

تأثیر شکل هندسی منافذ بر سرعت امواج لرزه‌ای در سنگ‌های کربناته مخازن هیدروکربوری

جعفر ولی^۱، عزت اله کاظم زاده^{۲*}، حسام آلوکی بختیاری^۳ و محمد رضا اصفهانی^۴

^۱ مری، پژوهشکده اکتشاف و تولید، پژوهشگاه صنعت نفت، تهران، ایران
^۲ استادیار، پژوهشکده اکتشاف و تولید، پژوهشگاه صنعت نفت، تهران، ایران
^۳ مری، پژوهشکده اکتشاف و تولید، پژوهشگاه صنعت نفت، تهران، ایران
^۴ مری، پژوهشکده اکتشاف و تولید، پژوهشگاه صنعت نفت، تهران، ایران

(دریافت: ۸۷/۵/۱۵، پذیرش نهایی: ۸۷/۱۱/۵)

چکیده

هدف از این تحقیق بررسی تأثیر شکل هندسی منافذ سنگ‌های کربناته بر سرعت امواج کشسان است. بدین منظور تعداد ۴۱ عدد نمونه استوانه‌ای (پلاگ) از سنگ‌های کربناته میدین نفتی در ناحیه جنوب غرب ایران تهیه شد. این نمونه‌ها برای اندازه‌گیری سرعت‌های V_p و V_s در شرایط خشک و اشباع از آب و در فشارهای متفاوت، خصوصاً فشار مخزن آماده شدند. همچنین آزمایش‌های پراش پرتو ایکس (XRD) و بررسی مقاطع نازک میکروسکوپی نیز جهت تعیین نوع کانی، نوع بافت و تخلخل صورت گرفته است. نمودار سرعت بر حسب تخلخل، چگالی، فشار، نوع کانی سنگ و خصوصاً نوع منافذ سنگ برای نمونه‌های کربناته مورد بررسی قرار گرفته است. پراکندگی نقاط در نمودارهای سرعت امواج الاستیک بر حسب تخلخل، چگالی، فشار و نوع کانی سنگ نشان دهنده آنست که مهمترین عامل تغییرات سرعت شکل هندسی منافذ در نمونه‌ها با تخلخل یکسان است. بدین نحو تفاوت در سرعت امواج کشسان در تخلخل ثابت به حدود ۱۵۰۰ متر بر ثانیه و همچنین در یک سرعت ثابت تغییرات تخلخل تا ۲۰ درصد نیز می‌رسد. در نمونه‌های دارای تخلخل حفره‌ای سرعت بیشتر و در نمونه‌های با تخلخل حفره‌ای ریز سرعت کمتر از معادله متوسط زمانی است. واژه‌های کلیدی: سنگ کربناته، سرعت امواج تراکمی و برشی، تخلخل، چگالی، نوع کانی سنگ، شکل هندسی منافذ

The effect of pore geometry on seismic wave velocities in carbonate rocks from hydrocarbon reservoirs

Vali, J.¹, Kazemzadeh, E.², Aloki B. H.³ and Esfahani, M. R.⁴

¹Researcher, Exploration and Production Division, Research Institute of Petroleum Industry (RIPI), Tehran, Iran
²Assistant Professor, Exploration and Production Division, Research Institute of Petroleum Industry (RIPI), Tehran, Iran
³Researcher, Exploration and Production Division, Research Institute of Petroleum Industry (RIPI), Tehran, Iran
⁴Researcher, Exploration and Production Division, Research Institute of Petroleum Industry (RIPI), Tehran, Iran

(Received: 5 August 2008, Accepted: 24 Jan 2009)

Abstract

The goal of this laboratory study is to investigate the effect of pore shapes on seismic wave velocities in carbonate rocks under reservoir conditions. In this research, 41 core plugs of carbonate rocks from oil fields of the southwest of Iran were prepared. The compressional and shear wave velocities were measured in both dry and brine saturated samples under several pressures especially reservoir pressure. The results from XRD and thin section studies were used to determine minerals, features and pore types of the samples. The cross plots of velocity versus porosity, density, pressure, mineralogy, and

especially pore types have been investigated. These cross plots showed that the pore shapes are the main reason for variation in velocities and dispersion of the data points, so that for a constant porosity the variance of elastic wave velocity is about 1500 ms^{-1} and also the variance of porosity is about 20 percentage for a constant velocity. The velocity is higher in samples with vuggy porosity and lower in samples with small size vuggy porosity than the velocity determined from the time average equation.

Introduction: The parameters which have effect on velocity are divided into two classes. The first class are the parameters that are related to the natural character of the rock, lithology and rock physics such as porosity, pore type, grain size and a combination of them. The second class is the parameters which are affined to depositional environment and they are not physically related to rock structures. These parameters are such as depth of burial, confining stress and age of deposition.

The effect of rock properties, such as porosity, type of porosity, minerals and pressure on P and S wave velocities are investigated by laboratory measurements of compressional and shear wave velocities for both dry and brine saturated rock under different confining pressure.

The effect of pore shapes has been either overleaped or not suitably used in theoretical equations, therefore seismic inversion analysis, AVO and pore volume calculations, which are based on these equations are highly inconclusive.

Pore types were classified into five groups by Anselmity and Eberli (1993), which are inter crystalline and interparticle porosity, micro porosity, moldic porosity, inter grain porosity and low porosity with high cementation. They also studied the effect of pore types on velocity measurements.

Burial depth, compressibility, saturation, wettability, hysteresis of saturation and frequency of wave velocity are other factors which have an effect on velocity.

In this paper, first the factors affecting seismic wave velocity in carbonate rocks were reviewed and then flow work of this study consisting of preparation of samples, determination of petrophysical properties (porosity, permeability) and compressional and shear wave velocities measurements were performed. Seismic wave velocity performed on 41 dry and brine saturated core plug samples under reservoir temperature and pressure. The diameters of the plugs were 3.7 centimeter for 34 samples and 5 centimeter for 7 samples.

Effective factors on seismic wave velocities in carbonate rocks Porosity: Porosity is one of the important parameters that has an effect on velocity, so that normally with an increase of porosity the velocity is decreased. Prediction of porosity just from seismic velocity is difficult, because in carbonate rocks seismic wave velocity is dependent on too many other parameters.

Minerals: Though the velocity differs in different minerals, the type of mineral is not the main factor that controls velocity in carbonate rocks.

Density: Generally a direct relation between density and velocity is found but there isn't any experimental equation for the relation between density and velocity. Therefore to increase certainty coefficient, laboratory measurements and determination of the relation between density and velocity are necessary.

Pressure: Pressure is one of the important factors that controls velocity in fractured rocks, which are brine saturated. Porosity reduction and better contact of grains in rock is the reason for the increase in velocity by the increase in pressure.

Pore geometry: The results of microscopic studies by Anselmiti and Eberli (1993) showed five different pore geometries in carbonate reservoir rock. They analyzed

different types of pore geometries and compared data points in velocity-porosity cross plot with time average equation.

Flow work: Flow work consisted of plugging, cleaning, petrophysical properties and acoustic velocity measurements.

Conventional core properties such as porosity, permeability and grain density provide the fundamental data set for well bore and reservoir characterization.

The core plugs were cleaned to remove residual hydrocarbons, formation brine, salts and other contaminants by using toluene and then they were dried in a conventional oven.

Porosity and grain density of samples were measured under ambient conditions using helium expansion and the application of Boyles's law to quantify grain volume by Ultraporosimeter 200A.

Air permeability was measured in ambient conditions by Ultrapermeameter, which uses the Darcy equation to calculate air permeability.

Acoustic velocity was measured in dry and brine saturated samples in reservoir temperature and pressure from 4400 psi to 800 psi by non equal steps.

Laboratory study of factors that control seismic wave velocity: The data points in the porosity- velocity cross plot, which resulted from laboratory measurements, were too scattered. Pore shape and cementation of pores are the reason for this scattering. The density-velocity cross plot shows that seismic wave velocity isn't controlled by the type of minerals. In all states mentioned above, the variability of velocity vs pressure is followed by $V=a*P^b$.

Results: * In carbonate rocks acoustic wave velocity is dependant on some parameters such as diagenetic, mineralogy, pore structure, type of fluid, pressure, temperature and also in no dense carbonate the wave velocity is related to grain to matrix ratio, shape, size and sorting of grains.

* Cross plot of velocity versus porosity showed that for a constant porosity the variance of velocity is about 1500 ms^{-1} and also for a constant velocity the variance of porosity is about 20 percentage.

* The velocity is higher in samples with vuggy porosity and lower in samples with small size vug porosity than the velocity determined from the time average equation.

* The test results for non visible vuggy samples show negative deviation from the time average equation for calcite and dolomite, and they have lower velocity than vuggy and small size vuggy porosity samples.

* The density - velocity cross plot showed that the effect of the type of minerals to control elastic properties is negligible.

* Pore shape is the main factor which causes scattering of data points in velocity-porosity cross plot for carbonate rocks.

Key words: Carbonate rock, Shear and compressional waves velocity, Porosity, Density, Kind of mineral, Pore shape

۱ مقدمه

سرعت مخصوص به خود را در سنگ‌های کربناته به وجود می‌آورند. عوامل تاثیرگذار بر سرعت را می‌توان به دو دسته تقسیم کرد. دسته اول پارامترهای مربوط به خواص ذاتی سنگ مخزن نظیر تخلخل، نوع خلل و فرج، ترکیب

سرعت در سنگ‌های کربناته تابع پیچیده‌ای از عوامل متعدد است. از دلایل عمده این پیچیدگی، تغییرات دیاژنتیکی است که سبب سیمان‌شدگی، انحلال و بلوری‌شدن مجدد می‌شود و بافت‌های خاص با الگوی

و اندازه دانه هستند که مربوط به سنگ‌شناسی و خواص فیزیکی سنگ‌اند و دسته دوم مربوط به پارامترهای محیطی‌اند و به‌طور فیزیکی مربوط به ساختار سنگ نمی‌شوند. از این عوامل می‌توان عمق تدفین، فشار همه جانبه و سن رسوبات را نام برد. در سنگ‌های کربناته پارامترهای ذاتی سنگ از اهمیت بیشتری برخوردارند. بدین منظور با اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی سرعت امواج تراکمی و برشی در حالت‌های خشک و اشباع و در فشارهای متفاوت، تاثیر خواص ذاتی سنگ نظیر تخلخل، نوع خلل و فرج، نوع کانی و همچنین فشار روی سرعت امواج P و S مورد بررسی قرار می‌گیرد. در راستای مطالعه تاثیر تخلخل بر سرعت لرزه‌ای وایلی و همکاران (۱۹۵۶) با اندازه‌گیری سرعت در لایه‌های متناوب لوسیت و آلومینیم برازش خوبی را برای رابطه میانگین زمانی به‌دست آوردند. پس از وایلی و همکاران تحقیقات زیادی صورت گرفته و روابط متنوعی عرضه شده است. برای مثال پیکت (۱۹۶۳) و رایگا-سلمنسیو و همکاران (۱۹۸۶) روابطی را برای ارتباط سرعت - تخلخل عرضه کرده‌اند.

آنسلمیتی و ابرلی (۱۹۹۳) با اندازه‌گیری سرعت‌های امواج تراکمی و برشی روی ۲۹۵ نمونه پلاگ کربناته باهاما و مائلا معادلات توانی را برای ارتباط تخلخل - سرعت مطرح کردند و روشن ساختند که تغییرات سرعت در تخلخل‌های ثابت به‌خصوص در تخلخل‌های بالا به بیش از ۲۵۰ کیلومتر بر ثانیه می‌رسد. همچنین والش (۱۹۶۵) به‌منظور روشن ساختن ارتباط بین مدول‌های کشسان پیکره سنگ و تخلخل روابطی را مطرح کرده است که بیانگر چگونگی تأثیرگذاری پارامترهای پتروفیزیکی و سنگ‌شناسی بر ارتباط سرعت - تخلخل است.

همان‌طوری که ذکر شد تخلخل، مهم‌ترین عامل کنترل‌کننده سرعت در سنگ‌ها است. اما در سنگ‌های کربناته شکل منافذ نیز تقریباً اهمیتی به اندازه تخلخل در

رفتار کشسان و در نتیجه سرعت امواج دارند. بیشتر معادلات نظری موجود از شکل منافذ صرف نظر می‌کنند یا آن‌را به‌طور مناسبی در نظر نمی‌گیرند، بنابراین آنالیزهای وارون لرزه‌ای، دامنه برحسب دورافت (AVO) و محاسبات حجم منافذ که برپایه این معادلات هستند، دارای عدم قطعیت‌های زیادی‌اند. تأثیر نحوه قرارگیری و شکل هندسی منافذ روی خواص کشسان به‌صورت نظری توسط اشلی (۱۹۵۷)، هیل (۱۹۶۵)، کاستر و توکسوز (۱۹۷۴) و به‌صورت آزمایشگاهی از سوی ماریون و زینسنر (۱۹۹۱)، آنسلمیتی و ابرلی (۱۹۹۳ و ۱۹۹۹)، وات و همکاران (۱۹۷۶)، ماریون و جیزبا (۱۹۹۶) تحقیق شده است. آنسلمیتی و ابرلی (۱۹۹۳) با بررسی مقاطع نازک میکروسکوپی تخلخل نمونه‌ها را به پنج نوع منافذ شامل تخلخل بین‌بلوری و بین‌ذره‌ای، میکروتخلخل، تخلخل قالبی، تخلخل درون‌دانه‌ای، و نمونه با تخلخل کم و سیمان‌شدگی سخت تقسیم‌بندی کرده‌اند و جهت تاثیر نوع تخلخل را در اندازه‌گیری‌های سرعت مورد بررسی قرار داده‌اند. آنها نتیجه‌گیری کردند که علی‌رغم تفاوت سرعت در کانی‌های اصلی سنگ‌های کربناته نوع کانی عامل کنترل‌کننده اصلی سرعت در سنگ‌های کربناته نیستند. بنابراین فرایندهایی که باعث دگرگونی کانی‌ها می‌شوند نظیر دولومیتی‌شدن، شکری و سیمانی‌شدن دولومیتی به‌همراه نوع تخلخل، بر سرعت اثر می‌گذارند (ابرلی و همکاران ۲۰۰۳). ماریون و جیزبا (۱۹۹۶) روی ارتباط مدول‌های بالک و نوع کانی تحقیقاتی کرده‌اند. نتایج تحقیقات آنها نشان می‌دهد که مدول بالک نمونه‌های دولومیت و کلسیت با یکدیگر تفاوت ناچیزی دارند.

گاردنر و همکاران (۱۹۷۴) رابطه‌ای تقریبی برای برآورد کردن سرعت از روی چگالی مطرح ساخته است که عموماً برای ماسه‌سنگ‌های سیلیسی کلاستی مورد استفاده قرار می‌گیرد. نتایج تحقیقات آزمایشگاهی

قطر ۲ اینچ هستند. همچنین آزمایش پراش پرتو ایکس (XRD) و تفسیر بررسی مقاطع نازک میکروسکوپی به منظور تعیین نوع کانی‌ها، بافت و تخلخل نمونه‌ها صورت گرفت. در نهایت با استفاده از نتایج تحقیقات آزمایشگاهی به بررسی مهم‌ترین عوامل تأثیرگذار بر سرعت امواج لرزه‌ای شامل تخلخل، هندسه منافذ، نوع کانی، چگالی و فشار در سنگ‌های کربناته پرداخته شده است.

۲ عوامل تأثیرگذار بر سرعت امواج لرزه‌ای در سنگ‌های کربناته

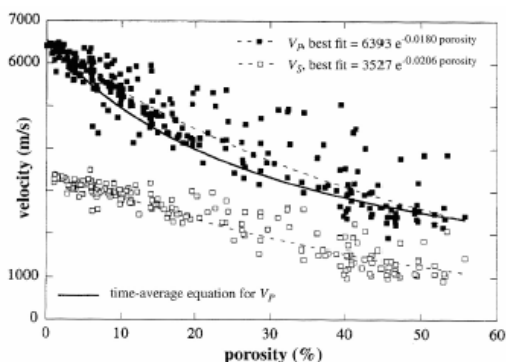
۱-۲ اثر تخلخل بر سرعت امواج کشسان

تخلخل یک عامل اصلی و موثر در سرعت امواج است و معمولاً با افزایش آن سرعت کاهش می‌یابد. با توجه به اینکه سرعت در سنگ‌های کربناته به پارامترهای دیگری نظیر دیاژنز، کانی‌شناسی، ساختار خلل و فرج، نوع سیال، فشار و دما و همچنین در کربناته‌های نامتراکم به نسبت دانه به خمیره، شکل، اندازه و جورشدگی بستگی دارد، پیش‌بینی تخلخل، صرفاً از روی داده‌های سرعت مشکل است. رسوبات کربناته دائماً تحت تأثیر تغییرات دیاژنتیکی اند که کانی‌شناسی و ساختار خلل و فرج را تغییر می‌دهند، بالاخص فرایندهایی نظیر سیمان‌شدگی و انحلال، پیوسته ساختار خلل و فرج را دگرگون می‌کنند و باعث ایجاد و یا کاهش تخلخل می‌شوند. این تغییرات می‌توانند یا به سبب تغییرات کانی از آرگونیت و کلسیت به دولومیت، و یا به دلیل تغییر شکل منافذ برای مثال از منافذ بین‌دانه‌ای به منافذ نوع قالبی باشند. همه این تغییرات خواص کشسان را تغییر می‌دهند و در نتیجه سرعت امواج را تحت الشعاع قرار می‌دهند. ارتباط سرعت - تخلخل توسط معادلات تجربی گوناگونی مطرح شده است. وایلی و همکاران (۱۹۵۶) با اندازه‌گیری سرعت در لایه‌های متناوب لوسیت و آلومینیم برازش خوبی را برای رابطه

آنسلمیتی و ابرلی (۱۹۹۳) روی نمونه کربناته روشن ساخته که رابطه گاردنر برای کربنات‌ها نیاز به تصحیح در جهت افزایش سرعت دارد، زیرا تقریباً همه نمونه‌های مورد آزمایش سرعتی بیشتر از سرعت محاسبه‌شده با رابطه گاردنر نشان می‌دهند.

آنسلمیتی و ابرلی (۱۹۹۳) وابستگی سرعت‌های امواج تراکمی و برشی را به فشار بررسی کردند. آنها سرعت را در نمونه‌های کربناته تحت فشارهای همه جانبه و فشارهای منافذ گوناگون اندازه‌گیری کردند. سرعت در سنگ‌ها تابعی از فشار موثر (اختلاف فشار همه‌جانبه و فشار سیال درون منافذ) است. در فشارهای کم، با افزایش فشار همه‌جانبه به علت تماس بهتر دانه‌ها، تغییر شکل منافذ و بسته شدن درزه‌های کوچک، سرعت افزایش می‌یابد (کینگ، ۱۹۶۶ و گاردنر و همکاران، ۱۹۷۴). افزایش سرعت در فشارهای کم برای نمونه‌های نامتراکم و با سرعت‌های کمتر بیشتر است در حالی که نمونه‌های سخت و با سرعت‌های بیشتر معمولاً کمتر تحت تأثیر فشار، خصوصاً در فشارهای پایین قرار می‌گیرند. بنابراین نمونه‌های با سرعت‌های کمتر دارای گرادیان سرعتی بیشتر و نمونه‌های با سرعت‌های بیشتر دارای گرادیان سرعتی کمتر با فشار هستند (آنسلمیتی و ابرلی ۱۹۹۳). از عوامل دیگر تأثیرگذار بر سرعت عمق تدفین، تراکم، سیمان‌شدگی، اشباع، ترشوندگی، هیستریزس اشباع شدگی و بسامدهای اندازه‌گیری هستند.

در این مقاله ابتدا مروری بر عوامل تأثیرگذار بر سرعت امواج لرزه‌ای در سنگ‌های کربناته خواهیم داشت. سپس مراحل کار در این تحقیق شامل آماده‌سازی نمونه‌ها، تعیین خواص پتروفیزیکی (تخلخل و تراوانی) و اندازه‌گیری سرعت‌های تراکمی (V_p) و برشی (V_s) بیان شده است. آزمایش روی ۴۱ نمونه پلاگ در شرایط خشک و اشباع از آب در فشار مخزن صورت گرفتند که تعداد ۳۴ نمونه آن به قطر ۱٫۵ اینچ و تعداد ۷ نمونه نیز با

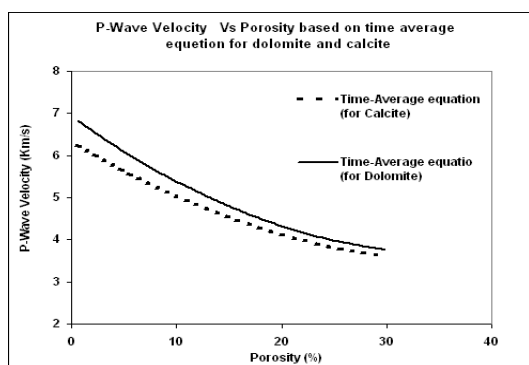


شکل ۱. نمودارهای V_p و V_s بر حسب تخلخل برای نمونه‌های باهاما و مائیللا با بهترین برازش منحنی تابع نمایی (آنسلمیتی و ابرلی، ۱۹۹۳)

شکری، تخلخلی از نوع بین‌بلوری ایجاد می‌کند و باعث کاهش سرعت می‌شود در حالی که دولومیت‌ها با بافت حفظ شده، سرعت‌های بسیار زیادی دارند. بنابراین فرایندهایی که باعث دگرگونی کانی‌ها می‌شوند نظیر دولومیتی‌شدن شکری و سیمانی‌شدن دولومیتی به‌همراه تخلخل و نوع تخلخل بر سرعت اثر می‌گذارند.

۲-۳ اثر چگالی بر سرعت امواج کشسان

در حالت کلی، رابطه مستقیم بین سرعت و چگالی وجود دارد ولی همانند نمودار سرعت-تخلخل پراکندگی نقاط در نمودار سرعت - چگالی زیاد است.



شکل ۲. نمودار معادله متوسط زمانی وایلی برای دو نوع کانی کلسیت و دولومیت

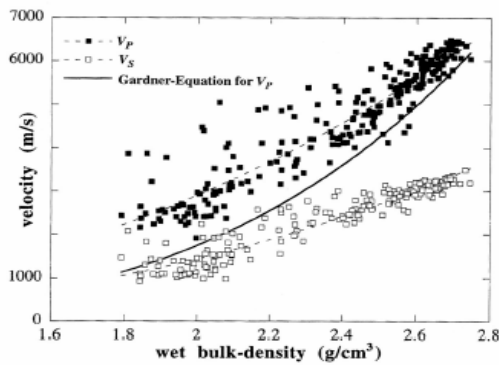
میانگین زمانی به‌دست آوردند و در حالت کلی معادله متوسط زمانی (۱) را برای سنگ‌های اشباع‌شده از سیال عرضه کرده‌اند.

$$\frac{1}{V_p} = \frac{\phi}{V_f} + \frac{1-\phi}{V_m} \quad (1)$$

که در آن V_p ، V_f و V_m به ترتیب سرعت‌های موج تراکمی در سنگ اشباع از سیال، سیال و قسمت جامد سنگ و ϕ تخلخل سنگ هستند. رابطه فوق ارتباط بین سرعت و تخلخل را بیان می‌کند و در سنگ‌های تحت فشار زیاد صادق است. آنسلمیتی و ابرلی (۱۹۹۳) با اندازه‌گیری سرعت‌های امواج تراکمی و برشی روی ۲۹۵ نمونه پلاگ کربناته باهاما و مائیللا معادلات توانی به صورت $V=ae^{b\phi}$ را در خصوص ارتباط تخلخل - سرعت عرضه کردند. که در این خصوص a و b اعداد ثابت و ϕ تخلخل است. علی‌رغم ضریب همبستگی زیاد پراکندگی زیادی در اطراف این منحنی نمایی وجود دارد (شکل ۱). برای مثال سنگ‌های با تخلخل ۴۰ درصد می‌توانند سرعتی از ۲۱ الی ۵ کیلومتر بر ثانیه داشته باشند. این تفاوت برای سنگ‌های دارای ترکیب شیمیایی و تخلخل یکسان، بسیار زیاد است.

۲-۲ اثر نوع کانی بر سرعت امواج کشسان

در سنگ‌های سیلیسی کلاستیک تنوع در میزان کانی‌ها (کوارتز و شیل) بسیار زیاد است و نوع کانی‌ها تاثیر زیادی روی سرعت امواج لرزه‌ای دارند. ولی علی‌رغم تفاوت سرعت در کانی‌های اصلی سنگ‌های کربناته، نوع کانی عامل اصلی کنترل‌کننده سرعت در سنگ‌های کربناته نیست. در شکل ۲ نمودار معادله متوسط زمانی وایلی برای دو نوع کانی کلسیت و دولومیت رسم شده است. همان‌طور که در شکل مشاهده می‌شود، تفاوت در سرعت به‌خاطر نوع کانی کلسیت یا دولومیت دارای پراکندگی بسیار کمتری است. برای مثال بافت دولومیتی



شکل ۳. نمودار سرعت امواج تراکمی برحسب چگالی بالک سنگ اشباع آنسلمیتی و ابرلی، ۱۹۹۳)

۲-۴ اثر فشار بر سرعت امواج کشسان

در سنگ‌های درزه‌دار اشباع از سیال، فشار عامل مهمی در کنترل سرعت امواج تراکمی و برشی است. علت افزایش سرعت با افزایش فشار را می‌توان به کاهش تخلخل و بهبود شرایط تماس دانه‌ها نسبت داد. هر دو مورد به تغییرات خواص پیکره‌سنگ مربوط می‌شوند و می‌توان از تغییر خواص کشسان کانی‌های سنگ صرف‌نظر کرد.

بعضی از آثار مهم فشار روی سرعت به شرح زیر است:

الف- تغییر شکل پذیری سنگ وابستگی فشار به سرعت را بیشتر می‌کند.

ب- ارتباط فشار - سرعت غیرخطی است.

ج- تغییر شکل ناکشسان باعث پدیده هیستریزس خواص کشسان می‌شود.

د- با افزایش فشار سرعت‌های امواج تراکمی و برشی معمولاً افزایش می‌یابند ولی نرخ تغییرات متفاوت است.

آنسلمیتی و ابرلی (۱۹۹۳) وابستگی سرعت‌های امواج تراکمی و برشی را به فشار بررسی کردند. آنها روی نمونه‌های کرناته تحت فشارهای همه‌جانبه و فشارهای منافذ گوناگون سرعت‌ها را اندازه‌گیری کردند. نتایج تحقیقات آنها نشان می‌دهد که افزایش سرعت در فشارهای کم برای نمونه‌های نامتراکم و با سرعت‌های پایین‌تر بیشتر است درحالی‌که نمونه‌های سخت و با

بهترین روابط تقریبی برای برآورد کردن سرعت از روی چگالی، رابطه گاردنر و همکاران (۱۹۷۴) است که عموماً برای ماسه سنگ‌های سیلیسی کلاستی مورد استفاده قرار می‌گیرد (رابطه ۲).

$$V_p = 108.9(d)^4 \quad (2)$$

که در این رابطه سرعت (V_p) برحسب متر بر ثانیه و چگالی (d) برحسب گرم بر سانتی‌متر مکعب است. نتایج تحقیقات آزمایشگاهی آنسلمیتی و ابرلی (۱۹۹۳) روی ۲۹۵ نمونه کرناته نشان می‌دهد که رابطه گاردنر و همکاران روی کرناته‌ها نیاز به تصحیح در جهت افزایش سرعت دارد زیرا همه نمونه‌های مورد آزمایش سرعتی بیشتر از سرعت محاسبه شده گاردنر و همکاران نشان می‌دهند. آنها روابط تجربی (۳) و (۴) را برای ارتباط سرعت - چگالی عرضه کردند.

$$V_p = 524(d)^{2.48} \quad (3)$$

$$V_s = 199(d)^{2.84} \quad (4)$$

علی‌رغم ضریب همبستگی زیاد، ۰٫۹۴ برای V_p و ۰٫۹۳ برای V_s ، پراکندگی قابل توجهی در اطراف منحنی بهترین برازش وجود دارد که دلیل عمده آن را می‌توان در متنوع بودن منافذ در کرناته‌ها دانست (شکل ۳).

با توجه به اینکه الگوهای لرزه‌ای بازتابی تابعی از تفاوت در پاکیری (امپدانس) صوتی‌اند و در بسیاری از تحقیقات فقط یک پارامتر مانند سرعت یا چگالی موجود است و پارامتر دیگر به‌صورت تجربی یا فرمول برآورد شده‌اند و از سوی دیگر امکان عرضه رابطه‌ای تجربی بین سرعت و چگالی، به منظور پوشش دادن اکثر سنگ‌های کرناته وجود ندارد، بنابراین اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی و تعیین ارتباط بین سرعت و چگالی، به منظور بالا بردن ضریب اطمینان ضروری است.

از نوع حفره‌ای مشاهده کردند که در یک سرعت مفروض ۵ کیلومتر بر ثانیه تخلخل می‌تواند از ۵ تا ۱۵ درصد برحسب بودن یا نبودن تخلخل حفره‌ای تغییر کند. نتایج اندازه‌گیری‌های سرعت برحسب تخلخل و بررسی مقاطع نازک میکروسکوپی از سوی آنسلمیتی و ابرلی (۱۹۹۳) بیانگر پنج نوع منفذ در نمونه‌ها بوده است. آنها انواع منافذ به شرح زیر را مورد تجزیه و تحلیل قرار داده و موقعیت نقاط در منحنی را با معادله متوسط سرعت - تخلخل مقایسه کرده‌اند.

الف - تخلخل بین بلوری و بین ذره‌ای

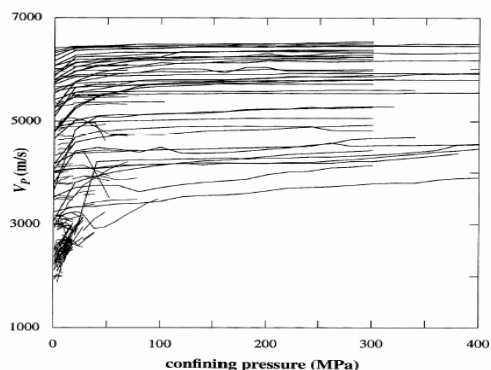
تخلخل بین‌ذره‌ای اکثراً در رسوبات با تراکم‌پذیری و سیمان‌شدگی ضعیف‌تر دیده می‌شوند و تخلخل بین‌بلوری در مراحل بعدی طی فرایند دیاژنز توسعه می‌یابد. برای مثال وقتی که بلورهای جدید نظیر دولومیت رموئدری شکل می‌گیرند که دارای رفتار پتروفیزیکی مشابه تخلخل بین‌ذره‌ای است، تجمع دانه‌های منفرد با سیمان‌شدگی ضعیف باعث کاهش سرعت می‌شود، زیرا بدون یک پیکره سخت، مدول کشسان کم است و اکثر این نمونه‌ها انحراف منفی جزئی از منحنی متوسط نمایی سرعت - تخلخل را نشان می‌دهند.

ب - میکرو تخلخل

منافذ ریز کمتر از ۱۰ میکرون در سنگ‌های کربناته با ماتریکس میکرایتی یا بدون ذرات میکرایتی فراوان است. بنابراین میکروتخلخل‌ها در کربناته میکرایتی زیاداند. بعلت عدم سیمان‌شدگی دارای بافت غیر مرتبط بوده بنابراین اثری شبیه تخلخل بین‌ذره‌ای ریزدانه در سرعت دارند. در این گونه سنگ‌ها انحراف منفی از روند منحنی متوسط سرعت - تخلخل مشاهده شده است.

ج - تخلخل قالبی

سرعت‌های بیشتر معمولاً کمتر تحت تاثیر فشار، خصوصاً در فشارهای کمتر قرار می‌گیرند (شکل ۴).



شکل ۴. نمودار سرعت امواج تراکمی بر حسب فشار موثر برای نمونه‌های بهاما و مائیل (آنسلمیتی و ابرلی، ۱۹۹۳).

بنابراین نمونه‌های با سرعت‌های کمتر دارای گرادیان سرعتی بیشتر و نمونه‌های با سرعت‌های بیشتر دارای گرادیان سرعتی کمتر با فشار هستند. افزایش سرعت‌ها در فشارهای کمتر از ۱۰۰ مگاپاسکال معمولاً به دلیل بسته شدن درزه‌ها در سنگ است. در فشارهای بیشتر از ۱۰۰ مگاپاسکال به دلیل آنکه بیشتر ترک‌ها و شکستگی‌ها تقریباً بسته می‌شوند V_p و V_s معمولاً ثابت می‌مانند و به یک حد ماکسیمم می‌رسند. ویژگی دیگر اندازه‌گیری‌های صورت‌گرفته آنسلمیتی و ابرلی، کاهش ناگهانی سرعت در فشار بحرانی است که به علت تخریب سیمان درون نمونه روی می‌دهد. سیمان عاملی است که به انتقال سیگنال صوتی کمک می‌کند. فشار بحرانی در سنگ‌های گوناگون متغیر است و بستگی به درجه سختی و تراکم بودن سنگ دارد.

۲-۵ اثر هندسه منافذ بر سرعت امواج کشسان

ماریون و جیزبا (۱۹۹۶) با اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی تعداد زیادی نمونه مغزه تأثیر وجود تخلخل‌هایی از نوع حفره‌ای را در سرعت امواج تراکمی و برشی بررسی کرده‌اند. آنها با گروه‌بندی نمونه‌ها برحسب فراوانی منافذ

تکامل دیاژنز شکل می‌گیرند. سرعت‌های زیاد نزدیک به سرعت کلسیت (۶۵۳۰ متر بر ثانیه) دارند و در قسمت بالایی منحنی تطابق سرعت - تخلخل قرار می‌گیرند.

۳ عوامل دیگر تاثیرگذار بر سرعت امواج لرزه‌ای

از عوامل دیگر تاثیرگذار بر سرعت می‌توان از عمق تدفین، تراکم، سیمان‌شدگی، اشباع، هیستریزس اشباع‌شدگی و ترشوندگی نام برد. تاثیر پارامترهای عمق تدفین و تراکم در سنگ‌های کربناته نسبت به فرایندهای دیاژنزی که تغییرات تخلخل و افزایش سختی در سنگ‌های کربناته را نتیجه می‌دهند به مراتب کمتر است. سرعت در درجه اول تحت تاثیر فرایندهای دیاژنزی پس از نهشته‌شدن رسوبات است و اثر تراکم به‌تنهایی با افزایش عمق و زمان کمتر است. پدیده‌هایی نظیر سیمانی‌شدن و انحلال که در طول مراحل اولیه تدفین رسوبات رخ می‌دهند باعث افزایش خواص کشسان سنگ می‌شوند و سرعت‌های زیادی را به‌وجود می‌آورند که لزوماً می‌بایست توابع معمول سرعت - چگالی یا سرعت - تخلخل نظیر معادلات متوسط زمانی یا معادله گاردنر برای سنگ‌های کربناته اصلاح شوند. اثرات اشباع سیالات روی سرعت امواج در محیط متخلخل به‌صورت نظری را محققانی نظیر گاسمن (۱۹۵۱)، کاستر و توکسوز (۱۹۷۴) بررسی کرده‌اند. نظریه‌های بیوت و گاسمن برای سرعت‌های امواج تراکمی در نمونه‌های اشباع کامل از سیال با گرانروی بیشتر، مقدار بیشتری را پیش‌بینی می‌کند. اگرچه در نمونه‌های اشباع جزئی با توجه به افزایش چگالی سنگ، انتظار کاهش V_p و V_s را داریم ولی دور شدن از این کاهش سرعت، به‌دلایل تاثیرات مرتبط با تخلخل، ساختار منافذ، پدیده‌های کشش سطحی بین سنگ و سیال و گرانروی سیال منافذ اتفاق می‌افتد. همچنین توزیع اشباع سیالات در خلل و فرج سنگ می‌تواند روی سرعت امواج کشسان در حالت اشباع جزئی

تخلخل‌های قالبی به‌سبب انحلال دانه‌هایی نظیر آراگونیت و کلسیت با منیزیم زیاد می‌تواند در ضمن و یا بعد از سیمان‌شدن فضای ذرات تشکیل شوند. بعد از انحلال، سنگ‌ها عمدتاً از قالب‌ها و سیمان بخش منافذ بین‌ذره‌ای تشکیل می‌شوند که دارای ضرایب کشسانی زیاد هستند. نمونه‌هایی که در آنها تخلخل قالبی غالب است دارای سرعتی بیش از سرعت معادل تخلخل کلسیت هستند و لذا انحراف مثبت از منحنی نمایی متوسط سرعت - تخلخل نشان می‌دهند. این سرعت‌های بالا به‌علت چارچوبی از سیمان و میکرایت اطراف قالب‌ها است. زمان عبور در این قالب‌ها سریع‌تر از دانه‌هایی است که تنها با اتصال نقطه‌ای، مشابه آنچه در سنگ‌های دارای تخلخل بین‌ذره‌ای وجود دارد، با هم مرتبط هستند. سنگ‌های دارای قالب‌های بزرگ‌تر نسبت به نمونه‌هایی با منافذ قالبی کوچک‌تر سرعت‌های بیشتری دارند که عمدتاً به‌دلیل وجود منافذ بزرگتر و فقدان میکرایت در فضای منافذ بین‌ذره‌ای و افزایش نفوذپذیری در اینگونه سنگ‌هاست. معمولاً در این سنگ‌های دانه‌درشت سیمان‌شدگی سریع‌اً اتفاق می‌افتد و بعد از انحلال ترکیبات اولیه، یک قالب سیمانی سرعت زیاد، به‌وجود می‌آورند.

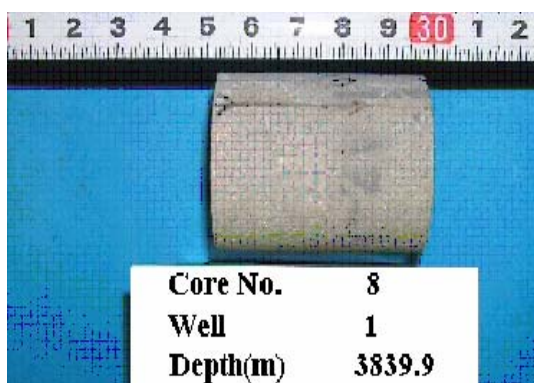
د- تخلخل درون‌دانه‌ای

فریمستون‌ها و باندستون‌ها که از سازواره‌هایی چون مرجان‌ها شکل می‌گیرند، شبکه‌ای از تخلخل را ایجاد می‌کنند که الگوی سرعت - تخلخل مشابه سنگ‌های دارای تخلخل قالبی دارند، لذا دارای سرعت‌های زیاد هستند و با افزایش تخلخل درون‌دانه‌ای، انحراف مثبت از روند عمومی منحنی سرعت - تخلخل را نشان می‌دهد

ه- نمونه‌های دارای تخلخل کم و سیمان سخت

این نمونه‌ها بلوک‌های سیمانی بزرگ با تخلخل کمتر از ۲۷ درصد را شامل می‌شوند، که در مراحل تقریباً پایانی

هیدروکربور و آب سازندی استفاده شده است.



شکل ۵. یکی از نمونه‌های تهیه شده به شکل پلاگ با قطر ۱٫۵ اینچ و طول ۲ اینچ، نمونه‌گیری به صورت عمودی صورت گرفته است.

مغزه‌های شسته شده به مدت ۲۴ ساعت در کوره حرارتی خلأ با دمای ۶۰ درجه سلسیوس قرار داده می‌شوند. تخلخل و تراوایی پارامترهای اصلی سنگ مخزن هستند. در آزمایشگاه برای محاسبه مقدار تخلخل باید دو پارامتر از سه پارامتر حجم کل، حجم منافذ خالی و یا حجم دانه‌های سنگ را اندازه‌گیری کرد. تخلخل و وزن مخصوص دانه‌ای با دستگاه Ultraporosimeter 200A اندازه‌گیری شدند. تراوایی مطلق توانایی یک نمونه برای هدایت سیال است. به عبارت دیگر می‌توان گفت تراوایی، خاصیتی از محیط متخلخل است که ظرفیت و توانایی یک محیط را برای انتقال سیال نشان می‌دهد. برای اندازه‌گیری تراوایی مطلق از دستگاه Ultrapermeameter 200A استفاده شده است. اساس کار دستگاه فوق مطابق قانون دارسی است و با اندازه‌گیری اختلاف فشار بین دو سر نمونه، دبی جریان و نیز معلوم بودن ابعاد نمونه، تراوایی محاسبه می‌شود. نمونه مورد آزمایش در داخل استوانه‌ای از جنس لاستیک مخصوص و در درون محفظه مغزه‌نگهدار جاگذاری شده است و فشار مناسب از اطراف بر نمونه وارد می‌شود. دبی جریان با یک دبی‌سنج اندازه‌گیری می‌شود.

تاثیر داشته باشد. وایلی و همکاران (۱۹۵۷) تاثیر ترشوندگی بر سرعت را برای چند نمونه ماسه‌سنگی بازسازی کردند. نتایج حاصل از آزمایش‌ها نمونه‌های مغزه خشک و نمونه‌های ترجیحاً نفت‌تر اشباع با آب نشان‌دهنده سرعت‌های تقریباً مساوی است. بنابراین ضریب بازتاب زیاد مربوط به خواص ترشوندگی ضعیف آب باعث تحت الشعاع قرار دادن زمان عبور موج از سنگ می‌شود. همچنین نمونه‌های آب‌تر اشباع با آب سرعت‌هایی نزدیک به معادله میانگین زمانی دارند که نمونه‌های ماسه‌سنگی بریبا مصداق آن است. نمونه‌های آب‌تر اشباع از نفت نیز تقریباً همان سرعت‌های مربوط به معادله میانگین زمانی را دارند، زیرا نفت فضای حلقوی را اشغال می‌کند و به استثنای جاهایی که فضای حلقوی را قطع می‌کند در مسیر سیگنال در ماتریکس سنگ قرار می‌گیرد. در آخرین حالت، نمونه‌های نفت‌تر و اشباع از نفت همان سرعت‌های مربوط به معادله میانگین زمانی را دارند زیرا نفت به راحتی سطح را تر می‌کند و گازی وجود ندارد که ضرایب بازتاب زیاد ایجاد کند.

۴ مراحل کار

۴-۱ آماده‌سازی نمونه‌ها و تعیین خواص پتروفیزیکی مراحل کار شامل تهیه نمونه پلاگ، آماده‌سازی، اندازه‌گیری خواص پتروفیزیکی و سرعت امواج تراکمی و برشی نمونه‌ها است. نمونه‌های منتخب بشکل استوانه‌ای (پلاگ) از نمونه‌های همه مغزه‌سنگ‌های کرناته مخازن هیدروکربوری واقع در جنوب ایران تهیه شده است. (شکل ۵). به منظور خارج ساختن هیدروکربورهای سبک و سنگین از داخل نمونه مغزه، آن را در تماس با یک حلال نفتی قرار می‌دهیم و پس از حل شدن مواد هیدروکربوری در حلال فوق، نمونه شسته می‌شود. در این تحقیق از سیال تولوئن و متانول برای عاری ساختن نمونه‌های پلاگ از

ارسال می‌شود و می‌توان امواج دریافتی را به کمک اسیلوسکوپ الکترونی مشاهده کرد. همچنین می‌توان به کمک نرم‌افزار SP107-V1.0 اولین رسید موج دریافتی که زمان عبور موج از فواصل فرستنده تا گیرنده است را به دست آورد. برای اندازه‌گیری در شرایط مخزن ابتدا باید دستگاه و نمونه در شرایط پایدار فشار مورد نظر قرار گیرند که این عمل مستلزم زمان نسبتاً طولانی است. سپس با تغییر فشار مؤثر از مقدار ماکسیمم فشار به سمت حداقل می‌توان شرایط متفاوت را در محیط نمونه ایجاد و زمان عبور موج را اندازه‌گیری کرد.

سرعت امواج تراکمی و برشی در دو حالت خشک و اشباع از آب اندازه‌گیری شده‌اند. اندازه‌گیری سرعت نمونه‌های فوق از فشار مؤثر حدود ۴۴۰۰ psi شروع و به فشار حدود ۸۰۰ psi رسیده است.

۳-۴ بررسی آزمایشگاهی عوامل کنترل‌کننده سرعت امواج لرزه‌ای در سنگ‌های کربناته

نتایج آزمایشگاهی ارتباط بین سرعت و تخلخل برای ۴۱ عدد نمونه در حالت‌های خشک و اشباع از آب در شرایط فشار مخزن، نشان می‌دهد که نمودار سرعت - تخلخل دارای پراکندگی زیادی است (شکل‌های ۷ و ۸). مناسب‌ترین توابع برازش‌گر برای ارتباط سرعت و تخلخل برای امواج P و S در حالت‌های خشک و اشباع به شکل توابع نمایی معادله‌های (۵) الی (۸) است.

$$V_p(\text{dry}) = 5.1467e^{-0.0130\phi} \quad (5)$$

$$V_p(\text{saturated}) = 5.5633e^{-0.0134\phi} \quad (6)$$

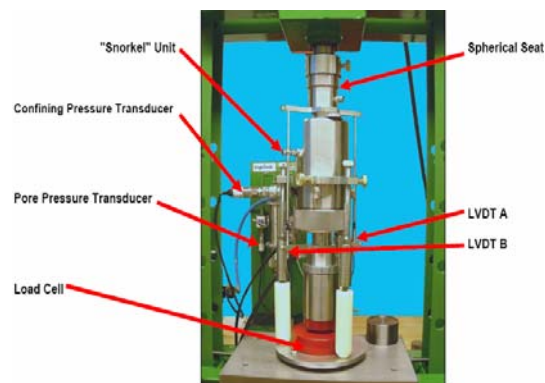
$$V_s(\text{dry}) = 2.8399e^{-0.0108\phi} \quad (7)$$

$$V_s(\text{saturated}) = 2.896e^{-0.0125\phi} \quad (8)$$

مقادیر ضریب همبستگی بین موج P و تخلخل در حالت‌های خشک و اشباع به ترتیب ۰٫۶۵ و ۰٫۷۸ هستند در حالی که این مقادیر برای موج S در دو حالت خشک و

۲-۴ اندازه‌گیری سرعت‌های V_p و V_s نمونه‌ها در حالت خشک و اشباع

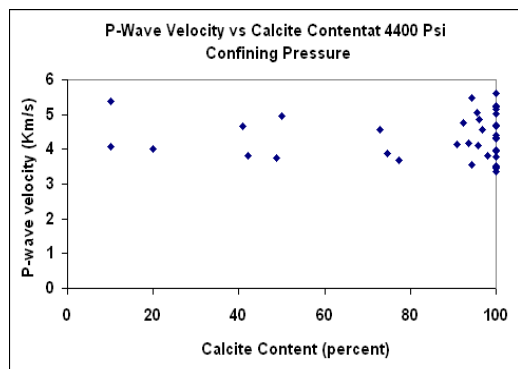
به منظور بررسی تاثیر پارامترهایی نظیر نوع و مقدار تخلخل، اشباع‌شدگی، نوع کانی و فشار روی سرعت امواج تراکمی و برشی، آزمایش اندازه‌گیری سرعت امواج تراکمی و برشی، روی نمونه‌های مغزه در فشارهای همه‌جانبه سه‌محوری در حالت خشک و اشباع از سیال صورت گرفته است. دستگاه اندازه‌گیری شامل قسمت‌هایی از قبیل: محفظه نگهدارنده نمونه، دستگاه اعمال فشار درون‌حفره‌ای، دستگاه اعمال فشار همه‌جانبه سه‌محوری، دستگاه ارسال و دریافت امواج تراکمی و برشی همچنین اسیلوسکوپ و نرم‌افزار SP107-V1.0 است (شکل ۶).



شکل ۶. بخش مغزه‌نگهدار دستگاه اندازه‌گیری سرعت امواج تراکمی و برشی

در این دستگاه نمونه در دو حالت خشک و یا اشباع از سیال سازند (آب و نفت) در محفظه نمونه‌نگهدار قرار می‌گیرد و در بالا و پایین نمونه، فرستنده و گیرنده امواج تعبیه می‌شود. سپس می‌توان به نمونه فشار همه‌جانبه تا حداکثر ۱۰۰۰۰ (psi) را اعمال کرد. به کمک دستگاه فشار درون‌منفذی نیز می‌توان فشار سیال درون مغزه را تنظیم کرد. ارسال و دریافت امواج با استفاده از دستگاه تولید امواج کشسان و به کمک فرستنده و گیرنده در ابتدا و انتهای نمونه صورت می‌گیرد. امواج تراکمی (P) و برشی (S1 و S2) با بسامد مرکزی حدود ۰/۵ مگاهرتز

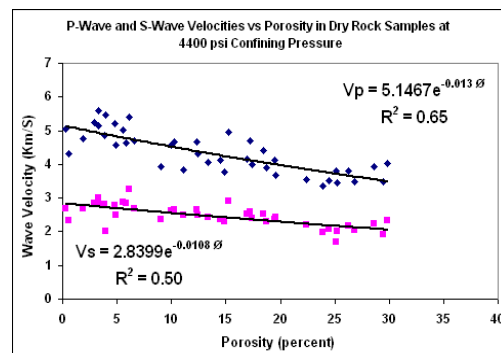
را به وجود می‌آورند که از مقادیر پیش‌بینی شده با معادله متوسط و ایلی بیشتر است. همچنین به منظور بررسی اثر نوع کانی و نقش آن در میزان پراکندگی منحنی‌های سرعت - تخلخل، میزان کانی‌های موجود در نمونه‌ها به کمک آنالیز پراش پرتو ایکس (XRD) مشخص شد. نمودار سرعت امواج تراکمی برحسب درصد کلسیت موجود در نمونه‌ها، بیانگر سرعت‌های متفاوت در نمونه‌ها با مقدار صددرصد کلسیت است، به طوری که تفاوت در سرعت حدود ۲۰۰۰ متر بر ثانیه برای نمونه‌ها با مقادیر صددرصد کلسیت مشاهده می‌شود. این مطلب بیانگر تاثیر ناچیز مقدار کلسیت در سرعت است (شکل ۹).



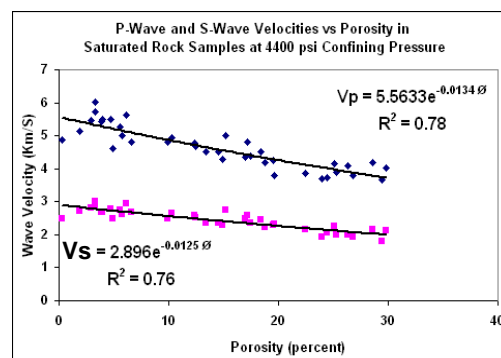
شکل ۹. نمودار سرعت امواج تراکمی برحسب درصد کلسیت

همان طوری که در مورد کانی کلسیت مطرح شد، تاثیر مقدار دولومیت در سرعت کمتر است و به نظر می‌رسد که سرعت بیشتر وابسته به نوع دولومیت باشد. دولومیت‌ها با بافت‌های حفظ‌شده دارای سرعت‌های زیاد هستند در حالی که بافت دولومیتی شکری، تخلخلی از نوع بین‌بلوری ایجاد می‌کند و باعث کاهش سرعت می‌شود. علاوه بر آزمایش‌های XRD به منظور تعیین نوع کانی و بررسی تاثیر آن در سرعت، آزمایش‌های تعیین چگالی دانه‌ای صورت گرفت که معرف نوع کانی غالب در سنگ‌ها است. نمودار سرعت امواج تراکمی برحسب چگالی دانه‌ای، موکد این مطلب است که تاثیر نوع کانی در کنترل خواص کشسانی قابل ملاحظه نیست (شکل ۱۰).

اشباع به ترتیب برابر ۰٫۵۰ و ۰٫۷۶ هستند. همان طوری که مشاهده می‌شود، ضریب همبستگی بین سرعت موج تراکمی و تخلخل در حالت‌های خشک و اشباع بیشتر از ضریب همبستگی بین سرعت موج برشی و تخلخل است.



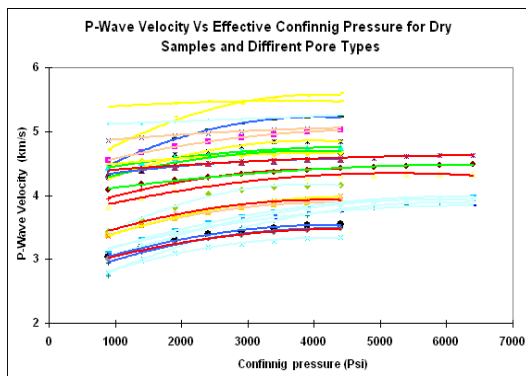
شکل ۷. نمودار سرعت امواج تراکمی و برشی برحسب تخلخل برای نمونه‌های سنگ کربناته خشک



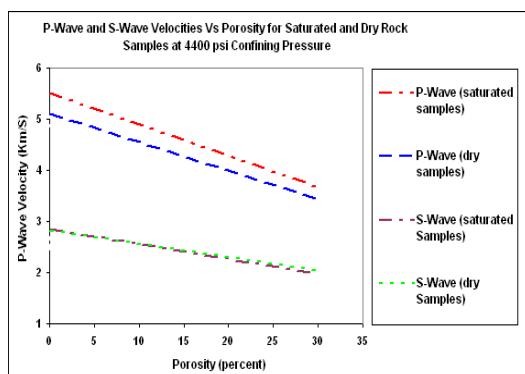
شکل ۸. نمودار سرعت امواج تراکمی و برشی برحسب تخلخل برای نمونه‌های سنگ کربناته در حالت اشباع از آب

همان طوری که در شکل‌های ۷ و ۸ مشاهده می‌شود تفاوت در سرعت برای تخلخل‌های ثابت به حدود ۱۵۰۰ متر بر ثانیه می‌رسد و برعکس، در یک سرعت ثابت مفروض، تغییرات تخلخل تا ۲۰ درصد نیز می‌رسد. این تفاوت با توجه به تغییرات سرعت در کانی‌های اصلی سنگ‌های کربناته یعنی دولومیت و کلسیت بسیار زیاد است. این تغییرات را می‌توان به توانایی سنگ‌های کربناته در تشکیل سیمان و شکل منافذ که باعث افزایش خصوصیات کشسانی سنگ، بدون پرکردن منافذ آن می‌شوند، نسبت داد. مدول‌های کشسان زیاد سرعت‌هایی

غیر قابل رویت بوده‌اند.

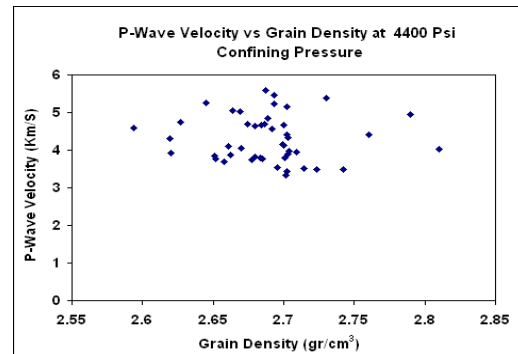


شکل ۱۱. نمودار سرعت امواج تراکمی برحسب فشار موثر



شکل ۱۲. مقایسه سرعت‌های امواج تراکمی و برشی در حالت‌های خشک و اشباع

در شکل ۱۳ ارتباط سرعت امواج تراکمی و تخلخل برای انواع تخلخل‌های غالب مشخص شده است و سرعت‌ها، با نمودار سرعت حاصل از معادله متوسط زمانی برای کلسیت و دولومیت مقایسه شده‌اند. همان‌طوری که مشاهده می‌شود نمونه‌های با تخلخل حفره‌ای، دارای سرعت‌هایی بیشتر از سرعت معادل تخلخل کانی‌های کلسیت و دولومیت هستند. این سرعت‌های زیاد به دلیل چارچوبی از سیمان و میکرایت اطراف حفره‌ها است. زمان عبور در این قالب‌ها سریع‌تر از دانه‌هایی است که فقط با اتصال نقطه‌ای نظیر سنگ‌های با تخلخل بین‌ذره‌ای به هم مرتبط شده‌اند. همچنین نمونه‌های دارای تخلخل‌های حفره‌ای ریز دارای سرعت‌هایی کمتر از تخلخل



شکل ۱۰. نمودار سرعت امواج تراکمی برحسب چگالی دانه‌ای

برای مثال در چگالی دانه‌ای ۲٫۷ گرم بر سانتی‌متر مکعب سرعت از حدود ۳۰۰۰ الی ۵۷۰۰ متر بر ثانیه تغییر می‌کند. این تغییرات در سرعت برای سنگ‌های دارای ترکیب شیمیایی یکسان زیاد است. بنابراین با توجه به مطالب فوق می‌توان عامل اصلی پراکندگی ارتباط سرعت - تخلخل را شکل هندسی خلل و فرج دانست.

در ادامه برای همه نمونه‌ها، نمودار تغییرات سرعت تراکمی برحسب فشار موثر در شکل ۱۱ عرضه شد. در همه حالت‌ها ارتباط سرعت با فشار با توابع نمایی به شکل $y=ax^b$ برازش مناسبی را نشان می‌دهد. با افزایش فشار سرعت افزایش می‌یابد و همان‌طوری که انتظار می‌رود، روند افزایش سرعت با افزایش فشار کاهش می‌یابد. همچنین مقایسه تغییرات سرعت امواج تراکمی و برشی برحسب تخلخل برای نمونه‌های خشک و اشباع از آب در فشار مخزن در شکل ۱۲ آمده است. همان‌طوری که مشاهده می‌شود تغییرات سرعت موج تراکمی نمونه‌ها در حالت‌های خشک و اشباع از آب در مقایسه موج برشی دارای تغییرات بیشتری است. به منظور بررسی تأثیر شکل هندسی خلل و فرج روی ارتباط سرعت - تخلخل، تخلخل‌های غالب موجود در نمونه‌ها با بررسی پتروگرافی مقاطع نازک میکروسکوپی آنها مشخص شد. در نمونه‌ها تخلخل‌های غالب شامل حفره‌ای، حفره‌ای - شکاف‌دار، شکاف‌دار، حفره‌های بسیار ریز، بین‌دانه‌ای و نیز تخلخل

حفره‌هاست.

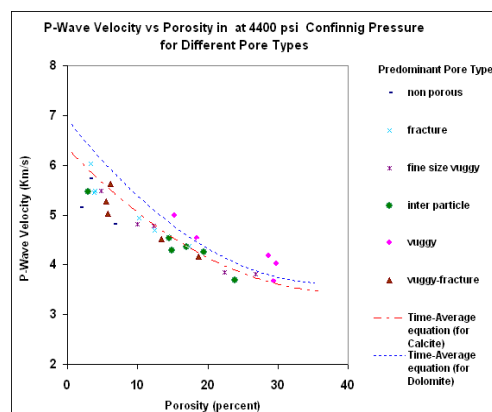
نمونه‌های دارای تخلخل حفره‌ای ریز دارای سرعت کمتر از تخلخل حفره‌ای هستند و تقریباً از معادله متوسط زمانی برای دولومیت پیروی می‌کنند.

سنگ‌های دارای تخلخل غیرقابل رویت انحراف منفی از معادله متوسط زمانی برای کانی‌های دولومیت و کلسیت نشان داده‌اند و دارای سرعت‌هایی کمتر از نمونه‌های با تخلخل حفره‌ای و تخلخل‌های حفره‌ای ریز بوده‌اند.

نمودار سرعت امواج کشسان برحسب چگالی موکد این مطلب است که تاثیر نوع کانی در کنترل خواص کشسان، قابل ملاحظه نیست.

عامل اصلی پراکندگی در نمودارهای سرعت امواج برحسب تخلخل را می‌توان نوع منافذ تشکیل‌دهنده تخلخل در سنگ‌های کربناته دانست.

حفره‌ای‌اند و تقریباً از معادله متوسط زمانی برای دولومیت پیروی می‌کنند. سنگ‌های دارای تخلخل غیرقابل رویت درمقاطع نازک میکروسکوپی، انحراف منفی از معادله متوسط زمانی برای کانی‌های دولومیت و کلسیت نشان داده‌اند و دارای سرعت‌هایی کمتر از نمونه‌های با تخلخل حفره‌ای و تخلخل‌های حفره‌ای ریز بوده‌اند.



شکل ۱۳. نمودار سرعت امواج تراکمی و تخلخل برای انواع تخلخل‌های غالب در سنگ‌های کربناته و مقایسه با نمودار متوسط زمانی برای کلسیت و دولومیت

منابع

- Anselmetti, F. S., and Eberli, G. P., 1993, Controls on sonic velocity in carbonate rocks, *Pure Appl. Geophys.*, **141**, 287- 323.
- Anselmetti, F. S., and Eberli, G. P., 1999, 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 Bull.*, **83**(3), 450-466.
- Eberli, G. P., Anselmetti, F. S., and Incze, M. L., 2003, Factors controlling elastic properties in carbonate sediments and rocks, *Leading Edge*, 654-660.
- Eshelby, J. D., 1957, The determination of the elastic field of an ellipsoidal inclusion and related problems, *Proc. Roy. Soc. London, A* **241**, 376-396.
- Gardner, G. H. F., Gardner, L. W., and Gregory, A. R., 1974, Formation velocity and density, the diagnostic basics for stratigraphic traps, *Geophysics*, **39**, 770-780.
- Gassmann, F., 1951, "Über die elastizität poröser medien", *Veiertel. Natur. Gesel. Zürich*, **96**, 1-23.
- Hill, R., 1965, A self-consistent mechanics of composite materials, *J. Mech. Phys. Solids*, **13**, 213-222.
- King, M. S., 1966, wave velocities in rocks as a function of changes in overburden pressure

۵ نتیجه‌گیری

سرعت امواج کشسان در سنگ‌های کربناته به پارامترهای نظیر دیاژنز، 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.

در نمودارهای سرعت امواج کشسان V_p و V_s برحسب تخلخل در نمونه‌های مورد بررسی تفاوت در سرعت در تخلخل‌های ثابت به حدود ۱۵۰۰ متر بر ثانیه می‌رسد و برعکس، در یک سرعت ثابت مفروض، تغییرات تخلخل تا ۲۰ درصد نیز است.

نمونه‌های دارای تخلخل حفره‌ای دارای سرعت‌های بیشتر نسبت به سرعت‌های حاصل از معادله متوسط زمانی برای کانی‌های کلسیت و دولومیتی هستند، سرعت زیاد به دلیل وجود چارچوبی از سیمان و میکرایت اطراف

- and pore fluid saturants, *Geophysics*, **31**, 50-73
- Kuster, G. T., and Toksöz, M. N., 1974, Velocity and attenuation of seismic waves in two-phase media. Part 1. Theoretical formulations, *Geophysics*, **39**, 587-606.
- Marion, D., and Jizba, D., 1996, Sonic velocity in carbonate sediments and rocks, In Palaz, I., and Marfurt, K. J., Ed., *Carbonate Seismology*, SEG Geophys. Devel. Ser., **6**, 75-93.
- Marion, D., and Zinszner, B., 1991, Core analysis to calibrate geophysical interpretation, in *Proceeding, 2nd Society of Core Analysis Symposium*, 17-34.
- Pickett, G. R., 1963, Acoustic character logs and their application in formation evaluation. *Trans, AIME*, **15**, 659-667.
- Raiga-Clemenceau, J., Martine, J. P., and Nicoletis, S., 1986, The concept of acoustic formation factor for more accurate porosity determination from sonic transit time data. *The Log Analyst* (Jan – Feb.), 54-59.
- Walsh, J., 1965, The effect of cracks on the compressibility of rocks, *J. Geophys. Res*, **70**, 381-389.
- Watt, J. P., Davies, G. F., and O'Connell, R. J., 1976, The elastic properties of composite materials, *Rev. Geophys. Space Phys*, **14**, 541-563.
- Wyllie, M. R. J., Gregory, A. R., and Gardner, L. W., 1956, Elastic wave velocities in heterogeneous and porous media, *Geophysics*, **21**, 41-70.
- Wyllie, M. R. J., Gregory, A. R., and Gardner, L. W., 1957, An investigation of factors affecting elastic wave velocities in porous media, *Geophysics*, **23**, 459-493.