«مجله علمی علوم و فنون سازندگی»

سال چهارم، شماره ۳، پاییز ۱۴۰۲، صفحه ۳۹ الی ۴۶

علمی – تخصصی

مروری بر تأثیر خواص ذاتی سنگ و عوامل محیطی بر پارامترهای الاستیک مخازن کربناته هیدروکربوری

محمد نیک بین[1*]، سید مجتبی هزاوئی، بابک امین شهیدی

[1] دانشجوی دکترا ، پژوهشکده نفت و گاز دانشگاه فردوسی مشهد

[2] دکترای تخصصی، هلدینگ تخصصی نفت، گاز و پتروشیمی

[3] استاد، پژوهشکده نفت و گاز دانشگاه فردوسی مشهد

(دریافت: ۱۴۰۲/۰۸/۰۳، پذیرش: ۱۴۰۲/۰۹/۲۱)

چکیده

بطور کلی بررسی کیفت مخازن ناهمگون کربناته، آنالیزی همه‌جانبه از تاثیر خواص ذاتی سنگ و عوامل محیطی بر پارامترهای الاستیک مخازن می‌طلبد. بررسی میکروسکوپی و ماکروسکوپی سنگ‌های کربناته برای ارزیابی عوامل زمین‌شناسی و اثبات تصدیق آن از طریق روابط الاستیک، تخمین قابل قبول از وضعیت فیزیکی و مکانیکی سنگ آهک ارائه می‌دهد.لازم بذکر است که خصوصیات فیزیکی و مکانیکی سنگ‌ها به بافت و ترکیب سنگ‌شناسی آن وابسته است. مسلما این خصوصیات به شناخت محیط و شرایط تشکیل سنگ‌ها کمک زیادی می‌کند و اطلاعات اساسی و پایه برای انجام طراحی‌های مهندسی در اختیار قرار می‌دهد.

در این مطالعه، فاکتورهای محیطی مانند فشردگی و تراکم حجمی، عمق تدفین، فشار موثر، مقیاس و همچنین خواص ذاتی سنگ از جمله تخلخل و شکل منافذ، کانی‌شناسی، محتوای رس، بافت سنگ، چگالی و ترشوندگی، شناسایی و تأثیر کلی آنها بر رفتار الاستیک مخازن کربناته به دقت مورد بررسی قرار گرفته شده است. این مطالعه تاکید دارد که درک صحیح این تأثیرات می‌تواند به بهبود استخراج و بهره‌وری از مخازن کربناته هیدروکربوری کمک کند.

کلید واژه‌ها: خواص سنگ مخزن، خواص الاستیک، مخازن ناهمگون کربناته.

۱. مقدمه

سنگ‌های کربناته عمده‌ترین مخازن هیدروکربنی را در ایران و جهان تشکیل می‌دهند از همین‌رو توجه این پژوهش برروی این نوع از مخازن با احتساب خواص ذاتی و ناهمگونی[1] بالایی که دارند، معطوف شده است. بنیاد ساختاری این نوع از سنگ‌ها با تمام پیچیدگی که دارد بسیار وابسته به نحوه اتصال، الاستیسیته[2] و چگالی موادی است که در ساختار توده آن به یکدیگر متصل شده‌اند. به‌طورکلی برای سنجش خواص الاستیک فیزیک سنگ مخازن کربناته بایستی به ابعاد خصوصیات لرزه‌ای آن‌ها دست پیدا کرد. با توجه به اینکه سرعت انتشار امواج لرزه‌ای در یک محیط الاستیک به عوامل گوناگونی نظیر کانی‌شناسی، بافت، ناهمسانگردی[3]، تخلخل، چگالی، نوع و شکل منافذ، نوع و درجه اشباع سیال منفذی و غیره بستگی دارد [۱، ۲ و ۳]، پس می‌توان تمامی عوامل موثر را به دو دسته اصلی تقسیم نمود. دسته اول پارامترهای محیطی می‌باشند که به طور فیزیکی به ساختار سنگ مربوط نیستند. از این عوامل می‌توان به عمق تدفین، فشار همه‌جانبه، درجه اشباع، نوع سیال منفذی، دما، فرکانس ابزار و

[1] Heterogeneity

[2] Elasticity

[3] Anisotropy

مقیاس زمین‌شناسی اشاره کرد؛ و دسته دوم پارامترهای مرتبط با خواص ذاتی سنگ نظیر بافت سنگ، ترکیب کانی‌شناسی، چگالی، تخلخل و شکل منافذ می‌باشند [۴]. در شرایط واقعی زمین‌شناسی، چندین عامل مختلف با هم ترکیب می‌شود و سپس برآیند آن‌ها روی سرعت انتشار امواج تأثیر می‌گذارد. در نتیجه، با توجه به این خصوصیات، می‌توان تعدادی قاعده کلی برای انواع سنگ‌ها تعیین کرد. به عنوان مثال، دولومیت مقدار مدول بالک[۱] زیادی دارد و دانه‌های سنگ به خوبی به یک‌دیگر متصل هستند، در نتیجه سرعت موج تراکمی[۲] و آمپدانس[۳] آن نیز نسبتاً بالا می‌باشد. در هر حال، به دلیل پیچیدگی زیاد و ناهمگنی سنگ‌های مخزن در مقیاس میکروسکوپی، مقدار تغییرات خواص لرزه‌ای، در پاسخ به تغییرات پارامترهای پتروفیزیکی، از سنگی به سنگ دیگر متغیر است [۵]. بنابراین، این قوانین تنها به صورت کیفی ارائه شده‌اند. در این پژوهش تمامی عوامل محیطی و ذاتی مؤثر بر ویژگی‌های الاستیک سنگ‌های رسوبی کربناته به صورت مطلق بررسی می‌شود. از آنجایی که در صنعت برای حفاری ایمن و اصولی در مخازن کربناته، باید شناخت درستی از رفتار این نوع سنگ نسبت به تغییرات محیطی داشت. پس شناخت این خصوصیات در قالب این مطالعه، می‌تواند رفتار سنگ مخزن را در برابر عوامل محیطی از قبیل فشار، کشش و برش پیش‌بینی کند.

۲. روش مطالعه

با توجه به پیشرفت سریع علم و فناوری، شاخه‌های مختلف علوم از یکدیگر جدا شده‌اند. اما برای حل مسائل پیچیده در حوزه علم و فناوری، نیاز به دیدگاه‌های جامع‌تر از تسلط بر مفاهیم پایه وجود دارد . در هر مرحله‌ای از اکتشاف و تولید، هر متخصص باید از خواص سنگ و سیال یک میدان معین آگاه باشد، و این مهم تنها با درک فیزیک حاکم بر لایه‌های زیرین زمین، میسر می‌شود. بدینگونه می‌توان ذخایر را از لحاظ اقتصادی ارزیابی، و آن‌ها را برای فرآیندهای توسعه، سیلابزنی و بازیابی در آینده، مناسب ارزیابی کرد.

رویکرد مطالعاتی این پژوهش با توجه به عنوان و اهداف روش تحقیق؛ مروری بر تبیین جایگاه مطالعه فیزیک سنگ مخزن در مطالعات بالادستی صنعت نفت می‌باشد. این مطالعه یک ابزار مناسب برای مدل‌سازی دقیق‌تر زیرسطحی است. در واقع پلی میان خواص الاستیک (از قبیل نسبت سرعت امواج الاستیک، خصوصیات لرزه‌ای و مدول‌های الاستیک)، خواص مخزن (از قبیل تخلخل، اشباع و فشار) و ساختار مخزن (از قبیل لایه‌بندی‌ها و شکاف‌ها) ایجاد می‌کند [۶]. این پژوهش هم‌چنین امکان یک پیش‌بینی قابل اعتماد و دقیق از نمودارهای الاستیک و تطابق امواج لرزه‌ای را با تغییر شرایط مخزن فراهم می‌آورد. در حقیقت مطالعه انجام شده ابزار یکپارچه شدن روش‌های مختلف توصیف مخزن است یا به عبارت دیگر فیزیک سنگ مجموع فرآیندها و الگوریتم‌های اکتشاف را یکپارچه می‌کند و نقطه اتصال و ارتباط روش‌های گوناگون است [۷]. بنابراین مطالعات انجام شده در چند دهه اخیر به دنبال ایجاد روابطی بودند که ارتباط میان خواص مخزن و پاسخ‌های الاستیک اندازه‌گیری شده در سطح زمین، درون چاه یا آزمایشگاه را مشخص سازد. از همین‌رو با تکیه بر روش مطالعه مذکور به ابعاد تاثیر خصوصیات ذاتی و اکتسابی مخزن کربناته بر خواص الاستیک آن می‌پردازیم.

۳. نتایج و بحث

در این بخش بطور اجمالی به بررسی فاکتورهای محیطی و ذاتی موثر برروی خواص الاستیک مخازن کربناته پرداخته می‌شود و نتایج حاصل از مطالعات موردی انجام شده چند دهه اخیر بطور مفصل در هر بخش مورد بسط و تفسیر قرار می‌گردد.

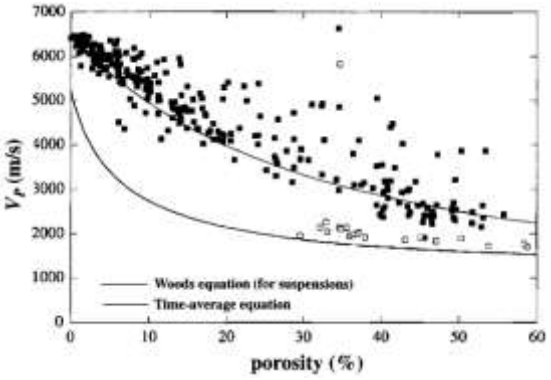
۳-۱. عوامل محیطی

۳-۱-۱. فشردگی یا تراکم حجمی

یکی از عواملی که تأثیر زیادی روی سرعت امواج لرزه‌ای دارد، تخلخل است، به طوری‌که با کاهش تخلخل سرعت امواج افزایش می‌یابد. فشار (تراکم مکانیکی) جزء عواملی است که روی تخلخل تأثیر به‌سزایی دارد. نتایج تحقیق بر روی نمونه‌های محیط کربناته Unda و Clino حوضه تختگاه باهاما[۴] نشان داد [۸] که با افزایش تراکم (کاهش تخلخل)، سرعت نیز با شیب ملایمی افزایش می‌یابد (شکل ۱). سرعت‌های نمونه‌های گل تنها اندکی بیش‌تر از سرعت در محیط‌های بدون تراکم و سخت‌شدگی است، معادله وود[۵] و لیندسی[۶] [۹]، که نشان می‌دهد کاهش تخلخل تنها به‌دلیل تراکم مکانیکی، تأثیر کمی بر روی سرعت موج تراکمی دارد. از سوی دیگر، کاهش تخلخل ناشی از فرآیندهای دیاژنزی، که سخت‌شدگی سنگ را افزایش می‌دهد، سرعت‌هایی بیش‌تر از آنچه که توسط معادله میانگین زمانی پیش‌بینی شده‌است، تولید می‌کند. در تخلخل‌های نزدیک به ۶۰ درصد، زمانی که رسوبات تقریباً عاری از فشردگی هستند، سرعت موج تراکمی

[۱] Bulk modulus
[۲] Compressiona velocity
[۳] Impedance
[۴] Bahama bank
[۵] Wood
[۶] Lindsay

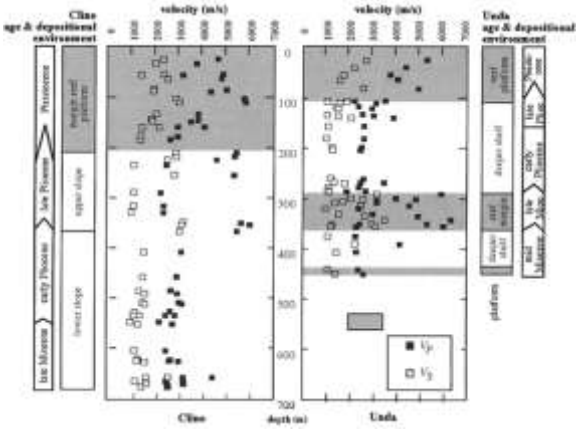
حدود ۱۷۰۰ متر بر ثانیه است و اندازه‌گیری سرعت موج برشی نیز امکان‌پذیر نیست. نمونه‌هایی که دارای حداقل ۱۰ تا ۱۵ درصد فشردگی هستند، قابلیت اندازه‌گیری سرعت موج برشی را دارند.



شکل (۱). نمودار سرعت موج تراکمی برحسب تخلخل، برای نمونه‌های کربناته [۸].

۳-۱-۲. عمق تدفین

بطور کلی سرعت موج برشی و تراکمی در مقابل عمق در سنگ‌های کربناته، تغییرات زیادی دارد، و در واقع سرعت تابعی از سن و عمق تدفین نیست. همان‌طور که در شکل (۲) مشاهده می‌شود، چند منطقه با الگوی کاهش سرعت در عمق‌های بالا مشاهده شده‌است، که ناشی از تأثیر فرآیندهای دیاژنزی در مقابل دیگر عوامل در نمونه‌های فشرده‌شده زیرسطحی است. این شکل، تغییرات V_P و V_S با عمق در نمونه‌های کربناته (در فشار مؤثر ۸ مگاپاسکال) نشان می‌دهد. رابطه معکوس بین سرعت و عمق در انتهای چاه به خوبی دیده می‌شود و نشان‌دهنده این مسئله است که تغییرات دیاژنزی و نوع رسوبات، تأثیرشان از عمق بیش‌تر است. سرعت در رسوبات کربناته و در محیط‌های آب‌دار سطحی (بخش‌هایی که با سایه مشخص شده‌اند)، تغییرات بیش‌تر و سرعت‌های بالاتری را نسبت به نمونه‌های عمیق‌تر نشان می‌دهند.



شکل (۲). مقایسه سرعت موج تراکمی و برشی در عمق‌ها و سن‌های مختلف در محیط کربناته Unda و Clino، [۸].

۳-۱-۳. فشار موثر

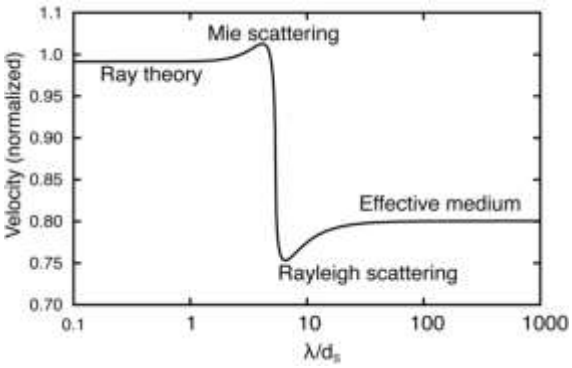
سرعت امواج در سنگ‌ها ناشی از عملکرد فشارهای مؤثر است، فشار مؤثر در واقع مقدار اختلاف بین فشار محدودکننده و فشار سیال منفذی است. تغییر خواص سیال منفذی، در فشارهای متفاوت، باعث تغییر مقدار فشار مؤثر می‌شود [۱۰]. از آنجایی که فشار روباره در یک مخزن تغییر نمی‌کند (یا تغییر بسیار کمی دارد)، اثر فشار خالص مخزن دقیقا عکس اثر فشار مخزن بر خواص لرزه‌ای است. خواص لرزه‌ای در تمام سنگ‌ها با افزایش فشار خالص مخزن افزایش می‌یابد، اما میزان چنین افزایشی به چندین عامل دیگر (شکل منافذ، تخلخل، سیالات منافذ، لیتولوژی و غیره) بستگی دارد، و تنها از طریق اندازه‌گیری می‌توان آن را کمی‌سازی کرد [۱۰]. به‌طور کلی در فشارهای کم، همه نمونه‌ها تغییرات افزایشی سرعت را با افزایش فشار مؤثر دارند، در نتیجه مرز دانه‌ها به هم نزدیک‌تر و منجر به تغییر در شکل حفرات و بسته‌شدن ریز شکستگی‌ها می‌شود، که این افزایش سرعت برای نمونه‌هایی که نامتراکم هستند، بیش‌تر است. نمونه‌هایی که سرعت ثابتی دارند، چگال هستند و در فشارهای بالا نیز تأثیرپذیری ناچیزی از فشار مؤثر دارند [۸ و ۱۱].

۳-۱-۴. مقیاس

زمان عبور امواج صوتی منتشرشونده در محیط ناهمگن، بستگی به نسبت مقیاس طول موج لرزه‌ای به مقیاس ناهمگنی زمین‌شناسی دارد. به طور کلی، زمانی که طول موج، λ، بلندتر از مقیاس ناهمگنی (لایه‌بندی)، a، باشد، سرعت اندازه‌گیری‌شده کم‌تر، و زمانی که طول موج کوتاه‌تر از مقیاس ناهمگنی باشد، سرعت اندازه‌گیری‌شده بیش‌تر است [۱۲].

شکل (۳) به صورت شماتیک وابستگی سرعت موج در محیط ناهمگن را به مقیاس ناهمگنی (لایه‌بندی) نشان می‌دهد. در طول موج‌های بسیار زیاد (طول موج لرزه‌ای و لایه‌بندی معمول سنگ مخزن)، سرعت میانگین یا «محیط مؤثر» وابسته به طبیعت لایه‌بندی و مسیری است که موج از درون سنگ عبور می‌کند. برای مثال، میانگین باکوس [۱۳] مدل مناسبی برای تخمین سرعت امواج تراکمی و برشی درون محیط با لایه‌بندی نازک است. با کاهش طول موج (افزایش فرکانس)، پاشش موج نیز افزایش می‌یابد. در ناحیه پراکندگی رایلی ($\lambda/d_s \approx 2\pi$)، سرعت یک کاهش ناگهانی را با افزایش فرکانس نشان می‌دهد؛ که به دنبال آن معمولاً یک افزایش بسیار زیاد و سریع در سرعت

به دلیل انتشار تشدیدشده ($\lambda \approx d_s$) مشاهده می‌شود (شکل ۳)، [۱۴ و ۱۵].



شکل (۳). وابستگی سرعت موج به مقیاس (یا فرکانس) به علت پاشش در محیط‌های ناهمگن؛ [۱۵].

۳-۲. عوامل ذاتی سنگ

۳-۲-۱. تخلخل و شکل منافذ

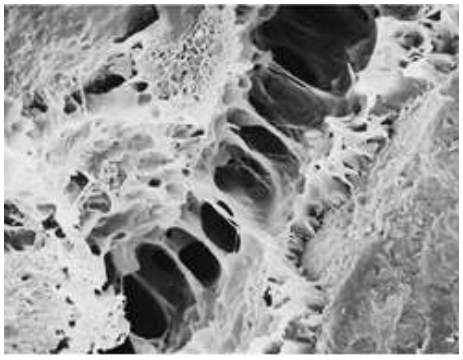
شناخت خواص لرزه‌ای کربنات‌ها نیاز به شناخت دقیق رابطه بین تخلخل و خواص کشسانی آن‌ها دارند. تخلخل اعم از تخلخل کل و تخلخل مؤثر، یک عامل اصلی در سرعت امواج صوتی می‌باشد و معمولاً با افزایش آن، کاهش می‌یابد [۳، ۴ و ۱۶]. زیرا وقتی موج صوتی ایجاد می‌شود، انرژی این موج از طریق ذرات محیط انتقال می‌یابد و به سمت جلو حرکت می‌کند. حال هرچه فاصله ذرات محیط از یک‌دیگر بیش‌تر باشد، انرژی موج دیرتر و کم‌تر منتقل می‌شود و موج با سرعت کم‌تری حرکت می‌کند. در تقسیم‌بندی ساختار جامد سنگ برخی خواص فیزیکی که اثرگذارند، عبارت‌اند از: نوع ذرات (کربناته یا غیرکربناته و انواع آن‌ها) ، مقدار نسبی ذرات و دانه‌های موجود، نحوه توزیع آن‌ها (تماس دانه به دانه نسبت به پخش‌شدگی ذرات در زمینه) و نوع زمینه (سیمان، گل میکرایتی و...). یک ویژگی بحرانی دیگر نیز، به خصوص در سنگ‌های کربناته، آرایش منافذ می‌باشد. به دلیل ناهمگنی بسیار زیاد موجود در این سنگ‌ها، توصیف و سرشت‌نمایی تخلخل یک فرآیند بسیار پیچیده است.

مشهورترین روابط میان تخلخل و سرعت در فیزیک سنگ، روابط میانگین زمانی هستند؛ که معروف‌ترین آن‌ها معادله قدیمی وایلی[۱] و همکاران [۱۷] است که با اندازه‌گیری سرعت در لایه‌های متناوب لوسیت و آلومینیم، برازش خوبی را برای رابطه میانگین زمانی به دست آوردند. روابط دقیق‌تر و مبتنی بر فیزیک سنگ نیز ارائه شدند که اغلب از سرعت، تخلخل و تراکم‌پذیری سیال استفاده می‌کنند و ساختار سنگ را نیز در نظر می‌گیرند. این مدل‌ها در سه دسته کلی مدل‌های تئوری، تجربی و ترکیبی قرار می‌گیرند.

پیشرفت مدل‌سازی فیزیک سنگ کربناته به شناخت دقیق سیستم تخلخل وابسته می‌باشد. بنابراین علاوه بر مقدار، نوع تخلخل نیز فاکتور مهمی در بررسی خواص فیزیک سنگی سنگ‌های کربناته می‌باشد. به طور کلی تخلخل‌های بیضی شکل و کروی مثل تخلخل قالبی، حفره‌ای و بین دانه‌ای سبب بالارفتن سرعت می‌شود و تخلخل‌های شکستگی و تخلخل‌های صفحه‌ای‌شکل میل دارند که سرعت را کاهش دهند.

۳-۲-۲. محتوای رس

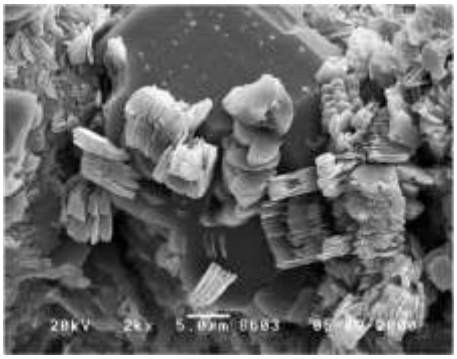
کانی‌های رسی فراوان‌ترین عناصر موجود در حوضه‌های رسوبی هستند. حضور آن‌ها در ترکیب سنگ‌ها، رفتار الاستیک سنگ‌ها را بسته به نوع کانی، حجم و نحوه توزیع رس، به طور چشم‌گیری تغییر می‌دهد. رفتار الاستیک کانی‌های رسی، در فیزیک سنگ نیز بسیار مورد توجه و اهمیت است؛ زیرا منجر به فهم دقیق‌تر پاسخ لرزه‌ای و نمودارهای صوتی، در توالی‌های شیلی و سنگ مخازن حاوی رس می‌شود. از مهمترین کانی‌های رسی مورد مطالعه شون[۲] [۱۸] کانی ایلیت و کادولینیت بوده است که با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) مورد مطالعه قرار گرفته‌اند (شکل‌های ۴و ۵).



شکل (۴). تصویر SEM از ایلیت رشته‌ای با مورفولوژی پل‌بندی در میان منافذ [۱۸].

[۱] Wyllie

[۲] Schön

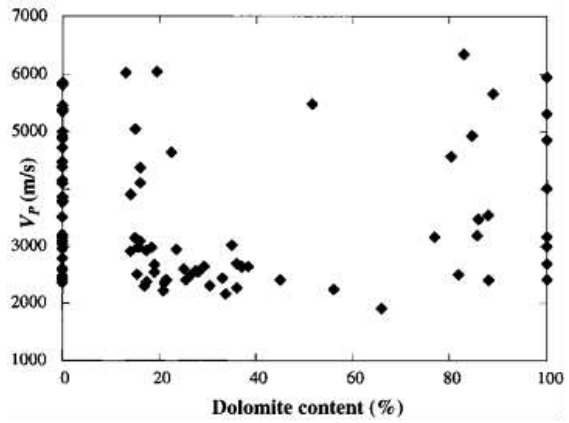


شکل (۵). تصویر SEM از ورقه‌های کائولینت با اتصال ضعیف به دانه [۱۸].

۳-۲-۳. کانی‌شناسی

با توجه به این‌که ترکیب شیمیایی کانی‌های عمده در سنگ‌های رسوبی تقریباً شبیه هم است، تأثیر زیادی روی تغییرات سرعت ندارد. سرعت موج طولی در کانی کلسیت ۶۵۰۰، در کانی دولومیت ۷۴۰۰ و در کانی آراگونیت ۵۸۰۰ متر بر ثانیه است. در سیلیکات‌ها به دلیل تنوع در کانی‌های تشکیل‌دهنده (مانند رس و انواع کوارتز)، کانی‌شناسی تأثیر زیادی روی سرعت دارد [۱۹]. در حالی که ترکیب کانی‌شناسی کربنات‌ها تأثیر مستقیم کمی بر روی سرعت دارد، اما فرآیندهایی که کانی‌شناسی را تغییر می‌دهند، مانند دولومیتی‌شدن، تأثیر زیادی دارند، زیرا بر روی تخلخل و نوع منافذ مؤثرند. دولومیتی‌شدن یک جایگزین متاسوماتیکی مهم است، که منیزیم را به کربنات‌کلسیم اضافه می‌کند و تشکیل کریستال‌های لوزی‌شکل می‌دهد. این فرآیند به دلیل وجود فضاهای بین لوزی‌ها و باقیمانده بقایای پوسته کلسیتی، فضای منافذ را بازآرایی و بزرگ می‌کند. فرآیند یا دولومیتی‌شدن کربنات‌های کلسیم یکی از فرآیندهای موثر بر کیفیت مخازن کربناته است، زیرا در طی این فرآیند به‌دلیل نقشی که در افزایش حجم فضاهای خالی و برقراری ارتباط هرچه بهتر بین این فضاها دارد، می‌تواند تراوایی رخساره‌ها افزایش دهد؛ یا به عبارت دیگر از آن‌جا که دولومیت به دلیل پایداری شیمیایی و مقاومت در برابر انحلال فشاری در حین تدفین، تخلخل و نفوذپذیری خود را بهتر از سنگ‌های آهکی حفظ می‌کند، غالب مخازن هیدروکربوری موجود در اعماق زیاد به افق‌های دولومیتی محدود می‌شود. هم‌چنین دولومیتی‌شدن و میزان آن، روی کیفیت مخزنی و افزایش و کاهش تخلخل نقش مؤثری ایفا می‌کند. بدین‌گونه که در طی این فرآیند تا زمانی که بنیان کریستالی آن به‌طور کامل انسجام نیافته است، قابلیت فشردگی و کاهش تخلخل را داراست و پس از آن‌که دولومیت و ساختار اتمی آن به‌طور کامل شکل گرفت، میزان تخلخل از این رو کم‌تر کاهش می‌یابد که چهارچوب دولومیتی رخساره سخت و تکمیل یافته است [۲۰].

شکل (۶) نشان می‌دهد که هیچ‌گونه رابطه و انطباقی بین سرعت موج تراکمی و محتوای دولومیت وجود ندارد. بنابراین دولومیت‌ها خود به‌تنهایی نمی‌توانند باعث تغییر در سرعت موج تراکمی بشوند، ولی نباید از تأثیر بافت‌های دولومیتی نیز غافل بود، مثلا دولومیت ساکاروزی (دانه‌شکری) باعث کاهش سرعت و یا سیمان دولومیتی باعث افزایش سرعت می‌شود، و دولومیتی‌شدن با بافت حفظ‌شده، نیز سرعت‌های بسیار زیادی را نتیجه می‌دهد. این نشان می‌دهد که اثر کانی‌شناسی بر روی سرعت، در این مورد کریستال با دولومیت بیش‌تر، در مقایسه با اثر تخلخل و بافت ناچیز است. سرعت، بیش‌تر به نوع دولومیت و در نتیجه به بافت، تخلخل و نوع منافذ مرتبط بستگی دارد [۸].



شکل (۶). نمودار سرعت در مقابل محتوای دولومیت در فشار مؤثر ۸ مگاپاسکال نمونه‌های کربناته [۸].

۳-۲-۴. بافت سنگ

سرعت امواج الاستیک در سنگ‌ها تابعی از خصوصیات بافتی است. تاندون و گوپتا[۱] [۲۱] در تحقیقی به مطالعه تأثیر پارامترهای بافتی بر میرایی امواج الاستیک و مقاومت فشاری نامحصور سنگ‌ها پرداخت. بدین منظور کمیتی بدون بعد به نام «ضریب بافت» معرفی شد که نماینده پارامترهای بافتی سنگ است. ویژگی‌های بافتی سنگ در قالب ابعاد دانه‌ها، شکل دانه‌ها، جهت‌یافتگی غالب دانه‌ها، جورشدگی دانه‌ها، درهم رفتگی، ارتباط بین دانه‌ها و ماتریکس در سنگ، مورد بررسی قرار گرفت. همه این پارامترها به نحوی با خصوصیات امواج الاستیک، مرتبط می‌شوند. نتایج این تحقیق نشان داد که با افزایش نسبت شکل، اندازه دانه‌ها و جهت‌یافتگی غالب، سرعت امواج افزایش می‌یابد

[۱] Tandon and Gupta

درحالی‌که با افزایش جورشدگی سرعت کاهش می‌یابد. از طرفی ضریب بافتی نسبتی معکوس با سرعت امواج دارد و هم‌چنین ارتباطی قوی بین ضریب بافتی و مقاومت فشاری محدودنشده وجود دارد. نسبت شکل دانه‌ها بیان‌گر این است که دانه‌ها در جهتی طویل‌تر از جهتی دیگر می‌باشند. با افزایش طویل‌شدگی دانه‌ها چون سطح تماس دو دانه مجاور هم کاهش می‌یابد، میرایی کاهش یافته و سرعت امواج بیش‌تر می‌شود. برای دانه‌های کروی این نسبت برابر یک فرض می‌شود [۲۱].

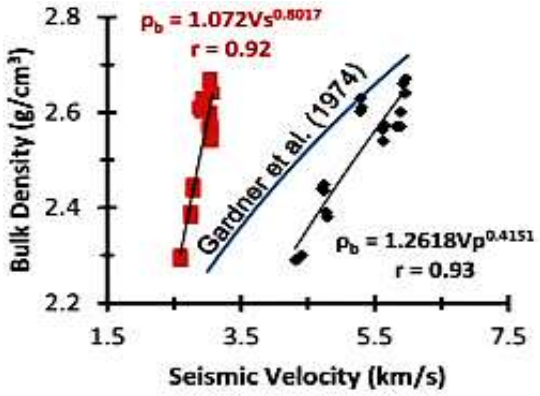
۳-۲-۵. چگالی

به طور کلی تحقیقات مختلف نشان داده است که رابطه مستقیمی بین سرعت امواج صوتی و چگالی وجود دارد. بدین معنا که با افزایش چگالی، سرعت امواج صوتی افزایش می‌یابد [۴، ۲۲، ۲۳ و ۲۴]. بهترین رابطه تقریبی برای برآورد سرعت از روی چگالی، رابطه گاردنر و همکاران [۲۵] است که برای اغلب لیتولوژی‌ها، با ضرایب متفاوت، مورد استفاده قرار می‌گیرد (معادله ۱).

معادله (۱): $\rho_p = aV_p^2 + bV_p + c$

در این رابطه، ρ چگالی برحسب گرم بر سانتی‌متر مکعب و V_p سرعت موج تراکمی بر حسب کیلومتر بر ثانیه می‌باشد. ضرایب a، b و c نیز ضرایب تجربی هستند که ماوکو[۱] و همکاران [۱۵] برای لیتولوژی‌های مختلف جمع‌آوری و ارائه کرده‌اند.

سوئته [۲] و همکاران [۱] با اندازه‌گیری خواص فیزیکی سنگ‌های تراورتنی دریافتند که رابطه مستقیمی بین سرعت امواج صوتی و چگالی وجود دارد. عبدل-ال[۳] و همکاران[۳] مطابق شکل (۷)، توابع توانی بین چگالی و سرعت امواج تراکمی (نقاط سیاه‌رنگ) و سرعت امواج برشی (نقاط قرمزرنگ) را برازش نمودند. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود، رابطه بین چگالی و سرعت امواج صوتی به صورت مستقیم است.



شکل (۷). رابطه چگالی با سرعت امواج تراکمی (نقاط سیاه‌رنگ) و سرعت امواج برشی (نقاط قرمزرنگ)؛ [۳].

۳-۲-۶. ترشوندگی

درک علل ترشوندگی نیازمند مطالعه‌ی ماهیت شیمیایی سیالات، قطبیت و وزن مولکولی ترکیبات هیدروکربنی و نیز فرآیندهای شیمیایی بین سطح جامد و سیال می‌باشد. در مطالعات نخستین عقیده بر این بود که تمام سازندهای نفتی، به دلیل تماس فاز آب به عنوان اولین سیال با سنگ مخزن، به شدت آب‌دوست هستند. بررسی‌های بعدی نشان دادند که بسیاری از مخازن نفت، آب‌دوست قوی نبوده و در آن مخازنی که نفت خام‌شان دارای مواد تأثیرگذار بر سطح دیواره‌ها، همچون آسفالتین و واکس که به آسانی توسط سطح جامد- مایع جذب می‌شوند، می‌باشند، دیواره‌ها می‌توانند به حالت نفت‌دوست تغییر یابند. تحقیقات دیگر گواه این هستند که خاصیت ترشوندگی سنگ مخزن ممکن است طیف وسیعی را بپوشاند. بطورکلی ترشوندگی سطوح کانی‌ها ممکن است نه تنها با تشکیل تک‌لایه‌هایی از ترکیبات قطبی فعال، تغییر یابد، بلکه لایه‌های قطورتری از مواد آلی که رسوب می‌کنند نیز در این تغییر مؤثرند.

وانگ[۴] و همکاران [۴] در بررسی خود بیان کردند که درجه ترشوندگی سنگ با سیال اشباع، ممکن است بر چگونگی انتشار موج مؤثر باشد. بطورکلی زمانی که سطح کاملاً ترشونده با سیال است، سطح تماس سیال- سنگ استاتیک است و تمایل به حفظ ساختار دارد، که در زمان انتشار موج درون سنگ اشباع، باعث اعمال یک نیروی برشی به سطح جامد می‌شود. در حالتی که سطح، ترشوندگی کم‌تری دارد، لغزش در سطح تماس سیال- سنگ رخ می‌دهد و این سطح در برابر (نیروی) برش مقاومت کم‌تری خواهد داشت. کاهش در مقاومت برشی در تمامی سطوح منافذ رخ می‌دهد و در کل مدول مؤثر برشی سنگ اشباع در مقیاس میکروسکوپی بیش‌تر از مقدار اندازه‌گیری شده محاسبه خواهد شد.

[۱] Mavko
[۲] Soete
[۳] Abd El-Aal
[۴] Wang

۴. جمع‌بندی و نتیجه گیری

بطور کلی هر حوضه رسوبی دارای خصوصیات ویژه‌ای از جمله خواص رسوب، تراکم، دیاژنز، تولید هیدروکربن و جریان سیال است، که علائم لرزه‌ای را تحت تأثیر قرار می‌دهد. در بررسی هر حوضه رسوبی مطالعه خواص ذاتی سنگ و عوامل محیطی بر پارامترهای الاستیک، یکی از مهم‌ترین روش‌های بررسی سنگ و سیالات مخزن است، که با ایجاد ارتباط میان آن‌ها، و صحت‌سنجی و ترکیب داده‌ها و نتایج حاصل، امکان پیش‌بینی دقیق رفتار الاستیک مخزن بر اثر تغییر شرایط حوضه فراهم می‌گردد.

عوامل مختلفی از جمله دیاژنز، تخلخل، ریزترک‌ها، کانی‌های رسی، مواد آلی و نوع ذرات سازنده سنگ بر رفتار مکانیکی سنگ آهک مؤثرند و از این‌رو تحلیل رفتار الاستیک فیزیک سنگی مخازن آهکی از پیچیدگی بالایی برخوردار است. بطورکلی با اشراف بر خصوصیات الاستیک مخزن، می‌توان برنامه‌های مطالعاتی در زمینه اکتشاف، بهره‌برداری و توسعه میادین را با ضریب اطمینان بالایی عملیاتی ساخته و از هدررفت هزینه‌های هنگفت حفاری‌های ناموفق جلوگیری نمود.

بنابراین، هدف این مطالعه ارائه شرح مفصلی از چگونگی تأثیر فرآیندهای رسوبی بر پارامترهای الاستیک سنگ‌ها و انواع رفتار لرزه‌ای بوده که منجر به گردآوری مطالبی کلی و مفید بر مبنای پژوهش‌های انجام شده اخیر، شده‌است، تا به درک بهتر و عمیق‌تری از چگونگی تأثیر زمین‌شناسی بر پاسخ‌های لرزه‌ای دست یابیم.

۵. مراجع

[1] Soete J, Kleipool LM, Claes H, Claes S, Hamaekers H, Kele S, Özkul M, Foubert A, Reijmer JJ, Swennen R. Acoustic properties in travertines and their relation to porosity and pore types. Marine and Petroleum Geology. 1; 59:320-35, Jun 2015.

[2] Sun Y, Lei C, Khan E, Chen SS, Tsang DC, Ok YS, Lin D, Feng Y, Li XD. Nanoscale zero-valent iron for metal/metalloid removal from model hydraulic fracturing wastewater. Chemosphere. 1; 176:315-23, June 2017.

[3] Abd el-aal AE, Al-Jeri F, Al-Enezi A, Parol J. Seismological aspects of the 15 November 2019 earthquake sequence, Kuwait. Arabian Journal of Geosciences. 13:1-3, Sep 2020.

[4] Wang H, Pan J, Wang S, Zhu H. Relationship between macro-fracture density, P-wave velocity, and permeability of coal. Journal of Applied Geophysics. 117:111-7, Jun 2015.

[5] Pang M, Ba J, Deng J, Müller TM, Saenger EH. Rock-Physics Template Based on Differential Diagenesis for the Characterization of Shale Gas Reservoirs. Arabian Journal for Science and Engineering. 47: 677-693, Jan 2023.

[6] Kadyrova R, Nurgalieva D, Saenger EH, Balcewicz M, Minebaeve R, Statsenkoa E, Glukhovan M, Nizamova A Galiullina B. Digital rock physics: Defining the reservoir properties on drill cuttings, Journal of Petroleum Science and Engineering, 210: 110063, Mar 2022.

[7] Markov M, Kazatchenko E, Mousatov A, Pervago E. Novel approach for simulating the elastic properties of porous rocks including the critical porosity phenomena. Geophysics. 1; 78(4): 37-44, Jul 2013.

[8] Anselmetti FS, Eberli GP. The velocity-deviation log: a tool to predict pore type and permeability trends in carbonate drill holes from sonic and porosity or density logs. AAPG bulletin. 1; 83(3):450-66, Mar 1999.

[9] Wood AW, Lindsay RB. A textbook of sound: McMillan Co. New York. 1955.

[10] Coyner, Karl B. "Effects of stress, pore pressure, and pore fluids on bulk strain, velocity, and permeability in rocks." PhD diss., Massachusetts Institute of Technology, 1984.

[11] Wang Z, Wang H, Cates ME. Effective elastic properties of solid clays. Geophysics. 66(2):428-40, Mar 2001.

[12] Mukerji T, Berryman J, Mavko G, Berge P. Differential effective medium modeling of rock elastic moduli with critical porosity constraints. Geophysical Research Letters. 1; 22(5):555-8, Mar 1995.

[13] Backus GE. Long-wave elastic anisotropy produced by horizontal layering. Journal of Geophysical Research. 67(11):4427-40, Oct 1962.

[14] Simm R, Bacon M. Seismic amplitude: An interpreter's handbook. Cambridge university press; 17 p, Apr 2014.

[15] Mavko G, Mukerji T, Dvorkin J. The rock physics handbook. Cambridge university press; 9 p, Jan 2020.

[16] Hamada G, Joseph V. Developed correlations between sound wave velocity and porosity, permeability and mechanical properties of sandstone core samples. Petroleum Research. 1;5(4):326-38, Dec 2020.

[17] Wyllie MR, Gregory AR, Gardner LW. Elastic wave velocities in heterogeneous and porous media. Geophysics.; 21(1):41-70, Jan 1956.

[18] Schön JH. Rocks—Their Classification and General Properties. In Developments in petroleum science. 65:1-19, Jan 2015.

[19] Christensen NI, Szymanski DL. Seismic properties and the origin of reflectivity from a classic Paleozoic sedimentary sequence, Valley and Ridge province, southern Appalachians. Geological Society of America Bulletin. 1;103 (2):277-89, Feb 1991.

[20] Moore CH, Wade WJ. Carbonate reservoirs: Porosity and diagenesis in a sequence stratigraphic framework. Newnes; 12 p, Aug 2013.

[21] Tandon RS, Gupta V. The control of mineral constituents and textural characteristics on the petrophysical & mechanical (PM) properties of different rocks of the Himalaya. Engineering Geology. 8; 153:125-43, Feb 2013.

[22] Louis L, Chen TM, David C, Robion P, Wong TF, Song SR. Anisotropy of magnetic susceptibility and P-wave velocity in core samples from the Taiwan Chelungpu-Fault Drilling Project (TCDP). Journal of Structural Geology. 1; 30(8):948-62, Aug 2008.

[23] Khandelwal M, Singh TN. Correlating static properties of coal measures rocks with P-wave velocity. International Journal of Coal Geology. 1; 79(1-2):55-60, Jul 2009.

[24] Rabbel W, Kaban M, Tesauro M. Contrasts of seismic velocity, density and strength across the Moho. Tectonophysics. 8; 609:437-55, Dec 2013.

[25] Gardner GH, Gardner LW, Gregory A. Formation velocity and density—The diagnostic basics for stratigraphic traps. Geophysics. 39(6): 770-80, Dec 1974.