

نقش تخلخل‌های غیر مرتبط در تعیین ضریب سیمان‌شدگی و تاثیر فشار همه‌جانبه موثر بر آن دریکی از مخازن کربناته ناهمگن ایران

حسام الوکی بختیاری*، عزت‌اله کاظم‌زاده، جعفر ولی، محمدرضا اصفهانی

پژوهشگاه صنعت نفت، تهران، ایران

*مسئول مکاتبات-آدرس الکترونیکی: bakhtiarh@ripi.ir

(دریافت: ۸۸/۴/۱۷؛ پذیرش: ۸۸/۹/۲۳)

چکیده

ضریب سیمان‌شدگی (m) مهمترین پارامتر در مدل‌های محاسباتی تعیین اشباع سیالات می‌باشد و خطای جزئی در ارزیابی آن تاثیر بسزائی در تخمین اشباع آب و ذخیره هیدروکربن در جا دارد. در سنگ‌های نامتجانس کربناته مقدار m بسته به نوع ناهمگونی می‌تواند از حدود ۱ در سنگ کربناته شکافدار تا حدود ۵ در سنگ کربناته با تخلخل‌های حفره‌ای و قالبی غیر مرتبط متغیر باشد. در بسیاری از موارد با اندازه‌گیری دقیق تخلخل و مقاومت الکتریکی مغزه‌های یک میدان هیدروکربوری می‌توان مدل تجربی برای تعیین m ارائه نمود. در این مطالعه به منظور ارزیابی پارامتر m در یکی از مخازن کربناته ناهمگون در جنوب ایران، ابتدا تخلخل، تراوانی و توزیع اندازه منافذ نمونه‌های مغزه ۳ حلقه چاه تعیین شد و با استفاده از این اطلاعات و مطالعه زمین‌شناسی مقاطع نازک میکروسکوپی، طبقه‌بندی سنگ مخزن انجام شد. سپس برای آزمایشات اندازه‌گیری مقاومت الکتریکی، نمونه‌های استوانه‌ای مغزه (پلاگ) به گونه‌ای انتخاب شدند که محدوده تخلخل مشاهده شده در هر گروه سنگی را پوشش دهند. به منظور بررسی اثر فشار بر ضریب سیمان‌شدگی، آزمایشات مقاومت الکتریکی علاوه بر شرایط فشار محیط در ۴ فشار همه‌جانبه موثر متفاوت انجام شد. نتایج نشان داد که در این مخزن می‌توان از ضریب سیمان‌شدگی ثابت ۲/۰۸۶ برای دولوستون با تخلخل بین‌دانه‌ای و بین‌کریستالی در شرایط فشار محیط استفاده نمود که این عدد به ۲/۱۴۸ در فشار هیدروستاتیک همه‌جانبه موثر ۴۰۰۰ پوند بر اینچ مربع افزایش می‌یابد. با تلفیق اطلاعات مربوط به سایر گروه‌های سنگ آهک با تخلخل غالب حفره‌ای و قالبی غیر مرتبط مدلی تجربی برای تعیین ضریب سیمان‌شدگی ارائه گردید که بیانگر افزایش ضریب سیمان‌شدگی بر اثر افزایش تخلخل است. در این گونه از سنگ‌های آهکی تاثیر افزایش فشار همه‌جانبه موثر بر ضریب سیمان‌شدگی بیشتر و بارزتر از دولوستن‌ها می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: ضریب سیمان‌شدگی، تخلخل‌های حفره‌ای غیر مرتبط، فاکتور مقاومت سازند، ناهمگون، توزیع اندازه فضای متخلخل.

مقدمه

نفتی مقادیر $m=1/73$ و $a=1/13$ را به دست آوردند. مطالعات محققین نشان داد که با استفاده از رابطه Archie می‌توان مقادیر m را به صورت مدل‌های تجربی از پارامترهای معلوم دیگر (اغلب تخلخل) و از نمودارهای پتروفیزیکی محاسبه نمود (Rasmus 1983; Sethi 1979; Neustaedter 1968; Borai 1987). این روابط برای استفاده در رخساره‌های گوناگون کربناته معمولاً با شکست مواجه می‌شوند. برای مثال در تخلخل‌های مشابه، مقدار m در سنگ‌های کربناته با تخلخل حفره‌ای بسیار متفاوت با مقدار آن در سنگ کربناته با تخلخل کریستالین است. Lucia (1983) نشان داد که مقدار m با افزایش نسبت تخلخل‌های غیر مرتبط به تخلخل کل افزایش می‌یابد. این نسبت تخلخل‌ها را می‌توان یا از نگارهای نوترون، دانسیته و صوتی محاسبه کرد و یا از نتایج اندازه‌گیری‌های آنالیز مغزه و مطالعات مقاطع نازک تخمین زد. Focke و Munn (1987) سنگ‌های کربناته را بر مبنای

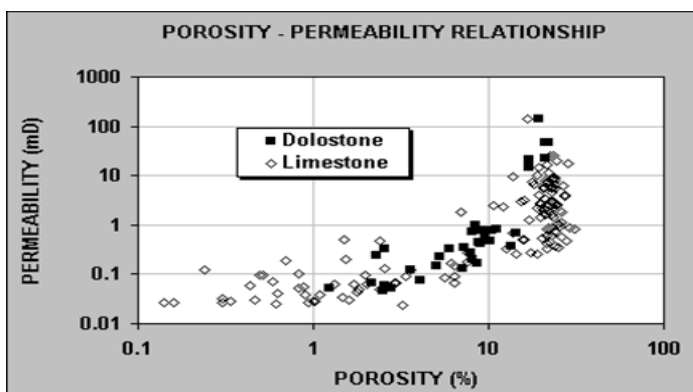
تخمین دقیق میزان آب (Sw) و ذخیره هیدروکربن درجا یکی از مهمترین چالش‌ها در ارزیابی سازندهای هیدروکربوری می‌باشد و عدم قطعیت‌ها را در پیش‌بینی‌های اقتصادی و توسعه میادین نفت و گاز کاهش می‌دهد. دسترسی به مقادیر صحیح Sw وابسته به ارزیابی دقیق ضرایب آرچی m ، a و n می‌باشد. در این میان m مهمترین عاملی است که اشباع‌شدگی نسبت به آن حساسیت نشان می‌دهد و به همین دلیل همواره اندازه‌گیری و تخمین صحیح آن یکی از مسائل اصلی در ارزیابی‌های پتروفیزیکی می‌باشد (Hossieni-nia & Rezaee 2002). ضریب سیمان‌شدگی اولین بار توسط Archie در سال 1942 تعریف شد. او نشان داد که مقدار m در ماسه‌سنگ با سیمان ضعیف ۱/۳ و در ماسه سنگ با سیمان‌شدگی خوب ۱/۸ تا ۲ می‌باشد. Timur و همکاران (1972) برای تعداد ۱۸۰۰ نمونه ماسه‌سنگ از ۱۵ میدان

نتایج آزمایشات مغزه شامل تخلخل، تراوایی و توزیع اندازه منافذ و همچنین مطالعه میکروسکوپی مقاطع نازک زمین‌شناسی استفاده شده است. سپس به منظور انجام آزمایشات هدایت الکتریکی و تعیین فاکتور مقاومت سازند در هر گروه سنگی، تعدادی نمونه به گونه‌ای انتخاب شدند تا محدوده تخلخل در آن گروه سنگی را شامل شوند. برای ارزیابی ضریب سیمان‌شدگی در سنگ‌های دولومیتی با تخلخل غالب بین کریستالی از روش متداول نمودار لگاریتمی $\Phi - FRF$ استفاده شده است و در سنگ‌های آهکی با تخلخل غالب قالبی و حفره‌ای غیر مرتبط و یا مرتبط ضعیف، با استفاده از رابطه آرچی ابتدا مقدار m برای هر نمونه محاسبه شد و سپس با توجه به ارتباط مستقیم بین افزایش مقادیر m با افزایش تخلخل مغزه، از نمودار $\Phi - m$ برای ارائه مدل تجربی استفاده شده است.

روش انجام کار

الف) انتخاب نمونه و تعیین خواص پتروفیزیکی

در این مطالعه ۱۷۲ نمونه استوانه‌ای (پلاگ) با قطر ۱/۵ اینچ از ۱۰ متر مغزه مربوط به ۳ حلقه چاه یکی از میدین کربناته ناهمگن گازی جنوب ایران تهیه شد. پس از طی مراحل آماده‌سازی نمونه‌ها که شامل پلاگ‌گیری، شستشو توسط حلال آلی (تولوئن) و خشک نمودن آن‌ها می‌باشد خواص معمولی مغزه شامل تخلخل هلیم، دانسیته دانه‌ای و تراوایی نسبت به هوا اندازه‌گیری شد. برای تعیین تخلخل و دانسیته دانه‌ای از دستگاه Ultrapermeameter استفاده شده است. شکل ۱ نمودار تخلخل - تراوایی را برای نمونه‌های پلاگ به تفکیک دولومیت و سنگ آهک نشان می‌دهد. همان‌گونه که در سازندهای کربناته ناهمگن قابل پیش‌بینی است ارتباط مناسبی بین تخلخل و تراوایی وجود نداشته و همین مسئله ضرورت تقسیم بندی سنگ مخزن کربناته را بر مبنای نوع رخساره و توزیع نوع و اندازه منافذ ایجاب می‌کند.



شکل ۱: نمودار تخلخل و تراوایی برای نمونه‌های کربناته که به دلیل وجود بافت ناهمگن سنگ رابطه مشخصی وجود ندارد.

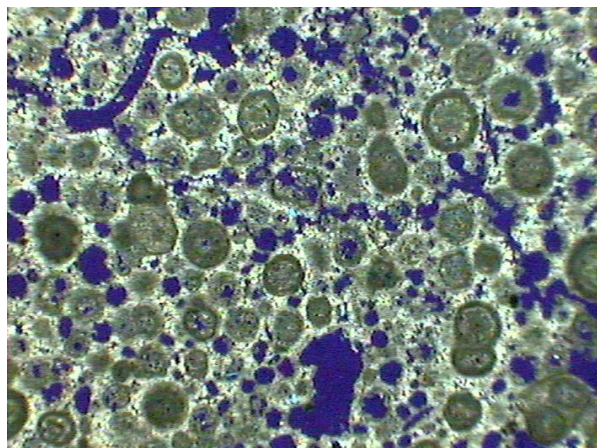
بافت فضای متخلخل به شش گروه تقسیم بندی کرده و با اندازه‌گیری تخلخل و فاکتور مقاومت سازند وبا استفاده از رابطه Archie، روند تغییرات m را نسبت به تخلخل بدست آوردند. آنها نشان دادند که مقدار m در سنگ‌های کربناته با تخلخل حفره‌ای غیر مرتبط تا ۵/۵ افزایش می‌یابد و تاثیر افزایش فشار موثر طبقات فوقانی بر مقادیر m در اینگونه از سنگ کربناته بیش از سنگ‌های کربناته با تخلخل‌های دیگر است. در سال ۲۰۰۷ کاظم‌زاده و همکاران با استفاده از نگاره‌های انحراف سرعت لرزه‌ای مقادیر m را مورد ارزیابی قرار دادند. همچنین رضائی و همکاران (۲۰۰۷) از واحدهای جریان الکتریکی برای تعیین m استفاده نمودند.

روش متداول برای تعیین ضریب سیمان‌شدگی استفاده از رابطه $a = FRF = Ro/Rw = \Phi^m$ در نمودار لگاریتمی تخلخل (Φ) - ضریب مقاومت سازند (FRF) است که در آن شیب منفی بهترین خط برازش شده به نقاط داده ضریب سیمان‌شدگی، m و تقاطع آن با خط تخلخل ۱۰۰ درصد ثابت پیچاپیچی، a می‌باشند. ضریب همبستگی خط برازش شده در سنگ‌های کربناته با تخلخل بین دانه‌ای و بین کریستالی عموماً زیاد بوده و بیانگر مقادیر ثابت m برای این گونه از سنگ است. نتایج بررسی‌های انجام شده در آزمایشات مغزه نشان می‌دهد که با فرض $a = 1$ مقدار m در سنگ‌های کربناته با تخلخل غالب بین کریستالی برابر ۲ می‌باشد. در سنگ‌های کربناته ناهمگن که شکل منافذ و گلوگاه‌ها در آنها بواسطه فرایندهای دیانزنی پیچیدگی بیشتری دارند، رابطه مقاومت الکتریکی با تخلخل نامتجانس بوده و پراکندگی در نقاط داده در نمودار لگاریتمی تخلخل - فاکتور مقاومت الکتریکی سازند ظاهر می‌شود. این مسئله ضریب همبستگی بهترین خط برازش شده را کاهش می‌دهد و مقادیر m و a بدست آمده را غیر قابل اعتماد می‌سازد. در چنین شرایطی بکارگیری مقادیر ثابت m برای سنگ کربناته تخمین اشباع سیالات در ارزیابی‌ها را با مشکل جدی مواجه می‌سازد. وجود تخلخل‌های قالبی و حفره‌ای غیر مرتبط در سنگ سبب می‌شود که مقاومت الکتریکی سنگ افزایش یافته و در نتیجه مقدار m در اینگونه از سنگ‌ها در مقایسه با سنگی که مقدار تخلخل مشابه و از نوع بین کریستالی داشته باشد، افزایش می‌یابد، در صورتیکه افزایش شکستگی و تخلخل‌های قالبی و حفره‌ای مرتبط با تسهیل در مسیر عبور جریان الکتریکی در سنگ، باعث کاهش مقاومت الکتریکی و ضریب سیمان‌شدگی می‌شوند.

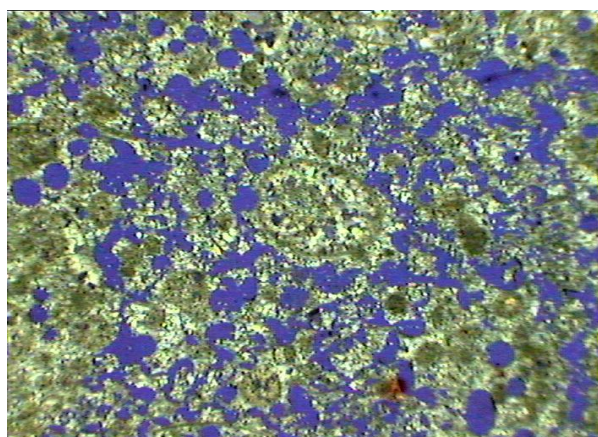
در این مطالعه نشان داده می‌شود که چگونه نوع تخلخل‌های غالب در سنگ کربناته بر ارزیابی ضریب سیمان‌شدگی یک مخزن هیدروکربنی تاثیر گذار می‌باشد. برای این منظور نمونه‌های مغزه مربوط به ۳ حلقه چاه یکی از مخازن گازی جنوب ایران بر مبنای تقسیم بندی Lucia (1999) گروه‌بندی شدند که در این طبقه‌بندی از

ب) تعیین سنگ‌شناسی نمونه‌های منتخب

همانگونه که در هنگام پلاگ‌گیری متداول است از انتهای نمونه‌های پلاگ، برشی از سنگ جهت تهیه مقاطع نازک میکروسکوپی گرفته شد. به منظور وضوح بهتر منافذ خالی رزین اپوکسی آبی به نمونه‌ها تزریق شد و جهت تشخیص رخساره دولومیت از آهک تمامی مقاطع نازک با ماده آلیزارین قرمز رنگ آمیزی شدند. نمونه‌ها بر مبنای طبقه‌بندی دانه‌ها از نظر نوع بافت و بر مبنای طبقه‌بندی لوسیا از نظر سیستم منافذ گروه‌بندی شدند. بر این اساس ۱۳۸ نمونه سنگ آهک و ۳۴ نمونه از جنس دولوستون می‌باشند. بیش از ۶۰ درصد از نمونه‌های آهکی عمدتاً گرینستون می‌باشند که جنس دانه در آن‌ها عمدتاً اجزای فسیلی و اووئید می‌باشند و مابقی سنگ آهک کریستالین با بافت متراکم و مادستون آرژیلیتی می‌باشند. نوع تخلخل غالب در گرینستون‌ها از نوع قالبی (شکل ۲)، قالب فسیلی (شکل ۳) و حفره‌ای غیر مرتبط، با ارتباط ضعیف (شکل ۴) و ندرتاً ارتباط خوب (شکل ۵) مشاهده شده‌اند.



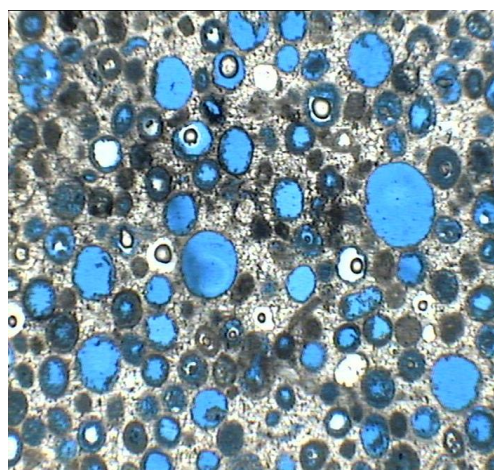
شکل ۴: گرینستون با تخلخل قالبی و حفره‌ای با ارتباط ضعیف.



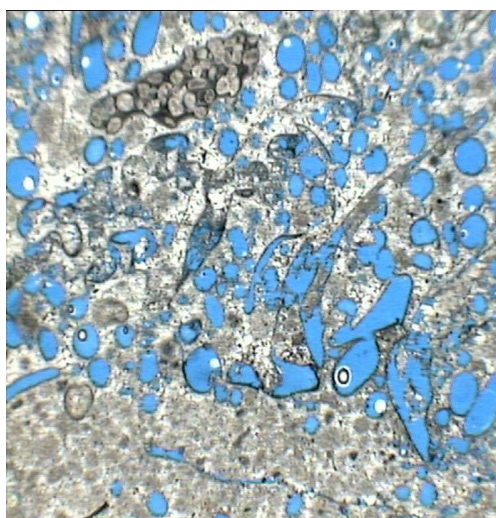
شکل ۵: گرینستون با تخلخل قالبی و حفره‌ای با ارتباط خوب.

شکل ۶ نمودار تخلخل - تراوایی را برای نمونه‌های آهکی نمایش می‌دهد. حضور تخلخل‌های قالبی عمدتاً غیر مرتبط سبب جابجایی داده‌ها به سمت راست منطقه گرینستون‌ها با تخلخل غالب بین دانه‌ای شده است و هرچه بر میزان تخلخل‌های غیر مرتبط افزوده شود این جابجایی بیشتر خواهد بود. در این نمودار سنگ آهک در سه گروه سنگی شامل ۱- سنگ آهک کریستالین و مادستون با تخلخل کمتر از ۱۰ درصد و تراوایی کمتر از ۱ میلی داری، ۲- گرینستون با تخلخل‌های قالبی و حفره‌ای مجزا با تخلخل بالای ۱۰ درصد و تراوایی کمتر از ۱ میلی داری و ۳- گرینستون با تخلخل‌های قالبی و حفره‌ای با ارتباط ضعیف تا ندرتاً خوب و با تخلخل بیش از ۱۰ درصد و تراوایی بیش از ۱ میلی داری نمایش داده شده‌اند.

نمونه‌های دولوستون عمدتاً از جنس دولوکستون (شکل ۷) تا دولوپکستون (شکل ۸) با زمینه غالب گلی با اندازه دانه ریز کوچکتر از ۲۰ میکرون می‌باشند و ندرتاً دولوگرینستون (شکل ۹) تا دولوپکستون با زمینه غالب دانه‌ای با اندازه دانه ریز تا متوسط با ابعاد ۲۰-۱۰۰ میکرون می‌باشند. سیستم تخلخل در دولوستون‌ها از نوع بین دانه‌ای و بین کریستالی است (شکل ۱۰). شکل ۱۱ وضعیت نمونه‌های دولومیتی

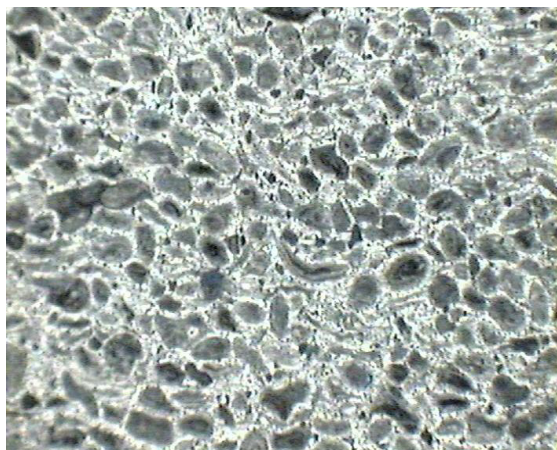


شکل ۲: گرینستون با تخلخل قالبی.

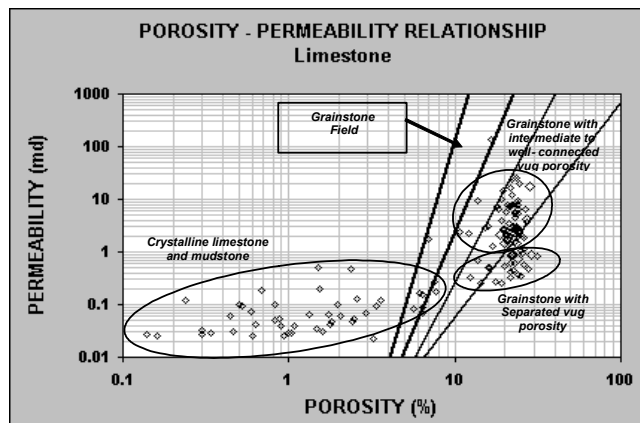


شکل ۳: گرینستون با تخلخل قالب فسیلی.

را در نمودار تخلخل - تراوایی نمایش می‌دهد که در آن دولوستون‌ها به دو گروه فوق تقسیم بندی شده‌اند.



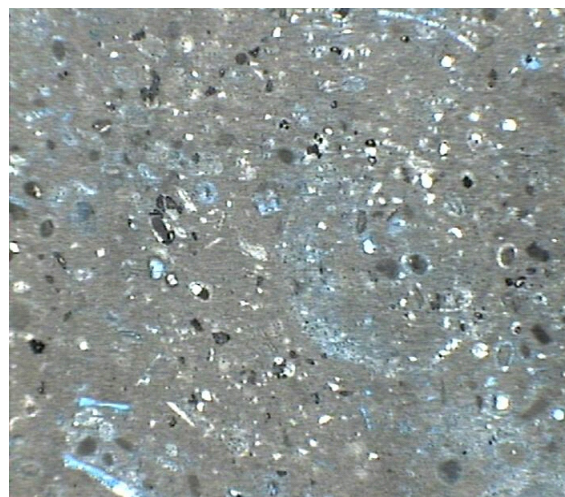
شکل ۹: دولوگرینستون با زمینه غالب دانه‌ای.



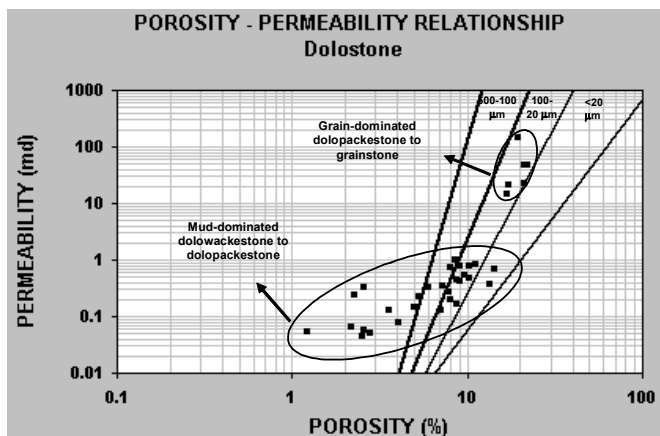
شکل ۶: نمودار تخلخل - تراوایی برای نمونه‌های سنگ آهک و گروه‌بندی آن به سه گروه سنگی با بافت متفاوت بر مبنای طبقه‌بندی لوسیا.



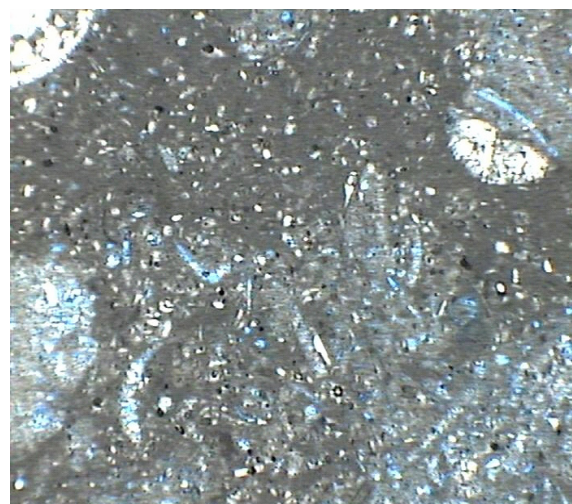
شکل ۱۰: دولوستون با تخلخل بین دانه‌ای.



شکل ۷: دولووکستون با زمینه غالب گلی.



شکل ۱۱: نمودار تخلخل - تراوایی برای نمونه‌های دولوستون و گروه‌بندی آن به دو گروه سنگی با بافت متفاوت بر مبنای طبقه‌بندی لوسیا.



شکل ۸: دولوپکستون با زمینه غالب گلی.

ج) توزیع اندازه منافذ و منحنی‌های فشار موئینگی

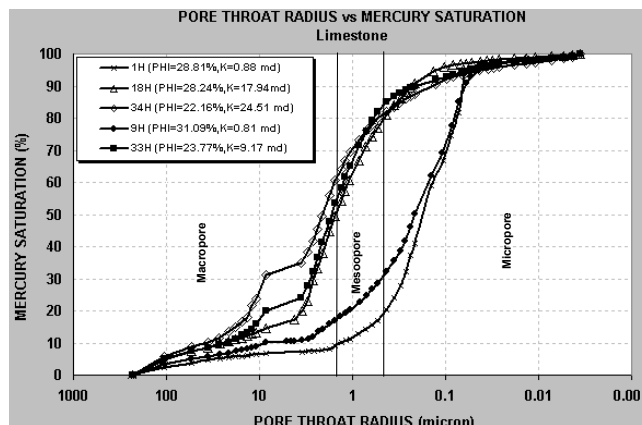
به منظور بررسی سیستم تخلخل از نظر توزیع اندازه گلوگاه‌ها و منافذ مرتبط به آن‌ها، از روش تزریق جیوه به تکه‌هایی از نمونه‌های گروه‌های سنگی مختلف استفاده شد. شکل ۱۲ منحنی توزیع اندازه منافذ و شکل ۱۳ منحنی فشار موئینگی جیوه را برای ۵ نمونه گرینستون با

توزیع اندازه منافذ را در سنگ کنترل می‌کنند لذا این گونه از دولوستون‌ها با تخلخل بین دانه‌ای تراوایی خوبی را نشان می‌دهند. در نمونه‌های دولوستون ریز بلور، دلووکستون و دولوپیکستون با زمینه غالب گلی توزیع اندازه منافذ به شکل نسبتاً یکنواخت تا یکنواخت بوده و شامل منافذ با اندازه کمتر از ۱/۵ میکرون می‌باشند. تراوایی در این‌گونه از نمونه‌ها از حدود ۱ میلی داری بیشتر نمی‌باشد.

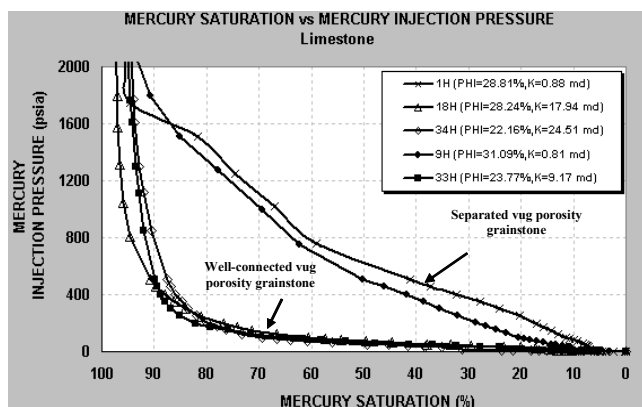
د) مقاومت الکتریکی و ضریب مقاومت الکتریکی سازند

به منظور تعیین مقاومت ویژه الکتریکی برای تعداد ۲۳ نمونه پلاگ سنگ آهک و ۹ نمونه پلاگ دولوستون، ابتدا هر نمونه با آب نمک با شوری ۲۰۰ هزار ppm کاملاً اشباع گردید و در داخل سیستم مغزه نگهدار هیدروستاتیک دستگاه Overburden Rig قرار گرفت. در این گونه از سیستم‌های مغزه نگه‌دار، فشار اعمال شده بر نمونه در تمام جهات با یکدیگر مساوی است. سپس بعد از اعمال فشار همه جانبه کم به نمونه (بسته به مقدار تراوایی)، توسط پمپ تزریق چند برابر حجم فضای متخلخل نمونه به آن آب نمک تزریق شد تا شرایط تعادل ایجاد گردید و در این مرحله مقدار مقاومت نمونه بر حسب اهم توسط

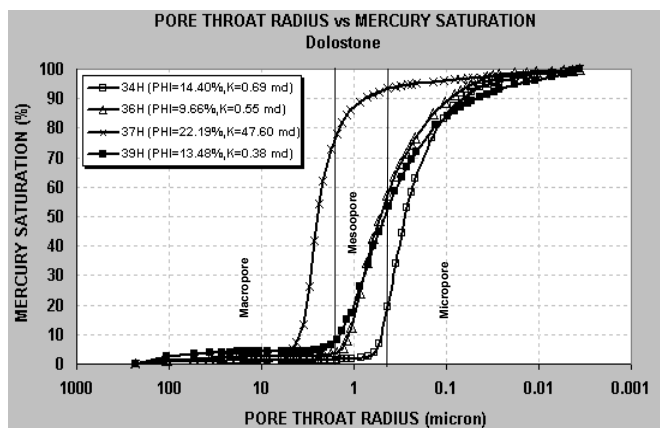
تخلخل‌های قالبی و حفره‌ای نشان می‌دهد.



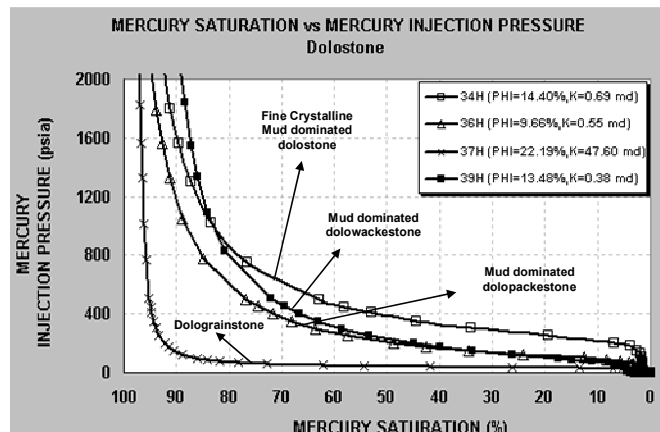
شکل ۱۲: نمودار توزیع اندازه منافذ در سنگ‌های آهکی با تخلخل‌های قالبی و حفره‌ای با استفاده از روش تزریق جیوه.



شکل ۱۳: نمودار فشار موئینگی جیوه در سنگ‌های آهکی با تخلخل‌های قالبی و حفره‌ای.



شکل ۱۴: نمودار توزیع اندازه منافذ در دولوستون با استفاده از روش تزریق جیوه.



شکل ۱۵: نمودار فشار موئینگی جیوه در دولوستون.

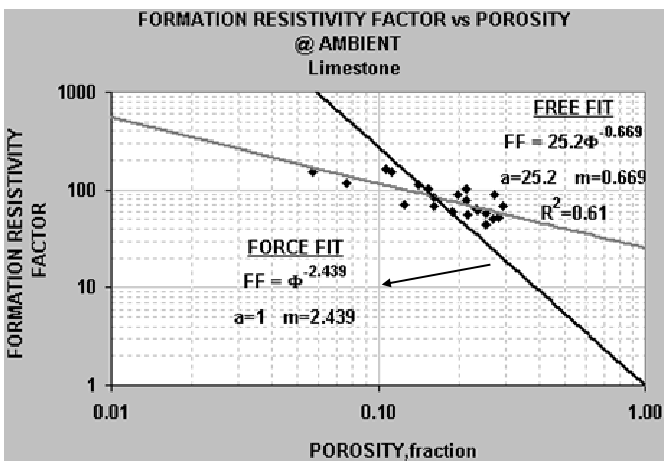
همانگونه که در این شکل‌ها مشاهده می‌شود حجم فضاهای خالی مرتبط به گلوگاه‌هایی که اندازه کمتر از ۰/۵ میکرون دارند در گرینستون‌ها با تخلخل قالبی غیر مرتبط بیشتر از گرینستون با تخلخل قالبی و حفره‌ای مرتبط می‌باشد. شکل منحنی‌های فشار موئینگی و توزیع اندازه خالی در گرینستون‌ها با تخلخل غیر مرتبط نشان دهنده سیستم‌های تخلخل غیر یکنواخت و دوگانه در سنگ است که علیرغم تخلخل بالا تراوایی کم را موجب می‌شوند. در گرینستون‌ها با تخلخل‌های مرتبط شکل منحنی‌ها، سیستم تخلخل نسبتاً همگن‌تر را نشان داده و به سمت سیستم تخلخل بین دانه‌ای متمایل می‌شوند.

شکل‌های ۱۴ و ۱۵ به ترتیب منحنی‌های توزیع منافذ و فشار موئینگی جیوه را برای ۴ نمونه از دولوستون نشان می‌دهند. همانگونه که مشاهده می‌شود توزیع سیستم تخلخل در نمونه دولوگرینستون کاملاً یکنواخت می‌باشد و تا ۸۰ درصد از فضای خالی سنگ شامل منافذ بزرگتر از ۱/۵ میکرون می‌باشند. از آنجائیکه دانه و اندازه آن

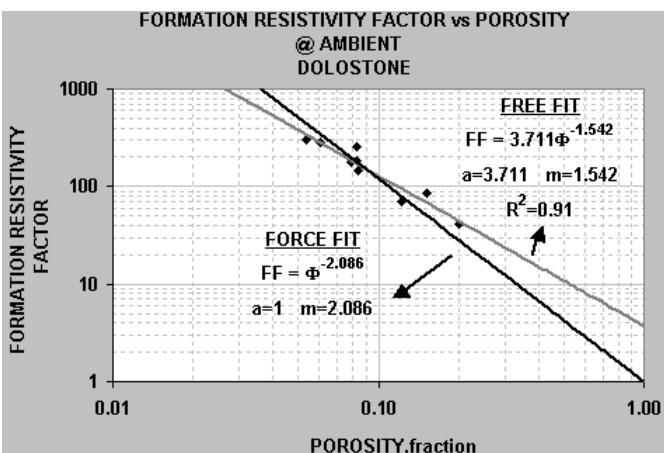
شکل ۱۸ نمایش داده شده است ارتباط مستقیم بین تخلخل و ضریب سیمان شدگی وجود دارد به گونه‌ای که با افزایش Φ بر میزان m افزوده می‌شود که این افزایش از حدود $1/75$ تا $3/5$ می‌باشد. بنابر این برای تعیین اشباع آب می‌توان از یک رابطه تجربی که m را به صورت تابعی از تخلخل نشان می‌دهد استفاده نمود. در سنگ آهک این مخزن کربناته با رخساره گریستون و با تخلخل غالب قالبی و حفره‌ای غیر مرتبط و مرتبط ضعیف تا ندرتا خوب این رابطه به صورت زیر می‌باشد.

$$m = 6/22\Phi + 1/44 \quad (R^2 = 0/89)$$

شکل‌های ۱۹ و ۲۰ و به ترتیب برای سنگ آهک و دولوستون نشان می‌دهند که ضریب سیمان شدگی با افزایش فشار همه جانبه موثر افزایش یافته است که میزان افزایش در سنگ آهک با تخلخل قالبی و حفره‌ای بیش از دولوستون با تخلخل بین‌دانه‌ای و بین کریستالی است. با استفاده از این دو منحنی می‌توان با تعیین فشار موثر طبقات فوقانی در هر زمان از عمر مخزن مقدار m را برآورد کرد.



شکل ۱۶: نمودار تخلخل - ضریب مقاومت الکتریکی سازند $FRF-\Phi$ برای نمونه‌های آهکی.



شکل ۱۷: نمودار $FRF-\Phi$ تخلخل - ضریب مقاومت الکتریکی سازند برای نمونه‌های دولوستون.

سیستم مقاومت سنج دستگاه HIOKI3522-LCR HI TESTER با پایان یافتن آزمایش در شرایط فشار اندازه‌گیری و ثبت گردید. با پایان یافتن آزمایش در شرایط فشار محیط و به منظور بررسی تاثیر افزایش فشار همه‌جانبه بر مقاومت الکتریکی سنگ مخزن، فشارهای همه جانبه به میزان ۱۰۰۰، ۲۰۰۰، ۳۰۰۰ و ۴۰۰۰ پوند بر اینچ مربع افزایش یافت و در هر مرحله فشاری با استفاده از اندازه‌گیری آب نمک خارج شده از نمونه میزان تراکم سنگ تعیین و مقاومت الکتریکی اندازه‌گیری شد.

با توجه به وابستگی هدایت الکتریکی به تغییرات دما، تصحیح دمایی برای مقاومت الکتریکی طبق رابطه زیر صورت گرفته است (Arps 1953, Worthington et al. 1990).

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

با استفاده از روابط زیر مقاومت ویژه الکتریکی نمونه و مقاومت ویژه آب سازندی تعیین شده‌اند (Schlumberger 1972).

$$R_o = R \frac{A}{L}$$

$$R_w = [(400000 / T_f) P_w]^{0.88}$$

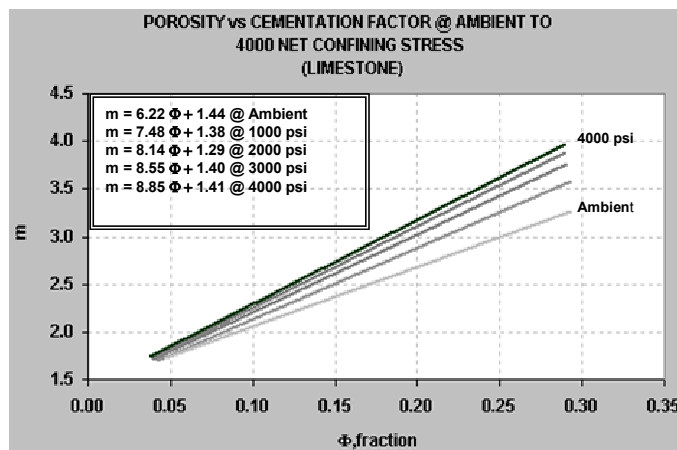
در روابط فوق A سطح مقطع و L طول نمونه، P_w شوری آب سازند بر حسب ppm و T_f دمای سازند بر حسب درجه فارنهایت می‌باشند. اندازه‌گیری‌ها با دقت ۰/۲ درصد بوده و در فرکانس یک کیلوهرتز انجام شده است.

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 که در جداول ۱ و ۲ به ترتیب برای سنگ آهک و دولوستون نشان داده شده است.

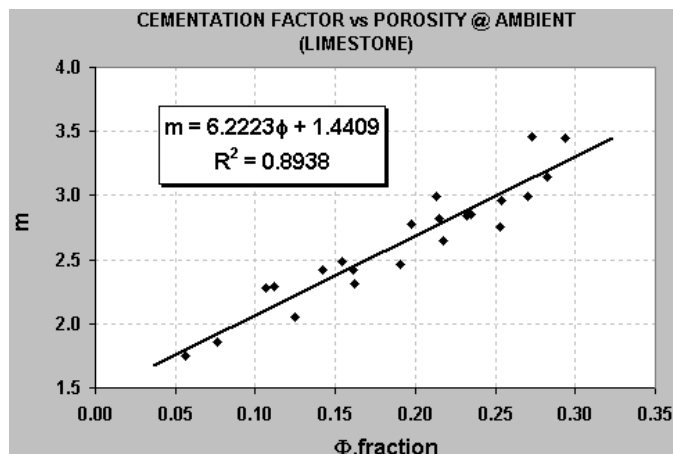
$$F = \frac{R_0}{R_w} = \frac{a}{\phi^m}$$

ه) ضریب سیمان شدگی

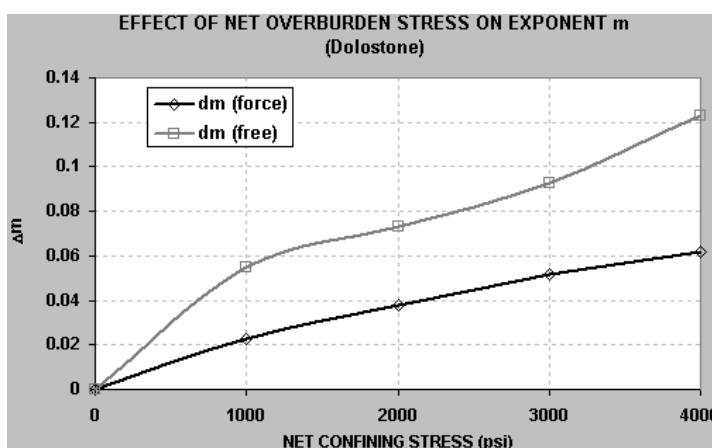
شکل ۱۶ و ۱۷ نمودار $FRF-\Phi$ را به ترتیب برای نمونه‌های آهکی و دولوستون در شرایط فشار محیط نمایش می‌دهند. همانگونه که مشاهده می‌گردد مقادیر m و a که از بهترین خط برازش شده به نقاط داده بدست آمده است در دولوستون‌ها قابل اعتماد بوده و به ترتیب برابر $3/711$ و $1/542$ با ضریب همبستگی $0/91$ می‌باشند. برای حالت $a=1$ مقدار m برابر $2/086$ می‌باشد. اما پراکندگی نقاط داده در سنگ‌های آهکی با تخلخل غالب قالبی و حفره‌ای غیر مرتبط، مقدار m مستخرج از این نمودار را برای استفاده در ارزیابی‌های پتروفیزیکی غیر قابل اعتماد می‌سازد. مقادیر m و a برای سنگ آهک به ترتیب $0/689$ و $25/2$ با ضریب همبستگی $0/61$ و برای حالت $a=1$ مقدار m برابر $2/439$ می‌باشد. همانگونه که در جدول شماره ۱ مشاهده می‌گردد و در



شکل ۱۸: نمودار ضریب سیمان‌شدگی بر حسب تخلخل برای نمونه‌های گرینستون برای فشار همه‌جانبه موثر از شرایط فشار محیط تا ۴۰۰۰ پوند بر اینچ مربع.



شکل ۱۹: نمودار ضریب سیمان‌شدگی بر حسب تخلخل برای نمونه‌های گرینستون.



شکل ۲۰: نمودار تغییرات m با فشار همه‌جانبه موثر برای دولوستون.

-در سنگ آهک گرینستون با تخلخل غالب قالبی و حفره‌ای مقدار m تابعی از تخلخل بوده و با افزایش تخلخل افزایش می‌یابد. در این حالت باید از رابطه تجربی که m را به صورت تابعی از تخلخل نشان می‌دهد استفاده نمود.

-با افزایش فشار موثر طبقات فوقانی بر مقدار m افزوده می‌شود که میزان افزایش برای سنگ کربناته با تخلخل دوگانه غیر مرتبط نسبت به دولوستون با تخلخل بین‌دانه‌ای و همگن بیشتر است.

نتیجه‌گیری

با توجه به وابستگی ضریب سیمان‌شدگی به نوع تخلخل، اولین مرحله در ارزیابی m برای مخازن کربناته هتروژن و با تخلخل دوگانه تعیین رخساره‌های سنگی است.

-در دولوستون با تخلخل بین‌کریستالین و بین‌دانه‌ای مقدار m در شرایط محیط برابر ۲/۰۸۶ می‌باشد و با افزایش فشار همه‌جانبه موثر تا ۴۰۰۰ پوند بر اینچ مربع مقدار آن به ۲/۱۴۸ افزایش می‌یابد.

منابع:

- Archie G.E. 1942: The electrical resistivity log as an aid in determination some reservoir characteristics. *Trans. Am. Inst. Min. Metal. Pet. Eng. Inc.* **146**: 54-62.
- Arps J.J. 1953: The effect of temperature on the density and electrical resistivity of sodium chloride solutions. *Trans., A.I.M.E.* **198**: 327-330.
- Borai A.M. 1987: A new correlation for the cementation factor in low-porosity carbonates. *SPE Form. Eval.* **2**: 495-499.
- Focke J.W., Munn D. 1987: Cementation exponents in middle eastern carbonate reservoirs. *SPE Form. Eval.* **2**: 155-167.
- Hosseini-nia T., Rezaee M.R. 2002: Error sensitivity of petrophysical parameters on water saturation calculation for hydrocarbon reservoirs. *J. Sci. Univ. Tehran.* **28**: 69-91.

- Kazemzadeh E., Nabi Bidhendi M., Keramati M., Rezaee M. R., Saadat K. 2007: Determination Archie coefficients in different petrofacieses of carbonate rocks using seismic velocity deviation logs, *Journal of Earth and Space Physics*. **33**: 51-66.
- Lucia F.J. 1983: Petrophysical parameters estimated from visual descriptions of carbonate rocks: A field classification of carbonate pore space. *Journal of Petroleum Technology*. **35**: 629-637.
- Lucia F.J. 1999: Carbonate reservoir characterization. ISBN 3-540-63782-6 Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York.
- Neustaedter R.H. 1968: Log evaluation of deep Ellenburger gas zones. SPE paper 2071, presented at the Deep Drilling and Development Symposium-Delaware Basin of the SPE of AIME, Monahans, Texas.
- Rasmus J.C. 1983: A variable cementation exponent, m, for fractured carbonates. *Log Anal.* **24**: 13-23.
- Rezaee M. R., Motiei H., Kazemzadeh E. 2007: A new method to acquire m exponent and tortuosity factor for microscopically heterogeneous carbonates, *Journal of Petroleum Science and Engineering*. **56**: 241-251.
- Schlumberger Well Surveying Corporation, 1972: Principle of log interpretation, Houston. Tex. 112 p.
- Sethi D.K. 1979: Some considerations about the formation resistivity factor-porosity relations. 20th SPWLA Symposium, paper L.
- Timur A., Hemphkins W.B., Worthington A.E. 1972: Porosity and pressure dependence of formation resistivity factor for sandstones. Presented at Form. Eval. Symp. Can. Well Log. Soc., 4th, Calgary, (Paper, D).
- Worthington A.E., Hedges J.H., Pallatt N. 1990: SCA guidelines for samples preparation and porosity measurement of electrical resistivity samples. *The Log Analyst*. **31**: 20-28.