



الفصل السابع

التسجيلات الجيوفيزيائية للآبار Geophysical Well Logging

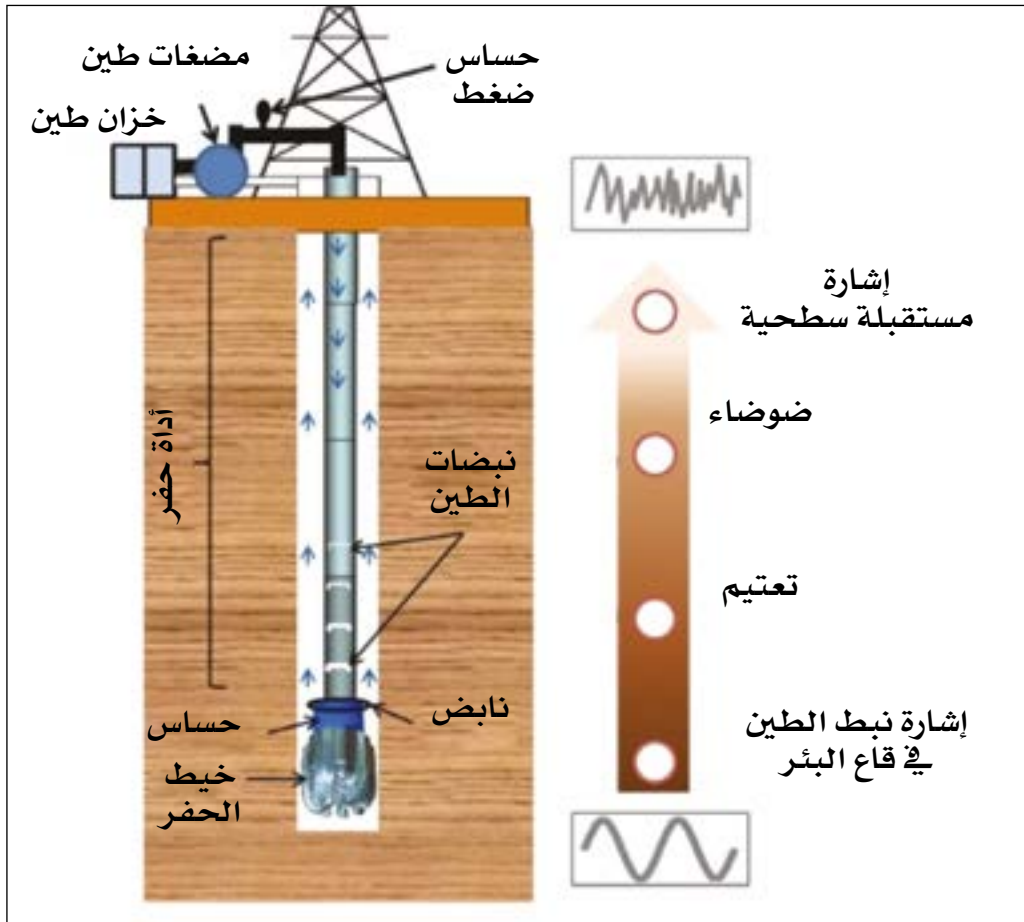
مقدمة

يمكن أن تؤرخ تسجيلات الآبار الجيوفيزيائية إلى أول حدث تم تسجيله في عام 1927م، بواسطة الأخوين شلمبرجير مع آخرين، عندما قاموا بقياس المقاومة الكهربائية في بئر محفورة سابقاً. لذلك تعتبر التسجيلات الكهربائية هي أول قياسات تسجيلات آبار على أرض الواقع. هذا القياس الأول كان عبارة عن تسجيل المقاومة للمكونات الجيولوجية كدالة في العمق، وتم رسم هذا التسجيل بشكل اجتهادي يدوياً. سوف يتم شرح ملخص لهذه التسجيلات الكهربائية وأجهزتها الأساسية دون الدخول في التصحيحات والتفسير الدقيق للبيانات.



تتم عملية التسجيل البئري بواسطة أجهزه فيزيائية مصممة خصيصاً للعمل داخل بيئة البئر، تعرف باسم مسبار البئر Sond (الشكل 1.7)، لتقوم بتسجيل العديد من الخصائص الفيزيائية للتتابعات المحفورة بغرض التعرف على خصائصها الصخرية ومحتواها من الموائع. ويتم التسجيل من أسفل إلى أعلى بعد إتمام حفر البئر أو أثناء حفرها فيما يعرف بأحدث التقنيات المستخدمة الآن، وهو التسجيل أثناء الحفر (Logging while drilling (LWD). تشمل هذه القراءات المسجلة؛ المقاومة الكهربائية والجهد الذاتي وأشعة جاما (الطبيعية أو الصناعية) والنيوترونات المشعة والكثافة والحثية النوعية المغناطيسية والسرعة الصوتية. يتم تسجيل هذه الخصائص الفيزيائية بهدف تحديد التالي:

- التعرف على المتكون الصخري.
- تحديد خواص صخر المكنن (المسامية، النفاذية، التشبع المائي،....).
- تحديد نوع المائع أو السائل الموجود؛ ماء ونفط وغاز.
- تحديد النطاق المنتج وعمقه وسمكه.
- تحديد مواقع الحدود الفاصلة بين الموائع.
- تحديد خصائص صخر المصدر.
- المضاهاة بين الآبار.
- تحديد الخواص البتروفيزيائية للمتكون الصخري.
- تحديد اتجاه ميل الطبقات، وعمل خرائط جيولوجية تحت سطحية.

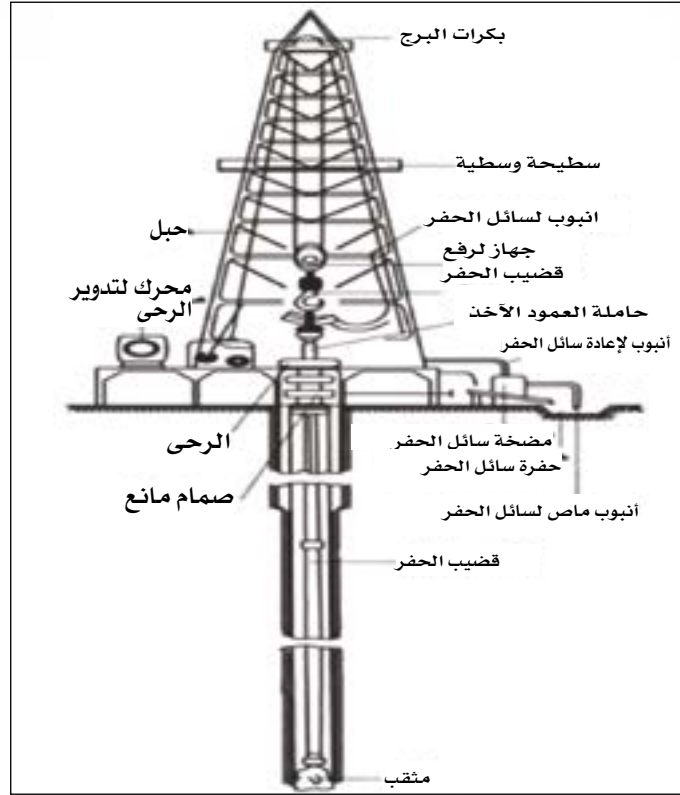


الشكل 1.7: عناصر أجهزة تسجيلات الآبار: مجس/مسبار القياس، والكابل، ومعمل مختبر البيانات المتنقل

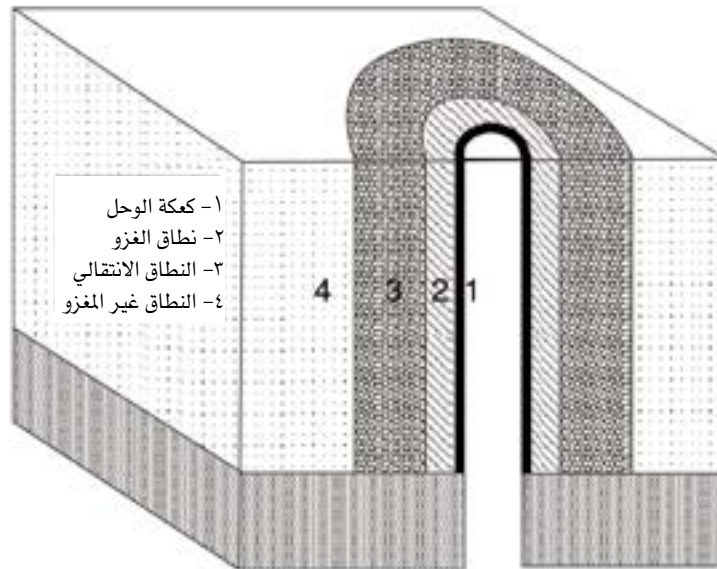


1.7 بيئة البئر Borehole Environment

لفهم الخصائص الفيزيائية التي يتم قياسها من خلال جيوفيزياء الآبار، تم إنشاء نموذج بسيط لبيئة البئر ممثلاً لآبار رأسية في وجود طبقات أفقية. بيئة البئر والتي من خلالها يتم قياس تسجيلات الآبار، هي ذات أهمية من وجهة نظر تصميمات أجهزة القياس وقيود التشغيل المرتبطة بها (كامل، 2020، تقرير غير منشور). علاوة على ذلك تعتبر هذه البيئة مهمة على أساس الاضطراب الذي تسببه في المتكون المحيط الذي يتم قياس خواصه. بداية هناك طرق متعددة للحفر، أكثر هذه الطرق شيوعاً هي طريقة الحفر الرحوي Rotary drilling (الشكل 2.7). خلال عملية الحفر تخرج كسارة الصخور الفتاتية Cuttings بواسطة سائل الحفر Drilling Mud المستخدم. كما يقوم سائل الحفر بوظائف أخرى أهمها؛ متكون أسطح لزجه تسهل عملية الحفر مع الأعماق، وتُبرد رأس الحفار الذي ترتفع درجة حرارته نتيجة الاحتكاك بالصخور الصلدة. وتبرز أهم فائدة لسائل الحفر في أنه يمنع تدفق موائع الطبقات المحفورة (خاصة المنفذة منها) إلى السطح فتعوق عملية الحفر، وذلك لأن سائل الحفر يُدفع في البئر تحت ضغط أعلى مما هو متوقع من الموائع الموجودة في التتابع الطبقي المحفور. ونتيجة للتباين في الضغط ما بين سائل الحفر داخل البئر وموائع الطبقات المنفذة، فإن رشيح سائل الحفر يدخل إلى الطبقات المنفذة في عمليه تعرف بالغزو، ليزيح ما أمامه من موائع أصلية قابلة للحركة في الطبقات المنفذة، مكوناً نطاقاً يُعرف بنطاق الغزو Invaded zone، تاركاً طبقة رقيقة من الطين على جدار البئر أمام تلك الطبقات المنفذة، تعرف باسم كعكة الوحل Mud cake، والتي تعتبر في بعض الأحوال من الدلائل المباشرة على وجود صخر مكمني منفذ. ويقل تأثير الغزو برشيح سائل الحفر بعيداً عن جدار البئر، مكوناً نطاقاً تختلط فيه موائع الطبقة الأصلية مع رشيح سائل الحفر، ويعرف باسم النطاق الانتقالي Transition zone إلى أن ينعدم تماماً تأثير رشيح سائل الحفر، فتظل موائع الطبقة الرئيسية دون التأثير بسائل الحفر، فيما يعرف بالنطاق عديم الغزو Uninvaded zone، كما هو موضح بالشكلين (3.7 و 4.7).

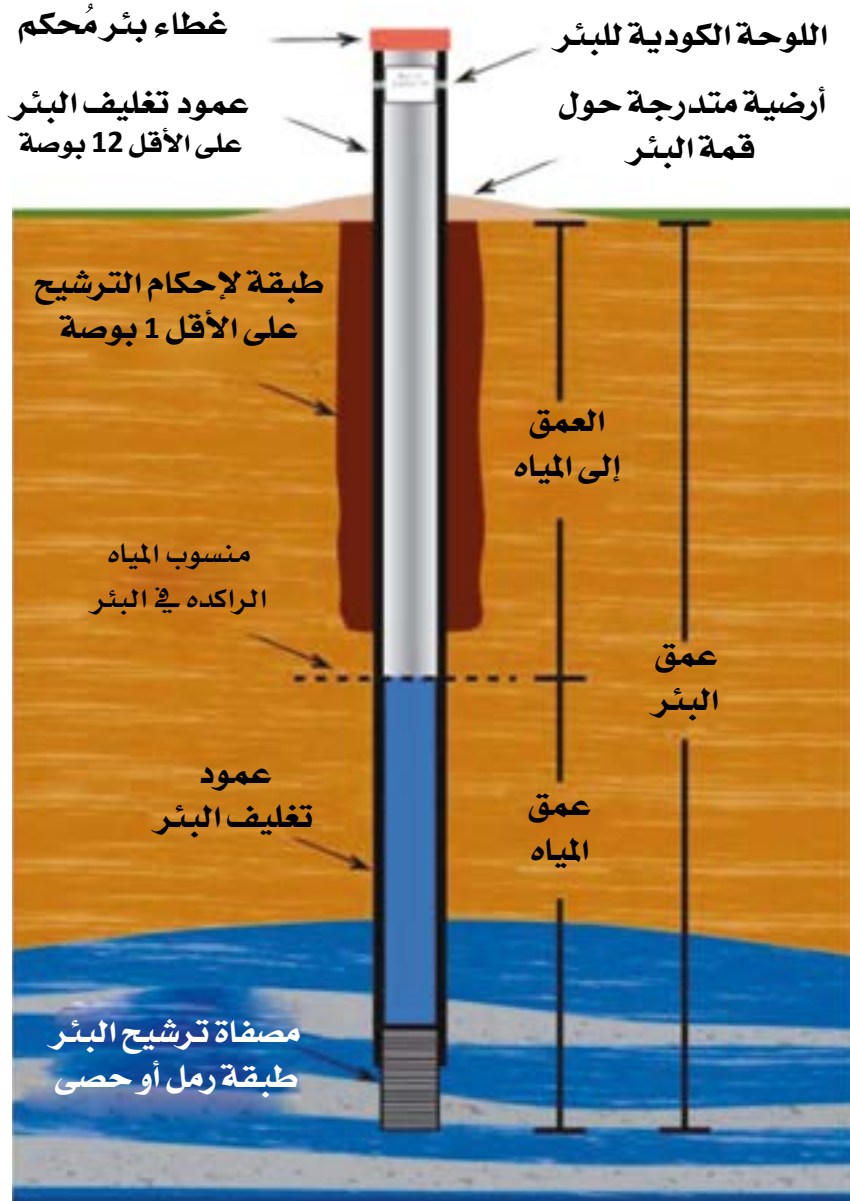


الشكل 2.7: يوضح عملية الحفر الرحوي



الشكل 3.7: نطاقات البئر المختلفة الناتجة من اندفاع سائل الحفر في صخر مسامي منفذ





الشكل 4.7: نموذج تخطيطي للبئر والنطاقات المختلفة في المتكون المستخدم لوصف قياسات تسجيلات الآبار الكهربائية وتصحيحها.

2.7 سجل الجهد الذاتي Self Potential Log

تعتمد الموصلية الكهربائية في الصخور الرسوبية أساساً على التواجد الإلكتروليتي الناتج من وجود مياه وأملاح أو تواجد المياه مع الهيدروكربون في الفراغات البينية. يعتمد مصدر الجهد الذاتي (الجهد التلقائي) بصفة أساسية على الجهود الكهروكيميائية Electrochemical potentials. تشمل الجهود الكهروكيميائية ذات الاهتمام كلا من جهد التقاء السائل Liquid junction potential وجهد الغشاء Membrane potential. يبين (الشكل 5.7) رسماً توضيحياً لتوليد جهد التقاء السائل، حيث يتواجد إلى اليسار محلول ملحي من كلوريد الصوديوم NaCl ذي تركيز أقل. أما إلى اليمين فيتواجد تركيز أيوني أعلى، إذا حصرنا أنفسنا في حالة كلوريد الصوديوم NaCl، كملح شائع وموجود في مياه المتكون، سنجد أن أيون Na^+ يكون أصغر إلى حد كبير من أيون Cl^- ، وحيث أن الماء يعتبر ثنائي القطب Dipole، فهذا يؤدي إلى أن الأيونات الموجبة Cations والأيونات السالبة Anion ترتبط بمجال دائري من جزيئات المياه حولها من خلال الجذب الإلكتروليتي. مع ذلك يسبب الحجم الأصغر من الكاتيون (الأيون الموجب) إلى قوة ربط أكبر لجزيئات المياه، وذلك يعود إلى توزيع الشحنة السطحية. ولأن أيونات الصوديوم والكلور لهما قابلية حركة مختلفة، حيث $\mu_{Cl} > \mu_{Na}$ ، هذا يؤدي إلى انفصال الشحنات، فتهاجر أيونات الكلور ذات القابلية للحركة الأعلى إلى منطقة التركيز الأقل، مما يؤدي إلى زيادة في الشحنات السالبة إلى اليسار، وزيادة في الشحنات الموجبة إلى اليمين، كما هو مبين في (الشكل 5.7 - أ).

يستمر تيار الانتشار بتجميع شحنات سالبة إضافية في المنطقة ذات التركيز الأيوني الأقل، وذلك أمام الطبقات المنفذة في البئر، والتي هي في العادة، حجر الرمل وحجر الجير. مع استمرار فصل الشحنات المتراكمة يؤدي ذلك إلى زيادة تولد المجال الكهربائي (E)، تأثير هذا المجال الكهربائي يفرض سرعة اندفاع للأيونات، فيزيد من سرعة الأيونات الموجبة المتجهة لليساار ويبطئ من حركة الأيونات السالبة المتجهة نحو اليسار. يزداد هذا المجال



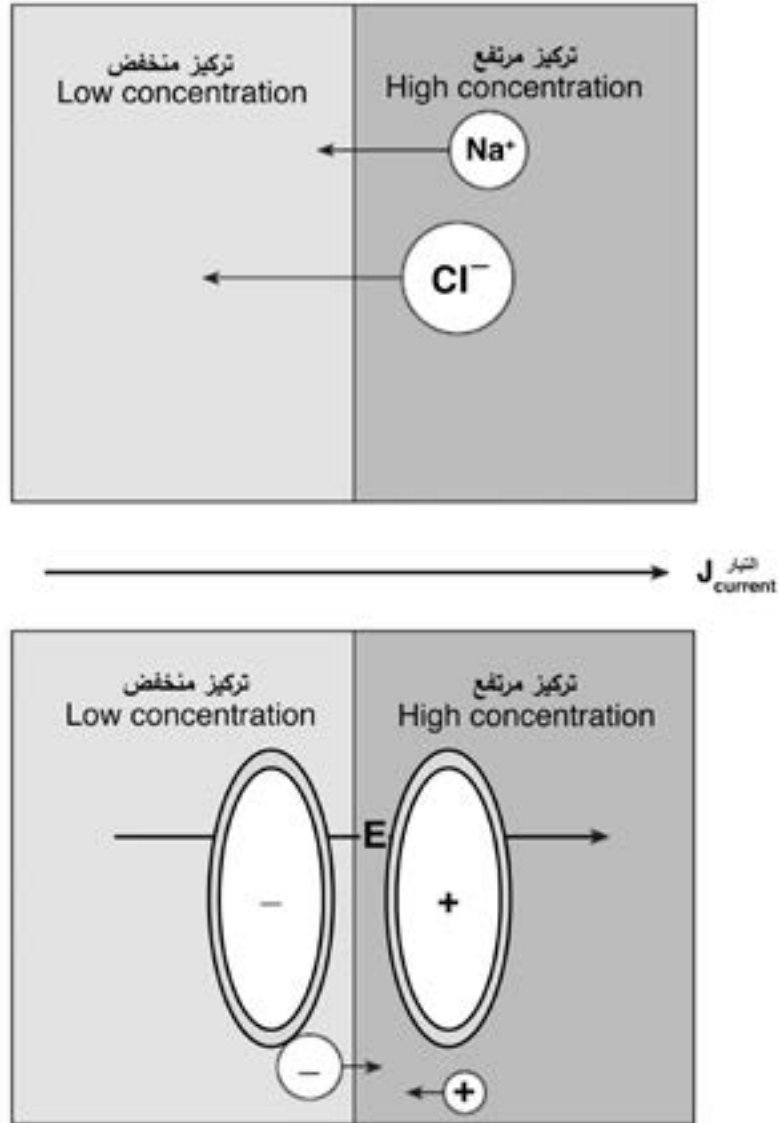
الكهربائي إلى أن يصبح انتشار الأيونات السالبة مساوياً للأيونات الموجبة، مؤدياً إلى اتزان ومشكلاً مجالاً كهربائياً ثابتاً، مع عدم وجود فصل إضافي في الشحنات. مع ذلك وبالرغم من هذا التعديل في الانتشار الأيوني إلا أنه يستمر.

أما جهد الغشاء الشكل (6.7) فينتج عند وجود طبقة من الطفل Shale، والتي تمنع مرور أيونات الكلور السالبة، وتسمح فقط بمرور أيونات الصوديوم الموجبة، ليتكون جهداً كهربائياً موجباً أمام طبقات الطفل في البئر، كما هو مبين في (الشكل 5.7 - ب).

وكما هو معروف، فإن مقاومة رشيح سائل الحفر (R_{mf})، Mud filterate resistivity، هي أكبر من مقاومة مياه المتكون (R_w) Formation water، يمكن كتابة الجهد الذاتي الناتج من جهد التقاء المائع Liquid junction potential بالمعادلة (1).

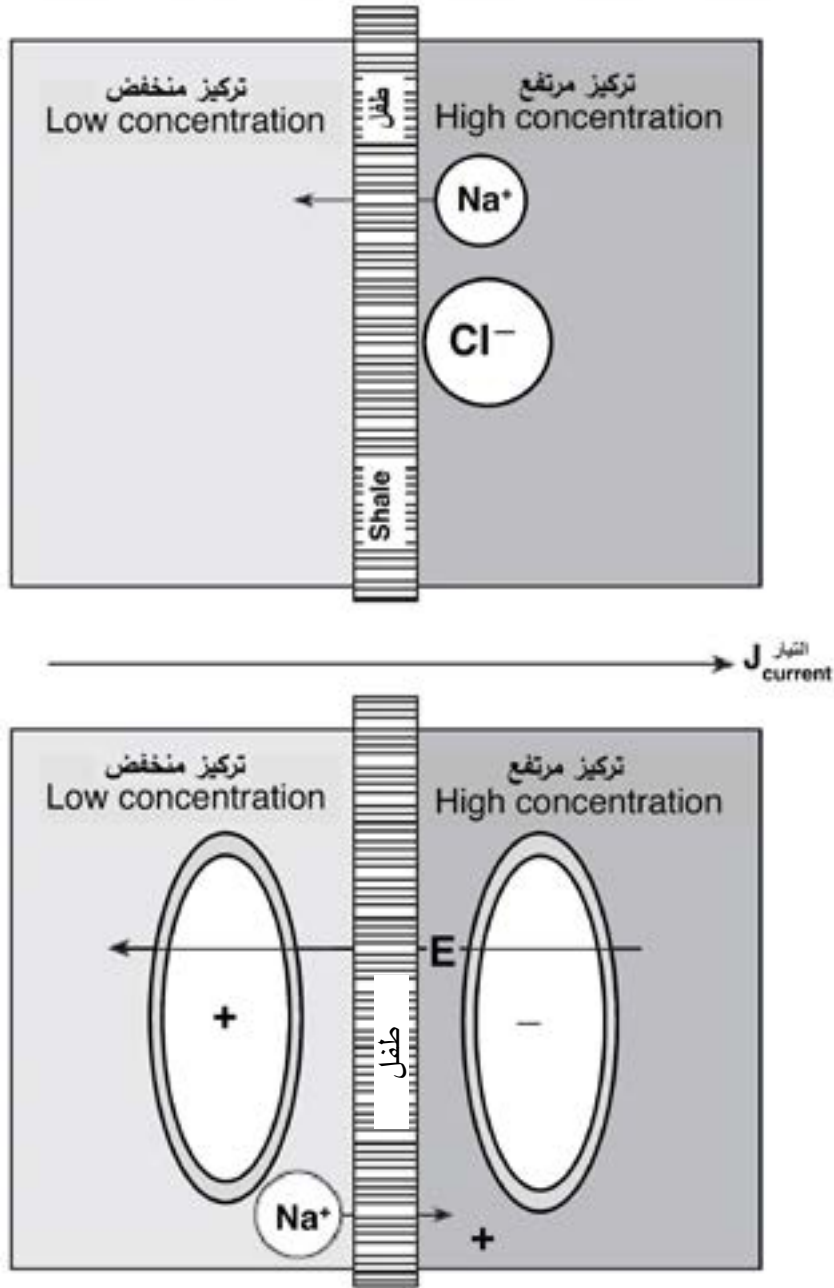
$$V_{l-j} = - C \log_{10} \frac{R_{mf}}{R_w} \quad (1)$$

يبين (الشكل 7.7) تمثيلاً خطياً للدائرة المكونة للجهد الذاتي (SP). تناظر الخلية التي يرمز لها (E_d) جهد التقاء السائل، ويتم تخطيطه باستقطابية دائرية متجهة إلى تركيز الإلكترونات الأعلى داخل ماء المتكون، عن ما هو في نطاق رشيح سائل الحفر. وكما هو مبين بالشكل، هناك مصدر إضافي للجهد الذاتي (SP) مصاحب لطبقة الطفل، هي ناتجة من جهد الغشاء Membrane potential الذي يتولد في وجود الطفل المحتوي على معادن الطين، والتي يحتوي سطحها على شحنات سالبة.



الشكل 5.7 - أ: عرض تخطيطي للميكانيكية المسئولة عن توليد جهد التقاء المائع. يؤدي اختلاف التركيز المبين بالجزء العلوي إلى الانتشار، حيث تؤدي السرعة الأعلى للكلور إلى الفصل بين أيون الصوديوم وأيون الكلور

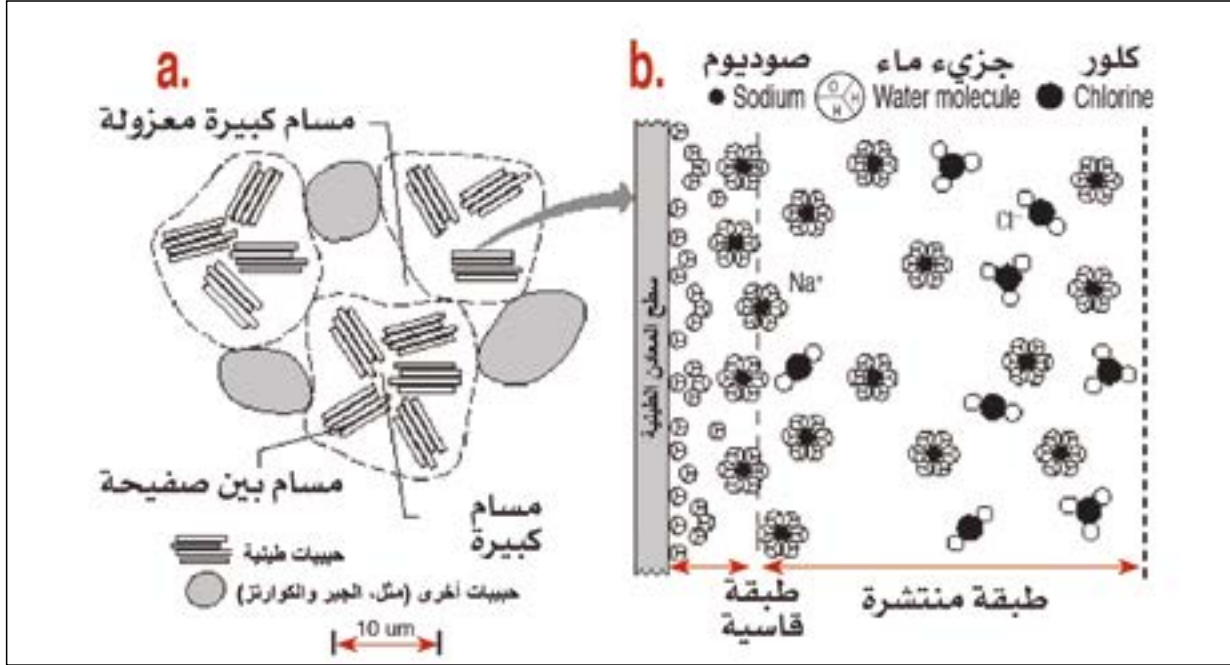




الشكل 5.7 - ب: رسم تخطيطي للميكانيكية المسؤولة عن توليد جهد الغشاء.

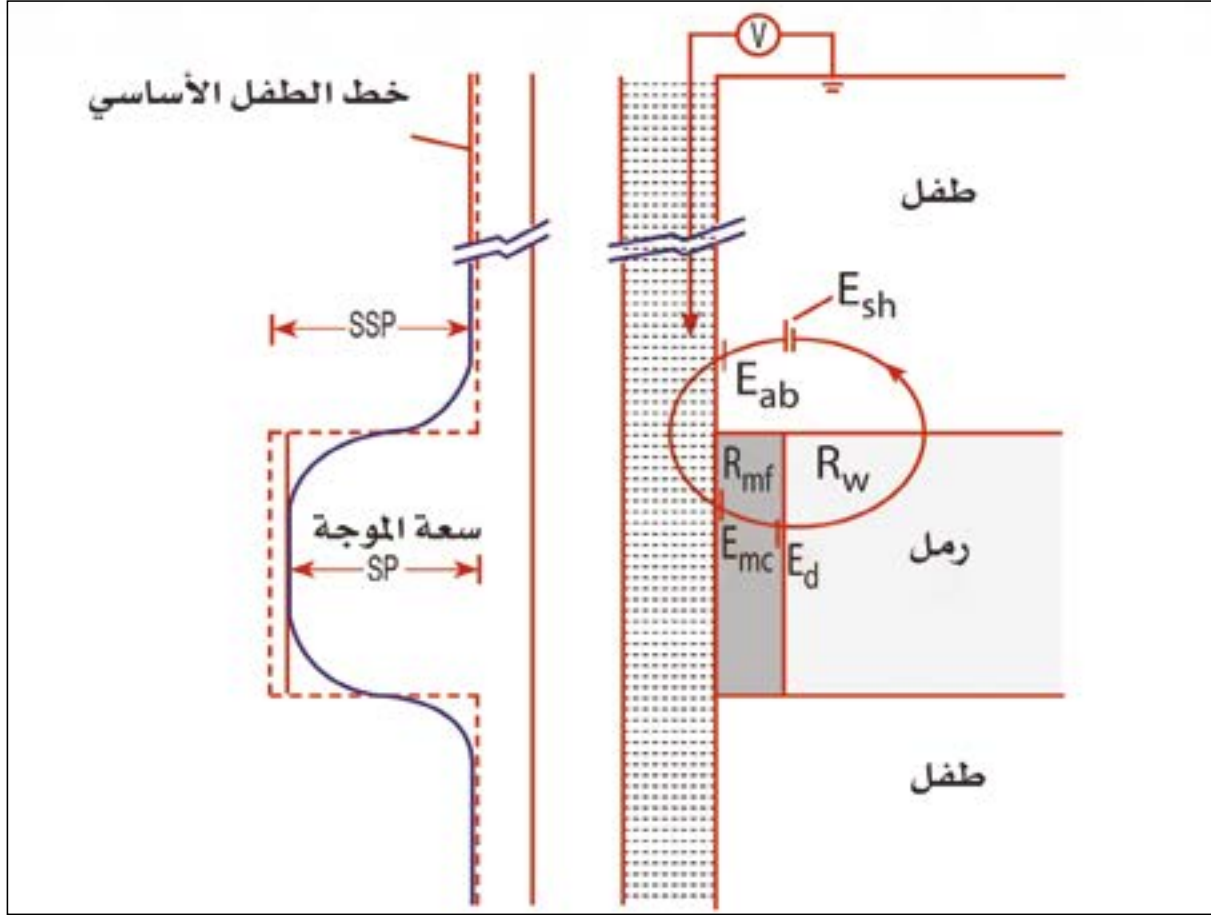
والآن ماذا يعني جهد الغشاء؟ في البداية يعرف الطفل على أنه خليط من جزيئات ذات حبيبات دقيقة، ينتمي معظمها لمعادن الطين كما هو واضح في الجانب الأيسر من (الشكل 6.7). لنفترض أن الطين غير منفذ تقريباً لتدفق المائع، لكنه مازال قادراً على النقل الأيوني، فعلى الرغم من تغير واعتماد هذه الخاصية على وجود معادن الطين، يتصرف الطين كغشاء انتقائي للكتيونات Cation-selective membrane. هذه الخاصية ترتبط بشرائح سليكات الألومنيوم التي تشكل التركيب الأساس لمعادن الطين. تتواجد شحنة سالبة قوية على سطح معادن الطين تنتمي إلى روابط غير متزاوجة أيونياً من الأوكسجين والسيليكون (O و Si). عند تعرض جزيئات المعادن الطينية لمحلول أيوني يحتوي مثلاً على $(Cl^- و Na^+)$ ، ستقوم سطوح هذه المعادن بطرد الشحنات السالبة، ويجذب الشحنات الموجبة، مكونة طبقة مزدوجة كهربائية Double electrical layer. بالتالي ستسود الكتيونات في المائع بالقرب من طبقات الطين. نتيجة قوة الطرد الإلكتروستاتيكي للأنيونات، وفي وجود خليط من معادن الطين مع جزيئات معدنية أخرى صغيرة، ومع وجود فراغات بينية تسمح بالتدفق الهيدروليكي للماء، وخاصة الكتيونات، فتكون قادرة على الانتشار خلال الأسطح المشحونة من التركيز الأعلى للتركيز الأقل، في حين تُستثنى أيونات (Cl^-) من ذلك. مثل هذه العملية من الانتشار تؤدي إلى تجمع شحنة موجبة على الجانب ذي التركيز الأيوني الأقل عند حد أو حاجز الطفل Shale barrier، لتنتج مجالاً كهربائياً مصاحباً لهذه العملية. للمساعدة في وصف جهد الغشاء، يتم الرجوع للشكلين (5.7 - ب) و (7.7)، اللذين يظهران إعداداً مبسطاً لتقييم جهد الغشاء، حيث يفصل حاجز طيني شبه منفذ المحاليل ذات الأملاح المختلفة. في هذه الحالة يتم إعاقة عملية الانتشار الطبيعي بسبب الشحنة السطحية السالبة للطين. تمنع هذه الشحنة السالبة أيونات الكلور (Cl^-) رغم سهولة حركتها من عبور غشاء الطفل Shale membrane، في حين أن أيونات الصوديوم (Na^+) الأقل حركة تستطيع أن تعبر هذا الغشاء بسهولة. يؤدي ذلك إلى اختزال قابلية حركة الكلور إلى الصفر. على أية حال، يكون هناك تجمع من الشحنات الموجبة إلى اليسار أي إلى الاتجاه الأقل تركيزاً.





الشكل 6.7 : (إلى اليسار) طبقة الطفل التي تتكون من حبيبات معدنية صخرية وجزيئات من الطين. (إلى اليمين) توزيع الأيونات القريبة من واجهة طبقة الطين (Revil & Leroy, 2004).

عندما يكون تركيز NaCl في ماء المتكون أقل منه في سائل الحفر Drilling mud، يزداد الجهد مؤدياً إلى جهد سالب أكثر أمام طبقة الرمل عما هو في نطاق طبقة الطفل. (الشكل 7.7) يبين كيفية قياس الجهد، باستخدام إلكتروود في البئر وآخر على مسافة بعيدة على السطح. يمثل خط الطفل الأساسي Shale base line الجهد الطبيعي بين الإلكتروودين في حالة عدم وجود تأثيرات كهروكيميائية، وفي صورته المثالية يكون على هيئة خط مستقيم يمتد من القمة إلى القاع. أما الجهد الذاتي الإستاتيكي (SSP) فهو الجهد المثالي المولد بواسطة التأثيرات الكهروكيميائية عندما تمر من طبقة الطفل إلى طبقة رملية سميكة ونقية (خالية من الطين) إذا لم يكن هناك تيار متدفق.



الشكل 7.7: عرض تخطيطي لنشوء الجهد التلقائي في البئر (Dewan, 1983)

من الناحية العملية، يقيس الالكترود فقط التغير في الجهد داخل البئر. وعلى الرغم أن سائل الحفر Drilling mud عادة ما يكون أقل مقاومة من مقاومة المتكون، إلا أن منطقة تدفق التيار أقل بكثير في البئر عن منطقة المتكون، لذلك فإن مقاومة البئر تكون عادة أعلى بكثير من مقاومة المتكون. بالتالي معظم الفقد في الجهد يحدث في البئر، علمًا أن أعلى جهد ذاتي يتم قياسه ويقترب من قيمة (SSP) يكون في مركز البئر. في أفضل الحالات، يسمح مقياس الجهد الذاتي بالتعرف على النطاقات المنفذة وتحديد مقاومة (RW) ماء المتكون Formation water resistivity. يشير أي انحراف لمقياس (SP) على أن النطاق المقابل مسامي ومنفذ، ويحتوي على مياه ذات تركيز أيوني مختلف عن تركيز سائل الحفر. يمكن

تحديد قيمة (RW) من خلال المعادلة (1). وحيث أنه يمكن قياس المقاومة لرشيح سائل الحفر Mud filterate resistivity، في هذه الحالة يمكن حساب مقاومة المتكون باستخدام عوامل معلومة جيداً لمحاليل NaCl. كما يستخدم مقياس الجهد الذاتي للإشارة إلى كمية الطين في صخر المكمن، ووجود الطين الذي يكسو الحبيبات، وحلقوم المتكون سيعرقل قابلية حركة أيون الكلور بسبب الشحنات السطحية السالبة، وبالتالي يفسد تطوير جهد التقاء السائل. قيمة الجهد الذاتي المولدة من نطاق يحتوي على رمل طفلي Shaly sand يسمى الجهد الإستاتيكي الخادع أو الزائف (PSP) Pseudo static potential، وذلك عندما لا يكون هناك تدفق للتيار.

1.2.7 مثال لسجل الجهد الذاتي Example of SP Log

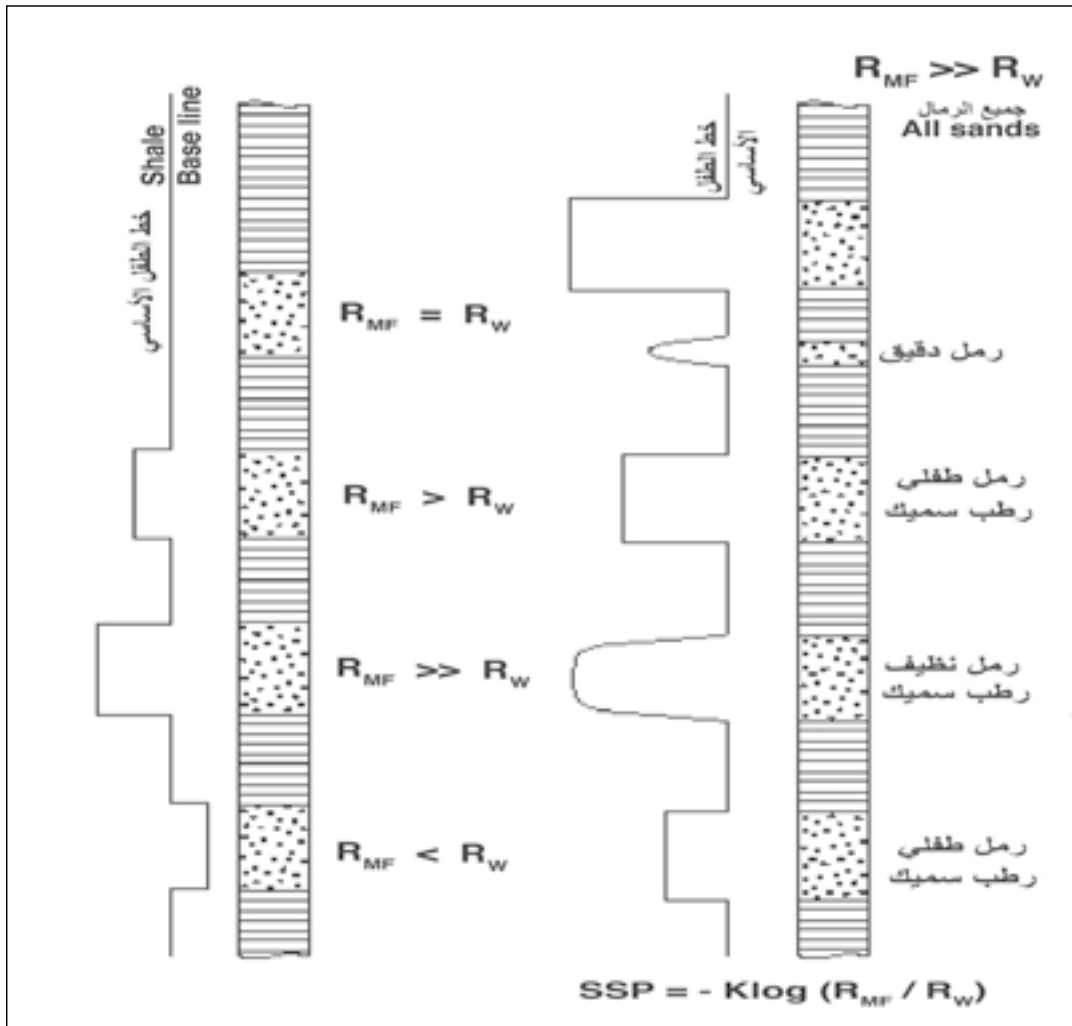
ربما تكون طريقة قياس الجهد الذاتي مناقضةً للصورة التكنولوجية الفائقة للعديد من تقنيات تسجيلات الآبار. العنصر الحساس في جهاز قياس الجهد الذاتي هو عبارة عن إلكترود (يركب في أغلب الأحيان في كابل معزول يعرف باللجام (bridle))، ويتصل بالإلكترود الأرضي على السطح كما هو مبين (بالشكل 7.7). قياس الجهد الناتج بين هذين الإلكترودين يعبر عن الجهد الذاتي. يوضح (الشكل 8.7) بعض السلوك المميز والمتوقع من تسجيل مقياس الجهد الذاتي. يظهر على يسار الشكل تتابع من طبقات الطين والرمل النقي ممثلة سوية مع استجابة مثالية مناظرة من مقياس الجهد الذاتي. يشار إلى مقياس الخط المقابل لطبقة الطفل Shale base line، والانحراف عن هذا الخط إلى اليسار يعني زيادة القيمة السالبة. في النطاق الأول الممثل بالرمل لا يوجد هناك انحراف، نظراً لتساوي نسبة ملوحة مياه المتكون والطين الراشح. في حين، يبين النطاقان التاليان زيادة لقيمة الجهد الذاتي (SP) التي تصل إلى أعلى قيمة نظراً للفارق الأكبر للمقاومية بين كل من رشيح سائل الحفر ومياه المتكون. أما النطاق الأخير، فيظهر فيه الانحراف ناحية اليمين لخط الطين ليناظر حالة رشيح سائل الحفر، والذي هو أكثر ملوحة من موائع المتكون الأصلي.

الجزء الثاني إلى اليمين (الشكل 8.7) يوضح حالات عديدة، في وجود فارق مُعطى بين ملوحة رشيح سائل الحفر وملوحة ماء المتكون، حيث انحراف مقياس (SP) لم يصل إلى

القيمة العظمى التي ظهرت في وجود رمل سميك ونقي. النقطة الأولى تتمثل في أن الانحراف ينخفض إذا كانت طبقة الرمل غير سميكة بدرجة كافية، وبالتالي لا يحدث فرق جهد كافٍ داخل البئر. والسبب نفسه يكون الانتقال عبر حدود الطبقة أبطأ بكثير. من الضروري أن يكون سمك الطبقة أكبر بـ 20 ضعفاً من قطر البئر، مع الأخذ في الاعتبار عمق الغزو والفارق بين المقاومة لنطاق الغزو وسائل الحفر، حتى يصل إلى قيمته الكاملة.

النقطة الثانية تشمل تأثير الطين Clay، حيث أن وجوده يؤدي إلى تقليل قيمة (SP). النقطة الثالثة تتمثل في دراسة تأثير النفط أو الغاز، فعند وجود نطاقات محتوية على رمل نقي Clean sand فإن الجهد الكهروكيميائي لا يتأثر بوجود النفط أو الغاز، إلا أن مقاوميات المتكون تكون أعلى، والانتقال يكون أبطأ عند حدود الطبقة، وفي هذه الحالة، قد نحتاج لطبقة ذات سمك أكبر للحصول على قيمة كاملة للجهد الذاتي، وعلى الرغم من ذلك، فإن تأثير النفط والغاز يكون أقوى في المتكون من الرمل الطفلي Shaly sand. وهنا ينخفض الجهد الكهروكيميائي عن الناتج من المتكون من الرمل حامل للمياه، لأن المياه تكون أقل في الفراغات البينية، ومن ثم فإن تأثير جزيئات الطين المشحونة على السطح يكون نسبياً أعلى.





الشكل 8.7: ملخص تخطيطي لسلوك منحنى الجهد الذاتي لظروف مختلفة (Asquith & Gibson, 1982)

3.7 الأجهزة الأساسية لقياس المقاومة Basic Instruments for Measuring Resistivity

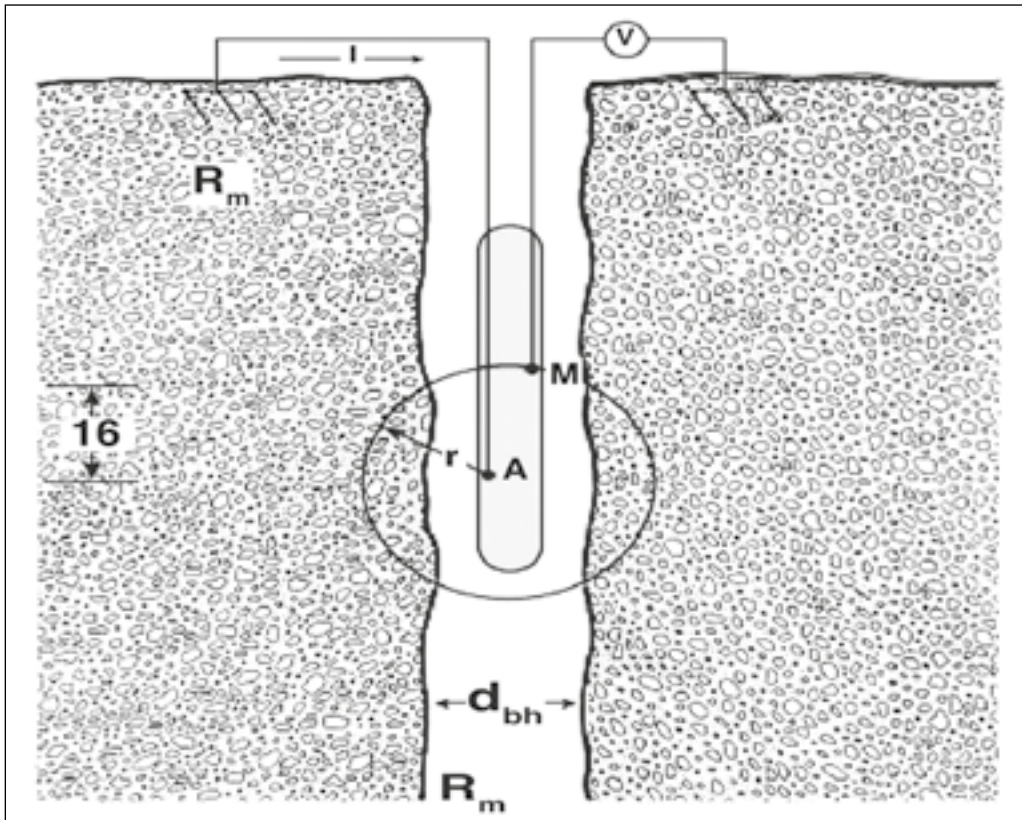
تعتمد موصلية الصخور على مقاومة المياه الموجودة في الفراغات وكميتها. كما تعتمد المقاومة أيضاً ولكن بدرجة أقل على نوع الصخر ومحتواه من الطين ونسيجه؛ حجم الحبيبات، وتوزيع الفراغات، ونسبة الطين، والمعادن الموصلة). تعتمد موصلية الصخور الرسوبية أيضاً وبدرجة قوية على درجة الحرارة. سوف يتم تتبع التقدم التاريخي للأجهزة المستخدمة في قياس المقاومة بدايةً من الجهاز العادي Normal device، إلى سجل البئر الجانبي المزدوج المركز التقليدي Traditional focused dual laterologs، ثم جهاز الحث.

يبين (الشكل 9.7) النوع العادي القصير، أول الأجهزة الاقتصادية المستخدمة. يظهر هذا الشكل جهاز القياس الذي فيه يقع إلكترود التيار (A) وإلكترود القياس (M) وهما داخل البئر، في حين أن القطبين الآخرين هما على سطح الأرض. تكون المسافة بين إلكترود التيار وإلكترود الجهد 16 بوصة كما هو مبين بالشكل. ومن هنا تم إعطاء المفهوم «قصير» لهذا السجل. هناك مشكلتان أساسيتان مصاحبتان للجهاز العادي القصير، ومرتبطتان بوجود البئر التي تكون عادة مليئةً بسائل الحفر الموصل. تتأثر هذه القياسات بمقاومية سائل الحفر وحجم البئر. عندما تكون البئر مليئةً بسائل الحفر الموصل بطريقة جيدة، يميل التيار للتدفق في سائل الحفر بدلاً من المتكون. كما أن التيار يتدفق من خلال طين الحفر إلى نطاقات غير النطاق الموجود مباشرة في مواجهة نقاط القياس كما هو موضح في (شكل 10.7). في هذه الحالة، فإن المقاومة الظاهرة الناتجة من حقن التيار والجهد الناتج سوف لا تعكس مقاومة المتكون بدرجة دقيقة، كما هو موضح في (شكل 11.7).

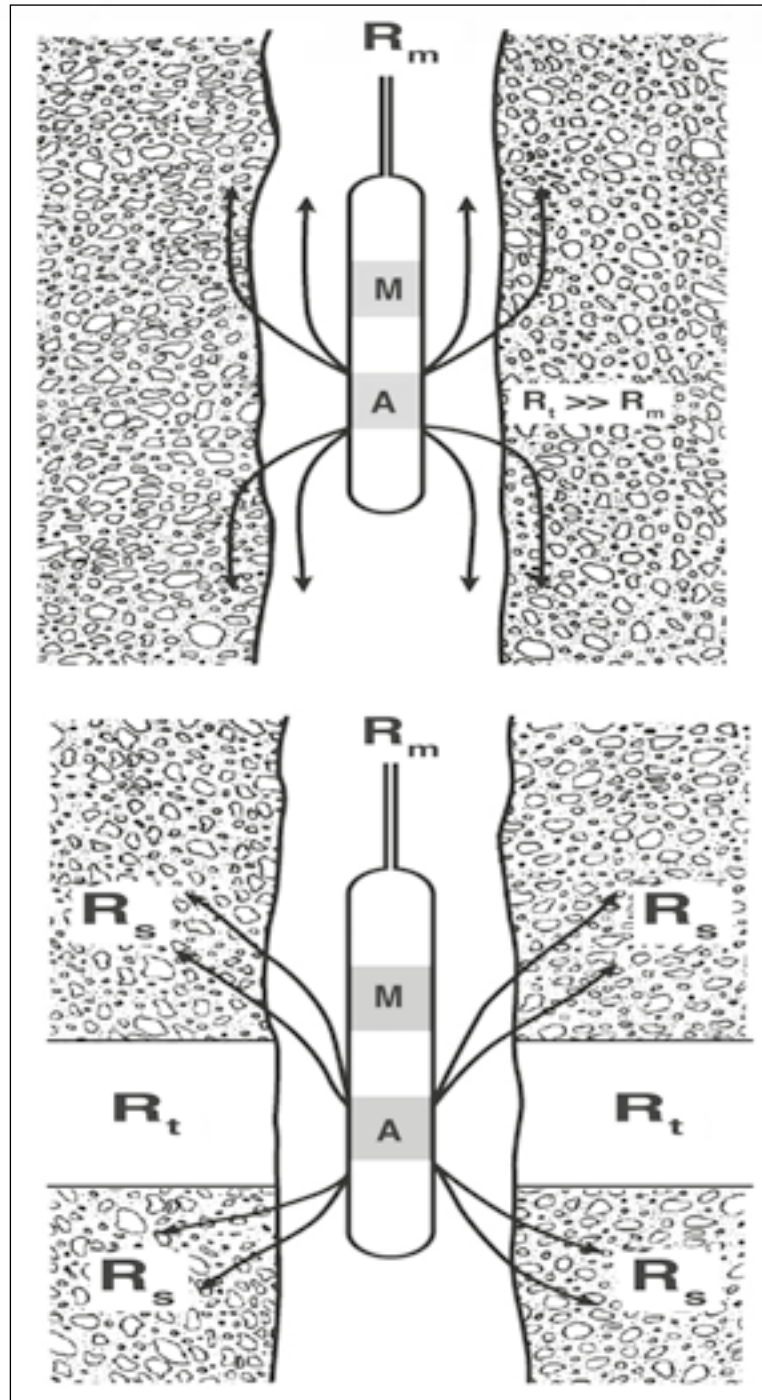


1.3.7 الأجهزة غير المركزة Unfocused Instruments

النوع العادي القصير The Short Normal

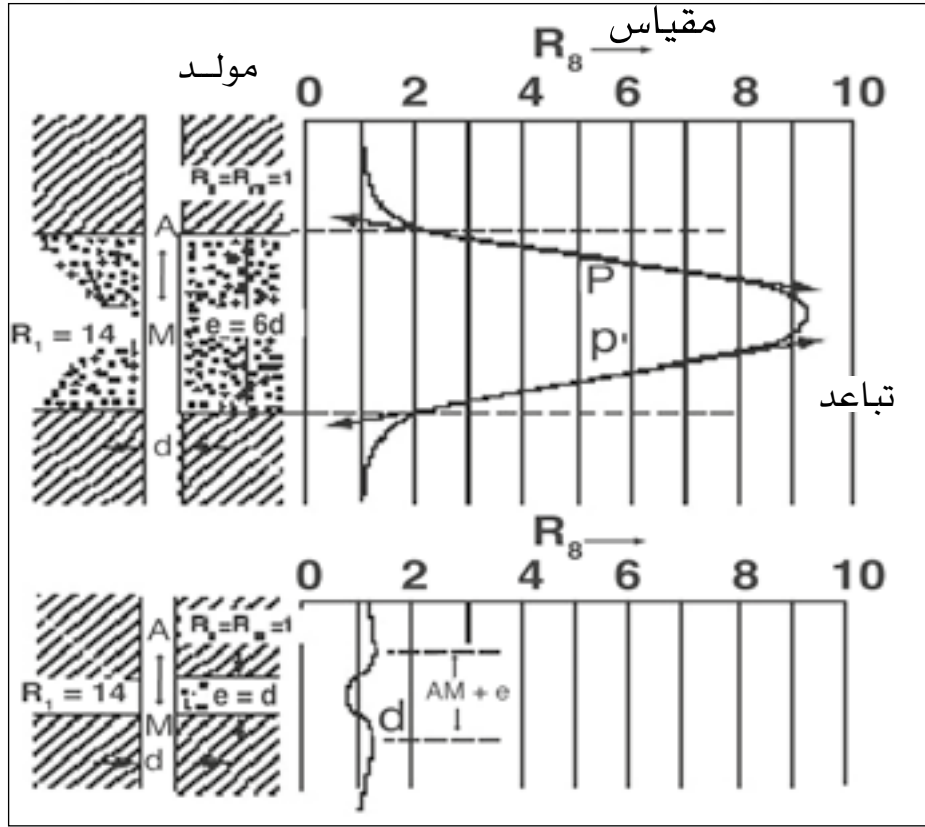


الشكل 9.7 : عرض تخطيطي للجهاز العادي القصير ذي مسافة 16 بوصة بين إلكترود التيار A وإلكترود القياس M



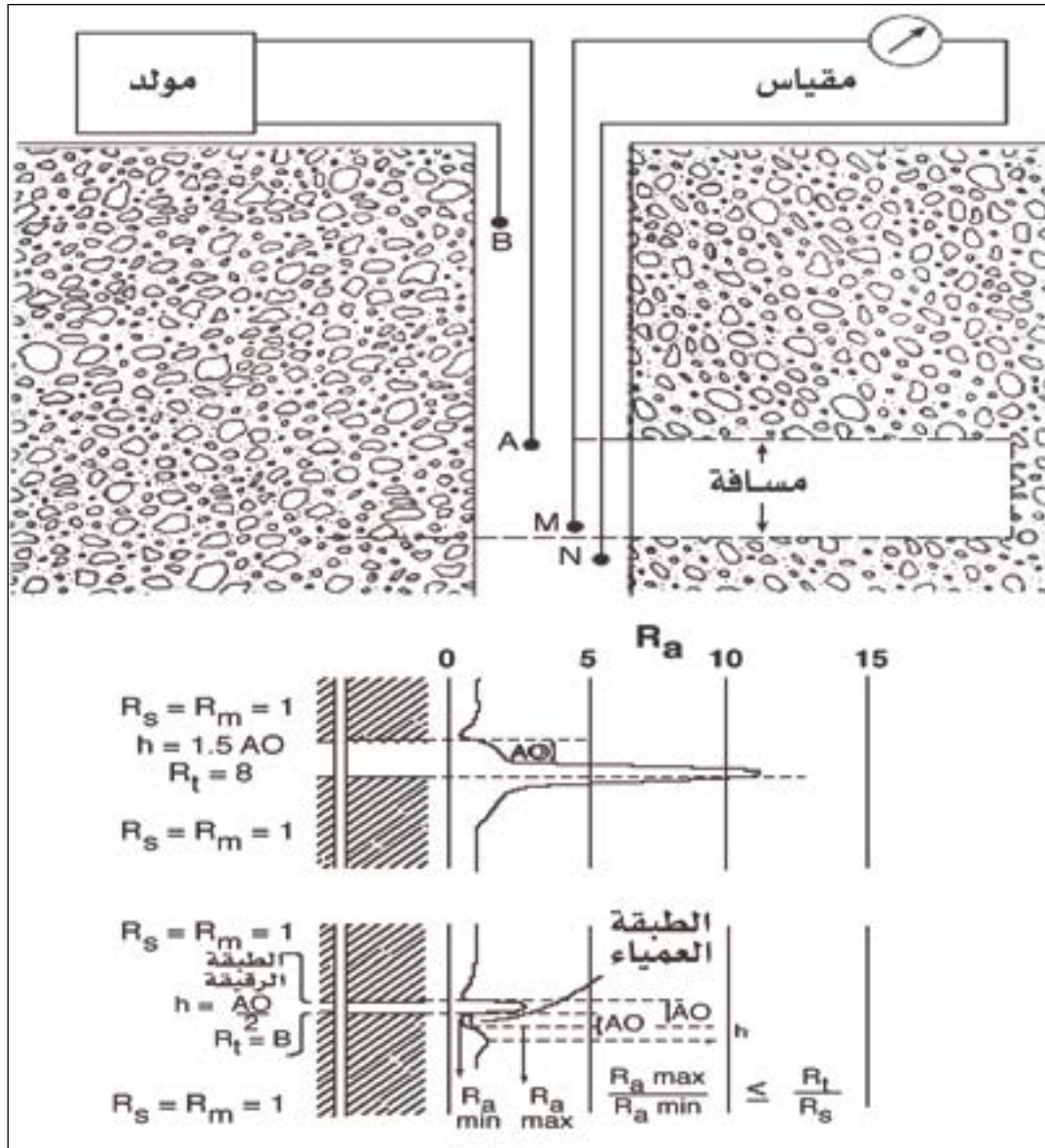
الشكل 10.7: عرض تخطيطي لمسارات سريان التيار الكهربائي في البئر للجهاز العادي القصير





الشكل 11.7: شكل تخطيطي لسجل الجهاز العادي واستجابته في وضعين مختلفين من الطبقات. حيث (e) تمثل سمك الطبقة، أما (d) فتمثل قطر البئر (Doll, 1955).

عندما تم عمل محاولات لتحسين رؤية وتحديد حد الطبقة، تم تطوير جهاز القياس العادي إلى الجهاز الجانبي Lateral device، الموضح في (الشكل 12.7). يشبه هذا الجهاز الجانبي الجهاز العادي باستثناء أنه يوجد به قطبان للجهد داخل البئر، وفرق الجهد بينهما يشير إلى مقاومة طبقة المتكون التي بينهما. يبين الجزء السفلي من الشكل الاستجابة لطبقتين، يظهر سمكها على أساس المسافة بين الأقطاب. من الواضح أن هناك بعض التحسينات في إظهار الطبقة، إلا أن استجابة الجهاز مازالت معقدة تماماً بسبب تدفق التيار من خلال طين الحفر إلى نطاقات غير النطاق الموجود مباشرة في مواجهة نقاط القياس. هنا قام مطورو الأجهزة باستكمال أجهزة تجمع بين العادي والجانبي.



الشكل 12.7: عرض تخطيطي للجهاز الجانبي في حالتين مختلفتين للطبقات. (O) هي النقطة المتوسطة بين (M و N)، في حين أن (h) هي سمك الطبقة (Schlumberger, 2005)

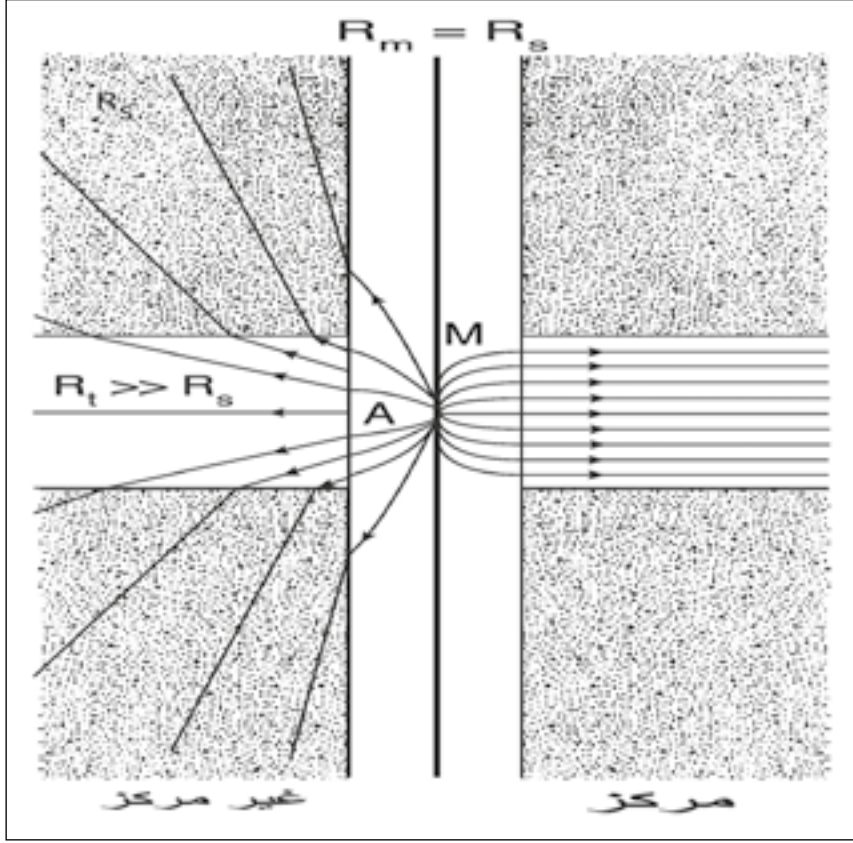


2.3.7 الأجهزة المركزة Focused Instruments

الخطوة التالية في تطور الأجهزة الكهربائية كانت ممثلة في تطبيق تيار مركز. يوضح (الشكل 13.7)، في النصف الأيسر، مسارات التيار للجهاز العادي في حالة طبقة ذات مقاومة عالية. يميل التيار للتدفق حول الطبقة من خلال سائل الحفر إلى الأكتاف ذات المقاومة الأقل. يظهر مسار التيار في النصف الأيمن من الشكل، حيث تيار القياس يتم إجباره للمرور في النطاق ذي الاهتمام.

يبين (الشكل 14.7) مبدأ التركيز، حيث تتواجد ثلاثة أقطاب لإرسال التيار، وهي A_0 ، A_1 ، A_7 ، في نظام توزيع للأقطاب يعرف بأنه جهاز التركيز الحارس Guard focusing device، ويسمى بالسجل الجانبي-3 (LL3) Laterolog. جهد هذين القطبين A_1 ، A_7 ثابت عند الجهد نفسه كجهد القطب المركزي (A_0). وحيث أن التيار لا يسري إلا إذا كان هناك فرق في الجهد، وعليه، فإنه لا يوجد تدفق للتيار في الاتجاه الرأسي، وبالتالي سينبعث التيار في الاتجاه الأفقي من قطب القياس المركزي. يشار إلى هذا التيار المنبعث من الأقطاب المركزة باسم التيار المضاد Bucking current، ووظيفته هي إعاقة تيار القياس من التدفق داخل طين الحفر. يتم التعديل بصفة مستمرة لهذا التيار، بحيث يبقى جهد القطبين (A_1 ، A_7) ثابتاً عند الجهد نفسه، كجهد الالكترود المركزي (A_0). وحيث أن كلا القطبين (A_1 ، A_7) يتواجدان في صورة طولية، لذا تكون خطوط التيار عند نهايته أفقية، والتي تجبر التيار من (A_0) ليبقى مركزاً بشكل أفقي لمدى أعمق داخل المتكون.

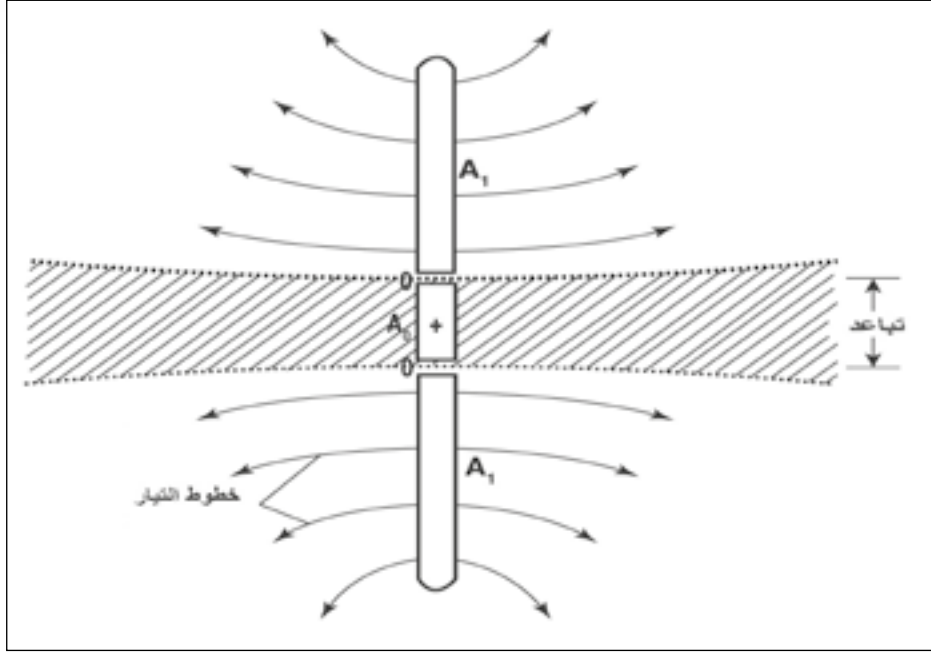
بالرغم من المميزات الجيدة لجهاز (LL3) إلا أن هناك بعض الصعوبات مع حدود الطبقة. يظهر ذلك في (الشكل 15.7)، والذي يبين فارقاً في مقاومة الطبقة متأثرة بمقاومية الطبقة التي هي على كتف الطبقة المواجهة للجهاز، وتختلف قيمة (Rt). في الجزء العلوي من الشكل، وفي وجود طبقة سميكة ذات مقاومة، نجد أن تيار القياس الرئيس يهرب إلى الكتف من خلال طين الحفر. في المثال السفلي، وفي وجود شريط موصل رقيق، نجد أن التيار يبحث عن الخروج بسرعة أكبر من المتوقع، ليعطي سمكاً ظاهرياً أكبر للطبقة عن الحالة السابقة.



الشكل 13.7: يبين تدفق التيار في البئر والمتكون من الالكتروود المركزي. إلى يسار الشكل، يتغير تدفق التيار عن النمط الإشعاعي نتيجة وجود طبقة ذات مقاومة عالية. إلى يمين الشكل، يتكون التدفق المرغوب وبالتالي يمكن معرفة المقاومة للطبقة ذات الاهتمام (Schlumberger, 2005)

المحاولة الأخرى لجعل التيار متمركزاً داخل الطبقة تتمثل في استخدام جهاز يحتوي على 7 أقطاب، أو (LL7). يبين (الشكل 16.7) مثلاً توضيحاً لتوزيع هذه الأقطاب. نجد هنا أن القطبين (A_1, A_1^-) والمسميين بالقطبين الحارسين Guard electrodes، لم يعودا في الصورة الطولية كما في (LL3)، وبدلاً من ذلك تم إضافة أقطاب مراقبة Monitoring electrodes بهدف إعاقة التيار المتدفق الموازي للجهاز خلال سائل الحفر. هذا يتم إنجازه بتغيير التيار المار في الأقطاب الحارسة Guard electrodes بالدرجة التي تجعل فرق الجهد بين زوج أقطاب المراقبة ($M_1 - M_1^-$ and $M_2 - M_2^-$) يساوي صفراً. وحيث أن فرق الجهد على طول هذا الاتجاه الرأسي يساوي صفراً، فإن التيار سوف يتركز داخل المتكون.





الشكل 14.7: يبين توزيع التيار من جهاز السجل الجانبي-3 (LL3) في متكون متجانس (Serra, 1984).

إذا تم تعريف المسافة بين (A_0) ونقطة المنتصف بين أقطاب المراقبة على أنها (a) ، والمسافة بين $(A_0, A_1, \text{ أو } A_1^-)$ على أنها (na) ، حيث تعرف (n) بانتشار التوزيع. إذا كانت (m) هي نسبة التيار من (A_0, A_1) والمطلوبة لجعل الجهد مساوٍ لأقطاب المراقبة، حينئذ يمكن رؤية أن التوزيع يكون مركزاً كما هو موضح في المعادلة (2).

$$m = \frac{(n^2 - 1)^2}{4n} \quad (2)$$

تتضمن هذه العلاقة تركيز التيار قرب جهاز القياس لأي انتشار من الأقطاب، لكنه لا يحدد كيف يسلك التركيز الإشعاعي داخل المتكون. يبدو أن الانتشار الأقل بين الأقطاب مرغوب فيه (أقل طول للجهاز وأقل تيار)، إلا أن التركيز يصبح إشعاعياً بسرعة كلما زاد الانتشار، كما أن التيار من (A_1) كلما زاد التركيز ينتشر لمسافة أبعد. مع ذلك، إذا زاد هذا الانتشار كثيراً، يتم ضغط التيار من (A_0) إلى حزمة أشعة أصغر. اقترح دول وآخرون (Doll et al., 1962) مسافة 2.5 بوصة كأفضل انتشار للأقطاب.

يمكن تحديد الجهد عند نقطة المنتصف لأقطاب المراقبة باستخدام المعادلة (3) لتعطي الجهد الناتج من كل قطب من الأقطاب الكهربائية:

$$V_{mon} = R_a \left[\frac{mio}{4\pi(na + a)} + \frac{io}{4\pi a} + \frac{mio}{4\pi(na - a)} \right] \quad (3)$$

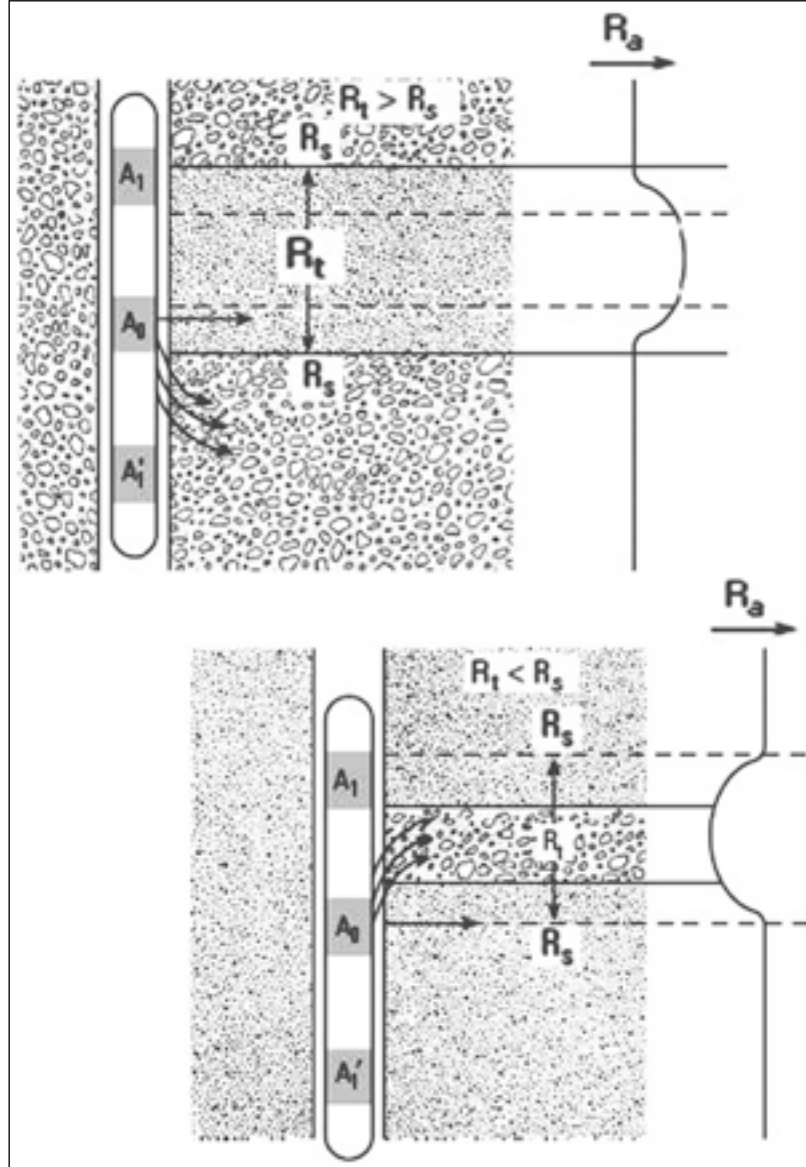
حيث (R_a) المقاومة الظاهرة للمتكون، (io) التيار المقاس من (A_0). تكتب V_{mon} غالباً على الصورة $V_{mon} = \frac{R_a io}{K}$ حيث (K) يعرف على أنه ثابت الجهاز. بالنسبة لجهاز (LL7) وفي حالة أن تكون $a=1$ ، والانتشار بين الأقطاب = 2.5، تكون قيمة (K) تقريباً = 1.5 متر. مع ذلك، دائماً ما يكون هناك تأثير من البئر عند التسجيل. من الطبيعي أن يتم أخذ ذلك في الاعتبار عن طريق تعديل قيمة (K)، لدرجة قد يهمل تصحيح تأثير البئر في بعض الظروف القياسية، مثل أن يكون قطر البئر = 8 بوصة في وجود قيمة (Rt/Rm) تتراوح بين (1-100). هذا يضمن أن يكون تصحيح البئر صغيراً في كل الحالات، ماعدا الحالات والظروف القياسية.

التركيز الكروي Spherical Focusing

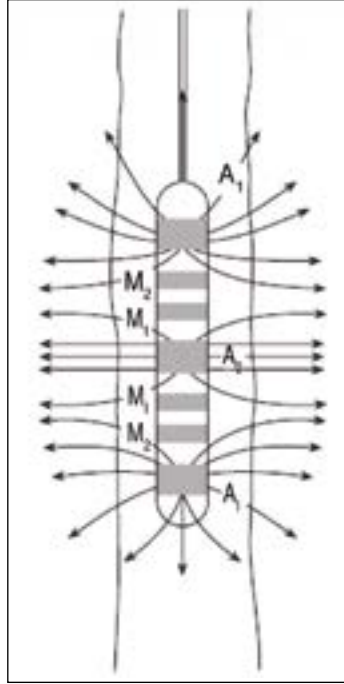
المحاولة الأخرى للتخلص من تأثير البئر، تتمثل في تطبيق مفهوم التركيز الكروي. في هذه التقنية، تحاول التيارات المضادة Bucking currents أن تؤسس لأسطح تساوي الجهد الكروي التي تتواجد إذا لم يكن هناك بئر. يظهر في (الشكل 17.7) شكل توضيحي لأسطح تساوي الجهد التي تحيط بقطب التيار في الجهاز العادي Normal device، نتيجة وجود سائل الحفر الموصل والمتواجد في البئر. وبدلاً من أن يكون هذا التيار في شكل دائري، يأخذ شكلاً طويلاً. الهدف من التركيز الكروي هو أن التيار المضاد Bucking current يجبر خطوط تساوي الجهد لتصبح دائرية مرة ثانية، ويمكن هنا التحكم في عمق الفحص. تظهر الفكرة بشكل أوضح في (الشكل 18.7). يزود القطب (A_0) بمصدر للتيار، وهو تيار القياس الذي يعود للأقطاب البعيدة، التيار المضاد العائد للقطبين (A_1^- و A_1^+) يكون متغيراً بحيث أن فرق الجهد بين أقطاب المراقبة ($M_1^- - M_2^-$ و $M_1^+ - M_2^+$) يساوي صفراً. يتم ضبط تيار



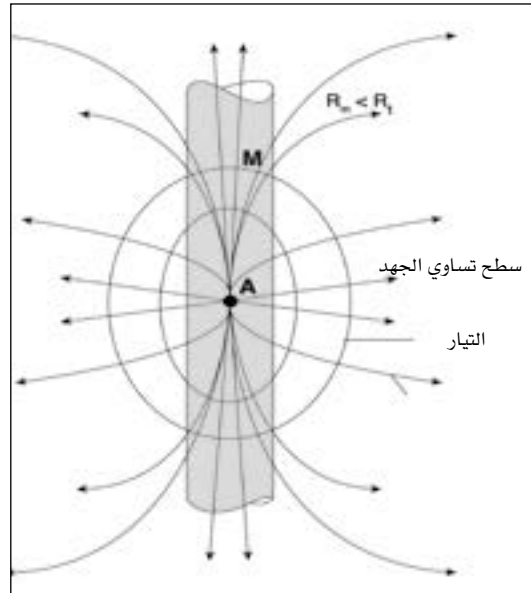
القياس ليحفظ جهداً ثابتاً بين (A_0) ومجموعتي أقطاب المراقبة. تتبع خطوط الجهد سطحين ذوي جهد ثابت. هذا يؤدي إلى أن تيار القياس المنبعث من القطب المركزي يتدفق بشكل إشعاعي للخارج ليسري في اتجاه السطح الأقل جهداً.



الشكل 15.7 : تأثير مقاومة طبقة الكتف **Shoulder** على سلوك جهاز LL3. الجزء العلوي يشير إلى التيار المار خلال طين الحفر إلى الكتف ذي الموصلية العالية. الجزء السفلي يشير إلى تأثير الطبقة الرقيقة ذات الموصلية العالية.



الشكل 16.7: توزيع الأقطاب في نظام السجل البئري الجانبي-7 (Serra, 1984)



الشكل 17.7: خطوط التيار وأسطح تساوي الجهد في الجهاز العادي القصير داخل البئر



يكون حجم المتكون الذي يتم فحصه مساوياً تقريباً للمسافة بين السطحين المتساويين في الجهد باستثناء المنطقة القريبة من حدود البئر، والتي تكون مغلفة بالتيار المضاد. ينظر إلى التيار المضاد على أنه إما أن يقوم بإنشاء سطح متساوي الجهد أو تزويد التيار خلال سائل الحفر بحيث يتم إجبار تيار القياس الحقيقي داخل المتكون. يمكن بلوغ التركيز نفسه بمبدأ التبادل الكروي باستبدال كل الأقطاب الكهربائية الحالية بأقطاب الجهد والعكس بالعكس.

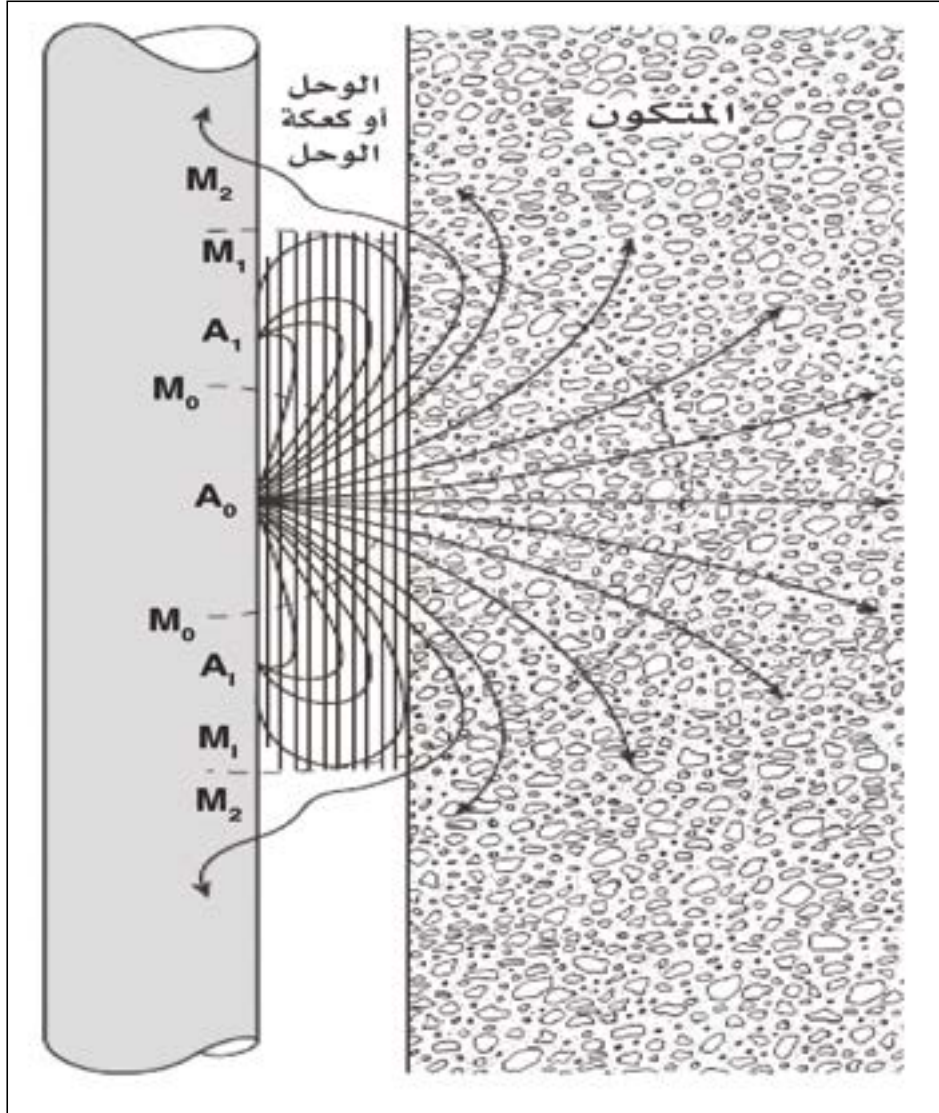
السجل البئري الجانبي المزدوج Dual Laterolog

تستخدم معظم أجهزة الأقطاب التقليدية الشائعة نظام التركيز المزدوج. تعرف هذه الأجهزة بالسجل البئري الجانبي المزدوج Dual laterolog، وهي تجمع مميزات نظامي LL3 و LL7، في تتابع متبادل من القياس. يتم قياس كل من المقاومة الضحلة والمقاومية العميقة في آن واحد عن طريق التغيير السريع لدور الأقطاب المختلفة. يبين (الشكل 19.7) مسارات التيار المحسوبة لهذا الجهاز. في الجانب الأيسر من الشكل، يكون توزيع الأقطاب بالشكل الذي يقيس النطاق العميق للمتكون. طول الأقطاب الحارسة Guard electrodes يكون 28 قدماً، وذلك لإنجاز الاختراق العميق لحزمة التيار ذات السمك 2 قدم. على الجانب الأيمن، يكون توزيع الأقطاب بالشكل الذي يقيس النطاق الضحل أو المتوسط للمتكون.

عند مقارنة أجهزة القياس الكهربائية، من الملائم أن نفكر في أن القراءة المقاسة تكون نتيجة تأثير ثلاث مناطق محددة من بيئة القياس: البئر، ونطاق الغزو، والنطاق غير المتأثر بالغزو. يرجع تأثير كل هذه النطاقات إلى خاصية المقاومة لكل نطاق، وهي على الترتيب (R_m, R_{xo}, R_t) . عموماً، تكون قيمة (R_m) أقل من (R_{xo}) أو من (R_t) . في هذا النموذج، فإن استجابة الجهاز تكون ناتجة من تأثير منطقة الغزو والمقاومية الحقيقية. يمكن التعبير عنها في المعادلة (4).

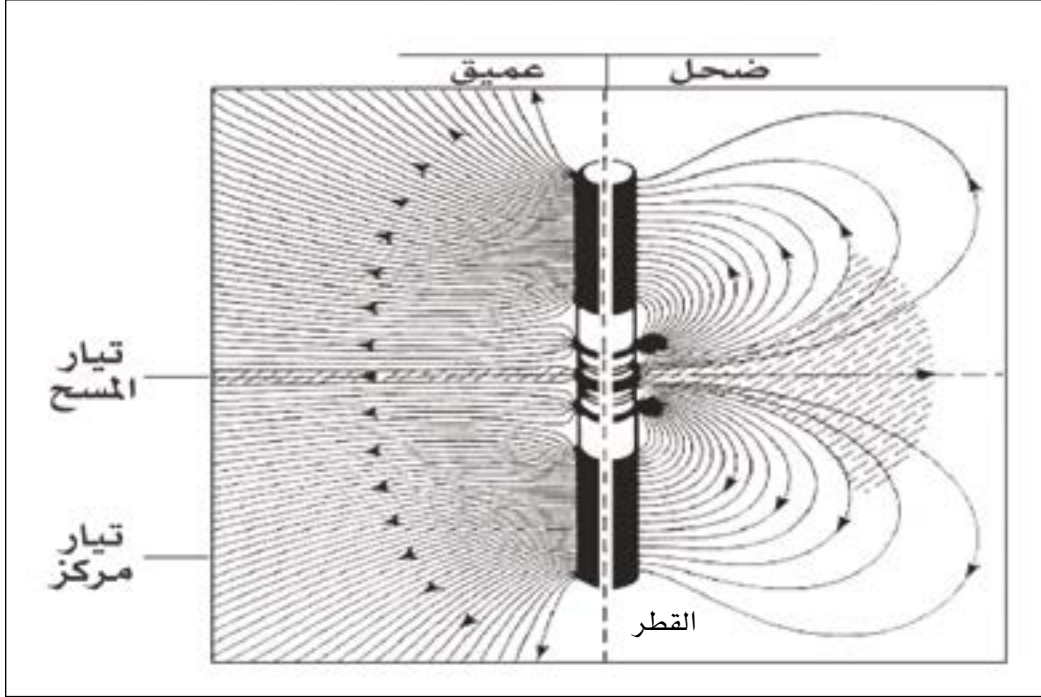
$$R_a = J(d_i) R_{x0} + (1 - J(d_i)) R_t \quad (4)$$

حيث (R_a) هي المقاومة الظاهرية. العامل (J) هو عامل ذو تأثير، ويعطي مساهمة نسبية لنطاق الغزو (ذو قطر d_i) ونطاق عدم الغزو. يُسمى هذا العامل بالهندسي الخادع، حيث يتأثر هذا المعامل بالفارق بين (R_t) و (R_{xo}) .



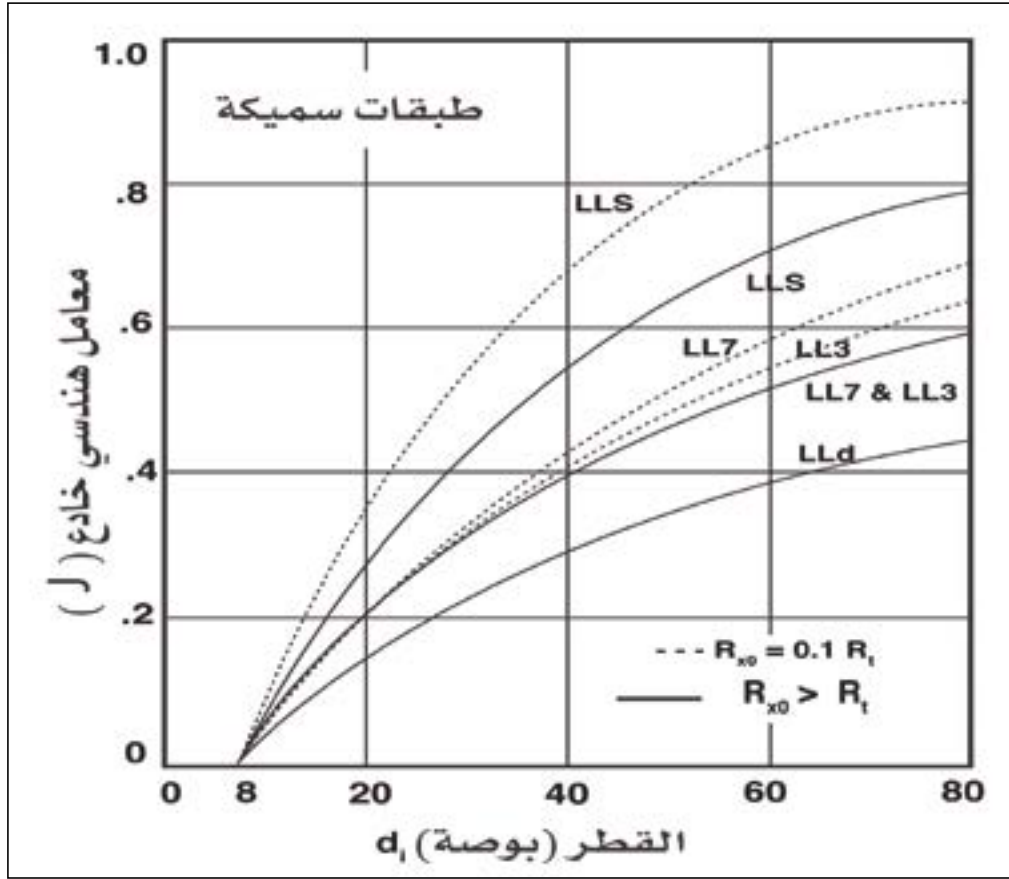
الشكل 18.7 : توزيع الأقطاب في نظام التركيز الكروي (Schlumberger, 2005)





الشكل 19.7: توزيعات التيار المحسوبة للسجل الجانبي المزدوج لنظامي التشغيل الضحل والعميق
(Chemali et al., 1983)

يبين (الشكل 20.7) العامل الهندسي الخادع لعديد من الأجهزة التي تم مناقشتها، في حال أن مقاومة نطاق الغزو أكبر من مقاومة نطاق عدم الغزو، وأيضاً في حال أن منطقة الغزو التي تكون مقاومتها 0.1 مقاومة المتكون غير المتأثر بالغزو، يمكن استخدام هذه العوامل الهندسية الخادعة في تقدير تأثير نطاق الغزو على قياس المقاومة عندما يكون هناك فارق بين R_{x0} و R_t . المنحنى الضحل (الممثل لجهاز LLS) يزداد بشكل حاد، وتشير على أنه في حالة نطاق غزو ذي موصلية عالية ($R_{x0} = 0.1 R_t$)، فإن نصف هذه الاستجابة يأتي من البوصات الثماني الأولى من الغزو، 90% من هذه الاستجابة يأتي من داخل المنطقة ذات قطر حوالي 80 بوصة. القياسات العميقة (المثلة لجهاز LLD) تكون أقل تأثراً بمنطقة الغزو، حيث فقط حوالي 15% من استجابته تأتي من قطر 20 بوصة (أو من البوصات الست الأولى من الغزو لبئر ذات قطر 8 بوصة).



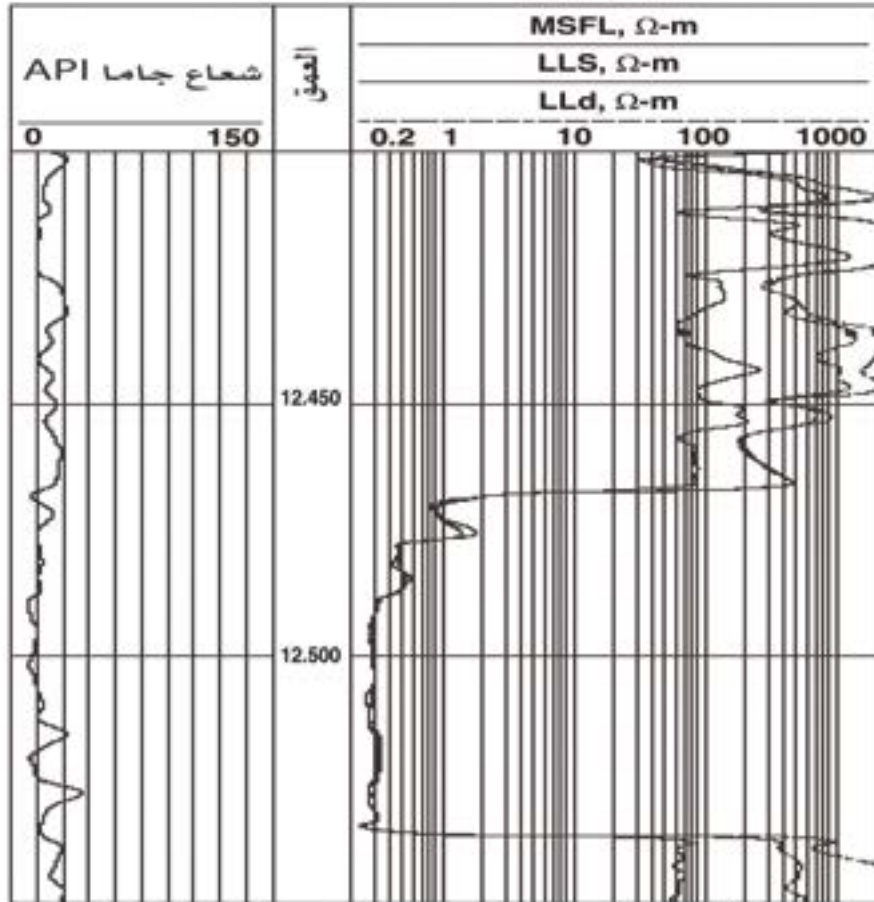
الشكل 20.7: مقارنة العوامل الهندسية الخادعة المحسوبة لعدد من أجهزة الأقطاب الشائعة LLS & LLd تشير إلى توزيع الأقطاب العميقة والضحلة لجهاز السجل البثري الجانبي المزدوج (Schlumberger, 1989).

لا تعتمد القراءة الفعلية الناتجة من نطاق الغزو على الاستجابة المبينة في (الشكل 20.7) فحسب، بل أيضا على المقاومة Resistivity. لذلك إذا كان $R_x = R_t$ ، فإن 15% من القراءة ناتج من نطاق الغزو ذي القطر 20 بوصة، في حين أنه إذا كان $R_x = 0.1 R_t$ ، فإن 1.5% فقط من القراءة يكون ناتجاً من نطاق الغزو. وتكون قراءة السجل الجانبي مثل كل أجهزة الأقطاب ذات علاقة أكثر خطية مع المقاومة وليست الموصلية، كما هو واضح في المعادلة (4).



مثال لجهاز السجل الجانبي المزدوج Example of Dual Laterolog

يبين (الشكل 21.7) عرضاً مثاليًا لبيانات جهاز السجل الجانبي المزدوج لمكمن نفطي افتراضي، يتكون من نطاق ذي مسامية متوسطة، غني بالمياه والهيدروكربون. يتواجد في الشكل سجلان ممثلان لسجل جانبي مزدوج، وهما القصير والطويل LLS و LLD. كما يتواجد سجل إضافي للمقاومية يُسمى السجل المركزي الكروي المجهري (MSFL)، والذي يعبر عن عمق فحص ضحل نظرا لصغر المسافة بين الأقطاب. يمثل المنحنى الموجود على المسار الأول سجل أشعة جاما، والذي يمكن الاستفادة منه في تحديد النطاقات النظيفة الخالية من الطفل.



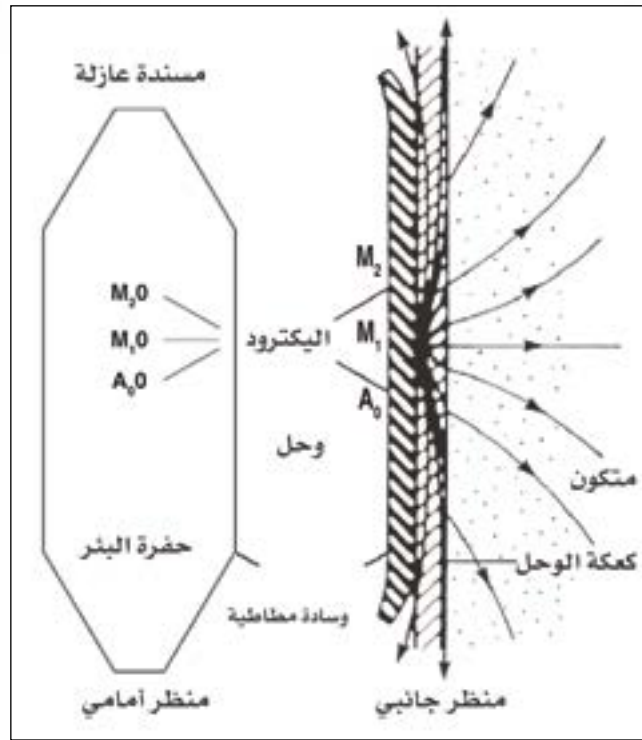
الشكل 21.7: استجابة جهاز السجل الجانبي في صخر مكمني مثالي.

يتميز نطاق المياه السفلي في هذه الحالة بقراءة منخفضة للمقاومية، وعدم وجود انفصال واضح بين منحنيي قراءات السجل الجانبي Laterolog الضحلة والعميقة. أما النطاق الحامل للهيدروكربون فوق عمق 12470 قدمًا، فيظهر بقراءات ذات مقاومية عالية. أسفل هذا النطاق وعلى طول 20 قدمًا نجد أن قراءات المقاومية أكبر من قراءات نطاق المياه. هذا يشير إلى وجود كمية قليلة من الهيدروكربون أو حدوث تغير في المقاومية. ولمعرفة كمية المياه أو الهيدروكربون فإن ذلك يعتمد على قياسات أخرى أو معلومات أكثر. واحدة من هذه المعلومات تتمثل في تقدير قيمة المسامية.

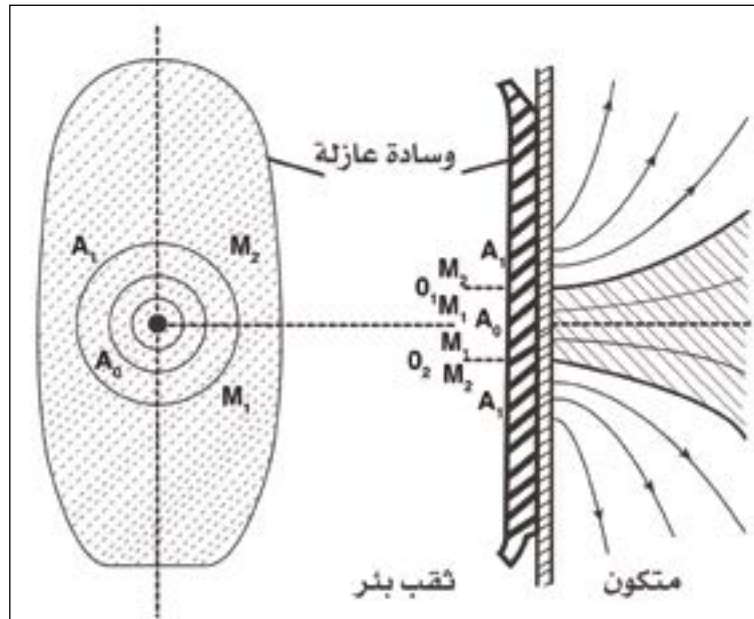
3.3.7 أجهزة القطب المجهري (الميكرو إلكترود) Microelectrode Devices

أجهزة القطب المجهري عبارة عن أجهزة تسجيل كهربائية، ولكن بمسافات بين الأقطاب أقل بكثير من أقرانها بالأجهزة السابق ذكرها. ونتيجة صغر هذه المسافات، فإن عمق الفحص أيضًا يكون قليلًا. هذه الأقطاب توضع على أجهزة خاصة تسمى المساند pads، والتي تكون ملاصقة لجدار البئر أثناء صعودها فيه. تطور أجهزة الأقطاب المجهرية مر بالتطور نفسه مثل أجهزة الالكتروود. البداية كانت مع جهاز السجل المجهري Microlog (الشكل 22.7)، والذي يعتبر من الأجهزة غير المركزة، والتي تعتمد على فكرة الأجهزة العادية والجانبية. حيث يرسل التيار من الإلكتروود (A_0)، ويتم قياس الجهد عبر القطبين (M_1 و M_2). تكون المسافة بين الأقطاب بوصة واحدة، وذلك للتأكد من فحص العمق الضحل. بالنسبة للجهاز الجانبي، يتم قياس فرق الجهد بين القطبين (M_1 و M_2) والذي يتأثر بدرجة عالية بجدار كعكة الوحل Mud cake. أما الجهاز العادي فيتم قياس جهد الالكتروود (M_2) والذي يتأثر أكثر بنطاق التدفق Flushed zone. يعتبر تأثير جدار الوحل خصوصًا في حالة متكون ذي مقاومية عالية وفي وجود جدار سميك من الوحل ذي موصلية عالية، هو العيب الرئيس في تحديد (R_{x0})، لكن في وجود غزو يكون هناك فاصل بين منحنوي (R_{x0} ، R_f). هذا الفاصل أثبت أنه مؤشر موثوق فيه في وجود نطاقات منفذة. كانت أجهزة السجل المركزي المجهري الجانبي Microspherical focused log μ SFL، هي الخطوة التالية من الاختراع لتحسين تحديد قراءة (R_{x0}). يوضح (الشكل 23.7) رسمًا تخطيطيًا لهذا الجهاز الذي يشترك في العديد من الظواهر مع السجل الجانبي Laterolog فيما عدا الأبعاد. نجد في (الشكل 23.7) أن التيار المضاد Bucking





الشكل 22.7: يبين جهاز السجل المجهرى (Microlog)، حيث المسافة بين الأقطاب 1 متر (Serra, 1986)



الشكل 23.7: يبين جهاز السجل الجانبي المجهرى (Microlaterlog (Serra, 1986)

current الناتج من الالكترود (A_1) يركز تيار القياس ليحمله يخترق جدار كعكة الوحل Mud cake. حوالي 90% من القراءة الناتجة تأتي من أول 2-4 بوصات من المتكون معتمدة في ذلك على الفارق بين (R_t و R_{xo}). اتبعت أجهزة الأقطاب المجهرية الأخرى المختلفة النهج نفسه لجهاز السجل الجانبي المجهري Microlaterolog، كل منها يحاول إزالة تأثير جدار كعكة الوحل، وفي الوقت نفسه تكون القراءة الناتجة لا تخترق عمقاً كبيراً من المتكون. الجهاز الأول تعتمد فكرته على مبدأ السجل الكروي Spherical log الذي تم وصفه سابقاً. هذا الجهاز أقل تأثراً بوجود جدار كعكة الوحل نتيجة التركيز الكروي، وأيضاً وجود مسند pad القطب بحجم أكبر. هناك أيضاً أجهزة أكثر تطوراً مثل micro-cylindrically focused log ويمكن الرجوع إليها من خلال المرجع (Schmoker, 1980).

4.7 أجهزة الحث Induction Devices

سوف نتعرض لأجهزة الحث بشيءٍ من الاختصار، ويمكن الرجوع إلى (Moran & Kunz, 1962) للحصول على تفاصيل أكثر. تم تصميم أجهزة الحث المغناطيسي أساساً لمعالجة مشكلة وجود سائل الحفر غير الموصل ذي الأساس الزيتي Oil base mud أو عدم وجوده أساساً Air filled hole، أو عند إدخال مبطنات بلاستيكية داخل البئر. مع ذلك، فإن لهذه الأجهزة استخدامات واسعة الانتشار في الآبار التي تستخدم سائل حفر موصل، بشرط أن يكون غير ملحي بدرجة عالية. تتميز هذه الأجهزة بقلّة تأثرها بظروف البئر والمتكونات المجاورة. تم تصميمها للحصول على عمق فحص أكبر داخل نطاق عدم الغزو مع قلّة تأثير نطاق الغزو. تستخدم هذه الأجهزة نظاماً يتكون من ملفات إرسال واستقبال متعددة. مع ذلك ولفهم أساسيات عمل هذه الأجهزة، نفترض أن الجهاز مكونٌ من مرسل ومستقبل واحد فقط (الشكل 24.4). يتم إرسال تيار متردد ذي تردد عال وبشدة ثابتة خلال ملف الإرسال. يولد المجال المغناطيسي الناشئ عن هذا التيار تياراً ثانوياً مستحثاً في المتكون. تتدفق هذه التيارات في مسار حلقي أرضي Ground loop حول اتجاه محور الملف المرسل. يولد هذا التيار الدائري بدوره مجالاً مغناطيسياً يستحث إشارة Signal في الملف المستقبل، تتناسب شدة هذه الإشارة أو التيار المستحث طردياً مع موصلية المتكون.



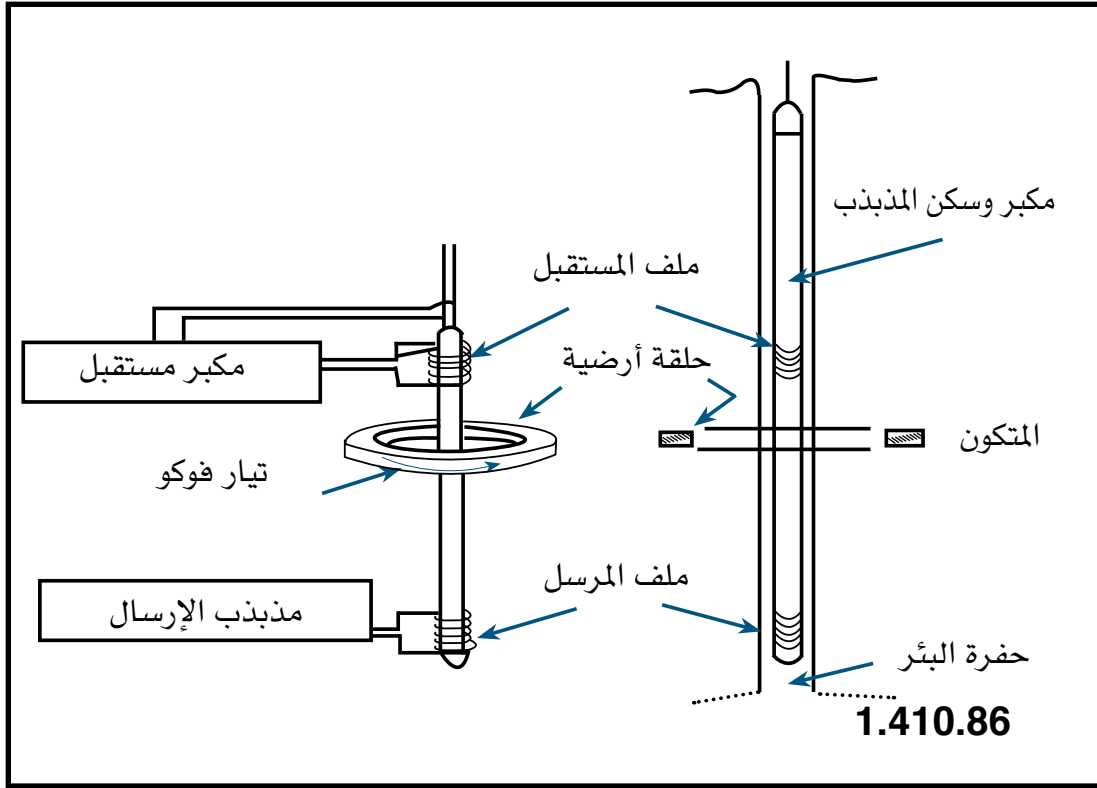
هناك أربعة أنواع من الأجهزة يتم استخدامها:

1. جهاز المسح الحثي والكهربائي (6FF40) IES: يشتمل هذا الجهاز على 6 ملفات (3 منها مرسلات و3 مستقبلات) بمسافة 40 بوصة بين المرسل والمستقبل الرئيسيين، ومعه الجهاز الكهربائي 16 بوصة العادي، وأيضا جهاز (SP). هذا الجهاز نحصل منه على أقصى عمق فحص مقارنة بأجهزة الحث الأخرى.
2. جهاز المسح الحثي والكهربائي (6FF28) IES: هذا الجهاز ذو قطر صغير (2 5/8 بوصة) ويستخدم في الآبار الضيقة ذات القطر الصغير، يحتوي على مسافة 28 بوصة بين الملفات. نحصل منه على عمق فحص عميق، إلا أنه أقل من عمق الفحص الناتج من جهاز (6FF40)، ويتواجد معه الجهاز الكهربائي 16 بوصة العادي، وأيضا جهاز (SP).
3. جهاز الحث المزدوج-السجل الجانبي-8 (DIL): يتكون من جهاز لقياس عمق فحص عميق والذي يسمى (ILD) وهو مماثل تمامًا لجهاز (6FF40) وجهاز لقياس عمق فحص متوسط (ILM) مع وجود جهازي السجل الجانبي-8 و(SP). جهاز (ILM) يحتوي على عمق فحص يبلغ نصف عمق الفحص لجهاز (6FF40) تقريبًا، هذا الجهاز أكثر تأثرًا بكل من سائل الحفر الملحي وزيادة قطر البئر.
4. سجل الحث (IES) مع السجل السمعي Sonic: يتكون من جهاز حث ذي عمق فحص عميق مماثل لجهاز (6FF40) مع وجود أجهزة التركيز الكروي Spherically focused log، و SP log، والجهاز السمعي (BHC).

مثال لسجل الحث Example of Induction log

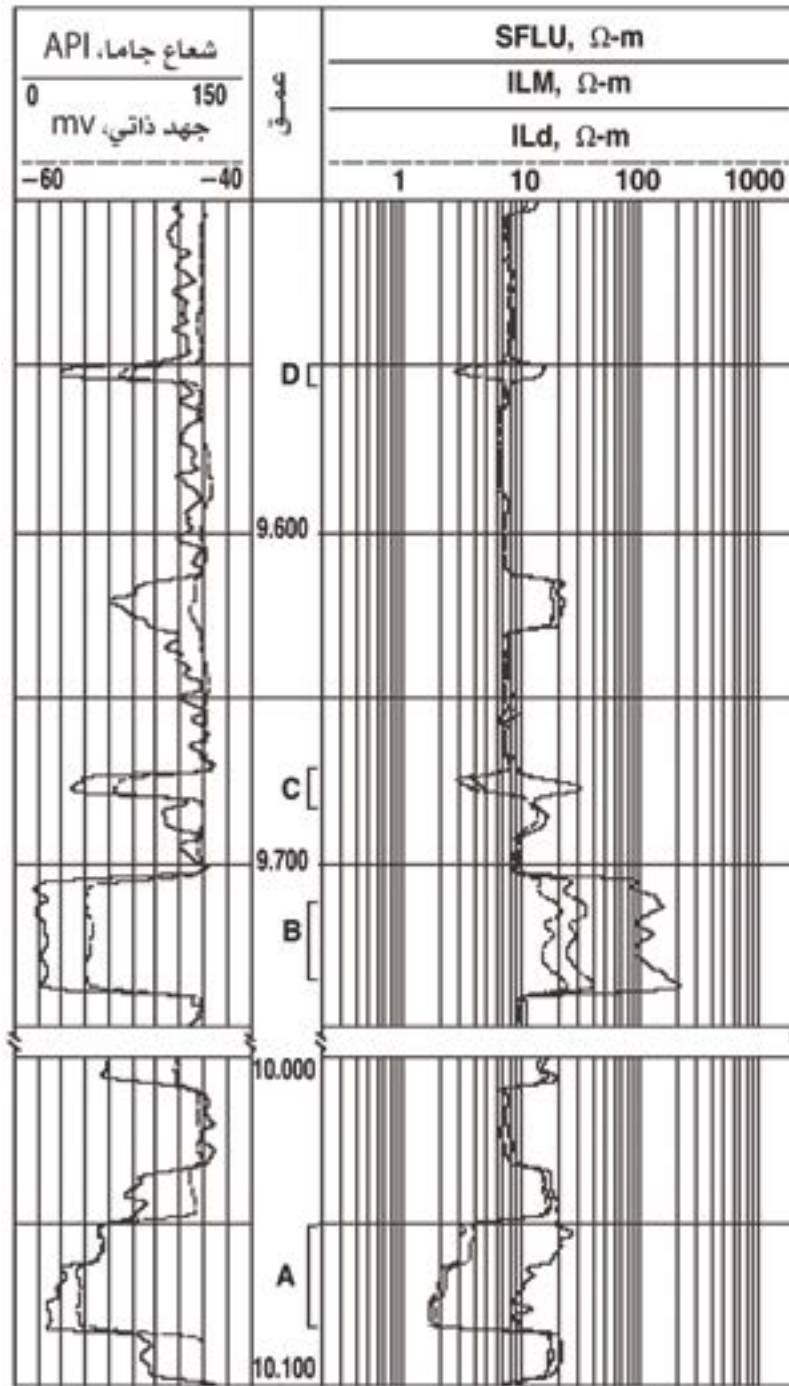
يوضح (الشكل 25.7) مثالاً لسجل الحث في صخر مكمني، حيث يتواجد نطاقان سميكان ونظيفان (خاليان من الطفل) (A،B). أيضًا يتواجد نطاقان نظيفان وذوا سمك أقل يرمز لهما بالرمزين (C، D). يمكن التعرف على هذه النطاقات الأربعة بسهولة على تمثيل السجل خلال أجهزة الحث الموجودة. أولاً للتعرف على النطاقات النظيفة، يتم ذلك من

خلال مقياسي (SP و GR) الممثلان على المسار رقم 1. تمثل أجهزة الحث على المسار الثاني والثالث والتي تشمل في هذا المثال كلاً من (ILD و ILM و SFL). هنا يعطي جهاز الحث (SFL) معلومات منطقية عن (R_{xo}) في الظروف المثالية ($R_{xo} > R_t$). يجب فحص أجهزة الحث لأي تصحيحات ضرورية قبل محاولة الحصول على تفسيرات كمية. مثل هذه التصحيحات تكون ضرورية لهذه النطاقات وخاصة النطاقين (D و C) ذوي السمك الأقل. يمكن الرجوع للعالمين (Jorden & Campbell, 1986) اللذين يعطيان مثلاً لمعظم تصحيحات سجل الحث منها؛ تأثير البئر ونطاق الغزو وسمك الطبقة.



الشكل 24.7: رسم تخطيطي مبسط لجهاز الحث المستخدم في قياس الموصلية





الشكل 7-25: مثال لتسجيل جهاز الحث

5.7 أجهزة قياس أشعة جاما والمسامية

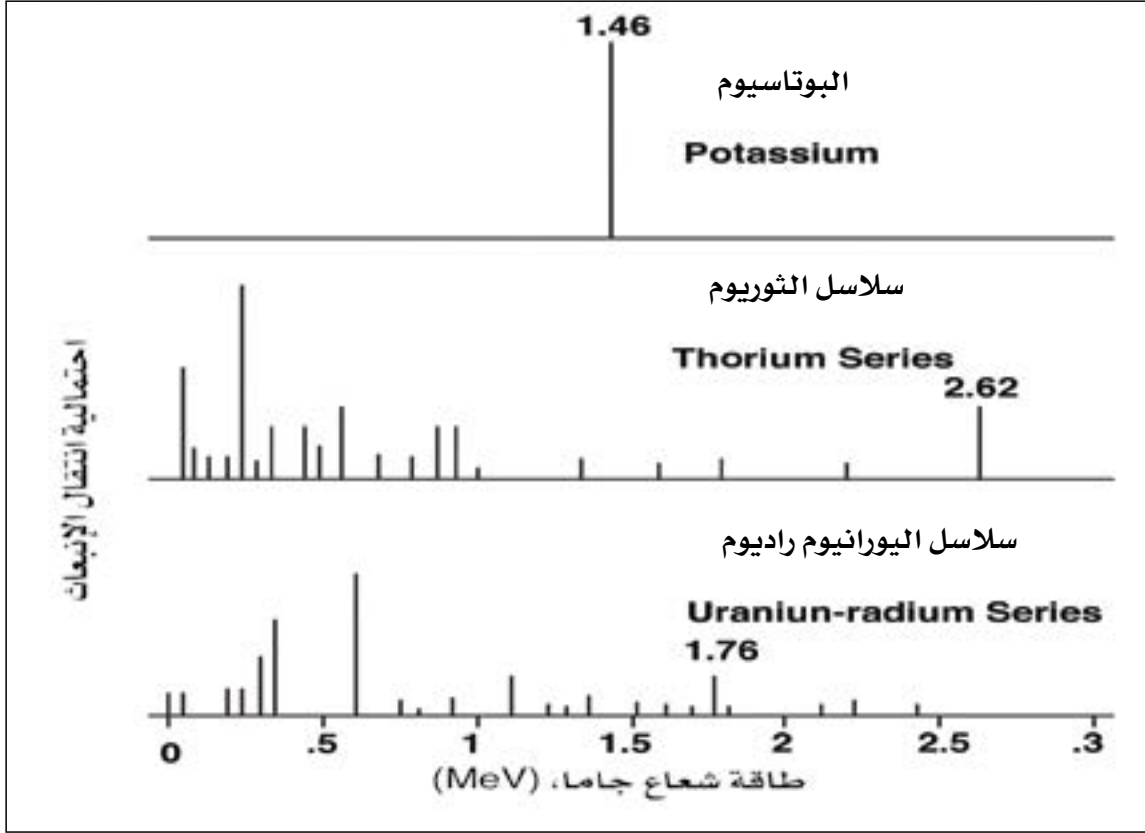
هناك نوعان من تسجيلات الآبار تستخدم لدراسة الفرق بين المتكون النظيف الخالي من الطين والمتكون المحتوي على نسبة من الطين. أحد هذه الأجهزة يتمثل في مقياس الجهد الذاتي والذي تمت مناقشته باختصار سابقاً. في هذا الباب سيتم مناقشة السجل الثاني والمتمثل في مقياس أشعة جاما. يلي هذا الجزء مناقشة بعض الأجهزة الأساسية المستخدمة في قياس المسامية.

1.5.7 سجل إشعاع جاما Gamma Ray Log

1.1.5.7 مصدر إشعاع جاما Source of Gamma Ray

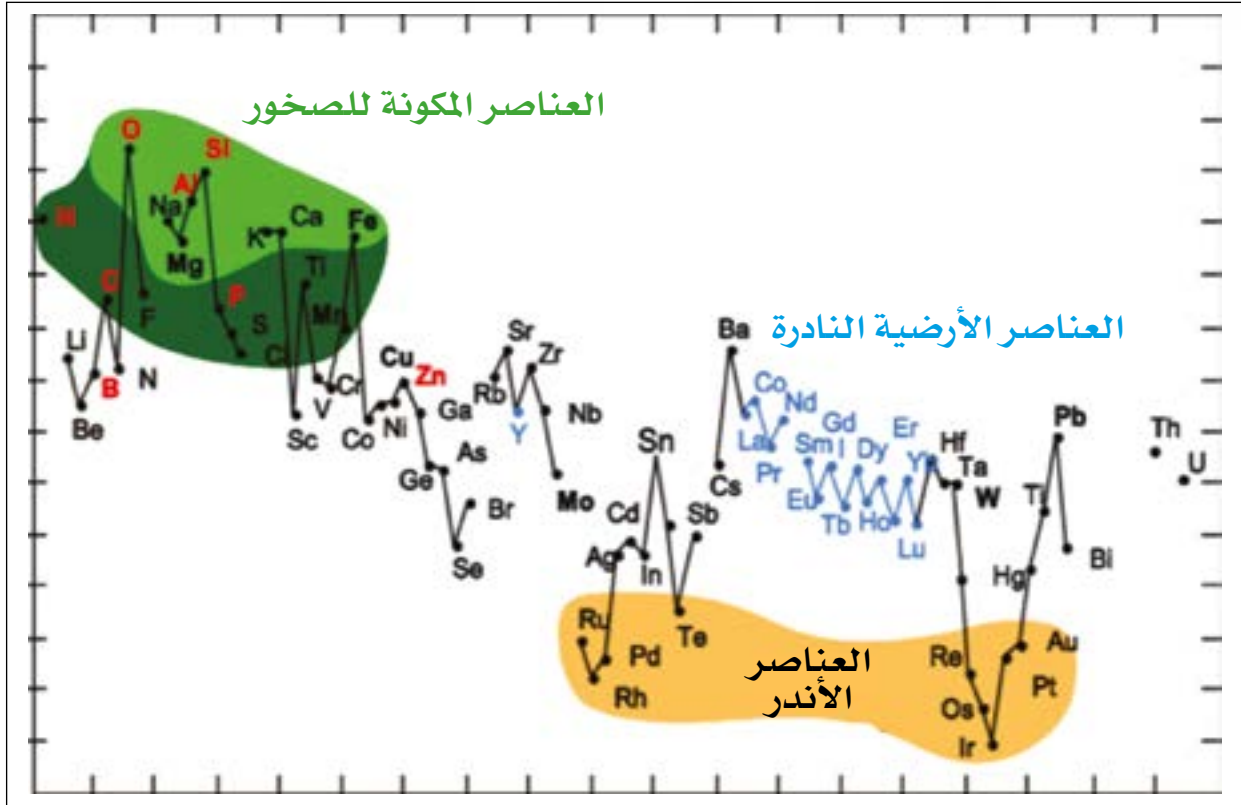
بدأ ظهور سجل أشعة جاما في نهاية ثلاثينات القرن الماضي كأول قياس غير كهربائي. وفي الحال، تم استخدامه من بين استخدامات أخرى في التمييز بين المتكون الخالي من الطين والحايل لبعض منه. تنتج هذه الأشعة من بعض النظائر المشعة والتي تكون مصاحبة لبعض المعادن الشائعة. تعتبر معادن الطين Clay من بين المعادن الرئيسية التي تحتوي على نظائر مشعة، والتي تتواجد في طبقات الطين Shale. هناك ثلاثة نظائر مشعة ومسئولة عن أشعة جاما في المتكون، وهي؛ البوتاسيوم والثوريوم واليورانيوم. تمتاز هذه العناصر بفترة عمر النصف Half life كالتالي: البوتاسيوم ^{40}K يساوي 1.3×10^9 سنة، والثوريوم ^{232}Th يساوي 1.4×10^{10} سنة، واليورانيوم ^{238}U يساوي 4.4×10^9 سنة. يصاحب اضمحلال البوتاسيوم انبعاث أشعة جاما المميزة بطاقة 1.46 Mev. يضمحل كل من اليورانيوم والثوريوم خلال سلسلتين من النظائر المشعة لتصل إلى الرصاص المستقر. هذا يؤدي إلى طيف معقد من أشعة جاما ذات طاقات عديدة مختلفة، كما هو موضح في (الشكل 26.7). تمثل نظائر الثوريوم واليورانيوم المصدر الرئيس لكل أشعة جاما في الصخور الرسوبية.





الشكل 26.7: توزيع أشعة جاما الناتجة من النظائر الثلاثة المشعة طبيعياً

يعتبر البوتاسيوم من أكبر مصادر جاما المشعة داخل المتكون، وهو من العناصر الأكثر شيوعاً في القشرة الأرضية. يبين (الشكل 27.7) العناصر الأكثر شيوعاً في القشرة الأرضية. هناك معادن هائلة تحتوي على البوتاسيوم في الصخور الرسوبية. يبين (الجدول 1.7) مجموعة من المتبخرات الغنية بالبوتاسيوم، ومن أشهرها معدن السلفيت Sylvite. نجد معادن الفلسبارات Feldspars أكثر المعادن الموجودة في أحجار الرمل، وهي تحتوي على عناصر غنية بالبوتاسيوم، كما تحتوي معادن الميكا Mica، والإليت Illite والجلوكونيت Glauconite التابعة لمعادن الطين Clay على البوتاسيوم، أيضاً.



الشكل 27.7 : تركيز عناصر القشرة الأرضية (Garrels & Mackenzie, 1971)

الجدول 1.7: معادن المتبخرات الحاوية على البوتاسيوم (Serra, 2007)

الاسم	التركيب	البوتاسيوم (الوزن %)
Sylvite	KCl	52.44
Langbenite	$K_2SO_4 (MgSO_4)_2$	18.84
Kainite	$MgSO_4 KCl (H_2O)_3$	15.7
Carnallite	$MgClKCl (H_2O)_6$	14.07
Polyhalite	$K_2SO_4 MgSO_4 (CaSO_4)_2 (H_2O)_2$	13.4
Glaserite	$(KNa)_2SO_4$	24.7



على العكس، المعادن الحاملة لليورانيوم والثوريوم تكون نادرة. قد يتواجد اليورانيوم نتيجة تواجد المعادن النادرة الشاذة، إلا أنه غالباً ما ينتج من ترسيب أملاح اليورانيوم. تؤدي قابلية ذوبان مركبات اليورانيوم إلى نقلها ووجودها المتكرر في الطفل العضوي Organic shale، حيث يتم امتصاص اليورانيوم بواسطة المواد النباتية أو الحيوانية التي تكوّن فيما بعد طبقة الطفل. أما الثوريوم فيكون مصاحباً للمعادن الثقيلة، مثل معدني المونازايت والزركون. وعلى عكس البوتاسيوم الذي يتوقع أن يتواجد دائماً بتركيز كبير، فإن الثوريوم واليورانيوم يتواجدان بنسب أقل خاصة في الطفل Shale. يتكون الطفل من معادن الطين Clay والطيني Silt. يتكون الطمي أساساً من الكوارتز، وقد يحتوي على فليسبار ومواد عضوية. معادن الطين هي المسئولة بصفة أساسية عن مصدري إشعاع البوتاسيوم والثوريوم. تحتوي معادن الإليت Illite والمونتموريللونيت Montmorillonite ومعادن الميكا Micas المتمثلة في معدني البيوتايت والمسكوفائيت على البوتاسيوم (Serra, 2007). المعادن الطينية التي تتكون أثناء تحلل الصخور النارية تكون قادرة على الاحتفاظ بكميات من المعادن المشعة، حيث يتواجد الثوريوم في المعادن غير القابلة للذوبان، في حين أن اليورانيوم والذي يمتلك خاصية قابلية الذوبان من السهل انتقاله من المعادن الطينية، وغالباً ما يصاحب المادة العضوية في الطفل Shale بدلاً من معادن الطين.

2-1-5-7 أجهزة قياس أشعة جاما Devices of Gamma Ray

من الاستخدامات الرئيسية لسجل أشعة جاما يتمثل في تمييز طبقة الطفل عن غيرها من الطبقات. أول جهاز لقياس إشعاع جاما كان يقيس فقط فيض أشعة جاما الكلي الناتج من المتكون. تستخدم أجهزة القياس الأقدم كلاً من عداد جيجر Geiger counter أو عداد وميض يوديد الصوديوم NaI Scintillation detector، لقياس أشعة جاما فوق حد أدنى عملي (حوالي 100 keV). معدل هذا العد الكلي هو دالة على توزيع المادة المشعة وكميتها في المتكون. تتأثر هذه القراءة بحجم وفعالية العداد المستخدم. ولهذا السبب، تم استنباط معايرة لهذه الأجهزة باستخدام وحدة (API)، وتستخدم سجلات أشعة جاما الكلية هذه الوحدة. تأتي وحدة (API) من الإشعاع الناتج من متكون معلوم تم إعداده في معامل جامعة هيوستن Houston University. يحتوي هذا المتكون على حوالي 4% بوتاسيوم، 24 ppm ثوريوم، 12 ppm يورانيوم ليتم تعيين قراءة قدرها 200 API لهذا المتكون.

تُعطى استجابة جهاز أشعة جاما بالمعادلة (5):

$$GR_{API} = \alpha U^{238} \text{ ppm} + \beta th \text{ ppm} + \gamma K^{39} \% \quad (5)$$

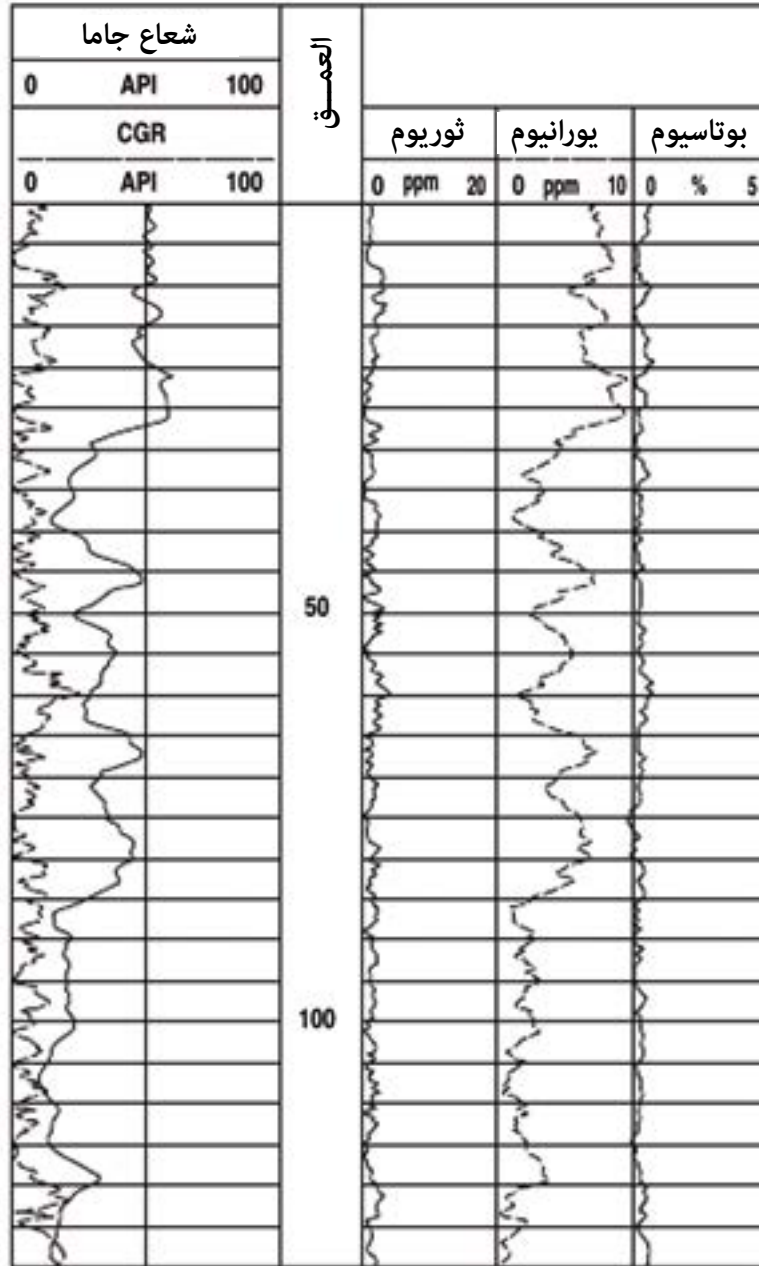
نلاحظ أن K^{40} هو النظير المشع إلا أن التركيز الأكثر شيوعاً هو (K^{39}). تعتمد المعاملات α و β و γ على الكاشف المستخدم وتفاصيل تصميم الجهاز. بالرغم من ذلك، هناك أنواع من الطفل تحتوي على نسب مختلفة من إشعاع جاما، متأثرة بتركيزات الثوريوم واليورانيوم والپوتاسيوم المصاحبة لها.

2.5.7 سجل أشعة جاما الطيفي Spectral Gamma Ray Log

مع تطور كاشفات أشعة جاما، كان من الطبيعي تطوير جهاز أشعة جاما إلى جهاز قادر على تحديد التركيز الفعلي للمكونات المشعة الثلاثة. تستعمل أجهزة إشعاع جاما الطيفي نفس نظام الكشف مثل أجهزة الإشعاع الكلية، ولكن بدلاً من استخدام منطقة طاقة ذات مدى واحد متسع للكشف، يتم تحليل إشعاع جاما إلى عدد من مستويات الطاقة المختلفة. يتم معايرة الجهاز بناءً على مكونات ثابتة تحتوي على نسب معروفة من الثوريوم واليورانيوم والپوتاسيوم، حينئذ يتم تحديد تركيز المكونات الثلاثة في المتكون المقاس بالإضافة إلى الإشعاع الكلي. إحدى الصعوبات في تفسير قياسات أشعة جاما هو عدم وجود تفسير وحيد، إذ تتواجد طبقات طين مشعة، أيضاً هناك الدولوميت ومكونات أخرى قد تحتوي على نسب عالية من اليورانيوم والثوريوم والپوتاسيوم والتي يمكن قياسها كل على حدة. يبين (الشكل 28.7) مثالاً لهذا التحليل، حيث تتواجد المكونات الثلاث (U, Th, and K) في المسار الثاني لقطاع من الكربونات. أما المسار الأول فيحتوي على منحنيين. يمثل الأول منحنى أشعة جاما الكلية GR، المنحنى الثاني يعرف بمنحنى أشعة جاما المحوسب (CGR) Computed gamma ray. يتكون هذا المنحنى الأخير من مجموع معدل العد الناتج من الثوريوم والپوتاسيوم، أي أنه غير متأثر باليورانيوم الذي قليلاً ما يصاحب معادن الطين. يتضح من الشكل أن الإشعاع المسجل من خلال (GR) يرجع إلى تأثير اليورانيوم. هذا يقودنا إلى أن تفسير سجل أشعة جاما على وجود نطاق من الطين كان خاطئاً. العلاقة بين تركيز المكونات المشعة والإشعاع الكلي مقاساً بوحدته (γ_{API}) تكون بالمعادلة (6):

$$\gamma_{API} = 4th + 8U + 16K \quad (6)$$





الشكل 28.7: تحليل أشعة جاما الطبيعية للتركيزات الناتجة من Th، U، K في قطاع من الكربونات. يبين منحنى (CGR) الممثل للإشعاع الكلي مطروحا منه نسبة اليورانيوم في النطاق الخالي بدرجة كبيرة من الطفل (Luthi, 2000)

هناك سببان مهمان لاستخدام سجل أشعة جاما الطيفي بدلاً من المقياس الكلي الذي يمكن استخدامه فقط في المضاهاة. السبب الأول: يتمثل في تحليل مصدر الشذات المشعة مثل التي تم وصفها من قبل. السبب الثاني: يتركز في المساعدة ليس فقط في تحديد حجم الطين بل أيضاً في تحديد نوعه عن طريق تصنيفه على أساس مساهماته النسبية من المكونات المشعة الثلاثة (U, Th and K). تمييز الميكا من الطفل هو احد التطبيقات المهمة لأجهزة أشعة جاما الطيفية.

6.7 التسجيلات المستخدمة في قياس المسامية Porosity Measuring Logs

هناك ثلاثة أنواع من الأجهزة تستخدم لحساب قيمة المسامية، اثنان من هذه الأجهزة تعتمد على القياسات النووية، وهما تسجيلا النيوترون والكثافة. أما السجل الثالث فيعتمد على القياسات الصوتية، ويسمى السجل السمعي. هناك جهاز آخر يعتمد على الرنين المغناطيسي لأنوية المتكون إلا أنه لن يتم مناقشته في هذا الفصل.

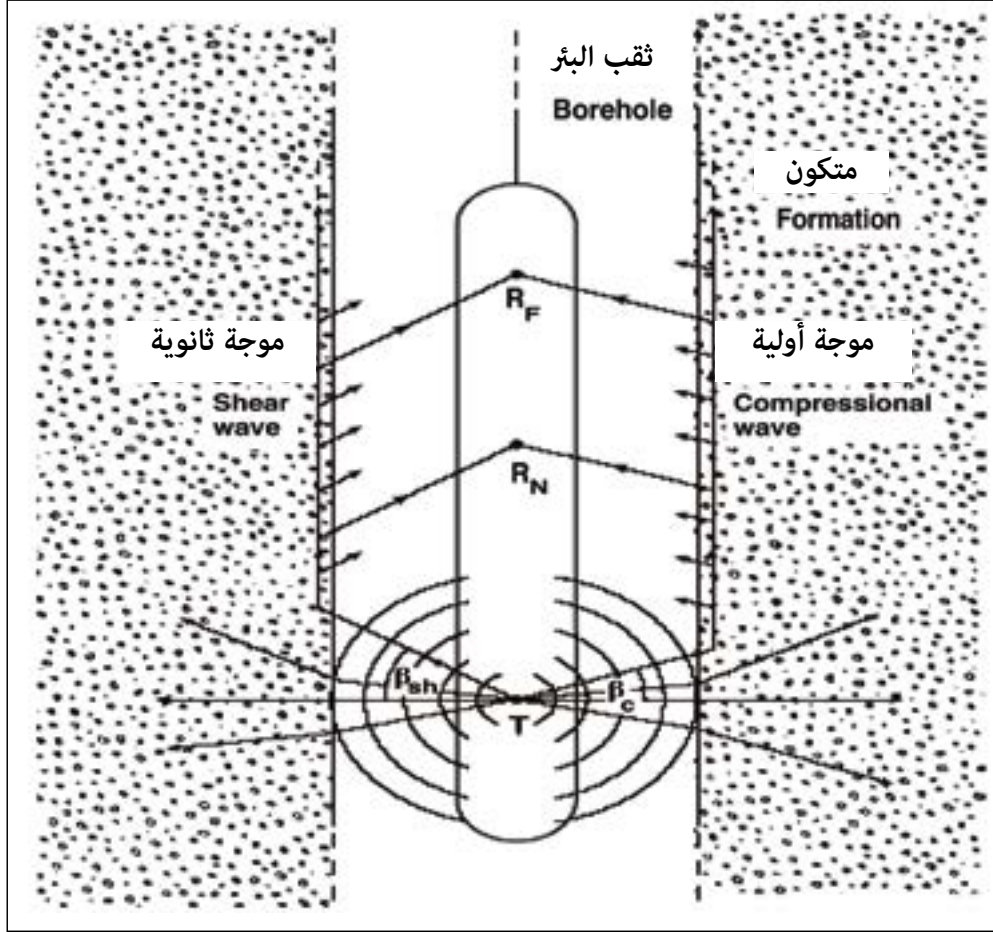
1.6.7 السجل السمعي لقياس المسامية Sonic Log for Measuring Porosity

تقيس أجهزة القياس السمعية التقليدية زمن عبور الموجات التضاغطية Compressional wave في الوسط حول البئر، من خلال مستقبلين يتم وضعهما على أبعاد 3 و 5 أقدام من المرسل. هذا النوع من الأجهزة مبين في (الشكل 29.7). تتكون هذه التقنية من قياس الفرق في أزمنة الوصول بين مستقبلين. عند قسمة هذا الفرق في الزمن على المسافة بين الكاشفين، فإنه يعطي زمن العبور Δt أو التباطؤ Slowness للمتكون والذي يعبر عنه بوحدة $\mu s/ft$. من الصعب تحديد عمق الفحص في المتكون المتجانس. وحيث أنه يتم قياس زمن العبور لأول إشارة موجية، فإن هذا القياس يكون حساساً فقط للمسار الصوتي الذي يستغرق أقصر وقت، وهذا المسار يكون موازياً تماماً لجدار البئر، وقريباً جداً منه.

يمكن تمييز المتكون غير المغزو من خلال أول زمن للوصول، وذلك يعتمد على المسافة بين المصدر والكاشف، وفارق السرعة بين نطاق الغزو ونطاق عدم الغزو، وأيضاً سمك نطاق



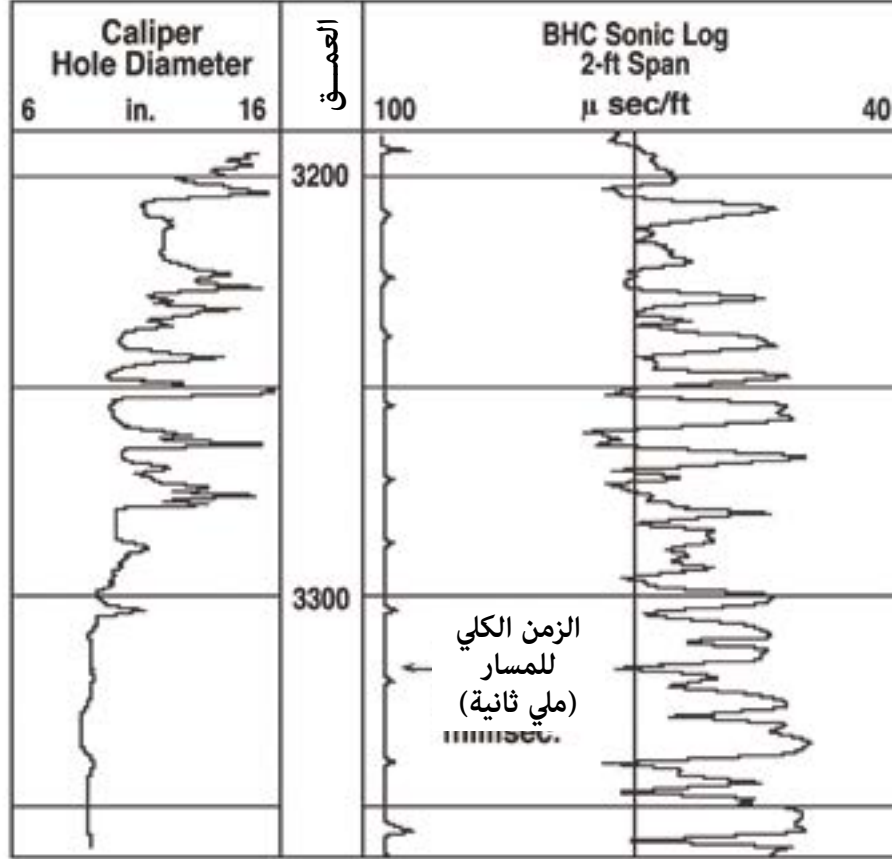
الغزو. عمومًا كلما زاد الفارق في السرعة بين النطاقين وزادت المسافة بين المصدر والكاشف كلما زاد عمق الفحص، والذي يكون حوالي 6 بوصات في الأجهزة السمعية التقليدية.



الشكل 29.7: يبين شكلاً تخطيطياً للجهاز السمعي (Tittman, 1986)

يبين (الشكل 30.7) العرض المثالي للسجل السمعي، حيث يتم عرض زمن عبور المتكون في المسارين 2 و 3. يزداد المقياس المعياري لزمن العبور كلما اتجهنا يساراً، وهو نفس اتجاه زيادة المسامية. إذا تم استخدام جهاز يحتوي على مصدر وكاشف فإنه يقيس زمن عبور أطول بشكل غير طبيعي خاصة عندما يكون قطر البئر كبيراً، ويرجع ذلك إلى زيادة زمن العبور من المرسل إلى المتكون عبر طين الحفر، ثم العودة إلى المستقبل. يمكن الحصول على

حل جزئي لهذه المشكلة باستخدام مرسل واحد ومستقبلين. عند تحديد زمن العبور للكاشفين واستخدام الفرق لتحديد زمن العبور، في هذه الحالة يمكن إزالة تأثير قطر البئر.

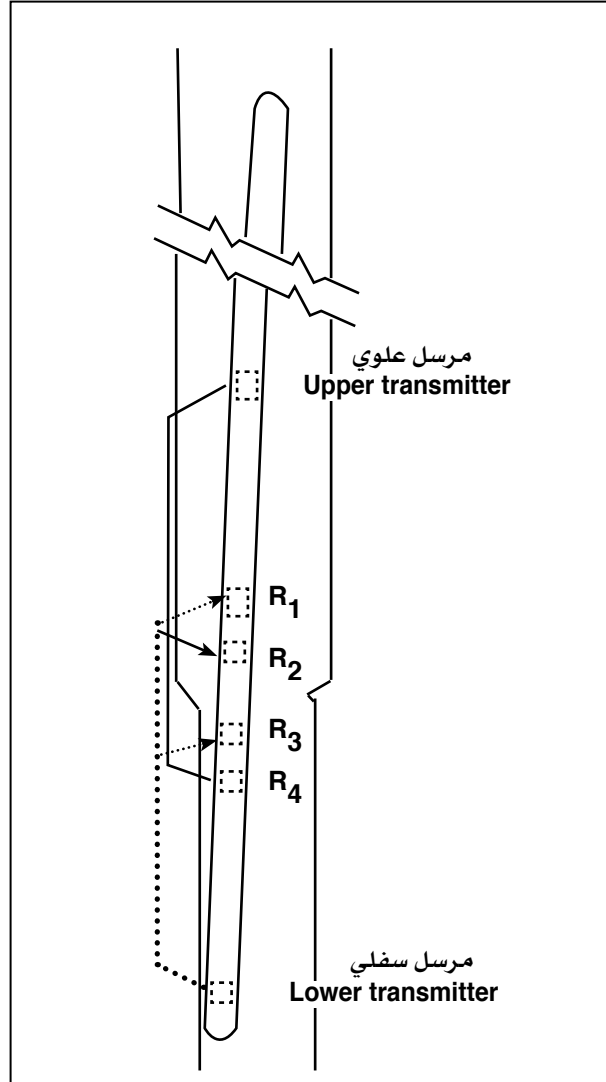


الشكل 30.7: يبين سجل الجهاز السمعي (Timur, 1987)

يوضح (الشكل 31.7) الوضع العام للتسجيل. نجد أنه ليس فقط هناك تغييرات في قطر البئر، بل أيضاً قد لا يتمركز الجهاز في المنتصف بسبب انحراف البئر. يمكن حل هذا التمركز عن طريق استخدام مرسلين وزوجين من المستقبلات القريبة من بعضها. بالتالي هناك مجموعتان من قياس زمن العبور: مجموعة صاعدة وأخرى ساقطة. في الحالة الميمنة في (الشكل 31.7)، يتجاوز زمن العبور الصاعد زمن العبور الساقط. بأخذ متوسط النتيجة، يتم إزالة تأثير مسارات زمن العبور غير المتساوي في طين الحفر، وهنا يعكس زمن عبور المتكون فقط. تسمى الأجهزة من هذا النوع (BHC) Borehole compensated.



تعتبر المضاهاة الجيولوجية واحدة من استخدامات السجلات السمعية. لاحظ العالم ويلي Wyllie أن هناك ارتباطاً قوياً بين زمن عبور الموجات الصوتية ومسامية المتكونات المتماصة، هذا يعني أنه يمكن استخدام السجل السمعي بصفة أساسية في قياس المسامية الأولية، إذ أنه لم يتأثر بالمسامية الثانوية.



الشكل 31.7: استخدام أربع كواشف لتقليل تأثير حجم البئر وميل الجهاز

2.6.7 سجل النيوترون Neutron Log

يعتبر سجل النيوترون، من الناحية التاريخية، أول جهاز نووي يتم استخدامه لتقدير قيمة المسامية للمتكون. يعتمد مبدأ السجل على حقيقة أن ذرات الهيدروجين ذات كفاءة عالية في تقليل سرعة النيوترونات السريعة. قياس توزيع النيوترونات ذات طاقة فوق حرارية Epithermal neutrons الناتجة من تفاعل النيوترونات ذات الطاقة العالية High energy source neutron مع المتكون يكون مرتبطاً بكمية ذرات الهيدروجين داخل المتكون. وحيث أن ذرات الهيدروجين تتواجد أحياناً في الهيدروكربون أو في الماء داخل الفراغات البينية، لذلك يرتبط تواجد الهيدروجين بالمسامية. بدأ استخدام سجل النيوترون لحساب المسامية في الخمسينات من القرن الماضي، واستمر إلى اليوم. يتكون هذا الجهاز في شكله البسيط من مصدر للنيوترونات السريعة مثل؛ بولونيوم-بريليوم Pu-Be أو أمريكيوم-بريليوم Am-Be، وكاشف (أو اثنين) حساس للنيوترونات على بعد مسافة ما من المصدر. سوف يتم مناقشة نوعين من أجهزة النيوترون المستخدمة في قياس المسامية. يتم التمييز بينهما من خلال مدى الطاقة المسجلة؛ فوق حرارية Epithermal أو حرارية Thermal. وحيث أن هذا النوع من الأجهزة يتكون من مصدر للنيوترون وكاشفات النيوترون، فإنه يشار إليه بجهاز نيوترون-نيوترون ($n-n$)، على عكس جهاز الكثافة النووي الذي يستخدم مصدراً من أشعة جاما وكاشفات أشعة جاما ($\gamma-\gamma$)، والذي يقيس كثافة المتكون. هناك أيضاً أنواع أخرى من أجهزة النيوترون، والتي تقيس أشعة جاما الناتجة من التفاعل مع المتكون، وتسمى نيوترون-جاما ($n-\gamma$).

يستخدم هذا الجهاز أساساً في التعرف على المتكونات المسامية وتحديد مساميتها. تستجيب هذه الأجهزة لكمية ذرات الهيدروجين الموجودة في المتكون. وبالتالي يعكس جهاز النيوترون كمية المسام المليئة بالسوائل في المتكونات التي تكون فراغاتها مليئة بالمياه أو النفط. يمكن التعرف على النطاقات الحاملة للغاز وذلك بمقارنة جهاز النيوترون إما بجهاز آخر لقياس المسامية أو بتحليل عينات اللب الأسطوانية. اتحاد كل من جهاز النيوترون مع واحد أو اثنين من أجهزة المسامية يعطي قيماً أدق لكل من المسامية ونوع الصخر شاملةً تحديد حجم الطفل داخل المتكون.



النيوترونات عبارة عن جسيمات متعادلة كهربائياً تحتوي على كتلة مساوية تماماً لكتلة ذرة الهيدروجين. يتم إرسال طاقة عالية من النيوترونات السريعة من مصدر مشع والذي يتم تركيبه في جهاز تسجيلات الآبار من هذا النوع. تصطدم هذه النيوترونات بأنوية مواد المتكون والذي يعتقد أنه تصادم من النوع المرن مثل كرة البلياردو. يفقد النيوترون جزءاً من طاقته مع كل تصادم. تعتمد كمية الطاقة المفقودة عند كل تصادم على الكتلة النسبية للأنوية التي يتصادم معها النيوترون. يحدث الفقد الأكبر للطاقة عندما يصطدم النيوترون مع أنوية لها الكتلة نفسها، أي أنوية ذرات الهيدروجين. اصطدام النيوترون مع أنوية ثقيلة لا يبطئ من سرعة النيوترون بدرجة عالية، فهي تترد بالسرعة نفسها تقريباً. وبالتالي يعتمد سرعة النيوترون بدرجة عالية على كمية الهيدروجين في المتكون. تبدأ حركة النيوترون في التباطؤ بعد ثوانٍ قليلة نتيجة التصادم المتتابع ليتحول إلى الحركة بسرعات حرارية Thermal velocities. في هذه الحالة يبدأ النيوترون بالانتشار عشوائياً دون فقد للطاقة، إلى أن يتم الاستيلاء عليه بأنوية ذرات أخرى كالكلور والهيدروجين والسيليكون وغيرها من العناصر. تصبح هذه الأنوية الأسيرة لهذه النيوترونات مثارة بشدة لترسل أشعة جاما ذات الطاقة العالية. هنا يتم تسجيل إما كمية أشعة جاما أو النيوترونات نفسها، وهذا يعتمد على نوع الجهاز المستخدم.

عندما يزداد تركيز الهيدروجين في المتكون الموجود أمام الجهاز في البئر، تكون حركة النيوترونات بطيئة، وتؤخر على بعد مسافة قصيرة من المصدر. وعلى العكس، عندما يكون تركيز ذرات الهيدروجين قليلاً، تسري النيوترونات لمسافة أبعد من المصدر دون أسر. وبالتالي يزداد معدل العد عند الكاشف عند تركيز أقل من ذرات الهيدروجين والعكس صحيح.

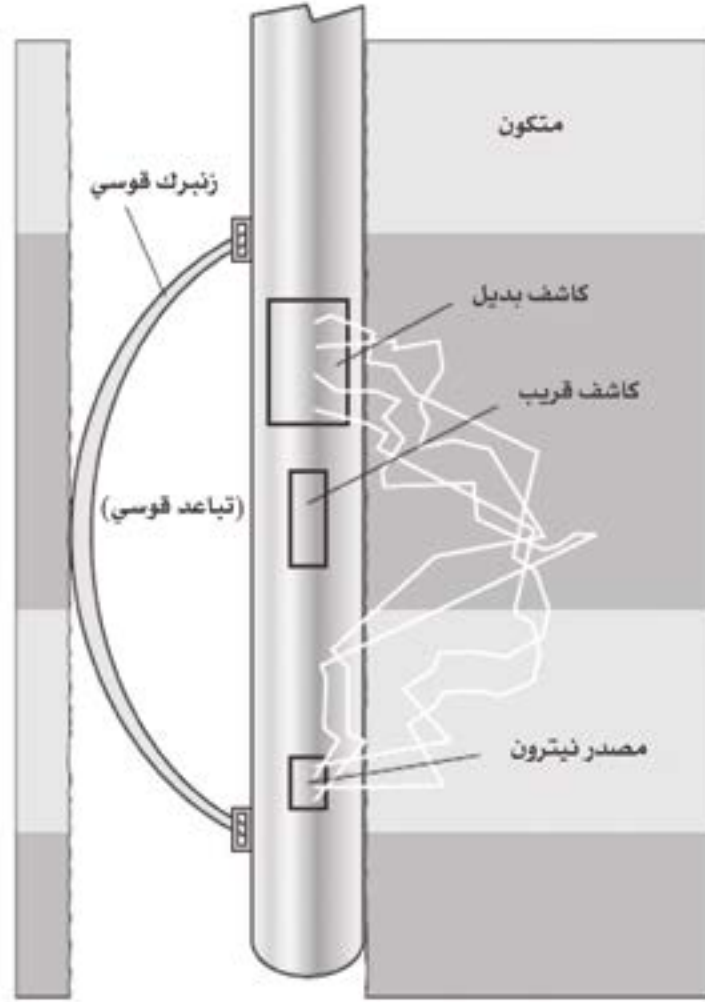
هناك نوعان من سجلات النيوترون ($n-n$) وهما الحراري وفوق الحراري، وكلاهما يشير إلى منسوب الطاقة المسجلة بالجهاز. أجهزة النيوترون الحراري Thermal neutron تكون حساسة بدرجة عالية لوجود ماصات حرارية Thermal absorber داخل المتكون. يعتبر كل من عنصر Gadolinium (Ga) و Boron (B) من الماصات الحرارية البارزة والتي

تكون مصاحبة للطفل وأيضا للكور المتواجد في المتكونات الملحية. العامل الآخر والذي قد يؤثر على قراءة التسجيل هي درجة حرارة المتكون وبيئة البئر. كلما زادت حرارة المتكون كلما زادت طاقة النيوترون، ونتيجة أن فاعلية الكاشف Detector تقل مع زيادة طاقة النيوترون فإن معدل العد أو التسجيل يقل. تستخدم معظم أجهزة النيوترون مصادر للطاقة تتكون من جزأين؛ الأول: يكون مرسلًا لجسيمات ألفا، والآخر: يكون منتجًا للنيوترون مثل بريليوم Beryllium (B). أحد المصادر الشائعة الأكثر استخداما في سجل النيوترون هو أمريكيوم-بريليوم Am-eridium-Beryllium والذي يرمز له (Am-Be). المخاوف البيئية بالإضافة للاحتياطات الأمنية قد يمنع استخدام هذا الجهاز قريباً، ليشجع على إيجاد اختيار بديل.

يبين (الشكل 32.7) جهاز النيوترون في شكله البسيط، والذي يتكون من مصدر للنيوترونات السريعة، مثل Pu-Be أو Am-Be، بطاقة متوسطة تصل إلى العديد من Mev، وكاشف (أو اثنين)، يكون حساساً لاستجابة النيوترونات ذات الطاقة القليلة وعلى مسافة من المصدر. هناك نوعان من أجهزة المسامية للنيوترون. يتم تمييز هذين النوعين من خلال مدى الطاقة المسجلة سواء كانت Thermal أو Epithermal. وحيث أن هذا النوع من الأجهزة يتكون من مصدر من النيوترون وكاشف للنيوترون، لذلك سيتم الإشارة إليهما باسم جهاز (n-n).

هناك أنواع من أجهزة تسجيل النيوترون المستعملة والتي تشمل الأنواع التالية GNT، SNP، CNL. تستخدم كل هذه الأنواع البلوتونيوم-البليوريوم (Pu-Be) أو أمريكيوم-بريليوم (Am-Be) كمصدر للنيوترونات بطاقة تقدر بالعديد من المليفولت. يستخدم سجل (GNT) كاشفاً حساساً لكل من أشعة جاما المأسورة ذات الطاقة العالية والنيوترونات الحرارية. يمكن استخدام هذا السجل في الآبار المغلفة Cased holes وغير المغلفة. قيم المسامية الناتجة من الآبار المغلفة تكون غير دقيقة نتيجة عدم المعرفة الجيدة بوزن المادة المستخدمة في التغليف وموقعها، وأيضاً وجود المادة اللاحمة خلف التغليف،... إلخ. هناك مسافات عديدة متاحة بين المصدر والمستقبل، حيث يتحكم فيها ظروف البئر، والمدى الواقع فيه قيم المسامية. يستخدم





الشكل 32.7: يبين شكلاً تخطيطياً لسجل النيوترون بصفة عامة (Ellis et al., 1983)

سجل (GNT) بعيداً عن مركز البئر وذلك لتقليل تأثير البئر.

أما سجل (SNP)، فإن مصدر النيوترون والكاشف يتم تثبيتهم على مزلقة skid موضوعة على جدار البئر. هذا السجل يسجل فقط النيوترونات ذات الطاقة الأكثر من 0.4 إلكترون فولت. يمتاز هذا السجل بالميزات التالية:

- هو سجل يوضع ملامساً لجدار البئر، فيكون أقل تأثراً بظروف البئر.

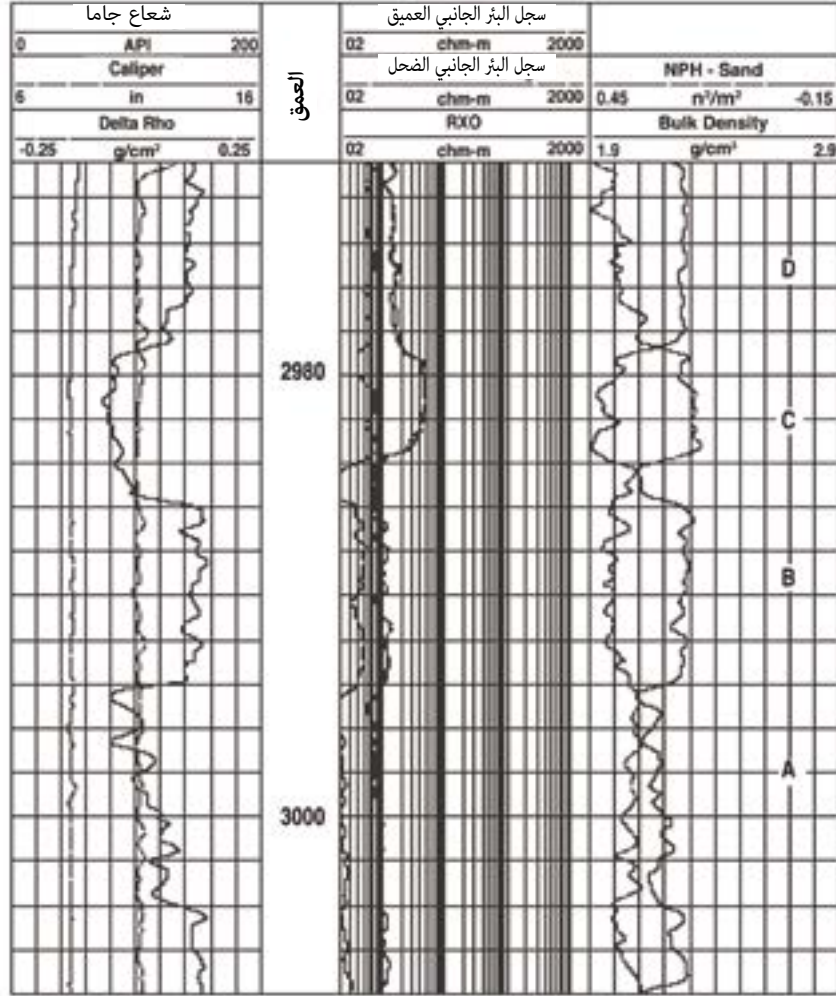
- وهو سجل يقيس النيوترونات ذات الطاقة فوق الحرارية Epithermal، بالتالي لا يتأثر بالعناصر الماصة للنيوترونات ذات الطاقة الحرارية Thermal. يعتبر الكلور والبورون من هذه العناصر الماصة الموجودة في ماء المتكون Formation water والمادة الصخرية matrix.

- معظم التصحيحات المطلوبة تتم أوتوماتيكياً.

يستخدم جهاز (CNL) مسافة مزدوجة لقياس النيوترون الحراري Thermal neutron من خلال كاشفين. يتم انبعاث نيوترونات بطاقة 16 كوري من المصدر. تكون المسافة بين المصدر والكاشف كبيرة وذلك لزيادة عمق الفحص. عند مقارنة عمق الفحص لكل من (CNL) و (SNP) للبيئر نفسها وعند العمق نفسه، نجد أن (CNL) يحتوي على عمق فحص أكبر من (SNP). يقل تأثير ظروف البيئر على جهاز (CNL) نظراً لاستخدامه كاشفين. يمكن استخدام (CNL) في الآبار المليئة بالسوائل، سواء كانت مغلقة أو غير مغلقة، لكن لا يمكن استخدامها في الآبار المليئة بالغاز. معظم أجهزة النيوترون المستخدمة حالياً تقيس بالتزامن مع سجل أشعة جاما، حيث يستخدم كل من (GNT) و (CNL) في الآبار المغلقة، في حين أن سجل (SNP) مصمم للعمل في الآبار غير المغلقة. يسجل دائماً مقياس قطر البيئر Caliper log متزامناً مع SNP log.

يبين (الشكل 33.7) التمثيل القياسي التقليدي لسجل النيوترون والذي يُعطى بالرمز (NPHI)، حيث يمثل في المسار الثالث والذي يتواجد معه سجل الكثافة. يفترض هذا المخطط المبين أن نوع المتكون الصخري هو من حجر الرمل، على الرغم أن هناك مخططات تفترض أحياناً أنه حجر الجير Limestone وأحياناً الدولوميت Dolomite ك متكون صخري. من المتعارف عليه أن يتم تمثيل مدى الكثافة من 1.9 إلى 2.9 جم/سم³ في وجود حجر الرمل المفترض، والذي يعادل تغيراً في المسامية يبلغ حوالي 60pu لمتكون حامل للمياه، ومن ثم نجد أن سجل النيوترون في مدى ديناميكي للمسامية مساوياً 60pu عبر مسار للمسامية يبدأ من 15pu وينتهي عند 45pu. مقياس الكثافة في المتكون من حجر الجير يتراوح بين 1.95 و 2.95 جم/سم³، وقد نجد في أحيانٍ نادرة أن مقياس سجل النيوترون يتراوح بين 0 - 60pu، خاصة عندما تكون قراءات النيوترون عالية.





الشكل 33.7: تمثيل بيانات النيوترون والكثافة على المسار الثالث

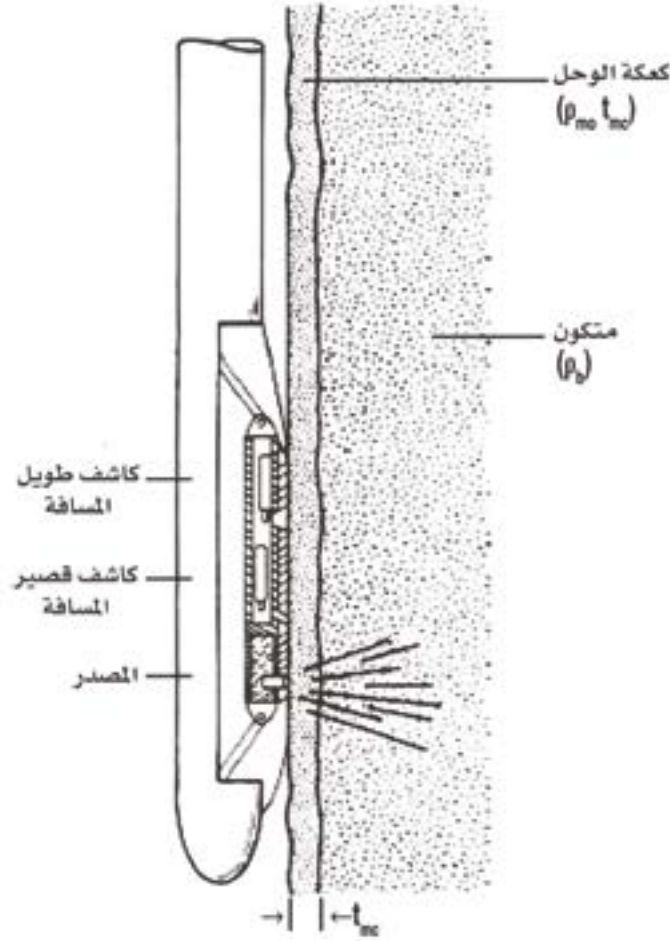
3.6.7 سجل الكثافة Density Log

يعتبر سجل الكثافة مفيداً كمقياس للمسامية الكلية. كما أن هناك استخدامات أخرى لمقياس الكثافة والتي تشمل؛ تحديد المعادن في رواسب المتبخرات، وتحديد حجم الغاز، وكثافة الهيدروكربون، وتقييم الرمال الطفلية، ومعرفة نوع الصخر وتركيبه، وتحديد إنتاج النفط. في هذا الجزء سيتم مناقشة مبادئ القياس والتسجيل، وكيفية تمثيل البيانات دون التعرض بالتفصيل للتصحيحات وتفسير البيانات.

يتم وضع مصدر مشع في الجهاز على جدار البئر لإرسال أشعة جاما ذات الطاقة المتوسطة داخل المتكون. هذه الأشعة عبارة عن جسيمات ذات سرعة عالية تصطدم بالإلكترونات داخل المتكون. مع كل اصطدام تفقد أشعة جاما جزءاً من طاقتها للإلكترونات، وبعد ذلك تستمر هذه الأشعة بفقد أجزاء من طاقتها. يسمى هذا النوع من التصادم بتشتيت الفوتونات حسب نظرية كومبتن Compton scattering. يتم تصميم كل من المصدر والكاشف بشكل يجعل استجابة الجهاز أساساً نتيجة ظاهرة كومبتن. يتم عد أشعة جاما المشتتة والتي تصل إلى الكاشف الموضوع عند مسافة ثابتة من المصدر كدليل لكثافة المتكون. يرتبط عدد تصادمات كومبتن بعدد الإلكترونات في المتكون. وبالتالي، ترتبط استجابة جهاز القياس بالكثافة الإلكترونية Electron density (عدد الإلكترونات /سم³) للمتكون. ترتبط الكثافة الإلكترونية بالكثافة الكلية، ρ_b بالجـم/سم³، والتي تعتمد بشكل أساس على كل من كثافة المادة الصخرية Rock matrix material، ومسامية المتكون Formation porosity، وكثافة الموائع التي تملأ المسامات Fluids filling the pores.

يتم وضع كل من المصدر والكاشف على هيكل مزلقي skid على جدار البئر، لتقليل تأثير عمود سائل الحفر. عندما يكون الاتصال بين هذا الهيكل والمتكون غير جيد نظراً لوجود كعكة الوحل Mud cake، أو نتيجة وجود خشونة في جدار البئر، في هذه الحالة يجب عمل بعض التصحيحات. قد تكون قيمة هذا التصحيح عالية خاصة في ظروف غير مواتية. وإذا تم استخدام كاشف واحد، في هذه الحالة من الصعب تحديد مثل هذا التصحيح، لأنه يعتمد على سمك ووزن ومكونات كعكة الوحل. يبين (الشكل 34.7) أحد أجهزة مقياس الكثافة Formation density compensated (FDC)، حيث يتم استخدام كاشفين.





الشكل 34.7: يبين جهاز الكثافة الذي يوضع على جدار البئر (Ellis et al., 1983)

يبين (الشكل 35.7) عرضاً لبيانات سجل الكثافة، حيث يتم تمثيل سجل الكثافة على المسار الثاني على مقياس خطي بوحدة جم/سم³. أما منحني التصحيح $\Delta\rho$ فيتم تمثيله على المسار الثالث. يوضح الشكل وجود سجل قطر البئر على المسار الأول الذي يحتوي أحياناً على سجل أشعة جاما. يتم تسجيل سجل النيوترون في بعض الأحيان مع سجل الكثافة على المسارين الثاني والثالث.

قبل الاستفادة من بيانات سجلات المسامية لابد من عمل تصحيحات لهذه البيانات، ثم تجرى عملية تحليل وتفسير البيانات، إلا أن ذلك خارج مجال هذا الكتاب. بصفة عامة، يمكن

النيترون بدرجة أكبر بنطاق الغزو، ويتم الاستفادة منه بصفة خاصة في الحصول على قيمة المسامية الكلية للمتكون الصخري على أعماق مختلفة. كما أن قياس الكثافة مع سجلات أخرى يمكن من تحديد نوع الصخر، وباستخدام مخططات أخرى معدة مسبقاً، يمكن تحديد التركيب المعدني لهذه الصخور وخاصة المعادن الثقيلة. إذا احتوى صخر المكمن على هيدروكربون، فإنه قد يؤدي إلى أن تكون المسامية المحسوبة أكبر من القيمة الحقيقية. في هذه الحالة، يكون تأثير النفط Oil غير واضح تماماً، ولكن وجود الغاز Gas يؤثر بشكل واضح على قيمة المسامية، لذلك تكون قيم سجل الكثافة أقل في المتكون الحامل للغاز مقارنة بالمتكون نفسه الحامل للماء أو النفط. يمكن الاستفادة من وجود انفصال Separation بين منحنىي سجل النيترون والكثافة للاستدلال على وجود الغاز، غير أن الطين قد يعطي الانفصال نفسه، وهنا لا بد من الحصول على معلومات من سجلات أخرى كسجلات المقاومة للتمييز بين الغاز والطين. يمكن الرجوع إلى (Asquith & Gibson, 1982; Serra, 2007) للحصول على معلومات تفصيلية في كيفية تصحيح بيانات سجلات الكثافة، ومن ثم كيفية الاستفادة من هذه البيانات.

7.7 تقييم صخر المكنن والمصدر Evaluation of Source and Reservoir Rock

تقييم صخر المكنن والمصدر هي عملية يقصد بها استخدام قياسات الآبار لاستنتاج وتقييم خصائص المكونات تحت السطحية. يكون لهذه الخصائص المختلفة تطبيقات في العديد من مناطق الاستكشاف النفطي والإنتاج. تعتبر المعاملات البتروفيزيائية من الخصائص المهمة في التعرف على تحديد صخر المصدر، وتقييم النطاقات المنتجة اقتصادياً والحاملة للهيدروكربون. في هذا الباب سيتم دراسة كيفية حساب بعض المعاملات البتروفيزيائية الأساسية لدراسة خصائص صخور المكنن والمصدر المستتجة من تسجيلات الآبار.

7.7 تقييم صخر المكنن Evaluation of Reservoir Rock

1.7.7 حساب حجم الطفل Shale Volume Determination

قد تتواجد معادن الطين Clay minerals، والتي يشار إليها في معظم الأحيان بالطفل Shale، موزعة داخل مكونات أحجار الرمل في ثلاثة أشكال: صفائحي Laminated، وتركيبى Structural وتناثري Dispersed، كما هو موضح بـ (الشكل 36.7). النوع الأول الصفائحي Laminated قد يتواجد ضمن حجر الرمل في هيئة رقائق صفحية من أصل فتاتي، وهي تتكون خارج إطار حجر الرمل لتسمى الطين الصفحي. على الرغم أن الصفائح الطينية لا تؤثر بشكل مباشر على المسامية والنفاذية إلا أنها تشكل حاجزاً رأسياً للنفاذية. قد ينتج الطين ما يسمى بالتحورات Diagenesis نتيجة تغيرات بعدية في الصخر بفعل الحرارة والضغط، حيث يحدث تغيرات لجزيئات المادة، باستثناء الكوارتز، لتفاعلها مع ماء المتكون. يعتبر معدن الفلسبار أكثر المعادن شيوعاً والذي يتحول/يتحلل إلى كاولينيت، وأيضا الهورنبلند يتحلل إلى كلورايت، فيؤدي ذلك إلى تكون الطين التركيبى Structural clay. عادة ما يتواجد حجر الرمل المتحور على هيئة طين متناثر Dispersed clay، وينشأ عندما ترسب بلورات الطين في السوائل البينية الموجودة في الفراغات.





الشكل 36.7: أنماط توزيع الطفل أو الطين (Bassiouni, 1994)

هناك طرق مختلفة لتحديد حجم الطفل منها؛ تسجيلات أشعة جاما والجهود الذاتية والمقاومية والنيوترون، أو كلا النيوترون والكثافة مجتمعين (Asquith & Krygowski, 2004). في البداية يتم حساب مؤشر حجم الطفل، ثم يتم حساب حجم الطفل كالتالي:

حساب حجم الطفل من سجل أشعة جاما Shale Volume From Gamma Ray

يحتوي الطفل عادة على نسبة إشعاع أكثر من التي تتواجد في حجر الرمل وصخور الكربونات، ولذلك يستخدم سجل أشعة جاما في حساب حجم الطفل في صخر المكنم. ولحسابه، يتم حساب مؤشر Index أشعة جاما أولاً بالمعادلة (7).

$$I_{GR} = \frac{GR_{log} - GR_{min}}{GR_{max} - GR_{min}} \quad (7)$$

حيث I_{GR} مؤشر Index أشعة جاما، GR_{log} قراءة أشعة جاما من المتكون، GR_{min} أقل قراءة لأشعة جاما (غالباً في وجود حجر رمل نقي أو كربونات)، GR_{max} أقصى قراءة لأشعة جاما (غالباً في وجود الطفل). قد تكون العلاقة بين نسبة الطفل ودليل أشعة جاما خطية. مع ذلك يتم استخدام العلاقة غير الخطية خاصة إذا تم معرفة عمر ونوع الصخر (المعادلات 8-11):

$$\text{For Tertiary rocks: } V_{sh} = 0.083 (2^{3.7I_{GR}} - 1) \quad (8)$$

$$\text{For older rocks: } V_{sh} = 0.33 * (2^{2*1GR} - 1) \quad (9)$$

$$V_{sh} = \frac{I_{GR}}{3 - 2 * I_{GR}} \quad (10)$$

$$V_{sh}(corr) = 1.7 - \sqrt{3.38 - (X + 0.7)^2} \quad (11)$$

حساب حجم الطفل من سجل الجهد الذاتي Shale Volume from SP

تعتبر طريقة الجهد الذاتي الطريقة الثانية الأكثر شيوعاً في تحديد حجم الطفل. قيمة هذا الجهد تقل بزيادة المقاومة، خاصة عندما يكون المتكون مصاحباً للهيدروكربون. جودة حساب حجم الطفل بهذه الطريقة هي قليلة في النطاقات الحاملة لمياه عذبة أو في آبار محفورة باستخدام سائل حفر طين ملحي Salty mud. تبين المعادلة التالية كيفية حساب حجم الطفل المعادلة (12).

$$V_{sh} \leq 1 - \frac{PSP}{SSP} \quad (12)$$

حيث PSP : تمثل الجهد الذاتي الخادع في وجود وحدة من الطفل Shaly unit
SSP : تمثل الجهد الذاتي في وجود وحدة سميكة نظيفة Thick clean unit

حساب حجم الطفل من سجل النيوترون Shale Volume from Neutron

يمكن تحديد حجم الطفل من سجل النيوترون المعادلة (13):

$$V_{sh} = \frac{\varphi N_{log} - \varphi N_{min}}{\varphi N_{sh} - \varphi N_{min}} \quad (13)$$



حيث $\varphi_{N \log}$ قراءة المسامية من سجل النيترين للمتكون، $\varphi_{N \min}$ أقل قراءة للمسامية من سجل النيترين، φ_{Nsh} قراءة المسامية لسجل النيترين في نطاق من الطفل.

تحديد حجم الطفل سجلي المقاومة R Shale Volume from Resistivity

يمكن استخدام المقاومة في حساب حجم الطفل في حالة وجود نسبة عالية من الطفل وقراءة قليلة من R_t ، من العلاقة التالية المعادلة (14):

$$V_{sh} \leq \frac{R_{sh}}{R_{t \log}} \quad (14)$$

إذا كانت النسبة الناتجة من المعادلة السابقة أقل من 0.5، حينئذ يتم تطبيق المعادلة التالية لتقدير حجم الطفل باستخدام سجل المقاومة المعادلة (15):

$$V_{sh} = \left(\frac{R_{sh}}{R_{t \log}} \right) \times \left(\frac{R_{cl} - R_{t \log}}{R_{cl} - R_{sh}} \right)^{1/B} \quad (15)$$

حيث R_{sh} قراءة المقاومة لطبقة الطفل، $R_{t \log}$ قراءة المقاومة الحقيقية للمتكون، R_{cl} قراءة المقاومة الحقيقية لنطاق نظيف خالٍ من الطفل المعادلة (16).

تحديد حجم الطفل من كلا سجلي النيترين والكثافة

Shale Volume From Combination of Neutron and Density

يمكن من خلال سجلي النيترين والكثافة تحديد حجم الطفل كالتالي:

$$V_{sh} = \frac{\varphi D - \varphi N}{\varphi D (clay) - \varphi N (clay)} \quad (16)$$

حيث: φD قيمة المسامية من سجل الكثافة للمتكون، φN قراءة المسامية من النيترين للمتكون، $\varphi N (clay)$ قراءة المسامية للنيترين في نطاق من الطفل، $\varphi D (clay)$ قيمة المسامية المستتجة من الكثافة في نطاق من الطفل.

تصحيح قيمة حجم الطفل Shale Volume Correction

هناك معادلات تجريبية مختلفة يمكن تطبيقها لتصحيح حجم الطفل الناتج من الطرق السابق ذكرها المعادلات (17 - 19):

$$V_{sh} (\text{corr}) = 1.7 - \sqrt{3.338 - (X + 0.7)^2} \quad (\text{Clavier et al., 1971}) \quad (17)$$

$$V_{sh} (\text{corr}) = \frac{0.5X}{(1.5 - X)} \quad (\text{Steiber, 1970}) \quad (18)$$

$$V_{sh} (\text{corr}) = 0.33 \left(2^{(2X)} - 1 \right) \quad (\text{Steiber, 1970}) \quad (19)$$

حيث X حجم الطفل الذي تم تحديده بالطرق السابقة.

من خلال قيمة حجم الطفل المصححة، يتم تصنيف النطاقات كالتالي:

- إذا كان حجم الطفل أقل من 10%، فإن النطاق يسمّى نطاقاً نظيفاً Clean zone
- إذا كان حجم الطفل يتراوح بين 10 و 35%، فإنه يسمى نطاقاً طفلياً Shaly zone
- إذا كان حجم الطفل أكبر من 35%، فإن النطاق يسمى نطاق الطفل Shale zone

2.7.7 حساب المسامية Porosity Determination

يمكن تعريف صخر المكمن أو الخزان على أنه الصخر الذي يحتوي على كل من المسامية والنفاذية. تعرف المسامية على أنها نسبة حجم الفراغات التي يحويها الصخر سواءً كانت متصلةً أو منفصلةً إلى الحجم الكلي للصخر. ويمكن التعبير عنها في المعادلة (20):

$$\varphi = \frac{V_P}{V_t} = \frac{V_t - V_S}{V_t} \quad (20)$$

حيث V_p حجم الفراغات، V_t الحجم الكلي للصخر، V_s حجم المواد الصلبة.



يقوم محللو التسجيلات بالتمييز بين المسامية الأولية ϕ_1 والثانوية ϕ_2 . الأولى يمكن حسابها باستخدام سجلات المقاومة والسجلات السمعية. أما الثانية فتنتج من الفرق بين المسامية الكلية المشتقة من السجلات الإشعاعية (الكثافة والنيوترون) والمسامية الأولية (Serra, 1986) كما هو موضح في المعادلتين (21, 22).

$$\phi = \phi_1 + \phi_2 \quad (21)$$

$$\phi_2 = \phi_{ND} - \phi_S \quad (22)$$

حيث ϕ_S المسامية الأولية من السجل السمعي Sonic log، ϕ_{ND} المسامية الناتجة من سجلي النيوترون والكثافة.

اقترح العالمان (Archie, 1942) و (Winsauer et al., 1952) المعادلتين التاليتين (23, 24) من خلال قياسات معملية لما أسموه معامل المتكون (F) Formation factor والمسامية:

$$F = \phi^{-m} \quad (\text{Archie, 1942}) \quad (23)$$

$$F = a \phi^{-m} \quad (\text{Winsauer et al., 1952}) \quad (24)$$

يعتمد الأس (m) على درجة تماسك الصخر، ويسمى أس التسمنت -Cementation exponent ويتراوح بين 1.14 و 2.52، أما الثابت (a) والذي يسمى معامل الالتواء Tortosity factor يتراوح بين 0.35 و 4.78، ويعتمد على درجة تعقد المسارات داخل الصخر.

تحديد المسامية الكلية من سجل الكثافة

Total Porosity Determination from Density Log

يمكن حساب المسامية الكلية من خلال سجل الكثافة كالتالي:

في حالة نطاق نظيف (Clean zone)، يمكن استخدام المعادلة (25) (Wyllie, 1963):

$$\varphi = \frac{\rho_{ma} - \rho_b}{\rho_{ma} - \rho_f} \quad (25)$$

حيث: φ المسامية من سجل الكثافة، ρ_{ma} كثافة المتكون الصخري والتي تختلف من صخر لآخر (الجدول 2.7)، ρ_b كثافة المتكون من السجل، أما ρ_f كثافة السائل الموجود بالصخر. الجدول 2.7: قيم الكثافة لمعظم المتكونات الصخرية الشائعة والموائع (Asquith et al., 2004)

تركيب الصخر / المائع	ρ_{ma} or ρ_{fl} (kg/m ³ g/cm ³)
حجر رملي	(2644) 2.644
حجر جيرى	(2710) 2.710
دولومايت	(2877) 2.877
انهدرايت	(2960) 2.960
ملح	(2040) 2.040
ماء عذب	(1000) 1.0
ماء مالح	(1150) 1.15

في وجود نطاق طفلي Shaly zone، يمكن حساب المسامية من خلال المعادلتين (26,27)

يعتمد فيهما على قراءات سجل الكثافة كالتالي:

$$\varphi_{De} = \frac{\rho_{ma} - \rho_b}{\rho_{ma} - \rho_f} - V_{sh} \frac{\rho_{ma} - \rho_{sh}}{\rho_{ma} - \rho_f} \quad (\text{Dresser Atlas, 1983}) \quad (26)$$

حيث ρ_{sh} كثافة الطفل.



Total Porosity Determination from Neutron حساب المسامية الكلية من سجل النيوترون
 في متكون نظيف، يمكن إيجاد المسامية الكلية من خلال قراءة سجل النيوترون مباشرة
 على افتراض أن المتكون الصخري يتألف من حجر الجير، وأيضاً بعد عمل تصحيحات تأثير
 ظروف البئر. في وجود نطاق طفلي، تعتمد المسامية الكلية على حجم الطفل، وبالتالي يمكن
 استخدام المعادلة (Dewan, 1983) التالية:

$$\varphi_{Ne} = \varphi_N - V_{sh} \times \varphi_N(sh) \quad (27)$$

حيث: $\varphi_{N(sh)}$ عبارة عن تسجيل المسامية في نطاق من الطفل، φ_N قراءة سجل النيوترون في
 النطاق الطفلي بعد عمل التصحيحات المتمثلة في ظروف البئر ونوع المتكون.

حساب المسامية الكلية من سجل النيوترون والكثافة

Total Porosity Calculation from Neutron and Density

يمكن حساب المسامية الكلية في متكون نظيف باستخدام المعادلة (28):

$$\varphi_{ND} = \sqrt{\frac{\varphi_N^2 + \varphi_D^2}{2}} \quad (28)$$

في متكون طفلي، يمكن حساب المسامية الكلية من خلال المعادلات (29-31) (Bussian, 1983) كالتالي:

$$\varphi_{De} = \varphi_D - \left[\left(\frac{\varphi Dsh}{0.45} \right) \times 0.13 \times V_{sh} \right] \quad (29)$$

$$\varphi_{Ne} = \varphi_N - \left[\left(\frac{\varphi Nsh}{0.45} \right) \times 0.03 \times V_{sh} \right] \quad (30)$$

$$\varphi_{ND} = \sqrt{\frac{\varphi_{Ne}^2 + \varphi_{De}^2}{2}} \quad (31)$$

تحديد المسامية الأولية Primary Porosity Determination

يعتمد الفارق في زمن العبور (Δt) المقاس بواسطة الجهاز السمعي على كل من نوع الصخر والمسامية. بالتالي، يجب معرفة زمن عبور المتكون الصخري (الجدول 3.7) لاستنتاج المسامية من الجهاز السمعي (Asquith & Krygowski, 2004). في وجود متكون نظيف، يمكن تحديد المسامية الأولية في الصخور المتماسكة المعادلة (32).

$$\varphi = \frac{\Delta t_{\log} - \Delta t_{ma}}{\Delta t_f - \Delta t_{ma}} \quad (32)$$

عند حساب المسامية من معادلة ويلى Wyllie لصخور الكربونات ذات مسامية ثانوية ممثلة في فجوات وكسور، فإن قيمة المسامية المحسوبة تكون قليلة. يرجع ذلك لأن السجل السمعي يسجل مسامية الصخر الأولية فقط، دون التأثير بالمسامية الثانوية. ومن ثم يمكن حساب المسامية الثانوية بطرح المسامية الناتجة من الجهاز السمعي من المسامية الكلية الناتجة من أي من سجل الكثافة أو النيوترون أو كليهما.

الجدول 3.7 : السرعة الصوتية وفارق زمن العبور لأنواع مختلفة من المكونات الصخرية والموائع (Bussian, 1983)

التركيب الصخري / سائل	سرعة المادة اللاحمة Ft/sec	Δt_{matrix} or Δt_{fluid} (Wyllie) $\mu\text{sec}/\text{ft}$ ($\mu\text{sec}/\text{m}$)	Δt_{matrix} (Raymer et al.) $\mu\text{sec}/\text{ft}$ ($\mu\text{sec}/\text{m}$)
حجر رملي	18.000 to 19,500	55.5 to 51.0 (182 to 168)	56 (184)
حجر جيرى	21.000 to 23.000	47.6 (156)	49 (161)
دولومايت	23.000 to 26.000	43.5 (143)	44 (144)
انهدرايت	20.000	50.0 (164)	
ملح	15.000	66.7 (219)	
غلاف (حديد)	17.500	57.0 (187)	
ترشيح طين ماء عذب	5.280	189 (620)	
ترشيح طين ماء مالح	5.980	185 (607)	



وحيث أن السجل السمعي يستخدم في حساب المسامية في صخر متماسك، فإنه يجب إضافة معامل التضغط التجريبي (C_p) لمعادلة ويلى (Wyllie, 1963) كما هو موضح في المعادلتين (33, 34):

$$\varphi_S = \left[\frac{\Delta t_{\log} - \Delta t_{mat}}{\Delta t_{fl} - \Delta t_{mat}} \right] * \frac{1}{C_P} \quad (33)$$

$$C_P = \frac{\Delta t_{sh} * C}{100} \quad (34)$$

حيث (C) مقدار ثابت وعادة يساوي 1.0 (Hilchie, 1978).

يزداد الفارق في زمن العبور (Δt) كلما زادت نسبة الهيدروكربون، لذلك نجد قراءة المسامية عالية جداً إذا لم يتم تصحيح تأثير الهيدروكربون. تم اقتراح التصحيحات التالية (Hilchie, 1978) لتأثير الهيدروكربون من خلال المعادلات (35 - 37):

$$\varphi = \varphi_s * 0.7 \text{ (gas)} \quad (35)$$

$$\varphi = \varphi_s * 0.9 \text{ (Oil)} \quad (36)$$

في النطاق الطفلي Shaly zone

$$\varphi_{Se} = \left(\frac{\Delta t_{sh} - \Delta t_{ma}}{\Delta t_f - \Delta t_{ma}} \times \frac{100}{\Delta t_{sh}} \right) - V_{sh} \left(\frac{\Delta t_{sh} - \Delta t_{ma}}{\Delta t_f - \Delta t_{ma}} \right) \quad (37)$$

تحديد المسامية الثانوية Secondary Porosity Determination

يمكن استخدام العلاقة التالية المعادلة (38) لحساب المسامية الثانوية

$$\varphi_2 = \varphi_{ND} - \varphi_s \quad (38)$$

تحديد المسامية الفاعلة Effective Porosity Determination

تعرف المسامية الفاعلة Effective porosity على أنها كمية الفراغات المتصلة والقادرة على إمرار السوائل. ويستثنى من هذا التعريف الفراغات المعزولة والتي قد تحتوي على ماء ممتز. يمكن استخدام المعادلتين التاليتين (39, 40) في حساب المسامية الفاعلة:

1- المعادلة العامة

$$\varphi_{E1} = \varphi_T (1 - V_{sh}) \quad (39)$$

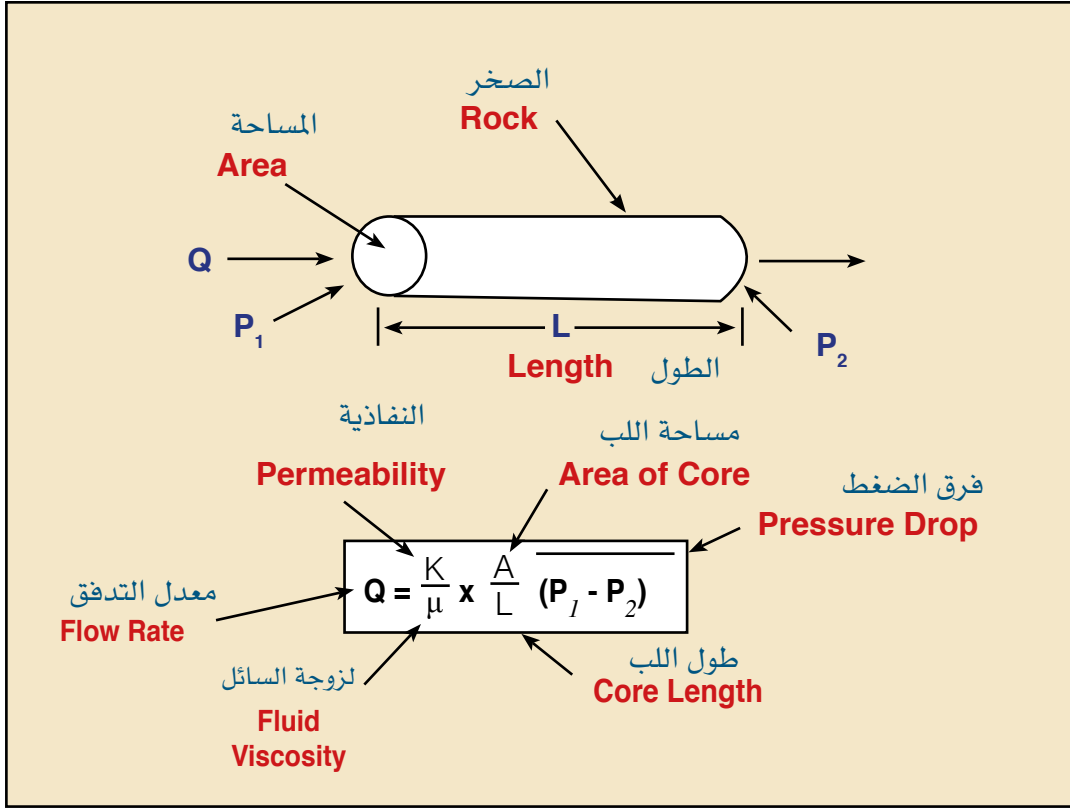
2- المعادلة التجريبية

$$\varphi_{E2} = (2\varphi_{Ne} + 7\varphi_{De}) / 9 \quad (40)$$

3.7.7 حساب النفاذية Permeability

تعرف النفاذية على أنها قدرة الصخر على إمرار السائل من خلاله. تُسمى النفاذية بأنها النفاذية المطلقة عند إمرار سائل واحد فقط في عدم وجود آخر. أما النفاذية الفاعلة فهي قدرة الصخر على إمرار سائل واحد في وجود سائل آخر. تعرف النفاذية النسبية على أنها النسبة بين النفاذية المطلقة والنفاذية الفاعلة. تعرف وحدة قياس النفاذية بالمللي دارسي (md). يمكن قياس نفاذية الصخر في المختبر من خلال العينات اللبية Core samples أو الفتات الصخري Cuttings كما هو موضح في (الشكل 37.7).





الشكل 7-37: يوضح كيفية حساب النفاذية

حيث L طول العينة، (p_1) ضغط السائل عند بداية العينة، (p_2) ضغط السائل عند نهاية العينة، (Q) معدل تدفق السائل، (A) مساحة مقطع العينة، (K) النفاذية. كما يمكن حساب النفاذية بواسطة تسجيلات الآبار من خلال علاقات عدة، سيتم التركيز هنا على حساب النفاذية من المسامية وقيمة التشبع بالماء غير القابل للاستخلاص من المتكون (S_{wi}) . وعلى الرغم أنه لا يمكن التأكيد على اعتماد النفاذية على المسامية في جميع الأحوال، إلا أن هناك علاقة تجريبية المعادلة (41) اقترحها (Wyllie & Rose , 1991): وتتص على:

$$k = \frac{C\phi^x}{(S_{wi})^y} \quad (41)$$

كما اقترح العديد من الباحثين انطلاقاً من معادلة ويلي وروز علاقات تجريبية أخرى مختلفة المعادلات (42-45) تسمح بتقدير النفاذية من المسامية كالتالي (Schlumberger, 1991):

علاقة تيكسير Tixier:

$$k^{1/2} = 250 \frac{\emptyset^3}{S_{wi}} \quad (42)$$

علاقة تيمور Timor:

$$k^{1/2} = 100 \frac{\emptyset^{2.25}}{S_{wi}} \quad (43)$$

علاقة كوت-دومانوار Coates-Dumanoir:

$$k^{1/2} = 300 \frac{\emptyset^w}{w^4 S_{wi}^w} \quad (44)$$

وعلاقة كوت Coates:

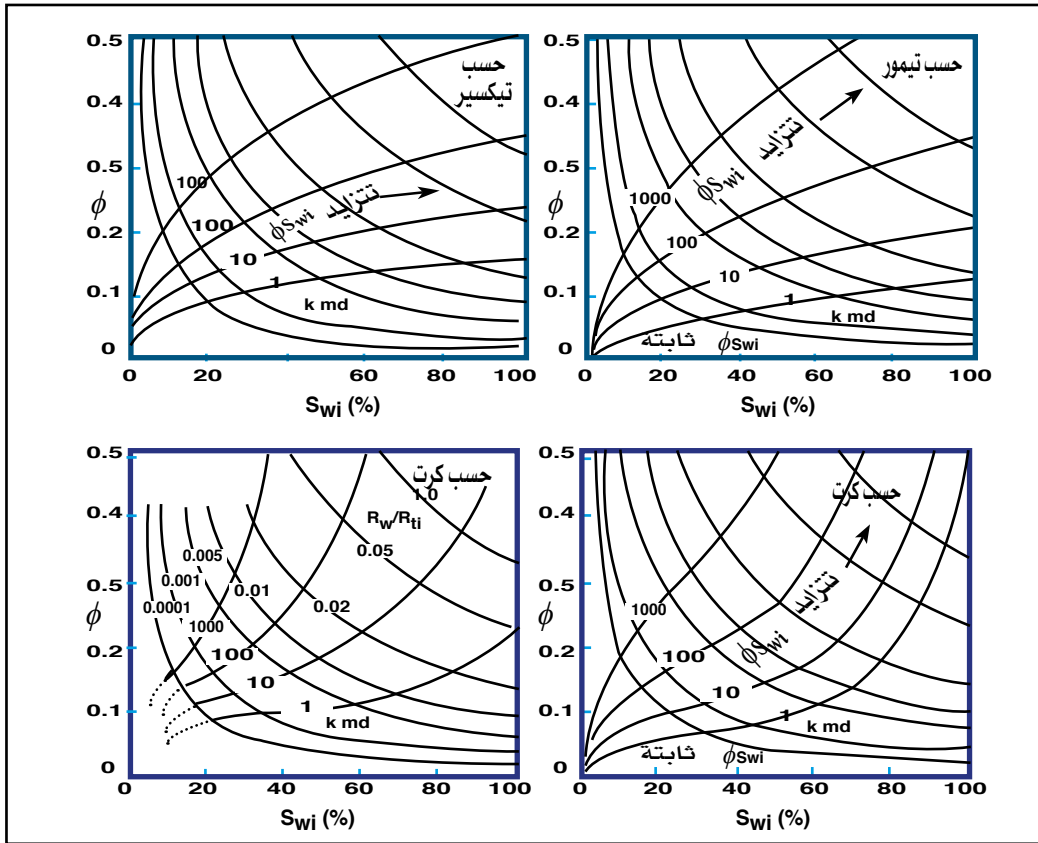
$$k^{1/2} = 70 \frac{\emptyset_e^2 (1 - S_{wi})}{S_{wi}} \quad (45)$$

حيث: (k) تعني النفاذية (بالملييدارسي md)، (\emptyset) المسامية، (S_{wi}) التشبع بالماء غير القابل للاستخلاص من المتكون، (w) متغير خاص بالبنية النسيجية Texture. ويعرض (الشكل 37.7) هذه العلاقات الأربع. تأخذ العلاقة بين المسامية والنفاذية عدة أشكال تختلف من صخر لآخر، إلا أنه يمكن القول بصفة عامة، كلما زادت المسامية زادت النفاذية. توضح الأشكال التالية (38.7) و (39.7) علاقات المسامية والنفاذية لبعض الصخور.

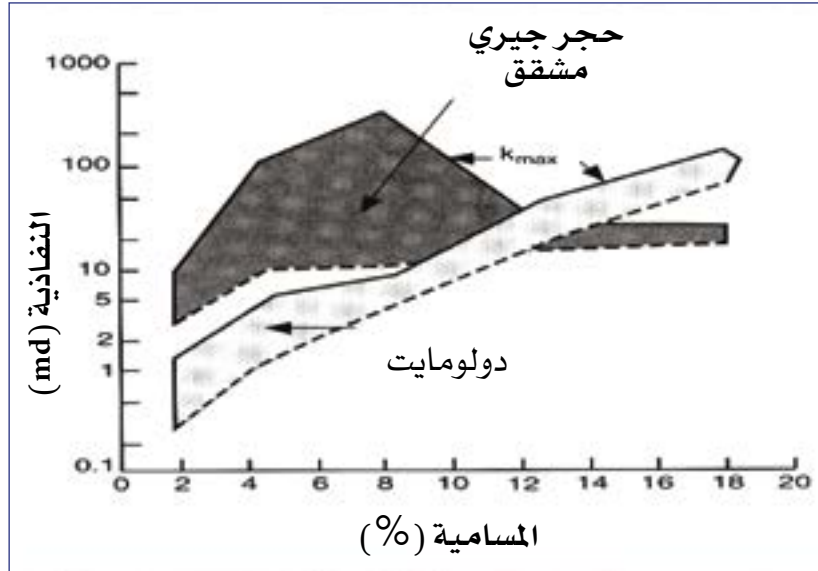


4.7.7 حساب التشبع بالماء Water Saturation

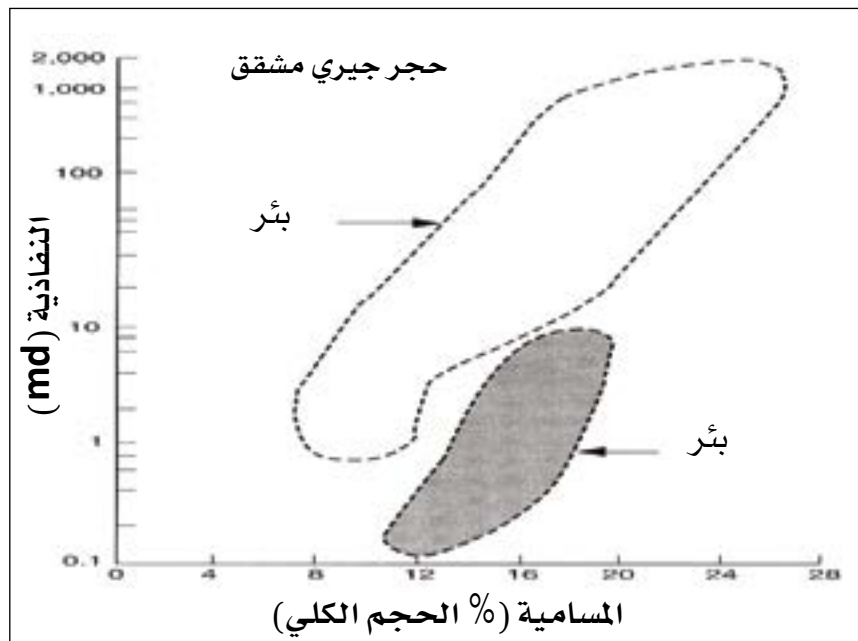
يعرف تشبع الماء على أنه كمية الفراغات في المتكون الصخري المحتوية على المياه، ويساوي نسبة حجم الماء إلى حجم الفراغات، ويتم تمثيله إما على هيئة كسر عشري أو نسبة مئوية، ويرمز لها بالرمز (S_w) .



الشكل 38.7: المخططات المستخدمة في حساب النفاذية من المسامية والتشبع بالماء (شقيق وآخرون، 1995)



الشكل 39.7: يوضح العلاقة بين النفاذية والمسامية لبعض الصخور (Ellis & Singer, 2008)



الشكل 40.7: يوضح العلاقة بين النفاذية والمسامية لمعادن الطين (Ellis & Singer, 2008)



$$\frac{\text{ماء المتكون الذي يشغل المسام}}{\text{الحجم الكلي للفراغات في الصخر}} = S_w \text{ التشبع المائي}$$

على الرغم أن التشبع الهيدروكربوني هو الكمية ذات الاهتمام، إلا أن تشبع المياه يستخدم عادة في المعادلات مثل معادلة آرشي. أيضاً يعطي التشبع الهيدروكربوني (S_h) بدلالة تشبع المياه المعادلة (46).

$$S_h = 1 - S_w \quad (46)$$

تشبع المياه في نطاق عدم الغزو (S_w) Water Saturation in Uninvaded Zone

يمكن حساب تشبع المياه في متكون نظيف من خلال معادلة آرشي (Archie, 1942) المعادلة (47):

$$S_w = \left[\frac{a * R_w}{R_t * \phi^m} \right]^{\frac{1}{n}} \quad (47)$$

حيث S_w تشبع المياه في نطاق عدم الغزو

R_w مقاومة مياه المتكون عند درجة حرارة المتكون

R_t المقاومة الحقيقية للمتكون

ϕ المسامية

a معامل الالتواء Tortuosity factor

m أس التسمنت Cementation exponent

n أس التشبع Saturation exponent

يمكن أيضا حساب تشبع الماء من المعادلات (48 - 53):

$$S_w = \left(\frac{FR_w}{R_t} \right) \quad (48)$$

$$S_w = \left(\frac{0.81R_w}{\Phi^2_e R_t} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (49)$$

$$S_w = \sqrt{\frac{aR_w}{\left[1 - \left(1 - \frac{V_p \Delta t_{mat}}{10^6} \right)^{\frac{1}{x}} \right]^m} R_t} \quad (50)$$

حيث أن معكوس زمن العبور (Δt) المقاس من الجهاز السمعي يستخدم لتحديد السرعة التضاغطية (V_p ft / sec) في الصورة التالية (Bussian, 1983):

$$V_p = 10^6 / \Delta t \quad (51)$$

أما الأس (x) فيمكن الحصول عليه من (الجدول 4.7):

الجدول 4.7: أزمنة العبور الصخرية matrix والأس exponent (Schlumberger, 1991)

Matrix	Δt_{mat} ($\mu\text{sec}/\text{ft}$)	X
سليكا	55.5	1.60
كالسيات	47.6	1.76
دولومايت	43.5	2.00



في وجود متكون طفلي Shaly formation :

يمكن حساب تشبع الماء بالأخذ في الإعتبار حجم الطفل (Schlumberger, 1991) من خلال المعادلة المعادلة (52):

$$S_w = \left(\frac{FR_w}{R_t} \right)^{\frac{1}{2}} - \left[\frac{V_{sh} R_w}{0.4 \varphi_e R_{sh}} \right] \quad (52)$$

والتي يمكن وضعها في الصورة التالية عند التعويض بقيمة (F).

$$S_w = \left(\frac{0.81R_w}{\varphi_e^2 R_t} \right)^{\frac{1}{2}} - \left[\frac{V_{sh} R_w}{0.4 \varphi_e R_{sh}} \right] \quad (53)$$

تشبع الماء في نطاق الغزو (S_{xo}) Water Saturation in Invaded Zone

في النطاق النظيف Clean zone :

يمكن حساب التشبع في نطاق الغزو أو التدفق (Invaded or Flushed zone) من معادلة آرشي أيضاً، بعد استبدال متغيرين هما المقاومة للطين الرشيح (R_{mf}) بدلاً من مقاومة الماء (R_w)، والمقاومية لنطاق الغزو (R_{xo}) بدلاً للمقاومية لنطاق عدم الغزو (R_t) كما هو موضح في المعادلة (54):

$$S_{xo} = \left(\frac{a * Rmf}{Rxo * \varphi^m} \right)^{\frac{1}{n}} \quad (54)$$

حيث S_{xo} تشبع المياه في نطاق الغزو (التدفق)

Rmf مقاومة طين الرشيح عند درجة حرارة المتكون

Rxo المقاومة الضحلة في نطاق الغزو (التدفق)

في النطاق الطفلي Shaly zones

$$\frac{1}{R_{xo}} = \frac{V_{sh} \left(1 - \frac{V_{sh}}{2}\right)}{R_{sh}} + \frac{\varphi^{m/2}}{a \times R_{mf}} \quad (55)$$

تشبع الهيدروكربون Hydrocarbon Saturation

كما ذكر سابقا، يمكن إيجاد تشبع الهيدروكربون بدلالة تشبع الماء، كما يمكن تحديد تشبع الهيدروكربون المتبقي Residual في نطاق الغزو (S_{hr})، وتشبع الهيدروكربون المتحرك Movable (S_{hm}) أيضاً كما هو موضح في المعادلات (56 - 58):

$$S_h = 1 - S_w \quad (56)$$

$$S_{hr} = 1 - S_{xo} \quad (57)$$

$$S_{hm} = S_h - S_{hr} \quad (58)$$

يمكن الحصول على دليل حركة الهيدروكربون من خلال المعادلة (59):

$$\frac{S_w}{S_{xo}} = \left[\frac{R_{xo} / R_t}{R_{mf} / R_w} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (59)$$

حيث S_w / S_{xo} دليل الهيدروكربون المتحرك

R_{xo} المقاومة الضحلة في نطاق الغزو

R_t المقاومة الحقيقية للمتكون

R_w مقاومة ماء المتكون عند درجة حرارة المتكون

إذا كانت نسبة S_w / S_{xo} أكبر أو تساوي 1، فإن الهيدروكربون لا يتحرك أثناء الغزو. أما إذا كانت نسبة S_w / S_{xo} أقل من 0.7 في وجود متكون من حجر الرمل أو أقل من 0.6 في متكون من الكربونات، فيعني ذلك تحرك الهيدروكربون (Schlumberger, 1991).



8.7 تقييم صخر المصدر من خلال سجلات الآبار

أ - سجل أشعة جاما Gamma Ray Log

تسجل أجهزة أشعة جاما نسبة الإشعاعات الطبيعية المنبعثة من المتكونات. تأتي هذه الأشعة من البوتاسيوم ^{40}K وعناصر سلسلة اليورانيوم والثوريوم. تتميز الصخور الغنية بالمواد العضوية باحتوائها على نسبة إشعاع عالية، وبالتالي تعطي قراءات عالية بالمقارنة بالصخر نفسه، والذي لا يحتوي على مواد عضوية كالطين وحجر الجير. ترجع نسبة الإشعاع إلى أن العوالق والحيوانات العضوية تمتص أيونات اليورانيوم التي تتواجد في مياه البحر وتتجمع في صخر المصدر.

ب - سجل الكثافة Density Log

يعتمد سجل الكثافة على قياس كثافة الصخر الكلية. وجود صخر المصدر محتويًا على نسبة عالية من المواد العضوية يؤدي إلى تقليل قيمة الكثافة الكلية مقارنة بالصخر نفسه الذي لا يحتوي على مواد عضوية. تتناسب الكثافة الكلية للمتكون عكسيًا مع المحتوى العضوي، فكثافة المواد العضوية تساوي 1 جم/سم³، وهي أقل من متوسط كثافة الحبيبات التي تصل إلى 2.7 جم/سم³ لصخر الطين أو الطفل، لذلك فإن العلاقة بين كثافة المتكون ونسبة إشعاع جاما علاقة عكسية، حيث تزداد كمية إشعاع جاما كلما قلت الكثافة.

ج. سجل المقاومة Resistivity Log

توجد المواد العضوية في صخر الطفل يؤدي إلى زيادة في قيم المقاومة الضحلة والعميقة بمنطقتي الغزو وعدم الغزو على التوالي حتى في مرحلة عدم النضوج.

د. السجل السمعي Sonic Log:

يوضح هذا السجل أيضًا فروقًا في الإستجابة بين صخر المصدر المحتوي على مواد عضوية وآخر غير محتوٍ على مواد عضوية، حيث يزداد زمن العبور للموجات في الطبقات الغنية بالمواد العضوية (Lindley, 1961).

1.8.7 تحديد نسب المواد العضوية الكلية من خلال تسجيلات الأبار

يمكن تحديد نسبة المواد العضوية الكلية داخل طبقة الطفل، إما من خلال سجل أشعة جاما أو من سجل الكثافة كالتالي:

أ - سجل أشعة جاما وتحديد نسبة المواد العضوية الكلية

تعتمد قراءة سجل أشعة جاما ليس فقط على كمية اشعاع المتكون الصخري، بل أيضاً على ظروف البئر مثل؛ وزن الطين، وقطر البئر، وتغليف البئر وسمكه. لذلك يجب تصحيح قراءة أشعة جاما المسجلة من هذه التأثيرات قبل حساب المحتوى العضوي الكلي. توضح المعادلة (60) حساب المحتوى العضوي الكلي في صخر الطفل من خلال العلاقة التالية: (Schmoker, 1981)

$$T_{ORG} = (Y_B - Y) / 1.378 A \quad (60)$$

T_{ORG} هي كمية المادة العضوية في صخر الطفل

Y_B هي شدة إشعاع أشعة جاما (API) في صخر الطفل الذي لا يحتوي على مواد عضوية.

Y هي شدة إشعاع أشعة جاما المسجلة (من السجل)

A هي الميل الناتج من العلاقة بين شدة إشعاع أشعة جاما والكثافة المسجلة للمتكون الصخري عند رسم العلاقة بين أشعة جاما المسجلة وكثافة المتكون الصخري،

فإذا كانت العلاقة بين النقاط عشوائية هذا يعني أن سجل أشعة جاما لا يتم الإعتماد عليه كدليل كمي لحساب محتوى المادة العضوية، لذلك فإن هذه العلاقة تحدد مدى استخدام سجل أشعة جاما في حساب المحتوى العضوي في المتكون الذي يتم دراسته.



ب . سجل الكثافة وتحديد نسبة المواد العضوية الكلية

يعتبر سجل الكثافة أكثر استخداماً وأكثر دقةً نسبياً من سجل أشعة جاما في حساب نسبة المواد العضوية الكلية. يرجع سبب ذلك أن خاصية الكثافة للمواد العضوية غير متغيرة بشكل كبير، على عكس نسبة الإشعاع الذي يتأثر بالظروف الفيزيائية والجيوكيميائية. يمكن حساب كمية المواد العضوية الكلية لصخر الطفل من خلال المعادلة (Schmoker, 1979), (61)

$$T_{ORG} = (\rho_b - \rho) / 1.378 \quad (61)$$

حيث T_{ORG} الحجم الكلي للمواد العضوية

ρ_b كثافة تتابع من الطفل المضغوط الذي لا يحتوي على مواد عضوية (جم/سم³)، والذي تتراوح كثافته في الغالب بين 2.55 و 2.67 جم/سم³، (Schmoker, 1979).

ρ كثافة تتابع الطفل الذي يتم دراسته (جم/سم³).

مع ذلك يتم الاستفادة في العلاقة بين سجلي أشعة جاما والكثافة، ليس فقط لمعرفة مدى إمكانية تطبيق السجل في حساب نسبة المواد العضوية، ولكن أيضاً لفصل النطاقات التي لا تظهر تغيراً ملحوظاً في الكثافة نتيجة عدم وجود مواد عضوية، ولمعرفة إن كانت هناك عوامل أخرى مؤثرة على الكثافة، مثل المسامية التي لا تأثير لها واضح على سجل أشعة جاما (Schmoker, 1979).

إذا كانت كثافة صخر المصدر ($\rho_{source\ rock}$) والحاوي على مواد عضوية أقل من كثافة صخر الطفل (ρ_{sh})، فهذا يعني أن الكثافة دالة في كمية المواد العضوية. في هذه الحالة، يمكن حساب كمية المواد العضوية من خلال المعادلة (62):

$$\text{Organic matter (Vol. \%)} = (\rho_{sh} - \rho_{\text{source rock}}) / (\rho_{sh} - \rho_{\text{organic matter}}) \quad (62)$$

حيث أن قيمة كثافة المواد العضوية $\rho_{\text{organic matter}}$ تساوي تقريباً قيمة كثافة الماء.

$$(\rho_{\text{water}} = 1 \text{ g/cm}^3)$$

2.8.7 تحديد نسبة المحتوى الكربوني العضوي الكلي (wt. %)

يمكن تحديد المحتوى الكربوني العضوي الكلي من معادلة العالمين (Schmoker & Hester, 1983) كالتالي والموضحة أدناه المعادلة (63):

$$\text{TOC} = (154.497 / \rho) - 57.261 \quad (63)$$

حيث (TOC) هي كمية الكربون العضوي الكلي بالنسبة للوزن (wt. %) والقيمه (ρ) هي كثافة صخر الطفل للوحدات المدروسة.

من خلال الاختبارات ومقارنة النتائج المتحصل عليها من المعادلة السابقة مع نتائج التحاليل العملية لمحتوى الكربون العضوي، يتبين أن هناك اختلافاً بسيطاً يصل إلى 1.1% في المحتوى الهيدروكربوني (Schmoker & Hester, 1983). مع ذلك قام العالمان (Schmoker & Hester, 1983; Schmoker, 1980) بتحديد المحتوى الكربوني العضوي للطفل من سجلات الكثافة، وتمت مقارنة النتائج بالمتحصل عليها من تحاليل العينات اللبية. أظهرت النتائج المحسوبة لـ (TOC)، أن سجلات الكثافة أكثر دقة من المتحصل عليها من التحاليل العملية التقليدية. هذا يعني أن هذه الطريقة يمكن الاعتماد عليها بشكل كبير في حساب كمية الكربون العضوي.



3.8.7 تمييز صخر المصدر من الصخر غير المصدر

هناك تقسيم بسيط لفصل صخر المصدر عن الصخر غير المصدر على أساس المعاملات الكمية لتسجيلات الآبار. وهناك معادلتان (64, 65) يمكن استخدامها لتمييز صخر المصدر على أساس الجمع بين سجل المقاومة والسجل السمعي، وأيضاً بين سجل الكثافة وسجل المقاومة. يُسمى المعامل الذي يجمع بينهم بمعامل التمييز (D) كالتالي:

1 - سجل المقاومة والسجل السمعي

$$D_{(\Delta T)} = -6.906 + 3.186 \log_{10} \Delta T + 0.487 \log_{10} R_{75} \quad (64)$$

2 - سجل المقاومة والكثافة

$$D_{(pb)} = -6.906 + 3.186 \log_{10} \sigma_b + 0.487 \log_{10} R_{75} \quad (65)$$

حيث $D_{(\Delta T)}$ ، $D_{(pb)}$ هما معاملا التمييز، R_{75} هي المقاومة المقاسة عند درجة حرارة $75 F^\circ$. وبالتالي، يمكن استخدام المقاومة كمؤشر لتكون صخر المصدر الذي يتم دراسته في وجود سجل الكثافة والسجل السمعي. لذلك، كان من الضروري حساب المقاومة عند درجة حرارة قياسية (معيارية)، ($75 F^\circ$, $24C^\circ$) والتي يمكن حسابها باستخدام معادلة العالم آرب ARP's (Schlumberger, 1987) المعادلة (66):

$$R_{75} = R_t (T + 7) / 82 \quad (66)$$

حيث T هي درجة حرارة المتكون (F°) عند العمق المعني.

يتم اشتقاق درجة الحرارة من خلال المال الحراري المحسوب من أعظم درجة حرارة للبئر عند أقصى عمق. من الجدير بالذكر أن تقنية تقييم صخر المصدر تنطبق على نطاقات الطفل التي يكون فيها حجم الطفل أكبر من 35%. وبناءً على هذا التطبيق، يتم تقسيم

نطاقات الطفل إلى؛ صخر مصدر أو صخر غير مصدر أو عدم إقراره كصخر مصدر، بناءً على قيم معامل التمييز (D) المذكورة سابقاً كالتالي (Omran & Alareeq, 2018):

- إذا كان كل من $D_{(\Delta b)}$ ، $D_{(pb)} > 0$ حينئذٍ يعتبر الصخر مصدر.
- إذا كان كل من $D_{(\Delta b)}$ ، $D_{(pb)} < 0$ حينئذٍ يعتبر الصخر صخرًا غير مصدر.
- إذا كان أيٌّ من $D_{(\Delta b)}$ ، $D_{(pb)} > 0$ حينئذٍ لا يمكن تقرير الصخر كصخر مصدر.
- إذا كان أيٌّ من $D_{(\Delta b)}$ ، $D_{(pb)} < 0$ حينئذٍ لا يمكن تقرير الصخر كصخر مصدر.

من الجدير بالذكر أن نتائج هذه التحاليل تعطي حوالي 91% نتائج موثوقة في التصنيف السابق ذكره، أي أن نسبة الخطأ = 9%. وبالتالي، يجب الأخذ في الاعتبار قدرة هذا التصنيف في إعطاء نتائج موثوقاً بها.

يمكن تحديد موطن الهيدروكربونات من العلاقة التي تربط بين معامل التمييز لصخر المصدر أو غير المصدر ومدى تواجد الهيدروكربونات كالتالي:

- إذا كانت الصخور المتواجدة صخور مصدر، وتتواجد فيها الهيدروكربونات، فهذا يدل على أن الهيدروكربونات ذاتية المنشأ.
- إذا كانت الصخور المتواجدة صخور مصدر، ولم تتواجد الهيدروكربونات، فهذا يدل على أن الهيدروكربونات قد هاجرت إلى أماكن أخرى.
- إذا كانت الصخور المتواجدة صخوراً غير ذات مصدر، وتتواجد فيها الهيدروكربونات، فهذا يدل على أن الهيدروكربونات خارجية المنشأ.
- إذا كانت الصخور المتواجدة صخوراً غير مصدر، ولم تتواجد فيها الهيدروكربونات، فهذا يدل على عدم تواجد أي هيدروكربونات من أي مكان.



