

بررسی اثر پارامترهای پتروفیزیکی بر سرعت انتشار امواج تراکمی در یکی از مخازن کربناته جنوب ایران

عزت ا. کاظم زاده^۱، مجید نبی بیدهندی^۲ و سید صالح هندی^۱

۱. پژوهشگاه صنعت نفت- پژوهشکده اکتشاف و تولید kazemzadehe@yahoo.com

hendiss@ripi.ir

۲. دانشگاه تهران-موسسه ژئوفیزیک mnbhendi@chamran.ut.ac.ir

(دریافت: ۸۱/۴/۲۲؛ پذیرش: ۸۱/۹/۲۳)

چکیده

در این مقاله تأثیر پارامترهای مختلف پتروفیزیکی بر روی سرعت انتشار امواج تراکمی (v_p) در سنگهای کربناته مخازن نفتی مورد مطالعه قرار گرفته است. بدین منظور ستون ۷۰ متری از یک مخزن نفتی واقع در جنوب ایران از سازند آسماری انتخاب گردید. انجام آزمایشات پتروفیزیکی مغزه بر روی ۱۵۰ نمونه پلاگ انجام شد. همچنین اطلاعات حاصل از نگارهای درون چاهی در عمقهای مورد نظر استخراج و تصحیحات لازم بر روی آنها صورت گرفت. داده‌های حاصل از آزمایشات مغزه و نگارهای درون چاهی جهت ایجاد ارتباط بین سرعت با خواص پتروفیزیکی تطابق داده شدند. نتایج حاصله بیانگر پراکندگی ارتباط بین سرعت موج تراکمی بر حسب تخلخل می باشد و روند تغییرات سرعت با افزایش تخلخل و چگالی فرموله گردیدند. همچنین تأثیر عوامل عمق، نفوذپذیری مطلق، روی سرعت امواج تراکمی مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است.

واژه‌های کلیدی: سرعت موج تراکمی، تخلخل، نفوذپذیری، سازند آسماری

مقدمه

یکی از مسائل مهم در ارزیابی مخازن پیچیدگی اکثر آنها می باشد، که منجر بر عدم اطمینان در برآورد حجم مخزن، میزان نفت درجا و روشهای تولید می شوند. مسلماً در آینده روشهای لرزه ای نقش مهمی در مسائل برداشت و تولید از مخازن ایفاد خواهند نمود، و این مستلزم درک کامل از رفتار امواج لرزه ای به منظور بدست آوردن اطلاعات جامع از خصوصیات سنگ و سیال مخازن می باشد. با پیشرفتهای سریع روشهای لرزه ای و تکنولوژی درون چاهی مطالعات دقیقتر مخازن هیدروکربوری مورد توجه بیشتری قرار گرفته است.

در سالهای اخیر روشهای لرزه ای توموگرافی چاه به چاه، لرزه نگاری سه و چهار بعدی، ارزیابی لرزه ای و توصیف مخازن هیدروکربوری، نمایش لرزه ای مراحل تولید و ازدیاد برداشت با زمان و نمودارهای صوتی درون چاهی بطور دقیق تر شروع شده است (Han *et al.*, 1986) فن آوریهای فوق در جهت تعبیر جدید مستلزم شناخت خواص لرزه ای و صوتی سیالات و سنگهای مخازن می باشد. همچنین توسعه و تولید مخازن نفتی و گازی بستگی به دقت عمودی و افقی در توصیف خواص مخزن دارد. بدلیل پوشش وسیع تکنیکهای لرزه ای دوبعدی و سه بعدی می توان یک شبکه از مدل‌های ساختمانی و رسوبی زمین شناسی ارائه نمود و از سیگنالهای لرزه ای جهت مشخص نمودن خواص پتروفیزیکی در ساختن مدل‌های شبیه سازی پتروفیزیکی مخازن استفاده نمود (Flavio *et al.*, 1999). بنابراین تبدیل دامنه های لرزه ای و زمان عبور به خواص پتروفیزیکی سنگها اهمیت خاصی دارد. در این جهت ابتدا باید پارامترهای تأثیرگذار بر پاسخهای لرزه ای مشخص شوند. تعداد زیادی از پارامترهای پتروفیزیکی، زمین شناسی، شرایط اندازه گیری و فاکتورهای هندسی می توانند روی انتشار امواج لرزه ای مؤثر باشند، در نتیجه لازم است، ابتدا جهت تفسیر کمیت‌های لرزه ای تأثیرات جانبی و عمودی پارامترهای فوق بر روی سیگنالهای لرزه ای تخمین زده شوند (Castagna *et al.*, 1985).

مدل فیزیک سنگ

ما باید قادر به استفاده از روابط فیزیک سنگ کالیبره شده برای یک میدان نفتی داده شده باشیم. روابط تجربی در مقالات معمولاً جهت ربط دادن سرعت‌های لرزه ای و پاگیری صوتی با درصد تخلخل و کانی شناسی می باشند که ممکن است لزوماً برای یک میدان خاص کارآئی نداشته باشند. همچنین چندین تئوری و مدل مختلف در مورد خواص کشسان مؤثر سنگها ارائه شده است. (Gassmann, 1951) با انجام این فرض که هرگونه حرکت نسبی بین سیال

و قسمت جامد سنگ در مقایسه با حرکت کل سنگ اشباع شده، بویژه در فرکانسهای پایین قابل اغماض است و همچنین با این فرض که پیکره سنگ از یک جسم جامد کشسان، همگن و همسانگرد ساخته شده است یک مدل برای محاسبه مدول بالک یک محیط متخلخل اشباع شده از سیال با بکارگیری مدولهای بالک شناخته شده قسمت جامد سنگ، پیکره سنگ و سیال درون حفره ارائه نمود. سپس (Biot, 1956) تئوری را برای تمامی محدوده فرکانس بسط داد و حرکت نسبی بین سیال و پیکره سنگ را مدنظر قرار داد. براین اساس بیوت در دو محدوده فرکانس پایین و بالا روابطی را برای سرعت انتشار امواج بدست آورده است.

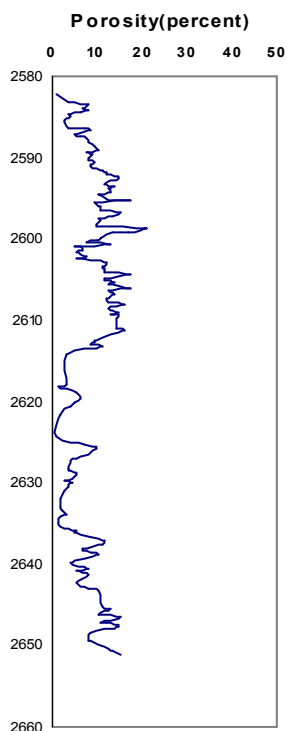
بطور کلی نامطمئن بودن داده های ورودی، محاسبات با معادلات گاسمن و بیوت را تا حدودی محدود می سازد. برای یک نمونه سنگ مقادیر حقیقی مدول بالک قسمت جامد (K_s) اصولاً غیر مشخص است. همچنین سرعتهای اندازه گیری شده پیکره سنگ، چگالی اندازه گیری شده، تخلخل و سرعت سیال همگی شامل درصدی خطا در اندازه گیری می باشند. بنابر این با توجه به محدودیت های تئوریهای ارائه شده لازم است که ارتباط بین پارامترهای پتروفیزیکی نظیر تخلخل و سرعت امواج تراکمی برای هر میدان نفتی جهت تعریف یک مدل فیزیک سنگ کالیبره شده ارائه نمود.

دانستن تغییرات درصد تخلخل در مخازن کربناته حائز اهمیت می باشد و در بررسی ها و مطالعات اقتصادی جهت توسعه میدان بکار می رود. با توجه به اینکه پاسخ لرزه ای در سنگهای کربناته شدیداً به تخلخل وابسته می باشد مشخص شدن چگونگی تغییرات آن در کل مخزن یک کار اساسی است. یک روش جهت رسیدن به این هدف، ساختن یک مدل فیزیک سنگ با استفاده از داده های مغزه و نمودار درون چاهی و سپس بکار گرفتن آن در تفسیر لرزه ای است. در مطالعات آزمایشگاهی از نمونه های منتخب مربوط به چندین چاه یک میدان، تعیین سرعتهای امواج P و S و پارامترهای پتروفیزیکی نظیر تخلخل، نفوذپذیری و درصد اشباع سیالات است. این اطلاعات به منظور ساختن یک مدل فیزیک سنگ برای تأثیر درصد تخلخل، هندسه خلل و فرج، کانی شناسی، اشباع و فرکانس روی پاسخ لرزه ای بکار می رود. اولین قدم کالیبره کردن مدل فیزیک سنگ با نگارهای درون چاهی است، که تفسیر نگارها را دربرخواهد داشت. سرانجام این مدل فیزیکی برای داده های مغزه انجام می شود. و با ارزیابی بوسیله نگارها جهت تفسیر لرزه ای بکار می رود.

در این مطالعه ما به ارتباط پارامترهای پتروفیزیکی و سرعت امواج تراکمی با استفاده از داده های مغزه و نگارهای درون چاهی می پردازیم، که می توان از نتایج حاصل جهت یک مدل فیزیک سنگ برای تفسیر لرزه ای استفاده نمود.

آزمایشات تعیین پارامترهای پتروفیزیکی

جهت انجام آزمایشات پتروفیزیکی از نمونه های تمام مغزه تعداد ۱۵۰ نمونه پلاگ استوانه-ای شکل به قطر تقریبی ۳/۸ سانتی متر و طول تقریبی ۶/۳ سانتی متر تهیه گردید. نمونه ها در دستگاه شستشوی مغزه ها بوسیله حلالهای تولوئن و متانول شستشو و عاری از هرگونه هیدروکربور گردیده اند. مدت زمان شستشو حدود ۷۲ ساعت بوده است.

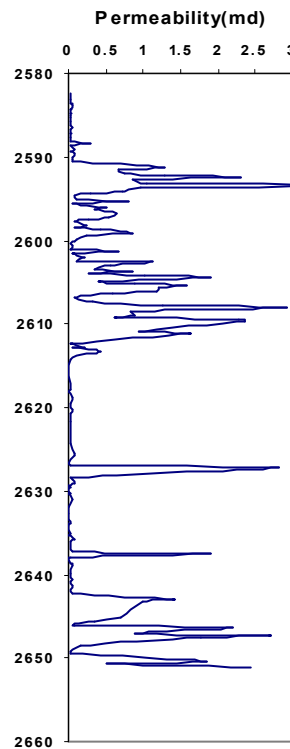


بعد از شستشو درصد تخلخل نمونه ها بوسیله دستگاه تخلخل سنج هلیم اندازه گیری گردیده است. نمونه درون مغزه نگهدار سیستم قرار داده و فشار دور لاستیک اعمال می شود و سپس هلیم به داخل نمونه با فشار معین وارد می شود. با استفاده از قانون بویل حجم هلیم تزریق شده به داخل نمونه اندازه گیری گردید. نمودار عمق برحسب تخلخل مغزه در شکل (۱) آمده است.

نفوذپذیری نمونه های پلاگ به کمک دستگاه اندازه گیری نفوذپذیری هوا صورت گرفته است. ابتدا نمونه ها درون مغزه نگهدار دستگاه قرار گرفته و پس از اعمال فشار دور لاستیک هوای خشک به داخل نمونه تزریق گردیده و پارامترهای اختلاف فشار دو سر نمونه، میزان جریان، سرعت جریان و ابعاد نمونه اندازه گیری شده و طبق قانون دارسی، مقادیر نفوذپذیری برای ۱۵۰ نمونه محاسبه گردیده است. نمودار عمق برحسب نفوذپذیری مغزه در شکل (۲) آمده است.

شکل ۱ - نگار عمق بر حسب تخلخل مغزه

جهت تعیین چگالی دانه ای، نمونه های شسته شده توسط دستگاه خرد گردیدند و از الک شماره ۱۰۰ عبور داده و با استفاده از دستگاه پیکنومتر حجم نمونه اندازه گیری گردید. سپس مقدار چگالی دانه ای با معلوم بودن وزن نمونه محاسبه گردید.



شکل ۲ - نگار عمق بر حسب نفوذپذیری مغزه

نگاره‌های درون چاهی

جهت بدست آوردن تطابق مناسب بین اطلاعات حاصل از مغزه و نگاره‌های درون چاهی با توجه به در دست نبودن اطلاعات رقومی نگارها، ابتدا اسکن شدند. سپس با استفاده از نرم افزار اتوكد وبا دقت ۰/۱ متر رقمی گردیدند. نگاره‌های استفاده شده شامل نگار پرتو گاما، نگار صوتی و نگار چگالی می باشند که دقیقاً در عمقهایی که اطلاعات مربوط به مغزه موجود بوده مقادیر نگاره‌های فوق مطابقت داده شده است. تصحیحات لازم بر روی اعداد قرائت شده از روی نگارها توسط نرم افزار تفسیر پتروفیزیکی TERALOG صورت گرفته است. نگاره‌های عمق بر حسب پرتو گاما، آهستگی زمان عبور (Slowness)، و پاگیری صوتی در شکل ۳ آمده است. نگار صوتی، زمان عبور موج را در یک فوت از سازند اندازه گیری می کند. با استفاده از مقادیر

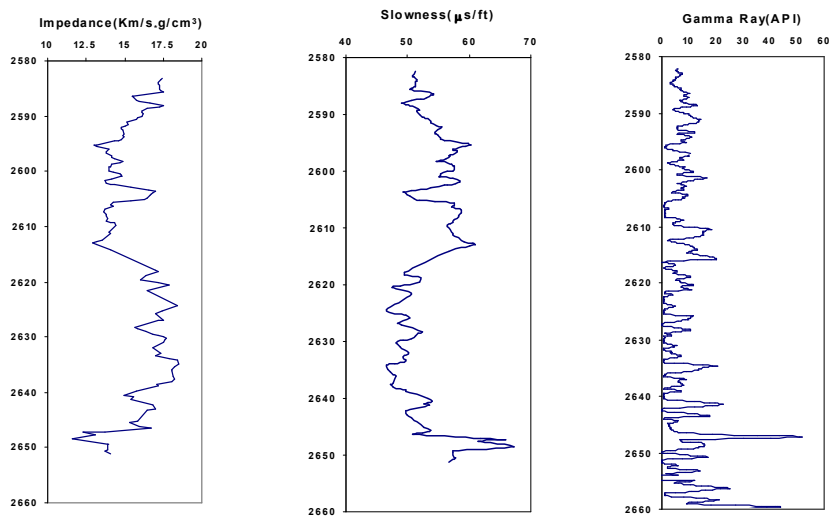
همکاران

بدست آمده از نگارهای فوق، سرعت موج تراکمی و پاگیری صوتی با استفاده از روابط ذیل محاسبه گردیدند.

$$V_p = \frac{300}{\Delta t} \quad (1)$$

$$Z = \rho V \quad (2)$$

که در آن Z ، ρ و V به ترتیب پاگیری صوتی بر حسب گرم بر سانتی متر مکعب در کیلومتر بر ثانیه، چگالی بر حسب گرم بر سانتی متر مکعب و سرعت بر حسب کیلومتر بر ثانیه می باشند. Δt اهرستگی زمان عبور بر حسب میکرو ثانیه بر فوت می باشد.



شکل ۳- نگار عمق بر حسب پرتو گاما، زمان عبور و پاگیری صوتی

تجزیه و تحلیل داده های بدست آمده

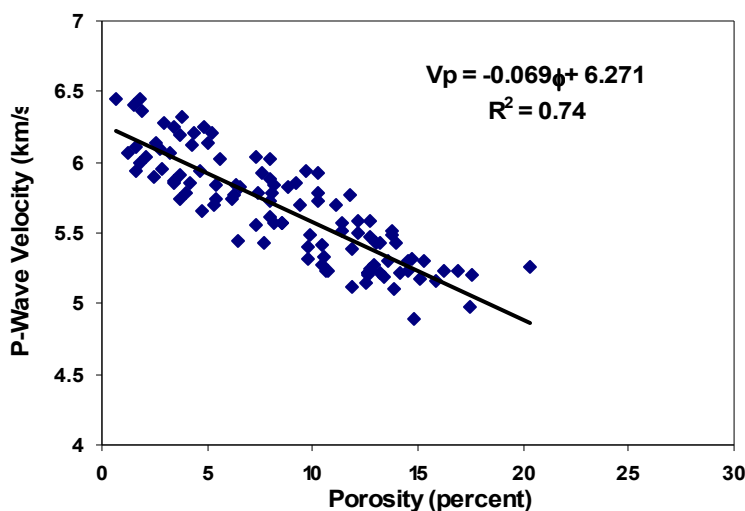
جهت بررسی ارتباط بین پارامترهای پتروفیزیکی حاصل از آزمایشات مغزه و نتایج بدست آمده از نگارهای درون چاهی بعد از انجام تصحیحات لازم موارد زیر مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است.

ارتباط تخلخل با سرعت امواج تراکمی

سرعت به شدت با تخلخل سنگ بستگی دارد. در منطقه مورد مطالعه از نمونه های سنگ مخزن لایه آسماری به وضوح مشاهده میشود که با افزایش تخلخل سرعت کاهش می یابد (شکل ۴). بهترین تطابق خطی ارائه شده بین سرعت امواج تراکمی (V_p) و تخلخل ϕ به صورت زیر می باشد.

$$V_p = -0.069\phi + 6.271 \quad (3)$$

که در آن V_p بر حسب کیلومتر بر ثانیه و تخلخل بدون بعد و بر حسب درصد می باشند.



شکل ۴- نمودار سرعت امواج تراکمی بر حسب تخلخل مغزها

ضریب همبستگی برای معادله خطی فوق (R^2) برابر ۰/۷۴ است. شیب منفی بیانگر کاهش سرعت با افزایش تخلخل می باشد و عرض از مبدا خط ($\phi = 0$) بیانگر سرعت در ماتریکس سنگ است. با توجه به مقادیر بدست آمده پراکندگی زیادی در اطراف این منحنی خطی که بهترین تطابق را نشان می دهد وجود دارد. در بعضی مواقع تغییرات سرعت در تخلخل های ثابت به ۷۰۰ متر بر ثانیه می رسد. برای مثال سنگ با تخلخل ۱۵ درصد می تواند سرعتی از ۴۹۰۰ الی ۵۵۶۰ متر بر ثانیه داشته باشد. از طرفی لیتولوژی سنگ مخزن در فاصله عمودی

۷۰ متری مورد مطالعه تقریباً ثابت است (انحراف معیار مربوط به داده های چگالی دانه ای ۰/۰۲۳ می باشد) بنابراین برای سنگها با ترکیب شیمیایی و تخلخل یکسان این تغییرات زیاد می باشد . در نتیجه نباید اثر پارامترهای دیگر تاثیر گذار بر روی سرعت امواج تراکمی را نادیده گرفت .

باتوجه به اینکه سنگ مخزن مورد مطالعه از دولومیت و سنگ آهک تشکیل شده است و توانایی تشکیل سیمان و بافت خاص دارند، باعث افزایش خصوصیات کشسانی سنگ می شوند بدون اینکه فضای منافذ پر شوند. مدوله‌های کشسانی بالا سرعتهایی را حادث می شوند که از مقادیر پیش بینی شده توسط معادلات تئوریک نظیر معادله متوسط زمانی وایلی بیشتر است . البته نظیر همین پراکندگی ها در نمودار سرعت - تخلخل ارائه شده توسط (Vernik & Nur, 1992) در سلسله کلاستها و در مخلوط های ماسه و رس توسط (Marion & Jizba, 1996) مشاهده شده است . ولی برخلاف کربناتها پراکندگی در این گونه سنگها بدلیل تغییر ترکیبات و مخصوصاً تغییر در میزان رس سنگها می باشد. همچنین تفاوت سرعت در سنگها با تخلخل یکسان را می توان نتیجه تفاوت در نوع منافذ دانست. سنگها با منافذ از نوع قالبی می توانند دارای سرعتهای بسیار بالایی باشند، حتی ممکن است بافتهای خیلی متخلخل نیز وجود داشته باشد . در حالی که سنگها با تخلخل بین ذره ای، بین بلوری و یا بسیار ریز تخلخل دارای سرعتهایی به مراتب پایین تر در تخلخل یکسان باشند. لذا سرعت در کربناتها بیشتر به نوع دولومیت، بافت، تخلخل و نوع منافذ بستگی دارد، ولی فرآیندهایی نظیر، دولومیتی شدن شکر و سیمانی شدن دولومیتی که باعث دگرگونی کانیها می شوند تاثیر بیشتری بر سرعت امواج تراکمی دارند.

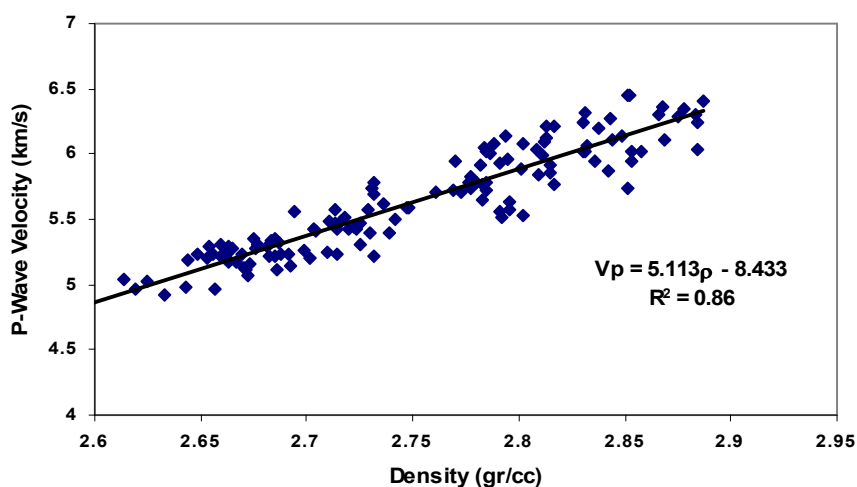
ارتباط چگالی با سرعت

الگوهای بازتاب لرزه ای تابعی از پاگیری صوتی هستند . نمودار عمق برحسب پاگیری صوتی در شکل (۳) تغییرات حاصل را در عمق مورد مطالعه نشان می دهد. چون چگالی بستگی زیادی با تخلخل دارد لذا سرعت معمولاً تطابق خوبی با چگالی نشان می دهد. برای نمونه های مورد مطالعه از مخزن آسماری نمودار سرعت برحسب چگالی در شکل (۵) آمده است. بهترین معادله خطی که داده های حاصل را برازش می کند به صورت زیر است .

$$V_p = 5/113 \rho - 8/433 \quad (4)$$

در رابطه فوق V_p بر حسب کیلومتر بر ثانیه و ρ بر حسب گرم بر سانتی متر مکعب می باشند. و ضریب همبستگی (R^2) برابر ۰/۸۶ است. ضریب همبستگی بالا نشان دهنده وابستگی شدید

سرعت با چگالی می باشد. همچنین مقدار شیب مثبت بیانگر این واقعیت است که با افزایش چگالی سرعت نیز افزایش می یابد. علیرغم ضریب همبستگی خوب برای سرعت موج تراکمی پراکندگی نیز وجود دارد که علت پراکندگی در این نمودار را بیشتر به تنوع منافذ موجود در سنگهای مخازن کربناته میتوان نسبت داد. آزمایشات انجام شده توسط (Watt et al., 1976) بر روی دو محیط از مواد جامد پلاستیکی به اشکال کروی و بیضوی بیانگر این مطلب است که بطور کلی دو محیط با جنس و تخلخل یکسان می توانند سرعتهای مختلفی داشته باشند و بستگی به شکل هندسی خلل و فرج دارد. همچنین تحقیقات انجام شده توسط (Marion and Jizba, 1996) بر روی نمونه های دولومیتی، عدم حفره، مقدار کمی حفره و تعداد زیادی حفره برای سرعت مفروض ۵ کیلومتر بر ثانیه تغییراتی در حدود ۵ تا ۱۵ درصد با توجه به وجود یا عدم وجود حفره مشاهده شده است، در مورد سنگ مخزن آسماری در عمق مورد مطالعه ماکزیمم تغییرات سرعت در یک چگالی ثابت تقریباً ۶۵۰ متر بر ثانیه بوده است.



شکل ۵- نمودار سرعت امواج تراکمی بر حسب چگالی

قابل اعتماد بودن همبستگی سرعت با دیگر پارامترهای پتروفیزیکی نظیر تخلخل و چگالی برای محاسبه پاگیری صوتی مدل‌های مقاطع لرزه ای و منشأ باز تابنده ها روی خطوط لرزه ای دارای اهمیت زیادی است. سرعتهای اندازه گیری شده یک ارتباط مستقیم با چگالی و یک ارتباط عکس با تخلخل نشان می دهند. با توجه به اینکه گوناگونی ترکیبات سنگهای مخازن کربناته کم است، جوابگوی تغییرات سرعت آنها نمی باشد. کربناته‌های خالص با فقدان محتویات

رس و سیلیسی کلاستها مشخص می شوند. کربناتها عمدتاً از کانیهای کربنات کلسیم و آرگونیت تشکیل شده اند، این کانیها خصوصیات فیزیکی خیلی شبیه هم دارند به طوری که گوناگونی در ترکیب دلیل مهمی برای گوناگونی زیاد سرعت در کربنات ها نمی شود.

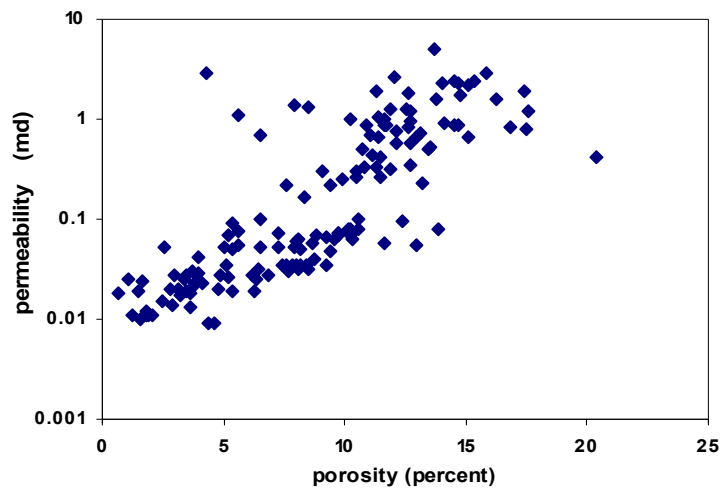
رابطه سرعت موج تراکمی با عمق

تراکم باعث کاهش تخلخل می شود و لذا باعث کاهش شدید زمان سیر صوت می شود. تحقیقات صورت گرفته نشان می دهد، معمولاً افزایش سرعت در اثر تراکم از افزایش سرعت در اثر کاهش تخلخل کمتر است. این تفاوت بیانگر این مطلب است که تغییرات دیاژنتیکی نظیر سیمان شدگی و انحلال و ... بیشتر از تراکم ساده با افزایش عمق دفن در سرعت مؤثر هستند. با افزایش عمق، فشار طبقات بالایی افزایش می یابد و سرعتها در بعضی از سنگها خصوصاً سنگهای درزه دار نسبت به فشار طبقات بالایی حساس می باشند. در سنگهای درزه دار افزایش زیاد سرعتها به علت بسته شدن درزه ها و نازک شدن محل شکافها بعلاوه تحت فشار بودن ذرات می باشند. موقعی که درزه ها در یک سنگ بطور تصادفی توزیع می شوند و سنگ از تمام جهات تحت فشار یکسان قرار می گیرند افزایش سرعتها همسانگرد است. سنگها با توزیع غیرتصادفی درزه ها رفتار ناهمسانگرد موج الاستیک را باعث می شوند. بنابراین دو عامل اصلی تأثیر گذار بر روی سرعت امواج تراکمی با افزایش عمق، ازدیاد تراکم و نازک شدن محل شکافها می باشند. در منطقه مورد مطالعه با توجه به کم بودن عمق مورد مطالعه و تنوع عوامل گوناگون تأثیر گذار بر روی سرعت در نمودار سرعت برحسب عمق روند خاصی مشاهده نمی شود.

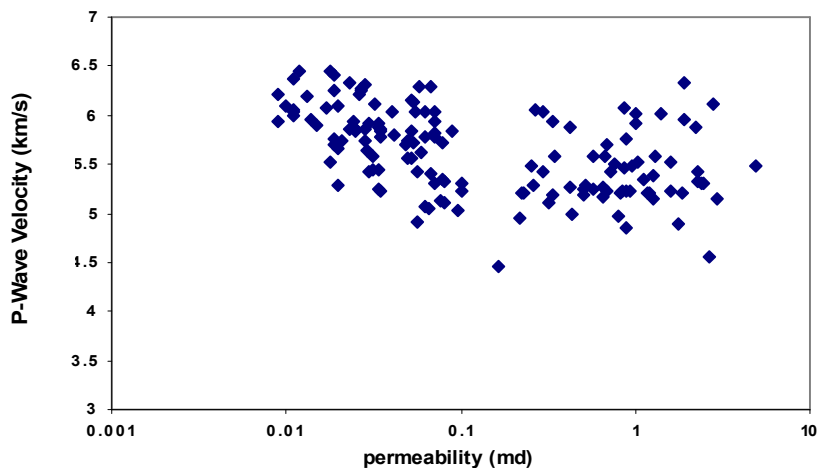
نفوذ پذیری و ارتباط آن با تخلخل و سرعت

در طی بررسیهای انجام شده در مخازن کربناته مشخص شده است که نفوذ پذیری و تخلخل همواره دارای ارتباط خطی نیستند. همچنین پارامترهای دیگر مخزن مانند فشار موئینه و درصد اشباع سیالات قانون مندی مشخصی را در رابطه با درصد تخلخل از خود نشان نمی دهند. از طرفی اندازه منافذ و روزنه ها در تمامی بافت سنگ یکسان نبوده و گسترش و پراکندگی آنها نیز در یک حجم از سنگ دارای یکنواختی نیست. لذا به صراحت می توان گفت تخلخل در سنگهای کربناته عامل ناهمگنی است و در بحث ارتباط بین نفوذ پذیری و تخلخل، سیستم تخلخل باید در نظر گرفته شود. زیرا عملکرد یک سنگ تابع مستقیم تخلخل نیست بلکه تابعی از سیستم تخلخل می باشد. که سیستم تخلخل در واقع ارتباط بین ابعاد، شکل

تخلخل، شکل و مجاری ارتباطی فضای متخلخل (گلوگاه ها) و نسبت ابعاد گلوگاه ها به ابعاد تخلخل می باشد. بنابراین همانطور که در شکل (۶) مشاهده می شود نمی توان یک ارتباط بین نفوذ پذیری و تخلخل ارائه نمود ولی روند کلی افزایش نفوذ پذیری با افزایش تخلخل مشاهده می شود. همچنین در نمودار سرعت امواج تراکمی بر حسب نفوذ پذیری مغزه شکل (۷) روند خاصی مشاهده نمی شود. بنابراین سرعت در سنگهای کربناته تابع فاکتورهای زیادی است. که آنها را به پارامترهای ذاتی سنگ و پارامترهای خارجی تفکیک کرده اند.



شکل ۶- نمودار نفوذپذیری بر حسب تخلخل.



شکل ۷ - نمودار سرعت موج تراکمی بر حسب نفوذپذیری

پارامترهای ذاتی سنگ نظیر تخلخل، نوع منافذ، ترکیب و اندازه دانه ها هستند که به لیتولوژی و خصوصیات فیزیکی سنگ وابسته می باشند . پارامترهای خارجی سنگ نظیر عمق دفن، فشار محصور و زمان هستند که بطور فیزیکی به بافت سنگ وابستگی ندارند و توسط شرایط بیرونی تعیین می شوند. در رابطه با سرعت امواج کشسانی در کربناته ها پارامترهای ذاتی از اهمیت بیشتری نسبت به پارامترهای خارجی برخوردار هستند .

نتیجه گیری

۱- نمودار سرعت موج تراکمی (V_p) بر حسب تخلخل مغزه دارای پراکندگی می باشد. این پراکندگی به این علت است که سرعت در سنگهای کربناته علاوه بر تخلخل به پارامترهای دیگری نظیر کانی شناسی ، شکل هندسی خلل و فرج و نوع سیال بستگی دارد. تغییرات سرعت در تخلخل ثابت در بعضی مواقع به حدود ۷۰۰ متر بر ثانیه می رسد. که این مقدار برای نمونه با ترکیب شیمیایی و تخلخل یکسان زیاد می باشد. علت را با توجه به توانایی کربناته ها در تشکیل سیمان و بافتهای خاص که بدون پرکردن منافذ سنگ باعث افزایش خواص کشسانی سنگ می شوند نیز توجیه کرده اند. بنابراین در تخمین تخلخل از خواص کشسانی باید سهم هریک از پارامترهای کانی شناسی، شکل

هندسی خلل و فرج، نوع سیال و ... مشخص گردد. ولی در حالت کلی روند کاهش سرعت با افزایش تخلخل مشاهده می شود.

۲- نمودار سرعت برحسب چگالی نشان دهنده همبستگی خوب بین آن دو می باشد. زیرا چگالی بستگی زیادی به تخلخل دارد. بنابراین می توان با استفاده از چگونگی تغییرات سرعت - چگالی و با استفاده از اطلاعات پایه فرمولی برای محاسبه سرعت برحسب چگالی در سنگهای کربناته ارائه نمود. پراکندگی موجود در منحنی سرعت برحسب چگالی را به دلیل تنوع منافذ موجود در سنگهای کربناته توجیه می کنند.

۳- تغییرات سرعت موج تراکمی بر حسب عمق در ستون ۷۰ متری مورد مطالعه دارای روند خاصی نمی باشد.

۴- ارتباط تخلخل و نفوذپذیری دارای تناسب خطی نمی باشد زیرا اندازه منافذ و روزنه ها در تمامی بافت سنگهای کربناته ثابت نبوده و گسترش و پراکندگی آنها نیز در یک حجم از سنگ دارای یکنواختی نمی باشد. بنابراین تخلخل در سنگهای کربناته به عنوان یک عامل ناهمگنی می باشد. اگرچه افزایش تخلخل با افزایش نفوذپذیری همیشه همسو نیست ولی در حالت کلی افزایش نفوذپذیری با افزایش تخلخل مشاهده می شود.

۵- با توجه به نتایج حاصل، نمی توان بین سرعت موج تراکمی و نفوذپذیری تطابق خوبی بدست آورد و پراکندگی داده های حاصل زیاد می باشد. ولی روند کلی افزایش زمان سیر صوت با افزایش نفوذپذیری مشاهده می شود. و مسلماً بدلیل شیب مثبت نمودار نفوذپذیری برحسب تخلخل نمونه های مغزه می باشد.

References

- Biot, M.A., (1956a). *Theory of propagation of elastic waves in fluid-saturated porous solid, low frequency range*. Journal of the Acoustical society of America, **28**, 168-178.
- Biot, M.A., (1956b). *Theory of propagation of elastic waves in fluid-saturated porous solid.,II, High frequency range*. J., Acous. Soc. Am., **28**, 179-191.

- Castanga, JP., Batzle, M.L., Eastwood. R.L., (1985). *Relationships between compressional-wave and shear wave velocities in clastic silicate rocks*. Geophysics **50**, 571-581.
- Flavio, S., Anselmetti, and Gregor P., Eberli (1999). *The Velocity-Deviation Log: A tool to predict type and permeability trends in carbonate drill holes from sonic and porosity or density logs*, AAPG Bulletin. V. **83**, .No 3, 450-466
- Gassmann, F., (1951). *Über die Elastizität poroser (on the elasticity of porous media)*. Vierteljahrsschrift der Naturforschenden Gesellschaft in Zurich, **96**, 1-23.
- Han, D., Nar, A., Morgan, D., (1986). *Effect of porosity and clay content on wave velocities in sandstones*, Geophysics, **51**, 2093-2107
- Marion, D., and Jizba, D, (1996), *Sonic velocity in carbonate sediments and rocks*, In I.Palaz and K.J. Marfurt, eds., Carbonate Seismology: SEG Geophysical Developments Series, No. **6**. P.75-92.
- Vernik, L., and Nur, A., (1992). *Petrophysical classification of siliciclastics for lithology and porosity prediction from seismic velocities*. Bulletin of the American Association of Petroleum Geologist, **76**, 1295 – 1309.
- Watt, J.p., Davies, G.F., and O'Connell, R.j., (1976). *The elastic properties of composite materials*: Rev. Geophys. SP., Phys., **14**, 541-563.