

## مدل‌سازی معکوس با استفاده از روابط کاستر و توکسوز جهت تخمین درصد حفره ها و نوع آن‌ها در سنگ‌های کربناته

اصغر نادری<sup>۱\*</sup>، مصطفی حیدری<sup>۱</sup>، ایرج مداحی<sup>۱</sup>، ناصر کشاورز فرج خواه<sup>۲</sup>

۱- کارشناس ارشد پژوهشگاه صنعت نفت [naderia@ripi.ir](mailto:naderia@ripi.ir)

۲- عضو هیئت علمی پژوهشگاه صنعت نفت

### چکیده

اصلی‌ترین پارامتر در مطالعات لرزه‌ای، سرعت امواج لرزه‌ای می‌باشد. این پارامترها تحت تأثیر عواملی مختلفی مانند خواص سنگ (تراکم، سن، سنگ شناسی، تخلخل، شکل حفره ها و ...)، خواص سیال (ویسکوزیته، چگالی، نوع سیال، درصد اشباع و ... ) و محیط (تاریخچه تنش، محیط رسوب گذاری، تاریخچه تولید، دما، فشار و ...) قرار دارند. با شناخت، مطالعه و بررسی رابطه بین سرعت‌های لرزه ای و این پارامترها می‌توان از داده‌های لرزه‌ای خواص سنگ، سیال و محیط را بدست آورد. عامل اصلی مؤثر در این پارامترها، تخلخل و فضاهای خالی می‌باشد. مطالعات زیادی در بدست آوردن و شناخت این روابط صورت گرفته اما بیشتر معادلات تئوری تغییرات بوجود آمده در خواص لرزه‌ای در نتیجه نوع فضاهای خالی را در نظر نمی‌گیرند. لذا در نتیجه وارون لرزه‌ای،  $AVO$  و محاسبه حجم حفره ها که بر اساس این معادلات پایه گذاری شده‌اند، در معرض عدم قطعیت‌های زیادی هستند. یکی از روابط ارائه شده، روابط کاستر - توکسوز است که می‌تواند چندین فاکتور و عوامل مؤثر مانند تخلخل، کانی شناسی، نوع حفره و سیال حفره را در محاسبات بکار گیرد. در این تحقیق سعی شده که با کمک این روابط و مدل سازی معکوس، با استفاده از داده‌های چاه‌های شکل، نوع و درصد فضاهای خالی را در سه چاه، تخمین زده شوند. در چاه‌های میدان مورد مطالعه بیشترین درصد شکل حفره ها به ترتیب مربوط به، اشکال کروی و ترک بودند.

کلید واژه‌ها: سرعت‌های لرزه‌ای، تخلخل، فضاهای خالی و شکل آن‌ها

## ۱. مقدمه

اگرچه بیش از نصف مخازن دنیا را سنگ‌های کربناته تشکیل می‌دهند ولی نتایج منتشر شده درباره خواص صوتی آن کم است. دلیل آن، این است که تکنیک اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی مرسوم معمولاً مناسب سنگ‌های کربناته نمی‌باشند. چرا که مسائلی مانند ناهمگنی، روابط پیچیده تخلخل و سرعت، جذب بالای امواج آلتراسونیک در کربنات‌ها نیز موثر هستند.

توسعه و بدست آوردن یک مدل فیزیک سنگی برای کربنات‌ها به دلیل سیستم فضاهای خالی موجود در آن‌ها بسیار مشکل است. سنگ‌های آواری عمدتاً فضاهای خالی بین دانه‌ای نسبتاً ساده‌ای دارند ولی کربنات‌ها انواع فضاهای خالی مانند مولدیک، واگی، بین ذره‌ای و بین دانه‌ای را دارند و پیچیدگی فضاهای خالی باعث پراکندگی رابطه بین سرعت و تخلخل می‌شود. نتایج تحقیقات آزمایشگاهی و تجربی نشان می‌دهند که نوع حفره می‌تواند باعث تغییر سرعت موج تراکمی در یک تخلخل مشخص تا ۴۰ درصد شود. شکل حفره یک فاکتور مهم در فیزیک سنگ، سنگ‌های کربناته می‌باشد. معمولاً در سنگ‌هایی که، فضاهای خالی عمدتاً مولدیک، بین فریم<sup>۱</sup> و واگی<sup>۲</sup> است، سرعت بیشتر از حالتی است که فضاهای خالی بین ذره‌ای می‌باشند.

فرایندهای سیمانی شدن و انحلال در سنگ‌های کربناته بطور پیوسته باعث ایجاد و یا از بین رفتن تخلخل می‌شوند و در مواردی موجب تغییر کانی‌شناسی از آراگونایت/کلسیت به دولومیت سنگ شده و یا توزیع حفره‌ها را در سنگ برعکس می‌کند یعنی دانه‌های اصلی حل شده و تخلخل ایجاد می‌نمایند و فضاهای حفره‌ای اصلی سیمانی شده و دانه‌ها را تشکیل می‌دهند.

تمام این تغییرات، خواص الاستیکی سنگ و در نتیجه سرعت صوتی<sup>۳</sup> را تغییر می‌دهند. نتیجه این فرایندها، افزایش وسعت دامنه تغییرات سرعت‌های صوتی در سنگ‌های کربناته است بطوری که در این نوع سنگ‌ها سرعت موج تراکمی از ۱۷۰۰ تا ۶۰۰۰ متر بر ثانیه و سرعت موج برشی از ۶۰۰ تا ۳۵۰۰ متر بر ثانیه تغییر می‌کند.

عامل اصلی مؤثر در سرعت امواج لرزه‌ای سنگ‌ها، تخلخل است. بیشتر معادلات تئوری‌های موجود، نقش فضاهای خالی در تغییرات خواص الاستیک را در نظر نمی‌گیرند. در نتیجه وارون لرزه‌ای، AVO و محاسبه حجم حفره‌ها که بر اساس این معادلات پایه گذاری شده‌اند، در معرض عدم قطعیت‌های زیادی هستند.

مطالعات زیادی در زمینه تغییرات پارامترهای الاستیکی سنگ (سرعت‌های لرزه‌ای) در کربنات‌ها انجام شده که می‌توان به ورور<sup>۴</sup> و همکاران (۱ و ۴)، گریگور<sup>۵</sup> و همکاران (۶)، کیز<sup>۶</sup> و همکاران (۳) و پلاتیر<sup>۷</sup> و همکاران (۵) اشاره کرد.

<sup>1</sup> interframe

<sup>2</sup> Vuggy

<sup>3</sup> Sonic velocity

<sup>4</sup> Verwer K

<sup>5</sup> Gregor T.

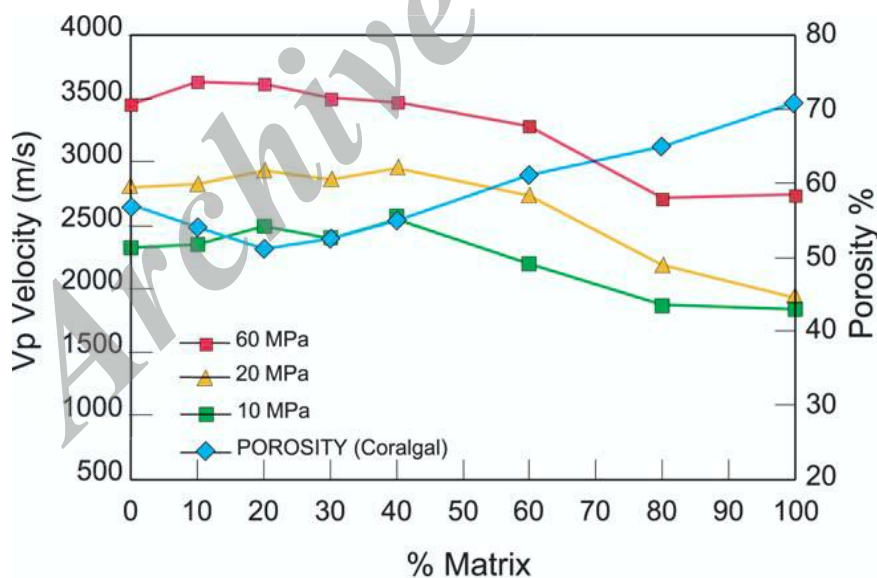
<sup>6</sup> Keys R

<sup>7</sup> Pelletier H.

## ۲. سرعت صوت در رسوبات کربناته

در رسوبات سست کربناته اندازه و شکل دانه‌ها، جورشدگی و نسبت دانه/ماتریکس بر روی سرعت صوتی تأثیر می‌گذارند. گل کربناته خالص دارای تخلخل متوسط ۶۰ درصد و  $V_p$  حدود ۱۷۰۰ متر بر ثانیه است. تحت فشار ۱۷۰ مگاپاسکال، تخلخل به ۲۹ درصد کاهش یافته و  $V_p$  به ۲۲۵۰ متر بر ثانیه افزایش می‌یابد در حالیکه  $V_s$  بین ۹۰۰-۱۲۰۰ متر بر ثانیه است. این نمونه‌ها دارای مدول برشی کوچک هستند، در نتیجه رفتاری شبیه مواد غیر صلب (مایعات) دارند. ماسه کربناته (دانه‌های اووئید و اسکلت) مقادیر  $V_p$  تقریباً ثابتی را نشان می‌دهند (۲۱۰۰-۲۴۰۰ متر بر ثانیه در فشار محدود کننده ۱۰ مگاپاسکال و ۳۵۰۰-۳۷۰۰ متر بر ثانیه در فشار ۸۰ مگاپاسکال). این دو عضو نهایی (گل و دانه) با هم مخلوط شده و کربنات‌های مختلف را می‌سازند. از جمله، مادستون (کمتر از ۱۰ درصد دانه)، وکستون (بیش از ۱۰ درصد دانه)، پکستون (بیشتر دانه) و گرینستون (بدون گل).

گریگور، ابرلی و بچلی<sup>۱</sup>، در سال ۲۰۰۳ آزمایش‌هایی بر روی نمونه‌های ساخته شده از ترکیب گل و دانه‌های کربناته انجام دادند، تا تأثیر نسبت ماتریکس/دانه را روی سرعت در فشارهای مختلف اندازه‌گیری نمایند. در آزمایش‌های آن‌ها دو نوع دانه، یکی دانه‌های گرد ۰/۳۷۵ میلیمتری و دیگری دانه‌های اسکلتی (پلاتی کراگال) ۰/۵۰۰ میلیمتری استفاده شدند و قسمت دانه ریز، گل لاگونی ۶۴ میکرونی بود. بدین ترتیب نمونه‌های مختلف رسوبات کربناته از مادستون تا ماسه‌های کربناته را تهیه کردند. تخلخل با افزایش گل ابتدا کاهش یافته و سپس افزایش می‌یابد. این نقطه برعکس شدن روند تخلخل در ۱۰ درصد اووئید و ۲۰ درصد اسکلت اتفاق می‌افتد. با افزایش ماتریکس، تخلخل افزایش یافته تا در نهایت به تخلخل طبیعی ماتریکس می‌رسد (شکل ۱).



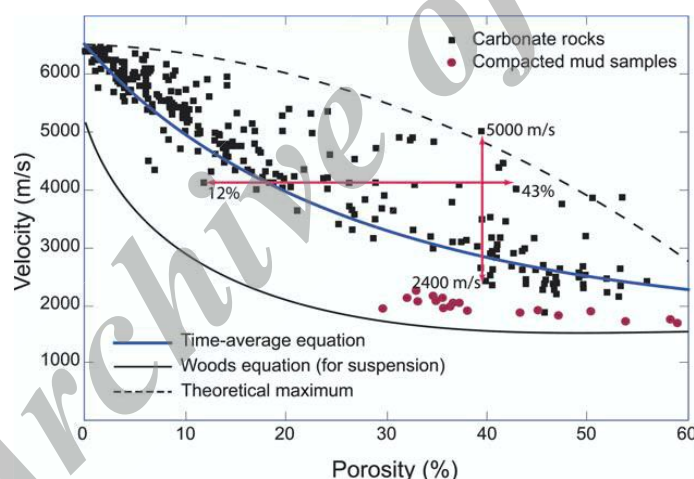
شکل ۱ ماتریکس در برابر سرعت و تخلخل مخلوط‌هایی از گل/دانه. ماتریکس از جنس گل است. تخلخل ابتدا با افزایش ماتریکس کاهش می‌یابد ولی پس از افزایش ۲۰ درصد گل: افزایش می‌یابد. سرعت بصورت عکس عمل می‌کند و ابتدا افزایش یافته و پس از افزایش ۴۰ درصد گل کاهش می‌یابد (Gregor P. Eberli G., Gregor T Bachle).

<sup>1</sup> Eberli and Baechle

افزایش اولیه ماتریکس از ۰ تا ۲۰ درصد در تمام فشارها باعث افزایش سرعت اکوستیکی می‌شود و این افزایش سرعت با کاهش تخلخل همراه است. روند معکوس با افزایش بیشتر ماتریکس دانه ریز شروع می‌شود. برای مخلوط مربوط به دانه‌های اووئیدی، سرعت در ۴۰ درصد ماتریکس شروع به کاهش می‌کند، در حالیکه برای مخلوط مربوط به دانه‌های اسکلتی سرعت در بیش از ۵۰ درصد شروع به کاهش می‌کند. تفاوت بین این دو سری داده نشان می‌دهد که شکل دانه و نسبت قطر دانه به ماتریکس در تغییرات پوروالاستیکی<sup>۱</sup> و تخلخل بحرانی<sup>۲</sup> در سنگ‌های کربناته مهم هستند.

### ۳. تخلخل و نوع حفره

از عوامل مهم کنترل کننده در سرعت امواج لرزه‌ای اندازه تخلخل سنگ است. شکل ۲ به خوبی رابطه بین تخلخل و سرعت را نشان می‌دهد. با این حال، مقادیر اندازه‌گیری شده، پراکندگی خاصی را حول این روند معکوس نشان می‌دهند. تفاوت سرعت‌ها در تخلخل‌های یکسان مخصوصاً در تخلخل‌های بالا می‌تواند بیش از ۲۵۰۰ متر بر ثانیه باشد. به عنوان مثال، سنگ‌های با تخلخل ۳۹ درصد می‌توانند سرعت‌های بین ۲۴۰۰ تا ۵۰۰۰ متر بر ثانیه داشته باشند. حتی در تخلخل‌های زیر ۱۰ درصد هم سرعت‌ها می‌توانند حدود ۲۰۰۰ متر بر ثانیه تفاوت داشته باشند که این مقدار تفاوت برای سنگ‌هایی که دارای ترکیب شیمیایی و تخلخل یکسان هستند، بسیار زیاد است. علاوه بر این، تخلخل سنگ‌های هم سرعت نیز می‌تواند مقادیر متفاوتی داشته باشد.



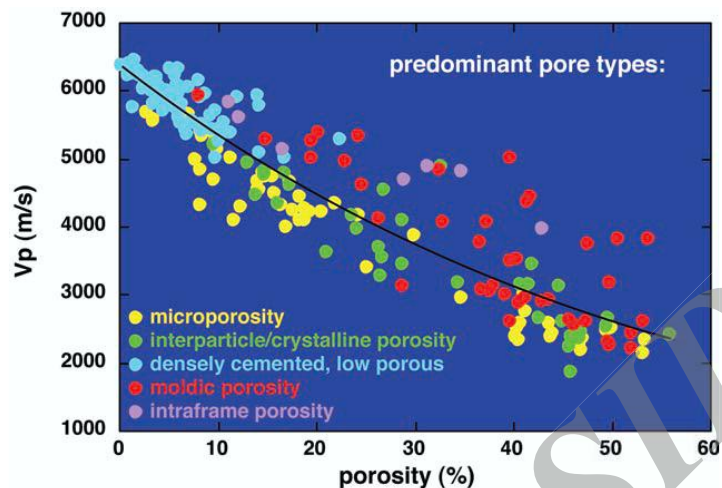
شکل ۲ نمودار  $V_p$  و تخلخل نمونه‌های کربناته خالص در مقایسه با معادلات متوسط زمانی و Woods. سرعت‌های نمونه‌های گل متراکم شده تنها کمی از معادله Woods بیشترند و این نشان دهنده این است که این نمونه‌ها هیچ سفتی ای (rigidity) ندارند و آن تراکم تاثیر جزئی روی  $V_p$  دارد. نمونه‌های کربناته دیاژنز شده رابطه معکوس سرعت-تخلخل را نشان می‌دهند ولی پراکندگی شدیدی از سرعت‌ها در تخلخل‌های یکسان و هم‌بند تخلخل‌های متنوع در سرعت‌های یکسان دیده می‌شود. این پراکندگی مقادیر، خطاهای زیادی را وارد وارون لرزه نگاری می‌کند (Gregor P. Eberli G., Gregor T Bachle).

برای نمونه، سنگ‌های با سرعت ۴۱۰۰ متر بر ثانیه می‌توانند تخلخل‌های ۱۲ تا ۴۳ درصد داشته باشند. روابط پیچیده بین سرعت و تخلخل در سنگ‌های کربناته از قابلیت کربنات‌ها برای تشکیل سیمان‌ها و چارچوب‌های مخصوص و نوع حفره‌ها ناشی می‌شود که می‌تواند خواص الاستیکی سنگ را بدون نیاز به پر کردن تمام حفره‌ها بهبود بخشد. اهمیت نوع حفره‌ها در

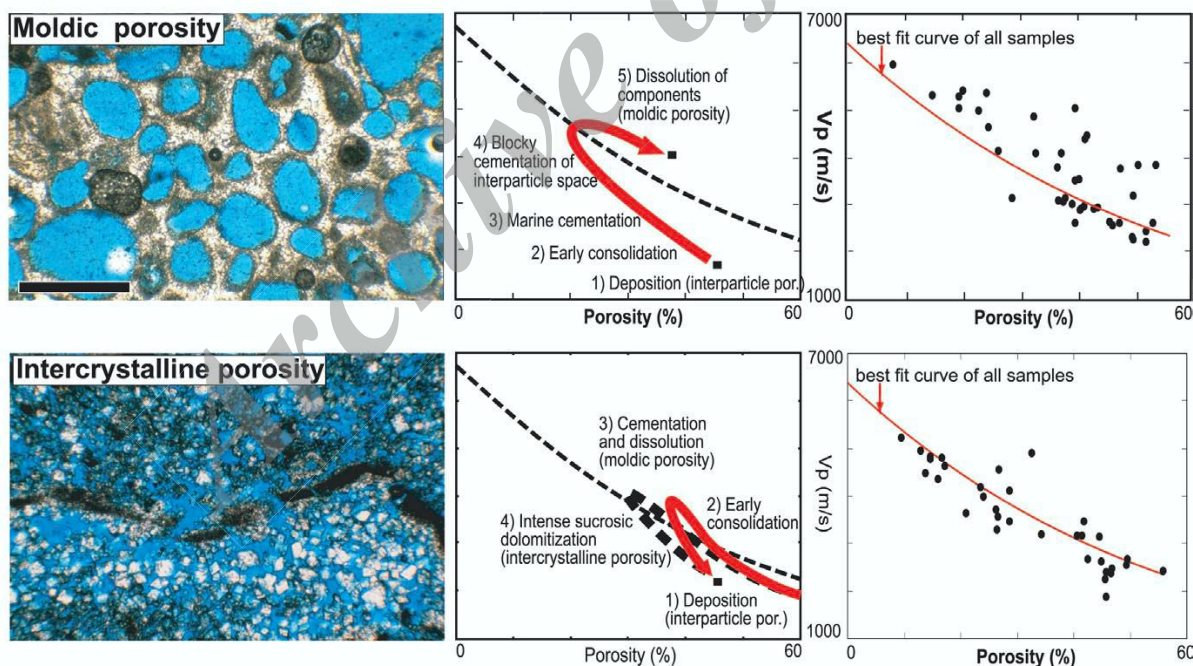
<sup>1</sup> Poroelastic properties

<sup>2</sup> Critical porosity

خواص الاستیکی و در نتیجه سرعت در شکل ۳ نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، انواع مختلف حفره‌ها در نمودار سرعت-تخلخل تشکیل دسته‌های مختلفی می‌دهند. این الگو، مشخصه هر گروه با نوع حفره، توضیح دهنده این مطلب است که چرا سنگ‌های با تخلخل یکسان، سرعت‌های متفاوت دارند.



شکل ۳ نمودار سرعت (در فشار موثر ۸ مگاپاسکال) در برابر تخلخل مربوط به انواع شکل حفره‌ها کرنات‌ها یا بهترین منحنی نمایی برازش شده به داده‌ها. انواع حفره‌ها نقاط مربوط به سرعت-تخلخل را کلاستر بندی می‌کنند و این نشان دهنده تاثیر نوع تخلخل بر خواص الاستیک سنگ‌هاست (Gregor P. Eberli G., Gregor T Bachle).

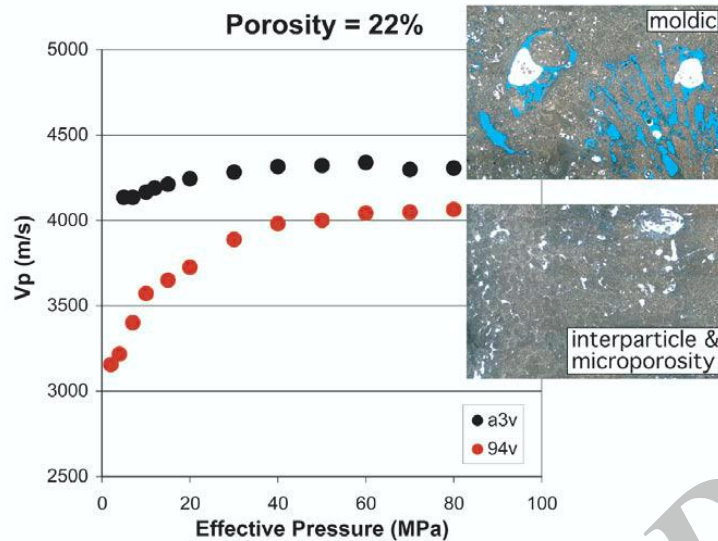


شکل ۴ مثال‌هایی از دو نوع حفره غالب با رفتارهای الاستیکی متفاوت. سنگ‌های قالبی از انحلال دانه‌ها و رسوب سیمان و تشکیل یک ساختار محکم ایجاد می‌شوند. در نتیجه، این سنگ‌ها نسبت به تخلخل‌شان دارای سرعت بالایی هستند. در مقایسه، دولومیتی شدن دانه شکر باعث ایجاد تخلخل بین کریستالی و سفتی و سرعت کم می‌شود (Gregor P. Eberli G., Gregor T Bachle).

این تفاوت‌ها در روابط تخلخل-سرعت در سنگ‌های کربناته نشان می‌دهند که تنها میزان تخلخل در تعیین سرعت مهم نیست، بلکه نوع حفره‌ها نیز عامل تعیین کننده می‌باشند. بیشترین تفاوت سرعت مشاهده شده در تخلخل‌های برابر بین سنگ‌های با تخلخل قالبی درشت و تخلخل بین دانه‌ای است. سنگ‌های با تخلخل قالبی دارای ۴۰ تا ۵۰ درصد تخلخل نمی‌توانند سرعت  $V_p$  تا ۵۰۰۰ متر بر ثانیه داشته باشند. در حالیکه سنگ‌های با تخلخل بین دانه‌ای یا ریز تخلخل، سرعت‌های کمتر از ۲۵۰۰ متر بر ثانیه دارند (شکل ۳ و شکل ۴). تغییرات سرعت ناشی از نوع حفره‌ها با افزایش فشار به قوت خود باقی است به‌طوری‌که سنگ‌های قالبی یا میان ساختاری دارای سرعت‌های بالا و رابطه مستقیم افزایش سرعت با افزایش فشار بر آن‌ها حاکم هست. در سنگ‌های ریز تخلخل و بین کریستالی سرعت کم بوده و با افزایش فشار افزایش سریع می‌یابد، ولی هیچ‌گاه به سرعت سنگ‌های قالبی یا میان ساختاری نمی‌رسد (شکل ۵). رابطه پیچیده تخلخل-سرعت، نشان می‌دهد که تغییر امیدانس می‌تواند بدون اینکه تفاوت تخلخل بین دو لایه وجود داشته باشد ایجاد شود. برعکس، دو لایه با تخلخل‌های متفاوت می‌توانند سرعت‌ها و امیدانس‌های بسیار شبیه به هم داشته باشند و هیچ‌گونه بازتابی مشاهده نگردد. نتایج تحقیقات صورت گرفته نشان داد که نوع و شکل حفره‌ها نقش مهمی در سرعت امواج لرزه‌ای دارند به همین دلیل درجه اعتبار معادله گاسمن در سنگ‌های کربناته نامشخص بوده و توسعه یک مدل فیزیک سنگ برای این نوع سنگ‌ها نیز بسیار مشکل به نظر می‌رسد. مدل‌های فیزیک سنگ تجربی به‌صورت گسترده- به دلیل ساده‌گی استفاده آن‌ها - در صنعت کاربرد پیدا کرده‌اند، این مدل‌ها نوعاً یک رابطه خطی بین تخلخل و سرعت‌های لرزه‌ای فرض می‌کنند و اغلب، یک رابطه خوب بین یک خصوصیت فیزیکی مانند نفوذپذیری و سرعت امواج به دست می‌آورند و در این حالت نفوذپذیری یک فاکتور مهم در کنترل سرعت در نظر گرفته می‌شود، در حالی که سرعت به شدت توسط تخلخل کنترل می‌شود. در نهایت می‌توان گفت که روابط تجربی تعداد بسیار محدودی از فاکتورها (معمولاً کمتر از سه فاکتور) را می‌توانند در نظر بگیرند.

مدل‌های **inclusion based** مانند مدل کاستر - توکسوز (۱۹۷۴) می‌تواند چندین فاکتور و عوامل موثر، مانند تخلخل، کانی شناسی، نوع حفره و سیال حفره را شامل شود. از آنجایی که شکل فضاهای خالی تأثیر زیادی روی مدول‌های الاستیکی و در نتیجه روی سرعت امواج می‌گذارد، لذا در این تحقیق سعی شده است پس از معرفی مختصر رابطه کاستر و توکسوز، با کمک مدل مذکور درصد و نوع حفره‌ها را در سنگ‌های کربناته با بکار بردن داده‌های چاهی محاسبه کنیم. در ادامه مراحل انجام کار، نتایج تخمین، محاسبه نوع و درصد حفره‌ها و فضاهای خالی بدست آورده شده است.





شکل ۵ مقایسه سنگ‌های با ۲۲ درصد تخلخل ولی نوع حفره‌ها متفاوت. نمونه دارای تخلخل قالبی دارای سرعت اولیه زیاد است که با افزایش فشار تنها به میزان کمی افزایش پیدا می‌کند. در مقابل، نمونه دارای تخلخل درون ذره‌ای و ریز تخلخل دارای سرعت اولیه کم و افزایش قابل توجه سرعت با اعمال فشار است ولی هیچ‌گاه به سرعت تخلخل قالبی نمی‌رسد. این امر نشان می‌دهد که تفاوت سرعت‌ها در نتیجه تفاوت نوع حفره‌ها در زیر زمین هم وجود دارد.

#### ۴. رابطه کاستر - توکسوز

مدلی که کاستر - توکسوز (۱۹۷۴) برای محاسبه مدول‌های الاستیکی براساس شکل فضاهای خالی سنگ (ضریب نسبت<sup>۱</sup>) ارائه کردند، بصورت زیر است.

$$(K_{KT}^* - K_m) \frac{\left(K_m + \frac{4}{3}\mu_m\right)}{\left(K_{KT}^* + \frac{4}{3}\mu_m\right)} = \sum_{i=1}^N x_i (K_i - K_m) P^{mi}$$

$$(\mu_{KT}^* - \mu_m) \frac{(\mu_m + \zeta_m)}{(\mu_{KT}^* + \zeta_m)} = \sum_{i=1}^N x_i (\mu_i - \mu_m) Q^{mi}$$

$K_{KT}^*$  و  $\mu_{KT}^*$  مدول‌های الاستیکی مؤثر با شکل فضاهای خالی،  $K_m$  و  $\mu_m$  مدول‌های الاستیکی ماتریکس سنگ،  $K_i$

$$\zeta = \frac{\mu(9K + 8\mu)}{6(K + 2\mu)}$$

مدول بالک آمین سیال درون فضای خالی و

ضرائب  $P^{mi}$  و  $Q^{mi}$  تأثیر آمین سیال درون محیط  $m$  را نشان می‌دهند و در جدول ۱ آورده شده‌اند.

<sup>1</sup> aspect ratio

جدول ۱ ضرایب P, Q برای برخی شکل‌های خاص زیرنویس‌های i, m به ترتیب، به سیال درون سنگ و مواد زمینه آن اشاره دارد.

Inclusion Shape	$P^{mi}$	$Q^{mi}$
Spheres	$\frac{K_m + \frac{4}{3}\mu_m}{K_i + \frac{4}{3}\mu_m}$	$\frac{\mu_m + \zeta_m}{\mu_i + \zeta_m}$
Needles	$\frac{K_m + \mu_m + \frac{1}{3}\mu_i}{K_i + \mu_m + \frac{1}{3}\mu_i}$	$\frac{1}{5} \left( \frac{4\mu_m}{\mu_m + \mu_i} + 2 \frac{\mu_m + \gamma_m}{\mu_i + \gamma_m} + \frac{K_m + \frac{4}{3}\mu_m}{K_i + \mu_m + \frac{1}{3}\mu_i} \right)$
Disks	$\frac{K_m + \frac{4}{3}\mu_i}{K_i + \frac{4}{3}\mu_i}$	$\frac{\mu_m + \zeta_i}{\mu_i + \zeta_i}$
Penny Cracks	$\frac{K_m + \frac{4}{3}\mu_i}{K_i + \frac{4}{3}\mu_i + \pi\alpha\beta_m}$	$\frac{1}{5} \left( 1 + \frac{8\mu_m}{4\mu_i + \pi\alpha(\mu_m + 2\beta_m)} + 2 \frac{K_i + \frac{2}{3}(\mu_i + \mu_m)}{K_i + \frac{4}{3}\mu_i + \pi\alpha\beta_m} \right)$

$$\beta = \mu \frac{(3K + \mu)}{(3K + 4\mu)} \quad \gamma = \mu \frac{(3K + \mu)}{(3K + \mu)} \quad \gamma = \frac{\mu(9K + 8\mu)}{6(K + 2\mu)}$$

### ۵. برآورد سرعت موج عرضی با کمک روابط تجربی

به دلیل عدم برداشت نمودار مربوط به سرعت موج عرضی در چاه‌های میدان مورد مطالعه و به دلیل نیازمندی این تحقیق، اطلاعات موج برشی با کمک روابط تجربی ارائه شده توسط گاستاگنا و همکاران (۱۹۹۳) و مدل ارائه شده توسط پژوهش-گران پژوهشگاه صنعت نفت محاسبه شدند.

### ۶. روش کار

در این مطالعه سه نوع شکل فضای خالی در نظر گرفته شده است: کروی، سوزنی و ریزشکستگی. روش کار به این صورت است که:

الف) ورود اطلاعات مورد نیاز برای مدل‌سازی پتروفیزیکی ابتدا یک چاه که حاوی اطلاعات کافی باشد انتخاب می‌شود. این اطلاعات شامل نگارهای تخلخل، صوتی، چگالی و کانی شناسی است.

اطلاعات مربوط به محدوده مخزنی مورد نظر استخراج می‌شود.

نگار سرعت موج فشاری از نگار صوتی محاسبه می‌گردد (Vp).

نگار سرعت موج برشی از فرمول‌های تجربی محاسبه می‌گردد (Vs).

نگار مدول فشاری و برشی از نگارهای حاصل استخراج می‌گردد (Ksat,  $\mu_{sat}$ ).



نگار مدول فشاری و برشی ماتریکس از نگار کانی شناسی و جداول مرجع محاسبه می‌گردد ( $K_m, \mu_m$ ).  
مدول فشاری و برشی سیال مخزنی در فشار و دمای مخزن از اطلاعات مخزنی استخراج می‌شود ( $K_f, \mu_f$ ).  
برای نسبت تناسب  $\alpha$  1 مقدار مناسب در نظر گرفته می‌شود.

مقادیر متوسط برای  $K_{sat}$ ،  $\mu_{sat}$ ،  $\rho_{sat}$  و  $V_p$  ورودی محاسبه می‌گردد.

(ب) مدل‌سازی پتروفیزیکی

برای مدل‌سازی، نمونه‌های موجود در نگارها به کلاس‌های چند تایی تقسیم شده و عملیات در این محدوده انجام شده است. مثلاً اگر فاصله نمونه‌های چاهی ۱۵ سانتی‌متر باشد، آن‌ها به گروه‌های مثلاً ۹۰ سانتی تقسیم می‌شوند. بنابراین در هر گروه ۶ نمونه قرار می‌گیرد. فرض می‌شود این ۶ نمونه دارای ساختار تخلخل یکسان هستند.

برای هر نمونه موجود در نگارهای ورودی درصدهای مختلفی از هر نوع شکل فضای خالی (کروی، سوزنی، ترک) در نظر گرفته می‌شود. به عنوان مثال اگر درصدهای ۳ نوع حفره موجود در یک در صد یک درصد تغییر دهیم. ۵۱۵۱ حالت مختلف بوجود می‌آید. در واقع سعی می‌شود نمونه‌های ساختگی ایجاد شود و نمونه ساختگی که خواص الاستیکی شبیه نمونه واقعی دارد انتخاب می‌شوند.

شماره نمونه ساختگی	درصد		
	کروی	سوزنی	ترک
1	0	0	100
2	0	1	99
3	0	2	98
4	0	3	97
5	0	4	96
6	0	5	95
7	0	6	94
8	0	7	93
9	0	8	92
10	0	9	91
11	0	10	90
12	0	11	89
13	0	12	88
5141	96	4	0
5142	97	0	3
5143	97	1	2
5144	97	2	1
5145	97	3	0
5146	98	0	2
5147	98	1	1
5148	98	2	0
5149	99	0	1
5150	99	1	0
5151	100	0	0

شکل ۶ نمونه‌های ساختگی ایجاد شده برای مدل‌سازی

<sup>1</sup> Aspect ratio

- ۱- برای تمامی این در صدها مدول بالک از طریق فرمول کاستر و توکسوز محاسبه می‌شوند. برای این مثال در نهایت ما ۵۱۵۱ مدول فشاری خواهیم داشت که باید با مدول های محاسبه شده در همان نمونه چاهی در نظر گرفته شده مقایسه گردد.
- ۲- تمامی مدول‌های محاسبه شده از مدول چاهی کم می‌شود و درصدهای دارای کمترین تفاوت انتخاب می‌شوند.
- ۳- برای تمام نمونه های چاهی موجود در گروه انتخاب شده مراحل ۱ تا ۴ انجام می‌شود تا در آن نقاط (فاصله‌ها) درصد هر نوع از انواع فضاهای خالی مشخص شود.
- ۴- با مشخص شدن نوع و درصد فضاهای خالی در سنگ و با وارد کردن پارامترهای سنگ در حالت خشک به روابط کاستر و توکسوز مدول بالک خشک سنگ محاسبه می‌شود.
- ۵- با کمک معادله گاسمن مدول بالک حالت اشباع سنگ از سیال تزریقی محاسبه می‌شود.
- ۶- با بکار بردن رابطه موجود بین مدول‌های بالک و برشی و چگالی سنگ سرعت‌های لرزه‌ای، سرعت‌ها در شرایط جدید سنگ مخزن محاسبه می‌شوند.
- ۷- تغییر سرعت‌ها در نتیجه جابه‌جایی سیال محاسبه می‌شود.
- ۸- تغییر زمان رفت و برگشت موج درون مخزن در نتیجه جابه‌جایی سیال محاسبه می‌شود.

## ۷. تخمین درصد و نوع حفره ها

برای تعیین نوع و درصد فضاهای خالی در سازندهای مورد مطالعه، از نمودارهای چاهی (سرعت موج طولی، تخلخل، چگالی و کانی‌شناسی) موجود استفاده شده است و سرعت موج عرضی نیز با استفاده از روابط تجربی محاسبه شده‌اند. با کمک روابط تجربی حاکم بین مدول‌های الاستیک، سرعت امواج و چگالی، ابتدا مدول‌های الاستیک برای حالت اولیه و در شرایط مخزن برای سه چاه محاسبه گردید. سپس با کمک روابط کاستر و توکسوز برای اشکال مختلف فضاهای خالی و درصدهای متفاوت از هر کدام، مدول‌های بالک محاسبه شد. به این ترتیب که برای هر نوع از اشکال و هر درصد از فضاهای خالی، بیشترین نزدیکی را که مدول بالک محاسبه شده با این روش با مدول بالک بدست آمده از نمودارهای چاهی داشته باشد، آن درصد و نوع فضاهای خالی به سنگ مخزن نسبت داده شده است.

در نهایت نتایج این تحقیق به‌عنوان مدل‌سازی معکوس رابطه کاستر و توکسوز جهت تخمین درصد حفره‌ها و نوع آن‌ها در چاه‌های شماره ۱، ۲ و ۳ میدان مورد مطالعه استخراج گردید که به ترتیب در شکل ۷، شکل ۸ و شکل ۹ نشان داده شده است.

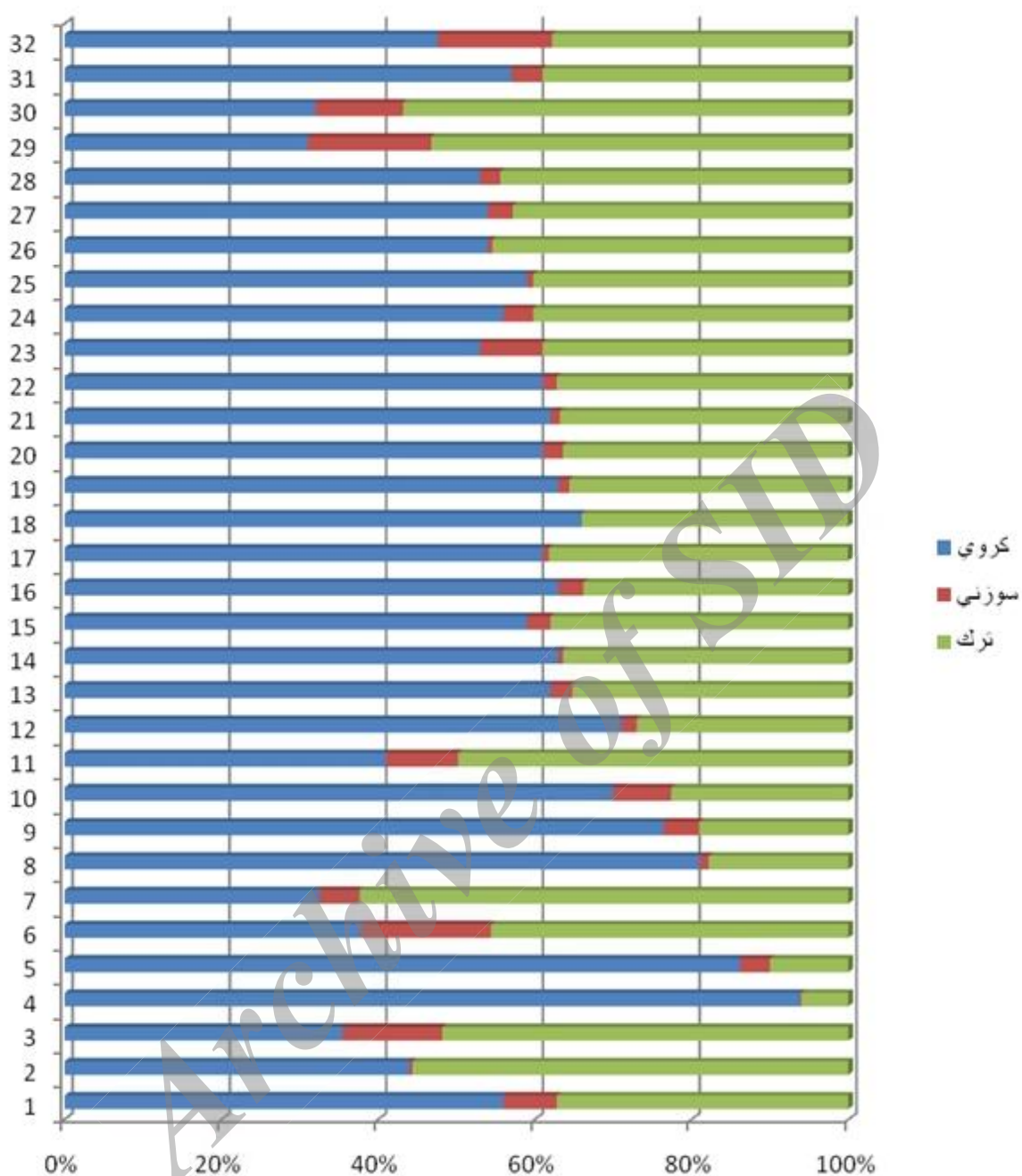
در این چاه‌ها به ترتیب برای مدل‌سازی معکوس تعداد ۱۹، ۳۰ و ۳۲ نمونه به فواصل یکسان در عمق برداشت شده‌است (هر نمونه بیانگر عمق است). همان‌طوریکه در شکل‌ها مشاهده می‌شود از نظر فراوانی شکل بیشتر حفره‌ها (بیش از ۵۰ درصد) کروی بوده و در مرحله بعد به ترتیب ترک و سوزنی قرار دارند. میزان تسلیم سنگ با نوع حفره‌ها کروی در برابر سنگ دارای ترک کم می‌باشد. در نتیجه تغییر تخلخل و در نتیجه تغییر پارامترهای الاستیکی سنگ (سرعت‌های لرزه‌ای) با تغییر فشار در این نوع سنگ‌ها در مقایسه کمتر بوده و امکان مشاهده تغییرات ایجاد شده در سنگ مخزن در نتیجه تغییر فشار با پارامترهای لرزه‌ای و نیز در مقاطع لرزه‌ای کم خواهد بود برعکس در حالتی که ترک در سنگ زیاد باشد با تغییر فشار، تغییر بیشتری در تخلخل و نیز پارامترهای لرزه‌ای ایجاد می‌شود که احتمال مشاهده تغییرات ایجاد شده در سنگ مخزن در نتیجه تغییر فشار، بالا می‌رود. با بررسی و مطالعه امکان مشاهده تغییرات ایجاد شده در سنگ مخزن با تغییر فشار، جابجایی سیال و تغییر دما می‌توان امکان پذیر بودن پایشگری لرزه‌ای مخزن را مطالعه کرد.



شکل ۷ درصد و نوع فضاهای خالی تخمین زده شده از طریق مدلسازی معکوس در چاه شماره ۱



شکل ۸ درصد و نوع فضاهای خالی تخمین زده شده از طریق مدل سازی معکوس در چاه شماره ۲



شکل ۹ درصد و نوع فضاهای خالی تخمین زده شده از طریق مدل‌سازی معکوس در چاه شماره ۳

مطالعه مقطع نازک برای بررسی درصد نوع تخلخل در این میدان در چند چاه دیگر نیز نشان می‌دهد که بیشترین نوع تخلخل را واگی و ریز شکستگی‌ها (ترک‌ها) تشکیل می‌دهند. نتایج نمونه این مطالعه در جدول ۲ آورده شده است.

جدول ۲ نوع و درصد تخلخل بدست آمده از مطالعه مقاطع نازک

شماره چاه	نوع تخلخل	
	واگی %	ریز ترک %
۱۴	۶۰	۴۰
	۵۰	۵۰
۳۳	۶۶	۳۳
	۵۰	۵۰

## ۸ نتیجه گیری

بیش از ۵۰ درصد فضاهای خالی شکل کروی داشته و درصد ناچیزی سوزنی هستند. کروی بودن حفره‌ها نشان دهنده استحکام بیشتر و در نتیجه سرعت بالای موج در سنگ می‌باشد. پس از شکل کروی، درصد ترک‌ها بیشتر از اشکال سوزی هستند. ترک‌ها برخلاف اشکال کروی در برابر فشار مقاومت کمتری داشته و زود تسلیم می‌شوند در نتیجه با افزایش فشار (روباره)، تخلخل و فضاهای خالی به شدت کاهش یافته و در نتیجه پارامترهای الاستیکی سنگ (سرعت‌های لرزه‌ای) افزایش می‌یابد. با مشخص شدن شکل و نوع حفره‌ها و درصد آن‌ها می‌توان میزان استحکام و سستی سنگ‌ها را به صورت کیفی مورد بررسی قرار داد و میزان موفقیت پیشگرمی لرزه‌ای مخزن را با کمک داده‌های لرزه‌ای پیش بینی کرد.

"هیئت تحریریه مجله از آقایان دکتر علی میثاقی و دکتر عبدالهی که داوری مقاله را بر عهده داشته اند کمال تشکر و

سپاس را دارد"

## منابع

1. Verwer K., Eberli G., Beechle G. and Weger R., 2010, Effect of carbonate pore structure on dynamic shear moduli : *Geophysics*,75,No.1,P.E1-E8
2. Baechle G.T., Weger R., Eberli G., Jose L., may 2005, Changes of shear moduli in carbonate rocks: Implications for Gassmann applicability: *The Leading Edge*,P. 507-510.
3. Keys R., G., Xu Sh., 2002, An approximation for the Xu-White velocity model : *Geophysics*,67,No.5,P.1406-1414
4. Verwer K., Braaksma H., Kenter A., M., 2008, Acoustic properties of carbonates: Effects of rock texture and implications for fluid substitution: *Geophysics*,73,No.2,P.B51-B65.
5. Pelletier H., Gunderson J., May 2005, Application of rock physics to an exploration play: A carbonate case study from the Brazeau River 3D: *The Leading Edge*,P. 516-519.
6. Gregor P. Eberli G., Gregor T Bachle, Flavio S., Michael L., July 2003, Factors controlling elastic properties in carbonate sediments and rocks, *The Leading Edge*,P. 654-660.



## **Application of Kuster and Toksoz equations in inverse modeling technique to estimate the percentages of pore types in carbonate rocks**

Naderi A., Heydari M., Maddahi I., Keshavarz Farajkhah N.

### **Abstract**

The most prominent parameter of seismic studies is seismic wave velocity. This parameter is influenced by different factors such as rock properties (Compaction, age, Lithology, Porosity, Pore Shape and etc), fluid properties (Viscosity, Density, fluid type, Saturation) and environment (Stress history, Depositional environment, production history, temperature, pressure, etc). Therefore, by identification, study and investigation of the relationship between seismic velocity and these parameters, properties of rock, fluid and environment from seismic data can be inferred. The main factors affecting these parameters are the porosity and pore ambiances. Many studies have been conducted to obtain and understand these relations. Most of the theoretical equations haven't considered changes in seismic properties from pores. Therefore, the seismic inversion, AVO and pore volume calculated based on these equations, include much uncertainties. One of the equations that consider several factors such as porosity, pore type, mineralogy and pore fluid is provided by Kuster and Toksoz. In this study, using this equation and inverse modeling technique, geometry and pore type and percentage of any type of pore shape in 3 wells penetrated one Iranian hydrocarbon reservoir were estimated. In this reservoir, Spherical and Disk shape have the highest percentage.

**Key words:** seismic velocity, porosity, pore type and pore shape