

تجزیه و تحلیل اشباع آب در سازندهای شیل دار به کمک نمودارهای متقاطع پیکت

علی اکبر رحیمی بهار

کارشناس پتروفیزیک پژوهشکده اکتشاف و تولید - پژوهشگاه صنعت نفت

حسین حسین پورصیامی

کارشناس پتروفیزیک پژوهشکده اکتشاف و تولید - پژوهشگاه صنعت نفت

(تاریخ دریافت ۸۲/۸/۳، تاریخ تصویب ۸۳/۱/۲۹)

چکیده

در این مقاله به تحلیل بسط مدل‌های مربوط به شیل با استفاده از نمودارهای متقاطع تخلخل موثر- مقاومت ویژه حقیقی متاثر از گروه شیل (A_{sh}) در سه حالت لایه ای، پراکنده و شیل کل خواهیم پرداخت. با استفاده از روش‌های ارائه شده در این مقاله می‌توان تحلیل واقع بینانه‌ای از مخازن نفتی که دارای شکستگی‌های طبیعی است به دست آورد. پاسخ معادلات برای مدل‌های مذکور امکان ایجاد نمودارهای متقاطع را برای محاسبه درصد اشباع آب، خواهند داد. سه پارامتر مهم در روش‌های پیشنهاد شده عبارتند از:

۱- مقدار (m) یا پارامتر تخلخل که نباید برابر با (۲) در نظر گرفته شود و باید بصورت آزمون و خطا تعیین شود.

۲- مقاومت ویژه آب (R_w) که در مخازن آب دار قابل تعیین است

۳- تمام لایه‌های شیلی که تحلیل می‌شوند می‌توانند در یک نمودار متقاطع شامل تخلخل و مقاومت ویژه متاثر از گروه شیل (A_{sh}) نمایش داده شوند، حتی زمانیکه حجم شیل بطور یکنواخت و پیوسته تغییر کند. در ادامه مقاله به ذکر دو نمونه مطالعه موردی خواهیم پرداخت که شامل نمودارهای متقاطع هستند که ابزارهای بسیار مفیدی در ارزیابی و تحلیل مدل‌های شیل لایه ای، پراکنده و کل می‌باشند.

واژه های کلیدی: شیل، نمودارهای درون چاهی، نمودارهای متقاطع پیکت، مدل‌های اشباع آب، ضرایب آرچی

مقدمه

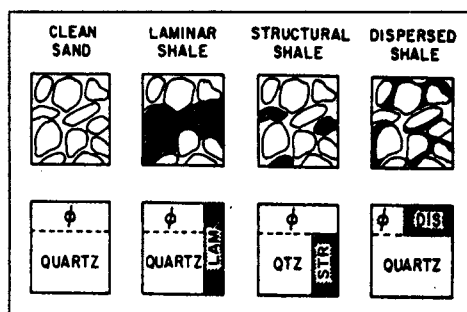
مقاومت ویژه حقیقی متاثر از گروه شیل (A_{sh}) بکار آیند. این موضوع در شکل (۲) نشان داده شده است. اصول مشابه دیگری نیز توسط (Sanyal & Ellithorpe, 1978) و مدل شیلی توسعه یافته دیگری نیز توسط (Patchett & Rausch, 1967) مورد بحث واقع شده اند. همچنین بررسی‌های بسیار چشمگیری از تحلیل سازند های شیلی نیز توسط (Fertl & Worthington, 1985) ارائه شده است.

اصول نظری

مدل‌های زیادی در ارتباط با ادبیات تعبیر و تفسیر نمودارهای درون چاهی در سازند های شیلی منتشر شده است. بطور کلی این مدل‌ها می‌توانند به

نمودارهای متقاطع پیکت (Pickett Plot) (1966 & 1973) به عنوان ابزارهای بسیار مفیدی در تعبیر و تفسیر نمودارهای درون چاهی بکار برده می‌شوند. در روش پیکت، شاخص مقاومت ویژه (I) و درجه اشباع آب (S_w) از روی نمودارهای متقاطع مقاومت ویژه حقیقی (در بعضی موارد ظاهری) و تخلخل یا پاسخ ابزار تخلخل محاسبه می‌شوند (شکل ۱). در طی سالها، تعدادی از متخصصان چاه پیمایی معتقد بودند که یکی از ضعف‌های نمودارهای متقاطع پیکت، عدم توانایی و اعتبار آن در تحلیل سازندهای شیلی است. در حالیکه مطالعه حاضر نشان خواهد داد که مدل‌های شیل لایه ای، پراکنده و کل می‌توانند برای نمودارهای متقاطع تخلخل و

بندی آنها را براساس توزیع شیل در سازند نشان می دهد. بخش بالایی شکل، تصویر شماتیک را نشان می دهد، در صورتیکه بخش پایینی آن حجمهای مربوطه را آرایه می دهد. معادلاتی که برای مدل‌های مذکور استفاده می شوند امکان ایجاد نمودارهای متقاطع را داده و می توانند مقادیر درجه اشباع آب را با سرعت محاسبه کنند.



شکل ۳: اشکال مختلف توزیع شیل و تاثیر آن بر تخلخل سازند.

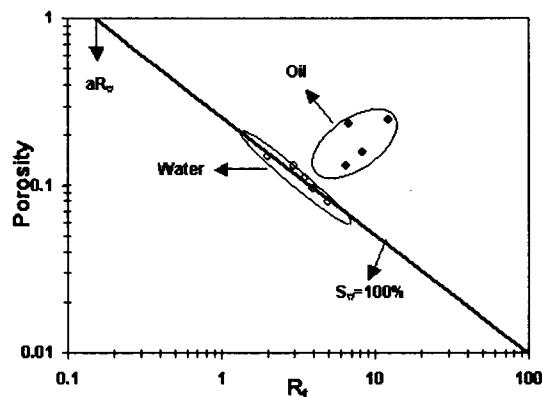
مدلهای شیل

۱- مدل شیل لایه ای

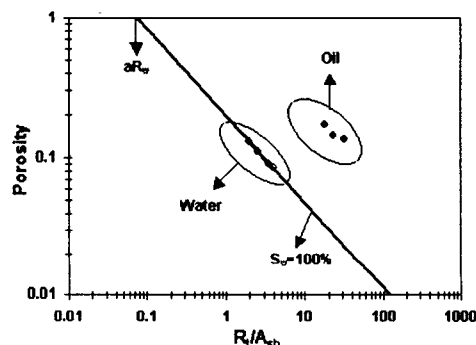
پاپن و همکارانش (Poupon et al, 1954) [۱۲] از مدل هدایت الکتریکی موازی بشرح زیر برای ارزیابی سازندهای شیلی لایه ای استفاده کردند:

$$S_w^2 = \frac{a(1-V_{lam})R_w}{\phi^2} \left(\frac{1}{R_t} - \frac{V_{lam}}{R_{sh}} \right) \quad (1)$$

در این رابطه (a) عددی است که بستگی به جنس سنگ دارد که اغلب ۱ در نظر گرفته می شود (البته برای ماسه سنگها $a = 0.62$ و برای سنگ آهک بدون درزه و شکاف با تخلخل کم $a = 1$ در نظر گرفته می شود)، (R_w) مقاومت ویژه آب سازند برحسب اهم متر، (ϕ) تخلخل، (V_{lam}) حجم شیل لایه ای، (R_t) مقاومت ویژه حقیقی سازند بر حسب اهم متر، (R_{sh}) مقاومت ویژه شیل برحسب اهم متر و (S_w) درجه اشباع موثر آب است. برای بدست آوردن معادله عمومی تر، پارامترهای درجه اشباع آب و تخلخل را از مقدار (۲) به (n) و (m) تغییر می دهیم. بنا براین معادله



شکل ۱: نمونه ای از نمودار متقاطع پیکت برای سازند های عاری از شیل.



شکل ۲: نمونه ای از نمودار متقاطع پیکت برای سازند های حاوی شیل.

سه مدل شیل لایه ای، پراکنده و شیل کل دسته بندی شوند. شیل‌های لایه ای، شیل‌هایی هستند که بشکل لایه ای در میان ماسه سنگها وجود دارند. این نوع شیلها بر روی تخلخل و نفوذپذیری لایه های ماسه سنگی تاثیری ندارند. شیل‌های ساختمانی (یعنی، شیل‌هایی که می توانند بصورت دانه ای یا نودولار (گره) در خمیره سازند وجود داشته باشند) بنظر میرسد که خواص مشابه ای با شیل‌های لایه ای دارند. شیل‌های پراکنده، شیل‌هایی هستند که می توانند در سرتاسر لایه ماسه سنگی پراکنده شوند و بخشی از تخلخل بین دانه ای را پر کنند یا دانه های ماسه را بپوشانند. شیل‌های پراکنده می توانند نفوذ پذیری سازند را بطور قابل ملاحظه ای کاهش دهند. مدل‌های شیل کل، مدل‌هایی هستند که برای بسیاری از سازندهای شیلی، مستقل از نحوه توزیع شیل بکار می روند. شکل (۳) شیل‌های مذکور و طبقه

بصورت شیب خط ۱۰۰٪ اشباع آب تعیین شده، لذا امکان محاسبه مقدار (n) به آسانی وجود دارد. برای بهبود بخشیدن به نتایج، روش زیر پیشنهاد شده است [۱۳]:

۱- تعیین مقدار n

۲- برون یابی خط درجه اشباع آب همزاد تا تخلخل ۱۰۰٪. قرائت در این نقطه، (R_t / A_{lam}) را می دهد که معادل با (aR_w / C^n) است، سپس محاسبه مقدار C .

۳- برون یابی خط درجه اشباع آب همزاد تا اینکه به خط اشباع آب برخورد کند. اگر قرائت تخلخل در نقطه برخورد برابر با مقدار ثابت C محاسبه شده در مرحله (۲) باشد، خط درجه اشباع آب همزاد انتخاب شده، درست است و اگر نباشد، خط درجه اشباع آب همزاد را به موقعیت جدید منتقل و مجدداً روش را تکرار می کنیم. با دانستن (m) و (n) و (aR_w) مقدار (S_w) با استفاده از معادلات (۱) یا (۲ و ۳) تعیین می شوند. روش دیگر برای تعیین (S_w) استفاده مستقیم از نمودارهای متقاطع است. در این حالت با فرض اینکه مقدار (R_w) در محدوده آب و هیدروکربن یکسان باشد و محاسبه شاخص مقاومت ویژه محدوده هیدروکربنی شیل لایه ای (I_{lam}) از رابطه زیر:

$$I_{lam} = (R_t / A_{lam})_h / (R_t / A_{lam})_w \quad (7)$$

درجه اشباع آب از رابطه زیر قابل محاسبه است:

$$S_w = I_{lam}^{-1/n} \quad (8)$$

همچنین از روی نمودار متقاطع در مقیاس لگاریتمی می توان درجه اشباع آب را با استفاده از رابطه زیر بدست آورد:

$$S_w = (\phi_w / \phi_h)^{m/n} \quad (9)$$

که در آن (ϕ_w) قرائت تخلخل بر روی خط ۱۰۰٪ اشباع آب و (ϕ_h) تخلخل محدوده هیدروکربن دار است. توجه به این نکته ضروری است که (ϕ_w) و (ϕ_h) متفاوت هستند.

(۱) برای تحلیل مخازن با شکستگی طبیعی که مقادیر (m) و (n) آنها کمتر از مقدار طبیعی (با توجه به درجه شکستگی آن) است به شکل زیر بسط داده می شود:

$$R_t / A_{lam} = aR_w \phi^{-m} S_w^{-n} \quad (2)$$

که در آن (A_{lam}) ، بخش مربوط به شیل لایه ای است و برابر است با:

$$A_{lam} = (R_{sh} - R_t V_{lam})(1 - V_{lam}) / R_{sh} \quad (3)$$

با گرفتن لگاریتم از دو طرف معادله (۲) خواهیم داشت:

$$\log(R_t / A_{lam}) = -m \log \phi + \log(aR_w) + \log S_w^{-n} \quad (4)$$

معادله (۴) بیان می کند که نمودار متقاطع (R_t / A_{lam}) در مقابل (ϕ) ، در مقیاس لگاریتمی باید خط مستقیمی با شیب $(-m)$ را ارایه دهد، مشروط بر آنکه (aR_w) ، (S_w) و (n) ثابت باشند. هنگامیکه خط ۱۰۰٪ اشباع آب تا تخلخل ۱۰۰٪ برون یابی شود مقدار (aR_w) می تواند در نقطه ای بر روی مقیاس (R_t / A_{lam}) قرائت شود. اگر محدوده هایی با درجه اشباع آب همزاد با ضابطه $(S_w \phi = \text{Constant} = C)$ وجود داشته باشند، پارامتر درجه اشباع آب (n) می تواند با جایگذاری $(S_w = C / \phi)$ در معادله (۲) بصورت زیر محاسبه شود:

$$(R_t / A_{lam}) = aR_w \phi^{-m} (C / \phi)^{-n} \quad (5)$$

با این وجود ضابطه $(S_w = C / \phi)$ باید با احتیاط بکار رود، چون در بعضی موارد مشاهده شده که این ضابطه می تواند تعبیر و تفسیر اشتباهی را بوجود آورد [۲]. با گرفتن لگاریتم از دو طرف معادله (۵) می توان نوشت:

$$\log(R_t / A_{lam}) = (n - m) \log \phi + \log(aR_w / C^n) \quad (6)$$

معادله (۶) بیان می کند که نمودار متقاطع (R_t / A_{lam}) و (ϕ) در مقیاس لگاریتمی باید خط مستقیمی با شیب $(n - m)$ را برای محدوده با درجه اشباع آب همزاد ارایه دهد. چون مقدار (m) قبلاً

۲- مدل شیل پراکنده

در بعضی از موارد، شیلها ممکن است در کل ماسه سنگ پراکنده شوند و بطور موضعی فضاهای کوچکتر را پر کنند و یا دانه های ماسه را پوشش دهند. شلومبرژه (Schlumberger, 1979) معادله زیر را برای محاسبه درجه اشباع آب در مخازن با شیل پراکنده ارائه داده است:

$$S_w = \sqrt{\frac{aR_w}{\phi^2 R_t} + \frac{V_{dis}(R_{dis} - R_w)^2}{2\phi R_{dis}}} - \left[\frac{V_{dis}(R_{dis} + R_w)}{\phi \cdot 2R_{dis}} \right] \quad (10)$$

در این رابطه (a) عدد ثابت (بسته به جنس سنگ)، (R_w) مقاومت ویژه آب سازند برحسب اهم متر، (ϕ) تخلخل، (V_{dis}) حجم شیل پراکنده، (R_t) مقاومت ویژه حقیقی سازند بر حسب اهم متر، (R_{dis}) مقاومت ویژه شیل پراکنده برحسب اهم متر و (S_w) درجه اشباع موثر آب است. ارزش معادله (۱۰) در چندین منطقه که تمام اطلاعات ورودی مورد نیاز در دسترس بودند، ثابت شده است. اما مشکل اینست که در اغلب موارد با توجه به دانستن ضریب (a)، مقاومت ویژه آب (R_w) و حجم شیل پراکنده، مجهولات زیاد دیگری نیز وجود دارند. علاوه بر این در موارد زیادی مقدار (m) برابر با (۲) نیست. برای رفع این مشکل، مقدار (m) از (۲) به (m) تغییر یافت تا معادله عمومی تری بدست آید. در این حالت مدل شیل پراکنده می تواند برای تحلیل مخازن با شکستگی طبیعی که مقدار (m) آن کوچکتر از حد معمول آن است (با توجه به درجه شکستگی آنها) بسط داده شود [۱]. با این تغییر، اکنون می توان معادله (۱۰) را بصورت زیر نوشت:

$$R_t / A_{dis} = aR_w \phi^{-m} S_w^{-2} \quad (11)$$

که در آن مقدار (m) بزرگتر از (۲) معرفی شده است و (A_{dis}) گروه شیل پراکنده است که توسط روابط زیر داده می شود:

$$A_{dis} = 1 + \frac{\phi^m R_t}{aR_w} (B_{dis} - 2\sqrt{(aR_w / \phi^m R_t) + B_{dis} C_{dis} + C_{dis}^2}) \quad (12)$$

$$B_{dis} = \frac{V_{dis}(R_{dis} - R_w)^2}{2\phi R_{dis}} \quad (13)$$

$$C_{dis} = \frac{V_{dis}(R_{dis} + R_w)}{2\phi R_{dis}} \quad (14)$$

با گرفتن لگاریتم از دو طرف معادله (۱۱) خواهیم داشت:

$$\log\left(\frac{R_t}{A_{dis}}\right) = -m \log \phi + \log(aR_w) + \log S_w^{-2} \quad (15)$$

معادله (۱۵) نشان می دهد که نمودار متقاطع $\log(R_t / A_{dis})$ و $\log(\phi)$ باید خط مستقیمی با شیب برابر با ($-m$) را برای محدوده هایی با (aR_w) و (S_w) ثابت نشان دهد. بنابراین، برای تحلیل یک مخزن دارای شیل پراکنده با استفاده از نمودار متقاطع در مقیاس لگاریتمی بشرح زیر عمل می شود:

۱- محاسبه (B_{dis}) و (C_{dis}) برای هر عمق (مورد نظر) با استفاده از معادلات (۱۳) و (۱۴).

۲- محاسبه (A_{dis}) از معادله (۱۲). در اینجا باید توجه داشت که محاسبه (A_{dis}) نیاز به داشتن (m) و (aR_w) دارد.

۳- تهیه نمودار متقاطع (R_t / A_{dis}) در مقابل (ϕ) بر روی کاغذ لگاریتمی. این نمودار باید خط مستقیمی را برای محدوده هایی که درجه اشباع آب (S_w) و (aR_w) ثابت دارند، نشان دهد.

۴- برون یابی خط مستقیم درجه اشباع آب ۱۰۰٪. در این نقطه حاصل (aR_w) در مقابل (R_t / A_{dis}) را در مقیاس لگاریتمی قرائت کنید. همچنین مقدار شیب ($-m$) را نیز تعیین نمایید. مقادیر (aR_w) و (m) که از نمودار لگاریتمی بدست آمدند، باید برابر با مقادیر ورودی در مراحل قبل باشند. بنابراین امکان تغییر مقدار (m) با روش آزمون و خطا و کنترل مجدد مقاومت ویژه آب وجود دارد (فرض می شود که مقدار (m) برابر با (۲) برای خیلی از مخازن دارای شیل پراکنده معتبر است که یا شکستگی طبیعی ندارند و یا مخازنی که درجه شکستگی طبیعی آنها خیلی کوچک است. با این وجود، با افزایش میزان شکستگی، فرض m برابر با ۲ معتبر

وکسمن و اسمیت (Vaxman & Smits, 1968) [۱۵] مدل متفاوت دیگری را برای محاسبه درجه اشباع آب در ماسه های محتوی رسهای پراکنده ارایه دادند. این مدل بشکل رابطه زیر می باشد:

$$S_w^{-n^*} = \frac{R_i}{\phi^{-m^*} R_w} (1 + R_w B Q_v / S_w) \quad (18)$$

در این رابطه (n^*) و (m^*) بترتیب پارامترهای اشباع و تخلخل رس پراکنده هستند و (Q_v) تمرکز حجمی کاتیونهای رس (بر حسب meq/ml) و (B) قابلیت هدایت معادل کاتیونهای رس بر حسب $(ohm-m)^{-1} / (meq/ml)^{-1}$ است. برای مواردیکه $(n^* = 2)$ معادله (۱۸) می تواند بصورت زیر نوشته شود:

$$\left(\frac{R_i}{A_{cec}}\right) = \phi^{-m^*} R_w S_w^{-2} \quad (19)$$

که در آن (A_{cec}) بصورت رابطه زیر داده شده است:

$$A_{cec} = 1 + \frac{R_i}{2\phi^{-m^*} R_w} (B_{cec}^2 - B \sqrt{B^2 + \frac{4\phi^{-m^*} R_w}{R_i}}) \quad (20)$$

که در آن :

$$B_{cec} = BR_w Q_v \quad (21)$$

قابلیت هدایت معادل کاتیونهای رس ، B ، معمولا از روابط منتشر شده توسط وکسمن و توماس (Vaxman & Thomas, 1974) [۱۶] یا رابطه زیر تعیین می شود:

$$B = 4.6 \left[1 - 0.6e^{\left(\frac{-0.77}{R_w}\right)} \right] \quad (22)$$

که در آن (R_w) مقاومت ویژه آب در ۲۵ درجه سانتیگراد است. تمرکز حجمی کاتیونهای رس، (Q_v) ، هم در ارتباط با پاسخهای اشعه گاما در محدوده های ماسه سنگهای دلتای مکنزی درکانادا [۱۶] پیدا شده اند و در محدوده های دیگر این امکان وجود نداشت. براساس کارهای کوپرپریش (Koerperich, 1974) [۷] اندازه گیریهای مستقیم آزمایشگاهی تنها راه معتبر جهت تعیین (Q_v) هستند، اما مشکل اینست که مغزه های قراردادی و

نیست.

۵- محاسبه شاخص مقاومت ویژه I_{dis} از رابطه زیر

$$I_{dis} = \frac{(R_i / A_{dis})_h}{(R_i / A_{dis})_w} \quad (16)$$

که در این رابطه فرض شده (aR_w) و (ϕ) در محدوده های آبی و هیدروکربنی یکسان باشند. صورت و مخرج رابطه اخیر می توانند بطور مستقیم از نمودار لگاریتمی در مقدار تخلخل محدوده تحلیل شده ، قرائت شوند.

۶- محاسبه درجه اشباع آب ، محدوده هیدروکربنی دارای شیل پراکنده از رابطه زیر :

$$S_w = I_{dis}^{-1/2} \quad (17)$$

معادله (۱۷) در سازند های با شیل پراکنده و فرض (n) برابر با (2) بکار می آید. امکان دیگر برای محاسبه (S_w) معادله (۹) است که (ϕ_h) و (ϕ_w) می توانند متفاوت باشند، اما باید مقادیر (R_i / A_{dis}) یکسانی داشته باشند .

هنگامیکه معادله (10) در شرایط قراردادی استفاده می شود ، باید (aR_w) را با توجه به مقادیر مستدل درجه اشباع آب ، بخوبی شناخت. با این وجود بعضی از محدوده ها باید با آب دارای مقاومت ویژه (R_w) بطور 100% اشباع شده باشند و بعلاوه (m) را نباید مساوی با (2) در نظر گرفت. بر عکس (m) می تواند مستقیما از روی نمودار لگاریتمی تعیین شود ، مشروط بر آنکه محدوده هایی با (S_w) ثابت وجود داشته باشند. در این حالت با استفاده از روش آزمون و خطا باید (m) تعیین شود ، چون مقدار (m) باید به عنوان داده ورودی در معادله (۱۵) برای تهیه نمودار مقاطع لگاریتمی وارد شود. مزیت دیگر آن اینست که تمام مناطق شیلی تحلیل شده می توانند در یک نمودار شامل تخلخل و درجه اشباع آب نمایش داده شوند، حتی اگر حجم شیل بطور پیوسته در حال تغییر باشد. چون این روش اجازه محاسبه (m) را از نمودارهای درون چاهی می دهد، لذا امکان بسط تحلیل حاضر به ارزیابی مخازن با شیل پراکنده و با شکستگی طبیعی وجود دارد.

مقاومت ویژه حقیقی سازند بر حسب اهم متر، (R_{ish}) مقاومت ویژه شیل کل بر حسب اهم متر و (S_w) درجه اشباع موثر آب است. معادله (۲۶) در امریکا، نیجریه، لیبی و آرژانتین با موفقیت مورد استفاده قرار گرفته است. یکی از محدودیتهای این معادله اینست که ضریب تخلخل برابر با (۲) است و مقدار (aR_w) باید بدرستی تعیین شود. برای حذف این محدودیت، ضریب تخلخل را از (۲) به مقدار (m) تغییر می دهیم و مجدداً معادله (۲۶) را بصورت زیر می نویسیم:

$$(R_t / A_{ish}) = aR_w \phi^{-m} S_w^{-2} \quad (27)$$

و گروه شیل کل (A_{ish}) بصورت زیر داده می شود:

$$A_{ish} = 1 + \frac{\phi^m R_t}{aR_w} (2B_{ish} - 2B_{ish} \sqrt{\frac{aR_w}{\phi^m R_t} + B_{ish}^2}) \quad (28)$$

که در آن:

$$B_{ish} = \frac{aR_w V_{ish}}{2\phi^m R_{ish}} \quad (29)$$

با گرفتن لگاریتم از دو طرف معادله (۲۷) خواهیم داشت:

$$\log(R_t / A_{ish}) = -m \log \phi + \log(aR_w) + \log S_w^{-2} \quad (30)$$

معادله (۳۰) بیان می کند که نمودار متقاطع لگاریتمی (R_t / A_{ish}) و (ϕ) باید خط مستقیمی با شیبی برابر با $(-m)$ نشان دهد، مشروط بر اینکه (aR_w) و (S_w) ثابت باشند. شاخص مقاومت ویژه شیل کل محدوده هیدروکربنی (I_{ish}) با فرض یکسان بودن (ϕ) و (aR_w) در محدوده آبی و هیدروکربنی از رابطه زیر بدست می آید:

$$I_{ish} = \frac{(R_t / A_{ish})_h}{(R_t / A_{ish})_w} \quad (31)$$

همچنین درجه اشباع آب نیز از رابطه زیر بدست می آید:

$$S_w = I_{ish}^{-1/n} \quad (32)$$

در رابطه اخیر $(n=2)$ در نظر گرفته شده است. راه دیگر محاسبه (S_w) استفاده از معادله (۹) است

نمونه های مناسب از دیواره چاه معمولاً در کل مقطع و در تمام چاهها قابل دسترس نیستند. با گرفتن لگاریتم از دو طرف معادله (۱۹) خواهیم داشت:

$$\log\left(\frac{R_t}{A_{ccc}}\right) = -m * \log \phi + \log R_w + \log S_w^{-2} \quad (23)$$

معادله (۲۳) بیان می کند که نمودار متقاطع لگاریتمی (R_t / A_{ccc}) در مقابل (ϕ) باید خط مستقیمی با شیب برابر $(-m^*)$ برای محدوده هایی با (R_w) و (S_w) ثابت نشان دهد. اگر خط مستقیم آبدار به تخلخل ۱۰٪ برون یابی شود، مقاومت آب (R_w) می تواند در مقیاس (R_t / A_{ccc}) قرائت شود. شاخص مقاومت ویژه (I_{ccc}) با فرض اینکه (R_w) و (ϕ) در هر دو محدوده هیدروکربنی و آبی یکسان هستند، با استفاده از رابطه زیر محاسبه می شود:

$$I_{ccc} = \frac{(R_t / A_{ccc})_h}{(R_t / A_{ccc})_w} \quad (24)$$

و درجه اشباع آب هم از رابطه زیر بدست می آید:

$$S_w = I_{ccc}^{-1/m^*} \quad (25)$$

در این رابطه، پارامتر درجه اشباع آب (n) برابر با (۲) فرض می شود. راه دیگر محاسبه (S_w) استفاده از معادله (۹) است که (ϕ_h) و (ϕ_w) می توانند متفاوت ولی (R_t / A_{ccc}) یکسانی داشته باشند.

۳- مدل شیل کل

پاپن (Poupon, 1954) و سپس (Simandoux, 1963) نشان دادند که در بعضی از موارد، امکان استفاده از معادله زیر برای محاسبه درجه اشباع آب (S_w) مستقل از نوع توزیع شیل وجود دارد:

$$S_w = \sqrt{\frac{aR_w}{\phi^2 R_t} + \left(\frac{aR_w V_{ish}}{2\phi^2 R_{ish}}\right)^2} - \left(\frac{aR_w V_{ish}}{2\phi^2 R_{ish}}\right) \quad (26)$$

در این رابطه (a) عدد ثابت (بسته به جنس سنگ)، (R_w) مقاومت ویژه آب سازند بر حسب اهم متر، (ϕ) تخلخل، (V_{ish}) حجم شیل کل، (R_t)

$$\phi_{ish} = \delta\phi_{dsh} + (1-\delta)\phi_{nsh} \quad (39)$$

که (δ) ضریب وزنی بین تخلخلهای شیلی تعیین شده از نمودارهای درون چاهی نوترون و دانسیته است. بطور کلی این مقدار از تجارب منطقه ای تعیین و در محدوده بین ۰/۵ تا ۱/۰ تغییر می کند.

(ϕ_e) تخلخل موثر بدون گاز و برابر با:

$$\phi_e = (\phi_{dc} + \phi_{nc})/2 \quad (40)$$

(ϕ_e) تخلخل موثر با گاز و برابر با:

$$\phi_e = [(\phi_{dc}^2 + \phi_{nc}^2)/2]^{1/2} \quad (41)$$

(ϕ_{dc}) تخلخل دانسیته تصحیح شده اثر شیل و برابر با:

$$\phi_{dc} = \phi_d - V_{sh}\phi_{dsh} \quad (42)$$

(ϕ_{nc}) تخلخل نوترون تصحیح شده اثر شیل و برابر با:

$$\phi_{nc} = \phi_n - V_{sh}\phi_{nsh} \quad (43)$$

و (S_{wr}) درجه اشباع آب کل است. همچنین گروه (A_{sh}) برای مدل دوال واتر از رابطه زیر محاسبه می شود:

$$A_{sh} = (R_t\phi_t^2/aR_w)(2B_{sh}^2 + 2B_{sh}\sqrt{B_{sh}^2 + (aR_w/R_t)\phi_t^2}) + 1 \quad (44)$$

و

$$B_{sh} = S_b(1 - R_w/R_b)/2 \quad (45)$$

نمودار متقاطع (R_t/A_{sh}) در مقابل (ϕ) در مقیاس لگاریتمی خط مستقیمی خواهد بود که شیبی برابر با $(-m)$ برای محدوده‌هایی با درجه اشباع آب کل ثابت (S_{wr}) ، دارند. برای محاسبه (S_w) در مدل دوال واتر از معادله زیر استفاده می شود:

$$S_w = (S_{wr} - S_b)/(1 - S_b) \quad (46)$$

که در آن (S_b) در مدل دوال واتر، درجه اشباع آب لایه ای است.

که در آن (ϕ_w) و (ϕ_h) می توانند متفاوت باشند، اما باید مقادیر (R_t/A_{sh}) یکسانی داشته باشند.

بسط به مدل‌های دیگر

مدلهای بحث شده در بخشهای قبلی این مقاله می توانند بسادگی به مدل‌های دیگری که غالباً توسط کارشناسان نمودارهای درون چاهی مورد استفاده قرار می گیرند، بسط داده شوند. مسیر کلی بدین ترتیب است که با تهیه نمودار متقاطع از (R_t/A_{sh}) در مقابل (ϕ) بر روی کاغذ لگاریتمی و محاسبه (I_{sh}) از رابطه زیر برای محدوده های آبی و هیدروکربنی که مقادیر (R_w) و (ϕ) یکسانی دارند:

$$I_{sh} = \frac{(R_t/A_{sh})_h}{(R_t/A_{sh})_w} \quad (33)$$

و محاسبه درجه اشباع آب از رابطه زیر:

$$S_w = I_{sh}^{-1/n} \quad (34)$$

مقادیر (A_{sh}) را برای مدل‌های دوال واتر (Dual Water، اندونزی (Indonesian)، سیمندوکس (Simandoux)، هوزین (Hossin) و پتچت و راش (Patchett & Raush) بصورت زیر محاسبه کرد:

الف) مدل دوال واتر - مدل دوال واتر [۳] می تواند بصورت زیر نوشته شود:

$$S_{wr}^2 - [S_b(1 - aR_w/R_b)]S_{wr} - aR_w/(R_t\phi_t^2) = 0 \quad (35)$$

در رابطه اخیر (S_b) ، درجه اشباع آب لایه ای است که بصورت زیر داده می شود:

$$S_b = V_{sh}\phi_{ish}/\phi_t \quad (36)$$

(ϕ_t) تخلخل کل و برابر با:

$$\phi_t = \phi_e + V_{sh}\phi_{ish} \quad (37)$$

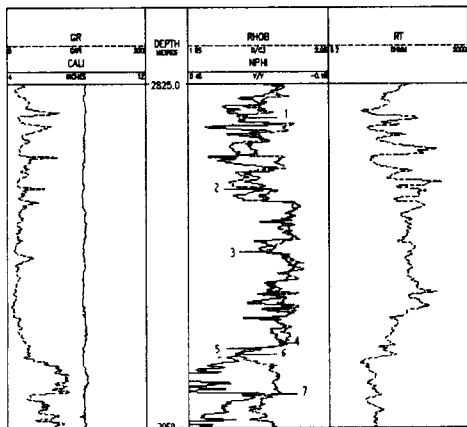
(R_b) مقاومت ویژه آب لایه ای و برابر با:

$$R_b = R_{sh}\phi_{ish}^2 \quad (38)$$

(ϕ_{ish}) تخلخل کل شیل و برابر با:

معادله (۵۵) اشاره دارد بر اینکه نمودار مقاطع (R_t / A_{sh}) در مقابل (ϕ) بر روی کاغذ لگاریتمی باید خط مستقیمی با شیب برابر با $(-m)$ را نشان دهد، مشروط بر آنکه (a) ، (R_{mf}) ، (R_w) و (S_w) ثابت باشند. با تقاطع دادن آن با تخرخل 100% و در اشباع آب 100% معادله بصورت زیر در می آید:

$$(aR_{mf}R_w)/(R_{mf} - R_w) = R_t / A_{sh} \quad (56)$$



شکل ۴: نمودارهای درون چاهی و نقاط انتخاب شده در یکی از چاهها.

مطالعات موردی

مورد اول- این مورد در ارتباط با سازند شیلی در یکی از میداین نفتی ایران است که در پژوهشکده اکتشاف پژوهشگاه صنعت نفت مطالعه شده و از نتایج آن در مطالعه حاضر استفاده شده است. شکل (۴) نمودار های درون چاهی قطرسنجی (Caliper)، اشعه گامای طبیعی (GR)، مقاومت ویژه (Rt)، تخرخل نوترون (Nphi) و چگالی (RhoB) را نشان می دهد. همانطوریکه مشاهده می شود در این مطالعه هفت محدوده در نظر گرفته شده و برای ارزیابی، مدل شیل کل (معادله ۲۶) و از فرمول سیمندوکس وپاین با فرض $(m=2.08)$ و $(a=1)$ استفاده شده است. اطلاعات ورودی دیگر شامل: در دمای مخزن $(R_w=0.0175 \text{ ohmm})$ و $(R_{sh}=4 \text{ ohmm})$ می باشند. در جدول (۱)، (R_t) ،

مدل اندونزیا- مدل اندونزیا [۴] می تواند بصورت زیر نوشته شود:

$$\frac{1}{\sqrt{R_t}} = \left[\frac{V_{sh}^{(1-V_w)/2}}{\sqrt{R_{sh}}} + \frac{\phi^{m/2}}{\sqrt{aR_w}} \right] S_w^{n/2} \quad (47)$$

گروه (A_{sh}) که در نمودار مقاطع لگاریتمی استفاده می شود، از رابطه زیر بدست می آید:

$$A_{sh} = \left[\frac{V_{sh}^{(1-V_w)/2}}{\sqrt{R_{sh}}} \frac{\sqrt{aR_w}}{\phi^{m/2}} + 1 \right]^{-2} \quad (48)$$

ج) مدل سیمندوکس - مدل سیمندوکس بصورت زیر نوشته می شود:

$$\frac{1}{R_t} = \frac{S_w^2}{a\phi^{-m}R_w} + \epsilon \frac{V_{sh}}{R_{sh}} \quad (49)$$

در این حالت گروه (A_{sh}) بصورت زیر داده می شود:

$$A_{sh} = (R_{sh} - \epsilon R_t V_{sh}) / R_{sh} \quad (50)$$

د) مدل هوزین - مدل هوزین بصورت زیر نوشته می شود:

$$\frac{1}{R_t} = \frac{S_w^2}{a\phi^{-m}R_w} + \frac{V_{sh}^2}{R_{sh}} \quad (51)$$

گروه (A_{sh}) استفاده شده در نمودار های مقاطع بحث شده در این مقاله بصورت زیر داده شده است:

$$A_{sh} = (R_{sh} - R_t V_{sh}^2) / R_{sh} \quad (52)$$

ح) مدل پتچت و راش - این مدل [۹] می تواند بصورت زیر نوشته شود:

$$S_w^n = \frac{aR_{mf}R_w}{\phi^m R_t (R_{mf} - R_w)} A_{sh} \quad (53)$$

$$A_{sh} = 1 - 10^{-SP/(60+0.1337T)} \quad (54)$$

که در آن (T) دمای سازند بر حسب فارنهایت و (SP) ، پتانسیل خودزاست. معادله (۵۳) می تواند بصورت زیر نوشته شود:

$$\log\left(\frac{R_t}{A_{sh}}\right) = -m \log \phi + \log \frac{aR_{mf}R_w}{R_{mf} - R_w} + \log S_w^{-n} \quad (55)$$

جدول ۱: اطلاعات ارزیابی شده سازند شیل دار، در چاه مورد نظر.

محدوده	R_f	ϕ	V_{ish}	B_{ish}	A_{ish}	R_f / A_{ish}
1	2.72	0.14	0.41	0.06	1.10	2.47
2	2.94	0.15	0.31	0.04	1.10	2.68
3	24.07	0.20	0.13	0.01	1.69	14.24
4	2.46	0.09	0.42	0.15	0.97	2.52
5	3.63	0.08	0.89	0.36	0.99	3.66
6	4.01	0.08	0.85	0.38	0.98	4.08
7	4.86	0.07	0.74	0.42	0.95	5.10

مقدار (aR_w) هم در تخلخل ۱۰۰٪ برابر است با: $aR_w = 1 \times 0.0175 = 0.0175$

محدوده های (۱)، (۲) و (۳) از معادلات (۳۱)، (۳۲) و (۹) بدست آمده اند در جدول (۲) ارایه می شوند. درجه اشباع آب محاسبه شده در جدول (۲) قابل مقایسه با مقادیر ۰.۵۸، ۰.۱۷ و ۰.۰۹۳ بدست آمده برای این چاه در محدوده های ۱ تا ۳ است. درجه اشباع آب با فرض $(n=2)$ محاسبه شده است.

جدول ۲: محاسبه (I_{ish}) و (S_w) .

محدوده	S_w		
	معادله (۳۱)	معادله (۳۲)	معادله (۹)
1	2.31	0.6575	0.6673
2	2.88	0.5897	0.5941
3	29.64	0.1837	0.1844

برای مثال تخلخل در محدوده (۱) برابر با (۰.۱۳۷) است. تخلخل این محدوده اگر خط اشباع ۱۰۰٪ در همان مقاومت ویژه محدوده (۱) قرائت شود، برابر با (۰.۰۹۳) خواهد بود. در نتیجه درجه اشباع آب از معادله (۹) برابر با:

$$S_w = (0.093 / 0.137)^{2.08/2} = 0.6673$$

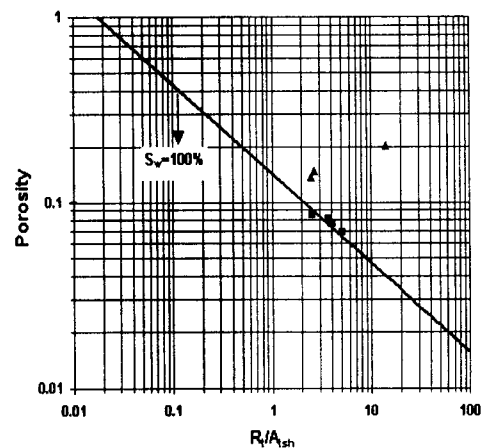
و برای معادله (۳۲) برابر با:

$$S_w = 2.31^{-1/2} = 0.6575$$

خواهد بود.

مورد دوم- این مورد استفاده از روش اندونزیا (معادلات (۴۷) و (۴۸)) را برای یک چاه دیگر در میدان مذکور قبلی توضیح می دهد. در شکل (۶) نمودارهای درون چاهی در این چاه دیده می شود. همانطوری که مشاهده می شود در این مطالعه یازده محدوده در نظر گرفته شده و برای ارزیابی مدل شیل

(ϕ) و (V_{ish}) برای این محدوده ها آورده شده است. همانطوری که مشاهده می شود، مقادیر (B_{ish}) و (A_{ish}) بترتیب از معادلات (۲۹) و (۲۸) محاسبه شده و ستون آخر مقادیر (R_f / A_{ish}) را که در نمودار متقاطع لگاریتمی (شکل (۵)) در مقابل تخلخل آمده نشان می دهد.

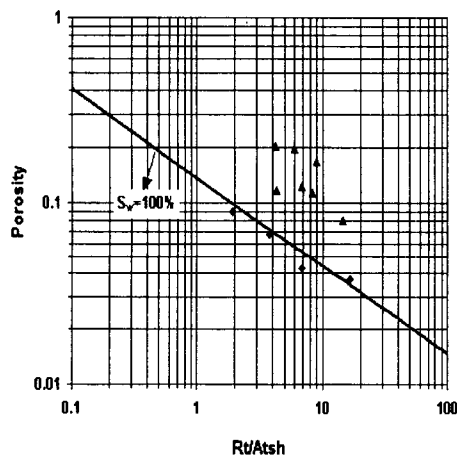


شکل ۵: نمودار متقاطع بیکت رسم شده بر اساس داده های مندرج در جدول (۱).

خط مستقیم با شیب منفی ($m=2.08$) از میان محدوده های (۴) و (۵) « (۶) و (۷) عبور می کند که نشان دهنده یک محدوده آبدار است. بنابراین می توان نتیجه گرفت که تعبیر و تفسیر با استفاده از معادله سیمندوکس معتبر است. لازم به ذکر است که مقدار m با روش سعی و خطا بدست آمده است یعنی اگر خط مستقیم مزبور از میان محدوده های مذکور عبور نکند، باید مقدار جدید دیگری برای (m) در نظر گرفت و روش را مجدداً تکرار کرد. شاخص مقاومت ویژه و درجه اشباع آب که برای

جدول ۳: اطلاعات ارزیابی شده سازند شیل دار، در چاه مورد نظر.

محدوده	R_t	ϕ	V_{tsh}	A_{tsh}	R_t / A_{tsh}
1	4.9450	0.1128	0.1715	0.5995	8.2485
2	2.7473	0.1170	0.1396	0.6402	4.2913
3	4.8011	0.1231	0.0955	0.7048	6.8117
4	2.9299	0.2018	0.2707	0.6878	4.2601
5	4.4280	0.1957	0.1718	0.7368	6.0097
6	7.1510	0.0797	0.1813	0.4884	14.6429
7	6.4747	0.1685	0.1443	0.7249	8.9315
8	5.0422	0.0375	0.1432	0.3010	16.7539
9	2.5838	0.0432	0.1160	0.3761	6.8705
10	2.2838	0.0676	0.0637	0.6072	3.7609
11	1.4083	0.0894	0.0403	0.7370	1.9110



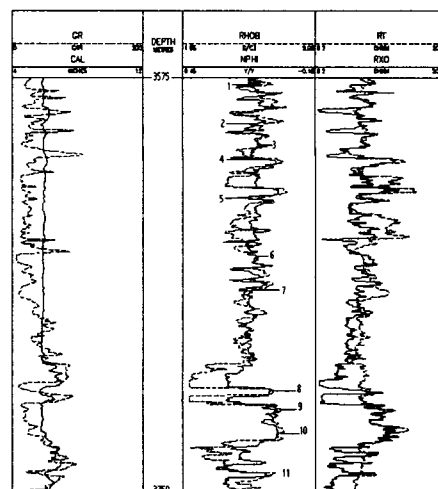
شکل ۷: نمودار متقاطع پیکت رسم شده بر اساس داده های مندرج در جدول (۳).

مقدار (aR_w) هم در تخلخل ۱۰٪ برابر است با:

$$aR_w = 1 \times 0.016 = 0.016$$

خط مستقیم با شیب منفی ($m=2.07$) از میان محدوده های (۸) و (۹)، (۱۰) و (۱۱) عبور می کند که نشان دهنده یک محدوده آبدار است. بنابراین می توان نتیجه گرفت که تعبیر و تفسیر با استفاده از معادله اندونزیا در این چاه معتبر است. اگر خط مستقیم مزبور از میان محدوده های مذکور عبور نمی کرد باید مقادیر جدید دیگری برای (a) و (m) در نظر گرفته و روش را مجدداً تکرار نمود. شاخص مقاومت ویژه و درجه اشباع آب که برای محدوده های (۵) تا (۱۱) از معادلات (۳۳)، (۳۴) و (۹) بدست آمده اند در جدول (۴) ارایه می شوند.

کل اندونزیا با فرض ($m=2.07$) و ($a=1$) انتخاب شده است.



شکل ۸: نمودارهای درون چاهی و نقاط انتخاب شده در یک چاه دیگر.

اطلاعات ورودی دیگر شامل:

در دمای مخزن ($R_w=0.0615$ ohmm) و (R_t)، ($R_{tsh}=4$ ohmm) می باشند. در جدول (۳)، (R_t)، (ϕ) و (V_{tsh}) برای این محدوده ها آورده شده است. همانطوریکه مشاهده می شود، مقدار (A_{tsh}) از معادله (۴۸) محاسبه شده و ستون آخر مقادیر (R_t/A_{tsh}) را که در نمودار متقاطع لگاریتمی در شکل (۷) در مقابل تخلخل رسم شده نشان می دهد.

$$S_w = 5.57^{-1/2} = 0.4237$$

جدول ۴: محاسبه (I_{sh}) و (S_w) .

محدوده	I_{sh}	S_w	
	معادله (۳۱)	معادله (۳۲)	معادله (۹)
1	5.6304	0.4214	0.4434
2	3.1594	0.5626	0.5822
3	5.5715	0.4237	0.4269
4	9.6936	0.3212	0.3319
5	12.8329	0.2791	0.2839
6	4.8700	0.4531	0.4993
7	13.9916	0.2673	0.2710

نتایج

در این مقاله روش هایی برای گسترش و بسط تکنیک پیکت از روی نمودارهای متقاطع قراردادی تخلخل و مقاومت ویژه برای مدل های شیل کل، لایه ای و پراکنده ارائه شدند. بررسی ها نشان داد که تحت شرایط مناسب، امکان ارزیابی سازندهای شیلی بدون دانش قبلی از (m) و (aR_w) وجود دارد. مزیت استفاده از نمودار های متقاطع لگاریتمی در این مطالعه اینست که تمام محدوده های شیلی تحلیل شده قابل نمایش در یک نمودار منفرد هستند، حتی اگر حجم شیل بطور پیوسته و یکنواخت تغییر کند. در این نمودار های لگاریتمی نمی توان مقدار ضریب (m) را برابر با (۲) در نظر گرفت، بنابراین، این روش می تواند بسادگی و سهولت برای تحلیل مخازن، با شکستگی طبیعی بسط داده شود.

درجه اشباع آب محاسبه شده در جدول (۴) قابل مقایسه با مقادیر

$$0.44, 0.58, 0.43, 0.33, 0.28, 0.50, 0.27$$

بدست آمده برای این چاه در محدوده های (۱) تا (۷) است. درجه اشباع آب با فرض $(n=2)$ محاسبه شده است. برای مثال تخلخل در محدوده (۳) برابر با (0.123) است. تخلخل این محدوده اگر خط اشباع ۱۰۰ درصد در همان مقاومت ویژه محدوده (۳) قرائت شود، برابر با (0.054) خواهد بود. در نتیجه درجه اشباع آب از معادله (۹) برابر با:

$$S_w = (0.054 / 0.123)^{2.07/2} = 0.4269$$

و برای معادله (۳۴) برابر است با:

مراجع

- 1 - Aguilera, R. (1980). *Naturally fractured reservoirs*: Penn-Well Books, Tulsa, Oklahoma, P. 703.
- 2 - Aguilera, R. (1990). "A new approach for analysis of the nuclear magnetic log-resistivity log combination." *Journal of Canadian Petroleum Technology*, V. 29, No. 1, PP.67-71.
- 3 - Clavier, C., Coates, G. and Dumanoir, J. (1984). "The theoretical and experimental bases for the dual water model for interpretation of shaly sands." *Society of Petroleum Engineers Journal*, Vol. 24, PP.153-169.
- 4 - Dewan, J. (1983). *Essentials of modern open-hole log interpretation*. PennWell Books, Tulsa, Oklahoma, P. 361.
- 5 - Fertl, W. H. (1987). "Log-derived evaluation of shaly classic reservoirs." *Journal of Petroleum Technology*, Vol. 39, PP.175-194.
- 6 - Johnson, W. L. and Linke, W. A. (1978). "Some practical applications to improve formation evaluation of sandstones in the Mackenzie Delta." *Paper C, in 19th Annual Logging Symposium Transactions*.
- 7 - Koerperich, E. A. (1974). "Application of waxman-smits and archie equations for determination of oil saturation in shaly sand reservoirs." SPE-5038: *Society of Petroleum Engineers, presented at 49th Annual Technical Conference and Exhibition*, P. 8.

- 8 - Morris, R. L. and Biggs, W. P. (1967). "Using log-derived values of water saturation and porosity." *Paper X, in 18th Annual Logging Symposium Transaction: Society of Professional Well Log Analysts*, P. x1-12.
 - 9 - Patchett, J. G. and Rausch, R. W. (1967). "An approach to determining water saturation in shaly sands." *Journal of Petroleum Technology*, Vol. 19, PP. 1395-1405.
 - 10 - Pickett, G. R. (1966). "A review of current techniques for determination of water saturation from logs." *Journal of Petroleum Technology*, Vol.18, PP. 1425-1433.
 - 11 - Pickett, G. R. (1973). "Pattern recognition as a means of formation evaluation, paper A, in 14th Annual Logging Symposium Transactions." *Society of Professional Well Log Analysts*, PP.A1-21.
 - 12 - Poupon, A., Loy, M. E. and Tixier, M. P. (1954). "A contribution to electric log interpretation in shaly sands." *Transactions of the American Institute of Mechanical Engineers*, Vol. 201, PP. 138-145.
 - 13 - Sanyal, S. K. and Ellithorpe, J. E. (1978). "A generalized resistivity-porosity crossplot concept, SPE-7145." *Society of Petroleum Engineers, presented at the California Regional Meeting*, P.8.
 - 14 - Schlumberger, (1979). *Log interpretation principles*. Schlumberger Limited, New York, P. 90.
 - 15 - Waxman, M. H. and Smits, L. J. M. (1968). "Electrical conductivities in oil-bearing shaly sands." *Society of Petroleum Engineers Journal*, Vol. 8, PP. 107-122.
 - 16 - Waxman, M. H. and Thomas, E. C. (1974). "Electrical conductivities in shaly sands –I: The relation between hydrocarbon saturation and resistivity index; II: The temperature coefficient of electrical conductivity." *Journal of Petroleum Technology*, Vol. 14, PP.213-225.
-