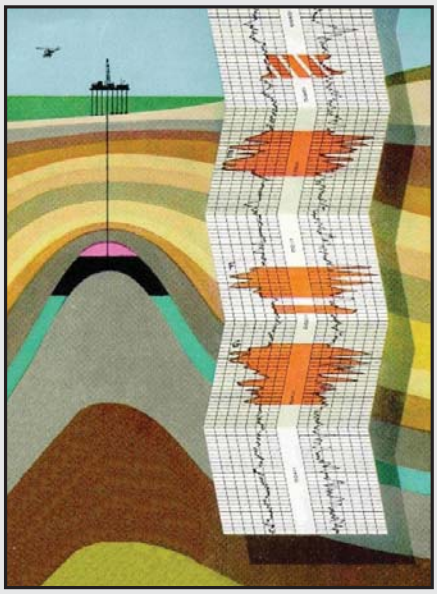
السبر الجيوفيزيائي للآبار

أ.د. حمدي اسماعيل حسانين



يعرف السبر الجيوفيزيائي للآبار (Geophysical bore hole logging) بأنه علم تسجيل وتحليل قياسات الخواص الفيزيائية والكيميائية وغيرها لمكونات الآبار وما حولها، على أعماق محددة باستخدام مجموعة من المسابر (Sondes) تحمل أجهزة معزولة عن سائل الحفر الغريني (Drilling mud) داخل البئر.

تمت أولى تجارب السبر الجيوفيزيائي للآبار عام ١٩١٢م بواسطة **كونراد شلمبرجير** (Conrad Schlumberger)، ثم تبعه **دول (H. G. Doll)** في الخامس من سبتمبر عام ١٩٢٧م، بإجراء أول تسجيل كهربائي (Electric log) في منطقة ألساكي لوري في فرنسا، وفي عام ١٩٤٢م قام **أرشي (G. E. Archie)** – كان يعمل في شركة شل – بنشر بحث في أمريكا موضحاً فيه أن المقاومية الكهربائية (Electrical resistivity) للتكوين الجيولوجي المشبع تماما بالماء تتناسب طرديا مع مقاومية الماء الموجود بهذا التكوين.

تطورت – مع مرور السنين – طرق السبر الجيوفيزيائي، وظهر العديد من تقنياته التي تعتمد على قياس الخواص: الكهربائية، والإشعاعية، والحرارية، والصوتية للصخور المحيطة بالبئر.

تهدف قياسات سبر الآبار إلى الكشف عن البترول، والخامات المعدنية، والمياه الجوفية، والأغراض الهندسية، وذلك باستخدام التقنيات الحديثة التي تعمل بالحاسب الآلي مع برامج حديثة لتفسير نتائج هذه القياسات. ونظراً لتعدد أنواع الصخور والبيئات الجيولوجية المختلفة فقد تعددت تقنيات سبر الآبار لتلائم مختلف أنواع الصخور والبيئات، وكذلك طرق الحفر المختلفة وأساليبها.

تعد المعلومات التي يتم الحصول عليها أثناء عمليات حفر الآبار غير دقيقة – إلى حد ما – ولا يمكن الاعتماد عليها في تفسير النموذج الجيولوجي تحت السطحي للطبقات، وذلك للعوامل التالية:

– تأثير ذوبان وتحلل نواتج الحفر في خليط الحفر الذي يستخدم لتبريد رؤوس الحفر.

– اختلاف درجة تماسك المتكونات الجيولوجية التي يخترقها البئر نتيجة تركيبها الصخري، ودرجة تأثرها بخليط الحفر خصوصاً طبقات الطفل.

– اختلاط راشح خليط الحفر مع السوائل التي تحتويها الطبقات، مما يغير صفات الخليط.

– تساقط الفتات الصخرية في البئر أثناء عملية الحفر؛ مما يجعل المعلومات المستخلصة من التقاط هذا الفتات عند سطح البئر غير ممثل للطبقات.

ومن هنا كانت الحاجة ملحة لإجراء السبر الجيوفيزيائي للآبار للحصول على المعلومات التي يمكن استخدامها في العديد من التطبيقات الجيوفيزيائية المهمة.

تقنيات السبر الجيوفيزيائي للآبار

يتكون نظام السبر الجيوفيزيائي من مسبار (Sonde)، وكوابل وأجهزة عرض وطبع البيانات وتخزينها – مثل الطابعات والشاشات الملحقة بأجهزة الحاسب الآلي – ومصادر للطاقة اللازمة لمعالجة هذه البيانات، شكل (١). كما تحتوي وحدة سبر الآبار على كافة المجسات (Sensors) الضرورية لسبر آبار قد يصل عمقها لأكثر من ٣٠٠٠ متر. ويتم عرض القياسات التي يتم الحصول عليها بيانياً كتسجيل جيوفيزيائي، فضلاً عن تخزينها رقمياً لاستخدامها في تفسير التغيرات الصخرية والتركيبية المسجلة مع العمق.

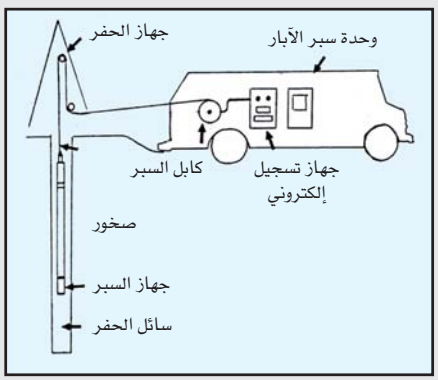
تتعدد أنواع وتقنيات سبر الآبار بحيث تتلاءم مع قياس المعاملات المطلوب قياسها، وصفات التكوينات الصخرية التي يخترقها البئر مع اختلاف الظروف، وتنقسم المسابر الجيوفيزيائية إلى عدة أنواع هي:

● المسابر الكهربائية

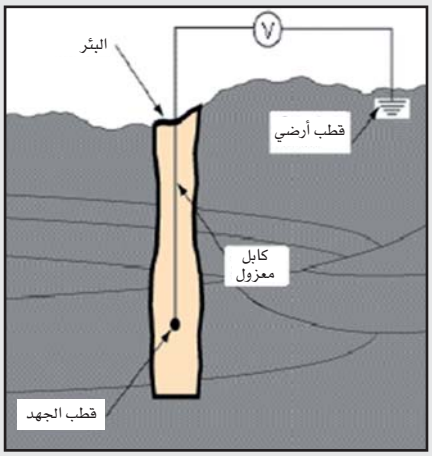
تشتمل المسابر الكهربائية (Electrical logs) على ثلاثة أنواع هي:

■ **مسابر الجهد الذاتي (Self-potential logs)**: وتقيس درجة نفاذية (Permeability) الصخور التي يخترقها البئر، شكل (٢)، وذلك بقياس الجهد الذاتي الناتج بين سائل الحفر والماء داخل مسام التكوين الصخري. يستخدم مقياس الجهد الذاتي – غالباً – في التمييز بين طبقات الحجر الرملي والطفلي، كما يحدد نسبة الغرين في الطبقة، فضلاً عن استخدامه في تحديد مقاومية ماء التكوين الصخري المطلوبة كأحد المعاملات المهمة لحساب درجة التشبع بالماء.

■ **مسابر المقاومية الكهربائية (Resistivity logs)**: وتستخدم في التعرف



■ شكل (١) مكونات وحدة سبر الآبار.



■ شكل (٢) مسبار الجهد الذاتي.

على درجة تشبع الصخور بالمياه أو الزيت أو الغاز وتحديد الطبقة الحاملة لها عن طريق قياس المقاومية الكهربائية التي تختلف باختلاف درجة مسامية الصخور، وأنواع السوائل الموجودة بداخلها، ودرجة تشبعها، ويبين شكل (٣)، التسجيل الناتج لكل من مسباري الجهد الذاتي والمقاومية الكهربائية.

تنقسم مسابر المقاومية الكهربية إلى قسمين مختلفين - بحسب نوع المسبار المستخدم في حمل أجهزة القياس - هما:

■ **مسابر طويلة المسافات بين الأقطاب الكهربائية (large spacing sonde)**: وتسمح بتثبيت الأقطاب الكهربائية على مسافات متغيرة لقياس المقاومية الكهربائية للنطاقات المختلفة حول البئر، وهي تنقسم إلى ثلاثة أنواع كالتالي:

١- **مسابر عمودية**: وتقيس النطاق المغمور براشح خليط الحفر (Invaded zone)، وتنقسم إلى نوعين هما:

(أ)- **مسابر عمودية قصيرة**: وفيها تصل المسافة بين قطب إرسال التيار الكهربائي وقطب استقبال الجهد إلى ١٦".

(ب)- **مسابر عمودية طويلة**: وفيها تزيد المسافة بين قطب المرسل وقطب المستقبل إلى ٦٤"، وذلك لقياس النطاق الصخري الذي لم يغمره راشح الحفر، شكل (٤).

٢- **مسابر جانبية (Latero-log)**: وتصل فيها المسافة بين المرسل والمستقبل إلى ١٨" ١٨` م وتستخدم لقياس المقاومية الكهربائية للطبقات السميكة (< ١٠م)، حيث تكون منطقة غزو المياه بعيدة عن البئر، شكل (٥).

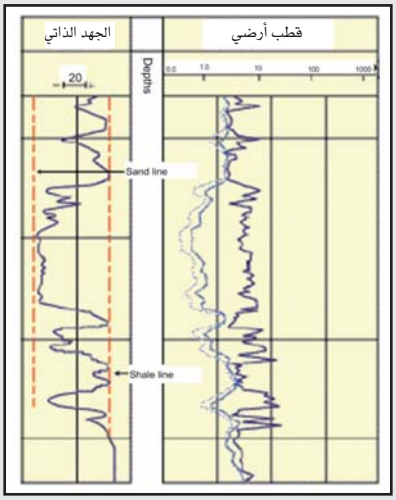
٣- **مسابر تركيز التيار جانبياً (Focused latero-logs)**: وتستخدم لقياس المقاومية الكهربائية لنماذج مختلفة من الطبقات يتراوح سمكها بين ٣٥ سم إلى عدة أمتار، وذلك بتركيز انتشار التيار بكثافة عالية خلال الجزء الأوسط من الطبقة الصخرية محدثاً منطقة مشبعة بالتيار. ينتج عنها جهد كهربائي مناسب للقياس عند أقطاب الجهد مهما كانت قيمة توصيلية الطبقة (Layer conductivity) أو ملوحة سائل الحفر. يوضح الشكل (٦) ثلاثة أنواع من مسابر تركيز التيار جانبياً:

(أ) **مسبار جانبي ٣**: ويشتمل على ثلاث شرائح طولية لإرسال التيار وتركيزه داخل النطاق الصخري المحيط بالشريحة الوسطى منها.

(ب) **مسبار جانبي ٧**: ويعمل على نشر التيار بشكل جانبي.

(ج) **المسبار الكروي**: ويعمل على نشر التيار بشكل كروي حول نقطة القياس. يبين شكل (٧) المسبار الكهربائي الجانبي المزدوج (Dual laterolg) حيث يمكن استخدامه لقياس الطبقات السميكة والرقيقة على حد سواء.

- **مسابر قصيرة المسافات بين الأقطاب الكهربية (Small spacing sonds)**: وتقيس المقاومية الكهربائية داخل البئر بالإضافة إلى كل من طبقة الحلقة الطينية (Mud cake) - التي تتكون على جدار البئر - والطبقة المغسولة (Flushed zone) المجاورة لها. تستخدم عملية



■ شكل (٣) تسجيل ناتج من مسباري المقاومية الكهربائية و الجهد الذاتي.

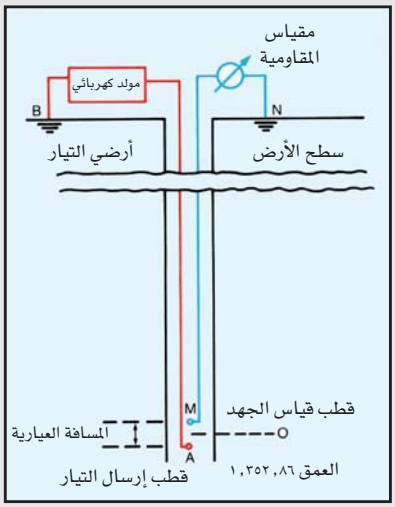
سبر كاليبر (Caliper log) - أحد أنواع المسابر قصيرة المسافات - مجموعة من المسابر التي تثبت الأذرعة الحاملة لها بحيث تكون ملاصقة لجدار البئر مهما اختلف قطره، ويمكن التحكم فيها آلياً، كما في حالة مسبار المقاومية الدقيقة (Micro resistivity log)، ومسبار الجانبية الدقيقة للمقاومية (Microlaterolog, MLL)، ومسابر المقاومية الدقيقة للمقاومية (Micro SFL)، ومسبار المقاومية القريبة (Proximity log).

■ **المسبار التأثيري (Induction log)**: ويقيس المقاومية الكهربائية للصخور والمياه حول البئر عند استخدام سائل حفر غير موصل (Oil base mud)، وذلك لتعذر استخدام المسابر الكهربائية السابقة، وفيها تستبدل أقطاب التيار الكهربائي بملفات إرسال (Transmitter coils)، شكل (٨)، يتم من خلالها إرسال تيارا تأثيري داخل طبقات البئر.

تستخدم تسجيلات المسبار التأثيري للحصول على معلومات تفصيلية عن الطبقات الرقيقة لتقليل تأثيرات سائل الحفر، مع إمكانية استخدام ملفات إضافية لتركيز التيار حتى يخترق النطاقات البعيدة عن البئر، ولذلك تسمى هذه المسابر بمسابر المقاومية الكهربائية التركيزية التأثيرية (Focused-induction log).

● المسابر الإشعاعية

تساعد المسابر الإشعاعية (Radioactive logs) في تقدير محتوى الطبقات من نفط أو غاز أو ماء،



■ شكل (٤) مسبار الكهربائية العمودية.

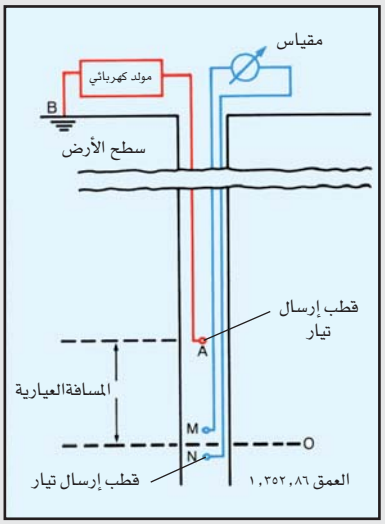
وتنقسم إلى ثلاث مجموعات مختلفة هي:

■ **مسابر أشعة جاما الطبيعية (Natural gamma rays):** وهما نوعان، أحدهما يقيس الإشعاع الكلي في الطبقات الصخرية، والآخر يقيس الطيف الإشعاعي الذي يحدد نوعية الصخور بحسب نسبة الإشعاع الناتج من كل من عناصر البوتاسيوم واليورانيوم والثوريوم، شكل (٩).

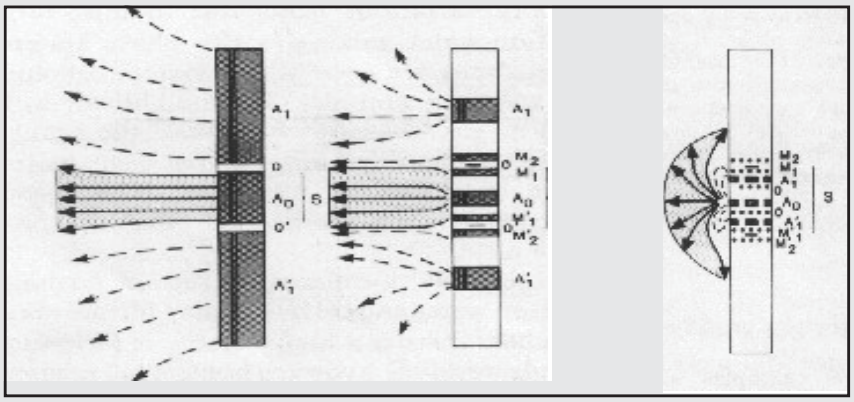
يتم تسجيل أشعة جاما الطبيعية في كل من الآبار المبطنة وغير المبطنة، حيث تنبعث هذه الإشعاعات (من عنصر اليورانيوم -٢٣٨، والثوريوم -٢٣٢ ونظائرهما، وعنصر البوتاسيوم -٤٠) من الرواسب دقيقة الحبيبات مثل الطفل الغرين والسيلت - عادة - أكثر من الحجر الرملي والحجر الجيري والدولوميت؛ لذلك فإنها تستخدم لتحديد طبقات الطفلة التي يصعب تمييزها، وتحديد سمكها حتى لو كانت مالحة، كما يستخدم تسجيل أشعة جاما للمضاهاة بين الوحدات الجيولوجية بين الآبار، حيث توضح هذه التسجيلات أشعة جاما المنبعثة.

■ **مسبار جاما - جاما أو مسبار الكثافة (Gamma-Gamma log or density log):** ويستخدم في تحديد الطبقات المحتوية على الغاز، وفي الاستكشاف المعدني، وفي الأغراض الهندسية، والكشف عن المياه الجوفية.

تتمثل آلية عمل هذا المسبار في احتوائه على مصدر مشع لانبعاث أشعة جاما لتسليطها



■ شكل (٥) مسبار المقاومية الكهربائية الجانبي.



■ شكل رقم (٦) مسابر المقاومية الكهربائية لتركيز التيار جانبياً.

على المتكونات الصخرية عبر حائط البئر، شكل (١٠)، فتصطدم بإلكترونات المتكون الصخري حيث تفقد جزءاً من طاقتها عند هذه الإلكترونات، وتمضي بما تبقى لديها من طاقة عائدة إلى المستقبل - المثبت على مسافة محددة من المصدر - ليتم تسجيلها. يتناسب العدد الإشعاعي المسجل عند المستقبل مع الكثافة الكلية (Bulk density) للمتكون، وبمعلومية كثافة المادة اللاحمة (Matrix density) يمكن تحديد مسامية المتكونات الصخرية المحيطة بالبئر، باستخدام المعادلة التالية:

$$\phi = \frac{\rho_{matrix} - \rho_{bulk}}{\rho_{matrix} - \rho_{fluid}}$$

حيث:

ϕ مسامية المتكونات الصخرية

p matrix كثافة المادة اللاحمة

p bulk الكثافة الكلية

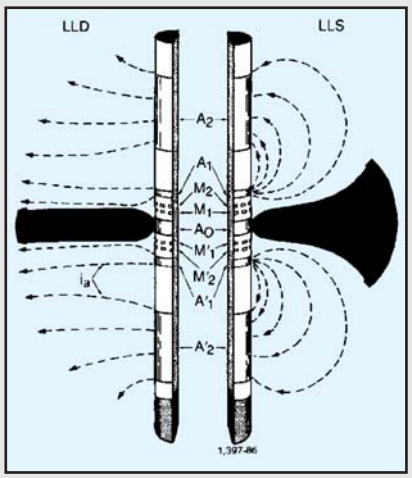
p fluid كثافة السوائل الموجودة في مسام الصخور

■ **المسبار النيوتروني (Neutron log):** ويستعمل في تحديد الطبقات المتماسكة والمضغوطة في الآبار المغلفة وغير المغلفة، كما يستخدم في معرفة الفتحات الموجودة في تبطين البئر.

تعتمد نتائج السبر النيتروني على مدى احتواء المتكونات الصخرية لذرات الهيدروجين التي يتم قذفها بالنيوترونات من خلال مصدر نووي، شكل (١١). عندما تتصادم هذه النيوترونات مع ذرات الهيدروجين فإنها تحدث فيضا من الطاقة الحرارية النيوترونية تصل إلى المستقبل (المجس) بكمية تتناسب مع محتوى الطبقة الصخرية من الهيدروجين. تتناسب كمية الطاقة المسجلة مع مقدار مسامية الصخر، سواء كانت تلك المسام مليئة بالماء أو بالهيدروكربونات. لذلك يعد هذا النوع من المسابر مناسب للتعرف على المسامية في جميع ظروف البئر سواء كان مبطناً بالصلب أو بالبلاستيك وحتى داخل مواسير الحفر.

● **مسابر الموجات الصوتية**

تعتمد مسابر الموجات الصوتية (Acoustic-logs) على إرسال موجات صوتية عالية التردد - باستخدام مرسل متحرك داخل البئر، شكل (١٢) - تنتشر في سائل الحفر والمتكونات الصخرية المحيطة بالبئر حتى تصل إلى مستقبل مثبت في المجس على مسافة محددة من مصدر الموجات. ومن خلال قياس الزمن



■ شكل (٧): مسبار المقاومية الكهربائية الجانبية المزدوجة. (A0 ، A1 أقطاب التيار، M1 ، M2 تمثل أقطاب الجهد).

الذي تقطعه هذه الموجات للوصول إلى المستقبل، يمكن تحديد سرعة الموجات الصوتية خلال مكونات طبقات الصخور – تتكون من مادة لاحمة (Matrix) ومادة مائعة تملأ المسام (Fluids) – المحيطة بالبئر والتي تختلف باختلاف نوعية الصخور ومساميتها الكلية. لذلك تعبر القيمة المقاسة فى مسابر الموجات الصوتية (Δt_{log}) عن المسامية طبقاً للمعادلة التالية:

$$\phi_{sonic} = \frac{\Delta t_{\log} - \Delta t_{ma}}{\Delta t_f - \Delta t_{ma}}$$

حيث :

ϕsonic : المسامية المحسوبة باستخدام نتائج السابرة الصوتية Δt_{log}

Δt_{ma} : قيمة الزمن المقطوع خلال مسافة محددة في المادة اللاحمة من الصخر.

Δt_f: قيمة الزمن المقطوع خلال مسافة محددة في الموائع التى تملأ فراغات الصخر.

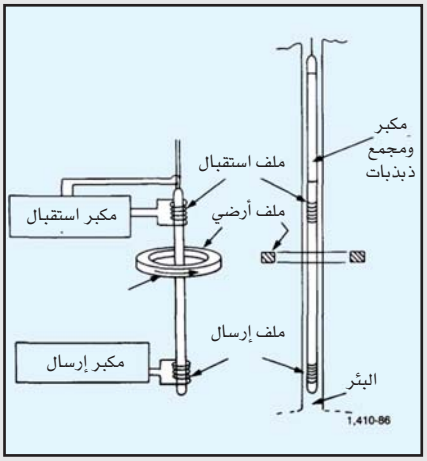
● مسابر خاصة

هناك أنواع عديدة من المسابر تم تصميمها لمهام خاصة داخل البئر، منها:

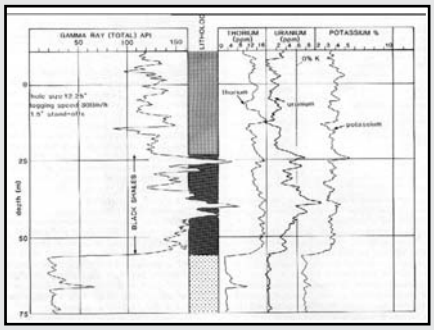
■ **مسبار الحرارية الأرضية:** ويستخدم لقياس الخواص الحرارية للتكاوين الصخرية.

■ **مسبار القابلية المغناطيسية والاستقطاب المستحث:** ويستخدم بدرجة كبيرة في الاستكشاف المعدني.

■ **مسبار الجاذبية:** ويستخدم لقياس عجلة



■ شكل (٨): مسبار تأثيري .



■ شكل (٩): تسجيل إشعاع جاما الطيفي .

الجاذبية الأرضية على أعماق مختلفة داخل البئر.

■ **مسباري سرعة تدفق وجودة المياه:** ويستخدمان في مجال استكشاف المياه الجوفية.

تطبيقات سبر الآبار

يمكن استخدام السبر الجيوفيزيائي للآبار في الحصول على المعلومات والبيانات التالية :

– أنواع الصخور المختلفة داخل البئر، والتكوينات الصخرية الحاملة للمياه.

– تحديد جودة المياه، وحالة الطبقة الأسمنتية المحيطة بأنابيب تغليف الآبار.

– تحديد الفواصل بين أنابيب التغليف.

– تعيين مسامية ونفاذية التكوينات الصخرية.

– تحديد التغير في قطر البئر قبل التغليف.

– معرفة سمك التكوينات الصخرية.

– تحديد مدى تشبع الصخور بالبترول أوالغاز أوالمياه.

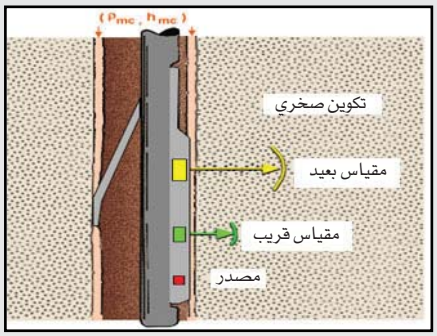
– التعرف على نطاقات التمعدن في حالة الاستكشاف المعدني.

– التعرف على طول التبطين في البئر وحالته وأماكن الكسور فيه، وتحديد العمق الكلي للبئر وعمق مستوى المياه أو البترول أو الغاز فيه.

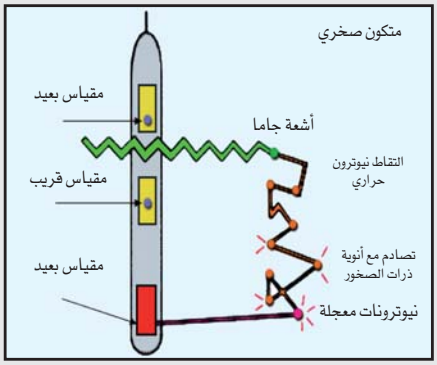
– تحديد المناطق المنتجة للمياه، ومناطق التسرب داخل البئر.

– تقويم الخزان الجوفي وذلك بمضاهاة النتائج بين مجموعة من الآبار في منطقة الاستكشاف.

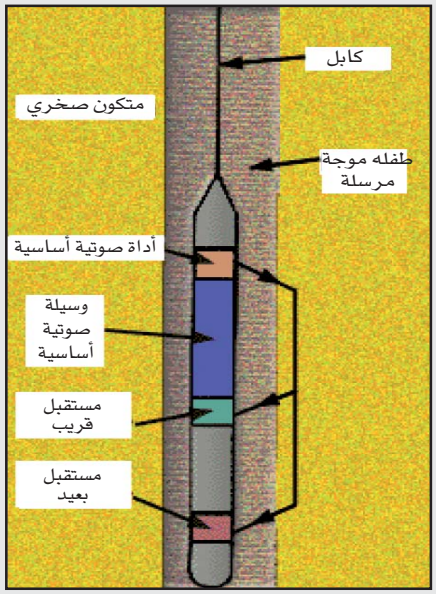
– دراسة البيئات الترسيبية و تصميم الآبار الإنتاجية.



■ شكل (١٠) مسبار الكثافة الإشعاعي.



■ شكل (١١) المسبار النيتروني.



■ شكل (١٢) مسبار الموجات الصوتية.

المراجع

-**Society of Professional Well Log Analysts (1975).** Glossary of terms & expressions used in well logging. Houston, Texas: SPWLA. p. 74 p.. ISBN None.

-**Sengel, E.W. «Bill» (1981).** Handbook on well logging. Oklahoma City, Oklahoma: Institute for Energy Development. p. 168 p.. ISBN 08-112-89419-.

-**Hilchie, Douglas W. (1990).** Wireline: A history of the well logging and perforating business in the oil fields. Boulder, Colorado: Privately Published. p. 200.

-**Pike, Bill; Rhonda Duey (2002).** «Logging history rich with innovation» (– Scholar search). Hart›s E&P: 52–55.