الاستكشاف الجيوكهربائي

د فوزان علي الفوزان د محمد أحمد متولي

يعد الاستكشاف الجيوكهربائي (Geo-Electrical Exploration) من أكثر طرق الاستكشاف الجيوفيزيائية شيوعاً و تنوعاً؛ وذلك لسهولة استخدامه وتعدد تطبيقاته وبساطة أجهزته. تعتمد هذه الطريقة على قياس فرق الجهد أو قياس المجال المغناطيسي المصاحب لمرور التيار الكهربي داخل طبقات الأرض.

بدأ استخدام هذه الطريقة منذ قرابة أكثر من قرن من الزمان، وذلك لأغراض التنقيب عن البترول أو المعادن. وقد أثبتت فعاليتها في الاستكشاف -أعماق لاتتعدى أكثر من ألف قدم- حيث كانت أولى محاولات استخدامه عام ١٩٠٦م، عندما قام العالمان السويديان **دافت وويليام** باستخدام قطبين للتيار الكهربائي ثابتين بالأرض، وآخرين كمستقبلين لجهد الأرض؛ وذلك للبحث عن التوصيلية الأرضية. وفي عام ١٩١٢م، قام عالم الجيوفيزياء **كونراد شلمبرجير** بعمله الرائد في التنقيب باستخدام الطرق الجيوكهربائية ، تزامنا مع قيام العالم الأمريكي **وينر**، و العالم السويدي **بريقرستو** بتطوير هذه التقنية والأجهزة المستخدمة فيها.

تطور علم الجيوفيزياء في السنوات العشرين الأخيرة بشكل عام، والطرق الجيوكهربائية بشكل خاص، ليشمل تطوير الاستكشاف أحادي وثنائي البعد - المستخدم إلى الآن بشكل واسع - إلى الاستكشاف ثلاثي ورباعي البعد. فضلاً عن تطور البرامج الحاسوبية المستخدمة في تحليل بيانات الاستكشاف الجيوكهربائي وعمل النمذجة والتفسير المتقدم للبيانات بأشكالها المختلفة.

المبدأ العلمي للاستكشاف الجيوكهربائي

يتمثل المبدأ العلمي لهذه الطريقة في خاصية التوصيل الكهربائي التي تتميز بها معظم الفلزات وكبريتيداتها المكونة للصخور. وعلى الرغم من أن هذه الفلزات موصلات ضعيفة للتيار الكهربائي، إلا أن التيار الكهربائي ينتقل بشكل أساسي عن طريق الأيونات الموجودة في مياه المسام الصخرية (Pore water). ولذلك فإن اكتساب معادن الطين للماء يجعلها نشطة أيونياً، وبالتالي تزداد قدرتها على التوصيل الكهربائي حتى وإن كانت قليلة الرطوبة.

الجدير بالذكر أن درجة التوصيل الكهربائي تعتمد على كمية الأملاح الذائبة في المياه الموجودة في مسام التربة، فكلما كانت المياه نقية كلما كان التوصيل ضعيفاً.

يستخدم في طريقة الاستكشاف الجيوكهربائي تياراً كهربائياً مباشراً (DC – methods) مستمراً أو تياراً ذا تردد منخفض حيث يقاس فرق الجهد للأرض بين نقطتين عن طريق وضع أربعة أقطاب على سطح الأرض، إثنان منها لإدخال التيار الكهربائي إلى باطن الأرض، والآخران لقياس فرق الجهد الناتج عن مرور التيار. وبمعرفة شدة التيار النافذ إلى باطن الأرض وفرق الجهد بين القطبين، يتم الحصول على قيمة مقاومة طبقات الأرض.

أنواع الاستكشاف الجيوكهربائي

توجد أنواع مختلفة ومتعددة من الاستكشاف الجيوكهربائي اعتماداً على المجال أو التأثير الذي يتم قياسه، ومن أهم هذه الأنواع:

- **الجهد الذاتي**

يستخدم الاستكشاف الجيوكهربائي بالجهد الذاتي (Self potential -SP) في البحث عن الخامات المعدنية وخاصة خامات الكبريتيدات، وكذلك رصد حركة المياه الجوفية تحت سطح الأرض.

ينشأ الجهد الذاتي نتيجة التفاعل الكيميائي الكهربائي بين المعادن والسوائل المحيطة بها، مما يسبب شذوذاً في الجهد الذاتي للأرض يمكن قياسه بواسطة أزواج من أقطاب مسامية غير قابلة للاستقطاب، مع بقاء المسافات بينها منتظمة على طول المنطقة المدروسة.

- **الاستقطاب الحثي**

تستخدم طريقة الاستقطاب الحثي (Induced polarization -IP) على نطاق واسع في استكشاف الفلزات المعدنية في باطن الأرض. تعتمد طريقة الاستقطاب الحثي على سريان تيار كهربائي في الأرض. مؤدياً بدوره إلى استقطاب كهربائي لأيونات المعادن المكونة

لكتل الصخور، وبالتالي نشوء تيارات تأثيرية، فإذا توقف التيار الكهربائي فجأة، فإنه يتم تفريغ هذه الشحنات من الخلايا المستقطبة على فترات زمنية تصل إلى عدة ثوان مولدة تياراً كهربائياً، وجهداً ذاتياً، ومجالاً مغناطيسياً يمكن كشفه وقياسه عند سطح الأرض.

أجهزة القياس

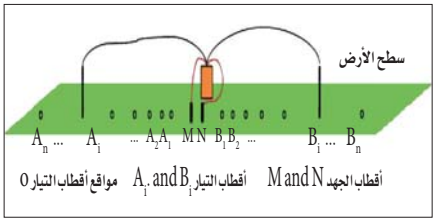
تطورت الأجهزة المستخدمة في أعمال القياس الجيوكهربائي تطوراً كبيراً منذ بداية استخدامها، فقد كانت الأجهزة تتكون من وحدتين منفصلتين، إحداهما تعد مصدراً للتيار الكهربائي، والأخرى لقياس فرق الجهد، ثم أصبحت هذه الأجهزة تتكون من وحدة واحدة تتضمن كلاً من المرسل والمستقبل، بحيث تظهر فيها قراءات المقاومة الكهربائية بالأوم. بالإضافة إلى تحديد أماكن الأقطاب وقيمة التيار المرسل إلى الأرض ونوع القياس المطلوب إجراؤه، عن طريق لوحه مفاتيح تقوم بادخل البيانات المطلوبه للجهاز، ومن ثم الحصول على أشكال ثنائية البعد لتوزيع قيم المقاومة الكهربائية بشكل سريع ومباشر أثناء القياس في الحقل، وأخيراً حفظ هذه البيانات لاستخدامها في مزيد من التحليل المكتبي.

طرق معالجة وتفسير البيانات

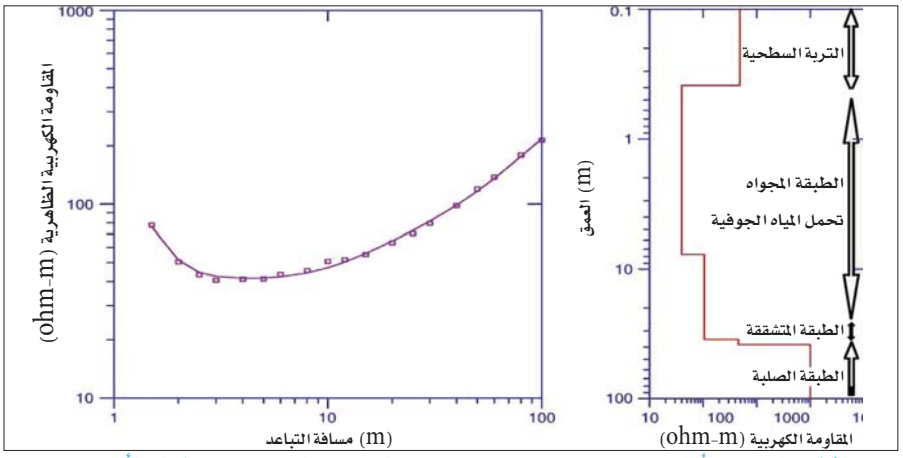
توجد عدة طرق مختلفة لقياس ومعالجة البيانات التي يتم الحصول عليها في الحقل، ومن ثم تفسيرها، ومن هذه الطرق ما يلي:

● الجس الجيوكهربائي الرأسي أحادي البعد

تعتمد الطريقة التقليدية لمعالجة بيانات المتحصل عليها من المسح الحقلي باستخدام



■ شكل (١) طريقة تباعد الإلكترودات في الجس الكهربائي الرأسي أحادي البعد.



■ شكل (٢): معالجة جسه أحادية البعد للحصول على نموذج لتغير المقاومة الكهربائية مع العمق لطبقات الأرض المختلفة.

جهاز الجس الجيوكهربائي الرأسي أحادي البعد (ID - Vertical electric sounding) عن طريق رسم منحنى للعلاقة بين لوغاريثم قيم المقاومة الجيوكهربائية مع مسافة التباعد بين الأقطاب الجيوكهربائية، شكل(١). حيث إنه عند زيادة التباعد بين الأقطاب يمكن الحصول على مزيد من المعلومات على أعماق أكبر. ولتفسير بيانات الجس الجيوكهربائي الرأسي، يفترض أن باطن الأرض يتكون من طبقات أفقية، ولذلك يتم البحث عن المنحنى الذي ينطبق مع منحنى البيانات المقاسة للحصول على عدد الطبقات وقيمة المقاومة الجيوكهربائية داخل كل طبقة.

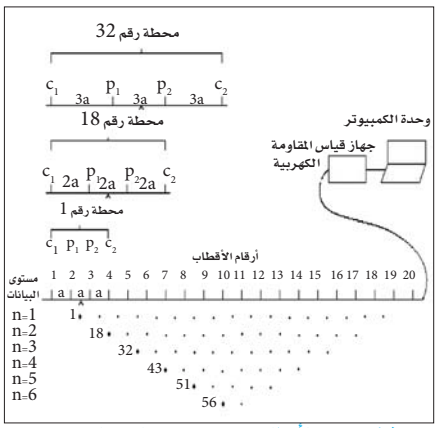
الجدير بالذكر أن المعالجة بهذه الطريقة أصبحت تتم بشكل سريع باستخدام برامج الحاسب الآلي، شكل(٢). مع ملاحظة أن هذه الطريقة يوجد فيها قصور يتمثل في أنه لا يؤخذ في الاعتبار تغير قيم المقاومة أفقياً.

● التصوير الجيوكهربائي ثنائي البعد

يعتمد التصوير الجيوكهربائي ثنائي البعد (2D resistivity tomography) على مراعاة التغير في الاتجاهين الأفقي، والرأسي، أثناء القياس والحصول على البيانات ومعالجتها، مع الأخذ في الاعتبار أن قيم المقاومة الجيوكهربائية لا تتغير في الاتجاه العمودي على خط القياس.

يتم الحصول على البيانات الحقلية بتوزيع عدد من أقطاب التوصيل على طول خط القياس، وتوصيلها بكابل يتصل مباشرة بوحدة التحكم في المركز، ويتم التحكم في ترتيب أقطاب التوصيل بشكل آلي بواسطة خبير متخصص، وذلك بتطبيق برامج خاصة لتغطية خط القياس أفقياً ورأسياً بشكل كامل، شكل(٣). بعد الانتهاء من تسجيل البيانات وحفظها داخل جهاز القياس، يتم تفريغها إلى الحاسوب، لبدأ عمليات التحسين والتحليل باستخدام برامج معالجة خاصة للحصول على نموذج قيم المقاومة الجيوكهربائية مع العمق وذلك لتمثيل وضع الطبقات تحت السطح، وفقاً للخطوات التالية:

- تمثيل قيم المقاومة الظاهرية مع مستويات القياس المختلفة وإزالة وتعديل البيانات غير الدقيقة، والتي من الممكن أن تسبب مشكلة أثناء المعالجة.
- اختيار أنسب المعاملات لتطبيق عملية التقارب بين البيانات المقاسة والمنمذجة طبقاً لطبيعة وظروف منطقة العمل والهدف من إجراء القياسات.
- اختيار أنسب نموذج لبيانات المقاومة الجيوكهربائية مع العمق، والتي تتفق مع الموضع البيئي والجيولوجي لمنطقة القياس.



شكل (٣): ترتيب الأقطاب للتصوير الكهربائي ثنائي البعد.

● التصوير الجيوكهربائي ثلاثي البعد

تستخدم طريقة التصوير الجيوكهربائي ثلاثي البعد (3D resistivity tomography) لإعطاء صورة ثلاثية الأبعاد عن تغير قيم المقاومة الجيوكهربائية تحت السطحية، والتي لم تستطع الطرق السابقة تداركها، ولذلك تعد هذه الطريقة أفضل الطرق للتعبير عن ما هو موجود تحت السطح.

تعد هذه الطريقة أقل طرق الاستكشاف الجيوكهربائي انتشاراً نظراً للتكلفة العالية والجهد والوقت اللازمين لتجميع البيانات، بالإضافة إلى عدم إمكانية إجراء القياسات على مساحة كبيرة مقارنة بالطريقتين السابقتين.

تقوم هذه الطريقة على خطوتين هما:

- **تجميع البيانات**: وفيها يتم توزيع الأقطاب في الاتجاه (x) لإجراء القياسات، ثم استخدام نفس أماكن الأقطاب لإجراء القياسات في الاتجاه (y)، شكل (٤).
- **التحليل**: وذلك للحصول على نموذج ثلاثي الأبعاد لتمثيل ماهو موجود تحت سطح الأرض. حيث يتم تقسيم نموذج التحليل إلى عدد من الخلايا، ومن ثم حساب قيم المقاومة داخل كل خلية، وبمقارنة النتائج مع البيانات المقاسة يمكن الوصول إلى أقل قيمة للفرق بين البيانات المقاسة والمحسوبة، وبالتالي الحصول على توزيع قيم المقاومة في الاتجاهات الثلاثة.

التطبيقات

تستخدم طرق الاستكشاف الجيوكهربائي في العديد من المجالات منها:

١- دراسات استكشاف المياه الجوفية الضحلة والعميقة، والتعرف على التراكيب الجيولوجية تحت السطحية، مثل: رسوبيات الحصى، وطبقات الطين.

٢- التنقيب عن المعادن بشتى أنواعها.

٣- تحديد سمك الطبقات المتماسكة على السطح.

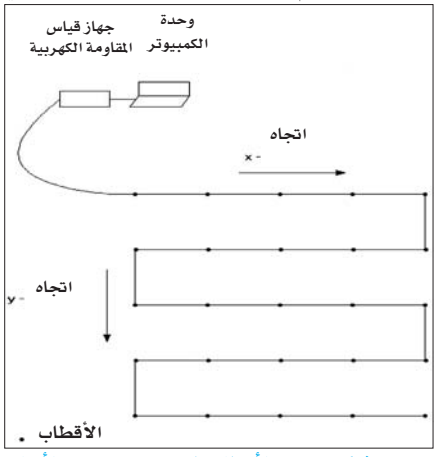
٤- تحديد أساس وعمق صخور القاعدة.

٥- تحديد وتحليل كامل البنية تحت السطحية للسدود.

٦- استكشافات الآثار.

٧- الكشف عن مصادر التلوث البيئي.

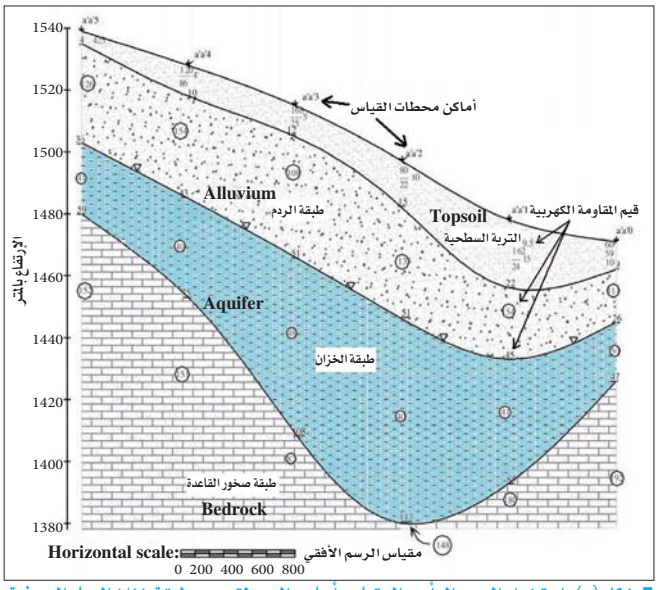
من أهم الأمثلة التطبيقية لطريقة الاستكشاف الجيوكهربائي ما يلي:



■ شكل (٤): ترتيب الأقطاب في المسح ثلاثي الأبعاد.

● تحديد خزانات المياه الجوفية

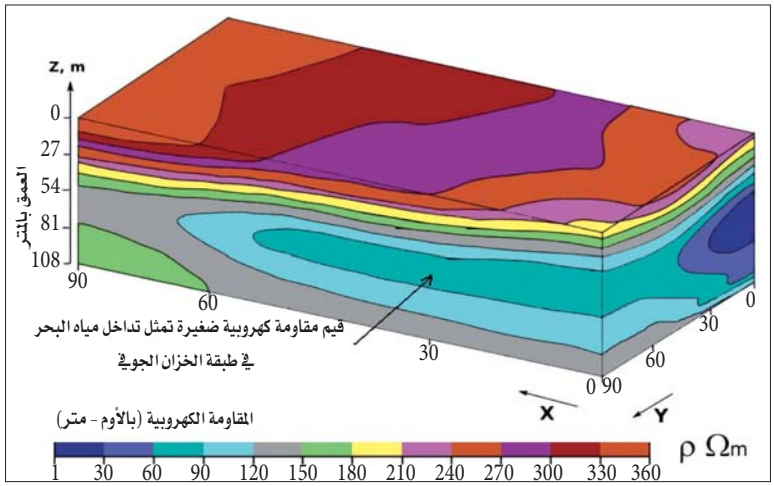
تعد المياه الجوفية مصدراً مهما من مصادر الثروة المائية. ولذا يجب معرفة أماكن وأعماق تواجد هذه الخزانات لتحقيق الأمن المائي. تتميز الطبقات الحاملة للمياه الجوفية بقيم مقاومة كهربائية أقل من الطبقات التي فوقها وتحتها؛ مما ساهم في نجاح تطبيق طريقة الاستكشاف الجيوكهربائي في تحديد أماكن وأبعاد وخصائص خزانات المياه الجوفية بأعماقها المختلفة، شكل (٥).



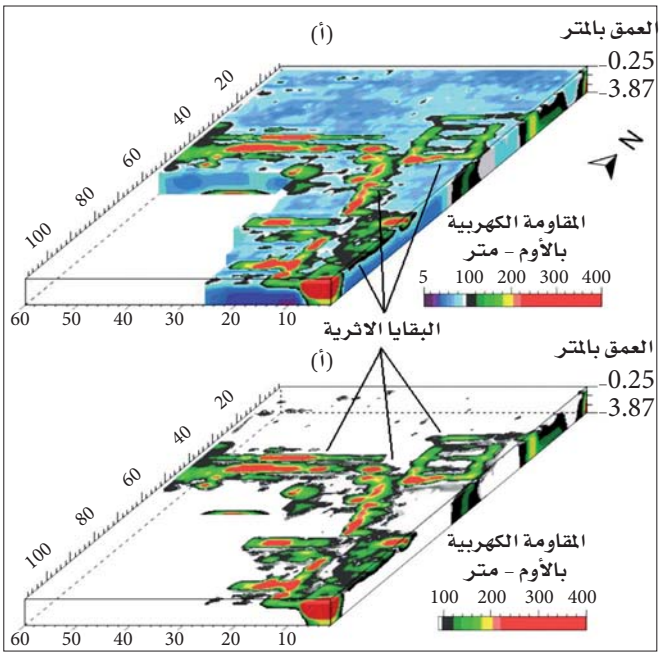
■ شكل (٥): استخدام الجس الرأسي المتعامد أحادي البعد لتحديد طبقة خزان المياه الجوفية.

● تداخل مياه البحر مع الخزان الجوفي

من المعلوم أنه في المناطق الساحلية المطلة على البحار تكون خزانات المياه الجوفية جنباً إلى جنب مع تداخلات المياه المالحة؛ مما يتطلب معرفة إلى أي مدى يحدث هذا التداخل في عمق التربة بين نوعي المياه. وقد تمكن الباحثون من معرفة حدود هذا التداخل وتتبعه من خلال الفرق بين قيم التوصيلية الكهربائية للمياه العذبة والمياه المالحة، ومن ثم يمكن اختيار أماكن حفر أبار المياه العذبة في المناطق الساحلية، شكل (٦).



■ شكل (٦): تداخل مياه البحر (قيم مقاومة منخفضة) فى اتجاه (X) اسفل الطبقة السطحية (قيم مقاومة عالية)



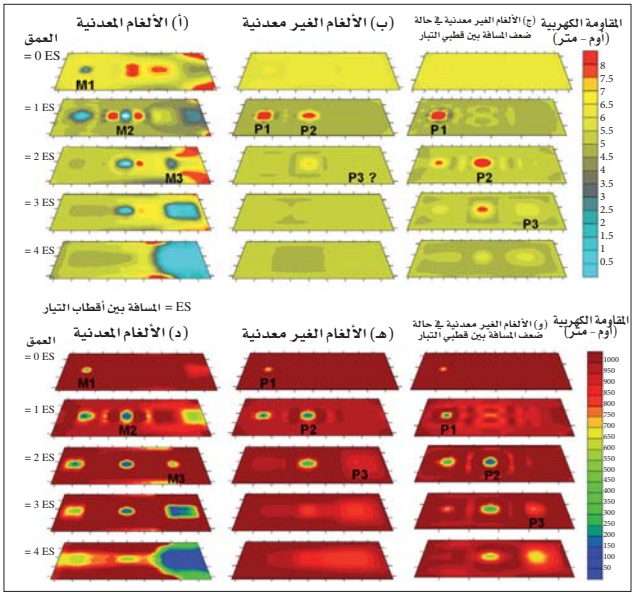
■ شكل (٧): تمثيل ثلاثي الأبعاد لبقايا جدران أثرية من العصر الروماني بشمال شرق اناطوليا -تركيا.

● البحث عن الآثار

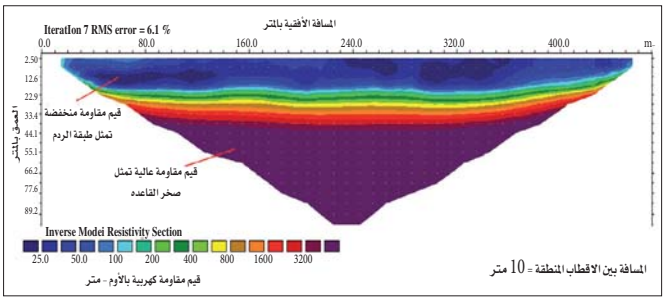
تعد البقايا الأثرية من الكنوز المهمة المدفونة تحت سطح الأرض على أعماق ضحلة. وقد لعبت طريقة المقاومة الجيوكهربائي دوراً مهما في تحديد أماكن وأبعاد تلك البقايا خاصة الجدارية، لأنها تتميز - غالبا - بقيم مقاومة كهربائية أعلى من الصخور المحيطة بها. ويتطلب تطبيق هذه الطريقة احتياطات كثيرة بهدف الحصول على أفضل النتائج التي توجه عملية الحفر والتنقيب إلى الاتجاه الصحيح وتوفر الكثير من الجهد والمال والوقت، شكل(٧).

● الكشف عن الألغام الأرضية

يعد وجود الألغام تحت سطح التربة من معوقات عمليات التنمية نتيجة هدر الكثير من الثروات بلا أدنى استغلال، فضلاً عن تأثيرها القاتل للإنسان. وقد ساهمت طريقة المقاومة الكهربائية الأرضية في هذه المجال عن طريق استخدام الأقطاب الحثية والتي لا يتطلب تجميع البيانات فيها اتصال مباشر بسطح الأرض، فجاءت النتائج مشجعة لبذل المزيد من الجهد لتطوير الطريقة، لكي تعمل مع مثيلاتها من الطرق الكهرومغناطيسية الأخرى في الكشف عن الألغام الأرضية، شكل(٨).



■ شكل (٨): نتائج تحليل بيانات المقاومة الكهربائية ثلاثية البعد للكشف عن الألغام المعدنية (P) وغير المعدنية (M) المدفونة على أعماق مختلفة (١، ٢، ٣ متر) في وسط رطب ووسط جاف



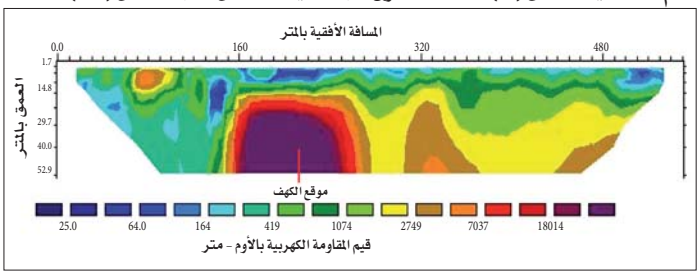
■ شكل (٩): تحديد سمك طبقة الردم للوصول إلى الطبقة الصلبة ودراسة مدى تجانسها.

● الإنشاءات الهندسية

يتطلب إنشاء أي مبنى - سواء كان متواضعا أو شاهق الارتفاع - وضع الأساسات على طبقة صلبة ومتجانسة نوعاً ما للمحافظة على سلامة المبنى، وهذا يتطلب إجراء القياسات الجيوكهربائية لمعرفة سمك طبقة الصلبة الردم للوصول إلى هذه الطبقة الصلبة، وأيضاً معرفة مدى تجانس وملائمة طبقة القاعدة لتصميم المنشأ الهندسي، فضلاً عن اختيار أنسب أساليب التأسيس. وفي هذا الإطار لعبت المقاومة الجيوكهربائية دوراً مهماً لإعطاء تصور كامل وسريع وغير مكلف مقارنة بطرق الحفر والجس التقليدية ،شكل (٩).

● تكهفات الصخور الجيرية

تعد التكهفات المتكونة في الطبقات الجيرية من أهم وأخطر المشاكل الهندسية التي تواجه العديد من الإنشاءات الحيوية داخل المدن. لما تسببه من انهيار المنشآت التى تقام فوقها . ونظراً لأن التكهفات غالباً تكون مملوءة بالهواء أو بمواد منخفضة المقاومة الكهربائية عما يحيط بها من صخور، فقد أعطت الطرق الجوفيزيائية وفيها الطرق الجيوكهربائية نتائج فعّالة في تحديد أماكن وأبعاد وأعماق تلك التكهفات، ومن ثم إيجاد أنسب الحلول الهندسية للتعامل معها، شكل(١٠).



■ شكل (١٠): يوضح الشكل مكان وأبعاد احد الكهوف تحت السطحية والذي يتميز بمقاومة كهربية عالية نسبيا عن الوسط المحيط.