

## مطالعه مقاومت ویژه سازندی با استفاده از روش واحدهای جریان هیدرولیکی در مخازن کربناته

عزت اله کاظم زاده<sup>۱\*</sup>، مجید نبی بیدهدنی<sup>۲</sup>، محمدرضا رضایی<sup>۳</sup>

۱- استادیار پژوهشگاه صنعت نفت، تهران، ایران

۲- دانشیار گروه فیزیک زمین، موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، ایران

۳- دانشیار دانشکده زمین شناسی پردیس علوم دانشگاه تهران، تهران، ایران

\* مسئول مکاتبات- آدرس الکترونیکی: [kazemzadehe@ripi.ir](mailto:kazemzadehe@ripi.ir)

(دریافت: ۸۴/۱۰/۲۵؛ پذیرش: ۸۵/۵/۱۰)

### چکیده

این مطالعه به منظور ارزیابی استفاده از طبقه بندی سنگهای مخازن کربناته به واحدهای جریان هیدرولیکی در جهت ارتباط پارامترهای مخزنی صورت گرفته است. از آنجا که ارتباط ساده‌ای بین تخلخل، تراوایی و مقاومت ویژه الکتریکی در سنگهای مخازن کربناته ناهمگن وجود ندارد در این مطالعه با اندازه گیری آزمایشگاهی بر روی تعدادی نمونه‌های پلاگ از مخازن کربناته نشان داده‌ایم که با مرتب‌سازی و طبقه‌بندی داده‌ها به واحدهای جریان هیدرولیکی می‌توانیم ارتباط خوبی بین تراوایی با تخلخل و ضریب مقاومت ویژه سازندی ارائه نماییم. واحدهای جریان هیدرولیکی از مقادیر تراوایی و تخلخل اندازه‌گیری شده در آزمایشگاه محاسبه شده‌اند که در هر واحد جریان هیدرولیکی ارتباط تخلخل و تراوایی به مقدار قابل توجهی بهبود می‌یابد، و همبستگی قابل توجهی بین تراوایی و ضریب مقاومت ویژه سازندی بدست می‌آید (ضریب همبستگی  $R^2$  در محدوده بین ۰.۶۱ و ۰.۷۹ قرار گرفته است). این همبستگی در واقع گسترش انطباق بین تخلخل و تراوایی در هر واحد جریانی هیدرولیکی است بطوریکه ارتباط بین تراوایی و ضریب مقاومت ویژه سازندی در مقایسه با ارتباط بین تخلخل و ضریب مقاومت ویژه سازندی به مقدار بیشتری بهبود یافته است. همچنین در این مطالعه نشان داده‌ایم که ارتباط بین فاکتور سیمان شدگی و تخلخل نمونه‌ها در تخلخلهای کمتر از ۷/۵ درصد بوسیله یک معادله خطی قابل ارائه می‌باشد و پراکندگی مقادیر سیمان شدگی با شاخص منطقه ای جریان (FZI) نسبت عکس دارد.

واژه‌های کلیدی: واحدهای جریان هیدرولیکی، ضریب مقاومت ویژه سازندی، تراوایی و تخلخل

### مقدمه

سانتی‌متر ارائه می‌نمایند. تلاشهای زیادی جهت ارتباط بین پارامترهای مخزنی صورت گرفته است، که از آن جمله ارتباط بین تراوایی، تخلخل و مقاومت ویژه الکتریکی می‌باشد و همیشه بعلت پیچیدگی فضای منافذ سنگهای کربناته، با مشکلاتی مواجه بوده است. به عنوان مثال همبستگی ضعیف بین تراوایی اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده از مشکلات روشهای ارائه شده می‌باشد. این عدم اطمینان بدلیل این است که تخلخل با توجه به تعریف، نسبت حجم منافذ به حجم توده سنگ است و یک پارامتر حجمی است در حالیکه تراوایی، مربوط به جریان یک سیال از منافذ سنگ می‌باشد که صرفاً تابعی از حجم منافذ نبوده و به توزیع هندسی و چگونگی ارتباط منافذ نیز بستگی دارد. بنابراین ارتباط بین تخلخل و تراوایی تابعی از هندسه منافذ می‌باشد. همچنین پس از مقاله معروف آرچی، محققین زیادی برای یافتن ارتباط مقاومت ویژه الکتریکی و تخلخل تلاش نموده‌اند زیرا ارتباط مقاومت ویژه سازندی و تخلخل وابسته به دو پارامتر ضریب سیمان شدگی (m) و ضریب پیچاپیچی (a) بوده و از آنجا که این دو ضریب به

روشهای توصیف پارامترهای مخزنی بسیار با ارزش بوده، زیرا امکان درک بهتر از میزان ذخیره و خواص جریانی از مخازن هیدروکربوری را فراهم ساخته و پایه‌ای برای مدل‌های شبیه ساز مخزن می‌باشند. روش‌های مختلف منجر به توصیف سازندهای هیدروکربوری در مقیاسهای مختلف از لحاظ قدرت تفکیک، پوشش و تعداد پارامترهای اندازه گیری شده می‌شوند. برای مثال نگاشتهای لرزه‌ای حاوی اطلاعات در خصوص ساختارهای زیرزمینی و سرعتهای لرزه‌ای سازند با کمترین قدرت تفکیک (چندین متر) اما ماکزیمم پوشش (دهها کیلومتر) می‌باشند. نگارهای چاه پیمایی حاوی اطلاعات در خصوص پارامترهایی نظیر، تخلخل، مقاومت و سرعت می‌باشند که قدرت تفکیک متوسط (چند سانتی‌متر) و پوشش چند متر را دارند در حالیکه اندازه‌گیریهای آزمایشگاهی روی مغزه، اطلاعات در خصوص پارامترهای مخزن نظیر سرعت، تخلخل، مقاومت، نفوذپذیری، چگالی و کانی‌شناسی با قدرت تفکیک در حد میلی‌متر و پوشش در حد

تاثیرگذار زمین شناسی می‌توانند واحدهای جریان هیدرولیکی مجزا را بوجود آورند که هر کدام خواص انتقال سیال مشابهی دارند. بنابراین واحدهای جریان هیدرولیکی شامل گونه‌های زمین شناسی متفاوت می‌باشند، و گروه‌بندی سنگها بر اساس شاخصهای زمین شناسی سنگ مرتبط با جریان، مبنای طبقه بندی واحدهای جریان هیدرولیکی می‌باشد. تئوری مربوط به طبقه بندی واحدهای جریان هیدرولیکی بر این فرض استوار است که منافذ را میتوان به صورت دسته‌ای از لوله‌های موئین در نظر گرفت. برای لوله‌های موئین مستقیم استوانه‌ای به شعاع  $r$ ، با ترکیب رابطه داری (Darcy) و رابطه پویزیله (Poiseuille) می‌توان نوشت:

$$K = \frac{r^2}{8} \Phi_e \quad (2)$$

که در آن  $K$  تراوایی و  $\Phi_e$  تراوایی موثر می‌باشند. رابطه ساده فوق بیانگر این است که ارتباط تخلخل و تراوایی بستگی به هندسه فضای منافذ شامل اندازه منافذ (شعاع  $r$ ) و شکل منافذ (عدد  $\lambda$  در معادله فوق برای لوله‌های استوانه‌ای شکل) دارد. برای یک محیط متخلخل واقعی کوزنی و کارمن دو پارامتر پیچاپیچی ( $\tau$ ) و مساحت سطح واحد حجم دانه (Sgv) را در رابطه (۲) اعمال نموده و رابطه زیر را ارائه نمودند (Kozeny 1927, Carman 1937):

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

که در آن  $F_s$  فاکتور شکل،  $K$  تراوایی بر حسب میکرومتر مربع و  $\Phi_e$  به صورت کسری بیان می‌شود.

گروه  $F_s \tau^2$  به عنوان ثابت کوزنی شناخته شده و محدودیت اصلی در کاربرد معادله فوق می‌باشد، زیرا مقادیر واقعی از ثابت کوزنی معمولاً برای یک سنگ خاص ناشناخته بود و عبارت  $S_{gv}^2$  در محاسبات منظور نمی‌گردید. تکنیک واحدهای جریان هیدرولیکی، با در نظر گرفتن مشخصات اصلی زمین شناسی و هندسه فضای متخلخل و تقسیم‌بندی شاخص منطقه‌ای جریان (Flow Zone Indicator)، تغییرات ثابت کوزنی و عبارت  $S_{gv}^2$  را در نظر می‌گیرد. آمیفول و همکاران با تقسیم رابطه (۳) بر  $\Phi_e$  تغییرات ثابت کوزنی را مورد مطالعه قرار داده‌اند و رابطه زیر را ارائه نمودند (Amaefule et al. 1993):

$$0.0314 \sqrt{\frac{K}{\Phi_e}} = \left[ \frac{\Phi_e}{1-\Phi_e} \right] \frac{1}{\sqrt{F_s \tau^2 S_{gv}^2}} \quad (4)$$

ثابت 0.0314 جهت تبدیل میلی متر مربع به میلی داری است. با تعریف عبارتهای شاخص منطقه ای جریان (FZI)، شاخص کیفیت مخزنی (Reservoir Quality Index) و تخلخل نرمال شده ( $\Phi_{2n}$ ) به صورتهای زیر:

$$FZI = \frac{1}{\sqrt{F_s \tau^2 S_{gv}^2}} \quad (5)$$

هم وابسته می‌باشند، لذا پیش‌بینی مقاومت ویژه از روی تخلخل همیشه دارای چالشهای جدی بوده است (Archie 1942). هدف این مطالعه ارزیابی استفاده از روش واحدهای جریان هیدرولیکی به منظور توصیف و درک ارتباط بین پارامترهای مقاومت ویژه الکتریکی، تراوایی و تخلخل بوده است. فهد و همکاران با استفاده از تکنیک واحد های جریان هیدرولیکی، تراوایی را از داده های نگارهای چاه پیمایی در یک مخزن ماسه سنگی عربستان تخمین زدند (Fahad et al. 2000). شدید و ریاض یک تکنیک جدید برای توصیف مخازن کربناته با تعریف عدد مشخصه ارائه نمودند (Shedid & Reyadh 2002). آنها بر روی ۸۳ نمونه، پارامترهای تخلخل، تراوایی، اشباع آب باقیمانده و تراوایی آب و نفت را اندازه گیری نمودند. نتایج حاصل بیانگر توصیف بهتر مخزن با بکار گیری مفهوم شاخص کیفیت مخزنی نسبت به تابع  $J$  میباشد، که با بکار گیری عدد مشخصه حاصل از اطلاعات مربوط به خواص سنگ و سیال و شرایط دینامیکی جریان، نسبت به واحد های جریان هیدرولیکی توصیف بهتری از مخزن ارائه نمودند. همچنین تحقیقات انجام شده توسط پراسد بیانگر بهبود ارتباط بین سرعت امواج و تراوایی درون واحدهای جریان هیدرولیکی می‌باشد (Prasad 2003). ضریب همبستگی بین سرعت امواج و تراوایی برای واحد های جریان هیدرولیکی در محدوده ۰/۸۷ تا ۰/۶۵ گزارش شده است.

### واحدهای جریان هیدرولیکی

واحدهای جریان هیدرولیکی روشی برای طبقه بندی انواع سنگها نسبت به خواص جریانی بر پایه پارامترهای زمین شناسی و فیزیک جریان در مقیاس منافذ است. تئوری روش ابتدا توسط آمیفول و همکاران و سپس توسط سایر محققین تعمیم یافت (Amaefule et al. 1993). این تکنیک بیشتر در تخمین تراوایی چاههای فاقد مغزه با استفاده از اطلاعات نگارهای چاه پیمایی بکار گرفته شده است. راههای متداول برای تخمین تراوایی ( $k$ ) یا بر اساس رگرسیونهای لگاریتمی از نگارهای چاه پیمایی تخلخل ( $\Phi$ ) بوده (رابطه ۱) و یا بر پایه روابط تجربی می‌باشند که تراوایی را به نگارهای چاه پیمایی مختلف مرتبط می‌سازند.

$$Lnk = a \Phi + b \quad (1)$$

هر دو روش تجربی هستند و پایه فیزیکی و زمین شناسی ندارند. یک واحد جریان هیدرولیکی زیر مجموعه‌ای از کل گونه‌های سنگ مخزن می‌باشد که با خواص زمین شناسی کنترل کننده جریان سیال سازگار بوده و قابل پیش بینی از سایر خواص می‌باشد. عمده ترین پارامترهایی که جریان سیال را تحت الشعاع قرار می‌دهند شامل نوع، فراوانی و محل قرارگیری کانیهها و بافت سنگها شامل اندازه دانه، شکل دانه، جورشدگی و فشردهگی می‌باشند. تلفیق های متنوع از عوامل

## ارتباط بین تراوایی و ضریب مقاومت ویژه سازندی

شباهت زیادی بین جریان سیال و جریان الکتریکی در محیط متخلخل وجود دارد. هر دو بوسیله معادله نفوذ (Diffusion) توصیف می‌شوند و مشخصات جریان در هر دو بیشتر تحت تاثیر منافذ سنگ در مقایسه با ماتریکس در سازندهای عاری از شیل می‌باشد. شواهد آزمایشگاهی نیز بیانگر شباهتها برای فرآیند جریان در مقیاس میکروسکوپی می‌باشد. بریس و همکاران با اندازه‌گیری تراوایی و مقاومت ویژه الکتریکی بر روی نمونه‌های گرانیت یک ارتباط خطی بین این دو پارامتر در نمودار لگاریتمی بدست آوردند (Brace et al. 1968). شبیه همین نتایج توسط دیگر محققین نیز ارائه گردیده است. این نتایج بیانگر یکسان بودن مسیر جریان ذرات آب تحت یک گرادیان فشاری و جریان یونها در سنگ تحت یک اختلاف پتانسیل می‌باشد. والش و بریس نشان دادند، تراوایی و ضریب مقاومت ویژه سازندی الکتریکی متناسب می‌باشند ( $K \propto F^{-r}$ ) که مقدار  $r$  را بین ۱ تا ۳ عنوان نمودند (Walsh & Brace 1984)، ولی تحقیقات انجام شده توسط سایر محققین (Batzle & Simmons 1983، Coyner et al. 1979 و ...) بر روی نمونه‌های گرانیتی و ماسه سنگی مقدار  $r$  را بین ۱/۵ تا ۲/۸ گزارش نموده‌اند. والش و بریس با فرض یکسان بودن مسیر جریان الکتریکی و جریان سیال و همچنین ضریب پیچاپیچی ( $\tau$ ) برای هر دو فرآیند رابطه زیر را بین ضریب مقاومت ویژه سازندی و تراوایی ارائه نمودند (Walsh & Brace 1984).

$$m = (b KF)^{0.5} \quad (10)$$

که در آن  $m$  را شعاع هیدرولیکی برابر با حجم مسیر به مساحت سطح تر شده و  $b$  را فاکتور وابسته به شکل منافذ عنوان نمودند. بیشتر روابط ارائه شده جهت ارتباط بین تراوایی و دیگر خواص هندسی منافذ بر پایه مدل لوله موئین یا کانال منافذ می‌باشد که این روابط بر اساس قانون هاگن (Hagen) و پویزیله و معادله دارسی جهت توصیف تراوایی بر اساس سایر پارامترها می‌باشد (Georgi & Menger 1994).

$$K = \frac{\Phi r_{hyd}^2}{4 \tau^2 \chi} = \frac{\Phi}{\chi S_{por}^2 \tau^2} = \frac{\Phi^3}{\chi S_{tot}^2 \tau^2} = \frac{\Phi^3}{\chi(1-\Phi)^2 S_m^2 \tau^2} \quad (11)$$

که  $\tau$  ضریب پیچاپیچی،  $S_{por}$  سطح ویژه منافذ،  $S_{tot}$  سطح ویژه کل سنگ،  $S_m$  سطح ویژه ماتریکس سنگ،  $r_{hyd}$  شعاع هیدرولیکی جریان و  $\chi$  فاکتور شکل سطح مقطع یا فاکتور کوزنی - کا رمن است، مقدار  $\chi$  برای سطح مقطع دایره‌ای شکل برابر ۲ می‌باشد. از طرفی برای مدل کانالی منافذ رابطه زیر را می‌توان بین مقاومت ویژه سنگ اشباع ( $R_0$ ) و مقاومت ویژه آب سازندی ( $R_w$ ) نوشت:

$$R_0 = R_w \cdot \frac{\tau}{\Phi} \quad (12)$$

با مقایسه رابطه فوق با رابطه آرچی رابطه زیر جهت ارتباط بین ضریب مقاومت ویژه سازندی ( $F$ )، تخلخل و ضریب پیچاپیچی برای

$$RQI = 0.0314 \sqrt{\frac{K}{\Phi_e}} \quad (6)$$

$$\Phi_z = \frac{\Phi_e}{1 - \Phi_e} \quad (7)$$

با توجه به روابط ۵ تا ۷، رابطه ۴ به صورت  $RQI = \Phi_z \times FZI$  تبدیل خواهد شد. با گرفتن لگاریتم از طرفین معادله خواهیم داشت.

$$\text{Log } RQI = \text{Log } \Phi_z + \text{Log } FZI \quad (8)$$

در شرایط ایده‌آل نمودار لگاریتمی  $RQI$  بر حسب  $\Phi_z$  یک نمودار خطی خواهد بود. هر خط یک واحد جریان هیدرولیکی است و محل تلاقی آن خط با  $\Phi_z = 1$  مقدار متوسط  $FZI$  برای این واحد جریان هیدرولیکی می‌باشد.

مبنای طبقه بندی واحدهای جریان هیدرولیکی مشخص کردن گروههای داده از خطوط راست با شیب یک روی نمودار لگاریتمی  $RQI$  بر حسب  $\Phi_z$  است. تراوایی نقاط نمونه از یک واحد جریانی هیدرولیکی با بکار بردن مقادیر متوسط  $FZI$  و مقادیر تخلخل مربوطه از رابطه زیر بدست می‌آید (Svirsky et al., 2004).

$$K = 1014 FZI^2 \frac{\Phi_e^3}{(1 - \Phi_e)^2} \quad (9)$$

تعیین واحدهای جریان هیدرولیکی درون یک مخزن با داده‌های مغزه انجام می‌شود. اندازه‌گیریهای تخلخل بر حسب تراوایی تحت فشار همه جانبه خالص از داده‌های معمولی مغزه جهت محاسبه  $FZI$ ،  $\Phi_z$ ،  $RQI$  استفاده می‌شود. اگرچه برای هر واحد جریانی می‌بایستی یک مقدار  $FZI$  در محدوده مقدار متوسط واقعی وجود داشته باشد، ولی بدلیل خطاهای اندازه گیری تصادفی در آنالیز مغزه یک توزیع از  $FZI$  در محدوده مقدار متوسط واقعی وجود دارد. تابع توزیع کلی  $FZI$  ها یک انطباق از توابع توزیع جداگانه اطراف متوسط  $FZI$  مربوط به هر واحد جریان هیدرولیکی است. تعیین هر مقدار متوسط  $FZI$  و یا هر واحد جریان هیدرولیکی نیازمند تجزیه کلی توزیع  $FZI$  به عناصر تشکیل دهنده آنها می‌باشد. در واقع این مسئله یک انطباق مجدد است که تکنیک آنالیز طبقه بندی، امکان انجام این فرآیند را میسر می‌سازد سه روش آنالیز هستوگرام، نمودار احتمال و الگوریتم طبقه بندی تحلیلی بوسیله محققین جهت گروه‌بندی مناسب واحدهای جریان هیدرولیکی استفاده شده است. روشهای طبقه‌بندی گرافیکی شامل آنالیز هستوگرام و نمودارهای احتمالی، توزیع  $FZI$  را بصورت تصویری مشخص می‌سازد که امکان تعیین تعداد واحدهای جریان هیدرولیکی را فراهم می‌سازد. در این مطالعه جهت تعیین تعداد واحدهای جریان هیدرولیکی از روش آنالیز هستوگرام استفاده شده است که با استفاده از نرم افزار Matlab و آنالیز خوشه ای مقادیر  $FZI$ ، شش واحد جریان هیدرولیکی برای کل داده‌ها بدست آمده است.

صددرد اشباع با آب نمک (r) در فشار همه جانبه ۴۰۰ Psi با دقت ۰/۲ درصد و فرکانس یک کیلوهرتز اندازه‌گیری شد. ابتدا نمونه صد در صد اشباع در داخل سیستم مغزه نگهدار دستگاه قرار داده شد. سپس با اعمال فشار همه جانبه ۴۰۰ Psi و تزریق چند برابر حجم فضای متخلخل آب نمک به نمونه توسط پمپ تزریق و ایجاد شرایط تعادل، مقدار مقاومت نمونه بر حسب اهم توسط دستگاه HIOKI3522-LCR HI TESTER اندازه‌گیری گردید، تصحیح دمایی برای مقاومت الکتریکی طبق رابطه زیر صورت گرفت (Worthington et al. 1990). (Arps 1953).

$$R_2 = \frac{R_1(T_1 + 21.5)}{(T_2 + 21.5)} \quad (16)$$

سپس مقاومت ویژه الکتریکی نمونه و مقاومت ویژه آب سازندی با استفاده از روابط زیر تعیین گردیدند (Schlumberge 1972).

$$R_o = R \frac{A}{L} \quad (17)$$

$$R_w = \left[ (400000 / T_f) P_w \right]^{0.88} \quad (18)$$

که در رابطه فوق A سطح مقطع نمونه و L طول نمونه، P<sub>w</sub> شوری آب سازند بر حسب PPM و T<sub>f</sub> دمای سازند بر حسب درجه فارنهایت می‌باشد.

در نهایت فاکتور مقاومت ویژه سازندی و مقدار ضریب سیمان شدگی با استفاده از فرمول زیر در حالت a=1 (رابطه آرچی) برای تمامی نمونه‌ها محاسبه گردید.

$$F = \frac{R_o}{R_w} = \frac{a}{\phi^m} \quad (19)$$

### بحث و نتایج

ابتدا با استفاده از تراوایی و تخلخل اندازه‌گیری شده مغزه، واحدهای جریان هیدرولیکی تعیین گردیدند. بدین منظور مقادیر RQI، FZI، Øz با استفاده از روابط ۵ و ۶ و ۷ برای ۱۷۸ نمونه با تخلخل بیش از ۷/۵ درصد محاسبه شدند. جهت طبقه‌بندی داده‌ها از نرم‌افزار Matlab استفاده گردید. با بکارگیری هیستوگرام توزیع فراوانی و روش آنالیز خوشه‌ای مقادیر FZI، شش واحد جریان هیدرولیکی مشخص گردید. مقادیر متوسط FZI با استفاده از نمودار RQI بر حسب Øz (شکل ۱) در هر واحد جریان هیدرولیکی در جدول ۲ آمده است.

نمودار تخلخل بر حسب تراوایی برای تمامی نمونه‌ها و همچنین ارتباط آنها در هر واحد جریانی در شکل ۲ نشان داده شده است. توابع به شکل  $Y = aX^b$  بهترین برازش را در هر واحد هیدرولیکی ارائه می‌نماید. نتایج حاصل بیانگر همبستگی ضعیف متداول بین تخلخل و تراوایی در سنگهای مخازن کربناته می‌باشد، ولی ارتباط بین تراوایی و تخلخل در هر واحد هیدرولیکی نشان دهنده همبستگی قوی بین این

مدل کانالی منافذ بدست می‌آید:

$$F = \frac{\tau}{\Phi} \quad (13)$$

با فرض یکسان بودن مسیرهای جریان الکتریکی و جریان سیال ارتباط بین نفوذپذیری و ضریب مقاومت ویژه الکتریکی با ادغام روابط فوق بدست خواهد آمد.

$$K = \chi^{-1} \frac{1}{F S_{por}} \quad (14)$$

همچنین روابط تجربی ارائه شده توسط محققین مختلف بیانگر ارتباط بین تراوایی و ضریب مقاومت ویژه سازندی به شکل زیر می‌باشد.

$$K = aF^{-u} \quad (15)$$

ضرایب a و u ضرایب تجربی بوده که این مقادیر بیشتر در خصوص ماسه سنگها و گرانیت‌ها تعیین شده است و مقادیر گرد آوری شده توسط فریند و نوور برای سنگهای مختلف در جدول ۱ خلاصه گردیده است (Freund & Nover 1995).

جدول ۱- مشخصات روابط تجربی ارائه شده جهت ارتباط تراوایی و ضریب مقاومت ویژه سازندی (Freund & Nover 1995).

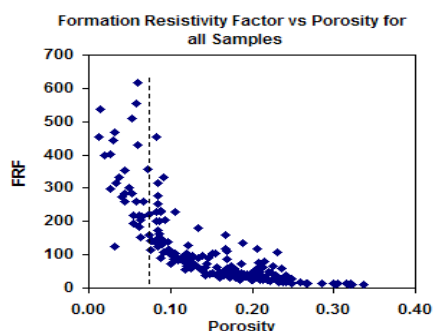
نوع سنگ	تعداد نمونه	U	R <sup>2</sup>
ماسه سنگ همراه با شیل	۱۲۶	۳/۹۲	۸۲٪
ماسه سنگ همراه با شیل	۴۸	۳/۴۸	۸۴٪
ماسه سنگ تمیز فونتنبلو (Fontainebleau)	۱۰	۱/۶۹	۸۷٪
گرانیت وسترلی (Westerly)	۶	۲/۴-۱/۵	---
گرانیت اونتاریو (Ontario)	۲۹	۱/۶۹	۰/۹۴
گرانیت مانیتوبا (Manitoba)	۲۴	۲/۲۲	۰/۸۴

### مراحل آزمایشگاهی

آزمایشات بر روی ۲۱۰ نمونه پلاگهای استوانه‌ای شکل به قطر ۱/۵ اینچ و طول حدود ۳ اینچ تهیه شده از نمونه‌های تمام مغزه سنگهای کربناته مخازن هیدروکربوری واقع در جنوب ایران از چندین چاه مختلف صورت گرفته است. تمامی پلاگها توسط حلالهای تولوئن و متانول توسط دستگاه دین استارک (Dean Stark) شستشو و عاری از هرگونه سیالی گردیدند و مدت ۲۴ ساعت در دمای ۸۰° درجه سانتیگراد در آون مخصوص خشک گردیدند. سپس روش متداول برای اندازه‌گیری تخلخل با اندازه‌گیری حجم دانه‌ای با دستگاه پیشرفته Ultra Porosimeter بر اساس قانون بویل بکار گرفته شد. همچنین تراوایی نمونه‌ها توسط دستگاه Ultra Permeameter با استفاده از قانون دارسی صورت گرفت. به منظور مطالعات مقاومت ویژه الکتریکی، نمونه‌ها با آب نمک با شوری ۲۰۰۰۰ ppm اشباع گردیدند و با استفاده از دستگاه FRF Overburden Rig مقدار مقاومت نمونه

جدول ۳- ضرایب تابع نمایی و ضریب همبستگی تخلخل با تراوایی.

واحد جریان هیدرولیکی	تعداد نمونه	a	b	R <sup>2</sup>
۱	۶۶	۱۴۹/۲۰	۲/۸۱	۰/۸۲
۲	۳۰	۰/۰۰۰۶	۳/۱۲	۰/۹۴
۳	۳۷	۳۶۸۳/۵۰	۳/۳۳	۰/۹۵
۴	۲۳	۱۰۲۰۲/۰۰	۳/۳۸	۰/۹۷
۵	۱۵	۳۸۹۹۳/۰۰	۳/۶۳	۰/۹۳
۶	۷	۱۹۳۸۸۵/۰۰	۳/۸۷	۰/۹۵
کل نمونه ها	۱۷۸	۱۱۱۸/۰۰	۳/۰۱۷	۰/۳۳



شکل ۳- ارتباط بین مقاومت ویژه سازندی و تخلخل برای تمامی نمونه‌ها.

$$m=12.5\Phi+1.133 \quad (R^2=0.73) \quad (20)$$

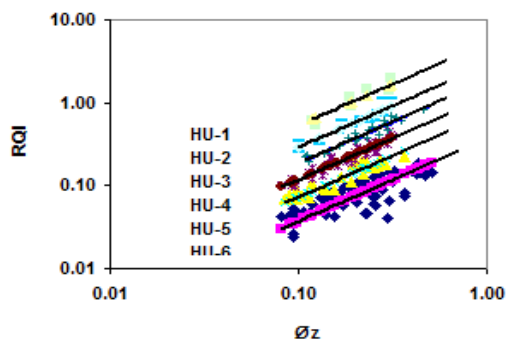
در حالیکه برای تخلخلهای بیش از ۷/۵ درصد ارتباط مناسبی بین ضریب سیمان شدگی و تخلخل وجود ندارد (رابطه ۲۱)، که این میتواند بدلیل تنوع در نوع تخلخل در سنگهای کربناته باشد (شکل ۴).

$$m=0.6\Phi+1.96 \quad (R^2=0.03) \quad (21)$$

شکل ۵ تغییرات ضریب سیمان شدگی را بر حسب مقدار شاخص منطقه ای جریان (FZI) نشان می دهد. نکته قابل توجه این است که با افزایش مقدار شاخص منطقه ای جریان پراکندگی مقادیر سیمان شدگی کم می شود، بطوریکه حد بالا و پایین این مقادیر به سمت عدد ۲ میل می کند که عدد متداول برای سنگ های مخازن کربناته با تخلخل های مرتبط و منظم است. بنابراین نتایج حاصل بیانگر ارتباط خوب ضریب سیمان شدگی با تخلخل در تخلخلهای پایین می باشد در حالیکه با افزایش مقدار تخلخل این همبستگی ضعیف می شود زیرا به نظر می رسد با افزایش تخلخل فرض  $a=1$  از اعتبار کمتری برخوردار است. همچنین مقایسه ارتباط ضریب مقاومت ویژه سازندی و تخلخل در واحدهای جریان هیدرولیکی بیانگر این مطلب است که همبستگی نسبتاً قابل قبولی بین مقاومت ویژه سازندی و تخلخل در هر واحد جریان هیدرولیکی وجود دارد (شکل های ۶ تا ۱۲).

دو پارامتر در هر واحد جریانی هیدرولیکی می باشد. کمترین مقدار ضریب همبستگی  $R^2$  برابر ۰/۸۲ در واحد جریانی هیدرولیکی شماره ۶ و بیشترین آن در واحد جریانی شماره ۳ برابر ۰/۹۷ درصد می باشد. در جدول ۳ مقادیر ضرایب تابع نمایی (a, b) و ضریب همبستگی بین تراوایی و تخلخل در هر واحد جریان هیدرولیکی آمده است.

Reservoir Quality Index (RQI) vs Normalized Porosity ( $\Phi_z$ )

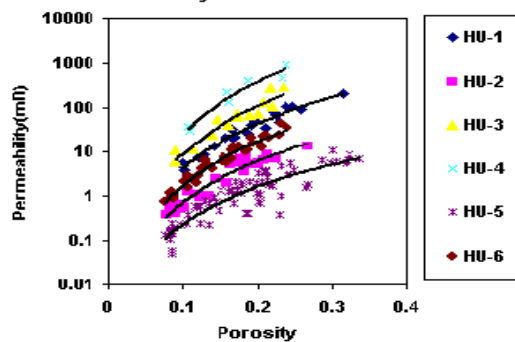


شکل ۱- شاخص کیفیت مخزنی بر حسب تخلخل نرمال شده.

جدول ۲- مقادیر متوسط شاخص منطقه ای جریان (FZI) در واحدهای جریان هیدرولیکی.

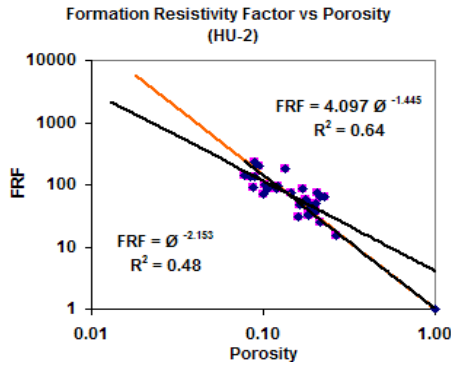
واحد جریان هیدرولیکی	۱	۲	۳	۴	۵	۶
FZI	۰/۳۷	۰/۷۳	۱/۱۸	۱/۸۸	۲/۹	۵/۳۱

Porosity- Permeability Relationship Based on Hydraulic Flow Units

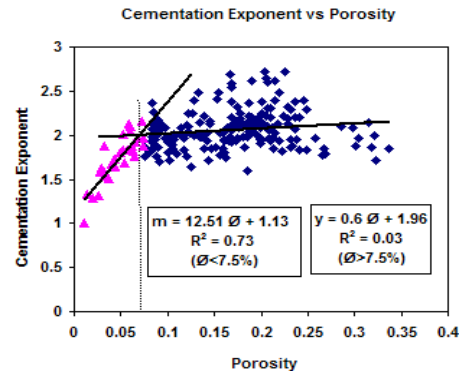


شکل ۲- ارتباط بین تخلخل و تراوایی در واحدهای جریان هیدرولیکی.

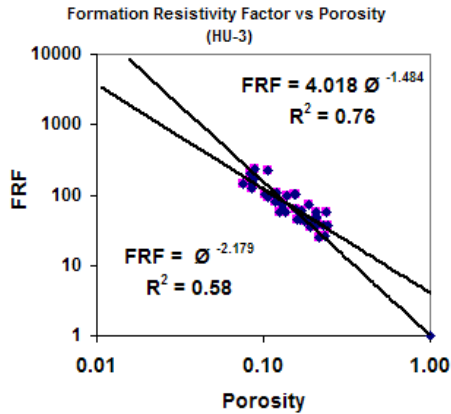
همانطوریکه در شکل ۳ مشاهده می شود روند تغییرات ضریب مقاومت ویژه سازندی نسبت به تخلخل برای نمونه های با تخلخل کم و زیاد متفاوت می باشد، بطوریکه پراکندگی داده ها با افزایش تخلخل کاهش میابد. همچنین روند تغییرات ضریب سیمان شدگی بر حسب تخلخل برای تخلخلهای کمتر از ۷/۵ درصد و بیشتر از آن متفاوت بوده بطوریکه در تخلخلهای کمتر از ۷/۵ درصد بین مقاومت ویژه الکتریکی و تخلخل رابطه خطی زیر با ضریب همبستگی  $R^2$  (۰/۷۳) قابل ارائه می باشد.



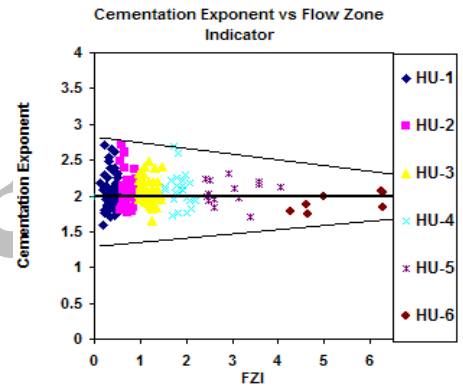
شکل ۲- ارتباط مقاومت ویژه سازندی و تخلخل برای واحد جریان شماره ۲.



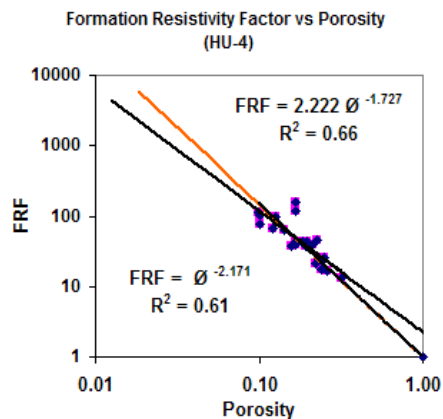
شکل ۴- ارتباط ضریب سیمان شدگی با تخلخل.



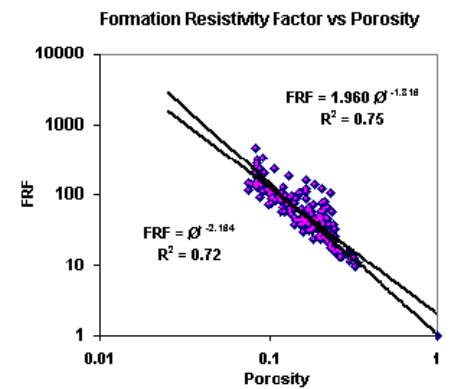
شکل ۹- ارتباط مقاومت ویژه سازندی و تخلخل برای واحد جریان شماره ۳.



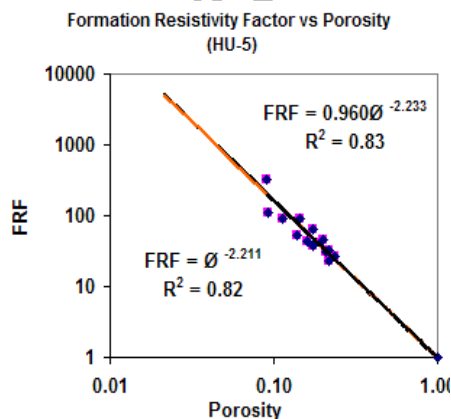
شکل ۵- ارتباط ضریب سیمان شدگی و شاخص منطقه ای جریان.



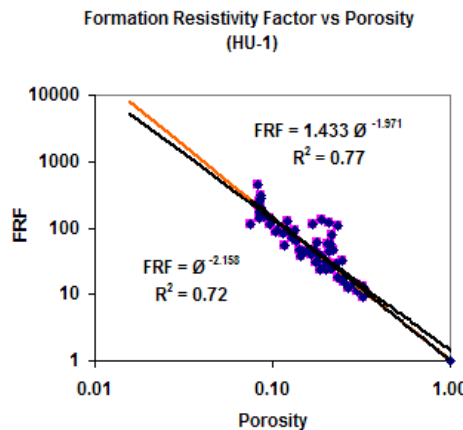
شکل ۱۰- ارتباط مقاومت ویژه سازندی و تخلخل برای واحد جریان شماره ۴.



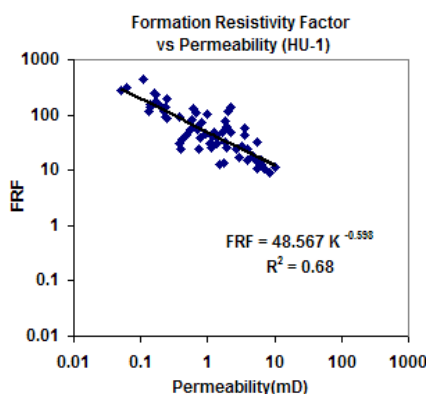
شکل ۶- ارتباط مقاومت ویژه سازندی و تخلخل برای کل نمونه‌ها.



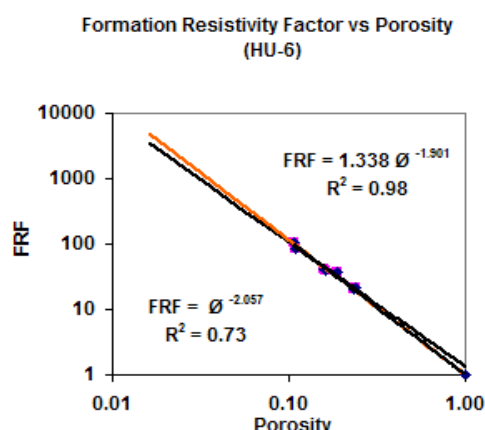
شکل ۱۱- ارتباط مقاومت ویژه سازندی و تخلخل برای واحد جریان شماره ۵.



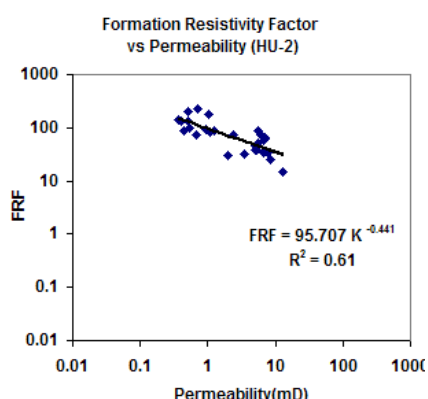
شکل ۷- ارتباط مقاومت ویژه سازندی و تخلخل برای واحد جریان شماره ۱.



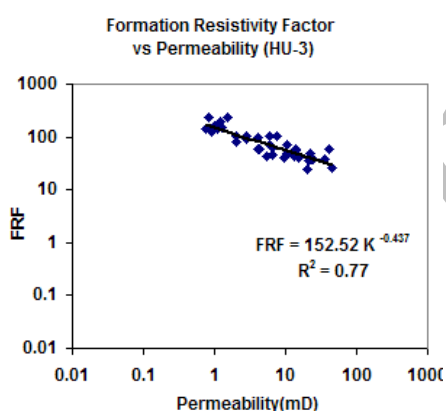
شکل ۱-۴-ارتباط مقاومت ویژه سازندی و تراوایی برای واحد جریانی شماره ۱.



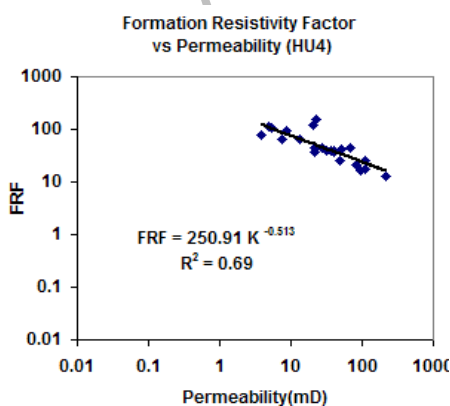
شکل ۱۲-ارتباط مقاومت ویژه سازندی و تخلخل برای واحد جریانی شماره ۶.



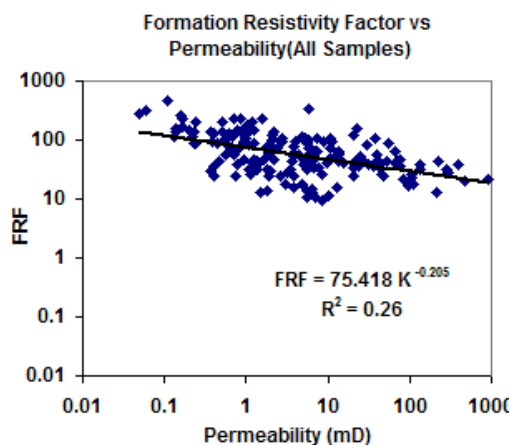
شکل ۱۵-ارتباط مقاومت ویژه سازندی و تراوایی برای واحد جریانی شماره ۲.



شکل ۱۶-ارتباط مقاومت ویژه سازندی و تراوایی برای واحد جریانی شماره ۳.



شکل ۱۷-ارتباط مقاومت ویژه سازندی و تراوایی برای واحد جریانی شماره ۴.



شکل ۱۳-ارتباط مقاومت ویژه سازندی و تراوایی برای کل نمونه‌ها.

همانطوریکه قبلاً ذکر گردید توسط محققین مختلف روابطی بین مقاومت ویژه الکتریکی و تراوایی با فرض یکسان بودن مسیر جریان الکتریکی و مسیر سیال ارائه شده است، ولی به علت پیچیدگی سیستم منافذ در نتیجه مسیر های جریان در سنگهای کربناته نمیتوان به سادگی ارتباط بین مقاومت ویژه الکتریکی و تراوایی را فرموله کرد. شکل ۱۳ بیانگر ارتباط ضعیف مقاومت ویژه سازندی با تراوایی در سنگهای کربناته بوده و رابطه تجربی  $K = a F^{-u}$  نمیتواند برازش مناسبی همانند نمونه های ماسه‌سنگی و گرانیتی ارائه دهد. در حالیکه در هر واحد جریان هیدرولیکی رابطه تجربی فوق برازش قابل قبولی بین ضریب مقاومت ویژه سازندی و تراوایی برقرار می‌کند (شکل‌های ۱۴ تا ۱۹). مقادیر  $a$  و  $u$  و  $R^2$  در جدول ۴ نشان داده شده است. بنا براین همبستگی بین تراوایی و مقاومت الکتریکی بعلت تنوع سیستم تخلخل و در نتیجه مسیرهای جریان در سنگهای کربناته ضعیف بوده ولی با بکار گیری تکنیک واحدهای جریان هیدرولیکی میتوان همبستگی بین این دو پارامتر را در هر واحد جریان تا حد قابل ملاحظه‌ای بهبود بخشید.

### نتایج

معمولاً نمودارهای تخلخل بر حسب تراوایی در مخازن کربناته ناهمگن دارای پراکندگی زیادی بوده و همبستگی ضعیفی را نشان میدهند ولی با طبقه بندی و مرتب نمودن داده‌ها بر حسب واحدهای جریان هیدرولیکی همبستگی قوی بین تخلخل و تراوایی در هر واحد جریان هیدرولیکی مشاهده می‌شود (شکل ۲ و جدول ۳).

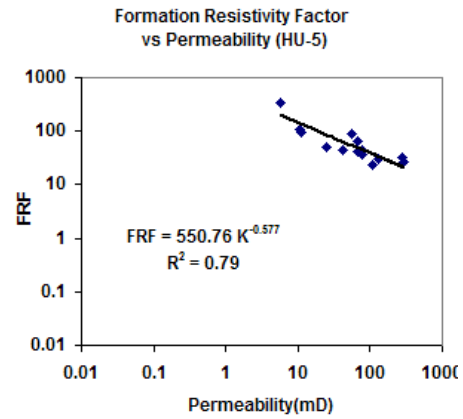
- روند تغییرات مقاومت ویژه الکتریکی در تخلخلهای کم با تخلخلهای زیاد متفاوت می‌باشد. بطوریکه ارتباط خطی نسبتاً خوبی بین ضریب سیمان شدگی و تخلخل برای تخلخلهای کم (کمتر از ۷/۵ درصد) وجود دارد ( $R^2 = 0.73$ )، در حالیکه برای تخلخلهای بالاتر این همبستگی ضعیف می‌باشد. همچنین دامنه تغییرات ضریب سیمان شدگی با افزایش مقدار شاخص منطقه ای جریان سازند کاهش می‌یابد.

- نتایج حاصل نشان می‌دهد تقسیم بندی نمونه‌ها بر حسب واحدهای جریان هیدرولیکی را میتوان جهت تعیین ضریب مقاومت ویژه سازندی بر حسب تخلخل و در نتیجه تعیین مقادیر ضرایب آرچی ( $a, m$ ) از رابطه (۱۹) استفاده نمود.

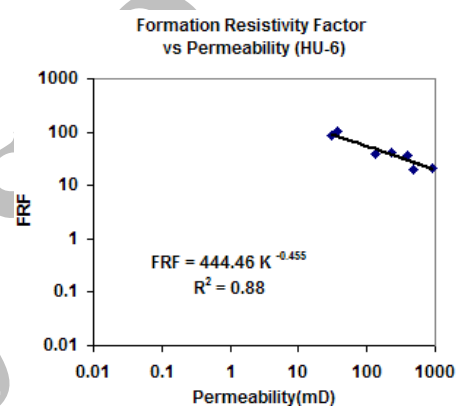
- ارتباط ساده‌ای بین مقاومت ویژه الکتریکی و تراوایی در سنگهای کربناته وجود ندارد ولی نتایج حاصل بیانگر بهبود قابل ملاحظه‌ای در این ارتباط در واحدهای جریان هیدرولیکی می‌باشد. دلیل عمده مشاهده ارتقاء همبستگی بین تراوایی و مقاومت ویژه الکتریکی می‌تواند یکسان بودن مسیر جریان الکتریکی و جریان سیال در واحدهای جریانی باشد. بطوریکه ارتباط ضریب مقاومت ویژه سازندی با تراوایی در هر واحد جریان به مراتب بیشتر از ارتباط ضریب مقاومت ویژه سازندی با تخلخل بهبود می‌یابد.

### تشکر و قدردانی

نگارندگان بر خود لازم می‌دانند از مرکز مطالعات اکتشاف و تولید پژوهشگاه صنعت نفت به سبب فراهم آوردن امکانات این پژوهش کمال تشکر را داشته باشند. همچنین از پرسنل واحد پژوهش مغزه های نفتی پژوهشگاه صنعت نفت تشکر و قدر دانی می‌گردد.



شکل ۱۸- ارتباط مقاومت ویژه سازندی و تراوایی برای واحد جریانی شماره ۵.



شکل ۱۹- ارتباط مقاومت ویژه سازندی و تراوایی برای واحد جریانی شماره ۶.

جدول ۴- ضرایب تابع نمایی و ضریب همبستگی مقاومت ویژه سازندی

با تراوایی.							
$R^2$	$b$	$a$	تعداد نمونه	واحد جریان هیدرولیکی			
۰/۶۸	-۰/۶۰	۴۸/۵۷	۶۶	۱			
۰/۶۱	-۰/۴۴	۹۵/۷۱	۳۰	۲			
۰/۷۷	-۰/۴۴	۱۵۲/۵۲	۳۷	۳			
۰/۶۹	-۰/۵۱	۲۵۰/۹۱	۲۳	۴			
۰/۷۹	-۰/۵۸	۵۵۰/۶۷	۱۵	۵			
۰/۸۸	-۰/۴۵	۴۴۴/۴۶	۷	۶			
۰/۲۶	-۰/۲۵	۷۵/۴۲	۱۷۸	کل نمونه ها			

### منابع

- Amaefule J.O., Altunbay M., Tiab D., Kersey D.G., Kedan D.K. 1993: Enhanced reservoir description: Using core and log data to identify hydraulic (flow) units and predict permeability in uncored intervals / wells, SPE 26436, Presented at 68<sup>th</sup> Ann. Tech. Conf., and Exhibit. Houston, Tx.
- Archie G.E. 1942: The electrical resistivity log as an aid in determining some reservoir characteristics. *Trans. AIME*. **146**: 54-67.
- Arps J.J. 1953: The effect of temperature on the density and electrical resistivity of sodium chloride solutions. *Journal Petroleum Technology*. **195**: 17-20.
- Batzle M.L., Simmons G. 1983: Micro crack closure in rocks under stress, fluid and electrical transport (abstracts). *Trans. Am. Geophys.* **64**: 317.
- Brace W.F., Walsh J.B., Frangos W.T. 1968: Permeability of granite under high pressure. *Geophysics, Res*, **73**: 2225-2236.
- Carman P.C. 1937: Fluid flow through granular beds. *Trans AICHE*. **15**: 150-166.



- Coyner K.B., Brace W.f., Walsh J.B. 1979: New laboratory measurement of permeability and electrical resistivity of crystalline rocks (abstracts). *Eos Trans. AGU*. **60**: 943.
- Fahad A., Al-Agmi S., Holditch A. 2000: Permeability estimation using hydraulic flow units in a Central Arabia Reservoir. *SPE*. **63254**: 787-799.
- Freund D., Nover G. 1995: Hydrostatic pressure tests for the permeability-formation factor relation on crystalline rocks from the KTB drilling project. *Surveys in Geophysics*. **16**: 47-62.
- Georgi D.T., Menger S.K. 1994: Reservoir quality, porosity and permeability relationships. *Trans. 14. Mintrop-Seminar, DGMK und Ruhr – Universitat Bochun*, **163**:1-35.
- Kozeny J. 1927: Uber kapillare leitung des wassers im boden, stiuzugsberichte, *Royal Academy od Science, Vienna, Proc. Class1*, **136**: 271-306.
- Prasad M. 2003: Velocity – Permeability relation within hydraulic units. *Geophysics*. **68**: 108-117.
- Schlumberger 1972: Inc. Log Interpretation-Principle. Schlumberger Educational Services, Houston.
- Shedid A.S., Reyadh A.A. 2002: A new approach of reservoir description of carbonate reservoirs. *SPE*. **74344**: 1-10.
- Svirsky D., Ryazanov A., Pankov M., Posysoev A. 2004: Hydraulic flow units resolve reservoir description challenges in a Siberian oil field. *SPE*. **87056**: 1-15.
- Walsh J.B., Brace W.F. 1984: The effect of pressure on porosity and the transport properties of rock. *Journal of Geophysical Research*. **89**: 9425-9431.
- Worthington A.E., Hedges J.E., Pallatt N. 1990: SCA guidelines for sample preparation and porosity measurement of electrical resistivity samples- Part I. *The Log Analyst*. 20-28.

Archive of SID