

تعیین ضرایب آرچی در پتروفاسیس‌های متفاوت سنگ‌های کربناته، با استفاده از نگارهای انحراف سرعت امواج لرزه‌ای

عزت‌اله کاظم‌زاده^{۱*}، مجید نبی‌بیدهندی^۲، محمد کرامتی معزآباد^۳، محمدرضا رضایی^۴ و کاظم سعادت^۵

^۱ دانشجوی دکتری ژئوفیزیک، مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران و عضو هیئت علمی پژوهشگاه صنعت نفت، ایران

^۲ دانشیار گروه فیزیک زمین، مؤسسه ژئوفیزیک، دانشگاه تهران، ایران

^۳ استادیار پژوهشگاه صنعت نفت، ایران

^۴ دانشیار دانشکده زمین‌شناسی، پردیس علوم، دانشگاه تهران، ایران

^۵ کارشناس، پژوهشگاه صنعت نفت، ایران

(دریافت: ۸۵، ۲، ۲۵، پذیرش نهایی: ۸۵، ۱۱، ۱۸)

چکیده

ارزیابی اشباع شدگی هیدروکربن در مخازن نفتی دارای اهمیت زیادی در محاسبات مخازن است. رابطه آرچی یکی از اساسی‌ترین فرمول‌های محاسبه اشباع شدگی است، که ضرایب این رابطه در آزمایشگاه تعیین می‌شود. آرچی این ضرایب را در سنگ‌های ماسه‌سنگی به دست آورده و اعداد ثابتی برای این لیتولوژی ارائه داد. اما سنگ‌های کربناته برخلاف ماسه‌سنگ‌ها دارای تنوع زیادی با توجه به نوع بافت و شکل منافذ در لیتولوژی است و چون ضرایب آرچی نیز تحت تاثیر عوامل لیتولوژیکی بالاخص نوع منافذند، در نتیجه ضرایب آرچی بایستی برای انواع گونه‌های سنگی در کربنات‌ها به دست آیند. عدم قطعیت در این ضرایب منجر به خطای زیادی در تعیین اشباع شاره‌ها، به ویژه میزان نفت در جا می‌شود. یکی از این ضرایب که تحت تاثیر شدید شکل منافذ است، ضریب سیمان‌شدگی است که عدم قطعیت در آن بیشترین خطا را تولید می‌کند. در این بررسی با اندازه‌گیری ضریب مقاومت ویژه سازندی و خواص پتروفیزیکی روی ۶۰ نمونه مغزه ضرایب آرچی (a و m) برای پتروفاسیس‌های متفاوت با استفاده از مطالعات پتروگرافی و تصاویر CT تعیین شد. همچنین با توجه به وابستگی شدید سرعت‌های امواج لرزه‌ای به شکل منافذ، پتروفاسیس‌های متفاوت با استفاده از نگارهای انحراف سرعت لرزه‌ای مشخص و ضرایب آرچی برای هر پتروفاسیس تعیین شد. نتایج حاصل نشان می‌دهند در حالت کلی با افزایش مقادیر انحراف سرعت، مقدار ضریب سیمان‌شدگی افزایش می‌یابد. همچنین مقایسه نتایج نشان می‌دهد که ضرایب همبستگی در پتروفاسیس‌های حاصل از نگارهای انحراف سرعت لرزه‌ای، بیشتر از پتروفاسیس‌های حاصل از مطالعات پتروگرافی مغزه هستند. بنابراین با توجه به این‌که اطلاعات نگارهای پتروفیزیکی، بیش از اطلاعات پتروگرافی حاصل از مغزه در دسترس است، به کارگیری روش ارائه شده می‌تواند در تعیین ضرایب آرچی بسیار مفید باشد.

واژه‌های کلیدی: ضرایب آرچی، مقاومت ویژه سازندی، نگار انحراف سرعت

۱ مقدمه

دارند. برای مثال هر دو با تخلخل نسبت عکس دارند و در سنگ‌های کربناته تأثیر نوع منافذ سنگ در هر دو قابل ملاحظه است. فرمول‌های اساسی برای تعیین خواص مخزنی از روی داده‌های سرعت امواج تراکمی و مقاومت ویژه الکتریکی، به ترتیب روابط وایلی و همکاران (۱۹۵۶) و آرچی (۱۹۴۲) است. رابطه (۱) را وایلی برای تعیین تخلخل از روی زمان سیر امواج تراکمی ارائه کرد.

$$\Delta t = (1 - \Phi)\Delta t_{\text{ma}} + \Phi\Delta t_{\text{f}} \quad (1)$$

برنامه‌ریزی دقیق توسعه و تولید از مخازن کربناته نفتی و گازی، بستگی به میزان توصیف جامع خواص مخزنی دارد. در این راستا رشد چشم‌گیر فنون ژئوفیزیکی قابل ملاحظه بوده است. یکی از تلاش‌های مهم صورت گرفته، تعیین اشباع شاره‌ها با استفاده از اندازه‌گیری‌های مقاومت ویژه الکتریکی سطحی، درون‌چاهی و استفاده از اطلاعات حاصل از سرعت امواج لرزه‌ای است که در برآورد میزان نفت درجا، از اهمیت زیادی برخوردار است. داده‌های مقاومت ویژه و سرعت امواج شباهت‌های زیادی

که در رابطه فوق، Δ_{tma} زمان عبور موج در واحد طول ماتریکس سنگ، Δ_{lf} زمان عبور موج در شاره و Φ تخلخل است. نتایج آنسلمیتی و ابرلی (۱۹۹۹) روی بیش از ۳۰۰ نمونه کربناته بیانگر رابطه معکوس بین سرعت و تخلخل است ولی با توجه به نوع منافذ، این ارتباط می‌تواند متنوع باشد. برای مثال، سرعت عبور صوت از تخلخل‌های بسته مانند تخلخل قالبی و درون‌فسیلی نسبت به تخلخل‌های به هم مرتبط، مانند تخلخل‌های بین‌ذره‌ای بیشتر است. تأثیر نحوه قرارگیری منافذ و شکل آنها روی خواص کشسانی به صورت نظری توسط اشلیبی (۱۹۵۷)، هیل (۱۹۶۵) و کاسترو توکسوز (۱۹۷۴) و از دیدگاه آزمایشگاهی توسط آنسلمیتی و ابرلی (۱۹۹۳)، ماریون و جیزبا (۱۹۹۶) و آنسلمیتی و ابرلی (۱۹۹۹) تحقیق شده است. ماریون و جیزبا روی تأثیر شکل منافذ بر سرعت در نمونه‌های مغزه، بررسی‌هایی کرده‌اند. آنها با گروه‌بندی نمونه‌ها برحسب فراوانی منافذ از نوع حفره‌ای، مشاهده کردند که در یک سرعت مفروض ۵۰۰۰ متر بر ثانیه، تخلخل می‌تواند از ۵ تا ۱۵ درصد بسته به وجود یا نبود تخلخل حفره‌ای تغییر کند، همچنین کمبود پراکندگی در ارتباط سرعت - چگالی برای این نمونه‌ها را تأکیدی بر این نکته دانسته‌اند که ارتباط سرعت - تخلخل لزوماً ناشی از شکل منافذ است و لیتولوژی تأثیر کمتری دارد.

رسوبات کربناته دائماً تحت تأثیر تغییرات دیاژنتیکی نظیر سیمان‌شدگی و انحلال است که باعث تغییر در ساختمان خلل و فرج می‌شود. این تغییرات باعث تغییر در خواص کشسانی و در نتیجه سرعت امواج می‌شود و دامنه وسیعی از سرعت از ۱۷۰۰ تا ۶۶۰۰ متر بر ثانیه برای امواج طولی و از ۶۰۰ الی ۳۵۰۰ متر بر ثانیه برای امواج برشی در سنگ‌های کربناته وجود دارد. علیرغم این که تخلخل مهم‌ترین عامل کنترل‌کننده سرعت در سنگ‌ها است اما در سنگ‌های کربناته شکل منفذ در رفتار کشسان، تقریباً اهمیتی به اندازه تخلخل دارد. بنابراین

ارتباطی پویا بین دیاژنز، تخلخل، نوع منافذ و سرعت امواج وجود دارد. از آنجا که بیشتر معادلات نظری موجود شکل منفذ را به‌طور مناسب یا به‌طور کلی در نظر نمی‌گیرد، بنابراین آنالیزهای وارون لرزه‌ای، دامنه برحسب دورافت (AVO) و محاسبات حجم منافذ که بر پایه این معادلات به دست می‌آیند، می‌توانند درصد عدم قطعیت بالایی داشته باشند. ابرلی و همکاران (۲۰۰۳) روی عامل‌های کنترل‌کننده خواص کشسانی در رسوبات کربناته و سنگ‌ها مطالعه کرده‌اند. آنها در تأثیر نوع منافذ در ارتباط بین سرعت و تخلخل اعلام کردند که سیمان‌ها به‌طور قابل ملاحظه‌ای سرعت را در سنگ‌های کربناته جوان‌تر، تحت تأثیر قرار می‌دهند ولی تأثیر نوع سیمان‌شدگی بیشتر از مقدار سیمان است. در سنگ‌های کربناته، سرعت فقط تابع تخلخل نیست بلکه در این مورد، نوع خلل و فرج اهمیت به سزایی دارد. آنسلمیتی و ابرلی (۱۹۹۳) بر اساس مشاهدات روی نمونه کربناته، ارتباط بین سرعت و تخلخل را برای انواع منافذ، مورد تجزیه و تحلیل قرار دادند. آنها انحراف مثبت از منحنی متوسط سرعت - تخلخل را برای تخلخل‌های قالبی و تخلخل درون‌دانه‌ای گزارش کردند.

وات و همکاران (۱۹۷۶) از یک روش مدل‌سازی قائم به ذات (self consistent modeling) برای برآورد ارتباط بین سرعت و تخلخل بین دو محیط، متشکل از اشکال کروی و بیضوی استفاده کردند. نتایج تحقیقاتی آنان نشان‌دهنده تغییرات سرعت در یک مقدار تخلخل برای دو محیط از جنس یکسان است که خود بیانگر ارتباط سرعت با شکل منافذ است.

مشابه تأثیر نوع منافذ بر ارتباط بین سرعت و تخلخل، در خصوص تأثیر نوع منافذ روی ارتباط بین مقاومت ویژه الکتریکی و تخلخل نیز تحقیقات گوناگونی صورت گرفته است. برای نخستین بار آرچی در ۱۹۴۲ نسبت مقاومت ویژه الکتریکی سنگ اشباع از آب سازند (R_0) و

می تواند بین یک و بی نهایت باشد، اما به طور تجربی مقدار ضریب سیمان شدگی می تواند بین $1/3$ و 3 باشد که این مقدار را آرچی ۱۹۴۲ به دست آورده است.

سونی و جنینگ (۱۹۶۰) اختلاف m را در سنگ های کربناته از $1/6$ تا $5/7$ برآورد کرده اند. کمترین مقدار m برای حالتی است که محیط عاری از تخلخل های ایزوله باشد، در واقع تخلخل های موجود در نمونه متخلخل همگی با هم مرتبط اند و منافذ بسته ای در سنگ وجود نداشته باشد و مقدار بالای ضریب سیمان شدگی مربوط به درجه بالای ناهمگنی، وجود لایه با تخلخل های ریز، وجود رس های ورقه ای و زاویه دار بودن دانه ها است (سالم و چلینگریان، ۱۹۹۹).

سالم (۲۰۰۱) روی ارتباط بین ضریب مقاومت ویژه سازندی، سرعت امواج تراکمی و تخلخل مخازن اشباع با شماره های چند فازی تحقیقاتی به انجام رسانده است. آنها ارتباط مستقیم بین سرعت امواج تراکمی و مقاومت ویژه الکتریکی را با استفاده از نگاره های چاه برای مخازن ماسه ای شیلی متراکم و ناهمگن گزارش کرده اند. آنها ضریب همبستگی بین این سه پارامتر را از 0.75 تا 0.92 به دست آوردند. همچنین کامل و مابروک (۲۰۰۲) معادله ای برای برآورد مقاومت ویژه سازندی، با استفاده از داده های زمان عبور امواج و مقاومت الکتریکی در سازندهای تمیز ارائه کردند.

شنگ (۱۹۹۱) روی مدل سازی همخوانی بین خواص کشسانی و الکتریکی سنگ های رسوبی تحقیقاتی صورت داده است که نتایج کار ایشان یک نظریه محیط مؤثر تفاضلی به منظور مطالعه روابط آرچی و وایلی بوده است.

۲ نگار انحراف سرعت

فکر اصلی در تعیین نگار انحراف سرعت این است که در معادله وایلی، با مشخص بودن سرعت عبور موج از

مقاومت ویژه آب سازندی (R_w) را ضریب مقاومت ویژه سازندی (FRF) نامید و آن را به توانی از تخلخل ارتباط داد:

$$FRF = \frac{R_0}{R_w} = \frac{1}{\Phi^m} \quad (2)$$

ابتدا وینسور و همکاران (۱۹۵۲) سپس وایلی و گریگوری (۱۹۵۳) رابطه آرچی را به رابطه زیر تعمیم دادند:

$$FRF = \frac{a}{\Phi^m} \quad (3)$$

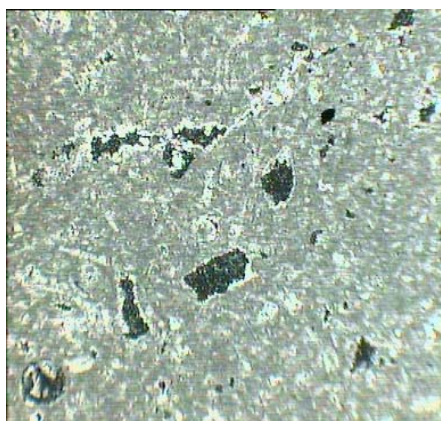
a تابع پیچاپیچی مسیر جریان در محیط متخلخل است و m که به مثابه ضریب سیمان شدگی یا ضریب شکل هندسی محیط متخلخل شناخته شده است به عواملی نظیر تخلخل، مقدار تخلخل ثانویه، قطر گلوگاه ها، توزیع اندازه گلوگاه ها و فشار بستگی دارد. همان طوری که در رابطه (۳) مشاهده می شود FRF تابعی از دو متغیر وابسته a و m است، بنابراین امکان تعیین a و m صرفاً با داشتن یک نمونه در آزمایشگاه میسر نیست. در صنعت نفت متداول است روی حداقل ۴ نمونه آزمایش کنند و با رسم نمودار FRF بر حسب Φ در مقیاس لگاریتمی مقدار m و a را تعیین می کنند ولی واقعیت این است که به دلیل تنوع بافت و نوع تخلخل در سنگ های کربناته، پراکندگی در این نمودار شبیه نمودار بین سرعت و تخلخل زیاد است..

فاک و مون (۱۹۸۷) مقدار m را در مخازن کربناته بین $1/5$ (سامانه تخلخل بین ذره ای یا بین بلوری) و $5/4$ (سامانه تخلخل با ارتباط ضعیف) عنوان کردند. مقدار m در معادله آرچی به واسطه افزایش حضور سیمان در منافذ سنگ افزایش پیدا می کند اما نمی توان آن را با مقدار سیمان مطابقت داد. تحقیقات صورت گرفته بیانگر این است که m عملاً وابسته به شکل هندسی خلل و فرج است که حتی آن را ضریب شکل هندسی منافذ نامیده اند (سالم و چلینگریان، ۱۹۹۹ و وایلی و گریگوری، ۱۹۵۳). وایلی و رز (۱۹۵۰) عنوان کردند که مقدار m از دیدگاه ریاضی

تخلخل، بیانگر تغییرات شدید دیاژنیتیکی، مثل انحلال، جانیشینی و تولید تخلخل قالبی است. زون‌ها با انحراف کوچک بخش‌هایی را نشان می‌دهند که از معادله متوسط زمانی وایلی پیروی می‌کند. در این زون‌ها عمدتاً تخلخل‌های بین‌ذره‌ای، بین‌بلوری و ریزتخلخل‌ها با تخلخل‌های بالا قرار دارند. همچنین عوامل نظیر، تخلخل‌های بالای ۴۰ درصد، ناهموازی در دیواره چاه، وجود شکستگی‌ها و حجم زیاد گاز آزاد، می‌توانند تأثیر منفی قوی در نگار انحراف سرعت داشته باشند (آنسلمیتی و ابرلی، ۱۹۹۹).

۳ مراحل انجام کار

آزمایش روی ۶۰ نمونه پلاگ استوانه‌ای شکل به قطر ۱/۵ اینچ و طول حدود ۳ اینچ تهیه شده از نمونه‌های تمام مغزه سنگ‌های کربناته مخازن هیدروکربوری از چندین چاه متفاوت صورت گرفته است. برای تعیین انواع بافت و تخلخل، از نمونه‌ها مقاطع نازک میکروسکوپی و تصاویر سی تی اسکن تهیه شد. در تصویر سی تی اسکن تخلخل‌ها به صورت تیره‌تر و نقاط چگال‌تر روشن دیده می‌شوند (شکل‌های ۱ و ۲).



شکل ۱. تصویر مقطع نازک میکروسکوپی با بافت پکتون و با تخلخل غالب قالبی و حفره‌ای.

ماتریکس و شاره 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 ایدئالی در معادله وایلی است. نگار انحراف سرعت از اختلاف سرعت محاسبه شده با استفاده از زمان عبور موج حاصل از نگار صوتی و سرعت مصنوعی به دست می‌آید که سرعت مصنوعی استفاده از معادله وایلی برای تعیین سرعت با استفاده از تخلخل حاصل از نگار نوترون یا چگالی است و مقادیر سرعت در ماتریکس و شاره معلوم است. نگار انحراف سرعت، ابزاری برای تشخیص انواع تخلخل اصلی در سنگ‌های کربناته است. آزمایش‌های به انجام رسیده روی نمونه‌های کربناته نشان داده‌اند که سرعت صوتی فقط حاصل عملکرد تخلخل کلی نیست، بلکه به نوع تخلخل هم بستگی دارد. به طور کلی تخلخل و سرعت، رابطه عکس دارند اما نوع تخلخل‌های موجود، این رابطه را تغییر می‌دهد. ثابت شده است که هندسه منافذ، عاملی اصلی در کنترل خواص کشسانی سنگ‌های کربناته است (بربی و همکاران ۱۹۸۵؛ آنسلمیتی و ابرلی ۱۹۹۳ و کتر و ایوانو ۱۹۹۵). آنسلمیتی و ابرلی (۱۹۹۹) تأثیر انواع منافذ روی سرعت را مورد بررسی قرار داده‌اند. آنها در مقاطع میکروسکوپی مورد مطالعه، پنج نوع تخلخل را مطرح ساخته‌اند و مقادیر انحراف سرعت را مورد بررسی قرار داده‌اند. آنها انحراف سرعت از مثبت به منفی را به ترتیب برای منافذ از نوع درون فسیلی، قالبی، تخلخل پایین با سیمان شدگی قوی، تخلخل بین‌ذره‌ای و در نهایت ریزتخلخل‌ها گزارش کرده‌اند. انحراف‌های مثبت، بیانگر سرعت‌های نسبتاً زیاد در ارتباط با تخلخل است و عمدتاً توسط فابریکی شبیه چارچوب سخت، مثل تخلخل درون فسیلی یا قالبی ایجاد می‌شود. در تخلخل‌های قالبی، انحراف‌های

تصحیح دمایی برای مقاومت الکتریکی طبق رابطه زیر صورت گرفت (آرپس ۱۹۵۳ و ورتینگتون و همکاران، ۱۹۹۰)

$$R_2 = \frac{R_1(T_1 + 21.5)}{(T_2 + 21.5)} \quad (۴)$$

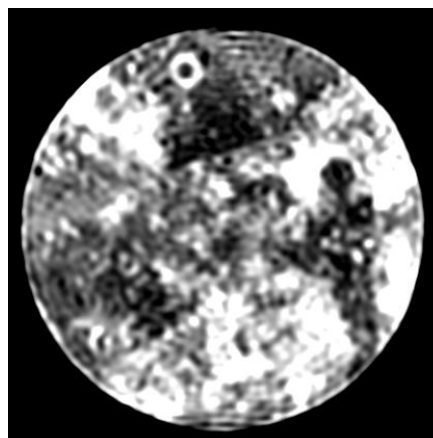
سپس مقاومت ویژه الکتریکی نمونه و مقاومت ویژه آب سازندی با استفاده از روابط (۵) و (۶) تعیین شد (شلمبرژه، ۱۹۷۲).

$$R_o = R \frac{A}{L} \quad (۵)$$

$$R_w = [(400000/T_f)P_w] \quad (۶)$$

که در آنها A سطح مقطع نمونه، L طول نمونه، P_w شوری آب سازند بر حسب PPM و T_f دمای سازند بر حسب درجه فارنهایت است.

با توجه به بررسی مقاطع نازک میکروسکوپی و تصاویر سی‌تی‌اسکن موجود، انواع بافت‌ها و تخلخل نمونه‌ها مشخص شد و بر این اساس مقادیر m و a با استفاده از رابطه ۳ بر پایه بافت، تخلخل و بافت - تخلخل محاسبه شد و مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت (جداول ۱ تا ۳). همچنین به منظور استفاده از نگارهای چاپ‌پیمایی تطابق عمق داده‌های مغزه و داده‌های چاپ‌پیمایی صورت گرفت و از تخلخل‌های نوترون، چگالی، نوترون-چگالی و تخلخل‌های آزمایشگاهی به همراه تخلخل صوتی، نگارهای انحراف سرعت تعیین شدند. در شکل ۳ نگار انحراف سرعت حاصل از تخلخل نوترون در حکم نمونه‌ای از نگارهای مورد بررسی آورده شده است. مقادیر انحراف سرعت، به ترتیب صعودی مرتب شدند و با دسته‌بندی این مقادیر، پتروفاسیس‌های متفاوت در دو حالت مجزا، یک‌بار با جداسازی تخلخل‌های کمتر از ۵ درصد و بار دیگر برای کل نمونه‌ها تعیین و شماره‌گذاری شد. بنابراین با افزایش شماره پتروفاسیس در هر حالت در جداول ۴ و ۵ مقادیر انحراف



شکل ۲. تصویر سی‌تی‌اسکن نمونه با بافت پکستون و تخلخل غالب قالبی و حفره‌ای.

همه پلاگ‌ها با حلال‌های تولوئن و متانول، با دستگاه دین استارک (Dean Stark) شستشو و عاری از هرگونه شاره‌ای شدند و مدت ۲۴ ساعت در دمای ۸۰ درجه سلسیوس در آون مخصوص خشک شدند. سپس روش متداول برای اندازه‌گیری تخلخل با اندازه‌گیری حجم دانه‌ای با دستگاه Ultra Porosimeter براساس قانون بویل به کار گرفته شد. همچنین تراوایی نمونه‌ها با دستگاه Ultra Permeameter با استفاده از قانون دارسی صورت گرفت. به منظور بررسی مقاومت ویژه الکتریکی، نمونه‌ها با آب نمک با شوری ۲۰۰،۰۰۰ ppm اشباع شدند و با استفاده از دستگاه FRF Overburden Rig مقدار مقاومت نمونه صد در صد اشباع با آب نمک (R) در فشار همه جانبه ۴۰۰۰ Psi با دقت ۰/۲ درصد و بسامد یک کیلو هرتز اندازه‌گیری شد. ابتدا نمونه صددرصد اشباع در داخل بخش مغزه نگهدار دستگاه قرار داده شد. سپس با اعمال فشار همه‌جانبه ۴۰۰۰ Psi و تزریق آب نمک به اندازه چند برابر حجم فضای متخلخل به نمونه با پمپ تزریق و ایجاد شرایط تعادل مقدار مقاومت نمونه بر حسب اهم با دستگاه Hioki3522-LCR HI Tester اندازه‌گیری شد،

جدول ۲. نتایج آزمایش برحسب نوع بافت.

Texture Type	a	m	R ²
Dolostone	19.17	0.80	0.58
Packstone	52.08	0.45	0.78
Dolopackstone	14.59	0.94	0.82
Dolowackstone	38.02	0.48	0.51
Dolomudstone	3.07	1.53	0.93

جدول ۳. نتایج آزمایش برحسب نوع بافت و تخلخل.

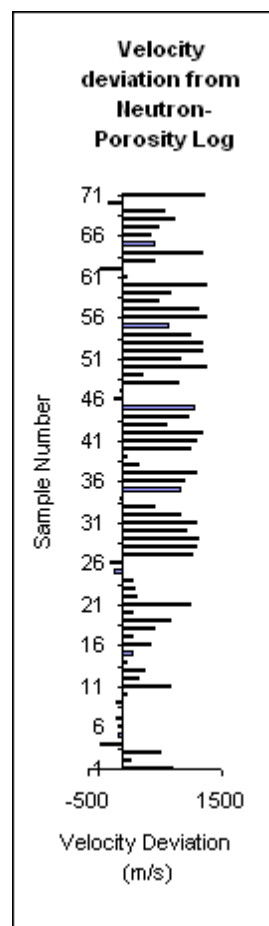
Texture	Pore type	a	m	R ²
Dolomudstone	Vuggy	3.09	1.52	0.93
Packstone	Vuggy- Moldic- Intercrystalline	4.35	1.49	0.83
Dolostone	Intercrystalline - Vuggy	4.01	1.44	0.84
Dolostone	Vuggy- Intercrystalline	21.75	0.74	0.46
Packstone	Fracture	7.35	1.07	0.99
Packstone	Moldic-Vuggy	28.42	0.68	0.76

جدول ۴. نتایج حاصل برحسب نگارهای انحراف سرعت و جدا سازی

نمونه‌ها با تخلخل کم.

	Classification Based on Separation of low Porosity Samples			
	Petrofacies	a	m	R ²
Neutron	Low porosity	95.8	0.32	0.74
	1	4.22	1.36	0.92
	2	1.53	1.91	0.82
	3	0.96	2.19	0.92
Density	Low porosity	128.8	0.25	0.56
	1	8.47	1.2	0.75
	2	1.60	1.93	0.70
	3	14.76	1.12	0.67
Neutron-Density	Low porosity	22.94	0.75	0.8
	1	24.47	0.72	0.75
	2	10.45	1.00	0.77
	3	1.32	2.00	0.94
Core	Low porosity	95.79	0.32	0.74
	1	2.35	1.07	0.90
	2	9.71	1.08	0.72
	3	1.14	2.07	0.88

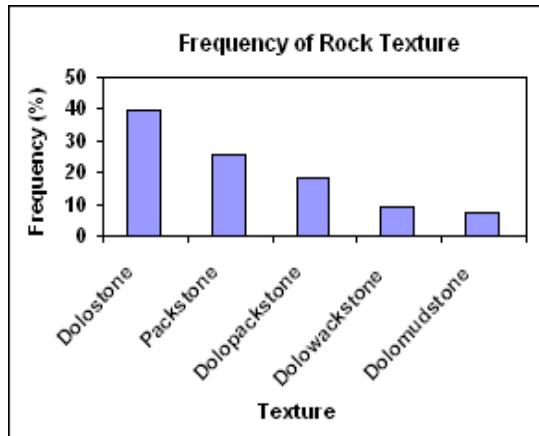
سرعت افزایش می‌یابد. در مرحله بعد مقادیر m و a برای پتروفاسیس‌های متفاوت با رسم نمودار ضریب مقاومت ویژه سازندی برحسب تخلخل در مقیاس لگاریتمی تعیین شدند.



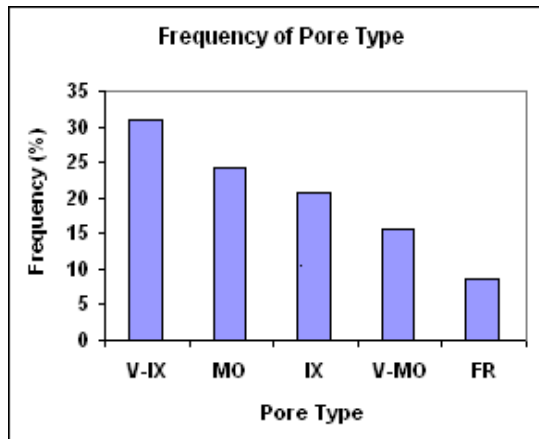
شکل ۳. نگار انحراف سرعت حاصل از تخلخل نوترون.

جدول ۱. نتایج آزمایش برحسب نوع تخلخل.

Pore Type	a	m	R ²
Vuggy-Intercrystalline	5.49	1.40	0.54
Moldic	12.16	1.04	0.73
Intercrystalline	13.14	0.93	0.80
Vuggy-Moldic	4.30	1.41	0.78
Fracture	7.35	1.07	0.99



شکل ۴. فراوانی بافت های موجود در نمونه ها.



شکل ۵. فراوانی نوع تخلخل های موجود در نمونه ها.

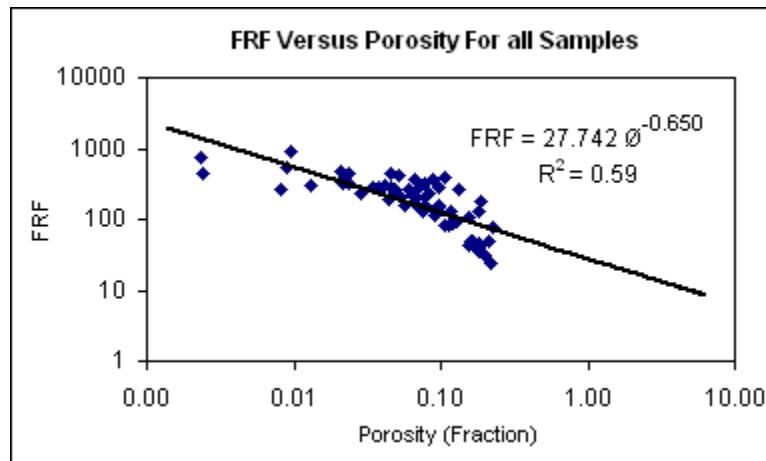
ارتباط ضریب مقاومت ویژه سازندی و تخلخل برای همه نمونه ها، بیانگر همبستگی ضعیف بین این دو پارامتر است (شکل ۶). ضریب همبستگی در این حالت برابر ۰/۵۹ است. مقدار ضریب سیمان شدگی و ضریب پیچاپیچی برای همه نمونه ها به ترتیب برابر ۰/۶۵ و ۲۷/۷۴ هستند. بنابراین به منظور حصول نتایج دقیق تر در خصوص تعیین ضرایب آرچی (a و m)، در نتیجه میزان اشباع شاره ها می باید سنگ ها را از لحاظ بافت و نوع تخلخل دسته بندی کرد و برای هر دسته، این مقادیر را مشخص ساخت.

جدول ۵. نتایج حاصل برحسب نگارهای انحراف سرعت برای همه نمونه ها.

	Classification Based on all Samples			
	Petrofacies	a	m	R ²
Neutron	1	95.15	0.34	0.76
	2	23.5	0.70	0.73
	3	19.15	0.86	0.82
	4	0.95	2.19	0.92
Density	1	73.41	0.35	0.71
	2	24.89	0.72	0.67
	3	68.6	0.38	0.75
	4	5.83	1.22	0.84
Neutron-Density	1	67.03	0.41	0.79
	2	40.9	0.50	0.63
	3	3.29	1.54	0.87
	4	1.37	2.02	0.93
Core	1	9.24	1.00	0.9
	2	62.44	0.39	0.71
	3	6.23	1.22	0.83
	4	1.14	2.06	0.88

۴ بحث

همان طوری که اشاره شد تحقیقات صورت گرفته محققان گوناگون، بیانگر این مطلب است که ضریب سیمان شدگی، تابعی از شکل هندسی منافذ است. بنابراین برای تعیین ضرایب آرچی، بررسی نوع منافذ ضروری است. در این مقاله علاوه بر بررسی نوع منافذ با استفاده از مقاطع نازک میکروسکوپی و تصاویر سی تی اسکن، از مقادیر انحراف سرعت به منظور بررسی پارامترهای آرچی استفاده شده است. برای مقاطع نازک میکروسکوپی و تصاویر سی تی اسکن نمونه های موجود، به ترتیب فراوانی، نشان دهنده بافت های دولستون، پکستون، دولوپکستون، دولوکستون و دلومادستون است (شکل ۴). همچنین انواع تخلخل غالب موجود در نمونه ها به ترتیب فراوانی شامل حفره ای- بین کریستالی (V-IX)، قالبی (MO)، بین کریستالی (IX)، حفره ای- قالبی (V-MO) و شکاف دار (FR) هستند (شکل ۵).



شکل ۶. ضریب مقاومت ویژه سازندی برحسب تخلخل برای همه نمونه‌ها

نمونه‌ها با هم، در شکل ۹ آمده است. مقدار متوسط ضریب همبستگی در این حالت برابر ۰/۸۰ است که نسبت به حالتی که بافت یا تخلخل به صورت جداگانه در نظر گرفته شده بیشتر شده است. لذا با تقسیم‌بندی نمونه‌ها، اساس بافت و نوع منافذ همبستگی بین مقاومت ویژه سازندی و تخلخل بهبود یافته است و می‌توان به نتایج قابل قبول‌تری از پارامترهای آرچی در سنگ‌های کربناته در نتیجه میزان اشباع شاره‌ها دست یافت. مقادیر ضریب سیمان‌شدگی و ضریب پیچاپیچی برای همه حالت‌های ذکر شده در بالا در جدول‌های ۱ تا ۳ خلاصه شده است. روش دیگری که در این مقاله پیشنهاد می‌شود و انتظار می‌رود در عمل کارایی خوبی داشته باشد استفاده از مقادیر نگار انحراف سرعت است. همان‌طوری که قبلاً ذکر شد، نگار انحراف سرعت را می‌توان به مثابه ابزاری در تشخیص تخلخل‌های اصلی در سنگ‌های کربناته به کار گرفت، لذا با توجه به وابستگی ضرایب آرچی به نوع منافذ، تقسیم‌بندی نمونه‌ها براساس مقادیر انحراف سرعت با در نظر گرفتن تخلخل‌های حاصل از نگارهای نوترون، نوترون و چگالی، چگالی و تخلخل‌های حاصل از اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی روی نمونه‌های پلاگ دو حالت معجزا، یک‌بار با جداسازی نمونه‌های با تخلخل

نتایج حاصل از تقسیم‌بندی نمونه‌ها اساس نوع بافت در شکل ۷ آمده است. ضریب همبستگی بین مقاومت ویژه سازندی و تخلخل نسبت به حالتی که همه نمونه‌ها با هم در نظر گرفته شده‌اند بهبود یافته است، به طوری که متوسط ضریب همبستگی برای پنج بافت موجود در نمونه‌ها شامل دولستون، پکستون، دولوپکستون، دولووکستون و دولو مادستون برابر ۰/۷۲ است که نسبت به حالتی که همه نمونه‌ها با هم در نظر گرفته شده‌اند بیشتر شده است.

در مرحله بعد، تقسیم‌بندی نمونه‌ها براساس انواع تخلخل غالب موجود در نمونه‌ها صورت گرفت. نمودارهای ضریب مقاومت ویژه سازندی برحسب تخلخل برای نمونه‌ها با تخلخل‌های غالب حفره‌ای- بین بلوری قالبی، بین کریستالی، حفره‌ای- قالبی و شکاف‌دار در شکل ۸ آمده است. مقدار متوسط ضریب همبستگی برای انواع تخلخل ارائه شده در شکل ۸ برابر ۰/۷۷ است که مقایسه مقادیر ضریب همبستگی در این حالت با حالت قبلی (شکل ۷) بیانگر بهبود ارتباط بین مقاومت ویژه سازندی و تخلخل است.

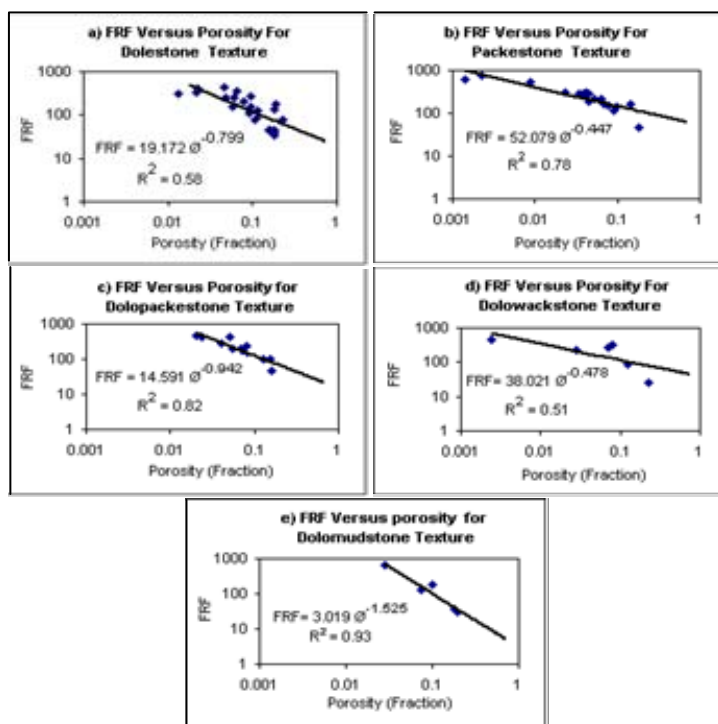
همچنین نمودارهای حاصل از ارتباط مقاومت ویژه سازندی و تخلخل با در نظر گرفتن نوع بافت و تخلخل

۵٪ مقدار ضریب سیمان‌شدگی را کمتر از ۲ مشاهده کردند. در این بررسی براساس محدوده تعیین شده ضرایب آرچی برای انواع پتروفاسیس، بهترین نتایج مربوط به حالتی است که برای تعیین نگار انحراف سرعت از تخلخل نوترون و آزمایشگاهی استفاده شود و تخلخل‌های کمتر از ۵٪ خود دسته‌ای را تشکیل دهند. ضمناً در کل دسته‌بندی‌های صورت گرفته براساس نگار انحراف سرعت ضریب همبستگی بالاتری نسبت به نتایج حاصل از مطالعات پتروگرافی حاصل از مغزه مشاهده شده است. لذا با توجه به دسترسی بیشتر نگارهای انحراف سرعت نسبت به اطلاعات پتروگرافی مغزه، به نظر می‌رسد استفاده از نگارهای انحراف سرعت لرزه‌ای، شیوه مناسبی برای تعیین مقادیر پارامترهای آرچی باشد.

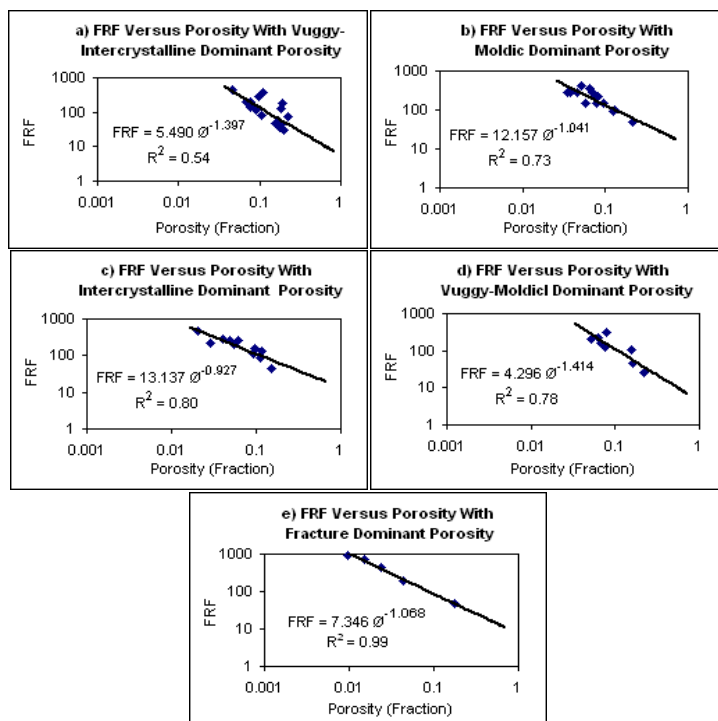
۵ نتیجه‌گیری

- پارامترهای آرچی (a و m) در مخازن کربناته وابستگی زیادی به شکل منافذ دارد.
- با افزایش مقادیر انحراف سرعت، به‌طور کلی مقادیر ضریب پیچاپیچی کاهش و مقادیر ضریب سیمان‌شدگی افزایش می‌یابد.
- در پتروفاسیس‌های حاصل از نگارهای انحراف سرعت لرزه‌ای، ضرایب همبستگی قابل قبولی نسبت به پتروفاسیس‌های حاصل از مطالعات پتروگرافی مغزه در نمودارهای ضریب مقاومت ویژه سازندی بر حسب تخلخل مشاهده می‌شود.
- جداسازی تخلخل‌های کم و تعیین پتروفاسیس براساس نگارهای انحراف سرعت منجر به نتایج بهتری در تعیین پارامترهای آرچی شده است.
- استفاده از نگار نوترون و داده‌های آزمایشگاهی در تعیین تخلخل به منظور نگار انحراف سرعت در مقایسه با سایر نگارهای تخلخل، در تعیین مقادیر پارامترهای آرچی نتایج بهتری داشته است.

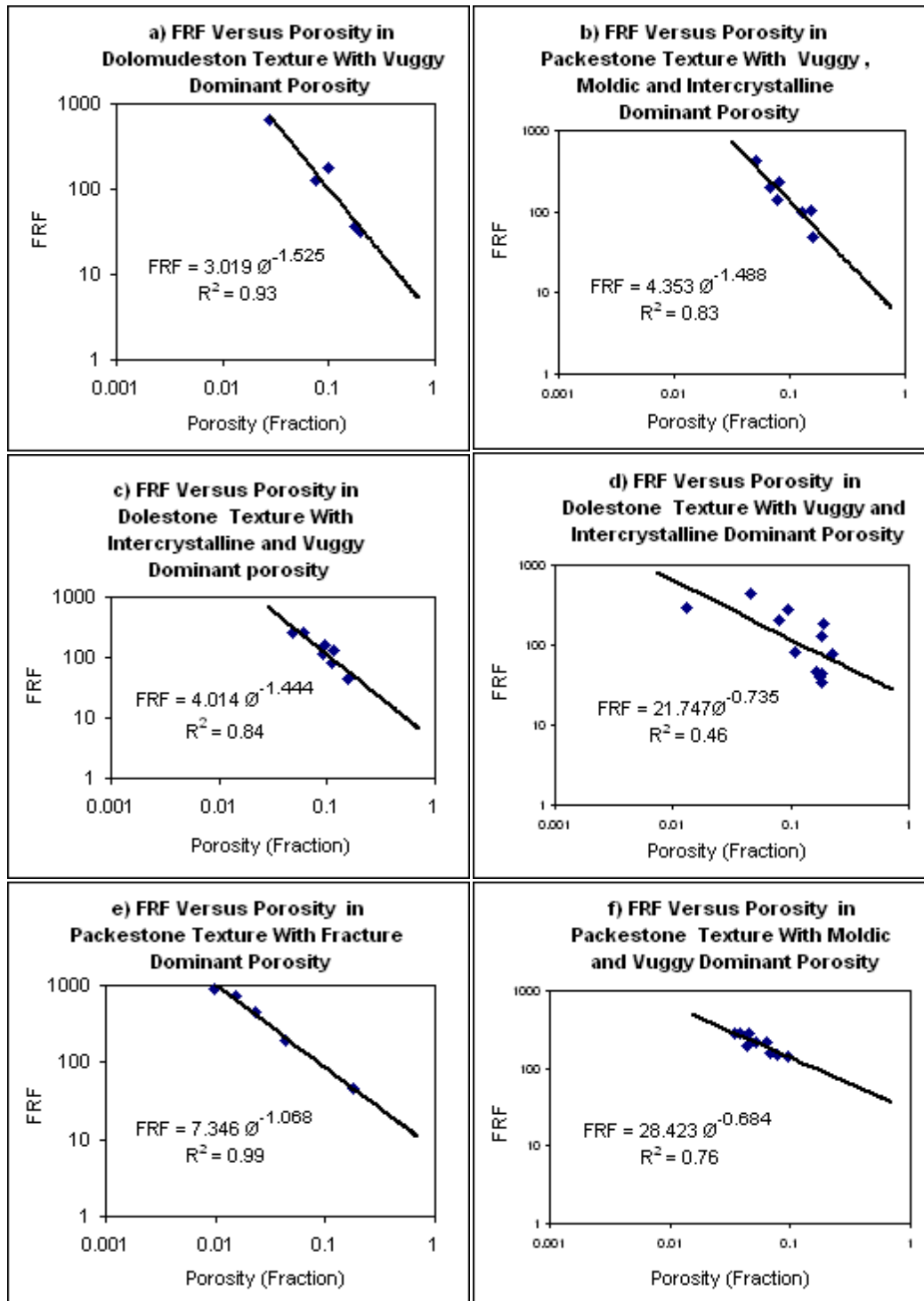
کمتر از ۵ درصد و بار دیگر برای کل نمونه‌ها در پتروفاسیس‌های متفاوت مشخص شدند. جدول ۴ و شکل‌های ۱۰، ۱۲، ۱۴ و ۱۶ مربوط به حالتی است که تخلخل کمتر از ۵٪، خود در حکم یک دسته مجزا در نظر گرفته شد و بقیه نمونه‌ها بر اساس نگارهای انحراف سرعت گوناگون دسته‌بندی شدند. و جدول ۵ و شکل‌های ۱۱، ۱۳، ۱۵ و ۱۷ مربوط به حالتی است که کل نمونه‌ها براساس عدد نگار انحراف سرعت دسته‌بندی شدند. در هر دو دسته‌بندی، نگار انحراف سرعت براساس نمودارهای چاه‌پیمایی گوناگون تعیین شد و سپس ضرایب آرچی در هریک از آنها به دست آمد. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش مقادیر انحراف سرعت، ضریب پیچاپیچی کاهش و ضریب سیمان‌شدگی افزایش می‌یابد. چراکه انحرافات سرعت می‌تواند از مقادیر مثبت به منفی به ترتیب برای منافذ درون فسیلی، قالبی و بین‌دانه‌ای بین‌بلوری میکروتخلخل‌ها تغییر کند. بنابراین انتظار می‌رود که با افزایش مقادیر انحراف سرعت مساحت سطوح منافذ به مساحت سطوح گلوگاه‌ها افزایش یابد لذا با توجه به تعریف پتروگرافی ضریب سیمان‌شدگی (نسبت مساحت سطوح منافذ به مساحت سطوح گلوگاه‌ها) افزایش ضریب سیمان‌شدگی با افزایش مقادیر انحراف سرعت توجیه می‌شود. همچنین زمانی که نمونه‌های با تخلخل کم (تخلخل کمتر از ۵٪) در دسته مجزایی قرار دارند نتایج بهتری حاصل شد. چراکه روند تغییرات مقاومت ویژه سازندی و تخلخل در تخلخل‌های کم، متفاوت از تخلخل‌های زیاد است. شبیه همین مطلب را فاک و مون (۱۹۸۷) در مخازن کربناته در خصوص مقادیر سیمان‌شدگی مطرح ساخته‌اند. آنها برای سنگ‌های آهکی و دولومیت‌های دانه‌ای با تخلخل بین‌دانه‌ای و دولومیت‌ها با تخلخل بین‌بلوری و سنگ با تخلخل فقط خمیره در محدوده تخلخل ۵٪ تا ۳۵٪ مقدار ضریب سیمان‌شدگی را ۲ به دست آوردند، در حالی که برای تخلخل‌های کمتر از



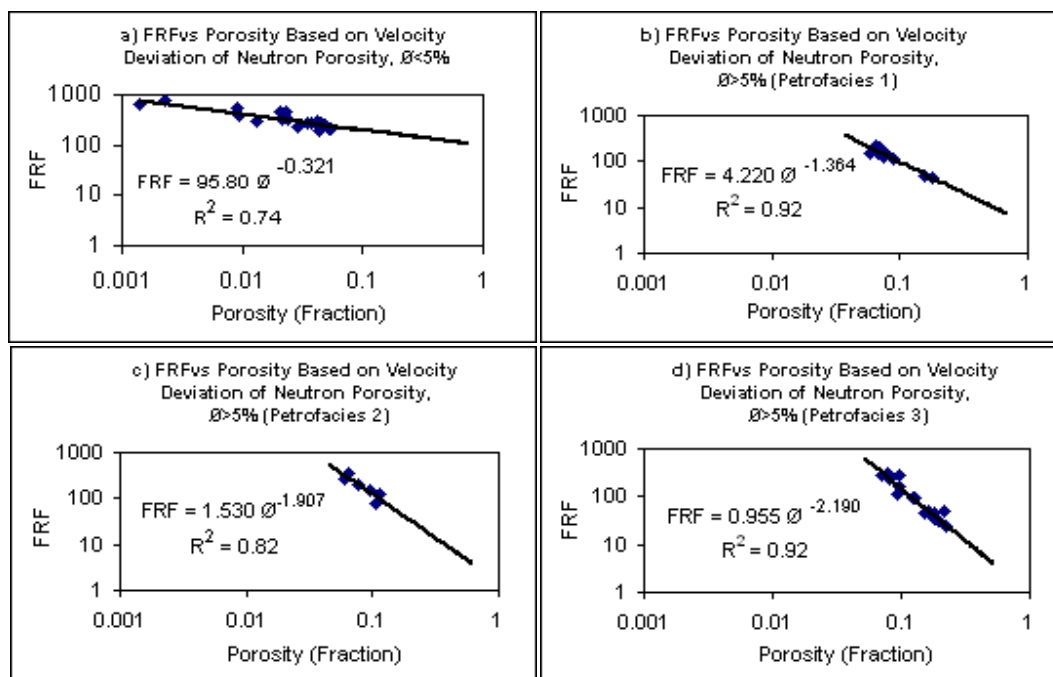
شکل ۷. ارتباط ضریب مقاومت ویژه سازندی و تخلخل برای انواع بافت‌های گوناگون (a) دولستون (b) پکستون (c) دولوپکستون (d) دولوکستون (e) دولومادستون.



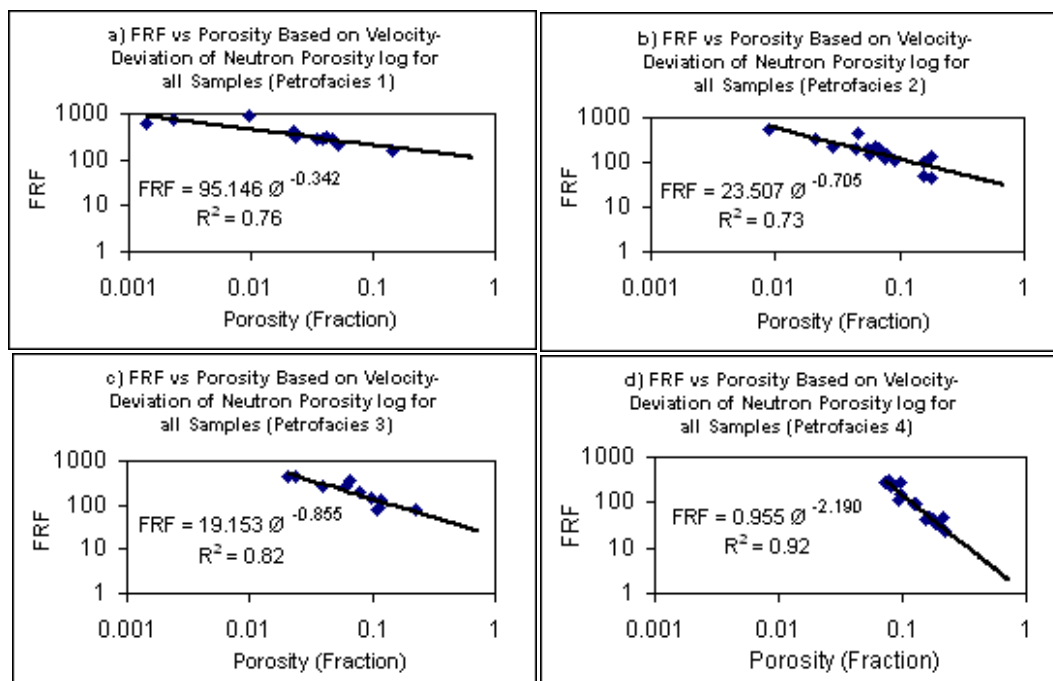
شکل ۸. ارتباط ضریب مقاومت ویژه سازندی و تخلخل برای انواع تخلخل‌های گوناگون (a) حفره‌ای و بین‌بلوری (b) قالبی (c) بین‌بلوری (d) حفره‌ای و قالبی (e) شکاف‌دار.



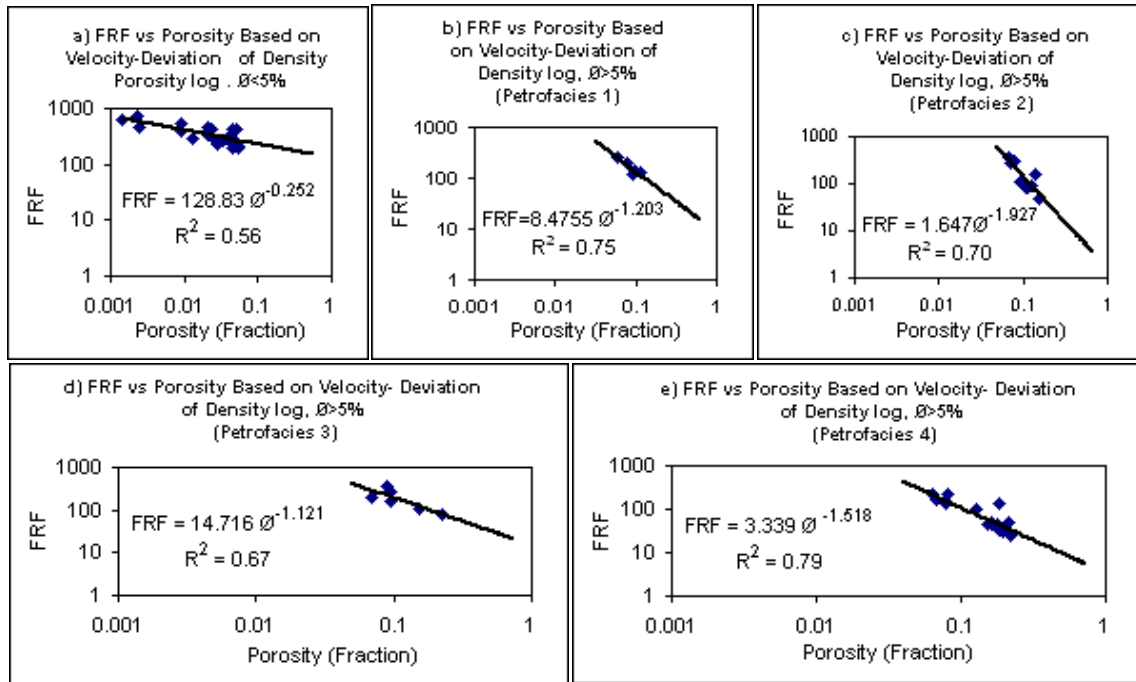
شکل ۹. ارتباط ضریب مقاومت ویژه سازندی و تخلخل برای انواع پتروفاسیس ها (a) بافت دولومادستون با تخلخل غالب حفره ای (b) بافت پکستون با تخلخل های غالب حفره ای، قالبی و بین بلوری (c) بافت دولستون با تخلخل های غالب بین بلوری و حفره ای (d) بافت دولستون با تخلخل های غالب حفره ای و بین بلوری (e) بافت پکستون با تخلخل غالب شکاف دار (f) بافت پکستون با تخلخل های غالب قالبی و حفره ای.



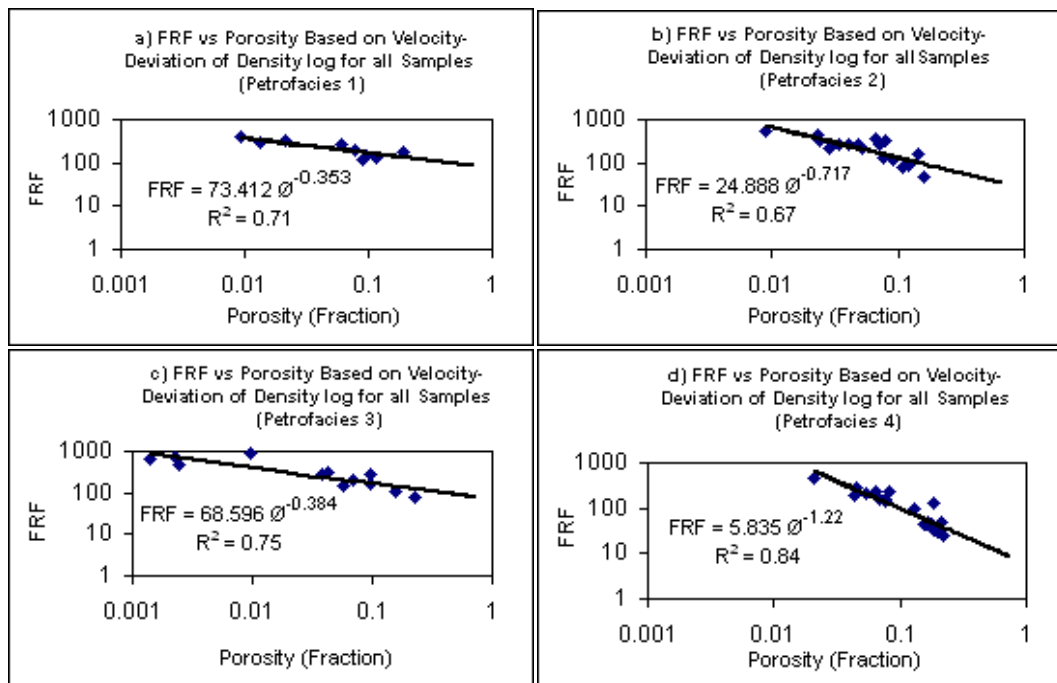
شکل ۱۰. ارتباط ضریب مقاومت ویژه سازندی و تخلخل براساس نگار انحراف سرعت حاصل از تخلخل نگار نوترون با جداسازی تخلخل‌های کمتر از ۵٪ (a) نمونه‌ها با تخلخل کمتر از ۵٪ (b) پتروفاسیس اول (c) پتروفاسیس دوم (d) پتروفاسیس سوم.



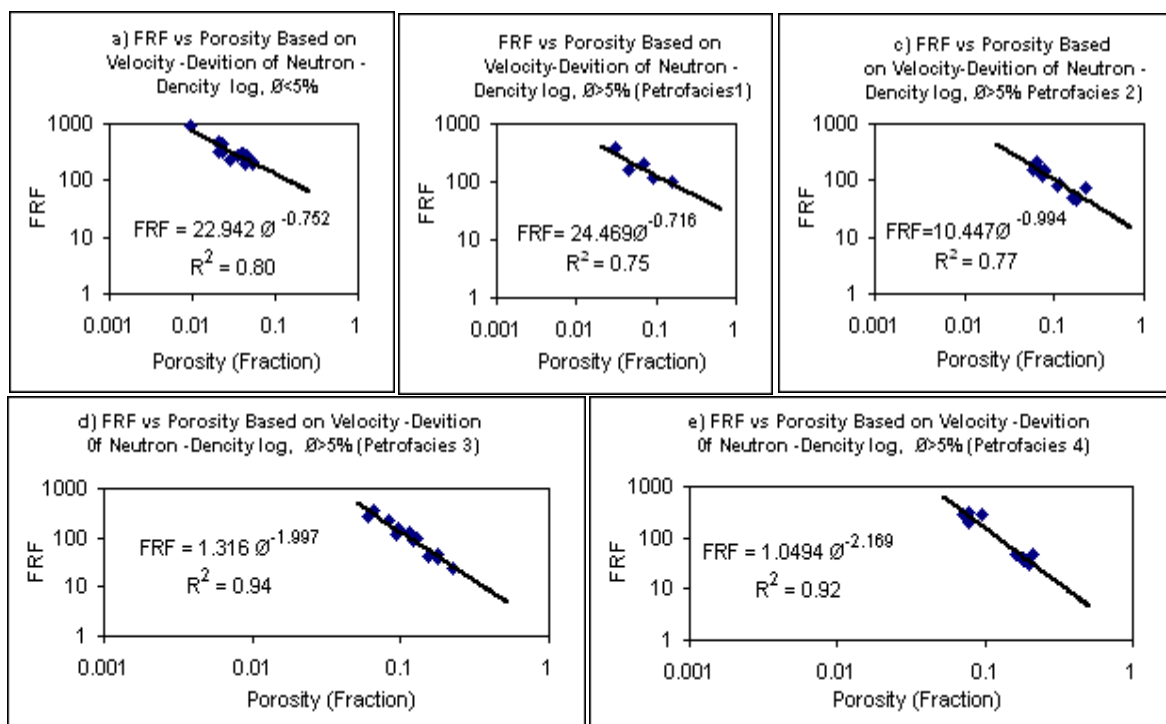
شکل ۱۱. ارتباط ضریب مقاومت ویژه سازندی و تخلخل، براساس نگار انحراف سرعت حاصل از تخلخل نگار نوترون برای همه نمونه‌ها (a) پتروفاسیس اول (b) پتروفاسیس دوم (c) پتروفاسیس سوم (d) پتروفاسیس چهارم.



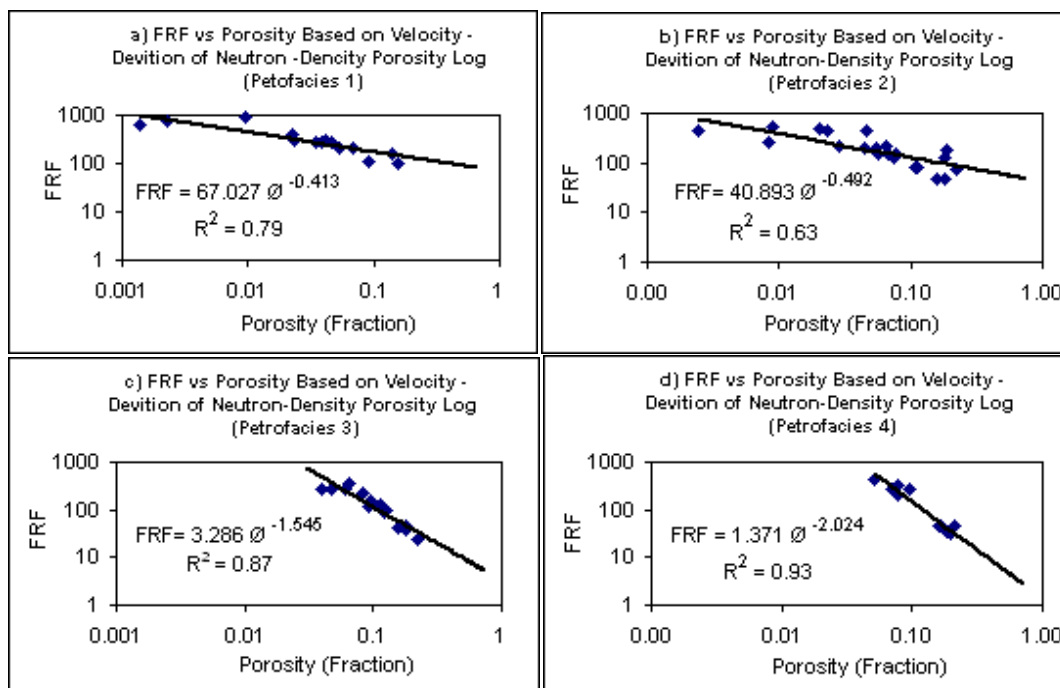
شکل ۱۲. ارتباط ضریب مقاومت ویژه سازندی و تخلخل براساس نگار انحراف سرعت حاصل از تخلخل نگار چگالی با جداسازی تخلخل‌های کمتر از ۵٪ (a) نمونه‌ها با تخلخل کمتر از ۵٪ (b) پتروفاسیس اول (c) پتروفاسیس دوم (d) پتروفاسیس سوم (e) پتروفاسیس چهارم.



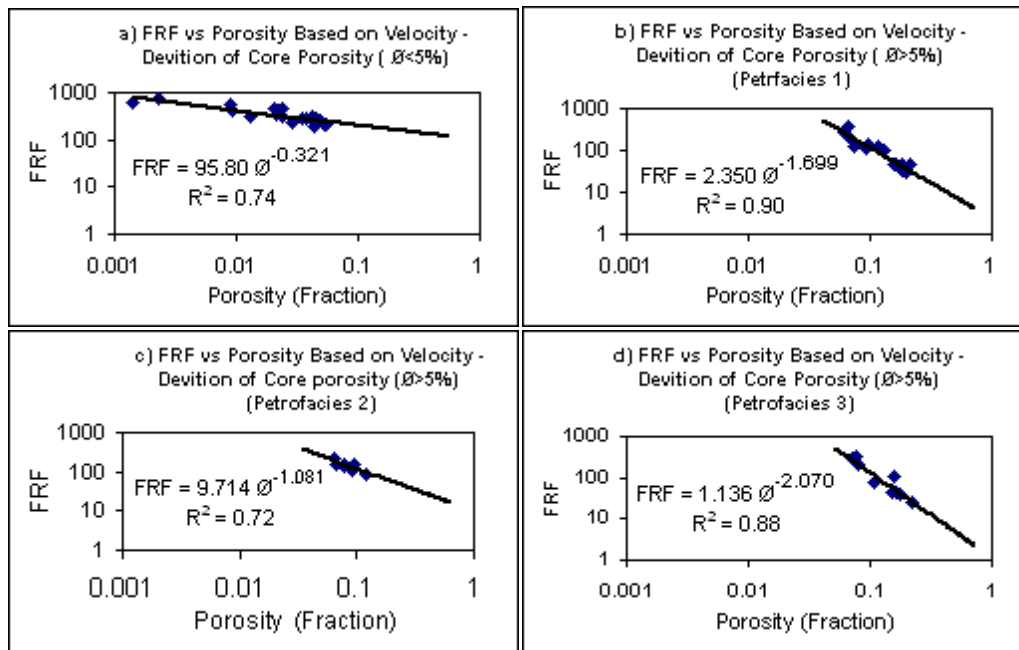
شکل ۱۳. ارتباط ضریب مقاومت ویژه سازندی و تخلخل، براساس نگار انحراف سرعت حاصل از تخلخل نگار چگالی برای همه نمونه‌ها (a) پتروفاسیس اول (b) پتروفاسیس دوم (c) پتروفاسیس سوم (d) پتروفاسیس چهارم.



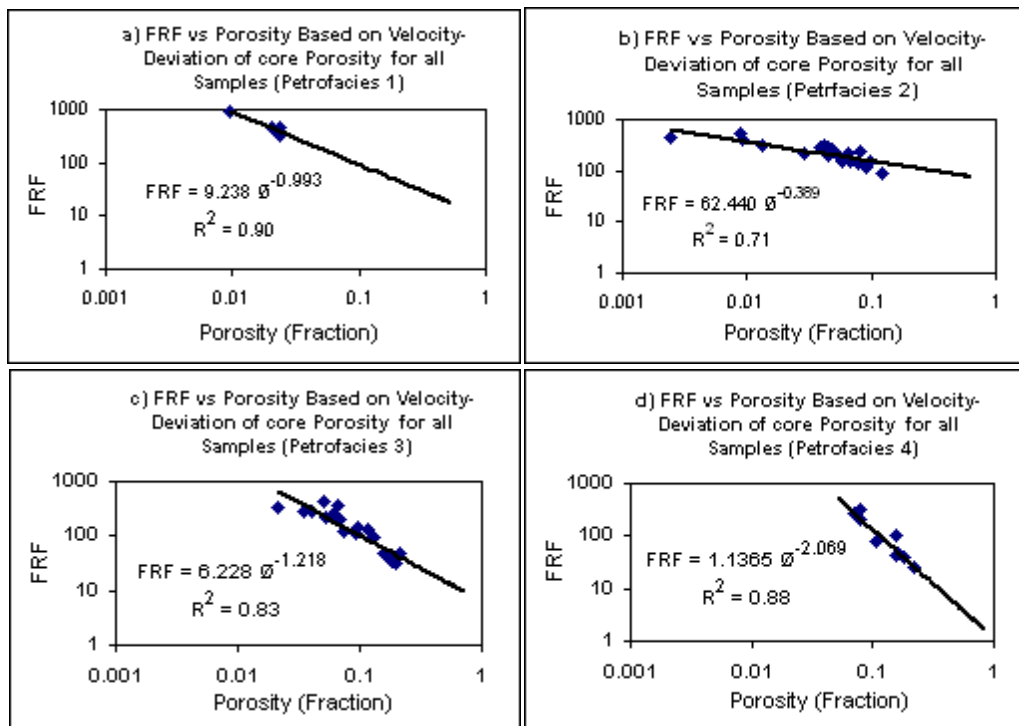
شکل ۱۴. ارتباط ضریب مقاومت ویژه سازندی و تخلخل براساس نگار انحراف سرعت حاصل از تخلخل نگارهای نوترون- چگالی با جداسازی تخلخل‌های کمتر از ۵٪ (a) نمونه‌ها با تخلخل کمتر از ۵٪ (b) پتروفاسیس اول (c) پتروفاسیس دوم (d) پتروفاسیس سوم (e) پتروفاسیس چهارم.



شکل ۱۵. ارتباط ضریب مقاومت ویژه سازندی و تخلخل، براساس نگار انحراف سرعت حاصل از تخلخل نگارهای نوترون- چگالی برای همه نمونه‌ها (a) پتروفاسیس اول (b) پتروفاسیس دوم (c) پتروفاسیس سوم (d) پتروفاسیس چهارم.



شکل ۱۶. ارتباط ضریب مقاومت ویژه سازندی و تخلخل براساس نگار انحراف سرعت حاصل از تخلخل مغزه با جداسازی تخلخل‌های کمتر از ۵٪ (a) نمونه‌ها با تخلخل کمتر از ۵٪ (b) پتروفاسیس اول (c) پتروفاسیس دوم (d) پتروفاسیس سوم.



شکل ۱۷. ارتباط ضریب مقاومت ویژه سازندی و تخلخل براساس نگار انحراف سرعت حاصل از تخلخل مغزه برای همه نمونه‌ها (a) پتروفاسیس اول (b) پتروفاسیس دوم (c) پتروفاسیس سوم (d) پتروفاسیس چهارم.

- K. J. Marfurt, eds., Carbonate Seismology: SEG Geophysical Developments Series, No. 6, 75-92.
- Salem, H. S., 2001, Relationships among formation resistivity factor, compressional wave velocity, and porosity for reservoirs saturated with multiphase fluids, Energy Source, **23**, 675-685.
- Salem, H. S., and Chilingarian, G. V., 1999, The cementation factor of Archie's equation for shaly sandstone reservoirs, J. Petrol. Sci. Eng. **23**, 83-93.
- Schlumberger, Inc. Log Interpretation-Principle. Schlumberger Educational Services, Houston, 1972.
- Sheng, P., 1991, Consistent modeling of the electrical and elastic properties of sedimentary rocks: Geophysics, **56**, 1236-1243.
- Sweeney, S. A., and Jennings, H. V., 1960, The electrical resistivity of preferentially water-wet and preferentially oil-wet carbonate rocks, Prod. Mon., **24**, 29-32.
- Watt, J. P., Davies, G. F., and O'Connell, R. J., 1976, The elastic properties of composite materials: Rev. Geophys. Sp., Phys., **14**, 541-563.
- Winsauer, W. O., Shearin, H. M., Masson, P. H., and Williams, M., 1952, Resistivity of brine-saturated sands in relations to pore-geometry: AAPG Bull. **36**, 253-277.
- 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 p. 20-28.
- Wyllie, M. R. J., Gregory, G. R., 1953, Formation factor of unconsolidated porous media: Influence of particle shape and effect of cementation: Petrol. Trans. AIME, **198**, 103-110.
- Wyllie, M. R. J., Gregory, R., and Gardner, G. H. F., 1956, Elastic Wave velocities in heterogeneous and porous media: Geophysics, **21**, 41-70.
- Wyllie, M. R. J., and Rose, W. D., 1950, Some theoretical considerations related to the quantities evaluation of the physical characteristics of reservoir rock from electrical log data, Trans. AIME., **189**, 105-118.
- Anselmetti, F. S., and Eberli, G. P., 1993, Controls on sonic velocity in carbonate rocks. In: Liebermann, R.C. (Ed.), PAGEOH: Pure Appl. Geophys., **141**, 287-323.
- Anselmetti, F. S., and Eberli, G. P., 1999, The velocity-deviation log: A tool to predict pore type and permeability trends in carbonate drill holes from sonic and porosity or density logs, AAPG Bull., **83**, 450-466.
- Archie, G. E., 1942, The electrical resistivity logs an aid in determining some reservoir characteristics. Petrol. Techno., **5**, 32-37.
- Arps, J. J., 1953, The effect of temperature on the density and electrical resistivity of sodium chloride solutions, J. Petrol. Echnol. Tech. Note., **195**, 17-20.
- Brie, A., Johnson, D. L., and Nurmi, R. D., 1985, Effect of spherical pores on sonic and resistivity measurements: Society of Professional Well Log Analysts Twenty-Sixth Annual Logging Symposium Abstract, p. 17.
- Eberli, G. P., Anselmetti, F. S., and Incze, M. L., 2003, Factors controlling elastic properties in carbonate sediments and rocks, The Leading Edge, p. 654-660.
- Eshelby, J. D., 1957, The determination of the elastic field of an ellipsoidal inclusion and related problems: Proc. Roy. Soc. London, Ser. A, **241**, 376-396.
- Focke, J. W., and Munn, D., 1987, Cementation exponents in Middle Eastern carbonate reservoirs. SPE-13735: SPE Form. Eval., **2**, 155-167.
- Hill, R., 1965, A self-consistent mechanics of composite materials: J. Mech. Phys. Solids, **13**, 213-222.
- Kamel, M. H., and Mabrouk, W. M., 2002, An equation for estimating water saturation in clean formations utilizing resistivity and sonic logs: Theory and application, J. Petrol. Sci. Eng. **36**, 159-168.
- Kenter, J. A. M., and Ivanov, M., 1995, Parameters controlling acoustic properties of carbonate and volcanoclastic sediment sat site 866 and 869, in J. Witerer et al., eds, Proceedings of the Ocean Drilling Program: Scientific Results, **143**, 287-303.
- Kuster, G., and Toksöz, N., 1974, Velocity and attenuation of seismic waves in two-phase media 1, Theoretical formulations: Geophys., **39**, 587-606.
- Marion, D., and Jizba, D., 1996, Sonic velocity in carbonate sediments and rocks, In I. Palaz and