



## بیست و سومین همایش انجمن زمین‌شناسی ایران ۲۰ و ۲۱ آبانماه ۱۳۹۹ The 23<sup>rd</sup> Symposium of Geological Society of Iran 10-11 November, 2020

# تأثیر تراوایی بر کاهش سرعت موج استونلی: راستی آزمایی یک انگاره در مخازن کربناته خلیج فارس

وحید توکلی

دانشیار دانشگاه تهران، vtavakoli@ut.ac.ir

## چکیده

سرعت موج استونلی در مخازن هیدروکربنی اغلب به عنوان شاخص تراوایی مورد استفاده قرار می‌گیرد. با وجود اهمیت تراوایی در مخازن و قابلیت کاربرد این نوع موج جهت محاسبه آن، مطالعات اندکی در خصوص شاخص‌های تأثیرگذار بر این موج در مخازن کربناته انجام شده است. این مطالعه به بررسی شاخص‌های زمین‌شناسی و پتروفیزیکی مؤثر بر سرعت موج استونلی در مخازن کربناته پرمین-تریاس در بخش مرکزی خلیج فارس می‌پردازد. همچنین باور تأثیر قابل ملاحظه تراوایی بر روی این موج، راستی‌آزمایی می‌شود. داده‌های زمین‌شناسی و آزمایشات معمول از ۴۱۸ متر مغزه یک چاه مورد استفاده قرار گرفته است. به طور متوسط هر ۲۵ سانتی‌متر یک پلاگ جهت اندازه‌گیری تخلخل، تراوایی و چگالی دانه برداشت گردید. همچنین از هر پلاگ، یک مقطه نازک تهیه گردید. مطالعات پتروگرافی درصد کانی‌های مختلف و نوع تخلخل‌های نمونه‌ها را نشان داد. مقایسه این شاخص‌ها با یکدیگر اثبات نمود که کانی‌هایی با چگالی بالاتر دارای سرعت موج استونلی بیشتری نیز هستند. افزایش تخلخل و تراوایی سبب کاهش سرعت این موج می‌گردد. بررسی اثر توأم تخلخل و لیتولوژی نشان داد که حجم سیال موجود در فضاهای خالی تأثیر بیشتری نسبت به نوع کانی‌ها دارد. در مقایسه میزان تخلخل و تراوایی، مشخص گردید که برخلاف تصور کنونی که تراوایی تعیین‌کننده سرعت موج استونلی در سنگ‌ها است، میزان تخلخل مؤثرترین شاخص در تعیین سرعت موج استونلی در مخازن مورد مطالعه است. نمونه‌هایی با تخلخل‌های مرتبط بین‌دانه‌ای و بین‌بلوری و در نتیجه تراوایی بالاتر دارای سرعت بالاتری نسبت به نمونه‌هایی با تخلخل‌های حفره‌ای و واگی و مقدار کمتر تخلخل هستند. نتایج این مطالعه می‌تواند در محاسبات پتروفیزیکی و بخصوص تعیین تراوایی مخزن بر اساس این موج مورد استفاده قرار گیرد.

## مقدمه

تراوایی در مخازن هیدروکربنی یکی از مهم‌ترین شاخص‌ها در تعیین کیفیت مخزنی است. به همین منظور ابزارهای

گونگونی جهت اندازه‌گیری تراوایی یا مرتبط ساختن آن به سایر خصوصیات در مخزن به کار گرفته شده است. تخلخل

اصلی‌ترین پارامتری است که تراوایی به آن نسبت داده می‌شود. در مخازن کربناته، ارتباط بین تخلخل و تراوایی بسیار

پیچیده بوده تا جایی که اغلب، محاسبه تراوایی بر مبنای میزان تخلخل ممکن نیست. در نتیجه دقیق‌ترین مقدار تراوایی

مخزن اغلب بر اساس داده‌های مغزه به دست می‌آید. اما متأسفانه مغزه از اغلب سازندها و چاه‌ها در دسترس نیست و در

نتیجه روش‌های جایگزین برای اندازه‌گیری تراوایی سنگ‌ها ابداع شده است. یکی از این روش‌ها، چاه‌پیمایی است. داده‌های

چاه‌پیمایی از اغلب مخازن و چاه‌ها در دسترس هستند. در نتیجه تلاش‌های بسیاری برای مرتبط ساختن تراوایی با

داده‌های چاه‌پیمایی انجام شده است. همچنین سازندگان این ابزارها تلاش زیادی نموده‌اند که بتوانند روشی را برای

اندازه‌گیری مستقیم تراوایی ابداع نمایند. داده‌های تشدید مغناطیسی هسته‌ای و لاگ دوقطبی صوتی از این ابزارها هستند

[۱، ۲، ۳]. باور محققان بر آن است که سرعت موج استونلی (Stoneley) که از لاگ دوقطبی صوتی به دست می‌آید

نشان دهنده توانایی جابجایی سیال در سنگ‌ها است [۴]. به عبارت دیگر این موج در هنگام حرکت سیالات را جابجا

می‌نماید و در نتیجه کندشدگی (Slowness) آن در سنگ‌های مخزنی ارتباط مستقیم با میزان تراوایی در این سنگ‌ها

دارد. با وجود اهمیت فراوان، تاکنون این انگاره راستی‌آزمایی چندانی نشده است. این مطالعه به بررسی و راستی‌آزمایی این

انگاره در مخازن کربناته پرمین-تریاس در خلیج فارس می‌پردازد. جهت درک رفتار موج استونلی و واکنش آن به تغییر

شاخص‌های پتروفیزیکی و زمین‌شناسی، این متغیرها مورد بررسی و بحث قرار می‌گیرد. نتایج، درستی یا نادرستی این

انگاره را در این مخازن نشان خواهد داد.

## مواد و روش کار

تعداد ۱۳۸۸ نمونه پلاگ و ۴۱۸ متر مغزه و همچنین ۱۳۸۸ داده تخلخل و تراوایی موجود بود که در آزمایشات بعدی مورد استفاده قرار گرفت. علاوه بر این نمونه‌های پلاگ و مغزه، همین تعداد مقاطع نازک تهیه گردید که برای شناسایی نوع تخلخل و میزان تخلخل موجود در سنگ و همچنین تعیین لیتولوژی سازندها استفاده شد. نمونه‌های پلاگ تهیه شده از مغزه به روش ساکسلت شسته شده بود و آماده برای اندازه‌گیری‌های تخلخل و تراوایی به روش قانون بویل و قانون داریسی گردید. مقاطع نازک میکروسکوپی شامل برش‌های نازک تهیه شده از نمونه‌های مغزه چاه مورد مطالعه است. برش‌های نازک توسط محلول الیزارین قرمز به جهت تفکیک لیتولوژی آهک از دولومیت رنگ آمیزی شده است. داده‌های آنالیز مغزه صورت گرفته شده شامل اطلاعات تخلخل، تراوایی و چگالی دانه (grain density) بوده است. نمودارهای چاه‌پیمایی و لاگ‌های پتروفیزیکی استفاده شده شامل لاگ گاما، لاگ صوتی، لاگ‌های مقاومت، لاگ نوترون و لاگ چگالی می‌باشد. تطابق عمقی توسط لاگ گاما مغزه انجام شد.

## بحث

### نتایج

#### لیتولوژی

لیتولوژی غالب و مهم در این مطالعه به پنج گروه اصلی تقسیم می‌شود. این پنج لیتولوژی شامل انیدریت (نمونه‌هایی که بیش از ۹۰ درصد از انیدریت تشکیل شده‌اند و در کل ۲ درصد از نمونه‌ها را به خود اختصاص داده‌اند)، دولومیت (نمونه‌هایی که بیش از ۹۰ درصد دولومیت دارند و ۵۵.۷۳ درصد نمونه‌ها را شامل می‌شوند)، آهک (بیشتر از ۹۰ درصد نمونه‌ها از آهک تشکیل شده است و در مجموع ۲۰.۶۷ درصد نمونه‌ها را شامل می‌شود)، آهک دولومیتی (نمونه‌هایی که بیش از ۵۰ درصد آهک و کمتر از ۱۰ درصد دولومیت دارند که ۱۱.۵۶ درصد نمونه‌ها را تشکیل می‌دهند) و دولومیت آهکی (نمونه‌هایی که بیش از ۵۰ درصد دولومیت و کمتر از ۱۰ درصد آهک دارند و همین‌طور ۱۰۰.۴ درصد نمونه‌ها را به خود اختصاص داده است.

#### نوع تخلخل

با مطالعات مقاطع نازک انواع تخلخل برای مخزن مورد مطالعه تعیین شده است که تخلخل‌های غالب آن عبارتند از تخلخل بین‌دانه‌ای، درون‌دانه‌ای، بین‌بلوری، قالبی، فنسترال و شکستگی. با توجه به درصد فراوانی این تخلخل‌ها (شکل ۱)، تخلخل قالبی بیشترین تخلخل رایج در مخزن و تخلخل‌های درون‌دانه‌ای، فنسترال و شکستگی کم‌ترین تخلخل‌های رایج در مخزن هستند.

#### تحلیل شکستگی‌ها

شکستگی‌های باز تأثیر عمده‌ای بر سرعت موج استونلی دارند و لذا لازم است تا در این نوع مطالعات مورد بررسی قرار گیرند. مطالعات پیشین بر روی سازندهای کنگان و دالان در خلیج فارس نشان داده است که شکستگی تأثیر چندانی بر خصوصیات مخزنی آنان ندارد. جهت درک تأثیر شکستگی‌ها بر سرعت موج استونلی، شکستگی‌ها بر اساس مشاهدات مغزه ثبت گردید. در مجموع تعداد ۱۰۶ شکستگی باز تشخیص داده شد که اغلب آنان در دالان بالایی قابل مشاهده هستند. متوسط فاصله شکستگی‌های باز در سازند کنگان ۴.۹ متر و در سازند دالان ۳.۲۵ متر است. این فاصله قابل ملاحظه نشان می‌دهد که این شاخص تأثیر چندانی بر سرعت موج استونلی در این مخازن نخواهد داشت. تطابق توزیع موج استونلی و شکستگی‌های باز در سازندهای مورد مطالعه این امر را اثبات می‌نماید.

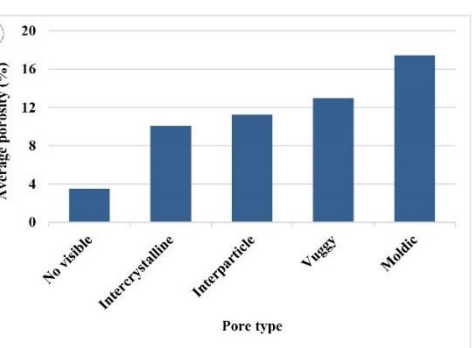
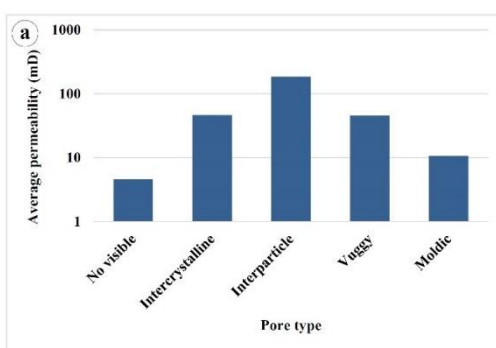
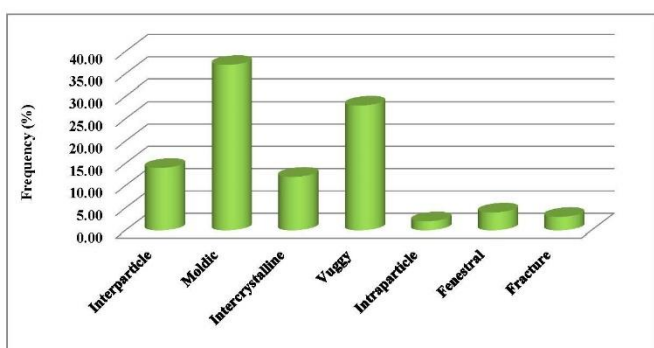
#### بحث

نتایج مطالعات قبلی نشان می‌دهد که سرعت موج استونلی تابع جابجایی سیال در سنگ‌ها است [۸]. زمانی که موج به مجرای مانند یک شکستگی باز برخورد می‌کند، سیال را به درون سازند می‌فشارد و بنابراین انرژی و در نتیجه سرعت آن کم می‌شود [۹]. مخازن کربناته پرمین-تریاس سازندهای شکسته‌ای نیستند و بنابراین مورد مناسبی برای بررسی تأثیر سایر شاخص‌ها بر سرعت موج استونلی هستند. مقایسه سرعت موج استونلی با تراوایی در سازندهای مورد بررسی نشان می‌دهد که با افزایش تراوایی، سرعت موج کاهش می‌یابد اما در تراوایی‌های بیش از ۱۰ میلی‌داریسی سرعت تقریباً ثابت است و یا حتی افزایش می‌یابد. این امر به سبب حجم سیال موجود در این فضاهای خالی است. از آنجا که به طور کلی با افزایش تراوایی، تخلخل نیز افزایش پیدا می‌کند، حجم سیال موجود نیز بیشتر شده و توانایی موج برای جابجایی این سیال کمتر می‌شود.

مقایسه سرعت موج استونلی در لیتولوژی‌های مختلف نشان می‌دهد که این سرعت تابع نوع کانی‌های موجود در سنگ است. سرعت موج استونلی به ترتیب از انیدریت به دولومیت، دولومیت آهکی، آهک دولومیتی و آهک کاهش می‌یابد. این رابطه نشان می‌دهد که سرعت موج استونلی و چگالی کانی‌ها ارتباط مستقیم دارد. جهت تأیید این روند، سرعت موج استونلی با چگالی دانه که از آزمایش معمول مغزه نیز به دست آمد، مقایسه گردید. نتایج روند مشابهی را نشان می‌دهد. در نتیجه در کنار سایر عوامل، کانی‌شناسی سنگ‌ها نیز سرعت موج استونلی را کنترل می‌نماید. این امر به دلیل ساختار متراکم‌تر در کانی‌هایی با چگالی بالاتر است که سرعت موج را افزایش می‌دهد.

جهت درک تأثیر تخلخل بر سرعت موج استونلی، متوسط این سرعت در محدوده‌های مختلف تخلخل بررسی گردید و رابطه مستقیمی بین این دو مشاهده شد. همانند تراوایی، در تخلخل‌های بالا (بیش از ۲۵ درصد)، سرعت موج با افزایش تخلخل ثابت است. سپس تأثیر همزمان هردو متغیر یعنی تخلخل و میزان دولومیت بر سرعت بررسی گردید. نتایج نشان داد درحالتی که این دو شاخص در سنگ تغییر کنند، یعنی به جای چگالی دانه‌ها، چگالی کل سنگ منظور گردد، سرعت تابع میزان دولومیت موجود در سنگ نیست. مقایسه سرعت با مقدار تخلخل در همین نمونه‌ها نشان داد که سرعت همچنان تابع تخلخل است و در نتیجه حجم سیالات موجود در سنگ تأثیر بیشتری نسبت به لیتولوژی بر سرعت موج استونلی دارد. بررسی همین رابطه با جایگزینی آهک به جای دولومیت در نمودارها، نتایج مشابهی را نشان می‌دهد.

جابجایی سیالات در سنگ‌ها و بخصوص سنگ‌های کربناته به میزان پیچیدگی فضاهای خالی نیز بستگی دارد. این پیچیدگی تابعی از نوع فضاهای خالی موجود در سنگ است. نمونه‌هایی با تخلخل‌های متصل بین بلوری و بین‌دانه‌ای دارای سرعت بالاتری در مقایسه با نمونه‌هایی با تخلخل واگی و قالبی هستند. این امر برخلاف انگاره پذیرفته شده در مورد سرعت این موج است. به این معنی که نمونه‌هایی با تخلخل‌های متصل و در نتیجه تراوایی بالاتر، باید دارای سرعت کمتری باشند. بررسی مقدار تخلخل در نمونه‌هایی با انواع متفاوت فضاهای خالی نشان می‌دهد که مقدار تخلخل در نمونه‌های با تخلخل‌های متصل کمتر است (شکل ۲). این امر اثبات می‌نماید که حجم تخلخل تأثیر بیشتری نسبت به تراوایی و نوع کانی بر سرعت موج استونلی دارد، هرچند هرسه سرعت این نوع موج را کنترل می‌نمایند. در سازندهای کنگان و دالان تخلخل‌های حفره‌ای در مواردی به یکدیگر متصل بوده و در نتیجه سرعت در آنان بیشتر از نمونه‌هایی با تخلخل قالبی است.



## نتیجه گیری

تلفیق داده‌های زمین‌شناسی و پتروفیزیکی در سازندهای کنگان و دالان در بخش مرکزی خلیج فارس تأثیر آنان

بر سرعت موج استونلی در این مخازن را آشکار نمود. بررسی‌ها نشان داد که لیتولوژی، نوع و مقدار تخلخل و

تراوایی سرعت موج استونلی را در این مخازن کربناته کنترل می‌نمایند. تأثیر شکستگی‌ها با توجه به فراوانی کم

آنان قابل ملاحظه نبود. سرعت موج در کانی‌هایی با چگالی بالاتر، بیشتر است اما چنانچه تخلخل سنگ‌ها نیز

درنظر گرفته شود، تأثیر تخلخل بر سرعت موج استونلی بیش از تأثیر نوع کانی‌ها است. افزایش تخلخل سبب

می‌گردد تا حجم سیال بیشتری در سنگ حضور داشته باشد و در نتیجه موج نتواند آن را جابجا نماید. همین

رابطه بین تراوایی و میزان سرعت موج استونلی نیز مشاهده می‌گردد. با افزایش تراوایی، سرعت کاهش می‌یابد

اما همچنان تأثیر تخلخل بیشتر از تراوایی است. نمونه‌هایی با تخلخل‌های مرتبط و تراوایی بالا، دارای سرعت

موج بالایی نیز هستند و در مقابل نمونه‌هایی با تخلخل‌های جداهم دارای سرعت کمتری می‌باشند. این برخلاف

تصور رایج در بین محققین است که اغلب تراوایی را اصلی‌ترین عامل تأثیرگذار بر سرعت موج استونلی در

سنگ‌های کربناته می‌دانند. در نمونه‌هایی با تخلخل کمتر، چگالی دانه کنترل‌کننده سرعت است و در نتیجه

ارتباط بین سرعت موج و تخلخل پراش بیشتری نشان می‌دهد.

## منابع

[1] Benjumea, B., López, A.I., Mari, J.L., García-Lobón, J.L. Petrophysical characterization of carbonates (SE of Spain) through full wave sonic data (2019) Journal of Applied Geophysics, 160, pp. 1-14.

[2] Carrasquilla, A., Lima, R. Basic and specialized geophysical well logs to characterize an offshore carbonate reservoir in the Campos Basin, southeast Brazil (2020) Journal of South American Earth Sciences, 98, art. no. 102436.

[3] Chang, S.K., Liu, H.L., Johnson, D.L. Low-frequency tube waves in permeable rocks. (1988) Geophysics, 53 (4), pp. 519-527.

[4] Konert, G., Affifi, A.M., Al-Hajri, S.A., Droste, H.J. Paleozoic stratigraphy and hydrocarbon habitat of the Arabian plate (2001) GeoArabia, 6 (3), pp. 407-442.

[5] Sadooni, F.N., Alsharhan, A.S. Stratigraphy, lithofacies distribution, and petroleum potential of the Triassic strata of the northern Arabian plate (2004) American Association of Petroleum Geologists Bulletin, 88 (4), pp. 515-538.

[6] Al-Husseini, M.I., Matthews, R.K. Calibrating mid-Permian to early Triassic Khuff sequences with orbital clocks (2010) GeoArabia, 15 (3), pp. 171-206.

[7] Abdolmaleki, J., Tavakoli, V., Asadi-Eskandar, A. Sedimentological and diagenetic controls on reservoir properties in the Permian-Triassic successions of Western Persian Gulf, Southern Iran (2016) Journal of Petroleum Science and Engineering, 141, pp. 90-113.

[8] Yan, S.-G., Xie, F.-L., Gong, D., Zhang, C.-G., Zhang, B.-X. Borehole acoustic fields in porous formation with tilted thin fracture (2015) Acta Geophysica Sinica, 58 (1), pp. 307-317.

[9] Singer, J., Saunders, J., Holloway, L., Stoll, J.B., Pain, C., Stuart-Bruges, W., Mason, G. Electrokinetic logging has the potential to measure permeability (2006) Petrophysics, 47 (5), pp. 427-441.