بررسی رابطه ضریب سیمان شدگی و تخلخل بدست آمده از آنالیز مغزه و مقایسه آن با روابط تجربی Shell و Borai در یکی از مخازن دولومیتی جنوب غرب ایران

علیرضا رستمی[1]، محمد حسنی گیو[2] ■ مدیریت اکتشاف شرکت ملی نفت ایران

چکیده

پارامتر آب اشباع‌شدگی یکی از مهم‌ترین پارامترهای پتروفیزیکی مخازن هیدروکربوری است. رایج‌ترین فرمول محاسبه آب اشباع شدگی رابطه آرچی می‌باشد. نقش ضریب سیمان شدگی(m) در این رابطه بسیار اساسی است، به طوری که تغییر اندك این ضریب موجب تغییرات قابل توجه آب اشباع‌شدگی می‌شود. مقدار m به مقدار و نوع تخلخل، تراوایی، بافت سنگ، شوری آب سازند و موارد دیگری بستگی دارد و از نمونه‌ای به نمونه دیگر تغییر نموده و نمی‌تواند ثابت فرض شود. در این مطالعه به منظور بررسی ارتباط ضریب m و مقدار تخلخل، تعداد ۲۷ نمونه از یکی از مخازن هیدروکربوری دولومیتی جنوب غرب ایران (حوضه زاگرس)- در دو میدان مختلف- انتخاب شد. نمونه‌ها بر اساس دیاگرام تخلخل- تراوایی لوسیا به سه گروه تقسیم شدند. دیاگرام‌های متقابل تمام لگاریتمی فاکتور مقاومت سازند در مقابل تخلخل (F-Ø) و نیمه لگاریتمی ضریب سیمان‌شدگی در برابر تخلخل (m-Ø) برای هر گروه به طور جداگانه و برای کل داده‌ها نیز به طور یکپارچه رسم شدند. همچنین روند تغییر m در مقابل Ø داده‌های آنالیز مغزه با مقادیر m محاسبه شده بر اساس فرمول‌های Shell و Borai مقایسه شدند. با افزایش مقدار تخلخل، مقادیر m بدست آمده از آنالیز مغزه و m محاسبه شده از رابطه Borai افزایش می‌یابند، در حالی که فرمول Shell رابطه معکوسی (خصوصاً در تخلخل‌های کمتر از ٪۱۰) را نشان می‌دهد. در نهایت بر اساس روابط خطوط رگرسیون به‌دست آمده از دیاگرام‌های متقابل m-Ø رابطه جدیدی برای محاسبه m ارائه گردید. محاسبه مقادیر m براساس این رابطه در مخازن دولومیتی مشابه، خطای محاسبه آب اشباع شدگی را تا حد مطلوبی کاهش خواهد داد.

واژه‌های کلیدی حوضه زاگرس، مغزه، ضریب سیمان شدگی، تخلخل، مخازن دولومیتی

مقدمه

بخش مهمی از میادی بزرگ نفتی جهان که ٪۳۸ از نفت وگاز جهان را تولید می کنند در سنگ‌های کربناته واقع شده‌اند. در صورتی که میدان‌های نفتی خاورمیانه به توسعه کامل برسند، ٪۶۵ از هیدروکربور تولیدی از سنگ‌های کربناته آن‌ها به دست خواهد آمد. معمولاً سنگ‌های کربناته در جهات عمودی و جانبی ناهمگن‌تر از ماسه‌سنگ‌ها می‌باشند. این ناهمگنی به دلیل تنوع شکل و اندازه منافذ است که خود ناشی از تنوع بافتی و پتانسیل بالای دیاژنتیکی این سنگ‌هاست[۸]. بخش قابل توجهی از تخلخل در سنگ‌های کربناته می‌تواند به صورت شکستگی‌ها، حفره‌ها و در بعضی موارد به صورت غارهای بزرگ شکل بگیرد. بنابراین توزیع تخلخل می‌تواند خیلی متغیر باشد، به طوری که بعضی چاه‌ها در مخازن کربناته ممکن است هزاران متر مکعب در روز تولید نمایند، در حالیکه در نزدیکی همان چاه‌ها، چاه‌های با تولید ناچیز نیز وجود دارد.

برآورد پارامترهای پتروفیزیکی و به خصوص محاسبه صحیح آب‌اشباع‌شدگی در چاه‌های حفاری شده، آزمایش و تولید در فواصل مطلوب، عمده‌ترین اهداف در اکتشاف و توسعه منابع هیدروکربوری است. به حداقل رساندن خطای محاسباتی و ارائه روشی که بتواند در صورت کمبود داده‌ها مورد استفاده قرار گیرد، اهمیت ویژه‌ای دارد. یکی از پارامترهای مهم در محاسبه آب‌اشباع‌شدگی از طریق فرمول آرچی ($SW=\sqrt[n]{\frac{a\times Rw}{\phi^m\times Rt}}$) ضریب سیمان‌شدگی m (توان تخلخل) است که مطالعه حاضر نیز به عنوان بخشی از این بررسی به نحوه محاسبه و محدوده تغییرات آن در فواصل دولومیتی شدهٔ یکی از مخازن هیدروکربوری جنوب غرب ایران می‌پردازد.

۱- مروری بر مطالعات قبلی

فاکتور مقاومت سازند (F) اولین بار توسط آرچی [۱] به صورت نسبت هدایت الکتریکی آب شور به هدایت الکتریکی ماسه سنگ تمیز کاملاً اشباع از آب تعریف شد:

[1] rostami49@yahoo.com
[2] m.hassanigiv2010@gmail.com

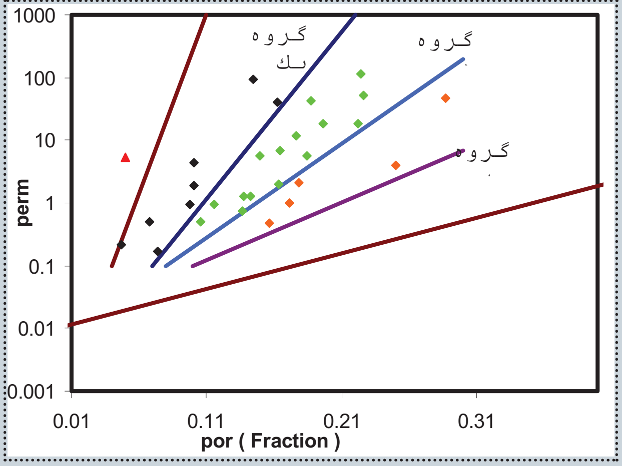
$$F= C_w / C_o = R_o / R_w \qquad (۱)$$

آرچـی دریافت کــه رابطه‌ای بیــن فاکتور مقاومت ســازند(F) و تخلخل (Ø) سنگ به صورت زیر وجود دارد.

$$F= a\, Ø^{-m} \qquad (۲)$$

آرچی در آهک‌های تمیز مقدار ثابت ۲ را برای m پیشــنهاد کرد. ضریب سیمانی شدن پارامتر پیچیده‌ای می‌باشد و عواملی نظیر مقدار تخلخل، مقدار تخلخل حفره‌ای مجزا، قطر گلوگاه‌ها و توزیع اندازه گلوگاه‌های تخلخل بــر بزرگــی آن تأثیر دارد. مقدار m می‌تواند از ۱ تا ۵ متغیر باشــد. تنها راه مطمئن اندازه‌گیری m در آزمایشــگاه اســت. بــرای اندازه‌گیری m ابتدا فاکتور مقاومت سازند محاسبه می‌شود. به این ترتیب که ابتدا پلاگ مغزه مورد آزمایش با آب نمک با شــوری معادل شوری آب سازند اشباع شده (R_w مشخص) و در فشارهای مختلف (۳۵۷، ۱۰۰۰، ۲۰۰۰، ۳۰۰۰، ۴۰۰۰ و ۵۰۰۰ پام) مقاومت پلاگ (R_o) تعیین می‌شود. با استفاده از معادله ۱ فاکتور مقاومت سازند محاسبه می‌گردد. از میان تمام فشارهای اندازه‌گیری شده، داده‌ای انتخاب می‌شــود که معادل فشــار مؤثر مخزن باشد. برای به دست آوردن مقدار m داده‌های فاکتور مقاومت ســازند و تخلخل (در فشار موثر مخزن) در نموداری با مقیاس تمام لگاریتمی در مقابل همدیگر رسم می‌شوند به طوری که شیب خط حاصله برابر با مقدار متوسط m است. در صورتی که نتایج اندازه‌گیری مقاومت پلاگ‌های مغزه در آزمایشگاه موجود نباشد، می‌توان از روابط تجربی اســتفاده نمود. متعدد بودن این روابط به علت آن است که هدف همه آن‌ها توصیف فاکتور پیچیده‌ای مانند m با چند پارامتر و در غالب موارد بیشتر با تخلخل است. در مورد کربنات‌ها این فرمول‌ها – به صورت ویژه‌ای – کاملاً ناحیه‌ای هســتند. به عنوان مثال سنگ‌های کربناته بــا تخلخل حفره‌ای مقادیری از m را نشــان می‌دهند که کاملاً با مقادیر به دســت آمده برای سنگ کربناته دیگر با همان مقدار تخلخل از نوع دیگر متفاوت است. لوسیا در تقسیم‌بندی سنگ‌ها براساس تخلخل، سنگ‌های کربناته را براساس مقدار تخلخل حفره‌ای و اینکه آیا تخلخل‌های حفره‌ای به هم مرتبط یا غیر مرتبط هستند، تقسیم‌بندی کرد. وی نتایج آزمایشگاهی مغزه‌های طیف وسیعی از مخازن کربناته و تأثیر تخلخل حفره‌ای غیرمرتبط را بر m بررســی نمود. روند مشاهده شده نشان دهنده افزایش m با افزایش نسبت تخلخل حفره‌ای غیر مرتبط به تخلخل کل بود و پیشنهاد نهایی وی، استفاده از روابط فابریک سنگ و نسبت تخلخل حفره‌ای به تخلخل کل در محاسبه m بود. لوسیا اعتقاد دارد که تخلخل‌های حفره‌ای مجزا اثر زیادی بر مقدار m دارند [۵].

بورای در بررسی اختلافات ناشی از تفسیر لاگ و نتایج آزمایش‌های انجام شــده در کربنات‌های کم‌تخلخل برخی از میادین حاشــیه جنوبی خلیج فارس، فرمولی برای تخمین ضریب سیمان‌شــدگی پیشــنهاد کرد. بورای مشــاهده نمود که مقدار m متناســب با کم‌شــدن مقدار تخلخل کاهش می‌یابد [۳]. به واســطه تأثیر مهمی که مقدار m در محاســبه آب اشباع‌شــدگی در فرمول آرچــی دارد، چنانچه محــدوده تغییرات m به درســتی در نظر گرفته نشود، آب اشباع شدگی نادرستی به دست خواهد آمد. به طور مثال چنانچه مقادیر یکسانی برای سایر پارامترهای موجود در



شکل ۱ | دیاگــرام متقابل نتایج آزمایشــگاهی تخلخل – تراوایی مغزه‌های مورد مطالعه و رده‌بندی آن‌ها

جدول ۱ | روابط تجربی محاسبه فاکتور مقاومت سازند(F) و نیز محاسبه محدوده تغییرات ضریب سیمانی شدن (m)

محدوده تغییرات m	فرمول عمومی آرچی	$F= a\, Ø^{-m}$
m=2	فرمول عمومی برای آهک‌های گچی (chalky)[۱]	$F= 1/ Ø^{2}$
m=2	برای ماسه های تحکیم یافته[۱]	$F= 0.81/ Ø^{2}$
m=1/7	برای ماسه‌های آهکی[۴]	$F= 1.45/ Ø^{1.7}$
m=2/14	برای آهک‌ها[۴]	$F= 0.85/ Ø^{2.14}$
m=1/54	فرمول فیلیپ برای ماسه و ماسه سنگ‌ها[۲]	$F= 1.45/ Ø^{1.54}$
m=1/33	پیشنهادی برای ماسه‌های شیلی[۱]	$F= 1.65/ Ø^{1.33}$
m=2/154	معروف به فرمول Humble برای ماسه سنگ‌ها[۴]	$F= 0.62/ Ø^{2.15}$
m= 2/2 – 2/5	پیشنهاد شلمبرژه برای سنگ‌های کربناته[۹]	$F= 1/ Ø^{2.2\text{-}2.5}$
$m= 1.87+0.019 / Ø$	پیشنهاد Shell برای کربنات‌های کم تخلخل[۹]	$F= 1/ Ø^{1.87+0.019 / Ø}$
$m= 2.14(Ø_{sv} / Ø_t) + 1.76$ ؛ $Ø_t$ تخلخل کل ، $Ø_{sv}$ تخلخل حفره‌ای غیر مرتبط		پیشنهادی برای کربنات‌ها برمبنای نسبت تخلخل حفره‌ای و تخلخل کل[۵]
$m= 2.2 –(0.035 / (Ø +0.042))$		پیشنهادی برای کربنات‌های کم تخلخل[۳]
$m= e^{ø} + 0.7$	ø تخلخل قالبی	پیشنهادی برای کربنات‌ها[۶]

محاسبه آب اشباع‌شدگی در نظر گرفته شود با تغییر مقدار m از ۲ به ۳ مقدار آب اشباع‌شدگی از ۳۲٪ به ۷۱٪ تغییر خواهد یافت. در جدول ۱ بخشی از روابط تجربی پیشنهاد شده توسط محققین مختلف برای مقایسه ارائه شده است.

۲- داده‌ها و روش کار

به منظور ارزیابی محدوده تغییرات و نحوه تغییر مقدار ضریب سیمانی شدن در فواصل دولومیتی یکی از مخازن هیدروکربوری جنوب غربی ایران (حوضه زاگرس)، نتایج اندازه‌گیری مقاومت تعداد ۲۷ نمونه از فواصل هیدروکربوردار در دو میدان مختلف مورد ارزیابی قرار گرفت. با استفاده از روش فابریک سنگ جداسازی و گروه‌بندی وضعیت اندازه بلورهای دولومیت و تخمین نحوه تأثیر آن‌ها بر روی خواص پتروفیزیکی انجام شد که بر این اساس نمونه‌ها مطابق شکل ۱ به سه گروه تفکیک شدند[۵].

گروه اول: این گروه شامل دولوگرینستون‌های ریز تا متوسط بلور (که بلورهایی با اندازه بیش از ۱۰۰ میکرون دارند) با تخلخل‌های بین بلوری همراه با دولوستون‌های درشت بلور که رفتار پتروفیزیکی مشابه با هم دارند می‌باشد.

گروه دوم: دولوپکستون‌های دانه افزون ریز تا متوسط بلور و نیز دولوستون‌های گل‌افزون با بلورهای متوسط با اندازه بلورهای ۲۰-۱۰۰ میکرون در این رده قرار می‌گیرند که بیشتر نمونه‌های اخذ شده را در برگرفته‌اند. در این گروه تخلخل حفره‌ای متوسط نیز دیده می‌شود.

گروه سوم: این گروه شامل دولووکستون‌ها و دولوستون‌های گل افزون ریز بلور هستند که اندازه بلورها از ۲۰ میکرون کوچکتر است.

۳- بحث

به منظور به دست آوردن مقادیر m متوسط، برای هر گروه از داده‌ها مقادیر F در مقابل Ø روی دیاگرام تمام لگاریتمی در دو حالت ثابت[۳] (a=1) و متغیر a ترسیم شد. حالت a=1 زمانی است که مسیرهای جریان سیال را مستقیم فرض کنیم و حالت متغیر بودن a، حالت طبیعی (پیچیده بودن) مسیرهای جریان است. مقادیر به دست آمده حاصل از این ارزیابی

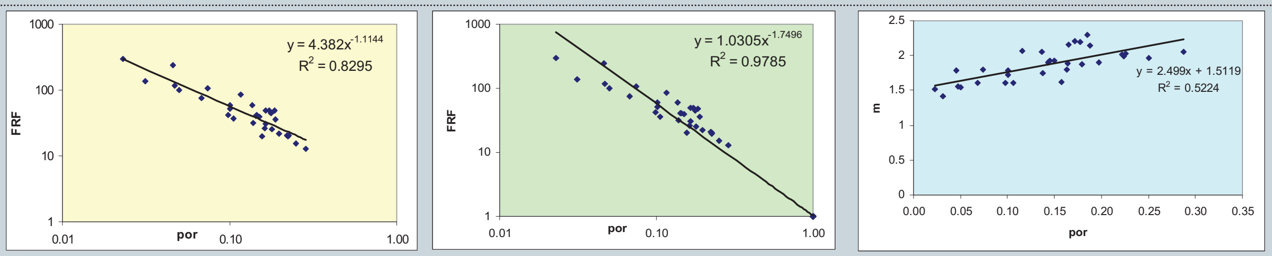
جدول ۲ | مقایسه مقادیر m در دو حالت a=1 (Forced fit) و a متغیر

Class	m	a	R^2	m (forced fit a=1)
۱	۱/۱۶	۰/۳۷	۰/۴۸	۱/۶۸
۲	۱/۲۷	۳/۶	۰/۴۶	۱/۹۶
۳	۱/۴۱	۲/۲۷	۰/۵۰	۱/۹۲
All	۱/۱۱	۴/۳۸	۰/۸۲	۱/۷۵

در جدول شماره ۲ آورده شده است. همانگونه که مشاهده می‌شود، در حالت a=1 مقادیر m از ۱/۶۸-۱/۹۶ متغیر است و نزدیک به عدد ۲ در فرمول پیشنهادی آرچی می‌باشد. در حالتی که مقدار a متغیر در نظر گرفته شود، مقادیر m از ۱/۱۱ –۱/۴۱ تغییر می کند.

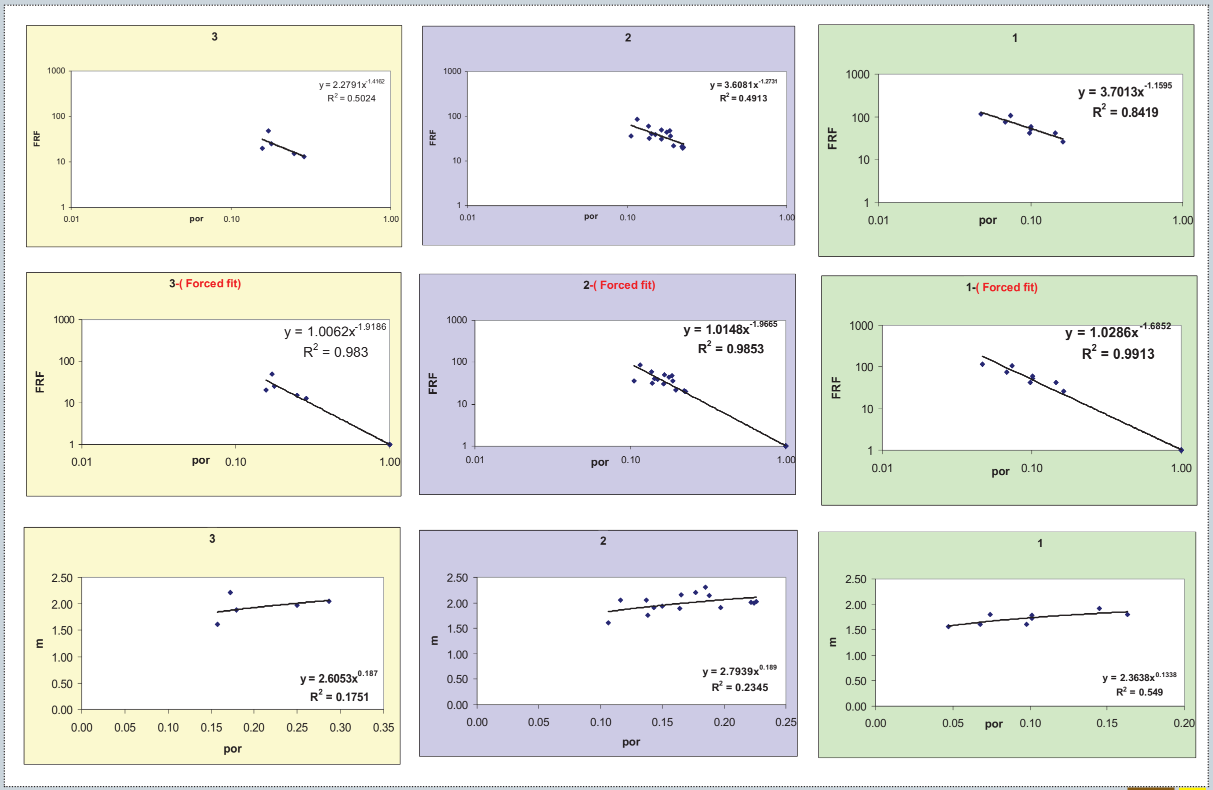
براساس دو پارامتر Ø و F حاصل از نتایج آزمایش پلاگ‌های مغزه، مقادیر m واقعی با استفاده از رابطه $m=-\frac{LogF}{Log\phi}$ محاسبه شد. برای بررسی رابطه m و Ø مقادیر به دست آمده از آنالیز مغزه و مقادیر m محاسبه شده از روابط تجربی شل [۹] و بورای [۳]، داده‌ها در هر گروه در مقابل همدیگر ترسیم و مقایسه شدند (شکل های ۲، ۳ و ۴). همان‌طور که مشاهده می‌شود با افزایش مقدار تخلخل، مقادیر m واقعی و m به دست آمده از رابطه بورای افزایش می‌یابد. در صورتی که فرمول شل رابطه معکوسی را بین تخلخل و m نشان می‌دهد. به این صورت که با افزایش تخلخل، مقدار m کاهش می‌یابد. حداکثر اختلاف m واقعی، m به‌دست آمده از رابطه بورای و m به‌دست آمده از رابطه شل در تخلخل‌های کمتر از ۱۵٪ است. همان گونه که مشاهده می شود در تخلخل‌های کمتر از ۱۵٪ فرمول بورای نیز منجر به یک تخمین بیشینه (Over estimate) (به ویژه در گروه ۱) می‌شود. از طرف دیگر اگر چه رابطه شل برای کربنات‌های کم تخلخل و بدون شکستگی پیشنهاد شده، محاسبه مقادیر m با استفاده از این رابطه به خصوص در کربنات‌های کم تخلخل و قرار دادن آن در فرمول آرچی برای محاسبه آب اشباع شدگی خطای زیادی را به دنبال خواهد داشت. لذا یافتن معادله‌ای عمومی که در نبود داده‌های حاصل از آنالیز مغزه بتواند به جای عددی ثابت در محاسبات مربوط به آب اشباع شدگی استفاده گردد بسیار ضروری به نظر می‌رسد. با توجه به معادلات خطوط رگرسیون دیاگرامهای رسم

[۳] forced fit

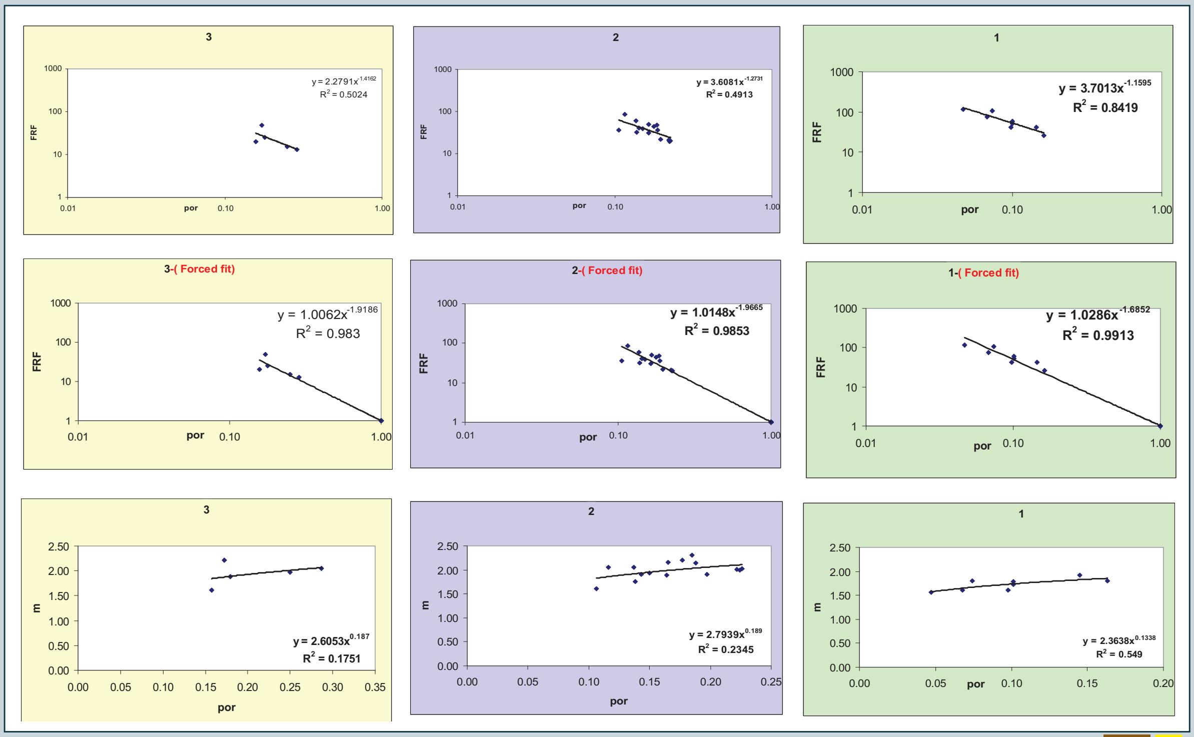


(الف) (ب) (ج)

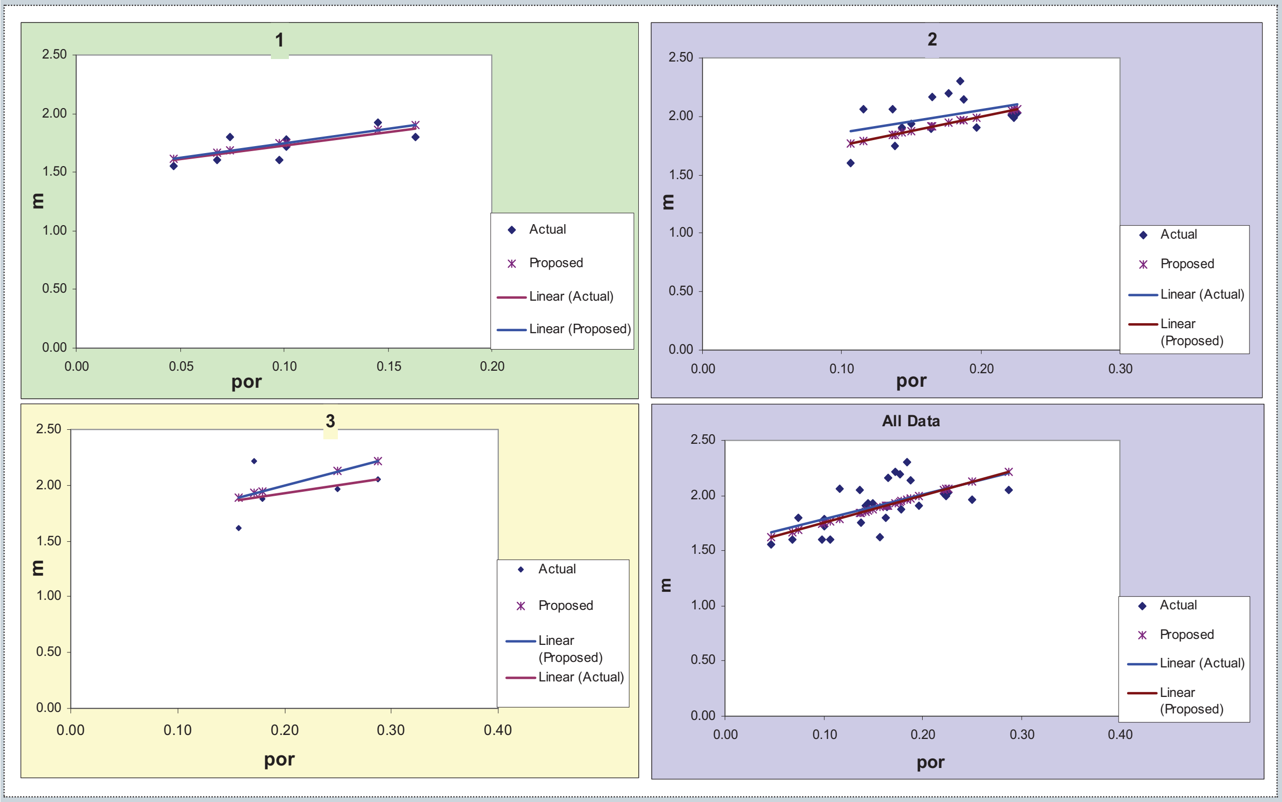
شکل ۲ | دیاگرام‌های متقابل تخلخل در مقابل فاکتورمقاومت سازند در دو حالت a متغیر (الف) و a=1 (ب) و دیاگرام متقابل تخلخل در مقابل ضریب سیمانی شدن (ج) برای کل داده‌ها



شکل ۳| دیاگرام‌های متقابل تخلخل در مقابل فاکتور مقاومت سازند در دو حالت a متغیر و a=۱ و تخلخل در مقابل ضریب سیمان شدگی برای گروه‌های سه گانه



شکل ۴| مقایســه روند تغییرات ضریب ســیمان شدگی به دســت آمده از آنالیز مغزه، محاسبه شده از طریق فرمول‌های شل و بورای و رابطه پیشنهادی در مقابل تخلخل مغزه



شکل ۵| مقایسه روند تغییرات ضریب سیمان شدگی حاصل از آنالیز مغزه و ضریب سیمان شدگی محاسبه شده بر اساس رابطه پیشنهادی در مقابل تخلخل مغزه

شده m در مقابل Ø و به روش سعی و خطا، بهترین رابطه منطبق بر داده‌ها به صورت زیر به دست آمد:

◆نتیجه‌گیری

در نمونه‌های مورد مطالعه با افزایش میزان تخلخل، ضریب سیمان شدگی (m) نیز افزایش می‌یابد.

از آنجا که مقدار m از نمونه‌ای به نمونه دیگر تغییر می کند، جایگزینی مقدار ثابت ۲ (پیشنهادی آرچی) نیز موجب خطا در محاسبه آب‌اشباع‌شدگی خواهد شد.

محاسبه m از طریق رابطه بورای و به ویژه رابطه شل به خصوص در مخازن با تخلخل کم (کمتر از ۱۵٪) با خطای قابل توجهی همراه می‌باشد. از این رو محاسبات آب اشباع‌شدگی که تاکنون با جایگزینی m محاسبه شده از فرمول شل انجام شده باشد با خطای زیادی همراه بوده و بهتر است بازنگری شود.

اعمال مقادیر m محاسبه شده از رابطه پیشنهادی این مطالعه، کاهش خطا در محاسبات آب اشباع‌شدگی در مخازن دولومیتی مشابه را به دنبال خواهد داشت.

لازم به ذکر است که این مطالعه فقط براساس تعداد ۲۷ نمونه انجام شده است و امید است که با بکارگیری نمونه‌های متنوع‌تر و بیشتر در آینده روابط مستحکم تری حاصل گردد.

◆منابع

[1] Archie, G.E., (1942), “the Electrical Resistivity Log as an Aid in Determining Some Reservoir Characteristics”, Transactions, AIME. No. 31, pp 350-366.

[2] Asquit, G. B. and Gibson, C., (1999), “Basic Well Log Analysis for Geologists”, AAPG, 214p.

[3] Borai, A.M., (1987), “A New Correlation for Cementation Factor in Low – Porosity Carbonates”, SPE Formation Evaluation, Vol. 4, No. 4, pp 459-499.

[4] Carothers, J.E., (1968), “A Statistical Study of the Formation Factor Relation to Porosity”, The Log Analyst, V.9, pp.38-52.

[5] Lucia, F. J., (2002), “Carbonate Reservoir Characterization”, Springer, 226p.

[6] Ragland, D.A., (2002), Trends in Cementation Exponents (m) for Carbonate Pore System”, Petrophysics, Vol.43, No.5, pp434-446

[7] Perez- Rosales, C., (1982), “On the Relationship between Formation Resistivity and Porosity”, SPE, pp531-536

[8] Schlanger, S. O., and Douglas, R. G., (1974), “The Pelagic Ooze-chalk-limestone Transition and its Implications for Marine Stratigraphy”, in K. J. Hsu and H. C. Jenkyns, eds., Pelagic sediments on land and under the sea”, International Association of Sedimentologists, Special Publication 1, pp.