشان داده شده با بیضی‌های مشکی کم رنگ مشخص شده، نشان‌گر شکستگی‌های به وجود آمده در سنگ پس از بارگذاری می‌باشند. نواحی نشان داده شده با بیضی‌های سفید رنگ نشان‌گر بخش‌هایی بوده که در اثر تراکم شکسته شده‌اند. با مقایسه کلی تصاویر می‌توان دریافت که ساختار دانه‌های سنگ در قبل از بارگذاری (تصاویر سمت چپ) منسجم و منظم و دارای دانه‌هایی بزرگ‌تر بوده که این امر سبب افزایش فاصله بین دانه‌ها می‌گردد که دلیلی بر وجود تخلخل و تراوایی بیشتر است. پس از اعمال بارگذاری روی نمونه‌ها، ساختار دانه‌ها فشرده‌تر و نامنظم‌تر و ذرات با ابعاد کوچک‌تر ظاهر گشته‌اند. طی فرآیند بارگذاری ذرات سنگ روی هم فشرده می‌شوند. با افزایش فشار شاهد خرد شدن، شکسته شدن و ریزتر شدن ذرات خواهیم بود. ذرات با ابعاد ریزتر در تصاویر سمت راست نیز مشاهده می‌شود که در اثر شکستگی سنگ، به وجود آمده‌اند. این ذرات باعث پر شدن فاصله بین حفرات می‌گردد که باعث انسداد و کاهش شدید تراوایی می‌گردد. با افزایش میزان بارگذاری، نرخ کاهش خواص پتروفیزیکی سنگ کاهش می‌یابد زیرا سنگ متراکم‌تر شده و با فشردگی در سطح حفرات احتمال کمتری برای شکست ذرات جدید وجود دارد.

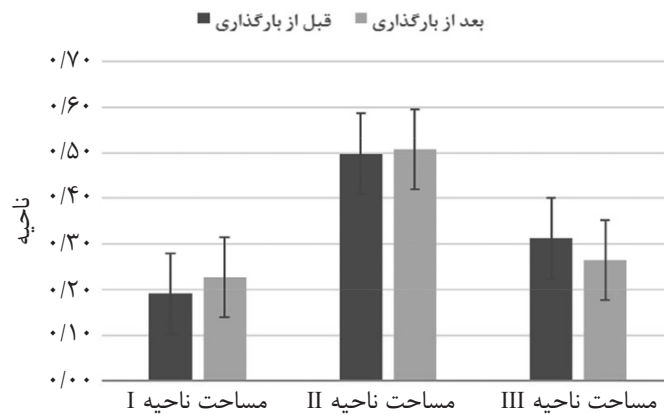
وانگ و همکاران و گومرو- دیاز مطرح کردند که مواد تشکیل‌دهنده سنگ بر شکنندگی و شکل‌پذیری سنگ اثرگذار است [۲۲ و ۲۳]. میزان استحکام سنگ با افزایش کوارتز و دولومیت در سنگ افزایش می‌یابد. نمونه سرشار از کلسیت نسبت به کوارتز و دولومیت وابستگی بیشتری به تنش از خود نشان می‌دهد. با توجه به نظریه ایشان، دانه‌های از جنس کلسیت مقاومت کمی از خود در برابر فشار نشان داده و زود می‌شکنند و از آنجا که نمونه‌های استفاده شده حدود ۸۵٪ کلسیتی می‌باشند، می‌توان اظهار داشت که دانه‌های کلسیتی با اندازه ماسه در اثر بارگذاری خرد شده و با بسته شدن گلوگاه‌ها و همچنین، کاهش حجم منفذی باعث کاهش تراوایی نمونه می‌شود. نتایج تست تزریق جیوه نمونه‌ها بصورت فراوانی تجمعی اندازه حفرات در شکل ۶ آورده شده است. ناحیه‌های I و II و III به ترتیب شاخصی از حفرات ریز<sup>۱</sup>، متوسط<sup>۲</sup> و بزرگ<sup>۳</sup> می‌باشند. تست تزریق جیوه در دو نوبت قبل از انجام بارگذاری و پس از اتمام بارگذاری انجام شده است.

به منظور بررسی دقیق‌تر، مساحت زیر نمودار هر ناحیه نسبت به کل نمودار توزیع حفرات محاسبه شده و نتایج در شکل ۷ نشان داده شده است. طبق نتایج محاسبه شده پس از بارگذاری، سطح ناحیه III کاسته شده و به سطح ناحیه I افزوده شده است. این بدین معنا است که حفرات، متراکم‌تر و بسته‌تر شده‌اند، که دلیلی بر پر شدن حفرات توسط خرد شدن ذرات حاصل از شکستگی و همچنین، تراکم و فشردگی حفرات و در نتیجه، تغییرات در محیط متخلخل است.

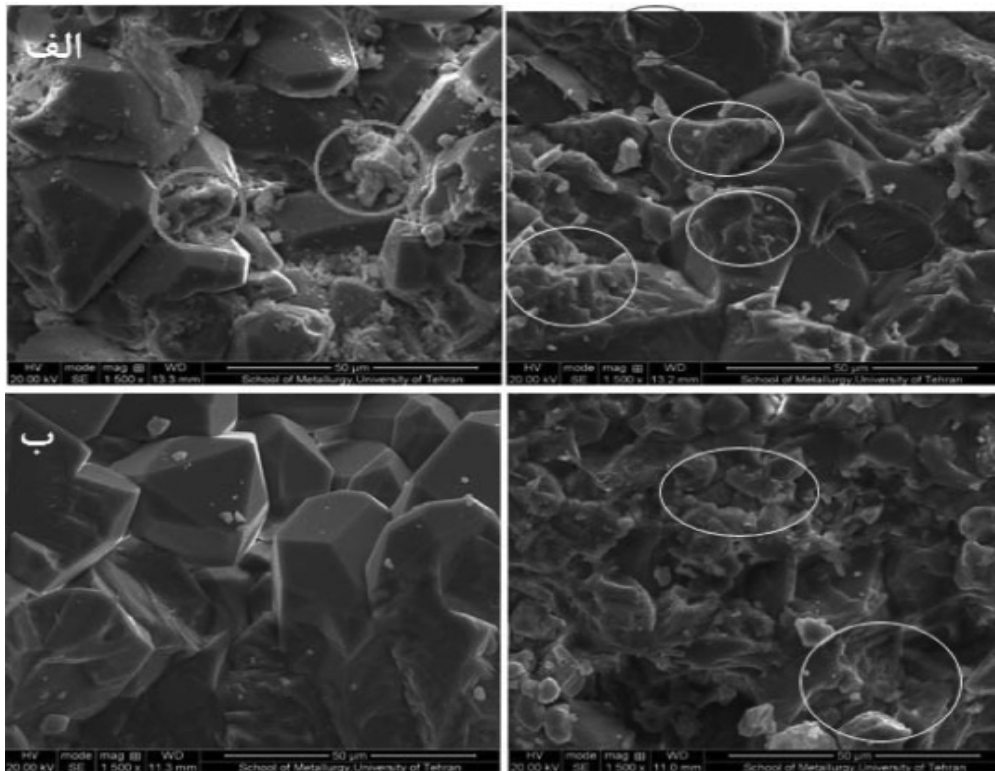
1. Micropore  
2. Mesopore  
3. Macropore



شکل ۶ توزیع حفرات با استفاده از تست تزریق جیوه الف) قبل از اعمال بارگذاری ب) بعد از اعمال بارگذاری



شکل ۷ تغییرات مساحت اندازه دانه‌ها در بخش‌های مختلف قبل و بعد از بارگذاری



شکل ۸ تصاویر SEM نمونه‌های مورد آزمایش قبل (سمت چپ) و بعد (سمت راست) از بارگذاری الف) نمونه A (۸۰۰۰ psi) و ب) نمونه B (۴۰۰۰ psi)

## بحث و نتایج

نشان داده و شاهد کاهش حجم حفرات زیاد خواهیم بود که ناشی از تغییر شکل می‌باشند. این تغییرات با بسته شدن مجراها نیز همراه خواهد بود. از فشار ۶۰۰۰ تا ۲۰۰۰ psi درمی‌یابیم که روند نمودار تقریباً یکسان خواهد بود. همچنین، تا فشار ۶۰۰۰ psi قسمت زیادی از منافذ فروریخته<sup>۱</sup> و رفته‌رفته با مسدودسازی گلوگاه‌ها و همچنین با لغزش<sup>۲</sup> و حتی خردشدن، باعث تغییرات و کاهش تخلخل نیز خواهد شد یعنی نمونه سنگ تا فشار حدوداً ۲۰۰۰ psi شاهد تغییر شکل بوده و از این فشار به بعد با روند کاهش شدید حجم حفرات روبرو نمی‌باشد، که در این جا عمدتاً با شروع ایجاد شکست‌های جزئی و لغزش بلورها روبرو خواهیم شد. با این وجود یکی از نکات مهم در فشارهای بالا که باعث عدم هم‌خوانی روند نمودار تخلخل و نمودار تراوایی می‌گردد ایجاد شکست در سنگ‌ها است.

همان‌طور که در شکل ۲ مشاهده شد نزدیک به ۱۱٪ از حفره‌های مرتبط در نمونه‌ی تحت بررسی دارای اندازه تقریبی کوچک‌تر از  $0.5 \mu\text{m}$  می‌باشند. بر این اساس، می‌توان گفت که درصد زیادی از گلوگاه‌های تشکیل‌دهنده سنگ بزرگ می‌باشند. همان‌طور که در شکل ۳ مشاهده گردید، در ابتدا با افزایش فشار تا ۲۰۰۰ psi شیب نمودار بسیار زیاد خواهد بود که ناشی از بسته شدن حفره‌ها و همچنین، تغییرات ناشی از تغییر شکل است. به‌علاوه، تغییر رفتار تخلخل و تراوایی در این مرحله تقریباً یکسان است. به‌دلیل اینکه میزان تغییرات تخلخل و تراوایی تا این فشار زیاد است، می‌توان این‌گونه بیان داشت که گستره‌ی زیادی از حفره‌های بزرگ در این نمونه وجود دارند. به‌دلیل در ارتباط بودن حفرات، با افزایش فشار تا ۲۰۰۰ psi تمامی حفرات تغییر شکل می‌دهند. دلیل این امر این است که در فشارهای پایین‌تر، سنگ از خود رفتار الاستیک

1. Pore Collapse  
2. Sliding

نخواهد بود بلکه در نمونه‌ها شکست موضعی<sup>۵</sup> رخ خواهد داد و در قسمت‌هایی از نمونه گسیختگی دانه و ایجاد شکاف بزرگ و پیوستگی بیشتر فضاهای متخلخل به وجود خواهد آمد که روند کاهش تخلخل و تراوایی با افزایش فشار کندتر خواهد شد [۲۶]. در تصاویر شکل ۸ مشاهده شد که با افزایش تنش بر روی نمونه‌ها اتصال<sup>۶</sup> بین دانه‌ها و همچنین، سیمان‌شدگی بین آنها جدا شده است و نتیجتاً این فاصله با تراکم دانه‌ها<sup>۷</sup> پر شده است. این اتصال ناشی از سیمان به وسیله ناحیه دایره ای خاکستری مشخص گردیده است. نتیجه خود این سیمان‌شدگی‌ها نیز به پرشدن و مسدود شدن مجراها و فضای متخلخل کمک کرده‌اند. با توجه به شکل با از بین رفتن اتصال بین دانه‌های سنگ که ناشی از شکسته شدن پیوند بین سیمان و دانه‌ها است، ذرات سنگ با برهم‌کنشی که بین یکدیگر داشته‌اند شروع به خرد شدن کرده‌اند، به دلیل بالا بودن میزان این خردشدن و قرارگیری ذرات ریزتر در میان ذرات درشت‌تر، میزان تخلخل و تراوایی به میزان شدیدی کاهش یافته است. نتایج تست تزریق جیوه در شکل ۶ و تصاویر میکروسکوپی در شکل ۸ به نوعی بیانگر شکست محلی در نمونه‌های تحت بارگذاری است. با افزایش فشار در نمونه تا ۸۰۰۰ psi، قسمت‌هایی از منافذ بزرگ دچار شکست و همچنین، ریزش زیادی شده‌اند. نتیجه نمونه با چنین منافذ بزرگی از استحکام کمتری برخوردارند. براساس شکل ۶، اکثر این منافذ بزرگ به ریز روزنه تبدیل شده‌اند و قسمت بسیار کمی از آنها با پرشدگی جزئی<sup>۸</sup> و بسته‌شدن همراه می‌باشند به نحوی که از اندازه‌های ۱۰ به ۶ و ۷  $\mu\text{m}$  تبدیل شده‌اند.

همان‌طور که انتظار می‌رفت با افزایش فشار، تغییرات تخلخل نسبتاً یکسان بوده ولی میزان تغییرات تراوایی نسبت به گام فشاری قبل روند کاهشی را پیش گرفته است. با گذر از گام فشاری ۶۰۰۰ psi شکست در نمونه دیده می‌شود. در این فشار به دلیل رشد کامل شکستگی‌ها و غلبه فشار بر تنش تسلیم نمونه، حفرات نمونه در حالت بزرگ متلاشی<sup>۱</sup> شده و باعث پیوستگی کامل شکاف‌های بزرگ‌تر می‌گردند. بهم پیوستن شکاف‌های بزرگ‌تر باعث عدم پیروی کامل رفتار تراوایی نسبت به فشار خواهد شد. در نتیجه مشاهده می‌شود که با وجود یکسان بودن میزان افزایش فشار تغییرات نرمال شده تراوایی از روند پیشین نمودار انحراف پیدا خواهد کرد. این شکست همین تغییرات را در روند نمودار تخلخل نیز به وجود می‌آورد. بنابراین، مشاهده می‌گردد که در فاز شکست، کاهش تخلخل و تراوایی که از سیستم انتظار می‌رود به همان‌گونه میسر نخواهد شد [۲۴].

در سنگ‌هایی که به خوبی جور<sup>۲</sup> شده‌اند و همچنین، دارای ضریب بایوت<sup>۳</sup> بالا هستند فضاهای متخلخل به خوبی با یکدیگر در ارتباط هستند و در هنگام افزایش فشار تغییرات تنش و تغییر شکل در قسمت‌های مختلف سنگ تقریباً به صورت یکنواخت رخ خواهد داد. اما با افزایش تنش وارده به نمونه، سیر تکاملی ایجاد شده در تراوایی و تخلخل رفته رفته وضعیتش نسبت بهم تغییر خواهد کرد و حتی ممکن است دچار رفتارهای متفاوت نیز بشوند [۲۵]. همان‌گونه که پیش‌تر ذکر گردید بیش از ۸۰٪ از گلوگاه‌های منافذ نمونه بین ۰/۵ تا ۱۰  $\mu\text{m}$  می‌باشند. این خود نشان‌دهنده همگن بودن نسبی اندازه فضای متخلخل است. به همین دلیل مشاهده می‌شود که با افزایش تنش تا حدود ۶۰۰۰ psi نحوه تغییرات و رفتار تراوایی و تخلخل به صورت نسبی شبیه به یکدیگر خواهند بود و از این فشار رفته رفته تفاوت‌ها ایجاد خواهد شد. شکست<sup>۴</sup> به معنای گسیختگی کامل سنگ

1. Disintegrate
2. Sort
3. Biot-Coefficient
4. Failure
5. Localization Failure
6. Bonding
7. Grain Compaction
8. Partial Filling

خالی آن است. همچنین، در تصاویر SEM مشهود است که چینش دانه‌های سنگ پس از بارگذاری فشرده‌تر گشته و فاصله بین دانه‌ها کاهش یافته و به‌وسیله دانه‌های ریز حاصله از شکستگی پر شده است. این دگرگونی در ساختار سنگ، باعث افزایش سرعت عبور موج صوتی در سنگ می‌شود.

### نتیجه‌گیری

براساس آنچه مطرح شد، تراوایی و تخلخل سنگ به میزان تنش مؤثر و زمان بارگذاری مربوط است و نتایج این مطالعه به‌صورت خلاصه بشرح زیر است:

- براساس تست‌های CMS این نتیجه حاصل شد که نرخ تغییرات خواص پتروفیزیکی حین فرآیند بارگذاری روند کاهشی داشته به‌طوری‌که با افزایش تنش مؤثر، سنگ مقاومت بیشتری نسبت به تراکم از خود نشان می‌دهد و پیش‌بینی می‌شود که در صورت عدم بروز شکستگی در ماتریس سنگ، با افزایش فشار تغییرات پتروفیزیکی سنگ به صفر میل نماید.

- تصاویر SEM نشان می‌دهد که ساختار طبیعی ماتریس سنگ با اعمال بارگذاری از خود تغییر شکل بروز می‌دهد. در فشارهای اولیه فرآیند بارگذاری، خردشدگی دانه‌های سنگ نسبت به سایر مراحل فشاری بسیار زیاد بوده و سپس ذرات خردشده با انسداد گلوگاه‌ها باعث کاهش تراوایی می‌گردد. با افزایش فشار نرخ کاهش خواص پتروفیزیکی سنگ روند کاهشی دارد.

- نتایج تست تزریق جیوه نشان می‌دهد که در اثر بارگذاری اندازه حفرات از اندازه‌های متوسط و بزرگ به ریز تغییر می‌یابد و این دلیلی بر پرشدن حفرات توسط خرده ذرات حاصل از شکستگی و همچنین، تراکم و فشردگی حفرات است.

- نتایج آزمایش سرعت‌های موج تراکمی و برشی نشان داد سرعت عبور موج از سنگ پس از بارگذاری

یکی دیگر از موارد قابل توجه این است که در شکل ۶ پس از اعمال بارگذاری و ریزش حفره‌های بزرگ‌تر و تبدیل به حفره‌های کوچک‌تر که اکثراً در ناحیه  $0.1-0.5 \mu\text{m}$  تبدیل شده‌اند، تغییرشکل فضاهای متخلخل کوچک‌تر نیز اتفاق می‌افتد. بنابراین، حفره‌های بزرگ‌تر که پیش‌تر مشاهده شد دچار ریزش شده و ذرات ناشی از خرد شدن شروع به کاهش اندازه فضای متخلخل به سمت منافذ ریز کرده‌اند. همچنین، اندازه این ذرات خرد شده به مقدار زیادی ریز نشده‌اند که در صورت بسیار ریز شدن فضای متخلخل بیشتر به سمت اندازه‌هایی زیر  $0.1 \mu\text{m}$  نمود پیدا می‌کرد در حالی که مشاهده می‌شود اکثر تغییر اندازه و سیر تکاملی فضای متخلخل به سمت اندازه‌های نزدیک به منافذ متوسط اندازه بوده است. فضاهای متخلخل محدوده ریز منفذ نیز افزایش یافته‌اند چنانکه میزان اشباع در این ناحیه کاهش یافته است که به‌علت از بین رفتن قسمتی از حفره‌های کوچک در خلال عملیات بارگذاری است. یکی دیگر از نکاتی که باید هنگام بررسی تزریق جیوه مد نظر قرار داد رفتار فرکتال<sup>۱</sup> است. ناحیه منافذ متوسط اندازه مربوط به شکاف‌ها است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود با خرد شدن دانه‌ها، میزان ناحیه منافذ متوسط اندازه نیز افزایش داشته است که خود بیانگر افزایش درصد فضاهای متخلخل ناشی از شکاف است [۲۷]. هنگام اعمال فشار به سنگ، میزان سرعت موج تراکمی و برشی افزایش می‌یابد، حال آنکه سرعت این امواج به شدت وابسته به فشردگی بین ماتریکس سنگ است. این امواج از نوع الاستیسیته هستند پس با تغییرشکل سنگ بدون ایجاد ریز شکستگی میزان سرعت آنها به میزان قابل توجهی افزایش می‌یابد. براساس داده‌هایی که ارائه شده مشاهده می‌شود که پس از اعمال فشار به سنگ میزان سرعت‌های موج تراکمی و برشی آن افزایش داشته است که این مسئله ناشی از میزان نسبت حجم فضای ماتریکس سنگ به فضای

• درک صحیح از وابستگی خواص پتروفیزیکی سنگ مخزن کربناته به تنش وارده می‌تواند در فرآیندهای ذخیره‌سازی، انتقال سیالات مخزنی در مخازن نفتی، بهینه‌سازی تولید، بررسی سناریوهای تزریق سیالات جهت ازدیاد برداشت و تغییرات ایجاد شده در محیط متخلخل بسیار کمک‌کننده باشد.

به میزان ۳۵٪ افزایش یافته است که بدین معنی است که ذرات حاصله از خردشدن دانه‌های سنگ فضای بین حفرات را پر کرده و مسیری جدید برای رسیدن سریع‌تر امواج صوتی فراهم کرده است که تأییدی بر نتایج بخش‌های قبلی بوده و هم‌خوانی قابل توجهی با آنها دارد.

### مراجع

- [1]. Nagel N. B., "Compaction and subsidence issues within the petroleum industry: From Wilmington to Ekofisk and beyond," *Physics and Chemistry of the Earth, Part A: Solid Earth and Geodesy*, Vol. 26, Issue 1-2, pp. 3-14, 2001.
- [2]. Karacan C. O., Grader A. S. and Halleck, P. M., "4-D Mapping of porosity and investigation of permeability changes in deforming porous medium," In SPE Eastern Regional Meeting, Society of Petroleum Engineers, 17-19 October, Canton, Ohio 2001.
- [3]. Skinner J. T., Tovar F. D. and Schechter D. S., "Computed tomography for petrophysical characterization of highly heterogeneous reservoir rock," In SPE Latin American and Caribbean Petroleum Engineering Conference, Society of Petroleum Engineers, 2015.
- [4]. Abdelkarim A. and Abdullatif O., "Combining petrophysical properties and ultrasonic velocity for improved prediction of tight carbonate reservoir," In Unconventional Resources Technology Conference, Society of Exploration Geophysicists, American Association of Petroleum Geologists, pp. 2201-2207, Society of Petroleum Engineers, Austin, Texas, 24-26, July 2017.
- [5]. De Assis P., Moraes F., Tabelini R. and Freitas U., "On the influence of texture on ultrasonic velocities of carbonate rocks using a global petrophysical database," In SEG Technical Program Expanded Abstracts, pp. 3925-3929, Society of Exploration Geophysicists, 2017.
- [6]. Regnet J. B., Robion P., David C., Fortin J., Brigaud B. and Yven B., "Acoustic and reservoir properties of microporous carbonate rocks: Implication of micrite particle size and morphology," *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, Vol. 120, No. 2, pp.790-811, 2015.
- [7]. Gir R., "Application of sonic waveform attributes in reservoir studies," *Geol. Soc. Malaysia, Bulletin* 27, pp. 75-102, 1990.
- [8]. Baechle G. T., Weger R., Eberli G. P. and Massaferro J. L., "The role of macroporosity and microporosity in constraining uncertainties and in relating velocity to permeability in carbonate rocks," In SEG Technical Program Expanded Abstracts, Society of Exploration Geophysicists, pp. 1662-1665, 2004.
- [9]. Weger R. J., Eberli G. P., Baechle G. T., Massaferro J. L. and Sun Y. F., "Quantification of pore structure and its effect on sonic velocity and permeability in carbonates," *AAPG bulletin*, Vol. 93, No. 10, pp. 1297-1317, 2009.
- [10]. Saleh M., Vega S., Prasad M. and Sharma R., "A study of permeability and velocity anisotropy in carbonates," In SEG Technical Program Expanded Abstracts, pp. 4238-4242, Society of Exploration Geophysicists, 2009.
- [11]. Vali J., Kazemzadeh E., Alok B. H. and Esfahani M. R., "The effect of pore geometry on seis mic wave velocities in carbonate rocks from hydrocarbon reservoirs," *Journal of the Earth and Space Physics (JESP)*, Vol 35, Issue 3, pp. 35-49, 2009.

- [12]. Baud P., Schubnel A. and Wong T. F., "Dilatancy, compaction, and failure mode in Solnhofen limestone," Journal of Geophysical Research: Solid Earth, Vol. 105, Issue B8, pp. 19289-19303, 2000.
- [13]. Rassenfoss S., "Need a faster measure of relative permeability? take a CT scan and follow with digital rock analysis," Society of Petroleum Engineers. doi:10.2118/0817-0028-JPT, 2017
- [14]. Akin S. and Kovscek A. R., "Computed tomography in petroleum engineering research," Geological Society, London, Special Publications, Vol. 215, No. 1, pp. 23-38, 2003.
- [15]. Teklu T. W., Zhou Z., Li X. and Abass H., "Experimental investigation on permeability and porosity hysteresis in low-permeability formations," Society of Petroleum Engineers, doi:10.2118/180226-MS, 2016.
- [16]. Eberli G. P., Baechle G. T., Anselmetti F. S. and Incze M. L., "Factors controlling elastic properties in carbonate sediments and rocks," The Leading Edge, Vol. 22, pp. 654-660, 2003.
- [17]. Aminian K., Bilgesu H. I. and Ameri S., "Influence of pore size distribution on damage profile," Society of Petroleum Engineers," doi:10.2118/39587-MS, 1998.
- [18]. Purcell W., "Capillary pressures-their measurement using mercury and the calculation of permeability therefrom," Journal of Petroleum Technology, Vol. 1, No. 2, pp. 39-48, 1949.
- [19]. Rose W. and Bruce W., "Evaluation of capillary character in petroleum reservoir rock," Journal of Petroleum Technology, Vol. 1, No. 05, pp. 127-142, 1949.
- [20]. Sriamornsak P. and Thirawong N., "Use of back-scattered electron imaging as a tool for examining matrix structure of calcium pectinate," International Journal of Pharmaceutics, Vol. 267, Issue 1-2, pp. 151-156, 2003.
- [21]. Ismail A. R., Jaafar M. Z., Sulaiman W. R. W., Ismail I. and Shiunn N. Y., "Identification of sandstone core damage using scanning electron microscopy," In AIP Conference Proceedings, Vol. 1901, No. 1, p. 110005. AIP Publishing, 2017.
- [22]. Wang Q. Z., Li W. and Xie H. P., "Dynamic split tensile test of flattened Brazilian disc of rock with SHPB set-up," Mechanics of Materials, Vol. 41, No. 3, pp. 252-260, 2009.
- [23]. Gamero-Diaz H., Miller C. K. and Lewis R., "sCore: a mineralogy based classification scheme for organic mudstones," In SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Society of Petroleum Engineers, 2013.
- [24]. Gangi A. F., "Hertz theory applied to the porosity-pressure, permeability-pressure and failure strength-porosity variations of porous rocks," In The 17<sup>th</sup> US Symposium on Rock Mechanics (USRMS). American Rock Mechanics Association, 1976.
- [25]. David C., Wong T. F., Zhu W. and Zhang J., "Laboratory measurement of compaction-induced permeability change in porous rocks: Implications for the generation and maintenance of pore pressure excess in the crust," Pure and Applied Geophysics, Vol. 143, Issue 1-3, pp. 425-456, 1994.
- [26]. Ingraham M. D., Bauer S. J., Issen K. A. and Dewers T. A., "Evolution of permeability and Biot coefficient at high mean stresses in high porosity sandstone," International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 96, pp. 1-10, 2017.
- [27]. Shen P., Li K. and Jia F., "Quantitative description for the heterogeneity of pore structure by using mercury capillary pressure curves," In International Meeting on Petroleum Engineering, Society of Petroleum Engineers, 1995.