



Original Research

Petroleum Research

Petroleum Research, 2025(December-January), Vol. 35, No. 144, 21-23

DOI: 10.22078/pr.2025.5747.3556

Elucidating the Distinct Roles of Compressional and Shear Waves in Characterizing the Reservoir Properties of the Permian-Triassic Carbonate Formations in the Persian Gulf

Bahareh Meidani, Vahid Tavakoli and Saman Darvish Bastami

School of Geology, College of Science, University of Tehran, Iran

vtavakoli@ut.ac.ir

DOI: 10.22078/pr.2025.5747.3556

Received: September 07, 2025

Modify Date: December 08, 2025

Accepted: November 01, 2025

Introduction

Well logging provides one of the most powerful tools for reservoir characterization, offering continuous and quantitative information on rock and fluid properties. Moreover, among various logs, sonic logs play a pivotal role by recording compressional (V_p) and shear (V_s) wave velocities, which are closely linked to rock dynamics, lithology, and the pore-permeability system. In addition, these data are particularly valuable in carbonate reservoirs, where heterogeneity, complex pore networks (interparticle, moldic, and fracture porosity), and variable geomechanical behavior complicate reservoir evaluation. Furthermore, the correlation between acoustic velocities and reservoir properties such as porosity, permeability, and mineral composition has been widely applied to improve reservoir modeling and guide exploration and production strategies.

Compressional and shear waves provide complementary information: while compressional waves propagate through solids, liquids, and gases, shear waves are restricted to solids and are therefore more sensitive to lithology and pore structure. Also, previous studies have investigated the empirical relationships between these waves. Pickett [1] suggested a near-constant ratio between V_p and V_s across different lithologies, whereas Castagna et al. [2] developed predictive equations for V_s from V_p in various rock types, with later work confirming their

applicability to carbonate systems. More recent studies [3] emphasized the utility of V_p - V_s ratios in assessing micro-porosity, compaction trends, and flow unit identification in carbonates.

Despite these advances, few studies have explicitly examined the individual and combined effects of key reservoir parameters on both V_p and V_s , particularly in the carbonate reservoirs of the Persian Gulf. The present study addresses this gap by investigating the relationship between porosity, permeability, matrix density, lithology, and pore type with compressional and shear wave velocities in the Permian-Triassic Kangan and Dalan formations. The novelty of this work lies in the simultaneous comparison of V_p and V_s responses and the delineation of their distinct roles in reflecting reservoir quality. The integrated use of sonic log data and laboratory measurements provides a robust basis for identifying the dominant controls on acoustic behavior and enhances the applicability of sonic data in log interpretation and carbonate reservoir modeling.

Materials and Methods

This study utilized 418 m of core, 1,388 plug samples, 1,575 thin sections (prepared approximately every 25 cm), and 1,388 porosity-permeability measurements from a well located in the central Persian Gulf. Plug samples were cleaned using the Soxhlet method and subsequently prepared for porosity and permeability

measurements, determined by Boyle's law and Darcy's law, respectively. Matrix density was estimated from dry weight calculations and porosity data.

Half of each thin section was stained with Alizarin Red solution to distinguish between limestone and dolomite. Moreover, mineral composition and dominant pore type were identified through visual estimation and comparison with standard petrographic charts. In addition, data were recorded either as estimated percentages (for mineral abundance and porosity) or on a semi-quantitative scale from 0 to 4 (for the intensity of diagenetic processes such as dissolution, cementation, and dolomitization). Also, this approach follows standard methodologies for petrographic analysis of carbonate rocks and provided a basis for integrating microscopic observations with petrophysical results.

Wireline log data comprised 402 m of gamma ray, sonic, and density logs. Moreover, the acoustic data were obtained from a Dipole Sonic Imager (DSI) tool operated by Schlumberger. Furthermore, this device generates a dipole acoustic source in contact with the borehole wall, enabling the simultaneous acquisition of compressional (V_p) and shear (V_s) wave velocities. Moreover, travel times were recorded by multiple receivers at different offsets and subsequently converted to velocity after initial processing. In addition, a key advantage of the DSI over conventional sonic logs is its ability to directly measure V_s in carbonate formations, where strong attenuation often prevents reliable recording.

To ensure depth consistency, the borehole gamma log was depth-matched to core gamma measurements based on correlation of gamma-ray patterns, thereby correcting depth shifts introduced during drilling and core retrieval. Following this calibration, all core-derived petrophysical and petrographic data were integrated with the log dataset for subsequent analysis.

Results and Discussion

Analysis of the dataset demonstrates that lithology, porosity, pore type, permeability, and matrix density exert distinct influences on compressional (V_p) and shear (V_s) wave velocities. The average velocities were measured as 5058.11 m/s for V_p and 2802.03 m/s for V_s . Moreover, dolomitic samples, characterized by higher matrix density (2.83 g/cm^3), exhibit greater velocities for both waves compared to limestones (2.72 g/cm^3), despite their higher average porosity.

The relationship between wave velocities and dolomite content indicates that up to ~50% dolomite, V_p increases moderately, while V_s remains nearly constant. Furthermore, at higher dolomite proportions, V_p decreases whereas V_s shows no significant change. Moreover, increasing dolomite content is also accompanied by enhanced permeability. Also, porosity exhibits an inverse relationship with velocity

for both waves, with a stronger reduction observed in V_s . In addition, pore-type analysis shows maximum velocities in interparticle porosity and minimum values in moldic porosity, the latter being dominant in limestones.

Matrix density displays a direct relationship with velocity: as density increases, both V_p and V_s increase proportionally, indicating similar sensitivity of both waves to this parameter. In contrast, permeability exerts a nonlinear effect. At values below 5 mD, both V_p and V_s decrease with increasing permeability, reflecting the absence of a continuous pore network. Beyond this threshold, V_s increases with permeability, while V_p shows a slight rise up to ~100 mD followed by a decline.

Overall, these results demonstrate that the controlling parameters affect compressional and shear waves differently. Moreover, lithology and pore type emerge as the dominant controls on acoustic velocity in the Kangan and Dalan carbonate reservoirs, whereas permeability introduces more complex, nonlinear effects.

The results indicate that compressional (V_p) and shear (V_s) wave velocities are systematically higher in dolomitic samples than in limestones. Furthermore, this trend is primarily attributed to the higher matrix density of dolomite (2.83 g/cm^3) compared to limestone (2.72 g/cm^3). Although dolomitic samples generally show higher average porosity, this does not reduce their velocity, confirming that the effect of matrix density and framework stiffness outweighs porosity. The positive relationship between matrix density and both V_p and V_s contrasts with the negative relationship observed with porosity, where increasing pore volume reduces velocity. The velocity reduction in limestones is further linked to moldic porosity, which introduces discontinuities in the rock fabric. Furthermore, shear waves are more strongly affected by pore type than compressional waves, as evident from the greater velocity drop in moldic porosity. In contrast, samples with interparticle porosity display the highest velocities due to their lower pore volume, while vuggy porosity yields slightly higher velocities than moldic porosity because of its smaller volume fraction.

The relationship between permeability and acoustic velocity is nonlinear. At permeabilities below 5 mD, V_p decreases markedly as pore connections are not fully developed, causing the wave to traverse the solid framework. At higher permeabilities, V_s shows an increasing trend, while V_p rises slightly up to ~100 mD and then decreases. This complex behavior reflects the greater abundance of dolomite in high-permeability intervals, which counteracts the velocity-reducing effect of porosity. Since shear waves do not propagate through pore fluids, their response is less sensitive to pore connectivity, explaining the weaker correlation

with permeability.

These findings are consistent with previous research. Salih et al. [5] reported higher velocities in dolomites due to increased matrix density and framework stiffness. The nonlinear link between permeability and velocity agrees with the observations of Archilha et al. [6], who showed that acoustic velocity depends not only on permeability magnitude but also on pore network connectivity and dolomite proportion [7, 8].

Conclusions

This study investigated the influence of key reservoir parameters on compressional (V_p) and shear (V_s) wave velocities in the carbonate reservoirs of the Kangan and Dalan formations. In addition, the results highlight lithology as the dominant control on acoustic behavior, with moldic porosity in limestones exerting the strongest velocity-reducing effect due to reduced density and structural discontinuities, whereas intercrystalline porosity in dolomites maintained matrix continuity and resulted in higher velocities. The relationship between permeability and velocity followed a nonlinear trend best described by a logarithmic model. Moreover, dolomite content enhanced both V_p and V_s up to ~70%, beyond which the effect approached saturation. Anhydrite contributed positively to velocity at intermediate concentrations but reduced it at higher amounts owing to increased heterogeneity.

The findings underscore the importance of distinguishing between compressional and shear wave responses when evaluating carbonate reservoirs. While V_s is more sensitive to lithological variations and pore type, V_p primarily reflects porosity and fluid effects. This interpretive distinction provides new insight into the complementary roles of V_p and V_s in assessing reservoir quality. The integrated approach of combining core measurements, petrographic analysis, and sonic log data enhances the reliability of well-log interpretation and reservoir modeling in heterogeneous carbonate systems.

Future studies should examine the combined influence of pressure and temperature on acoustic responses, as well as spatial variability of reservoir parameters at the field scale. Such investigations would contribute to

more robust predictive models for carbonate reservoir behavior and improve strategies for hydrocarbon exploration and production.

References

1. Pickett, G. R. (1963). Acoustic Character Logs and Their Applications in Formation Evaluation. *Journal of Petroleum Technology*, 15(06), 659–667. doi.org/10.2118/452-PA
2. Castagna, J. P., Batzle, M. L., & Eastwood, R. L. (1985). Relationship between compressional-wave and shear-wave velocities in elastic silicate rocks. *Geophysics*, 50(4), 571–581. doi.org/10.1190/1.1441933
3. Neto, I. A. L., Misságia, R. M., Ceia, M. A., & Archilha, N. L. (2015). Carbonate pore system evaluation based on prediction of microporosity and S-wave velocity under pressure effects. 77th EAGE Conference and Exhibition 2015: Earth Science for Energy and Environment, 1946–1950. doi.org/10.3997/2214-4609.201413152
4. Salih, M., El-Husseiny, A., Reijmer, J. J. G., Eltom, H., & Abdelkarim, A. (2023). Factors controlling sonic velocity in dolostones. *Marine and Petroleum Geology*, 147, 105954. doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2022.105954
5. Archilha, N. L., Missagia, R., Hollis, C., de Ceia, M. A. R., McDonald, S. A., Lima Neto, I. A., Eastwood, D. S., & Lee, P. D. (2016). Permeability and acoustic velocity controlling factors determined from X-ray tomography images of carbonate rocks. *AAPG Bulletin*, 100(8), 1289–1309. doi.org/10.1306/02251615044
6. Leisi, A., & Falahat, R. (2021). Investigation of some porosity estimation methods using seismic data in one of the South Iranian oil fields. *Journal of Petroleum Research*, 31(119), 88–97. doi.org/10.22078/pr.2021.4438.3007
7. Tofighi, F., Armani, P., Chehrazai, A., & Alimoradi, A. (2021). Comparison of the function of conventional neural networks for estimating porosity in one of the Southeastern Iranian oil fields. *Journal of Petroleum Research*, 31(118), 90–105. doi.org/10.22078/pr.2021.4318.2957

تبیین نقش متفاوت امواج تراکمی و برشی در بازتاب ویژگی‌های مخزنی سازندهای کربناته پرمین-تریاس خلیج فارس

بهاره میدانی، وحید توکلی* و سامان درویش بسطامی

دانشکده زمین‌شناسی، دانشکده‌گان علوم، دانشگاه تهران، تهران، ایران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۶/۱۶ تاریخ آخرین تغییرات: ۱۴۰۴/۰۹/۱۷ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۸/۱۰

چکیده

چاه‌پیمایی یکی از ابزارهای کلیدی در ارزیابی مخازن کربناته است و به‌ویژه داده‌های صوتی با ارائه اطلاعات ارزشمند درباره ویژگی‌های سنگ و سیال، جایگاه مهمی در مطالعات پتروفیزیکی و ژئوفیزیکی یافته‌اند. در همین راستا، این پژوهش با تمرکز بر سازندهای کنگان و دالان در خلیج فارس، به مقایسه رفتار امواج تراکمی و برشی و بررسی نقش هر کدام در ارزیابی کیفیت مخزنی پرداخته و ارتباط میان سنگ‌شناسی، نوع و میزان تخلخل، تراوایی و چگالی ماتریس با سرعت امواج را تحلیل کرده است. داده‌های به‌کاررفته شامل ۴۱۸ m مغزه، ۱۳۸۸ نمونه پلاگ و مجموعه‌ای از آنالیزهای پتروفیزیکی و زمین‌شناسی از یک چاه هدف می‌باشد. نتایج نشان می‌دهد که سنگ‌شناسی عامل اصلی کنترل‌کننده سرعت امواج است. تخلخل‌های قالبی در سنگ‌های آهکی با کاهش چگالی و ایجاد ناپیوستگی ساختاری موجب افت سرعت شده‌اند، در حالی که تخلخل‌های بین‌بلوری در دولومیت‌ها با حفظ پیوستگی ماتریس، سرعت بالاتری ایجاد کرده‌اند. هر دو نوع موج تراکمی و برشی در تراوایی‌های پایین‌تر از حدود ۵ mD سرعت بیشتری دارند. با افزایش تراوایی تا این مقدار، سرعت کاهش یافته و سپس روند افزایشی ملایمی مشاهده می‌شود. در تراوایی‌های پایین، پیوستگی بالای چارچوب سنگ موجب افزایش سرعت، و در تراوایی‌های بالاتر، شکل‌گیری مسیرهای جریان پیوسته موجب بازگشت تدریجی سرعت امواج می‌گردد. همچنین افزایش درصد دولومیت تا حدود ۷۰٪ موجب افزایش پیوسته سرعت گردید، اما پس از این آستانه اثر آن به حالت اشباع رسید. حضور انیدریت در مقادیر متوسط اثر مثبت داشت، در حالی که در مقادیر بالا با ایجاد ناهمگنی موجب کاهش سرعت شد. مقایسه دو نوع موج نشان داد که امواج برشی نسبت به تغییرات سنگ‌شناسی حساس‌تر هستند، در حالی که امواج تراکمی عمدتاً تحت تأثیر تخلخل و ترکیب سیال قرار دارند. این یافته‌ها بر اهمیت استفاده همزمان از داده‌های تراکمی و برشی در تحلیل داده‌های چاه‌پیمایی و بهبود مدل‌سازی و ارزیابی کیفی سازندهای کربناته تأکید دارد.

کلمات کلیدی: سازندهای کنگان و دالان، امواج تراکمی و برشی، ارتباط سنگ‌شناسی-سرعت، سرشت‌نمایی مخزن، تطابق سرعت صوت و تخلخل.

*مسئول مکاتبات

آدرس الکترونیکی vtavakoli@ut.ac.ir

شناسه دیجیتال: (DOI: 10.22078/pr.2025.5747.3556)

مقدمه

چاه‌پیمایی به‌عنوان یکی از ابزارهای کلیدی در ارزیابی پتروفیزیکی مخازن هیدروکربنی، امکان دستیابی به داده‌های پیوسته و عددی از ویژگی‌های سنگ‌های مخزن را فراهم می‌کند [۱]. در میان نگارهای متنوع چاه‌پیمایی، نگارهای صوتی با اندازه‌گیری سرعت امواج تراکمی و برشی نقش محوری در تعیین پارامترهای دینامیکی سنگ، شناسایی نوع سنگ‌شناسی، و توصیف سیستم تخلخل-تراوایی ایفا می‌کنند. این داده‌ها به‌ویژه در مخازن کربناته که به دلیل ناهمگنی ساختاری، تنوع سیستم‌های تخلخل (مانند تخلخل بین‌دانه‌ای، قالبی، و شکستگی) و پیچیدگی رفتار ژئومکانیکی شناخته می‌شوند، از اهمیت راهبردی برخوردارند [۲]. تحلیل همبستگی بین سرعت امواج صوتی و ویژگی‌های مخزنی (مانند تخلخل، تراوایی، و ترکیب کانی‌شناسی) امکان مدل‌سازی دقیق‌تر مخزن و بهینه‌سازی استراتژی‌های اکتشاف و تولید را فراهم می‌سازد. سرعت امواج از طریق چاه‌پیمایی صوتی در داخل چاه‌ها قابل محاسبه است. این سرعت به عوامل متعدد زمین‌شناسی مانند سنگ‌شناسی، چگالی کل، تخلخل، شکل هندسی فضاها، سیال سازندی و درجه سیمان‌شدگی بستگی دارد [۳-۵]. موج تراکمی از جامد، مایع و گاز و موج برشی فقط از جامد عبور می‌کند، لذا اطلاعات حاصل از آن‌ها نیز متفاوت است. به دلیل تفاوت این امواج و تأثیرات گوناگونی که این دو موج نسبت به خواص کشسان سنگ نشان می‌دهند، محققین همواره در تلاشند هر دو موج ثبت و بررسی گردد [۶]. تاکنون تحقیقات متعددی بر روی امواج صوتی توسط محققین انجام شده و اطلاعات گوناگونی در زمینه‌های مختلف از این امواج به دست آمده است. پیکت با انجام مطالعات گوناگون بر سنگ‌های مختلف به این نتیجه رسید که سرعت امواج برشی در سنگ‌های مختلف، ضریب ثابتی از سرعت موج تراکمی در

آن‌ها می‌باشد [۳]. همچنین، کاستانگا و همکاران به منظور پیش‌بینی دقیق سرعت موج برشی از داده‌های موج تراکمی، مطالعات مختلفی انجام دادند و معادلات گوناگونی برای سنگ‌شناسی‌های مختلف در سازندهای کربناته ارائه نمودند [۷]. باستوس و همکاران سرعت امواج تراکمی و برشی را در تعداد زیادی از نمونه‌های آهکی و دولومیتی بررسی کردند و نتیجه گرفتند که معادله کاستانگا و همکاران برای نمونه‌های آهکی مناسب‌تر است [۸]. در سال‌های اخیر، نتو و همکاران با بررسی امواج برشی و تراکمی، نسبت‌های این امواج به یکدیگر، بررسی فشردگی‌های فیزیکی و شیمیایی در مخازن کربناته و همچنین سیستم فضاها، خالی موجود، مقادیر ریزتخلخل‌های مخازن را بررسی و پیش‌بینی کرده‌اند [۹]. همچنین، تیلت و همکاران با بررسی امواج تراکمی و برشی به شناسایی واحدهای جریان در مخازن کربناته پرداختند و الگو و نقشه زیرسطحی از مخزن مورد مطالعه ارائه دادند [۱۰]. با وجود تمامی این تحقیقات، مطالعات اندکی در خصوص تأثیر هر یک از عوامل مخزنی و نیز تأثیر متقابل آنان بر سرعت امواج تراکمی و برشی انجام شده است. این مطالعات در کشور ما نیز بسیار اندک است. آصف و همکاران تأثیر همزمان تخلخل و مقدار رس بر سرعت موج برشی در سنگ‌های شیلی را بررسی کردند. در این پژوهش، داده‌های تجربی بیش از ۱۸۰ نمونه سنگ شیلی از منابع مختلف مورد تحلیل قرار گرفت و مشخص شد که تخلخل مهم‌ترین پارامتر مؤثر بر سرعت موج برشی محسوب می‌شود. بر اساس تحلیل‌های آماری، معادله‌ای ارائه شد که با دقت بالا قادر به تخمین سرعت موج برشی در سنگ‌های شیلی است. این مدل نشان می‌دهد که حتی در تخلخل یکسان، تغییرات محتوای رس منجر به مقادیر متفاوت سرعت موج می‌شود [۱۱]. جباری و همکاران از روش وارون‌سازی پیش از برانبارش برای شناسایی محدوده مخزنی در سازندهای غار-آسماری و جهرم استفاده

واحدهای کربناته پرمین-تریاس در خلیج فارس، از مهم‌ترین مخازن گازی ایران و خاورمیانه محسوب می‌شوند. این سازندها به دلیل ناهمگنی زیاد، وجود انواع رخساره‌های رسوبی و فرآیندهای دیاژنزی متنوع، مجموعه‌ای پیچیده از سنگ‌های آهکی، دولومیتی و انیدریتی را شامل می‌شوند که انواع مختلف تخلخل در آنان مشاهده می‌گردد. چنین تنوعی، بررسی رفتار امواج تراکمی و برشی را در این سازندها از اهمیت ویژه‌ای برخوردار می‌سازد، زیرا امکان تحلیل تفصیلی تأثیر سنگ‌شناسی، نوع تخلخل و تغییرات دیاژنزی بر سرعت امواج و در نتیجه بر کیفیت مخزنی را فراهم می‌کند. افزون بر این، جایگاه کلیدی این سازندها در تأمین بخش عمده‌ای از گاز طبیعی کشور، ضرورت مطالعه دقیق ویژگی‌های فیزیکی و پتروفیزیکی آن‌ها را دوچندان می‌نماید. از سوی دیگر، تکرار این سازندها در میداين متعدد منطقه موجب می‌شود که نتایج این پژوهش قابلیت تعمیم به سایر مخازن کربناته خلیج فارس را نیز داشته باشد.

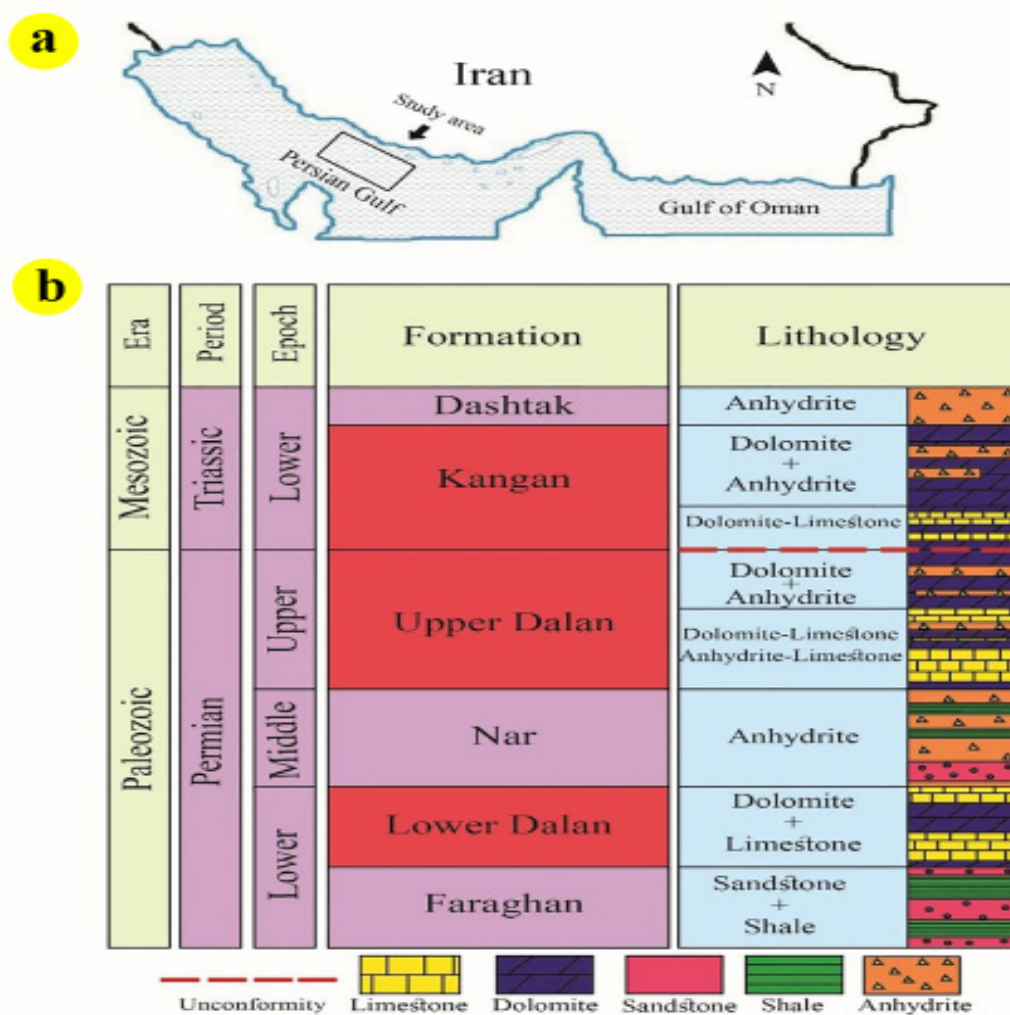
زمین‌شناسی منطقه

سازند کنگان به سن تریاس زیرین همراه با سازند زیرین خود، سازند دالان که در گروه دهرم جای دارد، یکی از مهم‌ترین سنگ‌های مخزن کربناته در جنوب غربی ایران و خلیج فارس هستند [۱۴ و ۱۵]. این سازندها هم‌ارز سازند خوف در کشورهای عربی و حاشیه جنوبی خلیج فارس بوده و با بسته‌شدن اقیانوس نئوتتیس و در زمان پرمین پایانی و تریاس پیشین نهشته شده‌اند [۱۶ و ۱۷]. توالی‌های سازند خوف و معادل‌های زمانی آن در حاشیه غیرفعال قاره‌ای اقیانوس نئوتتیس به واسطه عملکرد نیروهای زمین‌ساختی طی پیشروی سطح آب دریا و فرونشینی کف حوضه نهشته شده‌اند [۱۵، ۱۸ و ۱۹]. اتصال هیدرولیکی واحدهای مخزنی سازندهای کنگان و دالان سبب شده است تا این واحدها به عنوان یک مخزن گازی واحد در نظر گرفته شوند

کردند. نتایج نشان داد که در سازند غار-آسماری کاهش چگالی و مقاومت‌های تراکمی و برشی همراه با تخلخل بالا مشاهده می‌شود، در حالی که این پارامترها در سازند جهرم روند معکوسی دارند. با به کارگیری نمودارهای مقاومت صوتی و نسبت سرعت موج تراکمی به برشی، حضور هیدروکربن در سازند غار-آسماری به اثبات رسید. این مطالعه کارایی روش‌های ترکیبی را در شناسایی دقیق سیالات مخزنی نشان داد [۱۲]. کاظم زاده و همکاران، ارتباط بین سرعت امواج تراکمی و تخلخل در سنگ‌های کربناته را با دو روش طبقه‌بندی مبتنی بر واحدهای جریان هیدرولیکی و مقادیر انحراف سرعت لرزه‌ای تحلیل کردند. نتایج تحقیق آن‌ها نشان داد که روش انحراف سرعت لرزه‌ای با ضریب همبستگی ۹۳٪ نسبت به روش واحدهای جریان هیدرولیکی با ضریب همبستگی ۶۷٪، دقت بالاتری در تخمین سرعت امواج تراکمی دارد. این مطالعه مؤثر بودن طبقه‌بندی بر اساس انحراف سرعت لرزه‌ای را در تحلیل خصوصیات دینامیکی سنگ‌های کربناته نشان می‌دهد [۱۳]. بر همین اساس، هدف اصلی این پژوهش، تحلیل جامع ارتباط میان شاخص‌های کلیدی مخزنی شامل تخلخل، تراوایی، چگالی ماتریس، سنگ‌شناسی و انواع تخلخل با سرعت امواج تراکمی و برشی در سازندهای کنگان و دالان در بخش مرکزی خلیج فارس است. نوآوری این مطالعه در مقایسه همزمان دو نوع موج و تبیین نقش متمایز هرکدام در ارزیابی کیفیت مخزنی است؛ به گونه‌ای که امواج تراکمی و برشی به صورت متفاوت تحت تأثیر ویژگی‌های پتروفیزیکی قرار می‌گیرند. ترکیب داده‌های چاه‌پیمایی و آزمایشگاهی، دقت تحلیل‌ها را افزایش داده و به شناخت بهتر عوامل کنترل‌کننده رفتار امواج منجر می‌شود. یافته‌های این مطالعه پیش‌بینی پاسخ امواج در شرایط گوناگون مخزن را ممکن ساخته و موجب گسترش استفاده از داده‌های صوتی در بهبود تفسیر نگارها و مدل‌سازی مخازن کربناته می‌شود. سازندهای کنگان و دالان به‌عنوان

در شکل ۱ نمایش داده شده است. لازم به ذکر است که در این پژوهش، تقسیم‌بندی درون‌سازندی سازند کنگان بر اساس عضوهای K1 تا K5 صورت گرفته است. این نام‌گذاری مطابق با تقسیم‌بندی رایج و مورد استفاده در ایران می‌باشد که در اغلب میدان‌های گازی خلیج فارس به کار می‌رود. در سایر کشورهای حوزه خلیج فارس نیز از الگوهای مشابهی برای تفکیک لایه‌های درون‌سازندی استفاده می‌شود، اما ممکن است مرزها و ویژگی‌های هر عضو با اندکی تفاوت تعریف شده باشد. بنابراین، استفاده از این نام‌گذاری در مقاله حاضر صرفاً بر مبنای استانداردهای مورد پذیرش در مطالعات زیرسطحی ایران انجام گرفته است.

و فقط بر اساس مشخصه‌های مخزنی و چینه‌نگاری سکansı به چهار واحد مخزنی K1، K2، K3 و K4 تفکیک می‌شوند [۲۰-۲۳]. سازند کنگان به دو واحد K1 و K2 تقسیم می‌شود. این واحدها متشکل از انیدریت، دولومیت و آهک است. همچنین عضو دالان بالایی به دو واحد K3 و K4 تقسیم می‌شود که واحد K3 بیشتر از دولومیت و انیدریت و واحد K4 از آهک و دولومیت تشکیل شده است. مطالعات صورت گرفته بیانگر آن است که تغییرات ضخامت و لیتولوژی این واحدها در جهت افقی بسیار ناچیز است و شاخص‌های مخزنی تحت تأثیر دیاژنز به ویژه انحلال و دولومیتی‌شدن هستند [۲۴-۲۷]. ستون چینه‌شناسی و نقشه منطقه مورد مطالعه



شکل ۱ مکان جغرافیایی (الف) و ستون چینه‌شناسی سازندهای مورد مطالعه (ب).
Fig. 1 Geographical location (a) and the stratigraphic column of the studied formations (b).

مواد و روش‌ها

در این تحقیق از ۴۱۸ مغزه، ۱۳۸۸ نمونه پلاگ، ۱۵۷۵ نمونه مقطع نازک (تقریباً هر ۲۵ cm یک مقطع نازک تهیه شده است) و همچنین ۱۳۸۸ داده تخلخل و تراوایی از یکی از چاه‌های بخش مرکزی خلیج فارس استفاده شده است. انتخاب این چاه به دلیل دسترسی هم‌زمان به داده‌های کامل مغزه، مقاطع نازک، نتایج آنالیزهای پتروفیزیکی و داده‌های چاه‌پیمایی صوتی (شامل امواج تراکمی و برشی) انجام شد. این تمرکز بر یک چاه منفرد امکان مقایسه دقیق میان داده‌های پتروفیزیکی، سنگ‌شناسی و ژئوفیزیکی را فراهم کرده و از تأثیر تغییرات میدان به میدان در نتایج جلوگیری نموده است. نمونه‌های پلاگ به روش ساکسلت شسته شده و برای اندازه‌گیری‌های تخلخل و تراوایی به روش قانون بویل و قانون داریسی آماده شد. تخلخل با استفاده از دستگاه تخلخل‌سنج هلیوم^۱ نوع Core Lab-CMS 300 و بر پایه قانون بویل اندازه‌گیری گردید. بر اساس قانون بویل، حاصل ضرب فشار و حجم گاز در شرایط دمایی ثابت، مقدار ثابتی است. در این روش، ابتدا حجم مرجع و سپس حجم کل سلول اندازه‌گیری می‌شود؛ با تزریق گاز هلیوم به محفظه حاوی نمونه و مقایسه افت فشار بین دو حجم معلوم، حجم منافذ باز نمونه تعیین می‌گردد. انتخاب گاز هلیوم به دلیل نفوذپذیری بالا، بی‌اثر بودن و عدم جذب در دیواره منافذ انجام شده است. تراوایی با استفاده از دستگاه تراوایی‌سنج گاز^۲ نوع Core Lab-PERG 200 و بر اساس قانون داریسی اندازه‌گیری شد. قانون داریسی بیان می‌کند که نرخ جریان سیال از میان محیط متخلخل متناسب با گرادیان فشار و معکوس با گرانشی سیال است. در این آزمایش، سیال تزریقی هوای خشک با فشار ورودی کنترل شده استفاده شد. تخلخل نمونه‌ها در شرایط آزمایشگاهی استاندارد و با اعمال فشار محدود ۲۵۰ psi اندازه‌گیری شد. این مقدار فشار صرفاً به منظور حفظ یکپارچگی نمونه‌ها و کاهش

اثرات گسترش ریزشکستگی‌ها در حین اندازه‌گیری اعمال گردید و معادل فشار همه‌جانبه مخزن نیست. بدین ترتیب، مقادیر به‌دست‌آمده بیانگر تخلخل در شرایط آزمایشگاهی خشک هستند و در تحلیل‌ها به‌عنوان مبنای مقایسه‌ای بین داده‌های پتروفیزیکی و سرعت امواج مورد استفاده قرار گرفتند. چگالی ماتریس با استفاده از محاسبه وزن خشک و تخلخل نمونه‌ها به دست آمده است. چگالی خشک نمونه‌ها بر اساس آزمایش‌های معمول مغزه^۳ محاسبه شد. در این روش، ابتدا نمونه‌ها در دمایی ثابت ۸۰°C تا رسیدن به وزن پایدار خشک گردیدند. سپس وزن خشک هر نمونه با ترازوی دقیق تعیین و حجم آن از طریق اندازه‌گیری ابعاد هندسی به‌دست آمد. چگالی خشک با تقسیم وزن خشک بر حجم کل نمونه محاسبه شد. این پارامتر برای ۱۳۸۸ نمونه پلاگ از مغزه‌های برداشت‌شده از چاه مورد مطالعه تعیین و در تحلیل‌های پتروفیزیکی و مقایسه با سرعت امواج مورد استفاده قرار گرفت.

نیمی از هر مقطع نازک به‌وسیله محلول آلزاین قرمز به منظور تشخیص سنگ‌شناسی آهک از دولومیت رنگ‌آمیزی گردید. نوع و درصد کانی‌ها و تخلخل‌ها از مطالعه میکروسکوپی مقاطع نازک به‌دست آمده است و درصد هر نوع تخلخل به‌صورت چشمی با مقایسه نمونه‌ها با نمودارها و مقیاس‌های استاندارد پتروگرافی تعیین گردید. این روش امکان تخمین سریع و دقیق سهم نسبی هر نوع تخلخل را فراهم می‌سازد. نتایج حاصل، مبنای تحلیل ارتباط میان نوع تخلخل، لیتولوژی و سرعت امواج قرار گرفت. داده‌ها بسته به نوع ویژگی مشاهده‌شده، یا به‌صورت درصد تخمینی (برای فراوانی کانی‌ها و تخلخل) و یا در مقیاس رده‌بندی عددی صفر تا ۴ (برای شدت رخداد فرایندهای دیاژنزی نظیر انحلال، سیمان‌شدگی و دولومیتی‌شدن) ثبت شدند. این مقیاس‌گذاری

1. Helium Porosimeter
2. Gas Permeameter
3. Routine Core Analysis

سرعت vs برابر با $2802/0 \text{ m/s}$ اندازه‌گیری شد. نمونه‌های دولومیتی، به دلیل چگالی ماتریس بالاتر ($2/8 \text{ g/cm}^3$)، در مقایسه با نمونه‌های آهکی ($2/7 \text{ g/cm}^3$)، سرعت بیشتری در هر دو موج نشان می‌دهند، هرچند که متوسط تخلخل آنها بیشتر است.

روند تغییر سرعت امواج با درصد دولومیت نشان می‌دهد که تا حدود 50% دولومیت، V_p به‌طور ملایم افزایش می‌یابد و سپس با افزایش بیشتر دولومیت، V_p کاهش و V_s تقریباً ثابت می‌ماند. افزایش درصد دولومیت همچنین با افزایش تراوایی همراه است. افزایش تخلخل در هر دو موج موجب کاهش سرعت می‌شود، اما این کاهش در V_s شدیدتر از V_p است. بررسی انواع تخلخل نشان داد که بیشترین سرعت در تخلخل بین‌دانه‌ای و کمترین سرعت در تخلخل قالبی مشاهده می‌شود که عمدتاً در نمونه‌های آهکی وجود دارد.

ارتباط چگالی ماتریس با سرعت امواج، روندی مستقیم را نشان داد؛ به‌طوری‌که با افزایش چگالی، سرعت هر دو موج افزایش یافت. در مقابل، تراوایی اثر غیرخطی بر سرعت داشت؛ به‌گونه‌ای که در تراوایی‌های کمتر از 5 mD ، سرعت کاهش یافت، اما در تراوایی‌های بالاتر از این مقدار، V_s روند افزایشی و V_p تا حدود 100 mD اندکی افزایش و سپس کاهش نشان داد. این نتایج بیانگر آن است که اثرگذاری هر پارامتر بر امواج تراکمی و برشی متفاوت بوده و سنگ‌شناسی و نوع تخلخل نقش کلیدی در کنترل سرعت این امواج در مخازن کربناته سازندهای کنگان و دالان دارند.

تأثیر شاخص‌ها بر سرعت امواج

سنگ‌شناسی

سنگ‌شناسی یکی از پارامترهای مهم مخزنی و تأثیرگذار بر سرعت صوت است که در این تحقیق نیز بررسی گردیده است [۳]. دو نوع سنگ‌شناسی

به‌عنوان روش متداول در مطالعات پتروگرافی کربنات‌ها به‌کار گرفته شد و مبنای مقایسه بین داده‌های میکروسکوپی و نتایج پتروفیزیکی قرار گرفت. نمودارهای چاه‌پیمایی که در این تحقیق استفاده شده‌اند شامل 402 m نگار گاما، نگار صوتی و نگار چگالی می‌باشند. داده‌های صوتی این پژوهش از نگار تصویرگر صوتی دوقطبی^۱ حاصل شد. این نگار که توسط شرکت شلمبرژر تهیه گردیده است، با ایجاد منبع صوتی دوقطبی در تماس با دیواره چاه، امکان تولید و ثبت همزمان امواج تراکمی و برشی را فراهم می‌کند. زمان سیر امواج از طریق مجموعه‌ای از گیرنده‌های چندگانه در فواصل مختلف اندازه‌گیری و پس از پردازش اولیه به سرعت تبدیل شد. مزیت اصلی این نگار نسبت به نگارهای صوتی مرسوم، توانایی آن در اندازه‌گیری مستقیم سرعت موج برشی در محیط‌های کربناته است که در شرایط عادی به دلیل تضعیف شدید سیگنال به‌سختی قابل ثبت می‌باشد. به‌منظور یکسان‌سازی مرجع عمقی داده‌ها، نگار گامای ثبت‌شده در چاه با نگار گامای اندازه‌گیری‌شده بر روی مغزه‌ها تطابق داده شد. این تطابق بر اساس هم‌پوشانی الگوهای تغییرات شدت پرتو گاما در مقاطع مختلف انجام گرفت و بدین ترتیب اختلافات ناشی از جابجایی عمقی مغزه‌ها در زمان عملیات حفاری اصلاح گردید. پس از این همسان‌سازی، تمامی داده‌های آزمایشگاهی و پتروفیزیکی مغزه‌ها با داده‌های چاه‌پیمایی تطبیق عمقی داده شدند و به‌عنوان مبنای تحلیل‌های بعدی مورد استفاده قرار گرفتند.

نتایج

بررسی داده‌های به‌دست‌آمده نشان می‌دهد که پارامترهای سنگ‌شناسی، تخلخل، نوع فضاهای خالی، تراوایی و چگالی ماتریس تأثیرات متمایزی بر سرعت امواج تراکمی (V_p) و برشی (V_s) دارند. متوسط سرعت V_p برابر با $5058/1 \text{ m/s}$ و متوسط

1. Dipole Sonic Imager: DSI

۱۰ درصدی برای هر یک از سنگ‌شناسی‌ها جدا شد و متوسط سرعت نمونه‌ها در هر دسته محاسبه گردید. نمونه‌های آهکی و دولومیتی از نظر خصوصیات زمین‌شناسی و پتروفیزیکی با یکدیگر متفاوت می‌باشند (جدول ۱).

جدول ۱ مقایسه و بررسی ویژگی‌های زمین‌شناسی و پتروفیزیکی نمونه‌های آهکی و دولومیتی در سازندهای کنگان و دالان.
Table 1 Comparison of geological and petrophysical characteristics of limestone and dolostone samples in the Kangan and Dalan formations.

| Property Lithology | Average porosity (%) | Average permeability (mD) | Average velocity (m/s) | | Pore type | Average grain density (g/cm ³) |
|-----------------------|----------------------|---------------------------|------------------------|--------|--------------------------------|--|
| | | | S | P | | |
| Lime | 12.2 | 29.7 | 2761.8 | 4823.4 | Moldic | 2.7 |
| Dolostone | 17.5 | 67.1 | 2812.2 | 5234.2 | Interparticle and intercrystal | 2.8 |

صوت است به طوری که با هم نسبت مستقیم دارند و با افزایش چگالی، سرعت موج نیز افزایش می‌یابد و با کاهش آن، سرعت موج نیز کاهش می‌یابد (۳۱-۲۹). نمودارهای سرعت صوت تراکمی و برشی در مقابل چگالی ماتریس برای کل نمونه‌ها با فواصل g/cm^3 ۰/۱، مورد بررسی قرار گرفت. برای هر دسته متوسط سرعت امواج تراکمی و برشی محاسبه شد و در نهایت نمودارهای مربوطه رسم گردید (شکل ۶). نتایج نشان داد سرعت هر دو موج برشی و تراکمی با افزایش چگالی ماتریس، افزایش می‌یابند. برخلاف سایر پارامترها، در این شاخص مخزنی رفتار این دو موج کاملاً مشابه هم است.

انواع حفرات

شکل هندسی حفرات موجود در مخزن نحوه حرکت و سرعت امواج را تحت تأثیر قرار می‌دهد و لذا یکی از شاخص‌های مورد بررسی در این مطالعه است (۵ و ۳۲). انواع تخلخل‌ها در میدان مورد مطالعه شامل بین‌دانه‌ای، درون‌دانه‌ای، بین‌بلوری، قالبی، فنسترال، شکستگی و حفره‌ای است. نمودارهای متوسط سرعت موج برشی و موج تراکمی برای هر یک از این حفرات رسم شده است (شکل ۷). بررسی درصد فراوانی تخلخل‌های موجود در مخزن مورد مطالعه (شکل ۸) نشان می‌دهد تخلخل قالبی بیشترین نوع حفرات موجود در مخزن و تخلخل درون‌ذره‌ای، فنسترال و شکستگی کم‌ترین نوع تخلخل مخزن را تشکیل می‌دهند.

آهک و دولومیت که سنگ‌شناسی‌های اصلی سازندهای کنگان و دالان است، مورد بررسی قرار گرفته است. نمونه‌هایی دولومیت متشکل از بیش از ۹۰٪ کانی دولومیت و نمونه‌های آهکی شامل بیش از ۹۰٪ آهک هستند. برای رسم نمودارها، دسته‌های

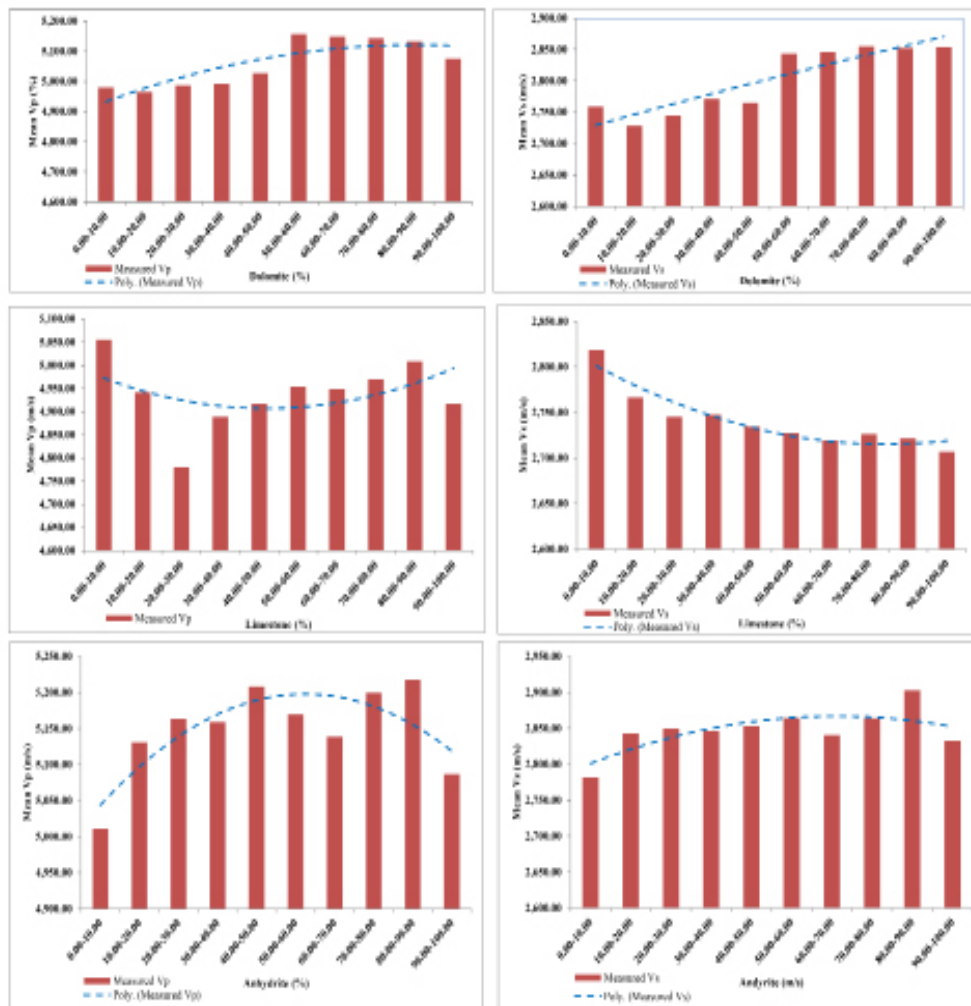
سرعت موج تراکمی در نمونه‌هایی با صفر تا ۵۰٪ دولومیت، با شیبی ملایم هم‌زمان با افزایش میزان دولومیت، افزایش می‌یابد اما سرعت موج برشی در این مقدار از دولومیت متغیر است (شکل ۲). سرعت هر دو موج برای نمونه‌هایی که دولومیت بیش از ۵۰٪ دارند به طور ناگهانی افزایش می‌یابد ولی با افزایش دولومیت در نمونه‌ها، سرعت موج برشی ثابت می‌ماند در صورتی که سرعت موج تراکمی روند کاهشی دارد (شکل ۲). در سازندهای مورد مطالعه میزان تراوایی با افزایش درصد دولومیت در نمونه‌ها افزایش می‌یابد (شکل ۳).

تخلخل

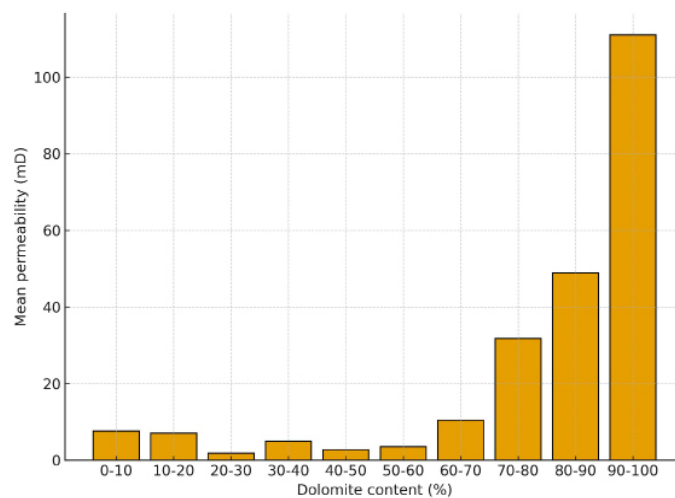
تخلخل یکی از مهم‌ترین شاخص‌های مخزنی تأثیرگذار بر سرعت صوت می‌باشد که هر دو موج برشی و تراکمی را تحت تأثیر قرار می‌دهد (۵ و ۲۸). تخلخل‌های بیشتر از ۳۰٪ در مخزن نادر و تخلخل‌های بیش از ۴۰٪ وجود ندارد (شکل ۴). در هر دو موج تراکمی و برشی با افزایش میزان تخلخل، سرعت کاهش می‌یابد اما این کاهش سرعت در امواج برشی بیشتر از امواج تراکمی است (شکل ۴). جهت درک توزیع تخلخل در نمونه‌ها، نمودار فراوانی نمونه‌ها در تخلخل‌های متفاوت (هر ۲٪ تخلخل) رسم گردید (شکل ۵).

چگالی ماتریس

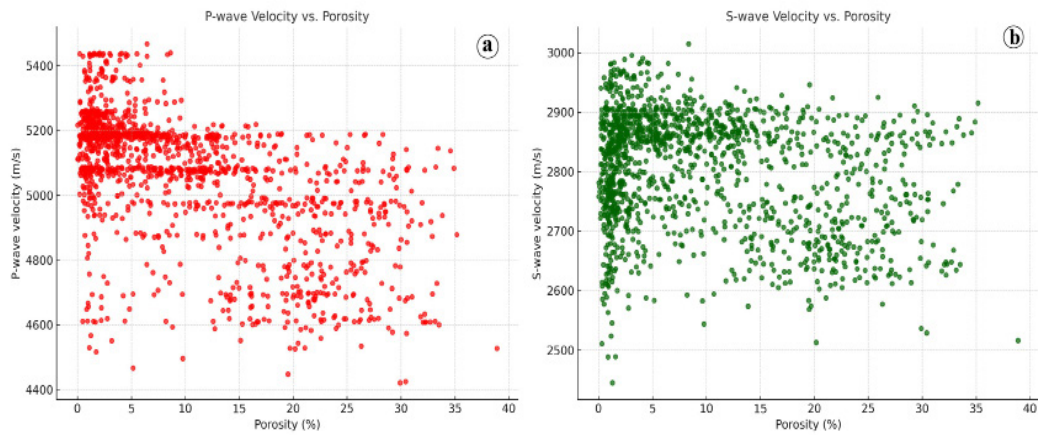
چگالی یکی از پارامترهای مهم و کنترل‌کننده سرعت



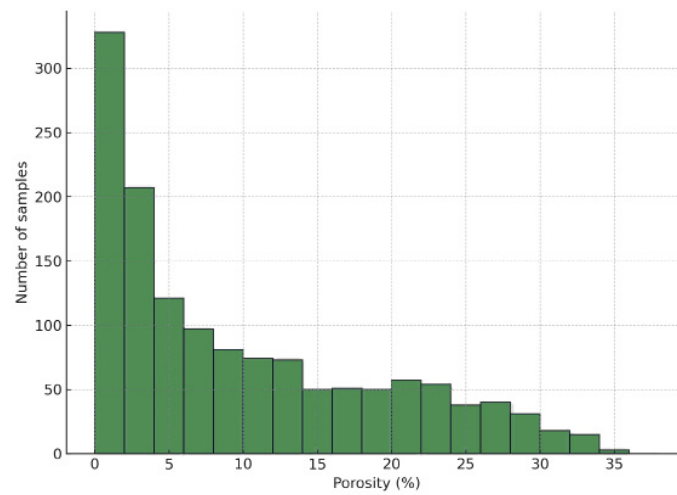
شکل ۲ نمودار درصد دولومیت، آهک و انیدریت موجود در نمونه‌ها در مقابل سرعت موج برشی (الف، ج، ه) و موج تراکمی (ب، د، و).
Fig. 2 Cross-plots of dolomite, limestone, and anhydrite percentages versus shear- and compressional-wave velocity.



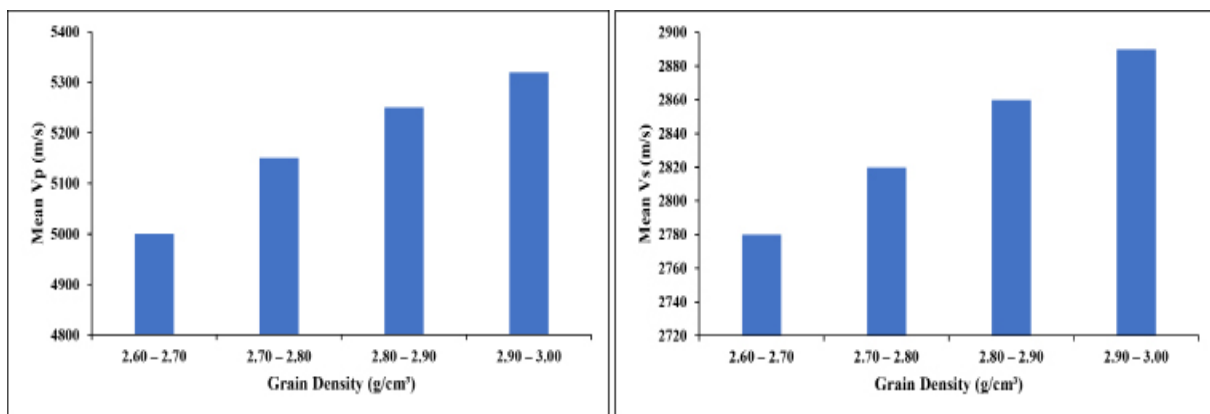
شکل ۳ نمایش نمودار درصد دولومیت در نمونه‌ها در مقابل تراوایی. با توجه به این نمودار با افزایش میزان دولومیت در نمونه‌ها، تراوایی نیز به طور متوسط افزایش می‌یابد.
Fig. 3 Cross-plot of dolomite percentage versus permeability. Based on this plot, permeability shows an overall increasing trend with increasing dolomite content in the samples.



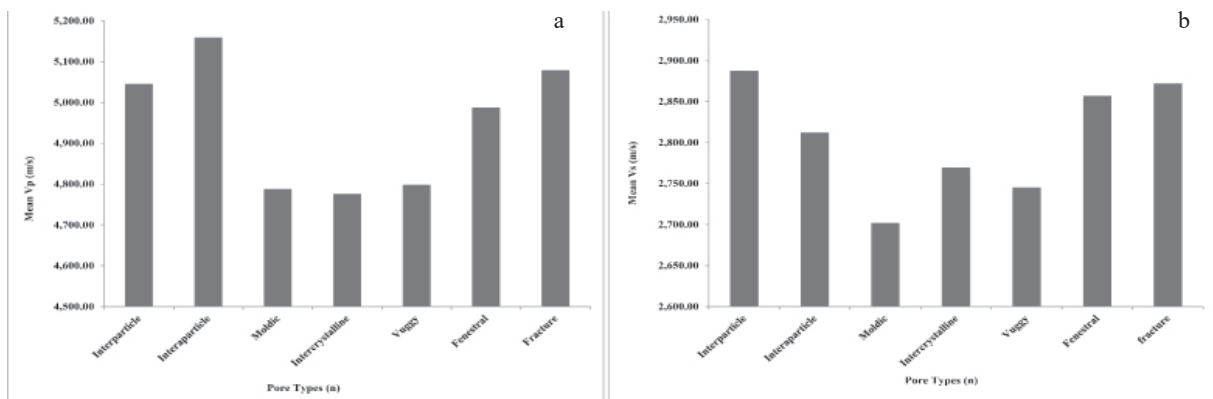
شکل ۴ (الف) نمایش نمودار تخلخل در مقابل سرعت موج تراکمی و (ب) نمودار تخلخل در مقابل سرعت موج برشی. **Fig. 4** Cross-plot of porosity versus compressional-wave velocity (a) and porosity versus shear-wave velocity (b).



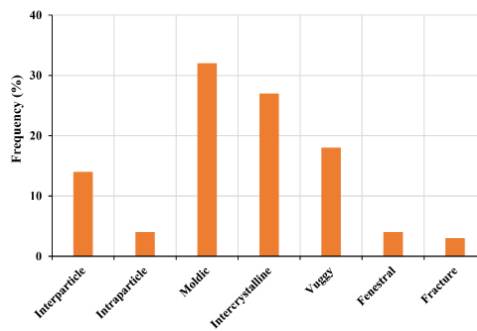
شکل ۵ نمودار فراوانی نمونه‌های مورد بررسی در گروه‌های مختلف تخلخل (هر ۲٪). **Fig. 5** Frequency distribution of the studied samples across different porosity classes (2% intervals).



شکل ۶ نمایش نمودارهای سرعت موج برشی (الف) و تراکمی (ب) در مقابل چگالی ماتریس نمونه‌های مورد بررسی در چاه مورد مطالعه. **Fig. 6** Cross-plots of shear-wave velocity (a) and compressional-wave velocity (b) versus matrix density of the studied samples in the investigated well.



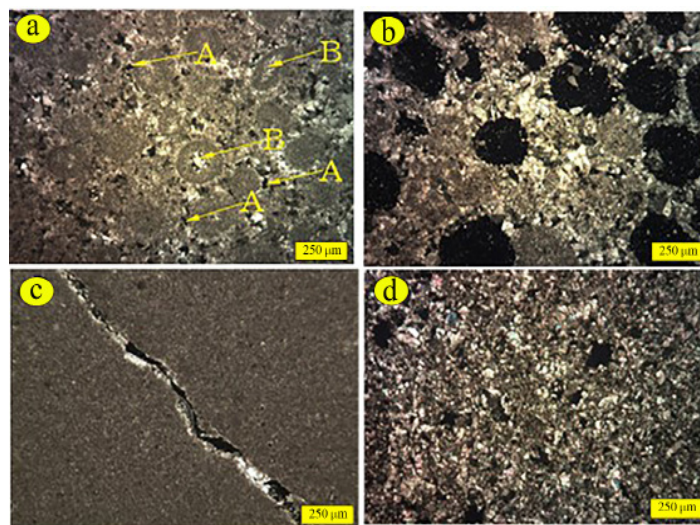
شکل ۷ رابطه بین سرعت موج صوتی و انواع تخلخل. (الف) انواع تخلخل در مقابل موج برشی و (ب) انواع تخلخل در مقابل موج تراکمی. Fig. 7. Relationship between acoustic-wave velocity and porosity types: porosity types versus shear-wave velocity (a) and porosity types versus compressional-wave velocity (b).



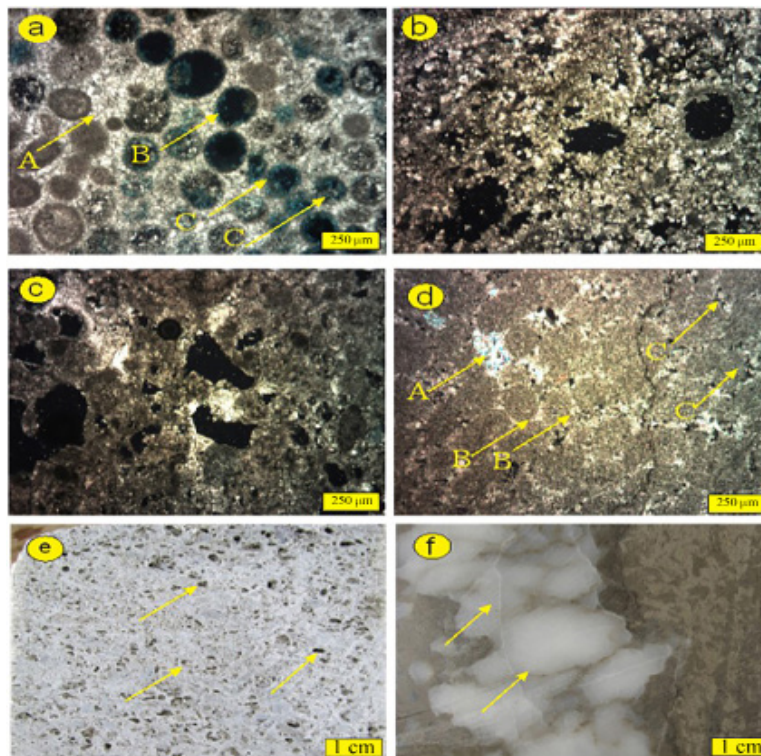
شکل ۸ نمایش فراوانی انواع فضاهای خالی موجود در مخزن مورد مطالعه. Fig. 8 Frequency distribution of pore types present in the studied reservoir.

متغیرات متوسط سرعت در امواج برشی در تخلخل‌های گوناگون بیشتر از امواج تراکمی است. سرعت هر دو موج در تخلخل بین‌دانه‌ای بالا است اما در تخلخل‌های قالبی (که بیشتر این تخلخل، متعلق به نمونه‌های آهکی است)، متوسط سرعت پایین است (شکل ۷). شکل‌های ۹ و ۱۰ برخی خصوصیات زمین‌شناسی شامل نوع تخلخل، رخساره و آلوک‌های موجود در این سازندها را نشان می‌دهد.

تغییرات متوسط سرعت در امواج تراکمی است. سرعت هر دو موج در تخلخل بین‌دانه‌ای بالا است اما در تخلخل‌های قالبی (که بیشتر این تخلخل، متعلق به نمونه‌های آهکی است)، متوسط سرعت پایین است (شکل ۷). شکل‌های ۹ و ۱۰ برخی خصوصیات زمین‌شناسی شامل نوع تخلخل، رخساره و آلوک‌های موجود در این سازندها را نشان می‌دهد.



شکل ۹ الف) تخلخل‌های قالبی در آهک‌ها که اغلب نتیجه انحلال آراگونیت‌ها هستند، ب) تخلخل‌های بین‌دانه‌ای (A) و درون‌دانه‌ای (B)، ج) تخلخل‌های بین‌بلوری در دولومیت‌ها، د) تخلخل شکستگی که بخش‌هایی از آن با سیمان آنیدریتی پر شده است. Fig. 9 (a) Moldic porosity in limestones, commonly resulting from aragonite dissolution; (b) interparticle (A) and intraparticle (B) porosity; (c) intercrystalline porosity in dolostones; (d) fracture porosity, partially filled with anhydrite cement.



شکل ۱۰ الف) تخلخل‌های قالبی که توسط تخلخل‌های بین‌بلوری به هم متصل شده‌اند، ب) سیمان‌های بین‌دانه‌ای بزرگ کلسیتی (A)، انیدهای حل شده (B) و تشکیل سیمان درون‌دانه‌ای (C)، سیمان‌های انیدریتی (A)، کلسیتی (B) و تخلخل‌های بین‌دانه‌ای باقی‌مانده، د) تخلخل‌های حفره‌ای، ه) تصویر مغزه از سیمان‌های وسیع انیدریتی، و) تصویر مغزه از تخلخل‌های قالبی.

Fig. 10 (a) Moldic porosity interconnected by intercrystalline porosity; (b) large interparticle calcite cements (A), dissolved ooids (B), and intraparticle cementation (C); (c) anhydrite cements (A), calcite cements (B), and remaining interparticle porosity; (d) vuggy porosity; (e) core image showing extensive anhydrite cementation; (f) core image illustrating moldic porosity.

تأثیرگذار بر سرعت موج‌های برشی و تراکمی و مقایسه این دو موج در مخازن کربناته است. در این مخازن به دلیل پیچیدگی‌های ساختاری، رفتار امواج تحت تأثیر پارامترهای گوناگونی قرار می‌گیرند که برای مطالعه دقیق این مخازن نیاز به بررسی این عوامل است.

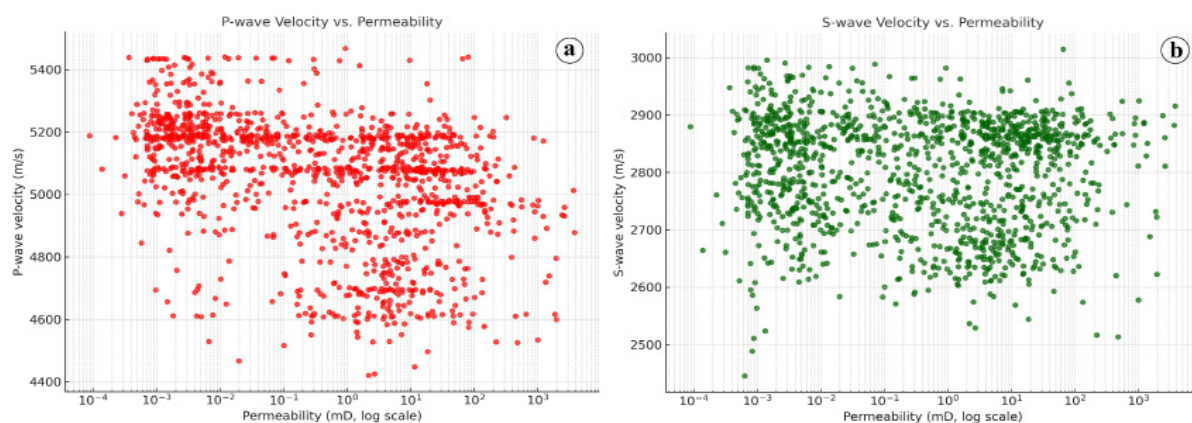
متوسط سرعت موج تراکمی و برشی در نمونه‌های دولومیتی بیشتر از نمونه‌های آهکی است (شکل ۲ و جدول ۱). دلیل این امر چگالی ماتریس بیشتر دولومیت نسبت به آهک است. با وجود اینکه نمونه‌های دولومیتی متوسط تخلخل بیشتری نسبت به نمونه‌های آهکی دارند (جدول ۱) اما این امر سبب کاهش سرعت در این نمونه‌ها نشده است و تأثیر چگالی ماتریس بیشتر بوده است. متوسط چگالی ماتریس در نمونه‌های آهکی $2/7 \text{ g/cm}^3$ و در دولومیت‌ها $2/8 \text{ g/cm}^3$ است.

تراوایی

دیگر پارامتر مخزنی تأثیرگذار بر سرعت صوت، تراوایی است [۲۹]. بررسی نمودارهای سرعت صوت در تراوایی‌های گوناگون (شکل ۱۱) نشان می‌دهد که با افزایش تراوایی تا 5 mD هر دو موج روند کاهنده دارند اما در مقدارهای بیشتر، متوسط سرعت موج برشی روند افزایشی دارد. به عبارتی با افزایش تراوایی، سرعت موج برشی افزایش یافته است. همچنین متوسط سرعت موج تراکمی تا 100 mD با افزایش تراوایی همچنان با شیب بسیار کم، افزایش یافته و در مقادیر بیشتر از این مقدار مجدد کاهش می‌یابد. در مجموع روند کلی سرعت موج تراکمی و برشی با افزایش تراوایی، به صورت کاهنده است.

بحث

هدف از انجام این تحقیق بررسی پارامترهای مخزنی



شکل ۱۱ نمودارهای تراوایی در مقابل سرعت موج برشی (الف) و سرعت موج تراکمی (ب).

Fig. 11 Cross-plots of permeability versus shear-wave velocity (a) and permeability versus compressional-wave velocity (b).

است. این امر موجب افزایش پراکندگی امواج و در نتیجه کاهش سرعت موج می‌شود. در نمونه‌های دارای تخلخل حفره‌ای نیز کاهش سرعت مشاهده می‌شود، اما مقدار آن نسبت به تخلخل قالبی کمتر است. در تخلخل‌های حفره‌ای، حجم کل منافذ کمتر و توزیع آن‌ها نسبتاً محدودتر است و در بسیاری موارد، حفرات به‌طور جزئی با ماتریس در تماس باقی می‌مانند؛ بنابراین بخشی از مسیر انتشار امواج همچنان از طریق بخش جامد عبور می‌کند. در هر دو نوع موج، سرعت در نمونه‌هایی با تخلخل حفره‌ای اندکی بیشتر از تخلخل قالبی است که با توجه به حجم کمتر تخلخل‌های حفره‌ای نسبت به قالبی در نمونه‌ها، تفسیر فوق تأیید می‌گردد. روند تغییرات نشان می‌دهد که افزایش حجم و پیوستگی تخلخل مهم‌ترین عامل کاهش سرعت امواج است، در حالی که نحوه آرایش و ارتباط فضایی منافذ تعیین‌کننده تفاوت در میزان افت سرعت میان انواع مختلف تخلخل می‌باشد. این رفتار با اصول فیزیک سنگ نیز سازگار است، زیرا در سنگ‌های با تخلخل بالا، مدول حجمی و برشی مؤثر کاهش یافته و در نتیجه سرعت امواج تراکمی و برشی هر دو کاهش می‌یابد.

رفتار سرعت موج‌های تراکمی و برشی در مقابل تغییرات تراوایی یکنواخت نیست. با افزایش میزان تراوایی تا ۵ mD، متوسط سرعت موج تراکمی کاهش می‌یابد (شکل ۱۱). در تراوایی‌های پایین‌تر،

افزایش سرعت در نمونه‌هایی با چگالی ماتریس بالاتر (شکل ۵) این امر را به وضوح نشان می‌دهد. با افزایش چگالی ماتریس (که تخلخل در آن تأثیری ندارد)، سرعت هردو موج تراکمی و برشی در نمونه‌ها افزایش می‌یابد. این امر درست عکس تخلخل است (شکل ۴) که با افزایش آن، سرعت همواره کاهش می‌یابد. دلیل کاهش سرعت امواج تراکمی و برشی در نمونه‌های آهکی علاوه بر نوع ماتریس، مربوط به میزان فضای خالی موجود در این نمونه‌ها است. مقدار تخلخل اغلب در نمونه‌های آهکی به سبب نوع تخلخل آنان (قالبی)، بیشتر است. از طرفی دیگر، در این نمونه‌ها، تغییرات سرعت در امواج برشی نسبت به امواج تراکمی بیشتر است که بیانگر تأثیرات بیشتر انواع تخلخل بر سرعت امواج برشی نسبت به امواج تراکمی است.

سرعت هردو موج در نمونه‌هایی با تخلخل بین‌دانه‌ای بیشتر از سایر انواع تخلخل است که به سبب میزان تخلخل کمتر در این نمونه‌ها است. میزان تخلخل در نمونه‌هایی با نوع تخلخل قالبی اغلب بیشتر است. به همین سبب و با افزایش تخلخل، سرعت در آنان کاهش می‌یابد. این امر در خصوص نمونه‌هایی با تخلخل حفره‌ای نیز قابل مشاهده است. نمونه‌هایی که دارای تخلخل قالبی هستند، به دلیل حذف اجزای ناپایدار و باقی ماندن فضاهای نامنظم غیرمرتبط، معمولاً تخلخل کل بیشتری دارند، اما پیوستگی ماتریس در آن‌ها کمتر

نتایج این پژوهش نشان داد که سرعت امواج تراکمی و برشی در نمونه‌های دولومیتی به طور میانگین بیشتر از نمونه‌های آهکی است، موضوعی که با یافته‌های صالح و همکاران هم‌خوانی دارد [۳۳]. این پژوهش نشان داد که چگالی بالاتر ماتریس دولومیت نسبت به آهک و سختی بیشتر چارچوب سنگ، عامل اصلی افزایش سرعت در این سنگ‌ها است. در همین راستا، مطالعات کلاسیک آنتسلمتی و همکاران نیز تأکید داشته‌اند که نوع سنگ‌شناسی و درصد دولومیت از مهم‌ترین عوامل کنترل‌کننده سرعت امواج در کربنات‌ها محسوب می‌شوند [۳۴].

نتایج این پژوهش در خصوص رابطه سرعت و نوع تخلخل با پژوهش‌های رگن و همکاران و ژانگ و همکاران سازگار است [۳۵ و ۳۶]. این پژوهشگران تأکید داشتند نوع و هندسه تخلخل به همان اندازه حجم تخلخل در رفتار الاستیک سنگ‌ها اهمیت دارد. همچنین، ونریو و ماوکو نشان دادند که افزایش سهم میکرایت و تخلخل‌های ریز در کربنات‌ها با کاهش سرعت و افت کیفیت مخزنی همراه است [۳۷]. این موضوع تفسیر نتایج مربوط به تخلخل‌های قالبی و حفره‌ای را تقویت می‌کند. رابطه غیرخطی میان سرعت و تراوایی در داده‌های این پژوهش نیز با نتایج آرچلیا و همکاران قابل مقایسه است [۳۸]. آنان نشان دادند که تغییرات سرعت امواج تنها به میزان تراوایی وابسته نیست، بلکه به پیوستگی شبکه حفرات و سهم دولومیت نیز بستگی دارد. در همین زمینه، آنتسلمتی و ابرلی با معرفی روش نگار انحراف سرعت^۱ نشان دادند که ترکیب داده‌های صوتی با سایر لاگ‌ها می‌تواند الگوهای نوع تخلخل و تراوایی را آشکار سازد [۳۹]؛ یافته‌ای که با نتایج حاضر درباره حساسیت بیشتر امواج برشی به تغییرات سنگ‌شناسی و امواج تراکمی به ترکیب سیال و تخلخل هم‌خوانی دارد. این مطالعات همچنان در جهان در حال انجام است [۴۰-۴۲]. اگرچه این نتایج در کلیت با شواهد

مسیرهای عبور سیال به یکدیگر متصل نیستند و شبکه پیوسته فضا‌های خالی در سنگ ایجاد نشده است. به همین سبب موج از تمام بافت سنگ عبور نموده و با افزایش تراوایی و تخلخل، سرعت کاهش می‌یابد. در تراوایی‌های بالاتر، روند عکس مشاهده می‌گردد. این امر به سبب حضور بیشتر دولومیت در این نمونه‌ها است که تأثیر زیاد آن بر سرعت پیش از این بررسی گردید (شکل‌های ۲ و ۳). با توجه به اینکه موج برشی از فضا‌های خالی عبور نمی‌نماید، در نتیجه اتصال آنان به یکدیگر تأثیر کمتری بر روی این نوع موج دارد. در نتیجه تغییرات سرعت در این نوع موج با تغییرات تراوایی، کمتر است (شکل ۸). تفاوت رفتار امواج تراکمی و برشی در سازندهای کربنات‌ه مورد مطالعه را می‌توان با ویژگی‌های فیزیکی انتشار آن‌ها در محیط متخلخل توضیح داد. امواج برشی در فرآیند انتشار خود تنها از طریق ماتریس جامد سنگ منتقل می‌شوند و بنابراین، تغییرات در بافت، نوع کانی‌شناسی، میزان دولومیتی‌شدن و حضور انیدریت اثر مستقیم و محسوسی بر سرعت آن‌ها دارد. هرگونه تغییر در پیوستگی دانه‌ها، سیمانی‌شدن یا تبلور مجدد می‌تواند باعث افزایش یا کاهش سرعت برشی شود. در مقابل، امواج تراکمی علاوه بر ماتریس جامد، از طریق سیال‌های موجود در خلل و فرج نیز منتقل می‌شوند. از این رو، پارامترهایی مانند درجه تخلخل، نوع و ترکیب سیال (آب، نفت یا گاز) و همچنین تراکم‌پذیری محیط تأثیر قابل توجهی بر سرعت این امواج دارند. کاهش چگالی یا افزایش تخلخل مؤثر سبب افت سرعت امواج تراکمی می‌شود، در حالی که تغییر در نوع سیال (به‌ویژه وجود گاز) معمولاً کاهش بیشتری در سرعت این موج به همراه دارد. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که در سازندهای کنگان و دالان، امواج برشی شاخص مناسبی برای شناسایی تفاوت‌های سنگ‌شناسی و امواج تراکمی معیاری مؤثر برای ارزیابی تغییرات تخلخل و ترکیب سیال محسوب می‌شوند.

1. Velocity deviation log/VDL

نتیجه‌گیری

مطالعه حاضر به بررسی تأثیر پارامترهای مخزنی بر سرعت امواج تراکمی و برشی در مخازن کربناته سازندهای کنگان و دالان پرداخت. نتایج نشان داد که سنگ‌شناسی به عنوان کلیدی‌ترین عامل، تأثیر تعیین‌کننده‌ای بر سرعت هر دو نوع موج دارد. در میان انواع تخلخل‌ها، تخلخل‌های قالبی که عمدتاً در نمونه‌های آهکی مشاهده شدند، به دلیل کاهش چگالی و ایجاد ناپیوستگی در ساختار سنگ، بیشترین تأثیر را در کاهش سرعت امواج نشان دادند. در مقابل، تخلخل‌های بین‌بلوری که بیشتر در دولومیت‌ها یافت می‌شوند، با حفظ پیوستگی ماتریس سنگی، سرعت بالاتری را موجب شدند.

نتایج نشان می‌دهد که سرعت امواج تراکمی و برشی در تراوایی‌های کمتر از حدود ۵ mD بیشینه بوده و با افزایش تراوایی تا این مقدار کاهش می‌یابد، سپس روندی افزایشی پیدا می‌کند. این تغییر رفتار بیانگر تأثیر نحوه پیوستگی ماتریس و ارتباط فضاهای تخلخلی بر انتشار امواج است؛ به طوری که در تراوایی‌های پایین، پیوستگی بالای بافت سنگ موجب افزایش سرعت و در تراوایی‌های بالاتر، شکل‌گیری مسیرهای جریان پیوسته سبب بازگشت تدریجی سرعت امواج می‌شود. افزایش درصد دولومیت تا ۷۰٪ موجب افزایش مداوم سرعت امواج می‌شود، اما پس از این آستانه، اثر آن به حالت اشباع نزدیک می‌گردد. از سوی دیگر، انیدریت در مقادیر میانی تأثیر مثبت بر سرعت دارد، ولی در مقادیر بالا به دلیل ایجاد ناهمگنی، این روند معکوس می‌شود.

یافته‌های این تحقیق اهمیت درک ارتباط بین ویژگی‌های پتروفیزیکی و رفتار امواج صوتی را در مطالعات مخازن کربناته برجسته می‌سازد. این نتایج می‌تواند در تفسیر داده‌های چاه‌پیمایی، مدل‌سازی مخزن و ارزیابی کیفی سازندهای کربناته مورد استفاده قرار گیرد. برای تکمیل این پژوهش،

پیشین سازگار است، اما نوآوری این پژوهش در مقایسه همزمان امواج تراکمی و برشی و تعیین نقش منحصر به فرد هر یک در بازتاب کیفیت مخزنی است. مطالعات قبلی عمدتاً یکی از این دو نوع موج را بررسی کرده‌اند یا به تحلیل کلی روابط سرعت با ویژگی‌های مخزنی پرداخته‌اند. در حالی که این پژوهش نشان داد که امواج برشی به‌طور بارزتر بازتاب‌دهنده تغییرات سنگ‌شناسی و نوع تخلخل هستند، در حالی که امواج تراکمی بیشتر تحت تأثیر ترکیب سیال و میزان تخلخل هستند. این تمایز تفسیری، چارچوب تازه‌ای برای استفاده همزمان از دو نوع موج در تحلیل داده‌های چاه‌پیمایی و پیش‌بینی کیفیت مخزنی در کربنات‌های پرمین-تریاس خلیج فارس فراهم می‌سازد.

نتایج به‌دست‌آمده از این پژوهش، به‌طور مستقیم قابل‌تعمیم به سایر مخازن کربناته با ویژگی‌های سنگ‌شناسی و دیاژنزی مشابه هستند. در این مخازن، رفتار امواج تراکمی و برشی تحت کنترل نوع تخلخل، میزان دولومیتی‌شدن و چگالی ماتریس شباهت زیادی به سازندهای کنگان و دالان دارد. با این حال، در مخازن آواری به دلیل تفاوت‌های اساسی در بافت، نحوه توزیع اندازه دانه‌ها، نوع سیمان و شکل تخلخل، روابط میان سرعت امواج و پارامترهای پتروفیزیکی می‌تواند متفاوت باشد. در محیط‌های آواری، کنترل اصلی سرعت معمولاً با درجه فشردگی و میزان سیمانی‌شدن مرتبط است، در حالی که در کربنات‌ها نقش فرآیندهای دیاژنزی و نوع تخلخل بسیار پررنگ‌تر است. بنابراین، گرچه روند کلی تأثیر تخلخل و سیال بر امواج تراکمی و حساسیت امواج برشی به بافت سنگ در تمام انواع سنگ‌ها برقرار است، اما ضرایب و شدت روابط به‌دست‌آمده در این مطالعه خاص محیط‌های کربناته است و برای استفاده در مخازن آواری باید مجدداً با داده‌های محلی بررسی شود.

پیشنهاد می‌شود تأثیر همزمان فشار و دما بر این روابط و همچنین تغییرپذیری فضایی پارامترهای مخزنی در مقیاس میدانی مورد بررسی قرار گیرد. چنین مطالعاتی می‌تواند به توسعه مدل‌های دقیق‌تر برای پیش‌بینی رفتار مخازن کربناته کمک شایانی نماید.

مراجع

- [1]. Movahhed, A., Bidhendi, M. N., Masihi, M., & Emamzadeh, A. (2019). Introducing a method for calculating water saturation in a carbonate gas reservoir. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 70, 102942. <https://doi.org/10.1016/J.JNGSE.2019.102942>.
- [2]. Zhang, Y., Zhong, H. R., Wu, Z. Y., Zhou, H., & Ma, Q. Y. (2020). Improvement of petrophysical workflow for shear wave velocity prediction based on machine learning methods for complex carbonate reservoirs. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 192, 107234. doi.org/10.1016/J.PETROL.2020.107234.
- [3]. Pickett, G. R. (1963). Acoustic character logs and their applications in formation evaluation. *Journal of Petroleum Technology*, 15(06), 659–667. doi.org/10.2118/452-PA.
- [4]. Anselmetti, F. S., & 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 Bulletin*, 83(3), 450–466. <https://doi.org/10.1306/00AA9BCE-1730-11D7-8645000102C1865D>.
- [5]. Weger, R. J., Eberli, G. P., Baechle, G. T., Massafiero, J. L., & Sun, Y. F. (2009). Quantification of pore structure and its effect on sonic velocity and permeability in carbonates. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 93(10), 1297–1317. <https://doi.org/10.1306/05270909001>.
- [6]. Schlumberger. (2005). Cased hole DSI sonic.
- [7]. Castagna, J. P., Batzle, M. L., & Eastwood, R. L. (1985). Relationship between compressional-wave and shear-wave velocities in clastic silicate rocks. *Geophysics*, 50(4), 571–581. <https://doi.org/10.1190/1.1441933>.
- [8]. Bastos, A. C., Dillon, L. D., Vasquez, G. F., & Soares, J. A. (1998). Core-derived acoustic, porosity and permeability correlations for computation pseudo-logs. *Geological Society Special Publication*, 136, 141–146. <https://doi.org/10.1144/GSL.SP.1998.136.01.12>.
- [9]. Neto, I. A. L., Misságia, R. M., Ceia, M. A., & Archilha, N. L. (2015). Carbonate pore system evaluation based on prediction of microporosity and S-wave velocity under pressure effects. *77th EAGE Conference and Exhibition 2015: Earth Science for Energy and Environment, 1946–1950*. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.201413152>.
- [10]. Teillet, T., Fournier, F., Borgomano, J., & Hong, F. (2020). Origin of seismic reflections in a carbonate gas field, Lower Miocene, offshore Myanmar. *Marine and Petroleum Geology*, 113, 104110. <https://doi.org/10.1016/J.MARPETGEO.2019.104110>.
- [11]. Asef, M. R., Misaghi, A., & Sarmadivaleh, M. (2023). Contribution of porosity and clay content on shear wave velocity in shaly formations. *Journal of Petroleum Geomechanics*, 6(2), 40–47. <https://doi.org/10.22107/JPG.2023.402053.1198>.
- [12]. Jabbari, N., Shad Manaman, N., & Chehrizi, A. (2020). Determining the quality of reservoir of Ghar-Asmari by using prestack inversion in one of the fields in Iran. *Iranian Journal of Geophysics*, 14(1), 55–73. <https://doi.org/10.30499/IJG.2020.103518>.
- [13]. Kazemzadeh, E., Vali, J., Esfahani, M., & Alokhi Bakhtiari, H. (2013). Combination of Core and Log Data for the Prediction of Compressional Wave Velocities in Carbonate Rocks. *Journal of Petroleum Research*, 22(71), 57–65. <https://doi.org/10.22078/PR.2013.140>.
- [14]. Alsharhan, A. S., & Nairn, A. E. M. (2003). *Sedimentary basins and petroleum geology of the Middle East*. Elsevier, Netherlands, 99. [https://doi.org/10.1016/S0264-8172\(99\)00008-2](https://doi.org/10.1016/S0264-8172(99)00008-2).
- [15]. Insalaco, E., Virgone, A., Courme, B., Gaillet, J., Kamali, M. R., Moallemi, A., Lotfpour, M., & Monibi, S. (2006). Upper Dalan Member and Kangan Formation between the Zagros Mountains and offshore Fars, Iran: depositional system, biostratigraphy and stratigraphic architecture. *GeoArabia*, 11(2), 75–176. <https://doi.org/10.2113/GEOARABIA110275>.
- [16]. Edgell, H. S. (1996). Salt tectonism in the Persian Gulf Basin. *Geological Society Special Publication*, 100, 129–151. <https://doi.org/10.1144/GSL.SP.1996.100.01.10>.
- [17]. Baud, A., Béchenec, F., Cordey, F., Le Métour, J., Marcoux, J., Maury, R., & Richoz, S. (2001). Permo-Triassic Deposits: from shallow water to base of slope.
- [18]. Sharland, P. R., Casey, D. M., Davies, R. B., Simmons, M. D., & Sutcliffe, O. E. (2004). Arabian Plate Sequence Stratigraphy – revisions to SP2. *GeoArabia*, 9(1), 199–214. <https://doi.org/10.2113/geoarabia0901199>.
- [19]. Esrafil-Dizaji, B., & Rahimpour-Bonab, H. (2009). Effects of depositional and diagenetic characteristics on carbonate reservoir quality: A case study from the South Pars gas field in the Persian Gulf. *Petroleum Geoscience*,

- 15(4), 325–344. <https://doi.org/10.1144/1354-079309-817>.
- [20]. Kadhodaie-Ilkhchi, A., Rahimpour-Bonab, H., & Rezaee, M. (2009). A committee machine with intelligent systems for estimation of total organic carbon content from petrophysical data: An example from Kangan and Dalan reservoirs in South Pars Gas Field, Iran. *Computers & Geosciences*, 35(3), 459–474. doi.org/10.1016/J.CAGEO.2007.12.007.
- [21]. Mohammadi Dehcheshmehi, S., Adabi, M. H., & Hejazi, S. H. (2013). Depositional facies and geochemistry of the Kangan formation in the South Pars Field, Persian Gulf (Iran). *Carbonates and Evaporites*, 28(3), 297–307. doi.org/10.1007/S13146-013-0156-3.
- [22]. Peyravi, M., Rahimpour-Bonab, H., Nader, F. H., & Kamali, M. R. (2015). Dolomitization and burial history of lower triassic carbonate reservoir-rocks in the Persian Gulf (Salman offshore field). *Carbonates and Evaporites*, 30(1), 25–43. doi.org/10.1007/S13146-014-0197-2.
- [23]. Tavakoli, V. (2015). Chemostratigraphy of the Permian–Triassic Strata of the Offshore Persian Gulf, Iran. *Chemostratigraphy: Concepts, Techniques, and Applications*, 373–393. doi.org/10.1016/B978-0-12-419968-2.00014-5.
- [24]. Amel, H., Jafarian, A., Husinec, A., Koeshidayatullah, A., & Swennen, R. (2015). Microfacies, depositional environment and diagenetic evolution controls on the reservoir quality of the Permian Upper Dalan Formation, Kish Gas Field, Zagros Basin. *Marine and Petroleum Geology*, 67, 57–71. doi.org/10.1016/J.MARPETGEO.2015.04.012.
- [25]. Abdolmaleki, J., Tavakoli, V., & Asadi-Eskandar, A. (2016). Sedimentological and diagenetic controls on reservoir properties in the Permian–Triassic successions of Western Persian Gulf, Southern Iran. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 141, 90–113. doi.org/10.1016/J.PETROL.2016.01.020.
- [26]. Jafarian, A., Fallah-Baghtash, R., Mattern, F., & Heubeck, C. (2017). Reservoir quality along a homoclinal carbonate ramp deposit: The Permian Upper Dalan Formation, South Pars Field, Persian Gulf Basin. *Marine and Petroleum Geology*, 88, 587–604. doi.org/10.1016/J.MARPETGEO.2017.09.002.
- [27]. Tavakoli, V., Naderi-Khujin, M., & Seyedmehdi, Z. (2018). The end-Permian regression in the western Tethys: sedimentological and geochemical evidence from offshore the Persian Gulf, Iran. *GML*, 38(2), 179–192. doi.org/10.1007/S00367-017-0520-8.
- [28]. Iwuoha, S. C., Pedersen, P. K., Clarkson, C. R., & Gates, I. D. (2019). A working method for estimating dynamic shear velocity in the montney formation. *MethodsX*, 6, 1876–1893. <https://doi.org/10.1016/J.MEX.2019.08.013>.
- [29]. Wyllie, M. R. J., Gregory, A. R., & Gardner, L. W. (2002). Elastic wave velocities in heterogeneous and porous media. <https://doi.org/10.1190/1.1438217>, 21(1), 41–70. doi.org/10.1190/1.1438217.
- [30]. Mavko, G., & Vanorio, T. (2010). The influence of pore fluids and frequency on apparent effective stress behavior of seismic velocities. *Geophysics*, 75(1), N1–N7. <https://doi.org/10.1190/1.3277251>.
- [31]. Uyanik, O. (2011). The porosity of saturated shallow sediments from seismic compressional and shear wave velocities. *Journal of Applied Geophysics*, 73(1), 16–24. doi.org/10.1016/J.JAPPGEO.2010.11.001.
- [32]. Blanc, P., Bourbon, X., Lassin, A., & Gaucher, E. C. (2010). Chemical model for cement-based materials: Thermodynamic data assessment for phases other than C–S–H. *Cement and Concrete Research*, 40(9), 1360–1374. doi.org/10.1016/J.CEMCONRES.2010.04.003.
- [33]. Salih, M., El-Husseiny, A., Reijmer, J. J. G., Eltom, H., & Abdelkarim, A. (2023). Factors controlling sonic velocity in dolostones. *Marine and Petroleum Geology*, 147, 105954. doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2022.105954.
- [34]. Anselmetti, F. S., von Salis, G. A., Cunningham, K. J., & Eberli, G. P. (1997). Acoustic properties of Neogene carbonates and siliciclastics from the subsurface of the Florida Keys: Implications for seismic reflectivity. *Marine Geology*, 144(1–3), 9–31. [https://doi.org/10.1016/S0025-3227\(97\)00081-9](https://doi.org/10.1016/S0025-3227(97)00081-9).
- [35]. Regnet, J.-B., Robion, P., David, C., Fortin, J., Brigaud, B., & Yven, B. (2015). Acoustic and reservoir properties of microporous carbonate rocks: Implication of micrite particle size and morphology. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 120(2), 790–811. doi.org/10.1002/2014JB011313.
- [36]. Zhang, S., Zou, C., Peng, C., Yan, L., & Wu, X. (2022). Pore structure and its effect on acoustic velocity and permeability of reef-shoal carbonates in the Tarim Basin, Northwest China. *Journal of Geophysics and Engineering*, 19(6), 1340–1354. doi.org/10.1093/jge/gxac087.
- [37]. Vanorio, T., & Mavko, G. (2011). Laboratory measurements of the acoustic and transport properties of carbonate rocks and their link with the amount of microcrystalline matrix. *Geophysics*, 76(4), E105–E115. doi.org/10.1190/1.3580632.
- [38]. Archilha, N. L., Missagia, R., Hollis, C., de Ceia, M. A. R., McDonald, S. A., Lima Neto, I. A., Eastwood, D. S., & Lee, P. D. (2016). Permeability and acoustic velocity controlling factors determined from X-ray tomography images of carbonate rocks. *AAPG Bulletin*, 100(8), 1289–1309. doi.org/10.1306/02251615044.
- [39]. Anselmetti, F. S., & 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 Bulletin, 83(3), 450-466. doi.org/10.1306/00AA9BCE-1730-11D7-8645000102C1865D.
- [40]. Talebi, F., & HajiZadeh, F. (2022). The effect of porosity on the seismic waves velocities and elastic coefficients in a South-Western Iran's oil field. *Journal of Petroleum Science and Technology*, 12(2), 34-41. doi.org/10.22078/jpst.2023.1287.
- [41]. Khaled, S., Gomaa, S., Nasr, K., Elwageeh, M., & Badr, S. (2022). Development of an artificial neural network model to calculate static young's modulus based on a log-derived data base. *Journal of Petroleum Science and Technology*, 12(3), 12-17. doi.org/10.22078/jpst.2023.4879.1821.
- [42]. Abdideh, M., & Navadeh Tayyebi, M. (2020). Application of quantitative risk assessment in wellbore stability analysis of directional wells. *Journal of Petroleum Science and Technology*, 10(4), 2-9. doi.org/10.22078/jpst.2020.4138.1669.