

# ترکیب داده‌های مغزه و چاه‌پیمایی به منظور پیش‌بینی سرعت امواج تراکمی در سنگ‌های مخازن کربناته

پژوهش‌نفت

سال بیست و دوم

شماره ۷۱

صفحه ۶۵-۵۷، ۱۳۹۱

تاریخ دریافت مقاله: ۹۰/۹/۲۳

تاریخ پذیرش مقاله ۹۱/۲/۴

عزت الله کاظم زاده\*، جعفر ولی، محمدرضا اصفهانی و حسام آلوکی بختیاری

پژوهشگاه صنعت نفت، پژوهشکده مهندسی نفت

kazemzadehe@ripi.ir

سرعت لرزه‌ای از ۱۳۹ تا ۱۱۳۵ (m/s) تعیین گردید. همچنین نتایج، نشان‌دهنده کارایی بهتر طبقه‌بندی سنگ‌ها بر اساس نگار انحراف سرعت لرزه‌ای نسبت به روش واحدهای جریان هیدرولیکی در تخمین سرعت امواج تراکمی می‌باشد. به طوری که متوسط ضریب همبستگی در تقسیم‌بندی بر اساس نگار انحراف سرعت برابر ۹۳٪ و بر مبنای واحدهای جریان هیدرولیکی برابر ۶۷٪ می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: سنگ کربناته، سرعت امواج طولی، واحد جریان هیدرولیکی، انحراف سرعت لرزه‌ای

## مقدمه

تخلخل یک پارامتر اصلی و مؤثر در مقدار سرعت امواج است که معمولاً با افزایش آن سرعت کاهش می‌یابد. با توجه به اینکه سرعت موج در سنگ‌های کربناته به پارامترهای دیگری نظیر دیاژنز، کانی‌شناسی، ساختمان خلل و فرج، نوع سیال، فشار و دما و همچنین در کربناته‌های نامتراکم به نسبت دانه به خمیره، شکل، اندازه، جورشدگی و پیچاپیچی بستگی دارد، پیش‌بینی تخلخل از روی داده‌های سرعت مشکل می‌باشد.

## چکیده

در سنگ‌های کربناته ارتباط سرعت امواج تراکمی با تخلخل علاوه بر مقدار تخلخل به عواملی نظیر نوع تخلخل، کانی، اشباع‌شدگی و فشار بستگی دارد. بنابراین نمودار سرعت بر حسب تخلخل دارای پراکندگی زیادی می‌باشد. در این مطالعه ارتباط بین سرعت امواج تراکمی و تخلخل به دو روش مختلف طبقه‌بندی در سنگ‌های کربناته مورد تجزیه و تحلیل قرار می‌گیرد. بدین منظور از دو روش تقسیم‌بندی سنگ‌های کربناته بر مبنای واحدهای جریان هیدرولیکی و مقادیر انحراف سرعت لرزه‌ای استفاده شده است. روش‌های آنالیز هیستوگرام و روش مربعات می‌نیمم خطا جهت گروه‌بندی شاخص منطقه‌ای جریان و مقادیر انحراف سرعت به کار گرفته شده است. تعداد واحدهای جریان هیدرولیکی بر مبنای مقادیر تخلخل و تراوایی اندازه‌گیری شده در آزمایشگاه تعیین گردید و مقادیر انحراف سرعت لرزه‌ای از اختلاف سرعت حاصل از نگار صوتی و سرعت حاصل از تخلخل نوترونی با استفاده از معادله متوسط زمانی وایلی محاسبه شد. نتایج بیان‌گر ۴ واحد جریان هیدرولیکی با مقادیر شاخص منطقه‌ای جریان از ۲/۲۳ تا ۱۹/۹۵ و چهار گروه سنگی با مقادیر انحراف

شده است.

$$V_p = 6393e^{-0.0180} X \phi, R^2=0.94$$

$$V_s = 3527e^{-0.0206} X \phi, R^2=0.92 \quad (5)$$

در این معادله  $V_p$  و  $V_s$  بر حسب متر بر ثانیه و  $\phi$  به صورت اعشاری می باشد. علی رغم ضریب همبستگی بالا، تغییرات سرعت می تواند در بازه ۲/۱ تا ۵ km/s متغیر باشد.

تحقیقات آزمایشگاهی انجام شده توسط ابرلی و همکاران [۵] بر روی نمونه های کربناته، نشان دهنده رابطه معکوس بین سرعت و تخلخل با پراکندگی زیاد است، به طوری که اختلاف سرعت در تخلخل های مساوی به خصوص در تخلخل های بالا، در برخی موارد به بیش از ۲۵۰۰ (m/s) می رسد. به عنوان مثال سنگ های با تخلخل ۳۹٪ می توانند سرعتی از ۲۴۰۰ (m/s) تا ۵۰۰۰ (m/s) داشته باشند. حتی در تخلخل های کمتر از ۱۰٪ سرعت می تواند در حدود ۲۰۰۰ (m/s) تغییر کند که یک دامنه تغییرات زیاد برای سنگ ها با ترکیب و مقادیر تخلخل یکسان می باشد.

در سنگ های کربناته، مدول های الاستیک بالا سرعت هایی را به وجود می آورند که از مقدار پیش بینی شده توسط معادله متوسط وایلی بیشتر است. معادله ۶ توسط والش [۶] جهت ارتباط بین مدول های الاستیک پیکره سنگ و تخلخل ارائه گردید که بیان گر نحوه تأثیرگذاری پارامترهای پتروفیزیکی و لیتولوژی روی وابستگی سرعت - تخلخل می باشد.

$$\frac{1}{K_{fr}} = \frac{1}{K_m} + \phi * C_p \quad (6)$$

در معادله بالا،  $K_m$  مدول بالک خمیره سنگ،  $C_p$  ضریب تراکم پذیری منافذ سنگ و  $K_{fr}$  مدول بالک پیکره سنگ می باشد. بر حسب سرعت امواج P و S و چگالی بالک سنگ به صورت معادله ۷ تعریف می شود.

$$K_{fr} = \rho(V_p^2 - \frac{4}{3}V_s^2) \quad (7)$$

از معادله ۶ نتیجه می شود که مدول های بالک پیکره سنگ با تخلخل تغییر کرده و به مدول بالک کانی سنگ و تراکم پذیری منافذ بستگی دارد. همچنین تراکم پذیری به شکل منافذ و نسبت ابعادی وابسته است. به علاوه برای سنگ های اشباع، مدول های بالک به تراکم پذیری سیال و فرکانس اندازه گیری بستگی دارد. بنابراین، دقت تعیین تخلخل از

فرآیندهایی نظیر سیمان شدگی و انحلال، پیوسته ساختار خلل و فرج را تغییر می دهد و باعث تغییر تخلخل می گردد. این تغییرات می توانند سبب تغییرات کانی از آرگونیت یا کلسیت به دولومیت شود، یا شکل منافذ را تغییر داده و به عنوان مثال از منافذ بین دانه ای به منافذ نوع قالبی تبدیل شود. همه این تغییرات خواص الاستیک را تغییر داده و در نتیجه سرعت امواج را تحت الشعاع قرار می دهد. ارتباط سرعت - تخلخل توسط معادلات تجربی مختلفی ارائه شده است. وایلی و همکاران [۱] با اندازه گیری سرعت در لایه های متناوب لوسیت و آلومینیم برآزش خوبی را برای معادله میانگین زمانی به صورت معادله ۱ به دست آوردند.

$$\frac{1}{V_p} = \frac{\phi}{V_{Luc}} + \frac{1-\phi}{V_{AL}} \quad (1)$$

که در آن  $V_p$  سرعت متوسط موج تراکمی در مجموعه لایه های متناوب،  $V_{Luc}$  و  $V_{AL}$  به ترتیب سرعت های تراکمی در آلومینیم، لوسیت و  $\phi$  معرف تخلخل می باشد. در سنگ های اشباع شده از سیال معادله ۱ به معادله ۲ تبدیل خواهد شد.

$$\frac{1}{V_p} = \frac{\phi}{V_f} + \frac{1-\phi}{V_m} \quad (2)$$

که در آن  $V_p$ ،  $V_f$  و  $V_m$  به ترتیب سرعت های موج تراکمی در سنگ اشباع از سیال، سیال و قسمت جامد سنگ می باشد. معادله ۲ به معادله میانگین زمانی معروف است و ارتباط بین سرعت و تخلخل را بیان می کند که در سنگ های تحت فشار بالا صادق است. مقادیر سرعت در سیال و خمیره سنگ معلوم می باشند. پس از وایلی و همکاران تحقیقات زیادی در این زمینه صورت گرفت و روابط متنوعی ارائه گردید. به عنوان مثال پیکت [۲] ارتباط بین سرعت و تخلخل را به صورت معادله ۳ ارائه نمود.

$$\frac{1}{V} = (1-\phi)^2 V_m + \phi V_f \quad (3)$$

همچنین رایگا-سلمنسیو و همکاران [۳] معادله ۴ را جهت ارتباط سرعت - تخلخل ارائه نمودند.

$$\phi = 1 - \left( \frac{\Delta t_{ma}}{\Delta t} \right)^{1/x} \quad (4)$$

متغیر x در معادله ۴ بیان گر نوع سنگ می باشد، به طوری که مقدار x برای سیلیکا، کلسیت و دولومیت به ترتیب برابر ۱/۶، ۱/۷۶ و ۲ می باشد. آنسلمیتی و ابرلی [۴] با اندازه گیری سرعت های امواج تراکمی و برشی بر روی ۲۹۵ نمونه پلاگ کربناته، معادلات توانی را برای ارتباط تخلخل 0 سرعت ارائه نمودند که در معادله ۵ نشان داده

بلکه به نوع تخلخل هم بستگی دارد و هندسه منافذ، عامل اصلی کنترل کننده ارتباط معکوس سرعت و تخلخل می‌باشد. در واقع میزان انحراف نگار سرعت می‌تواند با منافذ سنگ در ارتباط باشد. به عنوان مثال می‌توان به وجود دولومیت‌ها با تخلخل بیش از ۴۰٪ که در معادله وایلی سرعت آنها بیش از مقدار حقیقی تخمین زده می‌شود، اشاره کرد.

آنسلمیتی و ابرلی [۴] مقادیر اختلافات سرعت را از معادله متوسط زمانی وایلی برای انواع منافذ در نواحی بهاما و مائیل تشریح نمودند و به توضیح علت اختلافات مثبت و منفی از نمودار معادله متوسط زمانی پرداخته‌اند.

مقادیر انحرافات سرعت هر دسته از منافذ مشخص شده است، به طوری که مقدار متوسط انحرافات سرعت برای انواع منافذ متفاوت بوده و به ترتیب از کوچک به بزرگ مربوط به تخلخل ریزدانه، تخلخل بین دانه‌ای، تخلخل کم با سیمان شدگی زیاد، تخلخل قالبی و تخلخل درون فسیلی می‌باشد. در تشریح علت انحرافات سرعت می‌توان گفت در پیکره‌های سنگی سخت، موج صوتی تمایل به حرکت از پیکره سخت داشته و زمان عبور وابستگی زیادی به تخلخل ندارد. بنابراین، انحراف سرعت مقدار مثبت بالایی خواهد داشت. در صورتی که در سنگ‌هایی با خلل و فرج مشابه حالت ایده‌آل معادله وایلی، انتظار می‌رود که انحراف سرعت صفر شود. بنابراین، مقادیر انحراف سرعت در اطراف صفر جهت تخلخل‌های بین ذره‌ای نشان‌دهنده این مسأله است. همچنین اگر موج در حرکت خود با تخلخل‌های بالایی روبرو شود که در سطح خمیره سنگ توزیع شده و پیکره محکمی از آن حمایت نکند، میزان انحراف سرعت منفی حاصل خواهد شد.

#### واحدهای جریان هیدرولیکی

واحدهای جریان هیدرولیکی روشی است که برای طبقه‌بندی خواص مخزنی و جریانی انواع سنگ‌ها و پیش‌بینی خواص جریانی بر پایه پارامترهای زمین‌شناسی و فیزیک جریان در مقیاس منافذ به کار می‌رود. تئوری این روش ابتدا توسط آمیفول و همکاران [۷] ارائه شد و سپس

خواص الاستیک به ارزیابی دقیق تأثیر نوع کانی، شکل هندسی منافذ و نوع سیال وابسته است. در این مطالعه، تعداد ۶۷ نمونه پلاگ سنگ کربناته از یکی از مخازن جنوب غرب ایران تهیه شد. پس از آماده‌سازی و شستشو با یک حلال نفتی، خواص پتروفیزیکی شامل تخلخل و تراوایی اندازه‌گیری شد. همچنین سرعت امواج تراکم با استفاده از نمونه در شرایط فشار بالاسری و فشار سیال مخزن اندازه‌گیری شد. در این بررسی، نمونه‌ها به چهار دسته بر مبنای واحد جریان هیدرولیکی طبقه‌بندی شدند. سرعت صوت موج تراکمی در هر واحد جریان هیدرولیکی بر حسب تخلخل رسم گردید. متوسط مقدار ضریب همبستگی برای هر دسته از نمونه‌ها تعیین شد. نمودار انحراف سرعت صوت با تفاضل سرعت حاصل از نگار صوتی و سرعت در معادله وایلی به دست می‌آید. نمودار انحراف سرعت صوت بر حسب تخلخل برای کلیه نمونه‌ها در هر دسته از نمونه‌ها با انحراف سرعت یکسان رسم گردید. متوسط مقدار ضریب همبستگی برای هر دسته از نمونه‌ها در نمودار انحراف سرعت با مقدار ضریب همبستگی در نمودارهای واحد جریان هیدرولیکی مقایسه شد.

#### نگار انحراف سرعت

در معادله وایلی با مشخص بودن سرعت عبور موج از ماتریکس و سیال برای یک سنگ با یک تخلخل مفروض، یک مقدار برای سرعت عبور موج از آن محیط وجود دارد. در حالی که در محیط‌های واقعی، دو محیط با تخلخل متفاوت، سرعت سیگنال صوتی یکسانی دارند که برخلاف حالت ایده‌آل در معادله وایلی است. نگار انحراف سرعت از اختلاف سرعت محاسبه شده با استفاده از زمان عبور موج حاصل از نگار صوتی و سرعت حاصل از معادله وایلی و تخلخل نوترون به دست می‌آید.

نمودارهای صوتی، زمان‌گذر امواج تراکمی از محدوده معینی از سازند را ثبت می‌کنند که این زمان‌گذر به نوع لیتولوژی، تخلخل و نوع حفرات بستگی دارد.

سرعت صوتی تنها حاصل عملکرد تخلخل کلی نیست،

یکسانی داشته و یک واحد جریانی هیدرولیکی خاصی را تعریف می‌کنند. هر خط یک واحد جریان هیدرولیکی است و محل تلاقی این خط با  $\Phi_z = 1$ ، مقدار متوسط FZI برای این واحد جریان هیدرولیکی می‌باشد.

$$FZI = \frac{1}{\sqrt{F_s \tau^2 S_{gv}^2}} \quad (10)$$

$$RQI = 0.0314 \sqrt{\frac{K}{\Phi_e}} \quad (11)$$

$$\Phi_z = \frac{\Phi_e}{1 - \Phi_e} \quad (12)$$

$$RQI = \Phi_z * FZI \quad (13)$$

پایه دسته بندی واحدهای جریان هیدرولیکی، مشخص کردن گروه‌های داده از خطوط راست با شیب یک روی نمودار لگاریتمی RQI بر حسب  $\Phi_z$  است. اگرچه برای هر واحد جریانی باید یک مقدار FZI در محدوده مقدار متوسط واقعی وجود داشته باشد، ولی به دلیل خطاهای اندازه‌گیری تصادفی در آنالیز مغزه، یک توزیع از FZI در محدوده مقدار متوسط واقعی وجود دارد. سه روش آنالیز هیستوگرام، نمودار احتمال و الگوریتم دسته‌بندی تحلیلی به وسیله محققین جهت گروه‌بندی مناسب واحدهای جریان هیدرولیکی استفاده شده است. روش‌های دسته‌بندی گرافیکی شامل آنالیز هیستوگرام و نمودارهای احتمالی، توزیع FZI را به صورت تصویری مشخص می‌سازد که امکان تعیین تعداد واحدهای جریان هیدرولیکی را فراهم می‌سازد. جهت بهینه‌سازی تعداد مطلوب واحد جریان هیدرولیکی از نمودار پارامتر SSE بر حسب تعداد واحد جریان هیدرولیکی (HU) استفاده شده است. پارامتر SSE با معادله ۱۴ تعریف می‌شود که در این معادله،  $n$  تعداد کل نمونه‌ها می‌باشد.

$$SSE = (FZI - 10)^2 \frac{\sum_{i=1}^n \log RQI - \sum_{i=1}^n \log \phi_z}{n} \quad (14)$$

### مراحل انجام کار

آزمایشات بر روی ۶۷ نمونه منتخب به شکل استوانه‌ای (پلاگ) از نمونه‌های تمام مغزه سنگ‌های کربناته مخازن هیدروکربوری واقع در جنوب غرب ایران صورت گرفته است. به منظور خارج ساختن هیدروکربورهای سبک و سنگین از داخل نمونه‌های مغزه، آنها را در تماس با یک حلال نفتی قرار می‌دهند که پس از حل شدن مواد هیدروکربوری

توسط سایر محققین تعمیم یافت.

یک واحد جریان هیدرولیکی زیر مجموعه‌ای از کل گونه‌های سنگ مخزن می‌باشد که با خواص زمین‌شناسی کنترل‌کننده جریان سیال سازگار بوده و از روی سایر خواص قابل پیش‌بینی است. عمده‌ترین پارامترهایی که جریان سیال را تحت الشعاع قرار می‌دهند، عبارتند از: نوع، فراوانی و محل قرارگیری کانی‌ها و بافت سنگ‌ها شامل اندازه دانه، شکل دانه، جورشدگی و فشردگی. ترکیبات مختلف از عوامل تأثیرگذار زمین‌شناسی می‌تواند واحدهای جریان هیدرولیکی مجزا را به وجود آورد که هر کدام خواص انتقال سیال مشابه‌ای دارند. بنابراین واحدهای جریان هیدرولیکی شامل گونه‌های زمین‌شناسی متفاوت است و گروه‌بندی سنگ‌ها بر اساس شاخص‌های زمین‌شناسی سنگ در ارتباط با جریان سیال، مبنای دسته‌بندی واحدهای جریان هیدرولیکی می‌باشد. تئوری مربوط به دسته‌بندی واحدهای جریان هیدرولیکی بر این فرض است که محیط متخلخل را می‌توان به وسیله دسته‌ای از لوله‌های موئین در نظر گرفت. برای یک محیط متخلخل واقعی کوزنی [۸] و کارمن [۹] معادله ۸ را ارائه نمودند:

$$K = \frac{\Phi_e^3}{(1 - \Phi_e)^2} \times \frac{1}{F_s \tau^2 S_{gv}^2} \quad (8)$$

که در معادله ۸،  $\tau$  پیچاپیچی،  $S_{gv}$  مساحت سطح واحد حجم دانه،  $F_s$  فاکتور شکل،  $K$  نفوذپذیری بر حسب میکرومتر مربع و  $\Phi_e$  تخلخل می‌باشد. گروه  $F_s \tau^2$  به عنوان ثابت کوزنی شناخته شده و محدودیت اصلی در کاربرد معادله ۸ می‌باشد. زیرا مقادیر واقعی ثابت کوزنی معمولاً برای یک سنگ خاص ناشناخته بوده و عبارت  $S_{gv}^2$  در محاسبات منظور نمی‌گردد. آمیفول و همکاران [۷] با تقسیم معادله ۸ بر  $\Phi_e$ ، تغییرات ثابت کوزنی را مورد مطالعه قرار داده و معادله زیر را ارائه نمودند:

$$0.0314 \sqrt{\frac{K}{\Phi_e}} = \left[ \frac{\Phi_e}{1 - \Phi_e} \right] \frac{1}{\sqrt{F_s \tau^2 S_{gv}^2}} \quad (9)$$

ثابت  $0.0314$  جهت تبدیل میلی‌متر مربع به میلی داریسی است. با تعریف عبارت‌های شاخص منطقه‌ای جریان (FZI)، شاخص کیفیت مخزنی (RQI) و تخلخل نرمال شده ( $\Phi_z$ ) می‌توان معادله ۹ را به معادله ۱۳ تبدیل کرد. در شرایط ایده‌آل، نمودار لگاریتمی RQI بر حسب  $\Phi_z$  یک نمودار خطی خواهد بود که مقادیر مختلف FZI گلوگاه‌های منافذ

ارتباط تراوایی  $\theta$  تخلخل و نیز سرعت - تخلخل می‌باشد. در سنگ‌های کربناته، نوع تخلخل تقریباً اهمیتی به اندازه تخلخل در رفتار الاستیک در نتیجه سرعت امواج دارد. در حالی که در بیشتر معادلات از شکل منافذ صرف نظر شده و یا به صورت مناسبی در مدل‌ها در نظر گرفته نمی‌شود. بنابراین، عدم قطعیت آنالیزهای وارون لرزه‌ای، دامنه بر حسب دورافت و محاسبات حجم منافذ که بر پایه این معادلات می‌باشند، بسیار زیاد است.

در ادامه ارتباط تراوایی - تخلخل و سرعت امواج تراکمی - تخلخل با استفاده از شاخص منطقه‌ای جریان و مقادیر انحراف سرعت لرزه‌ای مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است.

مقادیر شاخص منطقه‌ای جریان برای کلیه نمونه‌ها با استفاده از داده‌های تخلخل و تراوایی محاسبه گردید. با دسته‌بندی بر اساس آنالیز هیستوگرام، مقادیر متوسط شاخص منطقه‌ای جریان برای کلیه نمونه‌ها به چهار دسته تقسیم‌بندی شده است. در جدول ۱ مقادیر متوسط شاخص منطقه‌ای جریان برای هر گروه از نمونه‌ها ارائه شده است.

در شکل ۲ نمودار شاخص کیفیت مخزنی و تخلخل نرمال شده در مقیاس لگاریتمی با شاخص منطقه‌ای جریان معادل برای هر واحد جریان هیدرولیکی نمایش داده شده است. همچنین در شکل ۳ آنالیز هیستوگرام بر اساس داده‌های لگاریتمی شاخص منطقه‌ای جریان هیدرولیکی آمده است. از آنجایی که تعیین تعداد واحدهای جریان هیدرولیکی با استفاده از آنالیز خوشه‌ای و آنالیز احتمال نرمال، تابع کاربر می‌باشد و احتمال ایجاد خطا در محاسبات زیاد است، لذا به منظور کاهش خطا از پارامتر مجموع مربعات خطا (SSE) استفاده شده است. روش کار بدین صورت است که ابتدا تعداد دسته‌ها را برابر یک فرض کرده و آنالیز خوشه‌ای K-means را توسط نرم‌افزار Matlab انجام می‌دهیم. سپس آنالیز رگرسیون خطی را بر روی داده‌ها انجام داده و مقدار مجموع مربعات خطا را محاسبه می‌کنیم. این کار را به همین صورت برای تعداد دسته‌های دیگر انجام داده و در نهایت نموداری از مجموع مربعات خطا در مقابل تعداد دسته‌ها رسم می‌کنیم (شکل ۴).

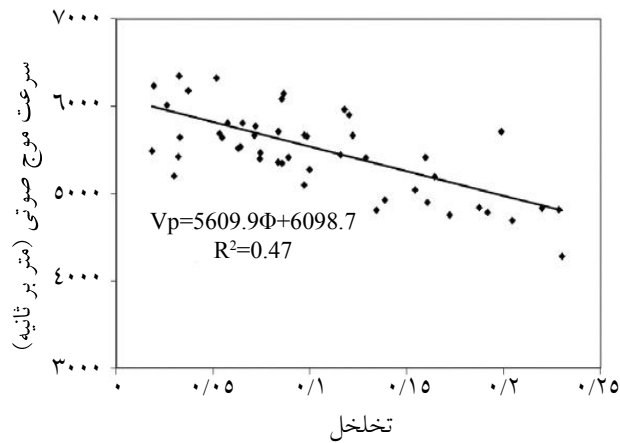
در حلال فوق، نمونه‌ها عاری از هرگونه هیدروکربور می‌شوند. در این مطالعه از سیال تولوئن و متانول جهت عاری نمودن نمونه‌های پلاگ از هیدروکربور و آب سازندی استفاده شد. سپس نمونه‌ها در آون معمولی خشک شدند. خواص پتروفیزیکی شامل تخلخل و تراوایی مطلق نسبت به هوا برای نمونه‌های پلاگ انتخابی با قطر  $3/8$  cm و طول  $5$  cm اندازه‌گیری شد. مقدار حجم فضای خالی با استفاده از دستگاه Ultra Porosimeter و بر اساس قانون بویل - ماریوت تعیین شد. در این دستگاه با استفاده از سل مرجع، گاز بی‌اثر هلیوم با فشار  $200$  پام به نمونه تزریق می‌شود. مقدار حجم دانه‌های نمونه توسط دستگاه اندازه‌گیری می‌شود. با محاسبه حجم توده با شکل هندسی می‌توان حجم حفرات و در واقع تخلخل نمونه را اندازه‌گیری کرد. همچنین مقدار تراوایی نمونه پلاگ سنگ مخزن بر اساس دستگاه Ultra Permeameter و با استفاده از قانون دارسی، اندازه‌گیری می‌شود. در این دستگاه نمونه پلاگ در نمونه نگهدار با فشار دور لاستیک  $180$  پام قرار می‌گیرد. به نمونه با اختلاف فشار معین، گاز هوای خشک تزریق شده و دبی سیال هوا در حال عبور از نمونه اندازه‌گیری می‌شود. با استفاده از قانون دارسی، تراوایی نمونه بر حسب میلی دارسی طبق رابطه زیر محاسبه می‌گردد.

$$K = \frac{Q\mu_m L}{\Delta P A} \quad (15)$$

سرعت امواج تراکمی در عمق مورد نظر سازند با استفاده از نگار صوتی به دست آمده است. بدین منظور عمق هر نمونه پلاگ در نگار صوتی چاه معادل سازی شد. سپس سرعت موج تراکمی (عکس زمان رسید) اندازه‌گیری می‌شود. بنابراین، سرعت موج تراکمی  $67$  نمونه در عمق‌های مختلف سازند مورد مطالعه، ارزیابی شد.

## بحث و نتایج

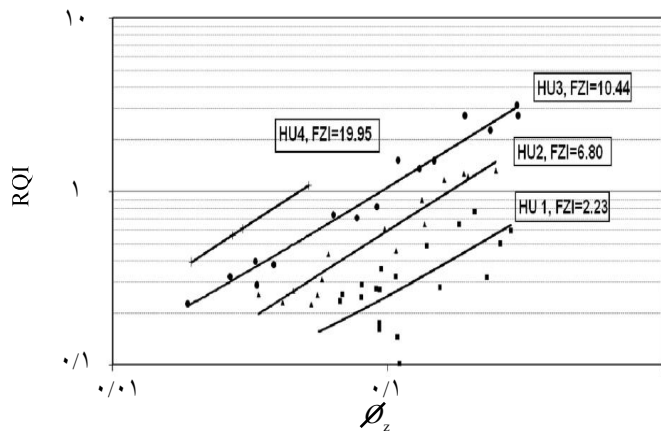
همان گونه که در شکل ۱ مشاهده می‌شود، پراکندگی زیادی در نمودارهای تراوایی و سرعت امواج تراکمی بر حسب تخلخل وجود دارد. ضریب همبستگی برابر  $47\%$  می‌باشد که بیان‌گر همبستگی بسیار ضعیف بین این دو پارامتر است. این مسأله به این معناست که در سنگ‌های کربناته علاوه بر مقدار تخلخل، نوع تخلخل نیز عامل کنترل‌کننده



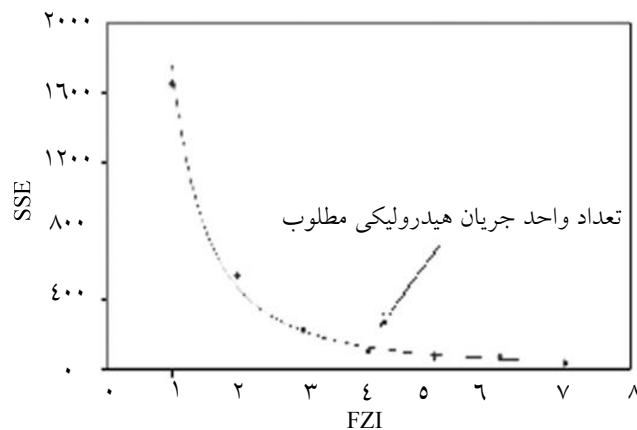
شکل ۱- سرعت صوت بر حسب تخلخل برای کلیه نمونه‌ها

جدول ۱- طبقه‌بندی نمونه‌ها بر حسب واحد جریان هیدرولیکی

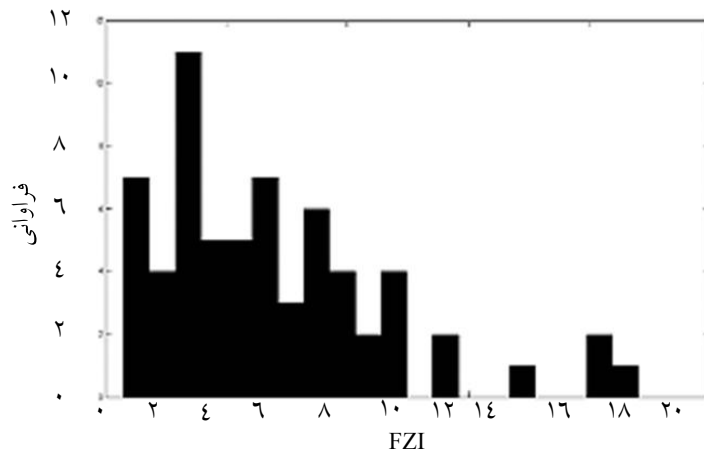
واحد جریان هیدرولیکی	FZI
۱	۲/۲۳
۲	۶/۸۰
۳	۱۰/۴۴
۴	۱۹/۹۵



شکل ۲- نمودار طبقه‌بندی نمونه‌ها بر حسب واحد جریان هیدرولیکی



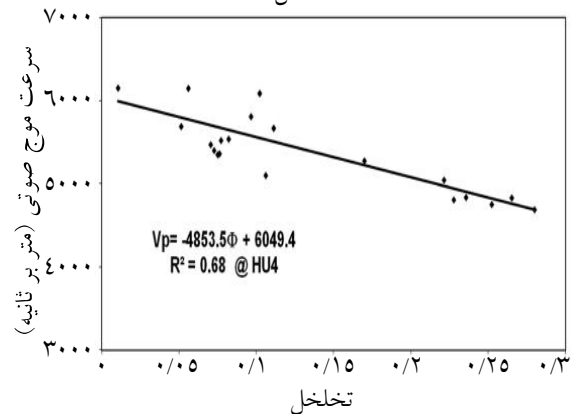
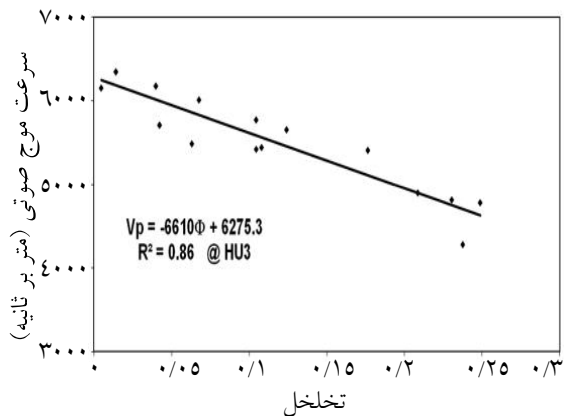
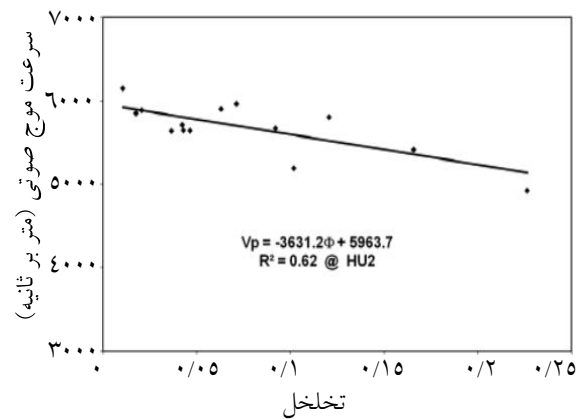
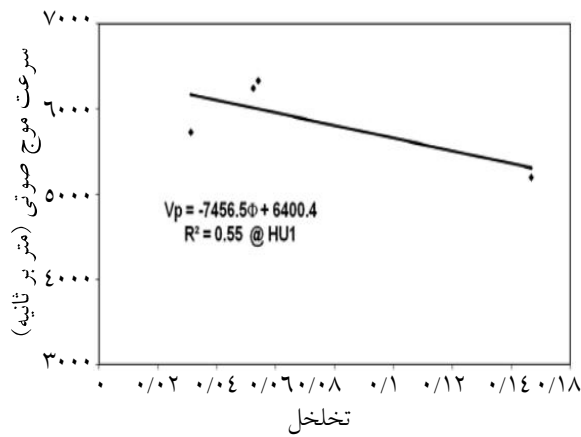
شکل ۳- طبقه‌بندی نمونه‌ها در واحدهای جریان هیدرولیکی (در این سری نمونه‌ها واحدهای هیدرولیکی جریان به تعداد ۴ بهینه می‌باشد).



شکل ۴- آنالیز هیستوگرام بر اساس داده‌های لگاریتمی شاخص منطقه جریانی

نتایج حاصل نشده و تنها محاسبات مشکل‌تر و پیچیده‌تر می‌شود. در شکل ۵ با رسم نمودار سرعت صوت بر حسب تخلخل نوترونی برای هر واحد جریان هیدرولیکی، معادله سرعت امواج تراکمی بر حسب تخلخل با ضریب همبستگی در واحد جریان هیدرولیکی آمده است. نتایج بیان‌گر ارتباط ضعیف سرعت امواج تراکمی بر حسب تخلخل در واحدهای جریان هیدرولیکی است. به گونه‌ای که ضریب همبستگی از ۰/۵۵ تا ۰/۸۶ تغییر می‌کند.

همان گونه که در شکل مشاهده می‌شود، با افزایش تعداد واحدهای جریان هیدرولیکی، مقدار مجموع مربعات خطا کاهش می‌یابد، اما از یک نقطه به بعد تغییر در مجموع مربعات خطا محسوس نبوده و قابل صرف‌نظر کردن است. این مقدار همان تعداد واحدهای جریان هیدرولیکی بهینه است. تعداد واحدهای جریان هیدرولیکی بهینه به این معنا است که می‌توان تعداد واحدهای جریان هیدرولیکی را بیش از مقدار بهینه نیز انتخاب نمود، اما بهبودی در



شکل ۵- نمودار سرعت صوت بر حسب تخلخل نوترونی در چهار دسته تقسیم‌بندی بر اساس واحدهای جریان هیدرولیکی

شکل ۷ نمودار سرعت صوتی برحسب تخلخل را برای هر کدام از ۴ گروه متوسط انحراف سرعت نشان می‌دهد. مقدار متوسط ضریب همبستگی برای این چهار گروه، برابر ۰/۹۳ می‌باشد. نتایج نشان می‌دهد که در تعیین سرعت امواج از تخلخل، استفاده از مقادیر انحراف سرعت نتایج بهتری نسبت به شاخص منطقه‌ای جریان ارائه می‌دهد. دلیل اصلی آن را می‌توان به تفکیک بهتر انواع تخلخل با استفاده از مقادیر انحراف سرعت نسبت به شاخص منطقه‌ای جریان نسبت داد. زیرا در سنگ‌های کربناته بعد از مقدار تخلخل، نوع تخلخل مهم‌ترین عامل تأثیرگذار بر سرعت می‌باشد.

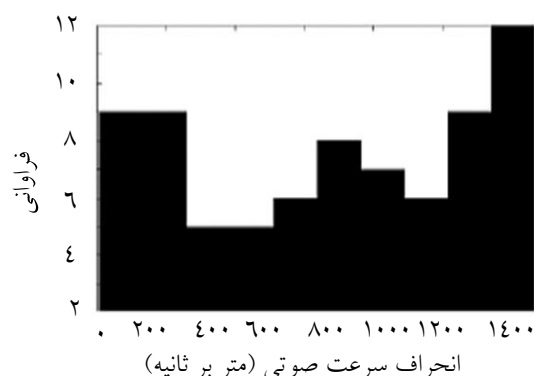
جدول ۲- دسته‌بندی نمونه‌ها بر حسب انحراف سرعت

دسته نمونه‌ها	متوسط انحراف سرعت (m/s)
۱	۱۳۹
۲	۴۶۶
۳	۷۸۶
۴	۱۱۳۵

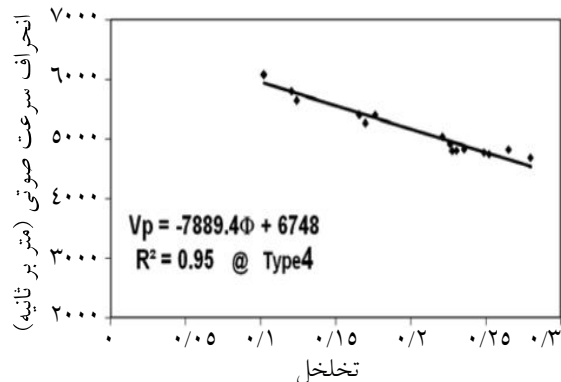
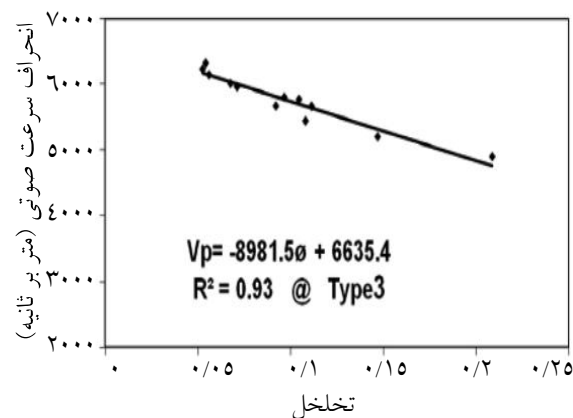
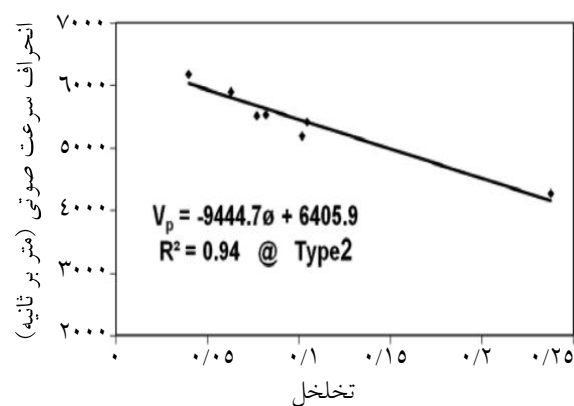
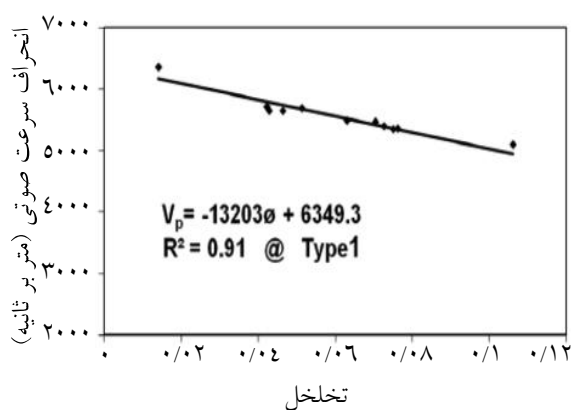
در ادامه از تفاضل سرعت امواج صوتی و سرعت حاصل از معادله وایلی با استفاده از تخلخل نوترون، مقدار انحراف سرعت به دست می‌آید.

$$VD = V_s - V_n \quad (16)$$

در معادله ۱۶،  $V_s$  سرعت صوت،  $V_n$  سرعت حاصل از معادله وایلی با استفاده از تخلخل نوترون و  $VD$  نیز مقدار انحراف سرعت می‌باشد. با داشتن مقادیر انحراف سرعت و با کمک آنالیز هیستوگرام، نمونه‌ها به چهار دسته تقسیم شده‌اند که در شکل ۶ مشاهده می‌شود. مقدار عددی انحراف سرعت امواج تراکمی برای هر دسته از نمونه‌ها در جدول ۲ آمده است.



شکل ۶- آنالیز هیستوگرام بر اساس انحراف سرعت در نمونه‌ها



شکل ۷- نمودار سرعت صوت بر حسب تخلخل نوترونی در چهار دسته تقسیم‌بندی بر اساس انحراف سرعت



## نتیجه‌گیری

همبستگی در چهار واحد جریانی هیدرولیکی تعیین شده در این مطالعه برابر  $0/68$  می‌باشد.

- نتایج بیان‌گر کارایی بیشتر طبقه‌بندی سنگ‌ها بر اساس نگار انحراف سرعت صوتی نسبت به روش واحدهای جریان هیدرولیکی در تخمین سرعت امواج تراکمی می‌باشد. به طوری که توصیف مخزن بر اساس مقادیر انحراف سرعت صوتی می‌تواند جهت پیش بینی سرعت امواج تراکمی از تخلخل مورد استفاده قرار گیرد. مقدار متوسط ضریب همبستگی در این مطالعه برابر  $0/93$  می‌باشد.

- در حالت کلی نمودار سرعت امواج تراکمی و تخلخل در سنگ‌های کربناته دارای پراکندگی بسیار زیاد بوده و نمی‌توان مدل تجربی مناسب بین این دو ارائه نمود.

- مقادیر انحراف سرعت، شاخص بهتری از مقادیر شاخص منطقه‌ای جریان در توصیف انواع تخلخل در سنگ‌های کربناته می‌باشد.

- با توصیف مخزن براساس شاخص منطقه‌ای جریان نیز نمی‌توان تخمین قابل قبولی از سرعت امواج تراکمی با استفاده از مقادیر تخلخل ارائه نمود. مقدار متوسط ضریب

## منابع

- [1]. Wyllie M. R. J., Gregory, A. R., and Gardner, L. W., "Elastic wave velocities in heterogeneous and porous media", Geophysics, Vol. 21, pp. 41-70, 1956.
- [2]. Pickett G.R., "Acoustic character logs and their application in formation evaluation", Trans. AIME, Vol. 15, pp. 659-667, 1963.
- [3]. Raiga-Clemenceau J., Martine J. P., and Nicoletis S., "The concept of acoustic formation factor for more accurate porosity determination from sonic transit time data", The Log Analyst (Jan – Feb.), pp. 54-59, 1986.
- [4]. Anselmetti F. S., and Eberli G. P., "Controls on sonic velocity in carbonate rocks", Pure and Applied Geophysics, Vol. 141, pp. 287- 323, 1993.
- [5]. Eberli G. P., Anselmetti F. S., and Incze M. L., Factors controlling elastic properties in carbonate sediments and rocks, The Leading Edge, pp. 654-660, 2003.
- [6]. Walsh J., "The effect of cracks on the compressibility of rocks", Geophysics Res., Vol. 70, pp. 381-389, 1965.
- [7]. Amaefule J. O., Altunbay M., Tiab D., Kersey D.G., and Kedan D.k., "Enhanced reservoir description: Using core and log data to identify hydraulic (flow) unites and predict permeability in uncored intervals/wells", SPE paper No. 26436, Presented at 68th Annual Technical Conference and Exhibition Houston, Tx., 1993.
- [8]. Kozeny J., "Uber kapillare leitung des wassers im boden", stuzurgsberichte, Royal Academy od Science, Vienna, Proc. Class1, Vol. 136, pp. 271-306, 1927.
- [9]. Carman P. C., "Fluid flow through granular beds", Trans AICHE, Vol. 15, pp. 150-166, 1937.