

# ارزیابی تراوایی توالی‌های پرمین-تریاس ناحیه مرکزی خلیج فارس، بر مبنای داده‌های پتروفیزیکی و رسوب شناختی

امیرحسین عنایتی بیدگلی\* و حسین رحیم‌پور بناب

دانشگاه تهران، پردیس علوم، دانشکده زمین‌شناسی، دانشگاه، ایران

تاریخ دریافت: ۹۲/۱۱/۲۸ تاریخ پذیرش: ۹۳/۱۱/۱۹

## چکیده

تراوایی یکی از مهم‌ترین پارامترهای مخزنی است که از نظر پیش‌بینی و تخمین نرخ تولید و شناسایی افق‌های مخزنی با بیشترین تولید، اهمیت زیادی دارد. معمولاً این پارامتر، براساس آنالیز مستقیم مغزه‌های حفاری، اندازه‌گیری می‌شود. در چاه‌های بدون مغزه نیز بر حسب نوع داده‌های موجود، روش‌های متنوعی برای پیش‌بینی این پارامتر تأثیرگذار مخزنی ارائه شده است. در این تحقیق نیز سعی شده تا بر اساس دو رویکرد مختلف، ضمن بررسی قابلیت کاربرد این روش‌ها در توالی‌های مخزنی دالان-کنگان، ارزیابی کیفی و کمی از وضعیت تراوایی این توالی‌ها به عمل آید. همچنین به منظور پیش‌بینی تراوایی به روش کمی، رده‌بندی معروف ارائه شده توسط لوچیا در سال ۱۹۹۵ نیز مورد ارزیابی و اعمال اصلاحاتی قرار گرفت که با توجه به معیارهای افزوده شده در تعیین رده‌های پتروفیزیکی، تفکیک بهتری از این رده‌ها در توالی‌های دالان بالایی-کنگان، امکان‌پذیر گردید. در نهایت، نتایج نشان داد که روندهای تغییرات تراوایی در توالی‌های پرمین-تریاس، در مقایسه با مقادیر واقعی، به خوبی قابل شناسایی بوده و این روش‌ها نیز در این سازندها قابلیت کاربرد دارند.

**کلمات کلیدی:** تراوایی، رده‌های پتروفیزیکی، رده‌بندی لوچیا، پرمین-تریاس

## مقدمه

و تراوایی مطلق به ترتیب، کنترل کننده فضای انباشت و قابلیت (عبور) جریان در بازه‌های مخزنی-غیرمخزنی هستند.

علاوه بر استفاده از مغزه‌های حفاری برای اندازه‌گیری دقیق تراوایی، رویکردهای مختلفی برای آگاهی از وضعیت تراوایی توالی‌های حفاری شده، بر اساس داده‌های مختلف، مانند لاگ‌های چاه‌پیمایی پیشنهاد شده است، مانند روش‌های پیتمن [۵]، تیمور و سنדר و همکاران [۶ و ۷]، نئو و همکاران [۸]، محقق [۹] و کودی [۱۰].

قابلیت گذردهی سیالات هیدروکربوری در محیط مخزن به پارامتری وابسته است که تراوایی خوانده می‌شود [۱]. قابلیت سنگ برای جریان دادن سیالات را تراوایی می‌نامند [۲]. به طور کلی، سه نوع تراوایی مطلق، موثر و نسبی برای سنگ‌های مخزنی معرفی شده است [۳-۱]. تخلخل موثر

\*مسئول مکاتبات  
آدرس الکترونیکی: amirhossein.enayati@gmail.com

هستند که توسط فابریک‌های رسوب‌گذاری و دیاژنزی مختلف، کنترل می‌شوند [۱۷-۱۳]. اصطلاح انحراف سرعت، بیانگر انحراف سرعت صوت (حاصل از لاگ صوتی) از سرعت پیش‌بینی شده بر اساس معادله زمان- میانگین وایلی [۱۸] (معادله ۱)، برای مقادیر تخلخل برابر، تحت لیتولوژی مشخص، می‌باشد.

$$\frac{1}{V_{\text{rock}}} = \frac{1-\Phi}{V_{\text{matrix}}} + \frac{\Phi}{V_{\text{fluid}}} \quad (1)$$

انحراف سرعت مثبت  $\rightarrow$  سرعت صوت حاصل از معادله وایلی  $>$  سرعت صوت (لاگ صوتی)  
 انحراف سرعت منفی  $\rightarrow$  سرعت صوت حاصل از معادله وایلی  $<$  سرعت صوت (لاگ صوتی)  
**محاسبه انحراف سرعت با استفاده از لاگ صوتی و لاگ‌های نوترون- چگالی**

انحراف سرعت را می‌توان بر اساس مراحل زیر مشخص نمود:

۱- محاسبه سرعت واقعی امواج صوتی فشاری ( $V_{p \text{ real}}$ )

از طریق لاگ صوتی بر اساس معادله ۲:

$$V_{p \text{ real}} \left( \frac{m}{s} \right) = \frac{304800}{DT \left( \frac{\mu s}{ft} \right)} \quad (2)$$

۲- تعیین تخلخل از لاگ نوترون ( $\Phi_N$ ) یا محاسبه آن از طریق لاگ چگالی ( $\Phi_D$ ). با توجه به شکل ۱، مقایسه تخلخل‌های تعیین شده بر اساس لاگ نوترون، با تخلخل‌های مشخص شده بر اساس لاگ چگالی، نشان می‌دهد که بین مقادیر تخلخل آنها اختلافی وجود دارد، این حالت در بازه‌های دارای گاز (مانند اعماق ۱۱۲۵ تا ۱۱۷۵ m) بسیار بارزتر است. تخلخل حاصل از لاگ نوترون - چگالی ( $\Phi_{ND}$ )، حدواسط تخلخل‌های لاگ‌های نوترون و لاگ چگالی است که بیشترین همبستگی را با داده‌های تخلخل مغزه‌ای دارند (شکل ۱). مطابق معادله ۳، تخلخل حاصل از لاگ چگالی محاسبه می‌گردد [۱۹]:

$$\Phi_D = \frac{\rho_{\text{matrix}} - \rho_{\text{log}}}{\rho_{\text{matrix}} - \rho_{\text{fluid}}} \quad (3)$$

برای محاسبه تخلخل نوترون- چگالی از معادله ۴ که مخصوص مخازن گازی است، استفاده شده است [۲۰ و ۱۹].

$$\Phi_{ND} = \sqrt{\frac{\Phi_N^2 + \Phi_D^2}{2}} \quad (4)$$

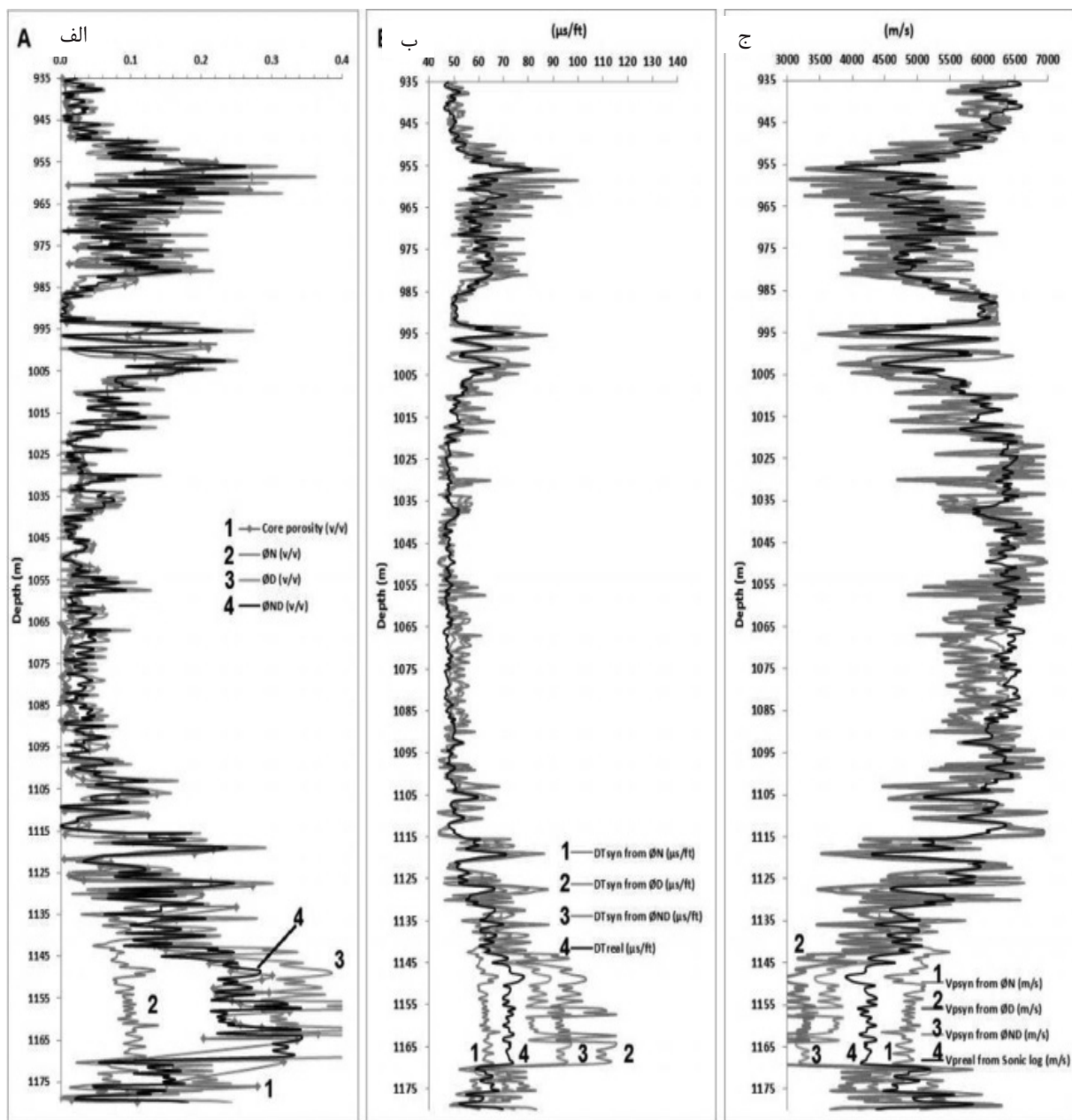
در این نوشتار نیز بر مبنای دو روش کیفی و کمی، سعی شده است تا قابلیت کاربرد آنها در یکی از مخازن پرمین- تریاس نواحی مرکزی خلیج فارس، ارزیابی شده و روندهای مختلف تراوایی در این توالی‌ها نیز مورد بررسی قرار گیرد، زیرا تعیین مقدار عددی دقیق تراوایی برای هر نقطه از سازند مخزنی (بر خلاف تخلخل) امری بسیار دشوار بوده و حصول چنین هدفی نیازمند تعداد فراوانی از چاه‌های مغزه‌گیری شده و نمونه برداری متراکم از آنها و کاربرد روش‌های مختلف آماری و شبکه‌های عصبی است که از اهداف این تحقیق خارج است. روش کیفی شامل ترسیم لاگ انحراف سرعت [۱۱] و روش کمی شامل رویکرد ارائه شده توسط جنینگز و لوچیا [۱۲] و لوچیا [۱] می‌باشد.

## روش کار

در این مطالعه، داده‌هایی شامل لاگ‌های نوترون، چگالی و صوتی و آب اشباع شدگی محاسبه شده برای سازندهای دالان و کنگان در پنج چاه از ناحیه خلیج فارس، مورد استفاده قرار گرفته است. همچنین به منظور مقایسه رده‌های پتروفیزیکی پیش‌بینی شده بر اساس روش جنینگز و لوچیا [۱۲] با انواع تعیین شده بر اساس مطالعات پتروگرافی، بیش از ۳۰۰ مقطع نازک رنگ‌آمیزی شده با محلول آلیزارین رد- اس از توالی‌های دالان بالایی- کنگان، نیز مورد آنالیز قرار گرفت. همچنین، جهت بررسی سیستم، اندازه و نوع فضاهای خالی موجود در توالی‌های مورد مطالعه، نمونه‌های مغزه مورد تزریق رزین آبی قرار گرفته‌اند (رنگ خاکستری در تصاویر). برای تخمین تخلخل بر اساس لاگ‌های صوتی و چگالی نیز از معادلات و تصحیحات مرسوم در مباحث ارزیابی سازند استفاده شده است (که در بخش مربوطه توضیح داده شده است).

## لاگ انحراف سرعت

سنگ‌های کربناته دارای خواص فیزیکی متنوعی



شکل ۱- الف: ارتباط تخلخل حاصل از لاگ‌های نوترون، چگالی، نوترون- چگالی و مغزه. ب: ارتباط لاگ‌های صوتی محاسبه شده بر اساس انواع تخلخل‌های موجود. ج: سرعت صوت بر اساس لاگ‌های قسمت ب

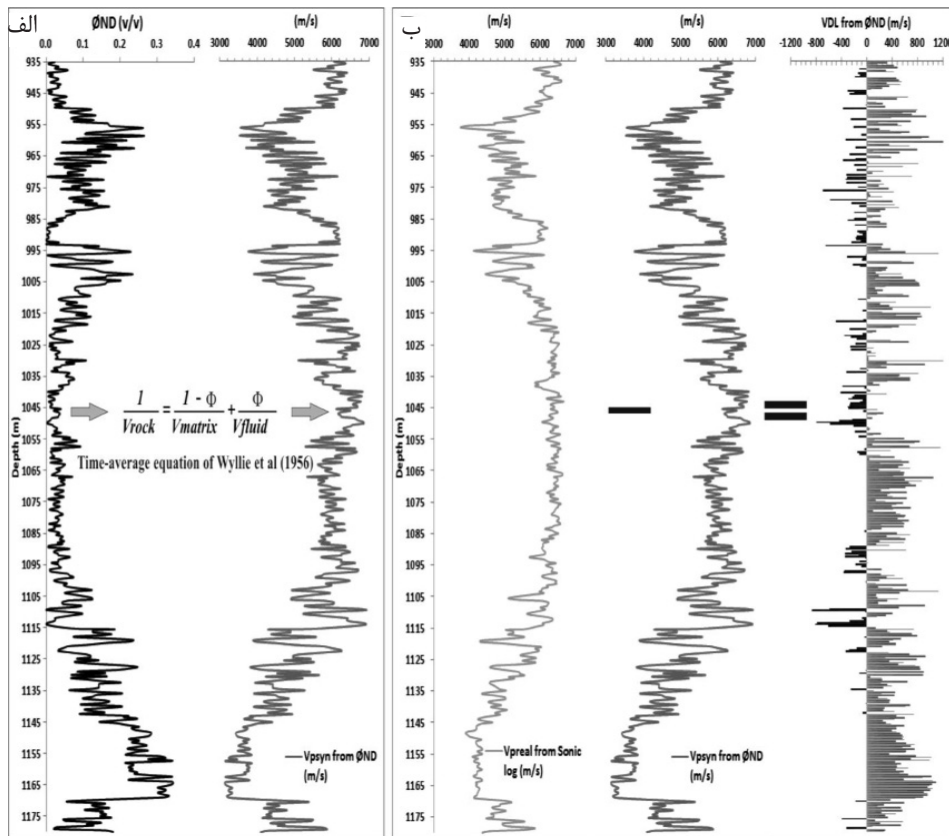
لاگ انحراف سرعت محاسبه شده بر اساس داده‌های لاگ نوترون- چگالی، مقادیر صحیح‌تری را نشان می‌دهند (شکل‌های ۲ الف و ۳)، خصوصاً اینکه زون‌های محتوی مقادیر بالای گاز آزاد، موجب کاهش تخلخل نوترون شده [۲۲] و سرعت پیش‌بینی شده افزایش میابد، همچنین گاز به صورت موثری سرعت صوت ( $V_p$ ) را کاهش می‌دهد [۲۳].

۳- در این مرحله، لاگ صوتی مصنوعی را با استفاده از معادله وایلی [۲۱] (معادله ۵) و معادله ۴، محاسبه نموده (شکل ۲ الف) و در نهایت، نتیجه به صورت سرعت موج فشارشی مصنوعی ( $V_{P_{syn}}$ ) ارائه می‌شود.

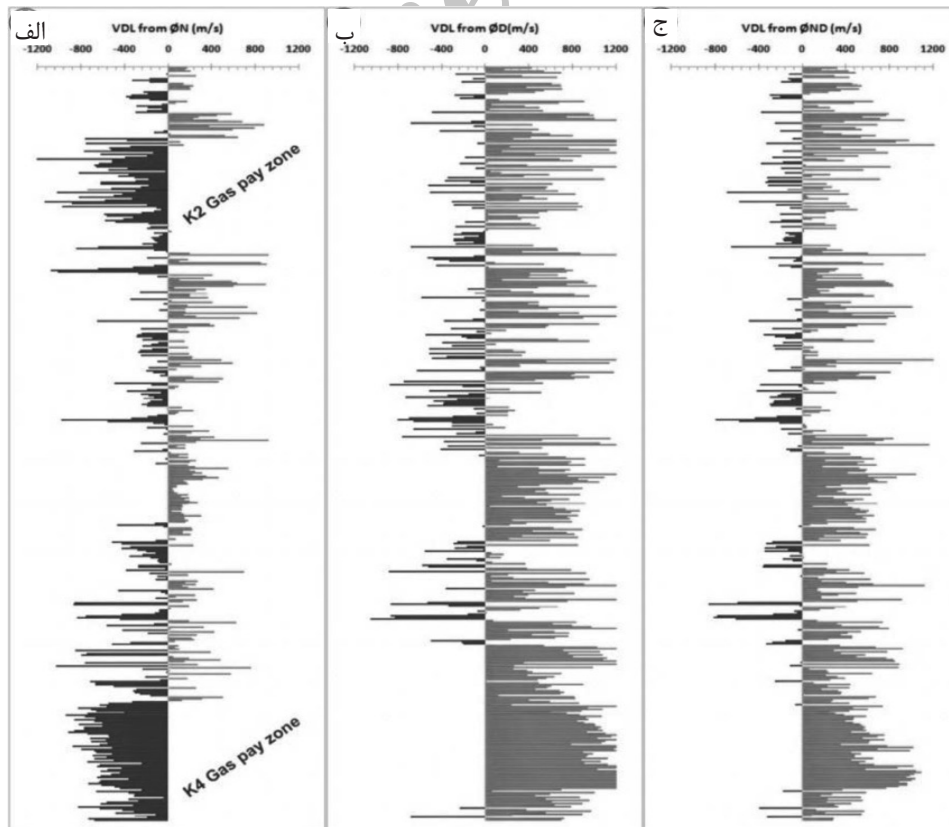
$$\Phi_s = \frac{\Delta t \log - \Delta t \text{ matrix}}{\Delta t \text{ fluid} - \Delta t \text{ matrix}} \quad (5)$$

مرحله آخر مطابق معادله ۶ و شکل ۲ ب است.

$$\text{Velocity Deviation} = V_{P_{real}} - V_{P_{syn}} \quad (6)$$



شکل ۲- الف- تبدیل لاگ تخلخل نوترون- چگالی به نمودار سرعت مصنوعی. ب: نحوه ایجاد لاگ انحراف سرعت



شکل ۳- تعیین لاگ انحراف سرعت، بر اساس تخلخل‌ها الف- نوترون ب- چگالی و ج- نوترون- چگالی به منفی شدگی شدید انحراف سرعت حاصل از تخلخل نوترون، در زون‌های گازی (واحد‌های K2 و K4) توجه کنید.

افزایشی در تراوایی و سه حالت دیگر در ارتباط با روندهای کاهششی در تراوایی هستند (شکل ۴):

۱- زون‌های مرتبط با تراوایی بالا (High Permeable; HP) - HP1 - زون‌های دارای نوسانات زیاد انحراف سرعت در محدوده +۲۵۰ تا -۲۵۰ m/s.

HP2 - زون‌های با روند کاهششی در مقادیر مثبت انحراف سرعت، از مقادیر +۵۰۰ m/s به مقادیر صفر و حتی منفی.

HP3 - انحراف سرعت‌های کمتر از +۲۵۰ m/s و بیش از -۲۵۰ m/s، بدون نوسانات قابل ملاحظه.

۲- زون‌های مرتبط با تراوایی پایین (Low Permeable; LP) - LP1 - زون‌های با روندهای افزایشی در مقادیر مثبت، از +۲۵۰ m/s به سوی مقادیر بیش از +۵۰۰ m/s.

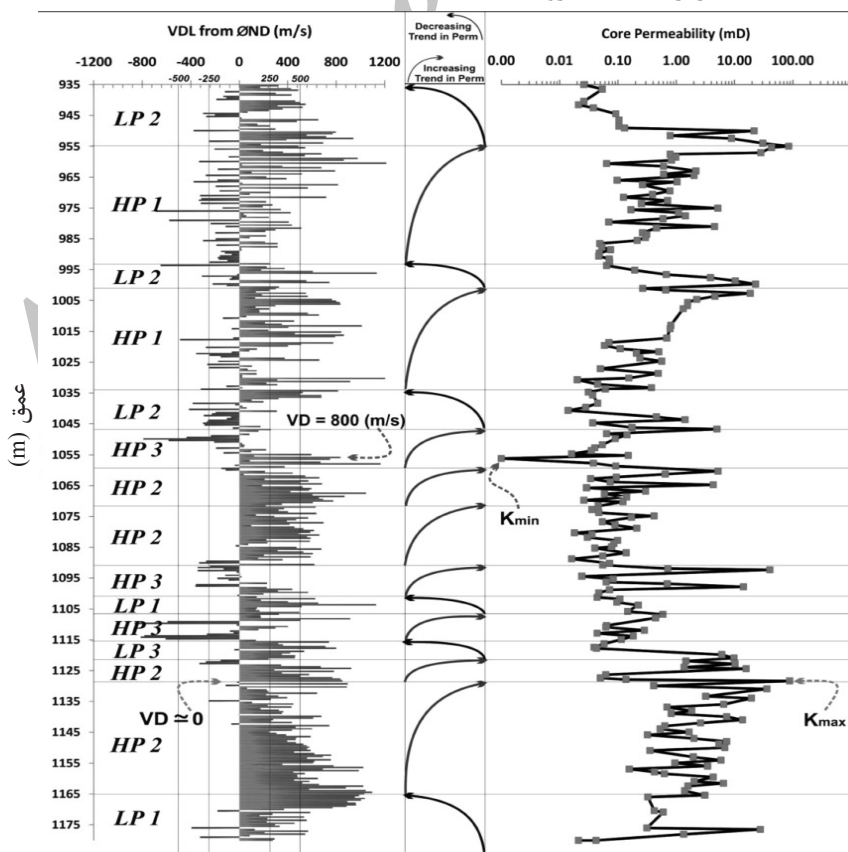
LP2 - انحراف سرعت بیش از +۲۵۰ m/s و کمتر از -۲۵۰ m/s.

LP3 - زون‌های با مقادیر نسبتاً ثابت و بیش از +۲۵۰ m/s و حتی +۵۰۰ m/s.

### بررسی کیفی تراوایی بر اساس لاگ انحراف سرعت

تراوایی سنگ‌های کربناته، تحت تاثیر انواع حفره و میزان ارتباط آنها می‌باشد [۲۴ و ۲۵] که آنها نیز کنترل مهمی بر روی انحراف سرعت و تراوایی دارند و از طریق لاگ انحراف سرعت، می‌توان روندهای تراوایی را در چاه مشخص نمود [۱۱]. به طور کلی، سنگ‌های با انحراف سرعت مثبت، تراوایی پایینی نشان می‌دهند، که ناشی از حفرات درون فسیلی و قالبی یا لیتولوژی‌های سیمانی شده کم تخلخل (حفرات مجزا از هم) است [۱۱]. حفرات بین ذره‌ای به صورت حفرات دارای اتصال خوب و تراوایی بالا، مشخص می‌گردند، که دارای انحراف سرعت صفر، کمی مثبت یا کمی منفی هستند.

در اینجا نیز با مقایسه داده‌های تراوایی مغزه و لاگ انحراف سرعت محاسبه شده در یکی از چاه‌های مورد مطالعه، ۶ وضعیت یا زون در لاگ انحراف سرعت که از HP1 شروع شده و تا LP3 خاتمه می‌یابد شناسایی شده است که سه حالت در ارتباط با روندهای



شکل ۴- مقایسه لاگ انحراف سرعت و تراوایی مغزه، و زون‌های افزایشی یا کاهششی در تراوایی (فلش‌های به سمت راست و چپ). زون‌های با تراوایی بالا یا پایین با حروف HP و LP نشان داده شده‌اند. حداکثر تراوایی (Kmax) با انحراف سرعت صفر و حداقل تراوایی (Kmin) با انحراف سرعت بسیار مثبت مرتبط هستند.

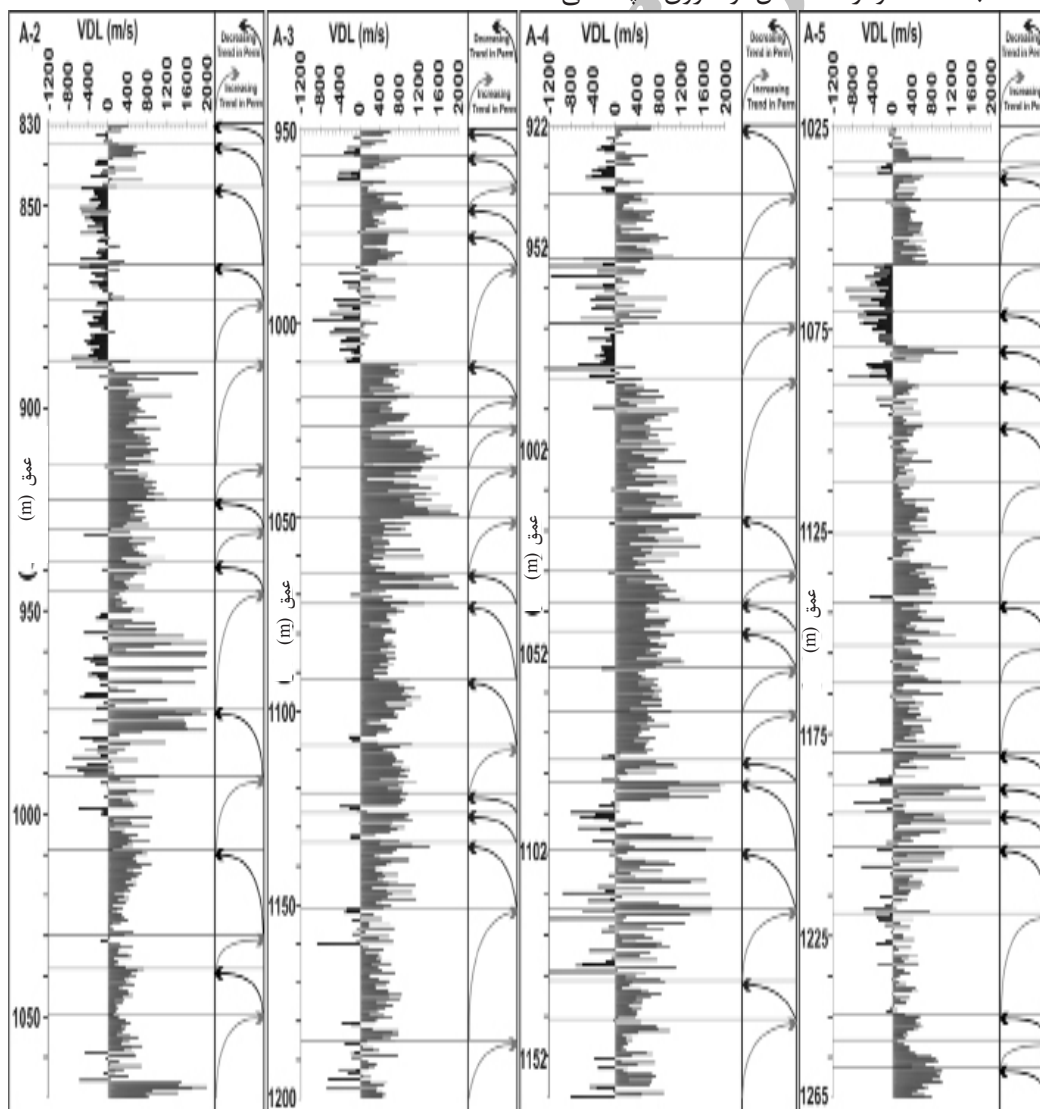
کسر می‌گردد تا تخلخل بین ذره‌ای حاصل شود، زیرا تراوایی به تخلخل بین ذره‌ای وابسته است. پیش‌بینی تراوایی بر اساس این روش، شامل این موارد است:

۱- محاسبه تخلخل واگی مجزا به منظور تعیین میزان تخلخل بین ذره‌ای: برای محاسبه تخلخل واگی مجزا  $(\Phi_{sv})$  از معادله‌های ۷ و ۸ استفاده می‌شود که برای سنگ‌های آهکی و دولومیتی کالیبره شده است. با توجه به توضیحاتی که پیش‌تر ارائه شد، تخلخل حاصل از لاگ‌های نوترون و چگالی، به عنوان تخلخل کل در نظر گرفته شده است.

به علت ناهمگنی ذاتی مخازن کربناته، در روندهای تراوایی شناسایی شده در سایر چاه‌ها، تفاوت‌هایی دیده می‌شود (شکل ۵). بر اساس این روندها، می‌توان در مورد وضعیت تراوایی زون‌های مختلف توالی‌های مورد مطالعه، پیش‌بینی‌هایی را انجام داد.

### ارزیابی کمی تراوایی

برای محاسبه تراوایی، بر اساس لاگ‌های چاه‌پیمایی، از مفهوم سنگ-فابریک و تخلخل بین ذره‌ای استفاده شده است [۱]. برای پیش‌بینی تراوایی در این روش، لاگ‌های صوتی، نوترون و چگالی و آب اشباع شدگی مورد نیاز است [۱۲]. در این روش، تخلخل حفره‌ای مجزا، محاسبه شده و از تخلخل نوترون-چگالی



شکل ۵- محاسبه لاگ انحراف سرعت و تعیین روندهای کاهش و افزایش تراوایی در چند چاه دیگر

نمی‌دهد، ولی در قسمت‌های آهکی مانند قسمت پایینی نمودار (زون K4)، این اختلاف زیادتر است که ناشی از حضور واگ‌های مجزا یا حفرات قالبی است.

۲- محاسبه شماره سنگ- فابریک: شماره سنگ- فابریک ( $\lambda$ ) می‌تواند از طریق تخلخل، آب اشباع شدگی اولیه و ارتفاع تخمین زده شود. با توجه به اینکه در بالای زون انتقال، وابستگی به ارتفاع، به صورت مشخصی حذف می‌شود. براساس کراس پلات تخلخل- آب اشباع شدگی، شماره سنگ- فابریک را می‌توان مشخص نمود [۱۲]. از دو راه می‌توان رده پتروفیزیکی یا عدد سنگ- فابریک را مشخص نمود که شامل ترسیم نمودار تخلخل- آب اشباع شدگی یا معادله جنینگز و لوچیا [۱۲] و لوچیا [۱] است.

$$\text{Log}_{10}(\Phi_{sv}) = 4.090 - 0.1450 (\Delta_t - 141.5\Phi) \text{ (Limestone) (7)}$$

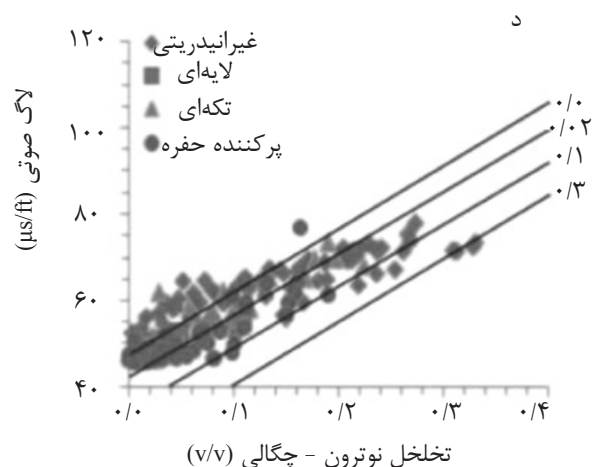
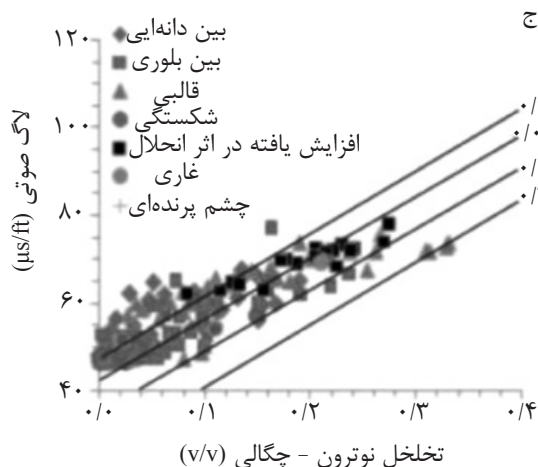
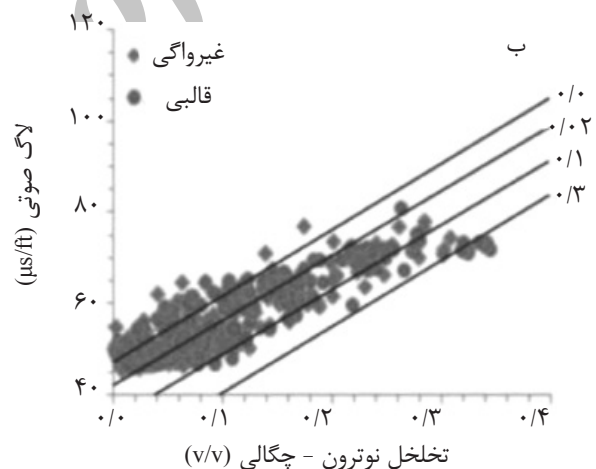
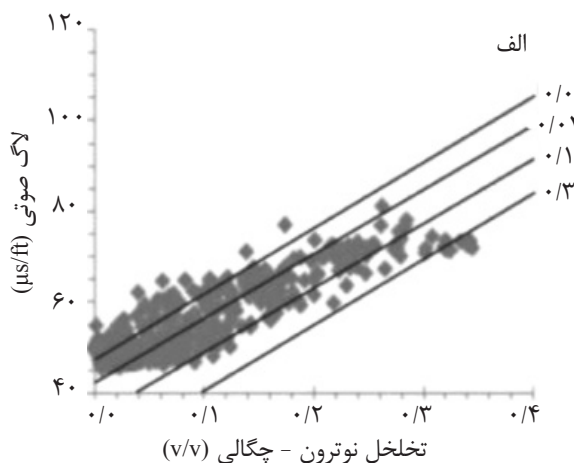
$$\text{Log}_{10}(\Phi_{sv}) = 4.442 - 0.1527 (\Delta_t - 141.5\Phi) \text{ (Dolostone) (8)}$$

واحدهای  $\Phi$  و  $\Phi_{sv}$  به صورت نسبت (v/v) بوده و  $\Delta t$  بر حسب  $\mu\text{sec}/\text{ft}$  می‌باشد.

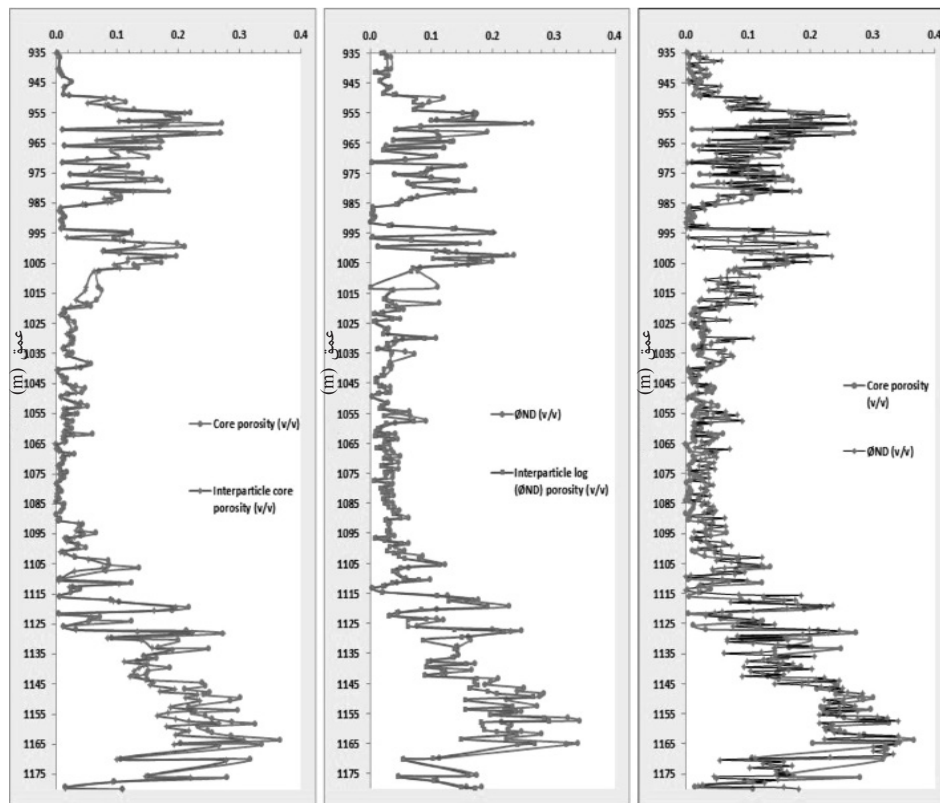
در صورت وجود حفرات قالبی یا درون فسیلی، داده‌ها از معادله وایلی منحرف می‌شوند [۱۲] (شکل ۶). با کسر تخلخل واگی مجزای محاسبه شده (معادلات ۷ و ۸)، از تخلخل نوترون- چگالی، تخلخل بین ذره‌ای ( $\Phi_{ip}$ ) حاصل می‌شود (معادله ۹).

$$\Phi_{ip} = \Phi_{ND} - \Phi_{sv} \quad (9)$$

مقادیر تخلخل نوترون- چگالی و مغزه‌ای، مشابهت زیادی دارند (شکل ۷)، همچنین لاگ‌های تخلخل بین ذره‌ای و تخلخل کل حاصل از داده‌های مغزه و لاگ‌های چاه پیمایی، تفاوت‌های مشخصی نشان



شکل ۶- بررسی میزان انحراف نمونه‌های مغزه‌ای، از معادله زمان- میانگین وایلی بر اساس مقادیر تخلخل نوترون- چگالی (الف) و انواع دارای واگ‌های مجزا و بدون واگ‌های مجزا (ب) و همچنین نوع حفرات (ج) و انواع بافت‌های انیدریتی (د).



شکل ۷- مقایسه اختلاف تخلخل‌های کل و بین ذره‌ای حاصل از مغزه و لاگ و ارتباط بین تخلخل مغزه و لاگ نوترون- چگالی

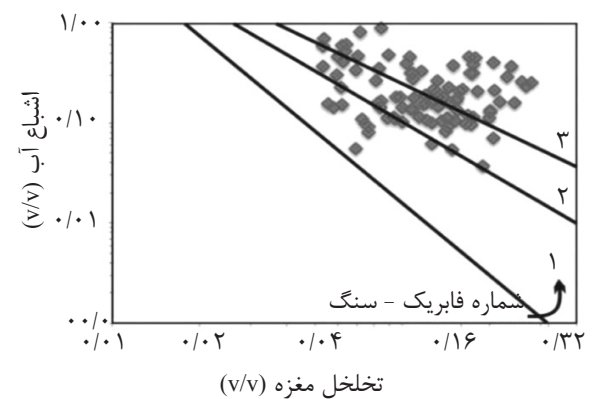
برای محاسبه شماره سنگ- فابریک از طریق معادله ۱۰، بایستی محدودیت‌هایی در نظر گرفته شود [۱۲]:

- ۱- استفاده از این معادله، محدود به بالای زون انتقال است.
- ۲- این معادله برای سیستم‌های دارای واگ‌های مرتبط، قابل استفاده نیست.
- ۳- این معادله، برای تخلخل‌های بیش از ۵٪ کارایی دارد، زیرا تخمین‌های بر اساس لاگ آب اشباع شدگی در کرنات‌های با تخلخل پایین، منجر به محاسبه مقادیر غیر واقعی، می‌گردد.
- ۴- تخلخل باید از ۳۰٪ نیز کمتر باشد.

مقایسه رده‌های پتروفیزیکی پیش بینی شده و رده‌های پتروفیزیکی حاصل از مطالعه مقاطع نازک

به منظور ارزیابی درجه تطابق آن با حالات واقعی، رده‌های پتروفیزیکی یا شماره سنگ- فابریک بر اساس مطالعات پتروگرافی در یکی از چاه‌های مورد مطالعه تعیین شده و سپس نتایج با مقادیر محاسبه شده، مقایسه شده است. در توالی مورد مطالعه نیز به منظور تعیین رده‌های پتروفیزیکی لوچیا [۱۷ و ۱] و شماره سنگ- فابریک‌ها، علاوه بر پارامترهای مورد اشاره در تفکیک رده‌های پتروفیزیکی

با توجه به شکل ۸ برای تعیین شماره سنگ- فابریک، بایستی از نمودار تمام لگاریتمی تخلخل- آب اشباع شدگی استفاده نمود. آب اشباع شدگی را می‌توان از طریق محاسبه (معادله معروف آرچی) (لاگ‌های آب اشباع شدگی) به دست آورد.



شکل ۸- تعیین شماره سنگ- فابریک بر اساس دو پارامتر تخلخل و اشباع آب

در این مطالعه از معادله ارائه شده توسط جینگز و لوچیا [۱۲] استفاده شده است (معادله ۱۰).

$$\lambda = \exp \frac{c_0 + d_0 \ln(\Phi) + \ln(S_w)}{c_1 + d_1 \ln(\Phi)} \quad (10)$$

اگر آب اشباع شدگی و تخلخل به صورت نسبت باشند (v/v):  $c_1: 0.7163$ ،  $c_0: 0.31063$ ،  $d_0: 1/1883$  و  $d_1: 0.6100$



تا پکستونی بوده و دارای انیدریت تکه‌ای هستند. نمونه‌های دولومیتی دارای ۹۰٪ - ۵۰٪ دولومیت بوده و نمونه‌های آهکی نیز، شاخص هستند و حفرات قالبی فراوانند. علاوه بر حفرات بین ذره‌ای، حفرات بزرگ شده بر اثر انحلال نیز دیده می‌شوند. سایز حفرات قالبی شامل ۱۰ تا ۲۰ μm و بیش از ۲۰ μm است. در نمونه‌های آهکی و شولی این رده سیمان متئوریک نیز دیده می‌شود. عموماً شامل رخساره‌های شول و دور از شول هستند. میزان تخلخل بین ذره‌ای و تراوایی این رده، ۳۰٪ - ۸٪ و ۰/۱ - ۸ mD است (شکل‌های ۹، ۱۰ و ۱۲).

در شکل ۱۳ الف-شماره‌های سنگ-فابریک‌های محاسبه‌ای و شماره‌های سنگ-فابریک‌های تعیین شده بر اساس مطالعات پتروگرافی، نشان داده شده است. معمولاً، بین مقادیر واقعی و تخمینی، اختلافاتی وجود دارد که می‌تواند ناشی از کاربرد پارامترهای بیشتر به منظور تفکیک بهتر رده‌ها و استفاده از لاگ‌های پتروفیزیکی بوده باشد

۳- محاسبه تراوایی و مقایسه آن با مقادیر تراوایی مغزه: پس از محاسبه تخلخل بین ذره‌ای و شماره سنگ-فابریک، تراوایی تعیین می‌شود.

$$K = e^{a(\lambda)} \Phi_{ip}^{b(\lambda)} \quad \text{or} \quad \ln(K) = a(\lambda) + b(\lambda) \ln(\Phi_{ip}) \quad (11)$$

e: عدد نپیر، تقریباً برابر با ۲/۷۱ است،  $\Phi_{ip}$ : تخلخل بین ذره‌ای (v/v)، K: تراوایی (mD)،  $a(\lambda)$ ،  $b(\lambda)$  پارامترهای وابسته به شماره سنگ-فابریک هستند و توسط معادلات زیر محاسبه می‌شوند:

$$a(\lambda) = a_0 - a_1 \ln(\lambda) \quad (12)$$

$$b(\lambda) = b_0 - b_1 \ln(\lambda) \quad (13)$$

ثابت‌ها یا ضرایب این معادلات بر اساس مخازن آهکی و دولومیتی از سرتاسر جهان، کالیبره و تعدیل شده‌اند [۱۲].

$$b_1: ۳/۶۰۳, b_0: ۸/۶۷۱, a_1: ۱۲/۰۸, a_0: ۲۲/۵۶$$

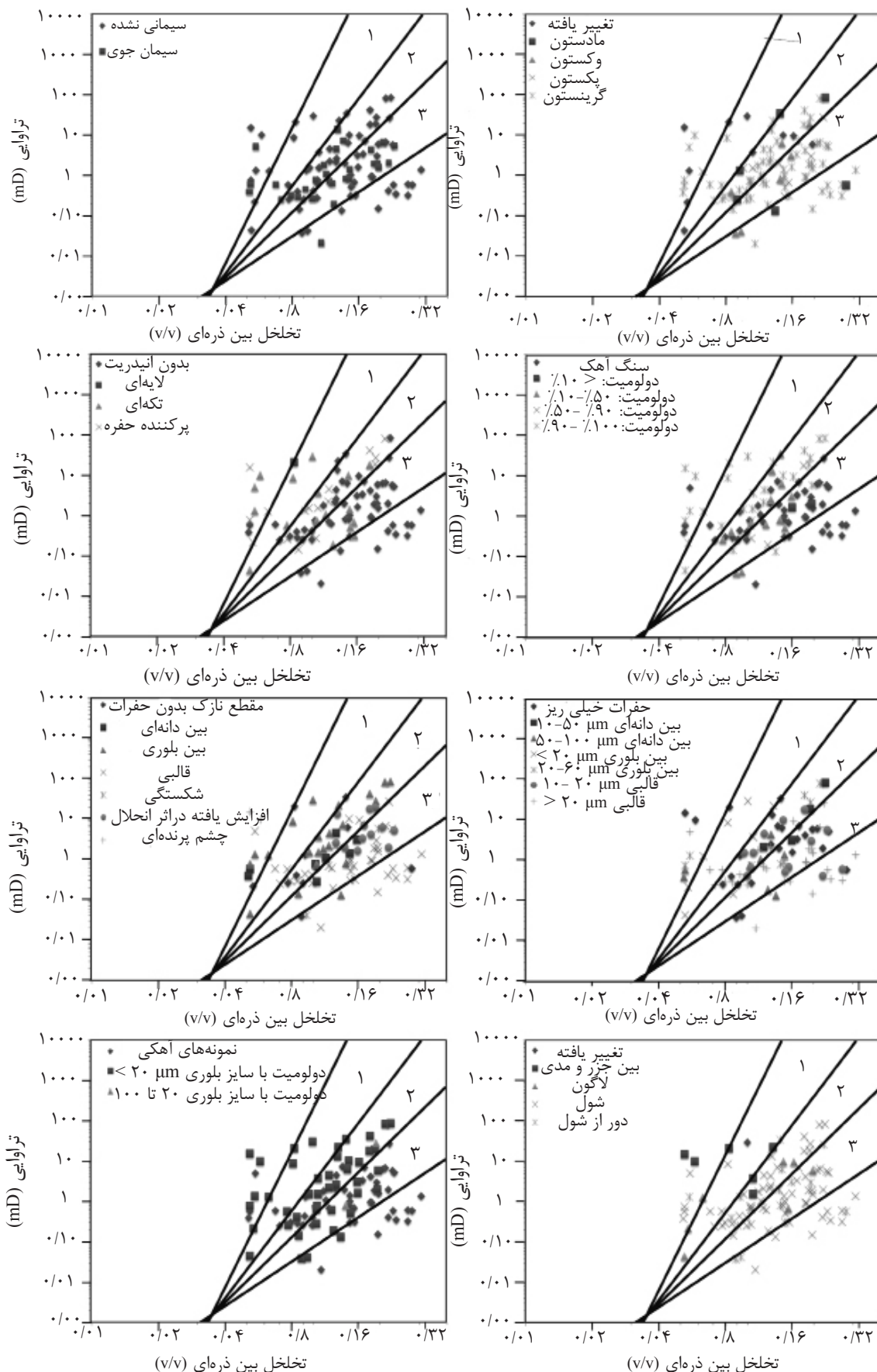
نکته مهم این است که این معادلات برای تخمین و پیش‌بینی تراوایی‌هایی در محدوده ۰/۱ تا ۱۰۰۰۰ mD یا سایز گلوگاهی  $۹/۹ \times 10^{-۶}$  تا  $۹/۹ \mu m^2$ ، کالیبره شده‌اند [۱۲]. مقادیر تراوایی محاسبه شده با مقادیر حاصل از اندازه‌گیری نمونه‌های مغزه‌ای، مقایسه شده‌اند (شکل ۱۳ ب).

(شامل سایز دانه‌ها و ذرات آهکی، سایز بلورهای دولومیت، جورشدگی، تخلخل بین دانه‌ای و محتوای گلی نمونه‌های آهکی)، پارامترهایی از قبیل بافت‌های انیدریتی (اغلب در ارتباط با حفرات)، وجود یا عدم وجود سیمان‌های جوی، درصد دولومیتی شدن، نوع حفرات، سایز حفرات و نوع رخساره‌های رسوبی نیز مورد استفاده قرار گرفت (شکل ۹) که نتایج آن به صورت تفکیک مناسب‌تر رده‌ها نسبت به پارامترهای اولیه مشخص شد (شکل ۱۰). مشخصات رده‌های تعیین شده را می‌توان به صورت زیر بیان نمود:

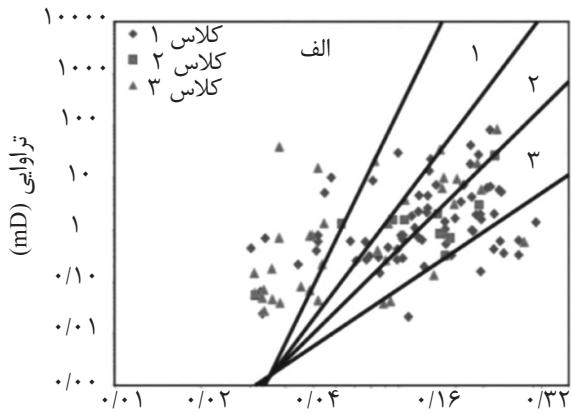
**رده پتروفیزیکی ۱:** این رده شامل فابریک‌های گرینستونی و نمونه‌های با دولومیتی شدن مخرب فابریک (اغلب گل غالب) است. انیدریت موجود در حفرات، به صورت تکه‌ای<sup>۱</sup> و لایه‌ای شکل (کمیاب) هستند. دارای ۹۰٪ - ۱۰٪ دولومیت و فضاهای حفره‌ای فنسترال می‌باشند. اندازه حفرات بین بلوری کوچک‌تر از ۶۰ μm بوده و بلورهای دولومیت از ۲۰ μm کوچک‌تر هستند. رخساره‌ها، شامل جزرومدی، شول و لاگونی می‌باشند. میزان تخلخل بین ذره‌ای و تراوایی این رده به ترتیب ۵٪ - ۴۰ - ۰/۱ mD است (شکل‌های ۹، ۱۰ و ۱۱).

**رده پتروفیزیکی ۲:** این رده شامل طیفی از فابریک‌های دانه غالب تا گل غالب است که عامل اصلی قرارگیری آنها در یک رده، تاثیر فرایندهای دیاژنزی مختلف بر روی فابریک‌های رسوبی مختلف بوده است. انیدریت‌های موجود در برخی از نمونه‌های این رده به صورت پرکننده حفرات (اغلب قالب‌ها) است. نمونه‌ها از نظر میزان دولومیت به دو گروه ۵۰٪ - ۱۰۰٪ و ۹۰٪ - ۱۰۰٪ قابل تقسیم هستند. برخی نمونه‌ها نیز آهکی هستند. حفرات بین دانه‌ای و بین بلوری، فراوانند. سایز حفرات بین دانه‌ای، بین ۱۰ تا ۱۰۰ μm متغییر است، سایز حفرات قالبی ۱۰ تا ۲۰ μm بوده و حفرات بین بلوری ۲۰ تا ۶۰ μm است. سایز بلورهای دولومیت عموماً از ۲۰ μm کوچک‌تر است. رخساره‌های این رده شامل انواع شولی، دور از شول و به مقدار کم‌تر، رخساره‌های لاگونی هستند. در رخساره‌های شولی این رده، سیمان‌های متئوریک دیده می‌شود. میزان تخلخل بین ذره‌ای و تراوایی این رده به ترتیب ۱۸٪ - ۷٪ و ۱۰۰ - ۰/۱ mD است (شکل‌های ۹، ۱۰ و ۱۱).

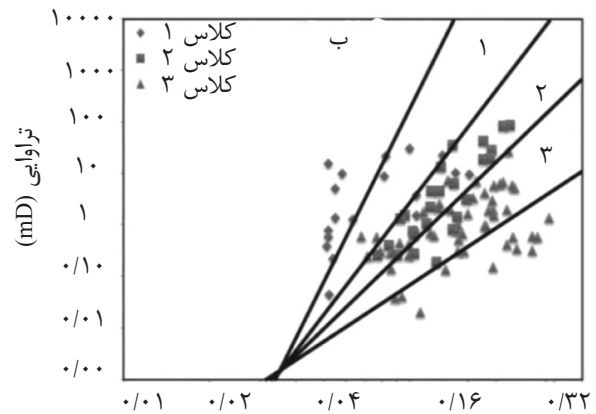
**رده پتروفیزیکی ۳:** فابریک‌های رسوبی شامل گرینستونی



شکل ۹- نمودار نمونه‌های مورد مطالعه بر حسب تخلخل- تراوایی و سایر مشخصات رخساره‌ای و دیاژنزی، به منظور به کارگیری پارامترهای بیشتر برای تفکیک بهتر رده‌های پتروفیزیکی

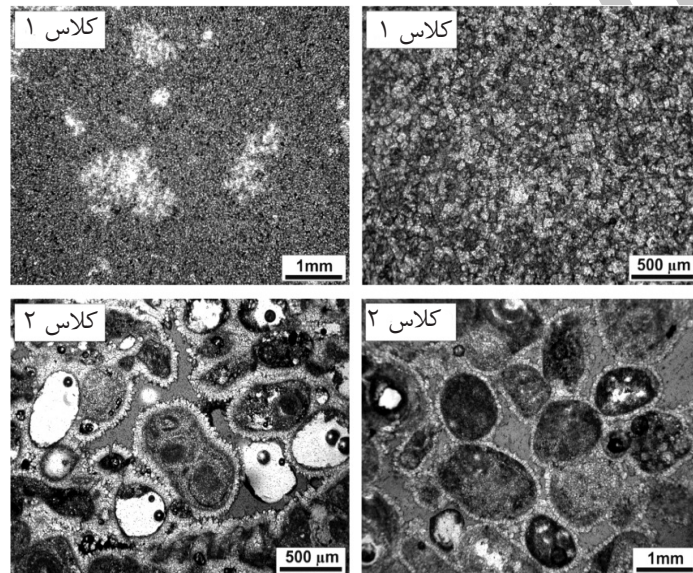


تخلخل بین ذره‌ای (v/v)

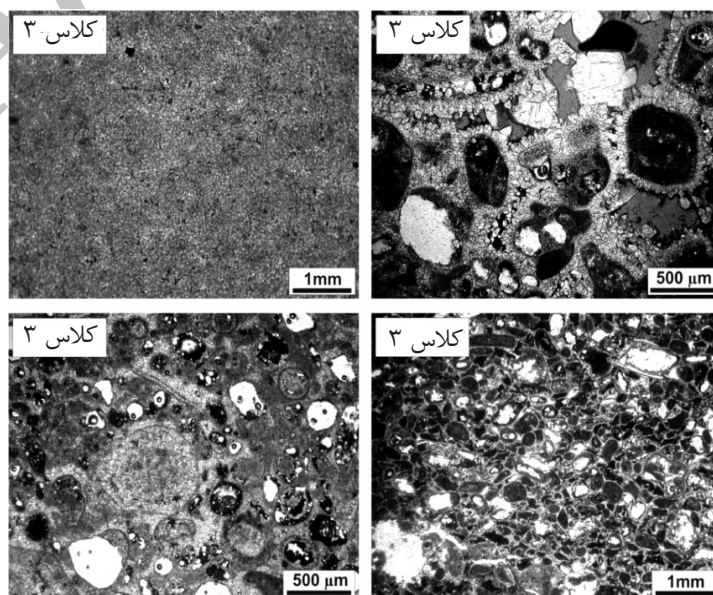


تخلخل بین ذره‌ای (v/v)

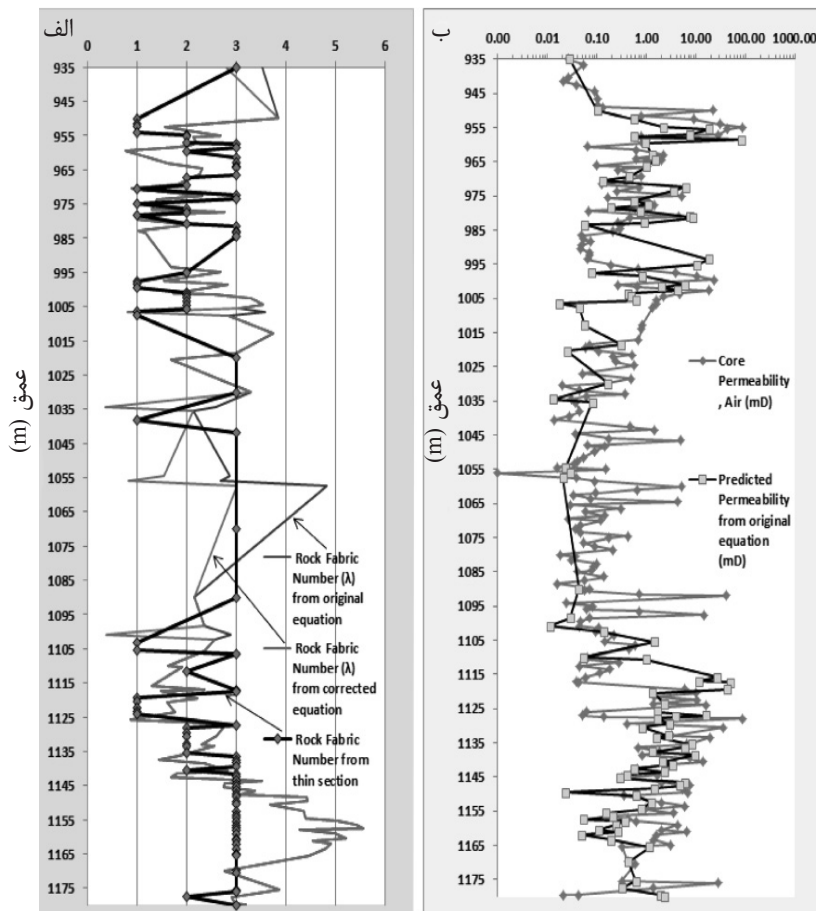
شکل ۱۰- الف: رده‌های پتروفیزیکی تعیین شده و شماره سنگ- فابریک مربوط به آنها در توالی دالان بالایی- کنگان بر اساس مشخصات ارائه شده توسط لوچیا [۱۷] که همپوشانی زیادی را نشان می‌دهد. ب: رده‌های پتروفیزیکی تعیین شده بر اساس مشخصات کامل‌تر، که تفکیک بهتری نشان می‌دهد (برای توضیح بیشتر به متن مراجعه شود).



شکل ۱۱- نمونه‌هایی از رده‌های پتروفیزیکی ۱ و ۲ شناسایی شده در توالی مورد مطالعه



شکل ۱۲- نمونه‌هایی از رده پتروفیزیکی ۳ شناسایی شده در توالی مورد مطالعه

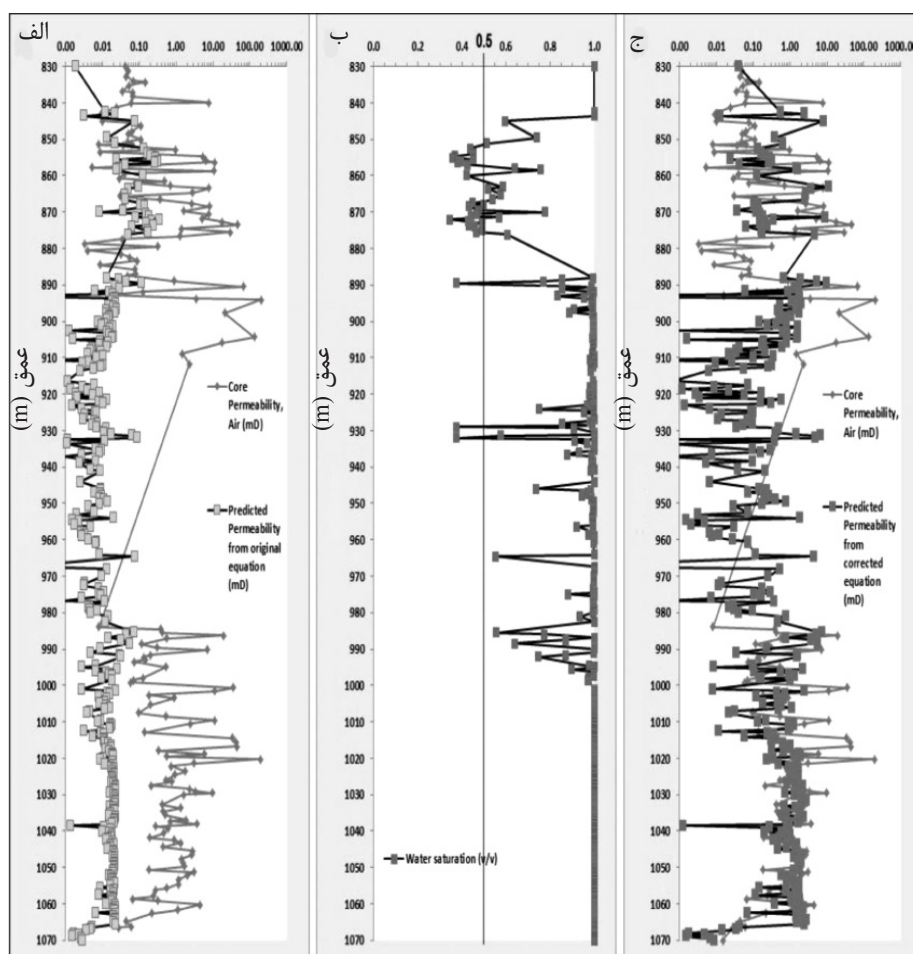


شکل ۱۳- الف) مقایسه شماره‌های سنگ- فابریک حاصل از محاسبه و مطالعه. ب) تراوایی پیش‌بینی شده و تراوایی مغزه

ارائه شده، تنها برای کاربرد در بالای زون انتقال (بالای سطح آب- هیدروکربور) مناسب هستند [۱۲]. به هر جهت، تخمین تراوایی در زون کاملاً اشباع شده از آب و عاری از هیدروکربور، از نظر پیش‌بینی نرخ بلاآمدگی ستون آب، می‌تواند اهمیت داشته باشد. برای تصحیح این حالت، در معادله تعیین عدد سنگ- فابریک (معادله ۱۰)، با تغییر ضریب  $d_0$  از مقدار  $1/883$  به  $2/8$  (تحت عنوان معادله تصحیح شده در شکل ۱۴ ج) درجه انطباق مقادیر حاصل از این تصحیح با مقادیر مغزه‌ای، افزایش می‌یابد (شکل ۱۴ ج). با این حال، در قسمت‌های با تراوایی کمتر از  $0.1$  mD (زون‌های غیر مخزنی) نیز، پس از تصحیح، اختلافی دیده می‌شود که ناشی از عدم کالیبره بودن این معادلات برای مقادیر تراوایی کمتر از  $0.1$  mD است [۱۲].

همان‌طور که پیش‌تر ذکر شد، پیش‌بینی تراوایی به صورت مقادیری دقیقاً منطبق بر مقادیر واقعی و اندازه‌گیری شده، امری دشوار و حتی امکان‌ناپذیر است. حتی مقادیر اندازه‌گیری شده هم با مقادیر واقعی سنگ مخزن در اعماق زمین نیز متفاوت است. به هر جهت، روندهای تراوایی پیش‌بینی شده با مقادیر نمونه‌های مغزه‌ای، هماهنگی خوبی نشان می‌دهد (شکل ۱۳ ب).

در دیگر چاه مورد مطالعه، در قسمت‌هایی از توالی دالان بالایی و کنگان، اختلاف بین تراوایی‌های پیش‌بینی شده و مقادیر مغزه‌ای، بسیار بارز می‌شود (مانند عمق ۹۸۰ تا ۱۰۷۰ m) (شکل ۱۴ الف). به طور کلی، این اختلاف‌ها به بازه‌های با اشباع آب بیش از  $0.5$  (v/v) یا  $50\%$  منحصر می‌شوند (شکل ۱۴ ب). خصوصاً اینکه، معادلات



شکل ۱۴- الف) مقایسه تراوایی پیش‌بینی شده، با مقادیر مغزه‌ای در چاهی دیگر، نشان می‌دهد که بین مقادیر پیش‌بینی شده و اندازه‌گیری شده، اختلاف زیادی وجود دارد. ب) مقادیر آب اشباع شدگی نشان می‌دهد که، غالباً، اختلاف بین مقادیر پیش‌بینی شده و اندازه‌گیری شده، در اینتروال‌های با اشباع آب بیش از ۵۰٪ رخ می‌دهد. ج) با تغییر یکی از ضرایب معادله ۱۰، درجه انطباق این دو مقادیر در زون‌های با آب اشباع شدگی بیش از ۵۰٪، افزایش می‌یابد.

### نتیجه‌گیری

۴- به‌واسطه ناهمگنی ذاتی مخازن کربناته، روندهای افزایشی و کاهش‌ی تراوایی شناسایی شده در سایر چاه‌ها، تفاوت‌هایی را نشان می‌دهند.  
۵- رده‌های پتروفیزیکی لوچیا یا شماره سنگ-فابریک بر اساس مطالعات پتروگرافی در یکی از چاه‌های مورد مطالعه تعیین شده و سپس نتایج حاصله با رده‌های پیش‌بینی شده، مقایسه شدند.  
۶- به منظور تعیین رده‌های پتروفیزیکی لوچیا، علاوه بر پارامترهای مرسوم مانند سایز دانه‌ها و ذرات آهکی، سایز بلورهای دولومیت، جورشدگی، تخلخل بین دانه‌ای و محتوای گلی نمونه‌های آهکی، پارامترهای دیگری شامل بافت سیمان‌های انیدریتی در حفرات، سیمان‌های جوی، درصد دولومیتی

۱- برای محاسبه تخلخل، ترکیبی از لاگ‌های نوترون و چگالی ( $\Phi_{ND}$ )، بیشترین همبستگی و ارتباط را با داده‌های تخلخل مغزه‌ای نشان می‌دهد.  
۲- با ترسیم لاگ انحراف سرعت، می‌توان ارزیابی کیفی از بازه‌های مورد مطالعه ارائه نمود که به صورت شناسایی روندهای کاهش‌ی یا افزایش‌ی در تراوایی است.  
۳- با مقایسه داده‌های تراوایی مغزه و لاگ انحراف سرعت محاسبه شده، ۶ وضعیت یا زون در لاگ انحراف سرعت شناسایی شده است که سه حالت در ارتباط با روندهای افزایش‌ی و سه حالت دیگر در ارتباط با روندهای کاهش‌ی در تراوایی هستند.

لوچیا [۱] در توالی‌های دالان بالایی و کنگان، جهت پیش‌بینی تراوایی، قابل استفاده بوده و در مقایسه با مقادیر تراوایی مغزه، دارای مشابهت‌های قابل توجهی در مقادیر و روندها هستند.

شدن، نوع حفرات، سایز حفرات و نوع رخساره‌های رسوبی نیز مورد استفاده قرار گرفت که منجر به تفکیک بهتر رده‌ها شد.

۷- رویکرد ارائه شده توسط جنینگز و لوچیا [۱۲] و

### علائم و نشانه‌ها

$p_{matrix}$ : چگالی ماتریکس (g/cc)	$\Phi$ : تخلخل کل (v/v)
$p_{fluid}$ : چگالی سیال (g/cc)	$\Phi_D$ : تخلخل حاصل از لاگ چگالی (v/v)
$p_{log}$ : لاگ چگالی (g/cc)	$\Phi_N$ : تخلخل حاصل از لاگ نوترون (v/v)
$\Delta t$ : مدت زمان سیر صوت ( $\mu\text{s}/\text{ft}$ )	$\Phi_{ND}$ : تخلخل حاصل از لاگ نوترون و چگالی (v/v)
$\Delta t_{matrix}$ : مدت زمان سیر صوت در سنگ ( $\mu\text{s}/\text{ft}$ )	$\Phi_s$ : تخلخل حاصل از لاگ صوتی (v/v)
$\Delta t_{fluid}$ : مدت زمان سیر صوت در سیال ( $\mu\text{s}/\text{ft}$ )	$\Phi_{sv}$ : تخلخل واگی مجزا (v/v)
$\Delta t_{log}$ : مدت زمان سیر صوت (لاگ صوتی) ( $\mu\text{s}/\text{ft}$ )	$\Phi_{ip}$ : تخلخل بین ذره ای (v/v)
$HP$ : تراوایی بالا	$V_{rock}$ : سرعت صوت در سنگ (m/s)
$LP$ : تراوایی پایین	$V_{matrix}$ : سرعت صوت در ماتریکس (m/s)
$K$ : تراوایی (mD)	$V_{fluid}$ : سرعت صوت در سیال (m/s)
$K_{min}$ : تراوایی حداقل (mD)	$V_{p_{real}}$ : سرعت موج فشاری واقعی (m/s)
$K_{max}$ : تراوایی حداکثر (mD)	$V_{p_{syn}}$ : سرعت موج فشارشی مصنوعی (محاسبه‌ای) (m/s)
$S_w$ : آب اشباع شدگی (v/v)	$c$ : عدد نپیر
$c$ : عدد نپیر	$Velocity\ Deviation$ : انحراف سرعت (m/s)
	$DT$ : لاگ صوتی ( $\mu\text{s}/\text{ft}$ )

### مراجع

- [1]. Lucia F. J., "Carbonate reservoir characterization," Springer-Verlag Berlin Heidelberg, (Second edition), 2007.
- [2]. Tiab D. and Donaldson E. C., "Petrophysics: theory and practice of measuring reservoir rock and fluid transport properties," 2<sup>nd</sup> ed., Gulf Professional Publishing, 2004.
- [3]. Honarpour M. M., Chilingarian G. V., and and Mazzullo S. J., "Permeability and relative permeability of carbonate reservoirs," in: Chilingarian G. V., Mazzullo S. J., Rieke A., Deminguez G. C., Samaniego F. Y. (eds.), Carbonate reservoir characterization: a geologic-engineering analysis, part I, Elsevier, 1992.
- [4]. Ahr W. M., "Geology of carbonate reservoir," John Wiley & Sons., INC., 2008.
- [5]. Pittman E. D., "Relationship of porosity and permeability to various parameters derived from mercury injection-capillary pressure curves for sandstone," AAPG Bulletin, Vol. 72, No. 2, pp. 191-198, 1992.
- [6]. Timur A., "An investigation of permeability, porosity, and residual water saturation relationship for sandstone reservoirs," The Log Analyst, Vol. 9, No. 4, pp. 8, 1968.
- [7]. Saner S., Kissami M., and Al-Nufaili S., "Estimation of permeability from well logs using resistivity and saturation data," SPE, Formation Evaluation, Vol. 12, No. 1, pp. 27-32, 1997.

- [8] Neo S., Asada J., Fujita N., Mohammed S., and Arab H., "Geological framework modeling and rock type optimization for a giant oil field," Offshore Abu Dhabi, SPE 49447, 1998.
- [9]. Mohaghegh S., "Virtual-intelligence application in petroleum engineering: Part 1-Artificial neural networks," J. Petrol Technol, pp. 64-73, 2000.
- [10]. Cuddy S. J., "Lithofacies and permeability prediction from electrical logs using fuzzy logic," SPE, Reservoir Evaluation & Engineering, Vol. 3, No. 4, pp. 319-325, 2000.
- [11]. Anselmetti F. S. and Eberli G. P., "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, 1999.
- [12]. Jennings W. J. and Lucia F. J., "Predicting permeability from well logs in carbonates with a link to geology for interwell permeability mapping," SPE 84942, 2003.
- [13]. Rafavich F., Kendall C. G. St. C., and Todd T. P., "The relationship between acoustic properties and the petrographic character of carbonate rocks," Geophysics, Vol. 49, pp. 1622-1636, 1984.
- [14]. Wang Z., Hirsche W. K., and Sedgwick G., "Seismic velocities in carbonate rocks," J. Can. Petrol Technol., Vol. 30, pp. 112-122, 1991.
- [15]. Anselmetti F. S. and Eberli G. P., "Controls on sonic velocity in carbonates," Pure Appl. Geophys, Vol. 141, No. 2-3-4, pp. 287-323, 1993.
- [16]. Anselmetti F. S. and Eberli G. P., "Sonic velocity in carbonate sediments and rocks," in: Palaz I., Marfurt K. J., (eds), Carbonate seismology, SEG Geophysical Developments Series, Vol. 6, pp. 53-74, 1996.
- [17]. Lucia F. J., "Rock-fabric/petrophysical classification of carbonate pore space for reservoir characterization," AAPG Bulletin, Vol. 79, No. 9, pp. 1275-1300, 1995.
- [18]. Wyllie M. R. J., Gregory A. R., and Gardner G. H. F., "Elastic wave velocities in heterogeneous and porous media," Geophysics, Vol. 21, No.1, pp. 41-70, 1956.
- [19]. Asquith G. B. and Gibson C. R., "Basic well log analysis for geologists," AAPG, Tulsa, Oklahoma USA, 1982.
- [20]. Coates G., Menger S., Prammer M., and Miller D., "Applying NMR total and effective porosity to formation evaluation," SPE 38736, 1997.
- [21]. Wyllie M. R. J., Gregory A. R., and Gardner G. H. F., "An experimental investigation of factors affecting elastic wave velocities in porous media", Geophysics, Soc. of Exploration Geophys, Vol. 23, No. 3, PP. 459-493, 1958.
- [22]. Hilchie D. W., Advanced well log interpretation: Golden, Colorado, D. W. Hilchie, variously paginated, 1982.
- [23]. Nur A. and Simmons G., "The effect of saturation on velocity in low porosity rocks," Earth and Planet Sc. Lett., Vol. 7, pp.183-193, 1969.
- [24]. Lucia F. J., "Rock fabric, permeability, and log relationships in an upward-shoaling vuggy carbonate sequence," Bureau of Economic Geology, University of Texas at Austin, Geological Circular, Vol. 87, pp. 5-22, 1987.
- [25]. Melim L. A., Anselmetti F. S., and Eberli G. P., "The importance of pore type on permeability of Neogene carbonates," Great Bahama Bank, in: Ginsburg R N., (ed), Integrated stratigraphy of a prograding Neogene platform margin, Great Bahama Bank, SEPM Concepts in Sedimentology and Paleontology, 2001.