------ المجلة العراقية لعلوم الارض، المجلد 5، العدد 2، ص 78-90، 2005 ------

استخدام مسح المقاومة النوعية الكهربائية في كشف القنوات تحت السطحية في منجم كبريت المشراق، شمال العراق

نبيل حميد الصائغ

مركز بحوث السدود والموارد المائية

جامعة الموصل

(تاريخ الاستلام 2005/5/12 ، تاريخ القبول 2005/9/6)

الملخص

أثبت مسح المقاومة النوعية الكهربائية في منجم كبريت المشراق نجاحه بصورة جيدة في كشف مواقع وامتداد قنوات تسرب المياه الكبريتية تحت السطحية. عمق القنوات تراوح بين 4 م وأكثر من 160 م تحت سطح الأرض في حين أن عرض القنوات تراوح تقريباً بين 20 م و 40 م.

The Use of Electrical Resistivity Survey to Detect Subsurface Channels at Al-Mishraq Sulfur Mine, North Iraq

Nabeel H. Al-Saigh

Dams and Water Resources Research Center

Mosul University

ABSTRACT

Resistivity survey at Al-Mishraq sulfur mine north of Iraq was very successful in detecting and delineating sulfuric water leakage's channels. Depths of the channels were ranging from 4m to more than 160m below the ground surface and channel's width from 20m to about 40m.

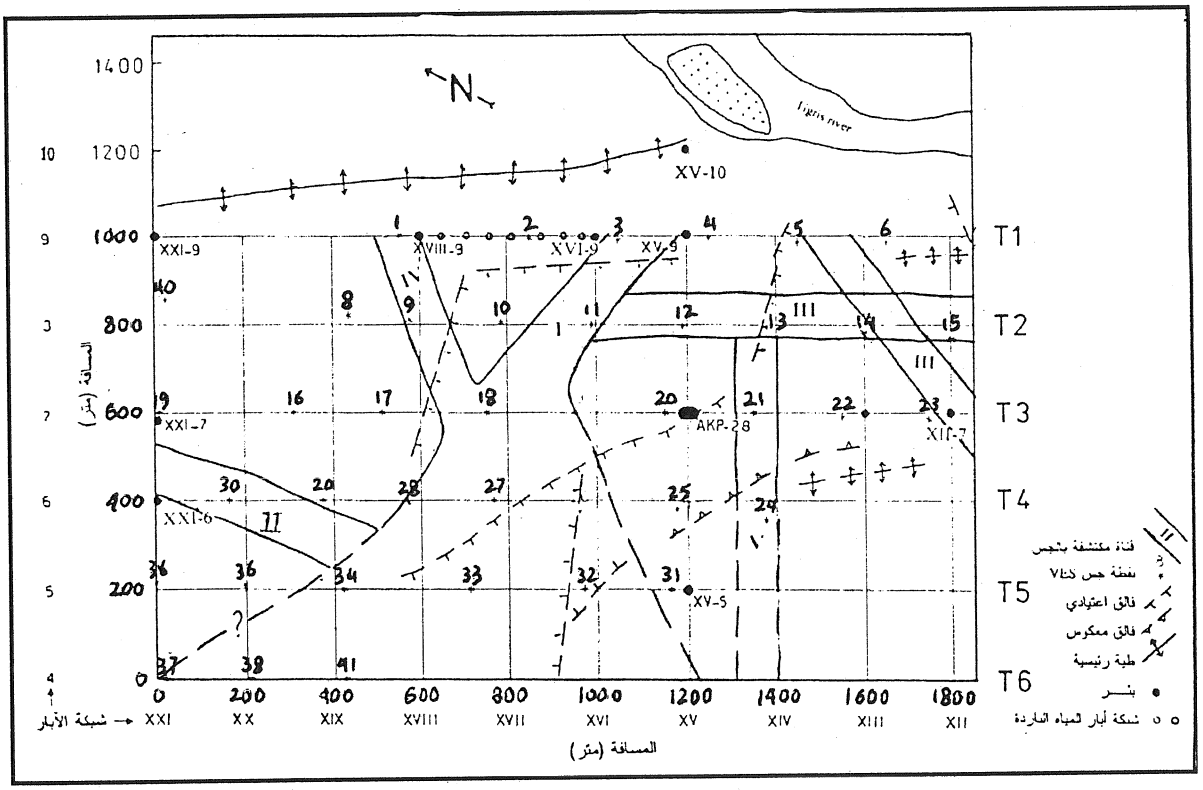
المقدمة

يقع منجم كبريت المشراق على بعد حوالي 40 كم جنوب مدينة الموصل على الضفة الغربية لنهر دجلة. استخراج الكبريت من المنجم يتم بواسطة حقن مياه حارة (ذات درجة حرارة تزيد عن 150 درجة مئوية) خلال مجموعة من الآبار إلى الطبقات الحاملة للكبريت ومن ثم استخراج الكبريت السائل خلال الآبار نفسها (طريقة فراش Frash method). هذه الطريقة في استخراج الكبريت ووقوع المنجم على الضفة الغربية لنهر دجلة والتي هي مرتفعة بحوالي 80 متراً عن النهر أدى إلى نشوء عدة قنوات تحت

سطحية حيث الكبريت السائل يتسرب خلالها إلى نهر دجلة. جرت محاولة لإيقاف تسرب الكبريت باستخدام حاجز هيدروليكي Hydraulic screen حيث تضخ مياه باردة في منظومة آبار للمساعدة على تصلب الكبريت. وكانت النتيجة جيدة في إيقاف التسرب ولكن محدودة في المنطقة المغطاة بالشبكة المائية. وعلى هذا الأساس يتضح ضرورة تعيين مواقع وامتداد تلك القنوات تحت السطحية لغرض اختيار الطريقة المناسبة في معالجة المشكلة.

السبب الرئيسي في اختيار طريقة المقاومة النوعية الكهربائية للكشف عن القنوات تحت السطحية واقتفاء تسرب المياه هو بسبب أن هذا التسرب يكون عادة مصاحباً بتغيرات في المقاومة الكهربائية عن المنطقة المحيطة به. نجاح الطريقة سجل في اقتفاء اثر المياه الجوفية الملوثة (Cartwright and McComas, 1968; Ebraheem et al., 1990; Stollar and Roux, 1975) وكذلك في الكشف عن قنوات الإذابة تحت السطحية والتكهفات (Dutta. et al., 1970 and Bates, 1973).

تهدف الدراسة إلى تحديد مواقع وامتداد القنوات تحت السطحية في المنطقة والى أعماق تزيد عن 150م، وذلك من خلال أخذ 41 نقطة جس كهربائي عمودي (VES) على شكل شبكة وبفاصلة 200م بين نقطة جس وأخرى (شكل 1).



شكل 1: خارطة تخطيطية لمنطقة الدراسة في منجم كبريت المشراق تبين مواقع نقاط الجس الكهربائي العمودي VES ومواقع الآبار والتراكيب الجيولوجية المميزة في المنطقة. كما تظهر الخارطة قنوات تسرب الكبريت السائل تحت السطحية.

جيولوجية المنطقة

طية المشراق هي عبارة عن طية محدبة ذات غاطسين تمتد باتجاه NNW-SSE ومحور الطية الرئيسي يقطع نهر دجلة. التركيب بصورة عامة ذات قمة عريضة والتضاريس الأرضية في منطقة المنجم متموجة تهبط بصورة مفاجئة بمقدار حوالي 80م عند ضفة نهر دجلة لتكون منحدر شديد (Cliff).

الصخور التي تغطي المنطقة تعود بالكامل لتكوين الفتحة (M. Miocene) ويتواجد تحته تكوين الفرات (L. Miocene) على عمق حوالي 200م.

ينقسم تكوين الفتحة في المشراق إلى جزئين رئيسين؛ الجزء العلوي غير المنتج Overburden وبسمك يتراوح بين 80-120م ويتكون من الجبس والأطيان وطبقات رقيقة من الكلس. وقد تعرى هذا الجزء بصورة كبيرة في الجزء الواقع شرق نهر دجلة. أما الجزء الأسفل وهو الجزء المنتج للكبريت Productive Series فيتكون من الكلس والجبس والمارل مع ثلاثة طبقات حاوية للكبريت، ويتراوح سمك هذا الجزء بين 88–124 م.

إن وقوع منطقة المشراق عند تقاطع نطاق دجلة للفوالق Tigris Zone Fractured Area مع نظام فوالق بخمة–الحضر Hadre- Bekhme Fault System أدى إلى اضطراب كبير في تركيبية المنطقة وخصوصاً بالقرب من منطقة التقاء نهري دجلة والزاب (The Geological Union Bureau, 1989). حيث أظهرت دراسة جيولوجية وتركيبية المشراق أن هناك نطاقي ضعف Zones of Weakness متقاطعين. النطاق الأول يمتد بموازاة طية المشراق المحدبة وينطبق على نهر دجلة والنطاق الثاني يقطع طية المشراق (The Geological Union Bureau, 1989).

إن عمليات استخراج الكبريت من الطبقتين المنتجتين الثانية والثالثة والتي بدأت في نهاية عام 1971 أدى إلى تغير كبير في معالم الطبقات تحت السطحية كما أدى إلى حدوث هبوط كبير للطبقات في بعض الأماكن بالإضافة إلى حدوث قنوات وفجوات في المنطقة. قسم من هذه الفجوات فارغ وقسم منها يحتوي على كبريت متصلب. كل هذه العوامل أدت إلى تغيير كبير في وضعية الطبقات تحت السطحية وعدم استمرارها لمسافات طويلة.

مسح المقاومة النوعية الكهربائية Resistivity survey

تعد طريقة قياس المقاومة النوعية الكهربائية إحدى الطرق الجيوفيزيائية التي تستخدم في تعين مواقع وحجوم التكهفات تحت السطحية وذلك بسبب التغاير المحتمل في قيم المقاومة النوعية الكهربائية بين الفجوات والصخور المحيطة بها. حيث أن الفجوات الفارغة تكون ذات مقاومة نوعية كهربائية عالية جداً مقارنة بالصخور المحيطة بها، وذلك بسبب رداءة التوصيل الكهربائي لهذه الفجوات. أما إذا كانت الفجوات مملوءة بسائل وخصوصاً إذا كان حامضياً فسوف يظهر مقاومة كهربائية منخفضة جداً. وهذا

يعني أن طريقة المقاومة النوعية الكهربائية يمكن أن توفر معلومات عن طبيعة الطبقات الصخرية تحت سطح الأرض بزمن أقل وبكلفة أرخص إذا ما قورن بكلفة وزمن حفر الآبار.

تعتمد هذه الطريقة على إمرار تيار كهربائي إلى داخل الأرض بواسطة قطبين كهربائيين ثم قياس فرق الجهد بواسطة قطبين آخرين. لذلك فان أي تغيرات تحت سطحية في التوصيل الكهربائي (المقاومة النوعية) سوف تغير من تدفق خطوط التيار الكهربائي وهذا بدوره يؤثر على توزيع الجهد الكهربائي داخل الأرض. وبذلك يمكن التعرف على طبيعة الطبقات الصخرية تحت السطحية من قياس الجهد الكهربائي على سطح الأرض. وقد تم في هذه الدراسة استخدام جهاز المقاومة النوعية الكهربائية نوع ABEM (SAS 300). في قياس إحدى وأربعون (41) نقطة جس كهربائي عمودي على امتداد (6) مسارات Traverses تغطي المنطقة (شكل 1). كل مسار تضمن 3-9 نقطة جس كهربائي عمودي VES وكانت المسافة بين نقطة قياس وأخرى حوالي 200م. أي أن القياس تم على شكل شبكة بفاصلة 200م.

وقد تم إنجاز الجس الكهربائي العمودي باستعمال ترتيب شلمبرجر للأقطاب (Schlumberger array). في كل نقطة جس بدأت المسافة الفاصلة بين أقطاب فرق الجهد MN بـ 1 م وبين قطبي التيار AB بـ 3 م، ثم زيدت المسافة باستمرار لتصل 80 م و 800 م على التوالي بين قطبي فرق الجهد وقطبي التيار، وذلك للوصول إلى أعماق قد تصل إلى أكثر من 150 مترا.

تفسير المعلومات الحقلية: Interpretation of Resistivity Data

أن اغلب المنحنيات الحقلية لقياسات المقاومة النوعية الكهربائية الظاهرية *Pa* هي من نوع QHK, HKHK, KHKHK والتي تمثل حالة سبع وست وخمس أنطقه على التوالي. إن هذه الأنواع من المنحنيات تعكس حالة نقصان وزيادة متكررة في المقاومة النوعية الكهربائية مع العمق والذي يعكس بدوره الاختلاف في نوعية وحالة الطبقات تحت السطحية وعدم استمرارها أو إمتدادها لمسافات طويلة. حيث أن وجود التكهفات والفجوات أو تلك التي تحوي على كبريت متصلب أدى إلى ارتفاع محسوس في قيم المقاومة النوعية الكهربائية وكذلك في الأماكن التي يتواجد فيها الجبس على السطح، في حين أن القنوات التي تتسرب فيها المياه الكبريتية أعطت قيم مقاومة نوعية كهربائية منخفضة جداً وذلك لأن هذه المياه الحاوية على الكبريت هي مياه حامضية (pH<7) تعطي قيم مقاومة نوعية كهربائية منخفضة (Ebraheem et al., 1990; Merkel, 1972; Cartwright and Sherman, 1972).

جرى تفسير المنحنيات الحقلية لقياسات المقاومة النوعية الكهربائية الظاهرية *Pa* بمظاهاتها مع المنحنيات النظرية وبمساعدة المخططات المساعدة وتم حساب المقاومة النوعية الكهربائية الحقيقية للطبقات وسمكها. حيث تبين أن العمق المستكشف يتراوح بين 0.4-0.6 من مسافة نشر الأقطاب (الفاصلة القطبية AB/2).

خرائط المقاومة النوعية الكهربائية الظاهرية: Isoresistivity maps

الشكل (2) يمثل خرائط تساوي المقاومة النوعية الكهربائية الظاهرية Isoresistivity maps حيث تم رسم ثمانية (8) خرائط كنتورية باستخدام الحاسوب. كل خارطة تمثل قيم المقاومة النوعية الكهربائية الظاهرية *Pa* عند مسافة نشر (فاصلة قطبية) AB/2 = 10، 30، 60، 100، 150، 200، 300، 400 م تغطي أعماق تتراوح بين 4-240 م. ومن هذه الخرائط يمكن التعرف على التغيرات الجانبية للمقاومة النوعية الكهربائية الظاهرية.

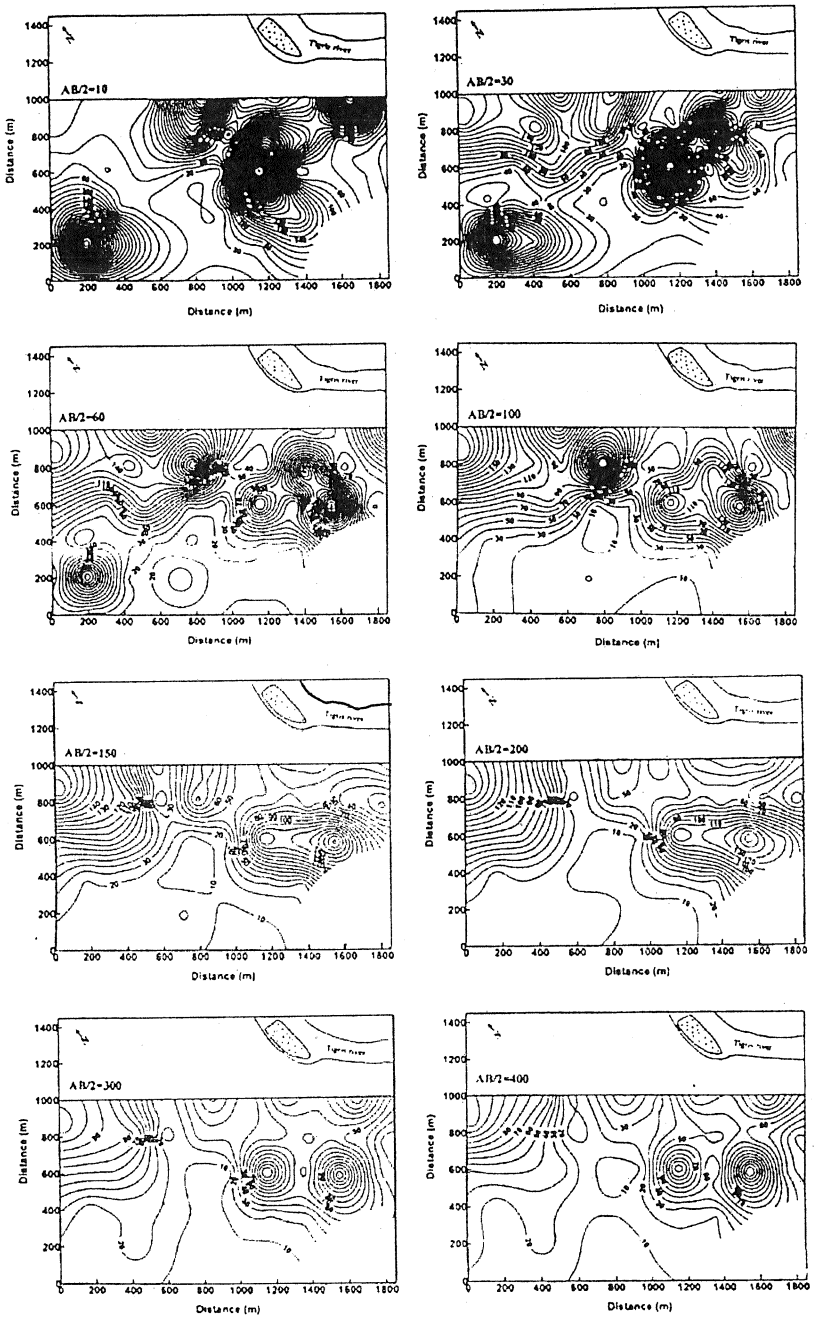
في الخارطة ذات الفاصلة القطبية 10 والتي تعكس عمقاً يتراوح بين 4–6م نلاحظ وجود منخفض في قيم المقاومة النوعية الكهربائية على شكل قناتين تكونان الحرف V. القناة الأولى (قناة I) تمتد من وسط المنطقة باتجاه الشرق E مارة بالقرب من البئر XVI-9. القناة الثانية (قناة II) تمتد من وسط المنطقة باتجاه الشمال مارة بالقرب من البئر XXI-6.

الخرائط ذات الفواصل القطبية 30 ,60 و 100 م تظهر نفس شكل خارطة الفاصلة القطبية 10م (استمرار ظهور القنوات I و II)، غير أن القناة الثانية (قناة II) تختفي عند الفاصلة القطبية 100م. مما يدل على أن هذه القناة هي قناة ضحلة وتمتد إلى عمق أقل من 50م تحت سطح الأرض. غير انه عند الفواصل القطبية 60 و100م يظهر ما يدل على وجود قناة ثالثة (قناة III) في جنوب شرق المنطقة تمتد من نقطة الجس 23 (بئر XII-7) باتجاه الشمال N وربما لتلتقي مع القناة الأولى (قناة I) بالقرب من البئر XV- 10.

إن الارتفاع في قيم المقاومة النوعية الكهربائية *Pa* والذي يظهر على شكل دوائر وخصوصاً في الخرائط القطبية 10-100م هو على الأغلب يمثل طبقات من الجبس شديد التكهف والذي يظهر على السطح في هذه الأماكن والذي انعكس على شكل قيم مقاومة نوعية كهربائية عالية. في حين نشاهد اختفاء طبقات الجبس عند الخرائط القطبية الأكبر (150-400م).

في الخارطة القطبية 150م والتي تمثل عمقاً يتراوح بين 60–90م تظهر بوضوح قناة رابعة (قناة IV) تمتد من وسط المنطقة باتجاه الشمال– الشمال الشرقي NNE مارة بالبئر XVIII-9، بالإضافة إلى استمرار وجود القناتين I و III، غير انه عند هذه الخارطة والخرائط الأخرى 200، 300 و 400م يصبح اتجاه القناة III تقريباً باتجاه جنوب جنوب شرقي–شمال شمال غربي NNW-SSE.

الشكل نفسه يتكرر في الخرائط القطبية 200 و 300 و 400 م والتي تمثل أعماقاً تتراوح بين 80–240م غير أن القناة (IV) المتجهة NNE أصبحت هي السائدة، مع ظهور قناة خامسة (قناة V)



شكل 2 : خرائط تساوي المقاومة النوعية الكهربائية الظاهرية Iso–resistivity

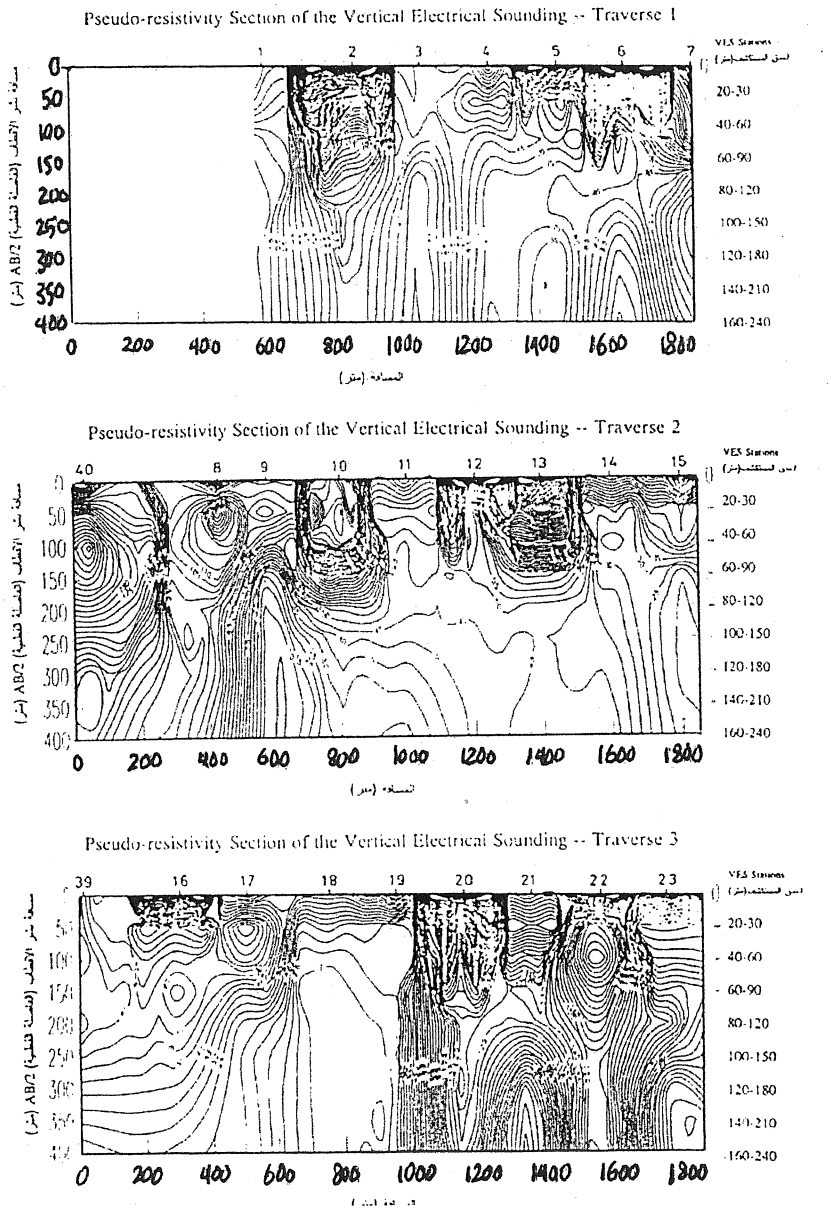
تتجه شمال شرق–جنوب غرب NE-SW تقريباً على طول خط الآبار XIV، حيث يلاحظ وجود مرتفعين للمقاومة النوعية الكهربائية على جانبي هذا الخط أحدهما يتمركز عند محطة الضخ AKP28 والآخر يتمركز عند البئر XIII-7. إن الارتفاع في قيم المقاومة النوعية الكهربائية عند هاتين المنطقتين هو على الأغلب نتيجة تصلب الكبريت السائل في الطبقات التي تحتهما وكذلك ربما لوجود طبقات من حجر الكلس Limestone والذي أنعكس في زيادة المقاومة النوعية الكهربائية. إن القناتين I و IV على الأغلب كانتا تمثلان قناة واحدة ولكن الحاجز الهيدروليكي Hydraulic screen والذي يمتد من البئر XV-9 إلى البئر XVIII-9 أدى إلى تصلب الكبريت في تلك المنطقة ومن ثم أدى إلى تقسيم القناة

الواحدة إلى قناتين يفصلهما الجزء المغطى بالشبكة المائية. غير أن القناة IV هي بصورة عامة أعمق من القناة I واكثر وضوحاً تحت عمق 60-90 م.

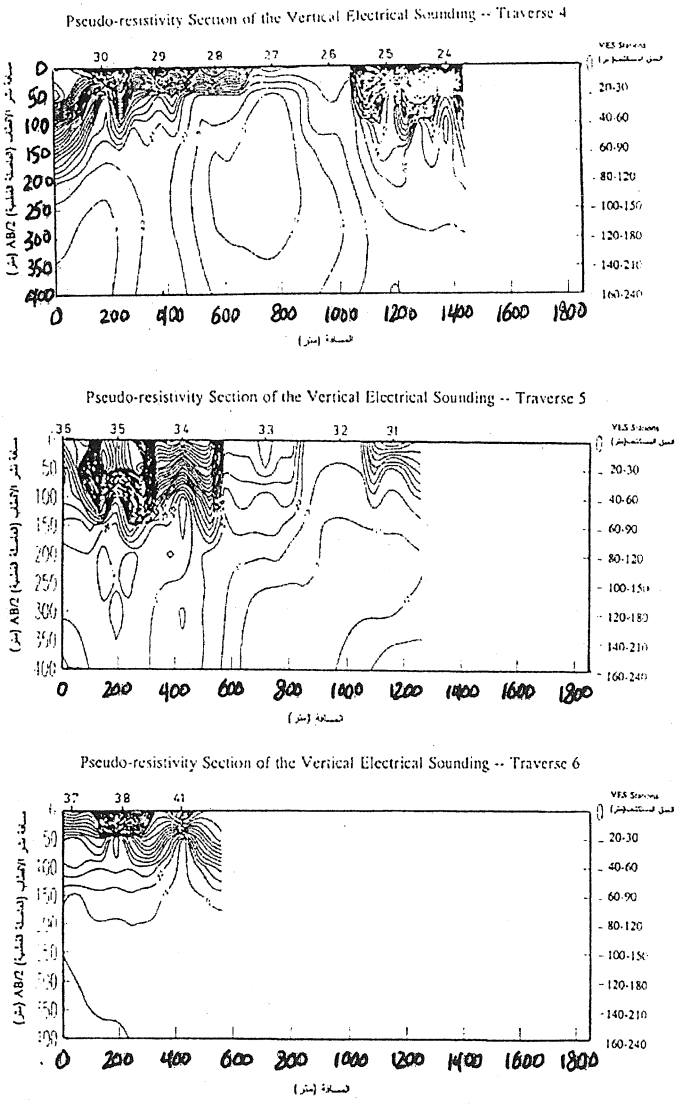
بصورة عامة أظهرت خرائط المقاومة النوعية الكهربائية أن عرض القنوات تحت السطحية يتراوح ما بين تقريباً 20 و 40م. غير أنه من الصعب تحديد العرض الحقيقي للقنوات من هذه الخرائط والتي تمثل المقاومة الكهربائية النوعية الظاهرية.

المقاطع الكهربائية الكاذبة Pseudo-resistivity sections

الشكل(3) يمثل مقاطع كنتورية لتساوي المقاومة النوعية الكهربائية الظاهرية *Pa* مع مسافة نشر الأقطاب Pseudo-resistivity sections للمسارات الستة المذكورة سابقاً.



شكل 3: المقاطع الكاذبة Pseudo-resistivity sections والتي تمثل مقاطع كنتورية لتساوي المقاومة النوعية الكهربائية الظاهرية مع مسافة نشر الاقطاب AB/2 للمسارات الستة.



شكل 3: تابع.

حيث يظهر في المقطع 1 أن أقل قيمة للمقاومة النوعية الكهربائية الظاهرية هي تحت نقاط الجس 1؛ 3 و4 والذي يمثل تواجد القناتين IV و I على التوالي. حيث يظهر أن القناة I هي قناة ضحلة يتراوح عمقها بين 60–90م، في حين أن القناة IV تبدأ بالظهور عند هذا العمق تحت نقطة الجس 1. كما يظهر تأثير الحاجز الهيدروليكي تحت نقطة الجس 2 وبمسافة حوالي 330م والى عمق يتراوح بين 140–210م (350=AB/2). حيث يظهر أن القناتين على الأغلب كانتا تشكل قناة واحدة انفصلت بفعل حاجز التبريد. كما يظهر تحت نقطة الجس 5 وبعمق يتراوح بين 140–210م بداية ظهور القناة V. أما ارتفاع قيم المقاومة النوعية الكهربائية الظاهرية تحت نقاط الجس 5 و6 فهو لوجود طبقات متكهفة من

الجبس في تلك المنطقة وبعمق يتراوح بين 40-60م أدى إلى ارتفاع كبير في قيم المقاومة النوعية الكهربائية.

المقطع 2 يظهر أن أقل قيمة للمقاومة النوعية الكهربائية الظاهرية *Pa* هي تحت نقطة الجس 9 وبعمق يتراوح بين 80-120م وهو يمثل موقع القناة IV. كما يظهر انخفاض طفيف في قيم المقاومة النوعية الكهربائية الظاهرية تحت نقطة الجس 11 والى عمق ضحل يتراوح بين 40-60م وهو يمثل موقع القناة I. كما لازال يظهر تأثير حاجز التبريد المائي تحت نقطة الجس 10. أما الارتفاع في قيم المقاومة النوعية الكهربائية الظاهرية تحت نقاط الجس 12 ،13 ،14 فهو لوجود الجبس المتكهف في تلك المنطقة. كما تظهر القناة III تحت نقطة الجس 15 وبعمق يتراوح بين 80-120م، كما يظهر بداية تشكل القناة V تحت نقطة الجس 13 وبعمق يتراوح بين 120-180م.

المقطع 3 يظهر أن أقل قيمة للمقاومة النوعية الكهربائية الظاهرية هي تحت نقطتي الجس 18 و 19 حيث يظهر ما يدل على وجود قناة واحدة عريضة تمتد من عمق يتراوح بين حوالي 60-90م إلى أكثر من 160م (400=AB/2) تحت سطح الأرض. إن هذا المكان يمثل وسط المنطقة ونقطة التقاء القناتين I و IV لتشكل قناة واحدة عريضة، حيث أن على الأغلب أن تأثير شبكة المياه الباردة اختفى عند هذا الخط. كما يظهر جزء من القناة III تحت نقطة الجس 23 وبعمق يتراوح بين 140-210م. كما يظهر ما يشير إلى وجود قناة أخرى عميقة (قناة V) وبعمق يتراوح بين 140-210م تحت نقطة الجس 21. إن القيم المرتفعة للمقاومة الكهربائية عبر هذه النقطة هو على الأغلب نتيجة تصلب الكبريت تحت محطة الضخ AKP28 وأيضا بسبب وجود طبقات متكسرة من حجر الكلس في هذه الأماكن (ثابت داؤود محضر باشي، اتصال شخصي).

المقطع 4 يظهر أن أقل قيمة للمقاومة النوعية الكهربائية الظاهرية هي تحت نقاط الجس 26، 27. يلاحظ في هذا المقطع أن عمق القناة أصبح ضحلاً وبحدود 40-60م كما يظهر أن عرض القناة أصبح أكبر.

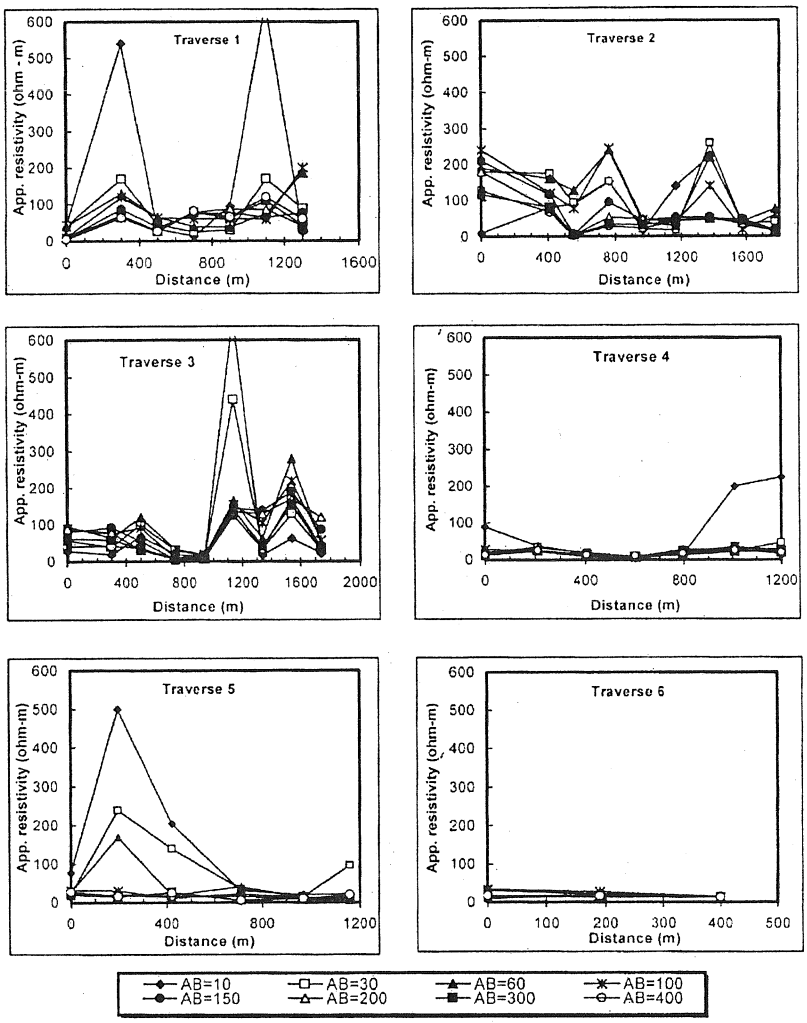
المقطع 5 يظهر أن أقل قيمة للمقاومة النوعية الكهربائية الظاهرية هي تحت نقاط الجس 31 ،32، 33 وبعمق حوالي 60-90م.

المقطع 6 يظهر أن أقل قيمة للمقاومة النوعية الكهربائية الظاهرية هي تحت نقطة الجس 41 وبعمق ضحل وربما يكون على شكل شق يمتد من عمق 20-30م تحت سطح الأرض لينفتح على عمق 120-80م وليكون قناة واحدة تحت نقاط الجس الثلاثة 37، 38 و41.

المسارات الكهربائية Electrical Profiles

الشكل (4) يمثل مسارات جيوكهربائية أفقية Geoelectrical Profiles حيث تظهر في كل مسار قيم المقاومة النوعية الكهربائية الظاهرية *Pa* للفواصل القطبية 10، 30، 60، 100، 150، 200، 300

و400 م عند كل نقطة من نقاط القياس على المسارات الستة. حيث أن اقل قيمة للمقاومة النوعية الكهربائية الظاهرية يمثل القناة التي تجري فيها المياه الحامضية الحاوية على الكبريت.



شكل 4: المقاطع الجيوكهربائية الافقية Geoelectrical profiles للمسارات الستة.

يظهر في المسار 1 أن اقل قيمة للمقاومة النوعية الكهربائية الظاهرية تظهر عند نقطة الجس 4 للفواصل القطبية 10–100م، في حين انه عند الفواصل القطبية 150–400م فان أقل قيمة تظهر عند نقاط الجس 1 و 3. حيث أن نقاط الجس 3، 4 تمثل موقع القناة I في حين أن نقطة الجس 1 تمثل موقع القناة IV واللتين تم استنباطهما من خرائط المقاومة النوعية الكهربائية، وهذا يدل على أن القناة IV تبدأ بالظهور على عمق 60–90 م.

في المسار 2 يظهر أن اقل قيمة للمقاومة النوعية الكهربائية تظهر عند نقطتي الجس 11 و 12 للفواصل القطبية 10–100 م والذي يمثل موقع القناة I، في حين أن أقل قيمة للمقاومة النوعية الكهربائية

تظهر عند نقطتي الجس 9 و 15 عند الفواصل القطبية 150-400 م والذي يمثل موقع القناتين IV و III على التوالي.

في المسار 3 تظهر أقل قيمة للمقاومة النوعية الكهربائية عند نقطتي الجس 18 و 19 للفواصل القطبية كافة حيث تمثل وسط المنطقة ونقطة التقاء القناتين I و IV وهو بدوره ربما يمثل المكان التي ينتهي فيه فاعلية الحاجز الهيدروليكي. كما يظهر عند نقطة الجس 21 انخفاض ملحوظ في قيم المقاومة النوعية الكهربائية عند الفواصل القطبية 300 و400 م والذي يمثل بداية ظهور القناة V على عمق حوالي 120-140م من سطح الأرض.

في المسار 4 تظهر جميع نقاط الجس قيم مقاومة نوعية كهربائية منخفضة وعلى الأخص في نقطة الجس 27 غير أن نقطتي الجس 24 و25 أظهرتا قيم مقاومة نوعية كهربائية عالية نسبياً عند الفواصل القطبية 10-40 م والتي تعكس وجود الجبس القريب من السطح والحاوي على التكهفات والتشققات وهو ما تم ملاحظته في الحقل. إن هذا الجبس يختفي على عمق حوالي 20م من سطح الأرض.

في المسار 5 تظهر جميع نقاط الجس قيم مقاومة نوعية كهربائية منخفضة غير أن نقاط الجس 34 و35 و36 أظهرت قيم مقاومة نوعية كهربائية مرتفعة نسبياً وللفواصل القطبية 10-60 م وهو ما يعكس وجود الجبس القريب من السطح والحاوي على التكهفات والتشققات والتي تمت ملاحظته في الحقل. إن هذا الجبس يختفي على عمق حوالي 30م من سطح الأرض. إن هذا المسار يمثل أيضاً منطقة انفتاح القنوات I و IV وربما القناة V أيضا في وسط منطقة الإنتاج.

في المسار 6 تظهر جميع نقاط الجس قيم مقاومة نوعية كهربائية منخفضة وخصوصاً تحت نقطة الجس 41 ولجميع الفواصل القطبية وذلك نتيجة انفتاح القنوات الثلاث وتشكيل قناة عريضة واحدة.

الاستنتاج

أظهر مسح المقاومة النوعية الكهربائية ما يشير إلى وجود خمس قنوات تحت سطحية في منطقة الدراسة لمنجم كبريت المشراق. عمق القنوات تراوح بين 4 وأكثر من 160 م في حين أن عرض القنوات تراوح ما بين 20 و 40 متراً. الشكل (1) هو عبارة عن خارطة تخطيطية للمنطقة تبين القنوات تحت السطحية المكتشفة وكذلك تظهر بعض التراكيب الجيولوجية المميزة في المنطقة. حيث يبدو أن ليس لهذه التراكيب الجيولوجية أية علاقة واضحة بظهور القنوات في المنجم.

شكر وتقدير

أتقدم بجزيل الشكر والامتنان لكل من الأستاذ سالم قاسم النقيب والدكتور قتيبة توفيق اليوزبكي والدكتور حازم امين الكواز من مركز بحوث السدود والموارد المائية لمساعدتهم الكبيرة في العمل الحقلي والتي بدونهم لم يكن يتم هذا العمل. كما أخص بالشكر والتقدير كل من الدكتور ثابت داؤد محضر باشي

(رئيس جيولوجين) والسيدة هناء إبراهيم (جيولوجي أقدم) والسيد ربيع خلف (جيولوجي) الشركة العامة لكبريت المشراق لمناقشاتهم القيمة وتذليل الكثير من العقبات خلال العمل الحقلي. آملين استمرار التعاون بين الجامعة والمؤسسات الحكومية ومن الله التوفيق.

المصادر

Bates, E.R., 1973. Detection of subsurface cavities. U.S. Army Engineer Waterways Experiment Stations. Mississippi, 63p.

Bhatacharya, P.K. and Patra, H.P., 1968. Direct current Geoelectrical Sounding. Elsvier Publishing Company, Amsterdam, 131p.

Cartwright, K. and McComas, M.R., 1968. Geophysical surveys in the vicinity of sanitary landfills in north-eastern Illinois. Ground Water, Vol.6, No.5, pp.23-30.

Cartwright, K. and Sherman, F., 1972. Electrical earth resistivity surveying in landfill investigations. 10th Annual Engineering and Soil Engineering Symposium, Moscow.

Dutta, N.P., Bose, R.N. and Saikia, B.C., 1970. Detection of solution channels in limestone by electrical resistivity method. Geophysical Prospecting, Vol.21, pp.405-417.

Ebraheem, A.M., Hamburger, M.W., Bayless, E.R. and Korthe, N.C., 1990. A study of acid mine drainage using earth resistivity measurements. Ground Water, Vol..28, No.3, pp.361-368.

Keller, G.V. and Frischknecht, F.C., 1966. Electrical Methods in Geophysical Prospecting. Pergamon Press, London.

Merkel, R.H., 1972. The use of resistivity techniques to delineate acid mine drainage in ground water. Ground Water, Vol. 10, pp.38-42.

Stollar, R.L. and Roux, P., 1975. Earth resistivity surveys- a method for defining ground-water contamination. Ground Water, Vol.3, No.2, pp.145-150.

The Geological Union Bureau for Geological Consultancy, 1989. Study to overcome excessive hot water outflow for Mishraq Sulphur Mine. Report on study, Baghdad, Iraq.

------ المجلة العراقية لعلوم الارض، المجلد 5، العدد 2، ص 91-102، 2005 ------

تقدير الخصائص الكيميائية للمياه الجوفية باستخدام المسح الجيوفيزيائي الكهربائي

محمد فوزي خطاب منيف محجوب المحجوب علي حسين عليوي

مركز التحسس النائي

جامعة الموصل

(تاريخ الاستلام 2005/5/11 ، تاريخ القبول 2005/9/6)

الملخص

تضمنت الدراسة الحالية إيجاد العلاقة بين قيم المقاومة النوعية الكهربائية المستحصلة من المسح الجيوفيزيائي الكهربائي والصفات النوعية للمياه الجوفية لمنطقة سينو الواقعة شمال غرب العراق. حيث أظهر نمط توزيع قيم المقاومة النوعية الكهربائية للخزان الجوفي الرئيسي في منطقة الدراسة والمتمثل بتكوين الفتحة توافقا مع بعض الصفات النوعية لمياه هذا الخزان والمتمثلة بقيم (Ca^{+2} , HCO_3^{-1} , Na^{+1} , pH, TDS, SO_4^{-2} , K^{+1}, No_3^{-1})، إذ أظهرت هذه الصفات ارتباطا قويا مع قيم المقاومة النوعية ($0.8 \geq R \leq 0.8$ -). تم إيجاد صيغ رياضية يتم بواسطتها تقدير هذه الصفات النوعية لمياه المنطقة حقليا بالاعتماد على قيم المقاومة النوعية الكهربائية.

Estimation of the Chemical Characteristics for Ground Water by Electrical Geophysical Survey

Mohammad F. Khattab Muneef M. Al-Mahjoob Ali H. Elewi

Remote Sensing Center

Mosul University

ABSTRACT

The present study investigated the relationship between resistivity values that obtained from the electrical geophysical survey and characteristics of water quality at Sinu area-NW Iraq.

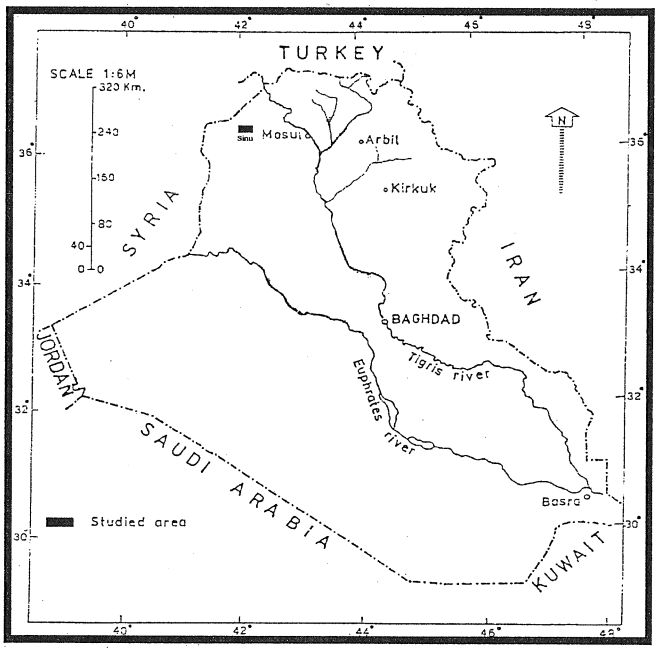
The pattern of the resistivity values for the main ground water aquifer at Seno area, which represented by Al- Fatha formation are coincided with some properties of water in this aquifer that are represented (pH, TDS, $SO4^{-2}$, Ca^{+2}, HCO_3^{-1}, Na^{+1}, K^{+1}, No_3^{-1}), so these properties are strongly show coincidence with resistivity values, ($0.8 \leq R \geq -0.8$).

Through this proposed method, mathematical equations found to estimate the characteristics of water quality depending on the resistivity values.

المقدمة

أن الكيمياء الكهربائية (Electro-Chemistry) تعد من أهم تطبيقات الكيمياء الفيزيائية والتي تعنى بالعلاقة بين الكهربائية والظاهرة الكيميائية والتي أصبحت تستخدم في الكثير من تطبيقات الهندسة البيئية كميا ونوعيا (Prabhakara Rao and Negi, 2003)، حيث إن التيار الكهربائي المار خلال المحلول الموصل يعتمد على مجموعة من العوامل أهمها التغيرات الكيميائية التي تحدث خلال المحلول، نوع الأيونات ودرجة حرارة المحلول (Sawyer and McCarty, 1978).

إن الدراسة الحالية تتناول العلاقة ما بين قيم المقاومة النوعية الكهربائية المستحصلة من الجس الكهربائي العمودي (VES) وتراكيز الأيونات الذائبة في المياه الجوفية لمنطقة سينو الواقعة شمال غرب العراق على بعد (90) كم غرب مدينة الموصل ضمن قضاء سنجار (شكل 1).



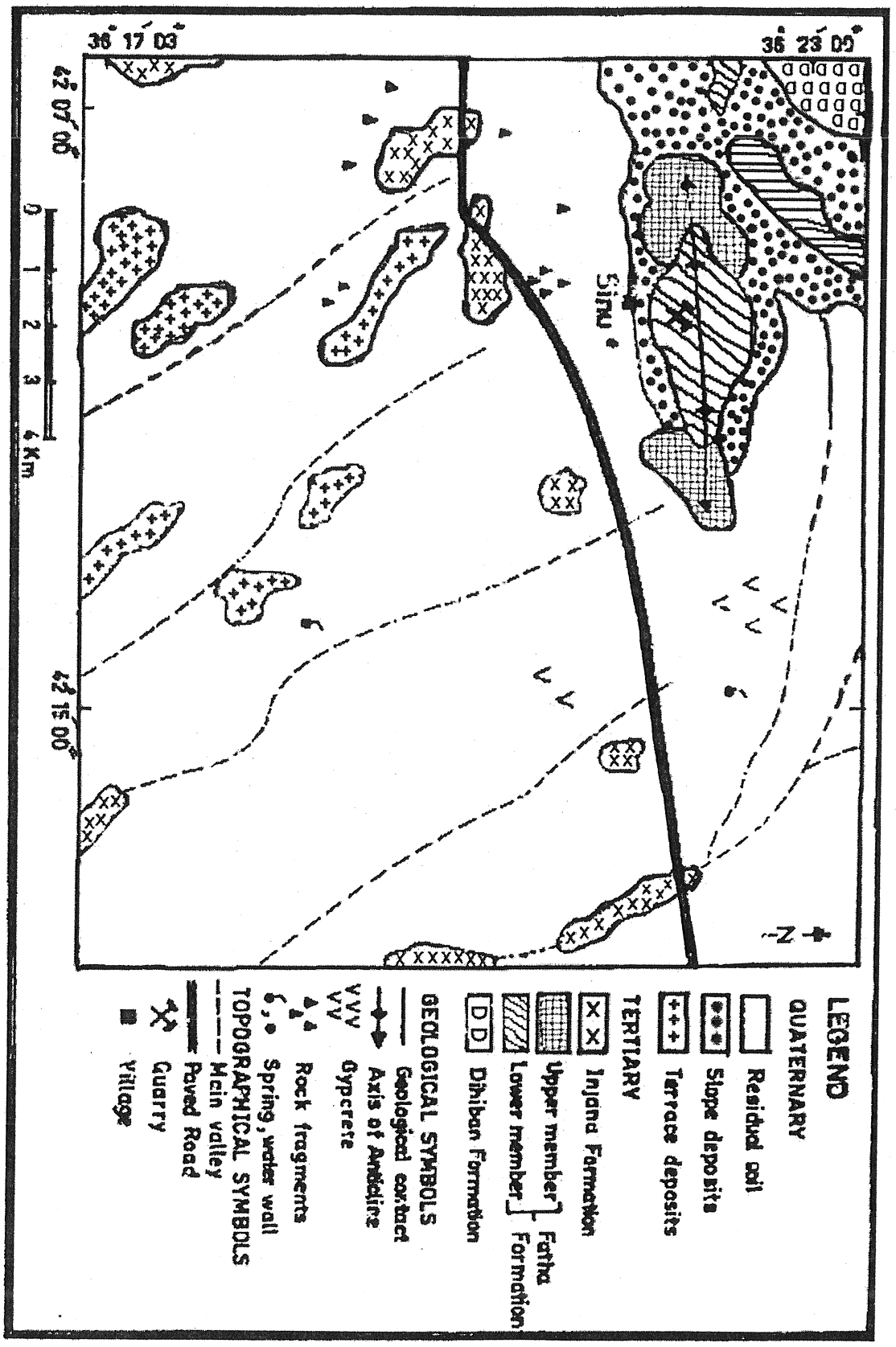
شكل 1: خارطة العراق موضحا عليها موقع منطقة الدراسة.

هدف الدراسة

يهدف البحث الحالي إلى معرفة الخصائص النوعية للمياه الجوفية في منطقة سينو من خلال قيم المقاومة النوعية الكهربائية وامكانية إيجاد صيغ رياضية يتم بواسطتها تحديد بعض تراكيز الأيونات الذائبة في المياه باستخدام قيم المقاومة النوعية الكهربائية لخدمة الدراسات الاستكشافية.

جيولوجية منطقة الدراسة

يمثل جبل سينو أهم التراكيب الجيولوجية الموجودة ضمن منطقة الدراسة، وهو عبارة عن طية محدبة ثنائية الغطس تمتد باتجاه شرق–غرب (الشكل 2). يبلغ أقصى ارتفاع لها (538) متر عن مستوى



شكل 2: خارطة جيولوجية لمنطقة الدراسة عن (Geosurve, 1996).

سطح البحر، والطية غير متناظرة إذ يميل الجناح الشمالي فيها بمعدل (30^{o}) في حين يميل الجناح الجنوبي بمعدل (11^{o})، (الجوادي، 1998).

من الناحية الليثولوجية يمثل تكوين الفتحة (المايوسين الأوسط) اقدم التكاوين المنكشفة في منطقة الدراسة، حيث يمثل هذا التكوين جسم جبل سينو بأكمله. يقسم هذا التكوين إلى قسمين، سفلي وعلوي، القسم السفلي يمتاز بتعاقبات من الحجر الجيري، الجبس، الحجر الطيني والمارل الأخضر. بالنسبة لمنطقة الدراسة فان هذا القسم ينكشف في لب طية سينو ومعظم الصخور المنكشفة على السطح هي صخور كلسية جيدة التطبق، أما سمكه الظاهر فلا يزيد عن (60) مترا (الديوة جي، بحث قيد النشر). أما القسم العلوي من تكوين الفتحة فيظهر بشكل شريط ضيق على جانبي الطية المحدبة، ويمتاز بوجود تعاقب دوري في الترسيب بين صخور الحجر الجيري، الجبس، الحجر الطيني والمارل. أيضا يظهر في منطقة الدراسة تكوين انجانة (المايوسين الأعلى)، حيث ينكشف هذا التكوين في الجزء الجنوبي من منطقة الدراسة في مناطق الوديان العميقة، ويتالف من صخور الحجر الرملي والحجر الطيني الأحمر. في حين إن ترسبات العصر الرباعي تغطي معظم منطقة الدراسة (الشكل 2). وتتالف من ترب طينية وجبسية (Gypcrete) وترب كلسية (Calcrete). أما سمك هذه الترسبات فيتراوح من متر واحد إلى عدة أمتار.

هيدروجيولوجية منطقة الدراسة

تتميز منطقة الدراسة كبقية مناطق العراق بمناخ شبه جاف، إذ أن معدل الساقط المطري للفترة من (1980–2001) بلغ (340.41) ملم، مأخوذة من محطة تلعفر للأنواء الجوية (العزو، 2003). ونتيجة لشحة سقوط الأمطار وندرة المياه السطحية باستثناء بعض العيون ذات الإنتاجية المحددة والتي لاتزيد كمية التصريف فيها عن (5 لتر/ثانية) والتي تستخدم لأغراض شرب الحيوانات وسقي مساحات محدودة من الأراضي، فان المياه الجوفية تلعب الدور الرئيسي لتجهيز المياه في تلك المنطقة.

هيدروجيولوجيا، يمكن تحديد تواجد المياه الجوفية في ثلاث خزانات في المنطقة، وهي خزان تكوين الفتحة، خزان تكوين انجانة وخزان العصر الرباعي. يعد تكوين الفتحة من التكاوين المائية الكبيرة الموجودة في منطقة الدراسة حيث شغل هذا التكوين جسم جبل سينو بأكمله وهو لهذا يمثل منطقة التغذية للمياه الجوفية في المنطقة وتكون حركة المياه بالاتجاه الجنوبي الشرقي. تتألف صخور الخزان المائي من تعاقبات لصخور الحجر الجيري، الحجر الطيني، المارل والجبس. إن تواجد الفواصل والفوالق ضمن هذا التكوين تجعله حاويا على كميات جيدة من المياه، إذ تعمل هذه الفواصل والفوالق عمل قنوات لإيصال الماء إلى الأسفل.

إن خزان تكوين انجانة يمثل الخزان الثاني لتواجد المياه الجوفية، ويتالف من تعاقبات لصخور المارل الأحمر والرصاصي إضافة إلى صخور الغرين، الرمل والطفل. يبدأ هذا الخزان بالظهور في

الأجزاء الجنوبية وبسمك محدود لا يتجاوز (2) متر ويتزايد سمكه كلما اتجهنا جنوبا خارج منطقة الدراسة.

ونظرا لمحدودية خزان تكوين انجانة وترسبات العصر الرباعي فقد تم التركيز على خزان تكوين الفتحة الذي تخترقه مجموعة من الابار (الشكل 3)، باعتباره الخزان الرئيسي في منطقة الدراسة.

الجس الكهربائي العمودي

تعتبر طريقة المقاومة النوعية الكهربائية (Resistivity Method) إحدى الطرق الجيوفيزيائية المهمة التي تستخدم في الدراسات الهيدروجيولوجية، وخصوصا فيما يتعلق بدراسة نوعية المياه الجوفية وتحديد درجة التلوث لها. حيث إن نقصان قيمة المقاومة النوعية الكهربائية بزيادة نسبة الملوحة في المياه الجوفية يساعد في تحديد انطقة التلوث، (Gnanasundar and Elango, 1999).

تتضمن الطريقة تحديد قيم المقاومة النوعية الظاهرية (Apparent Resistivity) تحت السطحية عن طريق امرار تيار كهربائي إلى داخل الأرض ومن ثم قياس فرق الجهد الناتج من هذا التيار. بالنسبة للدراسة الحالية تم الاعتماد على نتائج المسح الجيوفيزيائي الكهربائي لمنطقة سينو والمنجز من قبل (السالم واخرون، 2002). حيث شمل المسح قياس (31) نقطة جس كهربائي عمودي (VES) موزعة على أربعة مسارات. ثلاثة من هذه المسارات تمتد باتجاه شمال-جنوب، أما المسار الرابع فيمتد شرق-غرب (شكل 3).

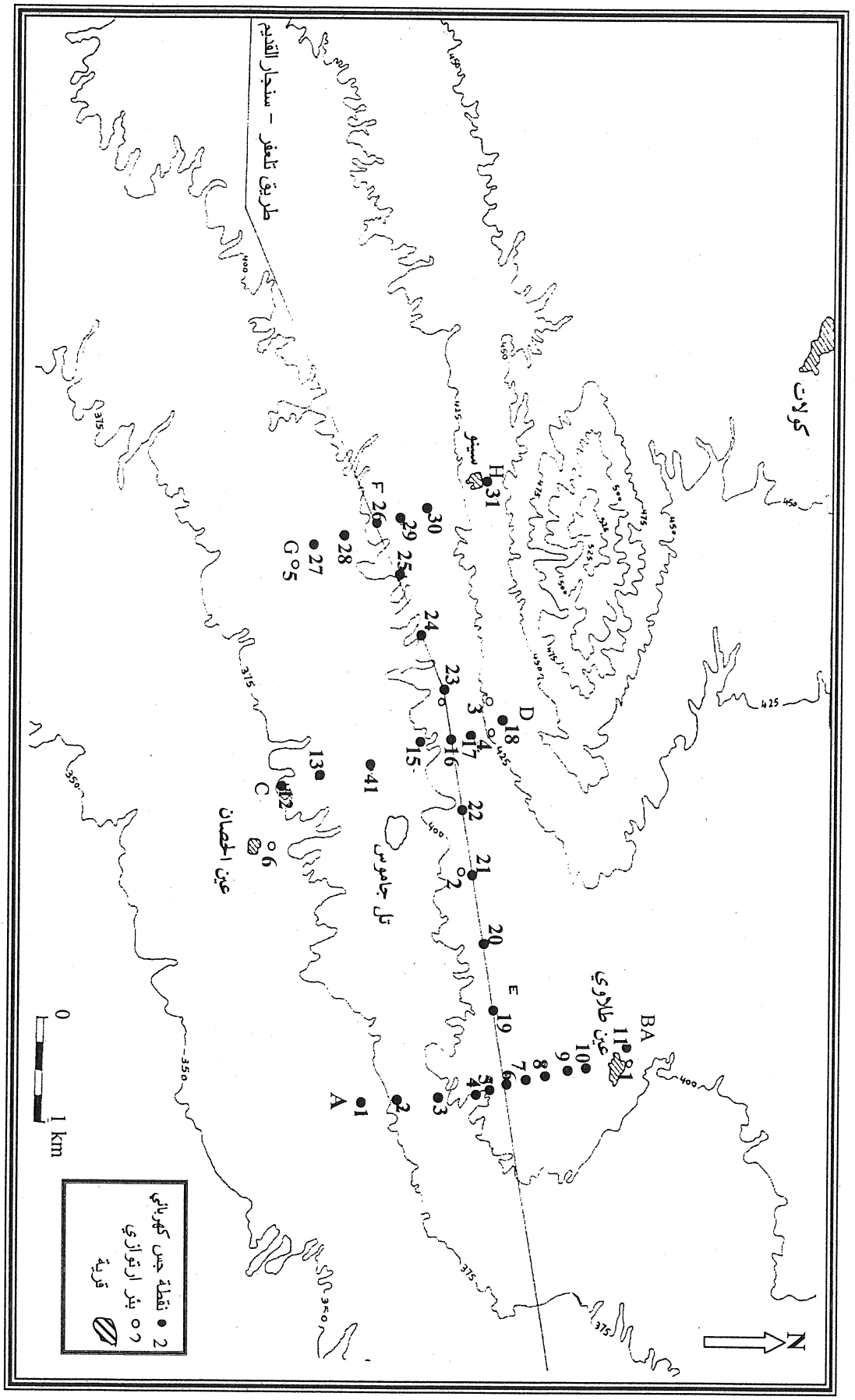
لقد بين (السالم واخرون، 2002) وجود ثلاثة انطقة جيوكهربائية في منطقة سينو ،وهي كما يلي:

النطاق الأول: يمثل نطاق التربة، وتتراوح قيم المقاومة النوعية لهذا النطاق بين (62.5-230.5) اوم.متر، وسمكه يتراوح بين (1-6) متر.

النطاق الثاني: تتراوح قيم المقاومة النوعية الكهربائية لهذا النطاق بين (9-65) اوم.متر، وسمكه يتراوح بين (37-109) متر. يمثل هذا النطاق القسم العلوي من تكوين الفتحة.

النطاق الثالث: يمثل هذا النطاق القسم السفلي من تكوين الفتحة، حيث تتراوح قيم المقاومة النوعية الكهربائية لهذا النطاق بين (117-325) اوم.متر، وسمكه غير محدد.

من خلال ربط نتائج المسح الجيوفيزيائي الكهربائي مع المعلومات الهايدروجيولوجية والمقاطع الليثولوجية للابار الارتوازية المحفورة في منطقة الدراسة ، تبين إن النطاق الجيوكهربائي الثالث والعائد للقسم السفلي من تكوين الفتحة يمثل الخزان الجوفي الرئيسي ضمن منطقة الدراسة. لذلك تم الاعتماد على قيم هذا النطاق في عمل مقارنة مع توزيع العناصر الكيميائية الذائبة في المياه الجوفية.



شكل 3: خارطة طوبوغرافية موضحا عليها نقاط الجس الكهربائي العمودي ومواقع الآبار الارتوازية.

العلاقة بين قيم المقاومة النوعية والصفات النوعية لخزان تكوين الفتحة

إن التيار الكهربائي المار خلال محلول موصل يعتمد على مجموعة من العوامل، أهمها صفات أيونات المحلول الالكتروليتي وبمعنى أدق نوع الأيونات وكميتها (Chen and Luckham, 1994). وبما أن عملية الجس الكهربائي تعتمد على فكرة امرار تيار كهربائي إلى الطبقات تحت السطحية ومن ثم تحديد قيم المقاومة النوعية الكهربائية لهذه الطبقات اعتمادا على قيم التيار الكهربائي المار خلال المحلول الالكتروليتي ضمن الطبقات وقيم فرق الجهد المتولدة من هذا التيار، لذلك فان قيم المقاومة هذه سوف تعتمد على نوع الأيونات وكميتها. حيث إن المقاومة النوعية الكهربائية هي معكوس لايصالية المحلول للتيار الكهربائي والتي يمكن أن تحسب وفق المعادلة الآتية (Sawyer and McCarty, 1978):

$$A = \frac{1000}{N} K$$

حيث إن A = الايصالية المكافئة

N = عيارية المحلول.

K = ثابت يتغير مع عيارية المحلول

فالانيونات والكتيونات هي التي تقوم بنقل التيار الكهربائي ولكن بدرجات مختلفة اعتمادا على الايصالية المكافئة لكل منهما، لاحظ الجدول (1).

جدول 1: الايصالية الايونية المكافئة لبعض الأيونات عند درجة حرارة (25) سيليزية بوحدة (mho-cm^2/equivalent)، (Sawyer and McCarty, 1978).

Cation	λ^+	Anion	Λ^-
H^+	349.8	HCO_3	44.5
Na^+	50.1	Cl^-	76.3
K^+	73.5	NO_3^{-1}	71.4
Ca^{+2}	59.5	SO_4^{-2}	79.8
Mg^{+2}	53.1		

حيث إن ايصالية المحلول سوف تساوي المجموع الجبري لقيم الايصالية المكافئة للانيونات والكتيونات.

$$A = \lambda^+ + \lambda^-$$

إن التوصيلية الكهربائية تعتمد بالدرجة الأساس على مقاومية التكوين الصخري المتمثلة بمقاومية المحلول ألالكتروليتي الموجود وتتناسب عكسيا مع المسامية ودرجة الإشباع (شارما، 1990). ومن خلال الجدول (1) يظهر تفسير الارتباط العالي بين قيمة المقاومة الكهربائية وقيمة (pH) المحلول والتي هي

مقياس لدرجة حموضة المحلول، إذ أن قيم المقاومة النوعية العالية تدل على انخفاض في قيمة الـ (pH) في تكوين المائي لمنطقة الدراسة وبالتالي زيادة في حامضية المحلول.

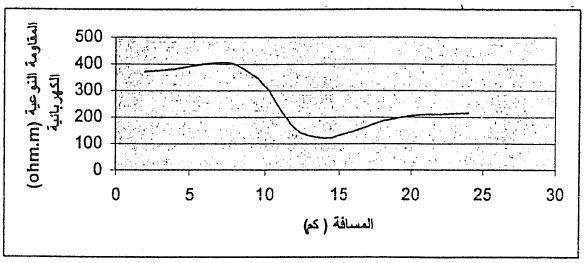
تم تحديد قيم المقاومة النوعية الكهربائية لخزان تكوين الفتحة والذي يمثل الخزان الرئيسي في منطقة سينو، حيث تراوحت القيم بين (108–440) اوم.متر، وعلى أعماق تتراوح بين (15–120 متر)، وهذه الأعماق تتوافق مع الدراسة الهيدروجيولوجية الحقلية ومقاطع الآبار في المنطقة.

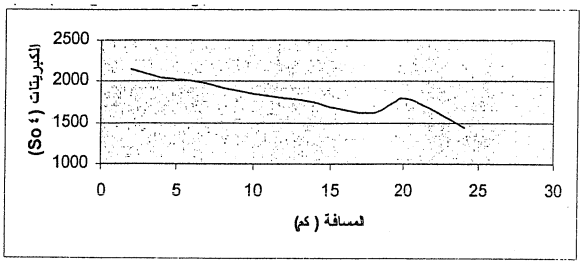
عند رسم المقاطع التي توضح تغاير الصفات النوعية المأخوذة من(السالم وآخرون، 2002) و(العزو، 2003) لمياه خزان تكوين الفتحة لمنطقة الدراسة وعلى طول المقطع شمال غرب–جنوب شرق ومقارنتها مع مقطع المقاومة النوعية الكهربائية، يظهر توافق توزيع الصفات النوعية المتمثلة (pH, TDS, $SO4^{-2}$, Ca^{+2}, HCO_3^{-1}, Na^{+1}, K^{+1}, No_3^{-1}) مع قيم المقاومة النوعية (شكل 4). إذ أظهرت هذه الصفات قيم معامل ارتباط عالية ($-0.8 \geq R \leq 0.8$)، لاحظ الجدول (2)، والتي من المفترض أن تكون لها علاقة خطية مع قيمة المقاومة الكهربائية اعتمادا على التغاير الإحصائي (Chapman and Monroe, 1993).

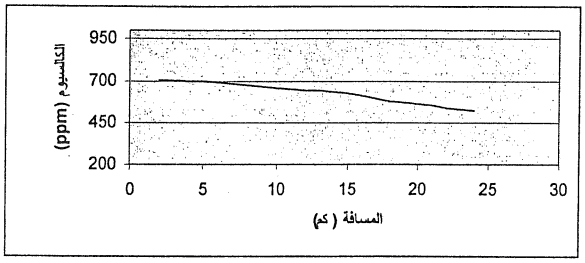
جدول 2: معاملات الارتباط بين المقاومة النوعية الكهربائية والصفات النوعية لخزان تكوين الفتحة لمنطقة سينو.

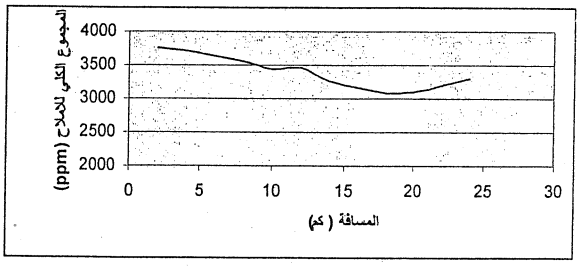
المتغيرات المترابطة	قيمة معامل الارتباط
R مقابل pH	-0.88
R مقابل SO_4^{-2}	0.832
R مقابل TDS	0.852
R مقابل Ca^{+2}	0.909
R مقابل Cl^{-1}	0.922
R مقابل HCO_3^{-1}	-0.889
R مقابل Na^{+1}	0.897
R مقابل NO_3^{-1}	0.850
R مقابل K^{+1}	0.875

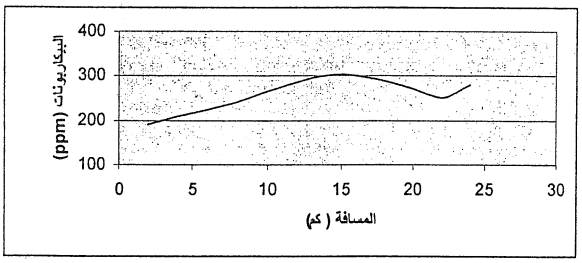
من خلال الجدول (2) يظهر الارتباط العكسي بين قيمة المقاومة الكهربائية وقيمة (pH) المحلول واللذان يعبران عن درجة حموضة المحلول، إذ أن قيم المقاومة النوعية العالية تدل على انخفاض قيم (pH) وبالتالي زيادة في حامضية المحلول وتراجع في تركيز (HCO_3^{-1}) لخزان منطقة الدراسة.

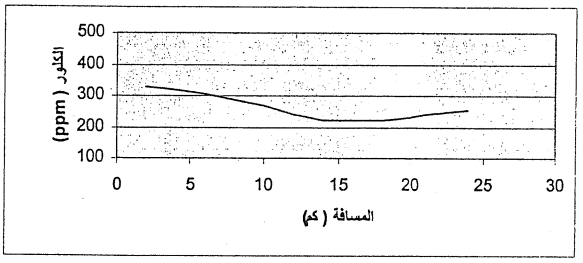


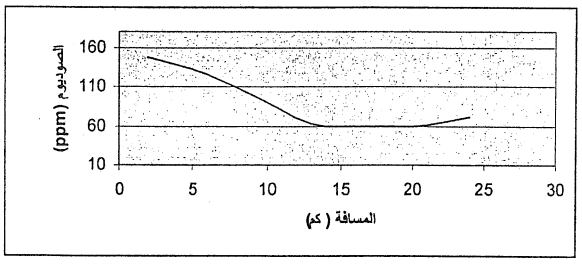


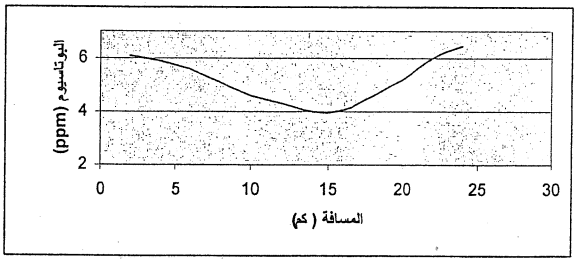


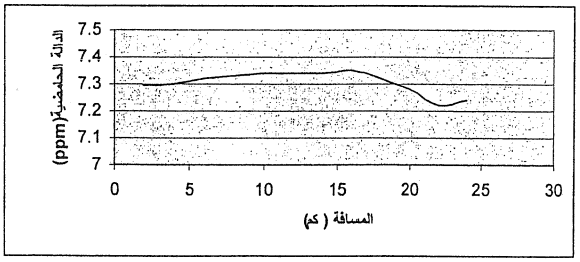


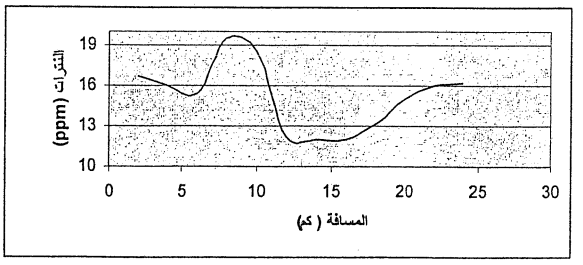












شكل 4: مقاطع توضح تغاير المقاومة النوعية والخواص النوعية لمياه خزان تكوين الفتحة لمنطقة سينو (NE-SW).

من خلال قيم معامل الارتباط العالية لقيم المقاومة النوعية الكهربائية مع الصفات النوعية للمياه الجوفية لخزان تكوين الفتحة، تم صياغة معاملات يمكن بواستطها تقدير هذه الصفات اعتمادا على قيمة المقاومة النوعية، وكما موضحة في الجدول (3).

جدول 3: معادلات حساب الخواص النوعية لخزان تكوين الفتحة وقيمة الخطأ القياسي لها.

المعادلات الرياضية	قيمة الخطأ القياسي للتقديرات	الانحراف المعياري
$pH = 7.336 - 5.41E^{-05} R$	2.0633E-02	6.702E-03
$SO_4^{-2} = 1446.691 + 1.392 R$	140.7	148.9934
$Ca^{+2} = 520.48 + 0.407 R$	49.01	43.605
$Cl^{-1} = 171.773 + 0.347 R$	16.1	37.172
$HCO_3^{-1} = 336.008 - 0.300 R$	18.4	32.149
$K^{+1} = 4.060 + 4.236 E^{-03} R$	0.75	0.4535
$Na^{+1} = 15.243 + 0.280 R$	14.9	30.01
$NO_3^{-1} = 10.53 + 1.812 E^{-02} R$	1.6	1.939
$TDS = 2993.152 + 1.674 R$	145.3	202.0515

حيث أن R : تمثل قيمة المقاومة النوعية الكهربائية المحسوبة من الجس الكهربائي العمودي.

تم تطبيق المعادلات السابقة على نقطتي الجس الكهربائي رقم (21) و (10) لكونهما واقعتا بالقرب من البئرين رقم (2) و (1) على التوالي (الشكل 3) وبذلك توفر دقة اكبر في اختبار المعادلات، وكانت قيم الخواص النوعية لمياه تكوين الفتحة المحسوبة والمقاسة مختبريا كما موضحة في الجدول (4).

جدول 4: قيم الخواص النوعية لمياه خزان الفتحة المقاسة مختبريا والمحسوبة بدلالة قيمة المقاومة النوعية للبئرين رقم (2) و (1).

بئر رقم (1)			بئر رقم (2)			
الفرق بين القيمتين(ppm)	القيمة المحسوبة رقميا بدلالة المقاومة النوعية (ppm)	القيمة المقاسة مختبريا (ppm)	الفرق بين القيمتين(ppm)	القيمة المحسوبة رقميا بدلالة المقاومة النوعية (ppm)	القيمة المقاسة مختبريا (ppm)	الخاصية أو الأيون
0.05	7.33	7.28	0.09	7.32	7.41	pH
482	3344	2862	108	3244	3136	TDS
85	605	520	39	581	620	Ca^{+2}
320	1739	1419	17	1655	1672	SO_4^{-2}
58	273	215.2	28	291	319	HCO_3^{-1}
1.84	14.33	16.17	2.17	13.25	11.08	NO_3^{-1}
81	244	325.48	39.41	223.82	184.41	Cl^{-1}
38	74	36.2	10.7	57.2	46.5	Na^{+1}
2.11	4.9	2.79	1.4	4.6	3.2	K^{+1}

الاستنتاج

أظهرت الدراسة الحالية أهمية الكيمياء الكهربائية في تقدير الخصائص النوعية للمياه الجوفية، إذ تبين إمكانية استثمار قيم المقاومة النوعية الكهربائية المستحصلة من الجس الكهربائي العمودي لمنطقة سينو والخاصة بتكوين الفتحة بتقدير الخصائص النوعية المتمثلة بقيم (pH, TDS, $SO4^{-2}$, Ca^{+2}, HCO_3^{-1}, Na^{+1}, K^{+1}, NO_3^{-1}) فضلا عن مسامية التكوين الصخري ودرجة إشباع هذا التكوين. إذ أظهرت مقاطع توزيع هذه الصفات توافقا مع قيمة المقاومة الكهربائية والذي يعزى إلى علاقة التيار المار في المحلول الالكتروليتي بنوع وكمية الأيونات الموجودة في المحلول.

إن قيمة معامل الارتباط أعطت تقدير كمي لدرجة الترابط بين هذه الصفات والمقاومة النوعية فضلا عن اتجاه هذه العلاقة. إذ أظهرت قيمة معامل الارتباط للمقاومة النوعية الكهربائية (R) ترابطا عكسيا مع قيمة (HCO_3^{-1}) و (pH) والذي يدل على إن زيادة قيم المقاومة الكهربائية تعني نقصان في قيمة (pH) وطرديا مع (TDS, $SO4^{-2}$, Ca^{+2}, Na^{+1}, K^{+1}, NO_3^{-1}) والتي تعكس سيطرة كمية المسامات ودرجة تشبع التكوين المائي لمنطقة الدراسة على قيم المقاومة النوعية للخزان الجوفي في منطقة الدراسة.

إن تواجد الصخور الجبسية التي تظهر في المناطق الوسطية والجنوبية لمنطقة الدراسة و انعدام الطبقات الكلسية التي يزداد سمكها شمالا، يرافقه نقصان في حجم المسامات المتأثرة بالفواصل والفوالق فضلا عن انخفاض درجة التشبع المائي التي تتميز بها الطبقات الجبسية وبالتالي زيادة في قيم المقاومة الكهربائية مع زيادة في(TDS, $SO4^{-2}$, Ca^{+2}, Na^{+1}, K^{+1}, NO_3^{-1})، ويرافق ذلك زيادة في تركيز (SO_4^{-2}) وتكوين حامض الكبريتيك (H_2SO_4) وبالتالي زيادة في حامضية المحلول، فضلا عن أن انعدام الطبقات الكلسية يؤدي إلى تناقص في تركيز (HCO_3^{-1}). وعليه فإننا نستطيع من خلال قيمة المقاومة النوعية الكهربائية التعرف على درجة حامضية الخزان الجوفي وطبيعة التغيرات الايونية التي تحصل على امتداده فضلا عن التغيرات الحاصلة في مسامية التكوين ودرجة التشبع بالمياه.

إن معادلات الانحدار التي تم تطبيقها وفرت موديلات رياضية لتقدير نوعية المياه الجوفية لخزان تكوين الفتحة في منطقة سينو، إذ أن قيمة الخطأ في هذه التقديرات التي تم تطبيقها على البئرين رقم (2) و (1) اللذان يمثلان نقطتي الجس رقم (21) و (10) لايدل على إمكانية استخدام هذه المعادلات في الحسابات الهيدروجيوكيميائية الدقيقة، إلا أنها أعطت قيمة تقريبية لدرجة حموضة الخزان الجوفي ودرجة تشبع الخزان وحجم المسامات، كما يمكن تقدير هذه الخصائص في الدراسات الاستكشافية والتنبؤ بمقدار الملوحة للخزان الجوفي وذلك لمعرفة الأغراض التي يمكن استخدام مياه الخزان لها.

المصادر العربية

الجوادي، زيد ياسين نوري، 1998. دراسة مورفوتكتونية للإطار الحديث لجزء من الرصيف غير المستقر في شمال غرب العراق باستخدام تقنيات الاستشعار عن بعد. أطروحة دكتوراه غير منشورة، قسم علوم الأرض، كلية العلوم، جامعة الموصل.

الديوة جي، بسام محمد أحمد، 2005. دراسة لاحتمالية اصل بعض الظواهر الدائرية في الطرف الجنوبي لجبل سينو شمال غرب الموصل، العراق. بحث قيد النشر.

السالم، طه حسين، المحجوب، منيف محجوب محمد، خطاب، محمد فوزي عمر، الديوة جي، بسام محمد أحمد ومتي، يوسف فرنسيس، 2002. المسح الجيوفيزيائي الكهربائي لمنطقة سينو، قضاء سنجار. شركة دجلة العامة لدراسات وتصاميم مشاريع الري.

العزو، عمر نبهان عبد القادر إبراهيم، 2003. هيدروجيولوجية منطقة سينو، شمال غرب العراق. أطروحة ماجستير غير منشورة، قسم علوم الأرض، كلية العلوم، جامعة الموصل.

المصادر الاجنبية

Chapman, M.J. and Monroe, C.B., 1993. An introduction of statistical problem solving in geography. McGraw, 350p.

Chen, T.Y. and Luckham, P.F., 1994. A Study of the electrical current passing through water-activated Electro-rheological fluids. J. Appl. Phys., Vol.27, pp.1556-1563.

Geological map of Mosul Quadrangle, 1996, scale 1:250,000 printed and published in the Establishment of Geological survey and Mining (GEOSERV), Baghdad, Iraq.

Gnanasundar, D. and Elango, L., 1999. Groundwater quality assessment of a coastal aquifer using geoelectrical techniques. Jour. Environ. Hydrology, Vol.7, pp1-8.

Prabhakara Rao, M.R.K. and Negi, B.C., 2003. Geoelectrical investigations for locating potable aquifers in parts of Agra District, U.P., India. J. Ind. Geophys. Union, Vol.7, No.4, pp.219-226.

Sawyer, C.N. and McCarty, P.L., 1978. Chemistry for environmental engineering. McGraw-Hill Inc., 532p.

Sharma, P.V., 1986. Geophysical methods in geology. Elsevier Sci. Publ. Company, Netherlands, 421p.