

تحليل حساسية ووضوح بعض ترتيبات المقاومة الكهربائية للكشف عن التكهفات تحت السطحية باستخدام موديلات اصطناعية معكوسة بتقنية التصوير الكهربائي المقاومي ثنائي البعد

أحمد جدوع الهيتي
قسم المعالجة
هيئة المعالجة وتقنية المعلومات
شركة الاستكشافات النفطية/وزارة النفط

زينب مصدق شنشل
قسم علوم الارض
كلية العلوم
جامعة الموصل

تاريخ الاستلام 2020/7/24 ، تاريخ القبول 2020/8/20

المستخلص

يعد تحديد شكل (ابعاد) وعمق وموقع الفجوات تحت طبقة الأساس في مرحلة التحريات الموقعية قبل الإنشاء من الأمور المهمة. لذا تهدف هذه الدراسة اجراء دراسة خصائص وتحليل ومقارنة النتائج لأنواع نشر الاقطاب الكهربائية المستخدمة في مسوحات تقنية التصوير المقاومي ثنائي البعد للكشف عن التكهفات تحت سطحية بهدف تحديد النوع المناسب للنشر الذي يجب تطبيقه في الحقل للحصول على أفضل النتائج، وأدق التفاصيل. تم انشاء الموديلات الاصطناعية ثنائية البعد للمقاومية الكهربائية لخمس حالات مختلفة جيولوجيا، والتي تعكس الحالات الشائعة للتكهفات الموجودة في الطبيعة، والتي هي عبارة عن (تكهف ضيق، تكهف واسع، تكهف ضحل، تكهف عميق، تكهفات متعددة) والمحسوبة ببرنامج RES2DMOD، تم تطبيق عملية العكس عليها للحصول على مقاطع المقاومة الحقيقية ثنائية البعد المعكوسة والمنفذة ببرنامج RES2DINV ولسته انواع من ترتيبات نشر الاقطاب الكهربائية في تقنية التصوير الكهربائي ثنائي البعد، بعد إضافة نسبة ضوضاء بنسبة (5%). بشكل عام نلاحظ امكانية اغلب انواع نشر الأقطاب الكهربائية التي تم اختبارها لتحديد الشذوذ الكهربائي (التكهف) وهذا بسبب التباين العالي المفترض بين قيم مقاومة التكهف والصخور المحيطة به، بالإضافة الى ان نسبة rms في جميع المقاطع لا تتجاوز نسبتها 5% وهذه نسبة جيدة جدا وتدل على جودة عملية العكس. ان ترتيب Wenner حساس نسبياً للتغيرات العمودية في المقاومة تحت السطحية أسفل مركز النشر، اما ترتيب dipole-dipole يكون ذو حساسية عالية لتغيرات المقاومة الأفقية، ويعتبر ترتيب Wenner- Schlumberger ذا حساسية عالية للتغيرات الافقية والعمودية معا. لوحظ انه كلما يزداد عمق التكهف كلما تقل كفاءة جميع انواع النشر في الكشف عنه بسبب انخفاض نسبة التباين بين الجسم والمحيط به. ان ترتيب Wenner beta يعتبر الاختيار الافضل من ناحية عكس قيم المقاومة الحقيقية، يليه بالدرجة الثانية ترتيب pole-dipole. ترتيبات، dipole-pole , dipole-alpha , wenner-schlumberger , dipole-dipole والافضل حسب الترتيب المذكور من حيث تحديد الموقع والشكل (الابعاد التقريبية) للتكهف. اما في حالة التحري في المناطق الصاخبة من حيث نسبة الضوضاء فأن استخدام ترتيب wenner alpha يعطي أفضل النتائج.

الكلمات المفتاحية: التكهفات تحت السطحية، موديلات صناعية، تحليل، وضوح ودقة، المقاومة الكهربائية.

Analyzing sensitivity and resolution of some electrical resistivity configurations for detecting subsurface cavities using inverted synthetic models by 2D electrical resistivity tomography technique

Zainab M. Shanshal

*Department of geology
College of Science
University of Mosul.*

Ahmed J. Al-Heety

*Seismic Processing Department
Processing and Info. Tech. Commission
Oil Exploration Co. (OEC)/ Ministry of Oil*

ABSTRACT

It is important to determine the location, depth and shape (dimensions) of cavities under subsurface in site investigation phase before construction. This study aims to make a study for properties, analysis and comparison of the results of different electrodes configurations that used in 2-D electrical resistivity Tomography surveys to detection subsurface cavities to determining the appropriate and suitable configurations type that must be conduct in the field to obtain best and accurate results. Two-dimensional synthetic models were created for Geoelectrical resistivity of five different geological features, which reflects the common cases of cavities in nature. These models are (narrow, broad, shallow and deep) cavities adding to one model for multiple cavities. RES2DMOD program was used to create these models, while RES2DINV program used in Inversion method to obtain the true 2-D inverted resistivity sections for six configuration types of electrode array for 2D electrical resistivity technique, after adding a Gaussian noise ratio of (5%). Generally, we are noticed the possibilities of most tested configuration types for determine electrical anomalies, because the high contrast between the cavities and the surrounding rocks resistivities values. In addition, RMS ratio overall does not exceed 5%, hence, this ratio is an acceptable and indicates to the quality of the inverse process. The Wenner array have high sensitivity to vertical resistivity variations, and Dipole-dipole array have high sensitivity to lateral resistivity variations. While the Schlumberger-wenner have high sensitivity in both lateral and vertical resistivity variations Also, it was noted that the efficiency of all types decreasing with increasing depth of cavities detecting, due to the low percentage of contrast between the cavities and the surrounding rocks. The Wenner beta (WB) configuration is the best choice in terms of inversing true resistivity values, Secondly the Pole-Dipole (PD). While in term of determining the location and shape (approximately dimensions) of cavities, Dipole-Dipole (DD), Weiner-Schlumberger(WS), Wenner Alpha (WA), Dipole-Pole (DP) respectively. However, in case of noisy areas, Wenner Alpha (WA) configuration gives the best result.

Keywords: subsurface cavities, synthetic models, resolution, accuracy, electrical resistivity , electrodes array.

المقدمة

تمثل ظواهر الكارست ومن ضمنها ظاهرة التكهفات (Cavities) 7-12% من مساحة الأرض في العالم (Ford and Williams, 2013). وتوفر خزانات المياه الجوفية التي تشكلها هذه الظواهر الكارستية المياه الى ما يقرب من ربع سكان العالم (Ford and Williams, 2013; Hartmann et al., 2014; Stevanovic, 2018)، كما ان انهيار الصخور التي تشكل سقف هذه التكهفات يعد خطراً كبيراً على الانسان والبيئة، وبالتالي، فان دراستها أهمية كبيرة في مجال الهندسة المدنية والبيئية والمياه الجوفية. إن ظاهرة الكارست ومن ضمنها التكهفات ظاهرة معروفة في العراق، وتتأثر مناطق كثيرة بهذه الظاهرة وتسبب مشاكل وخسائر مادية كبيرة وخسائر بشرية أيضاً، حيث أن الصخور الرئيسية المتأثرة بعملية التجوية (مثل الازابة) هي الصخور الكلسية والجبسية. لاسيما وان الصخور الجبسية تكون موجودة بشكل كبير في تكوين الفتحة والذي يغطي مناطق واسعة من العراق مثل الموصل، الانبار، صلاح الدين ومناطق أخرى. بينما تتكشف الصخور الكلسية في مناطق عديدة في العراق وضمن تكوينات جيولوجية مختلفة مثل الفرات، عنة، الدمام، بيلاسبى، عقرة - بخمة، قمجوقة ... الخ. إضافة إلى الخسائر المادية الناتجة من التخسف او التكهف فهناك خسائر بشرية مثبتة أيضاً (Sissakian and Al-Mousawi, 2007).

تعتبر ظاهرة التكهفات (Cavities) تحت السطحية (القريبة من السطح) من الظواهر الجيولوجية التي تسبب العديد من المخاطر في اعمال الهندسة المدنية، وتعتبر من اهم الاهداف التي يتم التحري عنها في تخطيط استخدام الأراضي وخاصة في أسس مشاريع البناء، حيث انه ومن الضروري تحديد أي مشكلة جيولوجية (ومن أهمها التكهفات) التي من الممكن تقع تحت موقع البناء، لأنها قد تسبب آثاراً غير مرغوبة على السطح مثل الهبوط أو الانهيار الكامل للمنشأ، تخسف الشوارع والطرق السريعة، تصدعات خزانات السدود...الخ.

يعد تحديد شكل(ابعاد) وعمق وموقع الفجوات تحت السطحية في مرحلة التحريات الموقعية (قبل الإنشاء) من الأمور المهمة حيث إن علاج هذه الفجوات قبل إقامة المنشأ من الأمور السهلة أما عدم كشفها خلال مرحلة التحريات الموقعية فقد تشكل خطراً على الأبنية التي تشيد فوقها، فضلاً عن صعوبة علاجها بعد إقامة المنشأ.

ان معظم اهداف المسوحات البيئية والهندسية تقع في الأعماق الضحلة، وعادة تكون معقدة ودقيقة ومتعددة الاحجام. لذلك يجب أن يراعي تصميم مسوحات المقاومة الجيوكهربائية قدرات نظام جمع البيانات، وعدم التجانس في قيم المقاومة الكهربائية تحت السطحية، ودقة النتائج المطلوبة.

طبقت التقنيات الجيوفيزيائية المختلفة للكشف عن الفجوات تحت السطحية. ويعتمد نجاحها على قدرة هذه التقنيات للوصول إلى عمق الهدف مع الحل المناسب لكل مشكلة. وغالباً ما يستخدم رادار الاختراق الارضي (GPR) لرسم خرائط التكهفات الضحلة جداً (Chamberlain et al., 2000)، ولكن عيوبها الرئيسية هي عمق الاختراق المحدود والحساسية العالية للوضوءاء. ويعد قياس الجاذبية الدقيقة أيضاً تقنية واسعة الانتشار للكشف عن التكهفات، لكنها مكلفة، وتأخذ وقت في التسجيل والتحليل، وتكون أيضاً حساسة جداً للوضوءاء. اما التصوير المقطعي للمقاومة

الكهربائية (ERT) فيستخدم الآن على نطاق واسع للكشف عن المشاكل الهندسية والتحريات الموقعية والتحري عن التكهفات والفراغات والتجاويف تحت السطحية الطبيعية، والأهداف الأثرية (McDonald and Davies, 2003; Cardarelli, et al., 2008; Al-Heety and Shanshal, 2016; Gardi, et al., 2018). ان تقنية المقاومة الكهربائية التصويرية ERT، تتيح لنا توزيع المقاومة الكهربائية تحت السطحية عن طريق تسجيل عدد كبير جداً من القياسات الكهربائية (Storez et al., 2000). حيث ان الاستجابة الجيوكهربائية المتغيرة في منطقة التحري تتيح لنا الحصول على مقاطع ثنائية او ثلاثية الأبعاد لتوزيع المقاومة تحت السطحية، مما يجعلها أداة فعالة للغاية وصديقة للبيئة، لتحليل وتوصيف الظواهر تحت السطحية وعدم الاستمرارية في الطبقات الجيولوجية (Sasaki, 1992; Storez et al., 2000).

ان كل نوع من انواه نشر الاقطاب يمتلك خصائص معينة تختلف عن النوع الاخر من حيث الدقة العامودية والافقية وعمق التحري ونسبة الإشارة الى الضوضاء وخصائص أخرى. لذلك يتوجب قبل تنفيذ أي مسح، تحديد النوع المناسب للنشر الذي يجب تطبيقه في الحقل لغرض الحصول على أفضل النتائج، وأدق التفاصيل.

يقوم هذا البحث بدراسة نظرية تتمثل بإنشاء موديلات اصطناعية ثنائية البعد بطريقة النمذجة الامامية، تمثل حالات مختلفة من التكهفات تحت السطحية الموجودة في الطبيعة، وباستخدام أنواع مختلفة من نشر الأقطاب، ومن ثم تطبيق عملية العكس (Inversion) على البيانات الناتجة من النمذجة الامامية لكل موديل بعد إضافة نسبة معينة من الضوضاء لتحاكي عملية تسجيل البيانات الحقلية، والهدف تحديد دقة قابلية النشر للكشف وتحديد الموقع والابعاد الهندسية للشذوذ في قيم المقاومة الكهربائية لكل نوع من أنواع النشر المستخدمة على حده، ومقارنة سلوك انواع النشر عند تطبيق مستويات ضوضاء مختلفة.

طرق العمل

تعتبر الدراسات الجيوفيزيائية التي تتضمن انشاء موديلات اصطناعية (synthetic models) لطرق المقاومة الكهربائية التصويرية أداة فعالة جداً في اختيار أفضل استجابة للمقاومة الكهربائية لأهداف محتملة ومختلفة الاشكال والاحجام والأعماق (Cardarelli et al., 2010)، لاسيما وان تقنية التصوير المقطعي للمقاومة الكهربائية تعد الاكثر استخداماً بسبب كثافة البيانات التي توفرها والتي لها اهمية في تحديد كفاءة ترتيبات الاقطاب الكهربائية المنفذة خلالها. هنالك عدد من الدراسات التي استخدمت الموديلات الاصطناعية، البعض منها كان الهدف منه البحث في المزايا النسبية وفعالية التصوير المقطعي للمقاومة عبر الابار (cross-hole) باستخدام أربع ترتيبات مختلفة وشائعة للأقطاب الكهربائية (Zhou & Greenhalgh, 2001) تقييم فعالية تصوير ترتيب فينر (Dahlin & Loke, 1998)، وقام (Dahlin & Zhou, 2004) بمقارنة دقة وكفاءة التصوير المقاومي باستخدام (5) نماذج اصطناعية، لـ 10 ترتيبات تحاكي قناة مدفونة، وسدود (Dykes). اما (Adeoti, et al., 2017) استخدم ثلاث ترتيبات مختلفة لتقييم وضاحية كل ترتيب لنموذج مصطنع لمنطقة لتكسر (Fractured Zones)، وقام (Cardarelli & Fishanger, 2005; Griffiths and Barker, 1993) باستخدام النمذجة لموديلات جيولوجية معقدة، وقام (Martinez-Lopez, et

(al., 2013) بتحليل الاستجابة الجيوكهربائية الناتجة عن ثلاثة تجاويف داخل طبقات من الصخور النارية والمتحولة. وقام (Martínez M, 2016) بتحديد وتوصيف تكهفات كارستية بتكامل المعلومات الجيوفيزيائية وباستخدام الموديلات الاصطناعية، قام (Varfinezhad and Oskooi, 2020) بعمل نمذجة امامية لموديلين باستخدام برنامجين مختلفين ومقارنتها. وقام (Hassan, et al., 2018) بإجراء موديلات مصطنعة لخمسة ترتيبات مختلفة لتحديد القنوات المدفونة باستخدام طريقة المقاومة التصويرية قام (Thabit & Al-Zubedi, 2015) باختبار (3) ترتيبات من خلال موديل صناعي لتحديد الترتيب الأكثر نجاحا في تصوير التراكيب الجيولوجية العمودية والافقية. كما وقام (Al-Zubedi, 2016) باختبار (5) ترتيبات من خلال موديلات مصطنعة، للتحديد الترتيب الأفضل في تصوير الأهداف تحت السطحية الضحلة لجدارين مدفونين تحت ترسبات طينية، وغيرها من الدراسات بهذا الصدد.

ان العلاقة بين المقاومة الظاهرية (Apparent resistivity) والمقاومية الحقيقية (True resistivity) هي علاقة معقدة، ولإيجاد القيمة الحقيقية للمقاومية تحت السطحية من قيمة المقاومة الظاهرية تطبق عملية العكس (Inversion) (لقيم المقاومة الظاهرية ويتم ذلك اما باستخدام منحنيات نظرية محسوبة او باستخدام برامج حاسوبية خاصة (Loke, 2009; Reynolds, 2011))، حيث يتم صنع موديل اولي متعدد الطبقات (initial multi-layer model) مبني على قيم المقاومة الظاهرية عن طريق طرق النمذجة الامامية (Forward modeling) (methods)، هذه البيانات يمكن عكسها الى موديل مقاومي جيولوجي حقيقي تحت سطحي من خلال تطبيق تقنية العكس (Inversion technique)). ان النماذج المصطنعة هي محاكاة للسيناريو الجيولوجي للحالات الحقيقية الموجودة في الطبيعة. والقصد هو توضيح النتائج (مسبقا) التي يمكن الحصول عليها عن طريق التصوير المقاومي المقطعي وإبراز إمكانيات طرائق نشر الاقطاب المختلفة وعمليات العكس. تم في هذه الدراسة حساب مجموعة البيانات الاصطناعية باستخدام ترتيبات نشر اقطاب مختلفة مع 51 قطبا كهربائيا، وبفاصلة القطبية 2 م.

النمذجة الامامية والموديلات الاصطناعية

تم انشاء الموديلات المستخدمة في هذا البحث باستخدام البرمجيات الحاسوبية الخاصة بطرق المقاومة الكهربائية ثنائية البعد من خلال مرحلتين: المرحلة الأولى هي مرحلة النمذجة الامامية ثنائية البعد (D Forward Modeling) والتي يتم خلالها حساب قيم المقاومة الظاهرية. ويتم هذا باستخدام طريقة العناصر المنتهية (finite-element method) او طريقة الفروق المنتهية (finite-difference method). على سبيل المثال فان الموديل يقسم الطبقات إلى شبكة مؤلفة من عدد كبير من أجزاء صغيرة بسيطة الشكل (على سبيل المثال: مربعات او مستطيلات). والتي تمثل العناصر المحدودة. يتم حساب سلوك هذه الأجزاء الصغيرة بشكل جيد نظرا لهندستها البسيطة مع دوال الطريقة المعرفة للبرنامج. وفي النتيجة يتم حساب سلوك الجسم او الطبقات بأكملها من خلال كيفية ردود فعل هذه المربعات لقيم المقاومة، وكيفية توزيع وانتشار التيار الكهربائي، وانتقال التيار الكهربائي من عنصر واحد (مربع) إلى المربع الاخر الذي يليه من خلال شروط محددة الاستمرارية وبالاغتماد على المعادلات الخاصة بالطريقة والمكتوبة داخل البرمجيات المخصصة. تعتبر طريقة العناصر المنتهية (finite-element) او طريقة الفروق المنتهية (finite-

(difference). من أكثر طرائق النمذجة الامامية شيوعا للحصول على موديلات المقاومة الكهربائية الاصطناعية ثنائية البعد بهيئة مقطع مقاومي كاذب (pseudo section) والتي يتم انشاءها من خلال عدد من البرمجيات، ومن أهمها برنامج RES2DMOD الذي تم استخدامه في الدراسة الحالية.

تم انشاء الموديلات اصطناعية باستخدام برنامج RIS2DMOD لعدة حالات تعكس تواجد التكهفات في الطبيعة (تكهف ضيق، تكهف واسع، تكهف ضحل، تكهف عميق، تكهفات متعددة) وبقيمة مقاومة تصل الى (1000) اوم. م، وعادة ما يكون التكهف في وسط موصل بقيمة مقاومة معينة. وفي جميع الموديلات التي تم انشاءها تم اضافة نسبة ضوضاء (Gaussian noise) لها بقيمة 5% اثناء انشاء الموديلات من خلال اختيار موجود في البرنامج، لكي تحاكي الوضع الجيولوجي الطبيعي والتسجيل الذي يتم في الحقل.

تم انشاء الموديلات للحالات أعلاه لعدة انواع من ترتيبات الاقطاب الكهربائية وهي الاكثر شيوعا (Wenner (alpha, Wenner beta, Wenner-Schlumberger, pole-pole, pole-dipole and dipole-dipole)، لغرض اختبار ومعرفة اي نوع من الترتيبات المستخدمة سيعطي أفضل وأدق النتائج.

عملية العكس

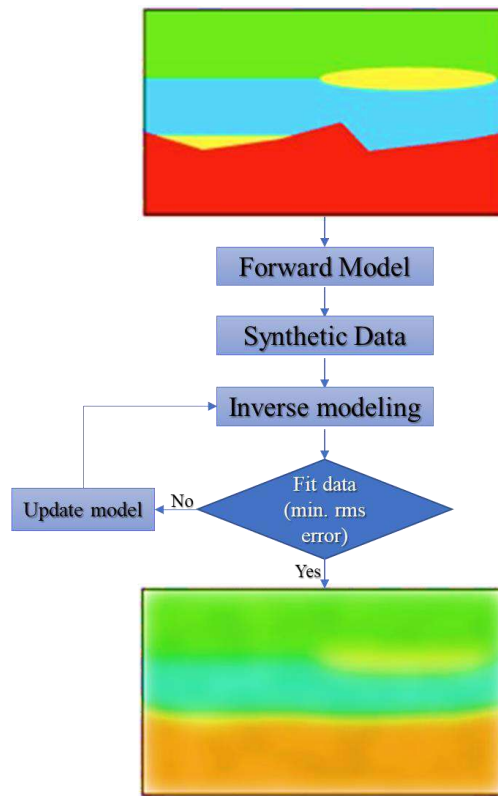
ان عملية العكس في الجيوفيزياء تقوم بعكس البيانات الحقلية او الاصطناعية مباشرة الى توزيع تحت سطحي حقيقي لخاصية فيزيائية معينة وبشكل ألي. وتعد عملية العكس حاليا الأساس في معالجة وتفسير البيانات الكهربائية المقاومة، لأنها تعرض توزيع الخواص الجيوكهربائية على شكل مقطع تصويري (Loke,2009; McDowell et al., 2002)، شكل (1).

ان تقنية ERT تنتج موديل هو تمثيل رياضي تام لتوزيع المقاومة ويمتلك مجموعة من المعاملات تقدر قيمها من خلال البيانات المقاسة او المصنعة، لذا فان كل طرق العكس تهدف بالأساس على ايجاد موديل يحاكي الهدف الاساسي من المسح. يتم تنفيذ عملية العكس للموديلات باستخدام برنامج (Loke and Software RES2DINV (Barker, 1996)، والذي يعتمد على طريقة التهذيب الاجباري (smoothness-constrained) (للجذر الأدنى (least-squares method)، حيث ان البرنامج يعمل بطريقة الية، فهو يمتلك مجموعة من المعاملات الافتراضية مثل عوامل الاخمد (Damping) factors)، المرشحات المستوية (flatness filter) الافقية والعامودي، ومعاملات الشبكة (Mesh parameters) وغيرها من المعاملات التي تقود عملية العكس الى إعطاء نتائج معقولة وأقرب الى الواقع، لاسيما عندما تكون البيانات المسجلة والمعاملات المدخلة دقيقة الى حد ما.

في هذه الدراسة تم انشاء موديلات النمذجة الامامية ثنائية البعد (forward models 2d) بالاعتماد على البيانات المصطنعة المدرجة (synthetic data) باستخدام برنامج RES2DMOD ، والتي تمثل الحالات الجيولوجية المراد دراستها من حيث موقع وعمق وابعد التكهفات تحت السطحية ونوع ترتيب الاقطاب. ثم يتم استخلاص بيانات

ERT المصطنعة من هذه الموديلات باستخدام خوارزمية يوفرها البرنامج، في المرحلة الأخيرة تتم إضافة نسبة معينة من الضوضاء الى البيانات المصطنعة.

يتم الحصول على مقاطع المقاومة ثنائية البعد المعكوسة باستخدام برنامج RES2DINV من خلال اجراء عملية العكس (inversion) على موديلات النمذجة الامامية بعد ادخال بعض معاملات (parameters) المطلوبة لتنفيذ العملية في البرنامج، حيث انه إذا كانت النتائج مقبولة بالاعتماد على قيمة نسبة الخطأ (rms error) يتم اعتماد الموديل الناتج من عملية العكس، اما في حالة وجود نسبة خطأ كبيرة يتم تعديل المدخلات في عملية العكس واجراءها مرة أخرى، لحين الحصول على نتيجة مقبولة. الشكل (1) مخطط يصف مبدأ عملية النمذجة الامامية (forward modeling) والعكسية (inverse modeling) لبيانات التصوير المقطعي ERT.



الشكل 1: مخطط يوضح مبدأ عملية النمذجة الامامية (forward modeling) والعكسية (inverse modeling).

النتائج والمناقشة

ان كل ترتيبات نشر الاقطاب تمتلك مزايا وحدود في العمل الحقلية، ولكن جميع هذه الترتيبات توفر تطبيقاً عملياً مفيداً في عمليات المسح الجيوكهربائي، والتصوير المقطعي ثنائي وثلاثي الأبعاد (Chambers, et al.,1999; Dahlin,1993).

اللوحات (1-5) تمثل الموديلات الخمس الاصطناعية ثنائية البعد للمقاومية الكهربائية التي تم اختبارها لخمس حالات مختلفة من حيث الوضع الجيولوجي، والتي تعكس الحالات الشائعة للتكهفات الموجودة في الطبيعة، والتي هي عبارة عن (تكهف ضيق، تكهف واسع، تكهف ضحل، تكهف عميق، تكهفات متعددة) والمحسوبة ببرنامج RES2DMOD، وأسفل كل موديل او حالة تظهر مقاطع المقاومة الحقيقية ثنائية البعد المعكوسة والمنفذة ببرنامج RES2DINV ولسته انواع من ترتيبات نشر الاقطاب الكهربائية الاكثر شيوعا، بعد إضافة نسبة ضوضاء بنسبة (5%)، لتكون أقرب للطبيعة في عملية تسجيل البيانات الحقلية.

بشكل عام في جميع مقاطع المقاومة المعكوسة نلاحظ ان اغلب ترتيبات نشر الاقطاب الكهربائية التي تم اختبارها تمكنت من تحديد الشذوذ الكهربائي (التكهف) وهذا بسبب درجة التباين العالي بين قيم مقاومة التكهف نفسه والصخور المحيطة به، بالإضافة الى ان نسبة rms في جميع المقاطع لا تتجاوز نسبتها 5% وهذه نسبة جيدة وتدل على جودة عملية العكس.

من خلال مقارنة قيم المقاومة بين الموديل المصطنع والمقاطع المعكوسة كما يظهر في اللوحات (1-5) وكما موضحة بالأرقام في الجدول (1)، نلاحظ ان:

1. الموديل الاول (تكهف ضيق)، كانت القيمة الاقرب للقيمة المفترضة قد اعطاها ترتيب dipole-dipole فقط.
2. الموديل الثاني (تكهف واسع) فكانت القيمة الحقيقية الاقرب للقيمة المفترضة اعطتها اغلب انواع النشر المستخدمة وهي بالترتيب: Wenner -beta، Wenner -alpha، Pole-dipole، wenner-schlumberger، pole-pole.
3. الموديل الثالث (تكهف ضحل)، كانت القيمة الحقيقية الاقرب للقيمة المفترضة قد اعطاها ترتيب Pole-dipole بالدرجة الاولى وترتيب Wenner -beta بالدرجة الثانية، ترتيب pole-pole بالدرجة الثالثة.
4. الموديل الرابع (تكهف عميق)، كانت القيمة الاقرب للقيمة المفترضة قد اعطاها ترتيب Wenner -beta فقط.
5. الموديل الخامس (تكهفات متعددة) كانت القيمة الحقيقية الاقرب للقيمة المفترضة اعطاها ترتيب pole-dipole بالدرجة الاولى وترتيب wenner-schlumberger بالدرجة الثانية.

ومن خلال مقارنة النتائج مما ذكر أعلاه لها نلاحظ انه وبشكل عام لجميع المقاطع ترتيب Wenner-beta اعطى قيم مقاومة أقرب لقيم المقاومة للمقاطع المعكوسة في حالات (تكهف ضحل، تكهف عميق، تكهف واسع) جميعا.

ان دالة الحساسية (sensitivity function) هي العلاقة بين كل وحدة حجم لما تحت السطح مع الفولتية المقاسة عند السطح، فكلما كان قيمة عامل الحساسية كبير كان تأثير تحت السطح على القياس أكبر. في ترتيبات النشر ذات الحساسية العالية يظهر ان أعلى قيمة للحساسية تكون بالقرب من الاقطاب، اما عند المسافات البعيدة عن

الاقطاب فأن نمط الخطوط الكنتورية التي تمثل سلوك عامل الحساسية تظهر بأشكال مختلفة تبعا لنوع النشر المستخدم، (Loke, 2009). ومن خلال ملاحظة اللوحات (1-5)، يظهر ترتيب Wenner حساس نسبياً للتغيرات العامودية في المقاومة تحت السطحية أسفل مركز النشر في جميع الموديلات المعكوسة، كما انه يمتلك عمق تحري متوسط، وقوة إشارة قوية بشكل عام تتناسب عكسياً مع عاملها الهندسي (الذي يعتبر الاصغر بين انواع النشر الاخرى) والذي يستخدم في حساب المقاومة الظاهرية، اما التغطية الأفقية فتكون ضعيفة نسبياً مع زيادة المسافة البينية للأقطاب. لذلك يفضل ترتيب Wenner للمسوحات في المواقع ذات الضوضاء العالية بسبب قوة الإشارة العالية. كذلك يظهر ترتيب Schlumberger-Wenner حساسية عالية للتغيرات العامودية والأفقية بنفس الوقت في المقاومة الكهربائية أسفل مركز النشر. ان ترتيبي dipole-dipole & dipole-dipole يكونان ذوي حساسية عالية لتغيرات المقاومة الأفقية، خاصة في المسوحات ثنائية البعد متعددة الاقطاب. وبالتالي، فانه مع المعدات الميدانية وتقنيات المسح يعتبر هذا الترتيب المفضل لرسم خرائط التراكيب العامودية مثل التكهفات بسبب درجة الوضوح العالية للتغيرات الأفقية. اما ترتيب pole-pole فيعتبر ضعيف الحساسية للتغيرات الأفقية والعمودية للمقاومة بسبب المسافة الكبيرة بين قطبي الجهد والتيار فيه.

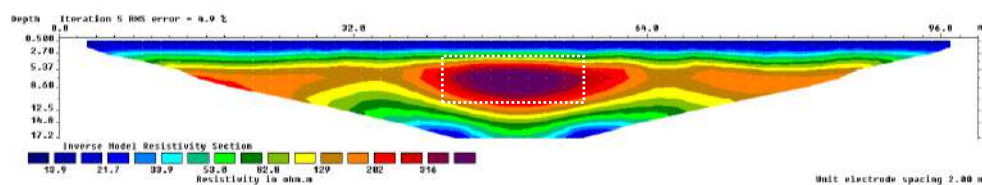
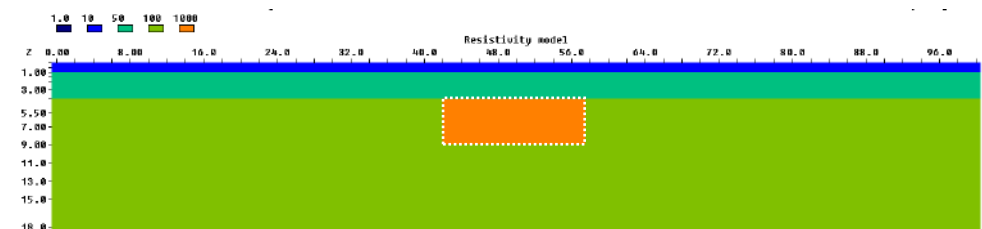
الجدول 1: قيم المقاومة بين الموديلات المصطنعة والمقاطع المعكوسة.

Cavity Model	True Resistivity ($\Omega.m$)	Range of Inverse resistivity values ($\Omega.m$)					
		Wenner alpha	Wenner beta	Wenner-Sch	Pole-pole	pole-dipole	dipole-dipole
Narrow	1000	105	102	100	36	135	120
		148	238	136	93	200	316
Wide	1000	121	200	100	190	125	130
		576	1387	463	411	650	309
Shallow	1000	129	160	140	160	100	130
		316	446	343	400	468	317
Deep	1000	105	110	100	88	130	114
		230	489	147	198	185	162
Multi	1000	130	95	145	65	115	134
		190	213	216	143	267	195

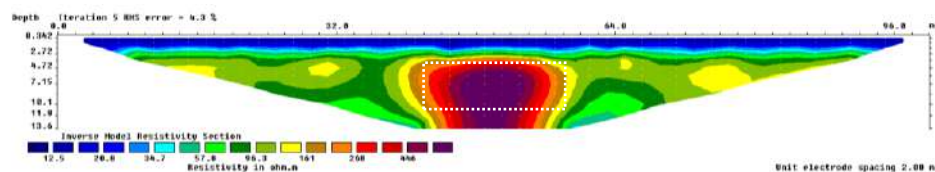
ومن خلال الجدول (2)، والذي يمثل نتائج مقارنة الابعاد الهندسية التقريبية (Geometry) (طول، عرض، عمق) في المقاطع المصطنعة مع مايقابلها في المقاطع المعكوسة لأنواع النشر المختبرة، نجد ان ترتيبي wenner Alpha and Beta اعطيا أفضل قيم مطابقة -مقاربة مع مايمثلها في الموديل المحسوب، ومن ثم يأتي بعده بالدرجة الثانية ترتيب Wenner-schlumberger ومن ثم ترتيب Pole-dipole واخيرا ترتيب dipole-dipole.

جدول (2) الابعاد التقريبية (عمق، طول، عرض) في الموديلات المصنوع مع ما يقابلها في المقاطع المعكوسة لأنواع النشر المستخدمة.

Cavity Model	Geometry d: depth (m) l: length(m) w: width(m)	Configurations					
		Wenne $r \alpha$	Wenner β	Wen-Sch	Pole- pole	Pole- dipole	dipole- dipole
Narrow	d= 5 l=13 w= 8	d =4 l=.... w=16	d =7 l=..... w=10	d =4 l=14 w=14	d =1 l= 19 w=...	d =5 l=20 w=...	d =5 l=14 w=18
Wide	d = 5 l= 7 w= 32	d =5 l=7 w=32	d=6 l=... w=30	d =5 l=8 w=32	d =1 l=20 w= 32	d =5 l=17 w=32	d=5 l=25 w=40
Shallo w	d = 4 l=5 w=16	d =5 l=5 w=26	d =4 l=.... w=18	d =5 l=9 w= 24	d =1 l=10 w=28	d =3 l=9 w=22	d=3 l=15 w=24
Deep	d =9 l=9 w=16	d =8 l=... w=24	d =9 l=... w=16	d =7 l=... w=32	d =2 l=18 w=30	d =7 l=20 w=32	d=5 l=24 w=32
Multi (mid)	d= 5 l=7 w=4	d= 5 l=... w=....	d= 4 l=... w=...	d=5 l=... w=...	d= 1 l=... w=...	d= 5 l=9 w=14	d= 4 l=8 w=20
	d=4 l=3 w=8	d= 4 l=4 w=20	d=3 l=... w=16	d= 5 l=7 w=18	d= 1 l=20 w=....	d=5 l=4 w=20	d= 4 l=8 w=24
	d=10 l=5 w=7	d= 5 l=5 w=22	d= 3 l=... w=...	d= 5 l=... w=...	d=1 l=20 w=...	d=5 l=15 w=14	d= 3 l=... w=...

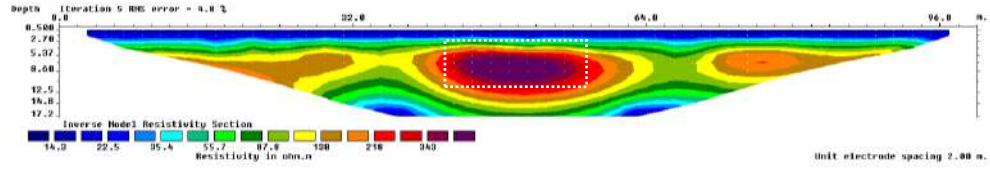


Wenner alpha array

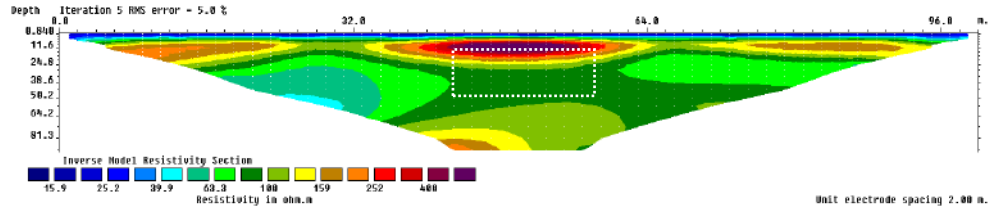


Wenner beta array

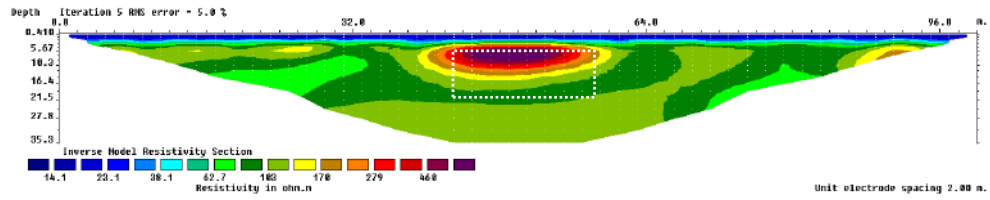
تحليل حساسية ووضوح بعض ترتيبات المقاومة الكهربائية للكشف عن التكهفات تحت السطحية باستخدام



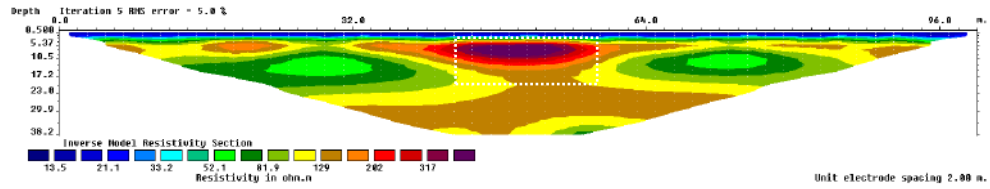
Wenner-Schlumberger array



Pole-pole array

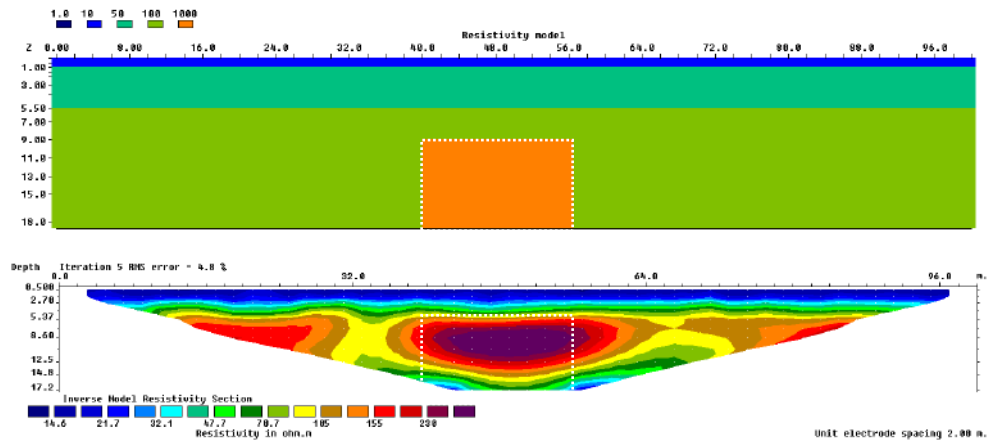


Pole-dipole array

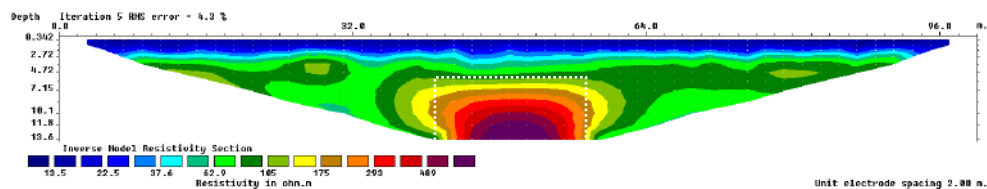


dipole-dipole array

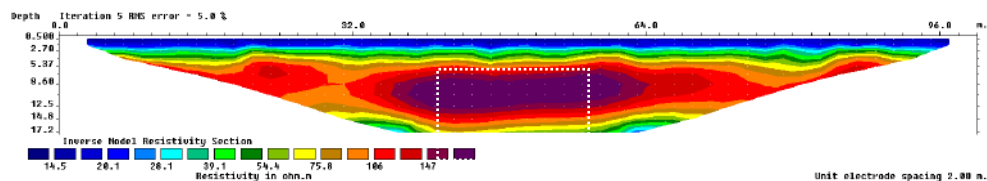
اللوحة 1: الموديل المصنع الأول (تكهف ضحل) والموديلات المعكوسة له.



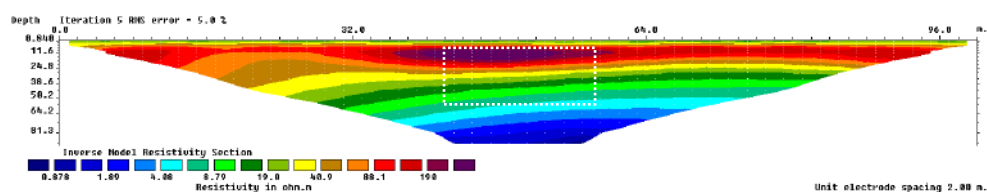
Wenner alpha array



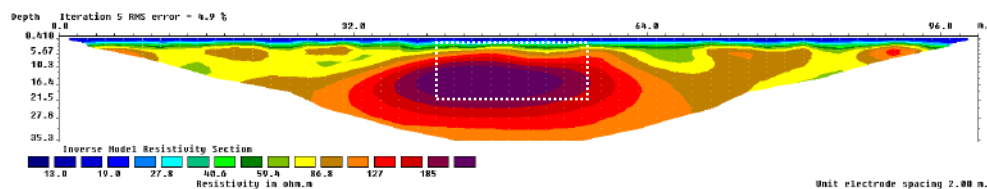
ورق Wenner beta array



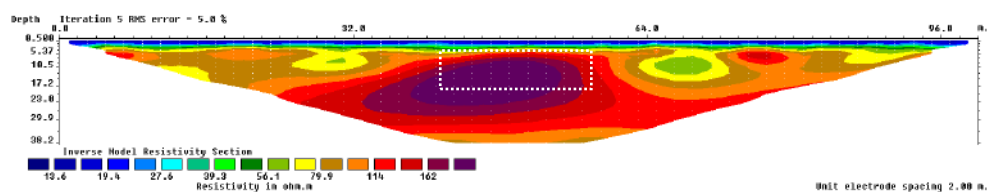
Wenner-Schlumberger array



Pole-pole array

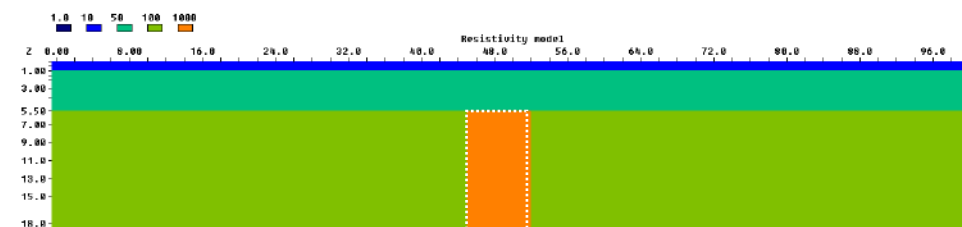


Pole-dipole array

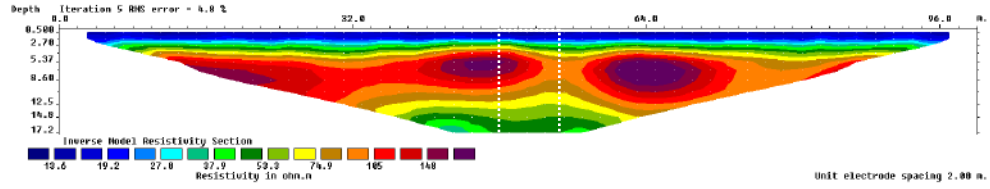


Dipole-dipole array

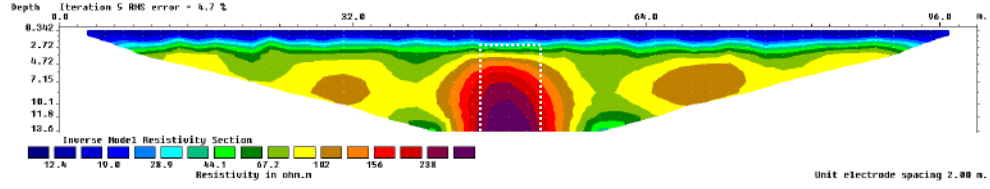
اللوحة 2: الموديل المصنع الثاني (تكهف عميق) والموديلات المعكوسة له.



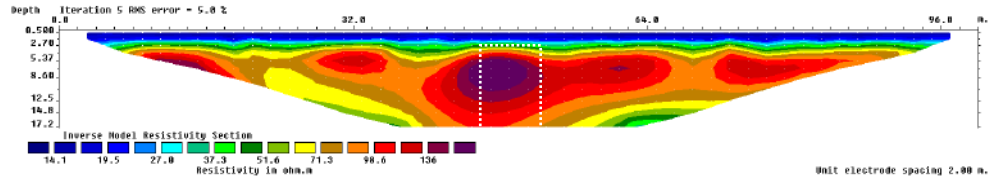
تحليل حساسية ووضوح بعض ترتيبات المقاومة الكهربائية للكشف عن التكهفات تحت السطحية باستخدام



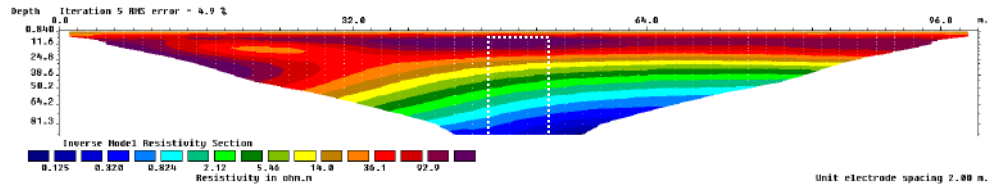
Wenner alpha array



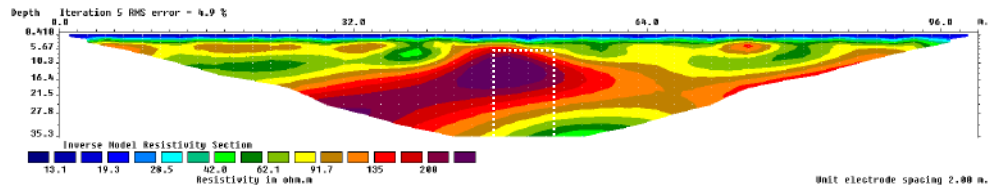
Wenner beta array



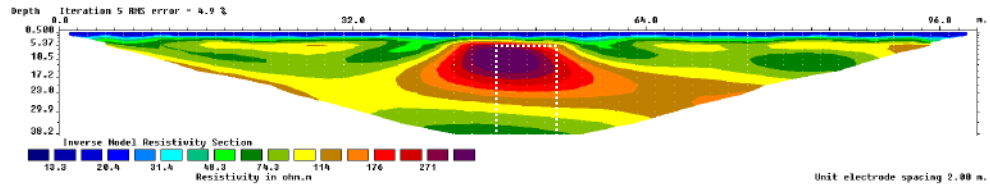
Wenner-Schlumberger array



Pole-pole array

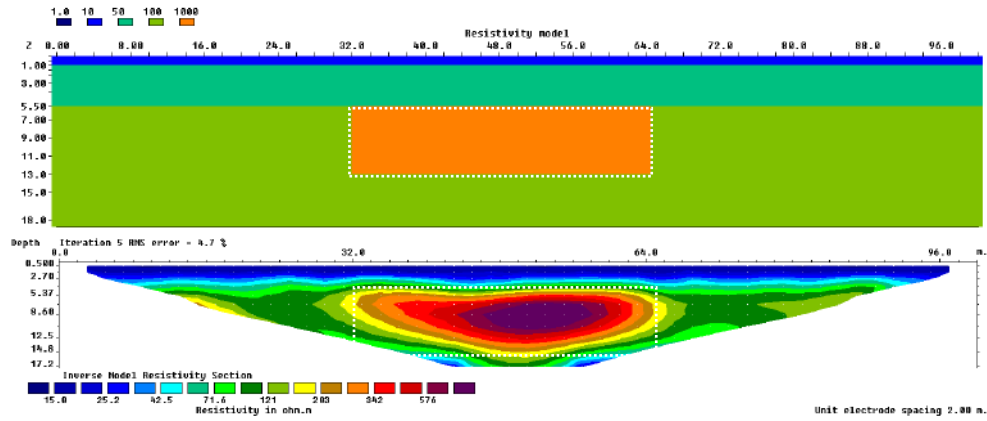


Pole-dipole array

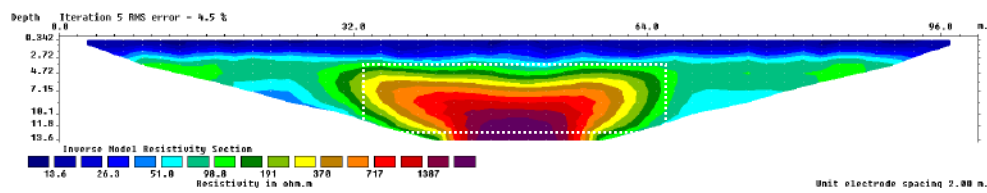


Dipole-dipole array

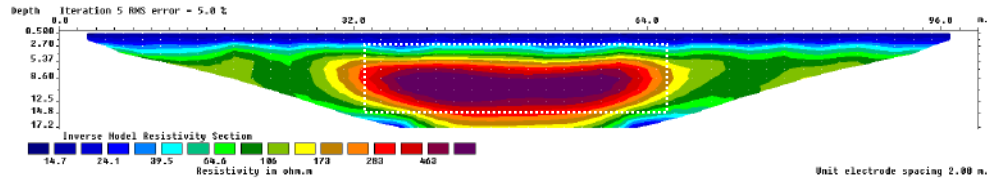
اللوحة 3: الموديل المصنع الثالث (تكهف ضيق) والموديلات المعكوسة له.



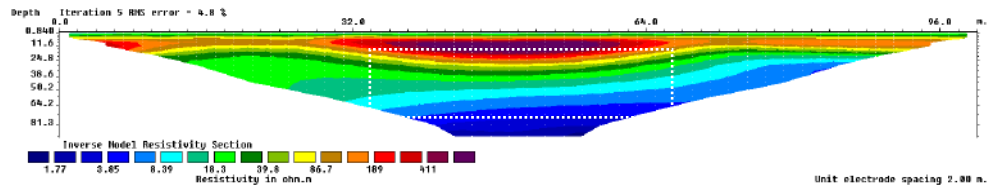
Wenner alpha array



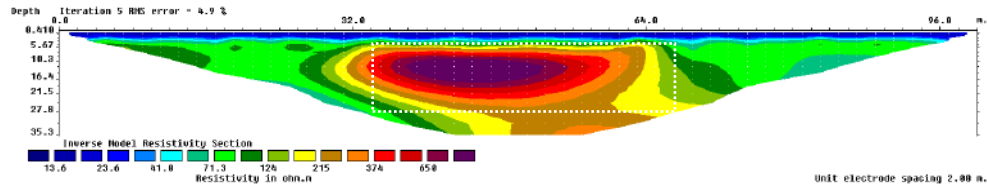
Wenner beta array



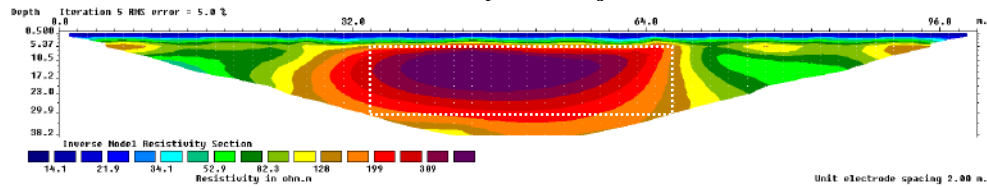
Wenner-Schlumberger array



Pole-pole array



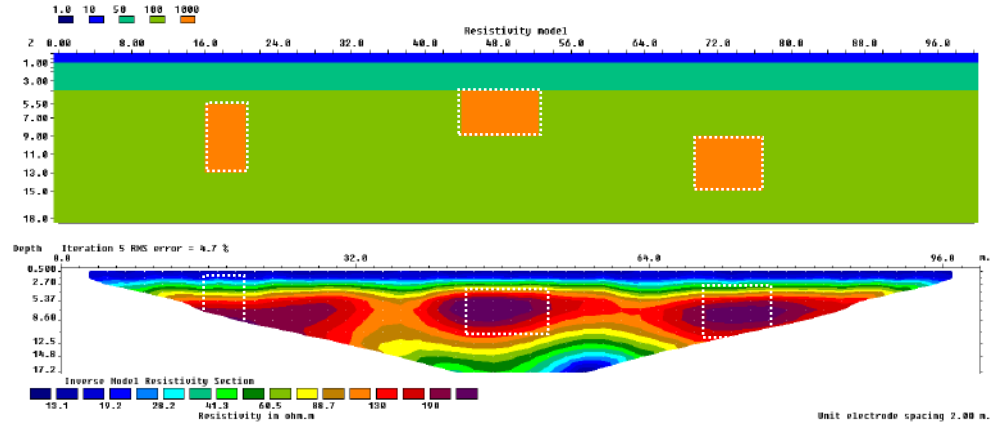
Pole-dipole array



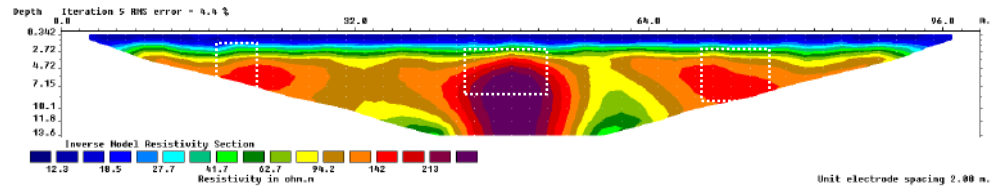
Dipole-dipole array

اللوحة (4) الموديل المصنع الثالث (تكهف واسع) والموديلات المعكوسة له.

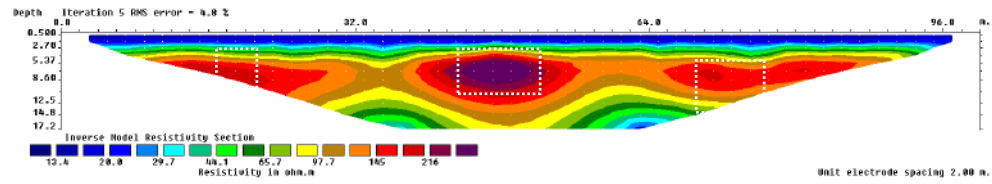
تحليل حساسية ووضوح بعض ترتيبات المقاومة الكهربائية للكشف عن التكهفات تحت السطحية باستخدام



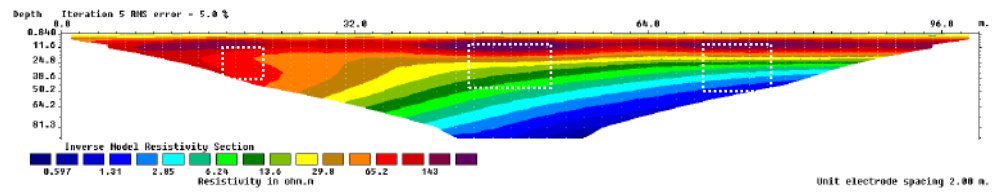
Wenner alpha array



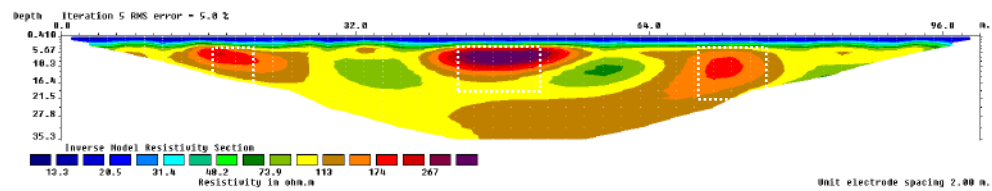
Wenner beta array



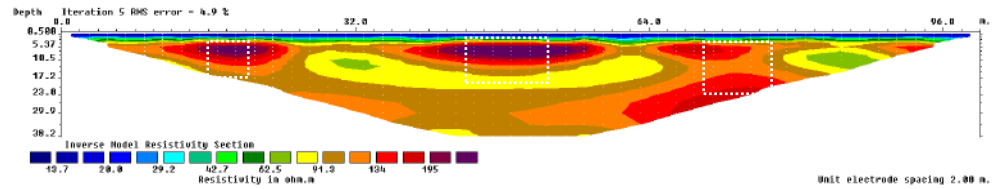
Wenner-Schlumberger array



Pole-pole array



Pole-dipole array



Dipole-dipole array

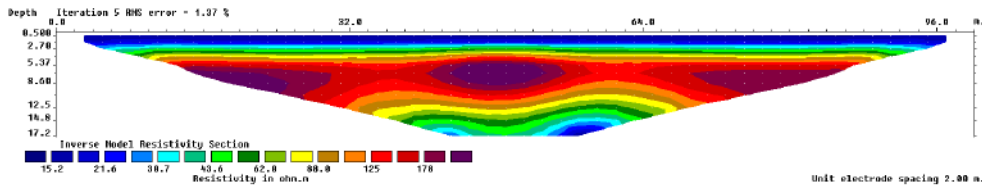
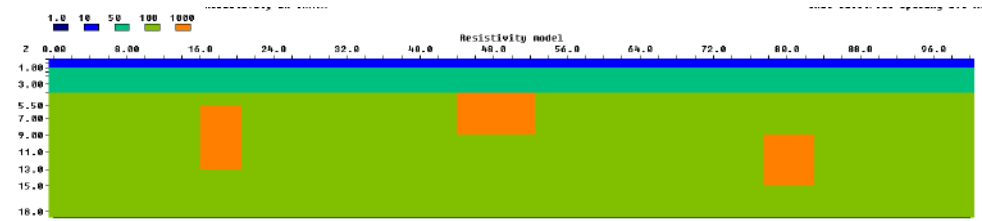
اللوحة 5: الموديل المصنع الخامس (تكهفات متعددة) والموديلات المعكوسة له

يمكن ملاحظة قيمة نسب RMS % في الجدول (3)، حيث انها كانت متغيرة في جميع موديلات المقاومة المعكوسة ولأنواع ترتيبات الأقطاب المختبرة، حيث يلاحظ انه ترتيب Wenner beta في جميع الموديلات اعطى اقل النسب، لكن من خلال المقارنة فان هذا الترتيب لم يكن صاحب أفضل تطابق ما بين الموديل المصطنع والموديل المعكوس.

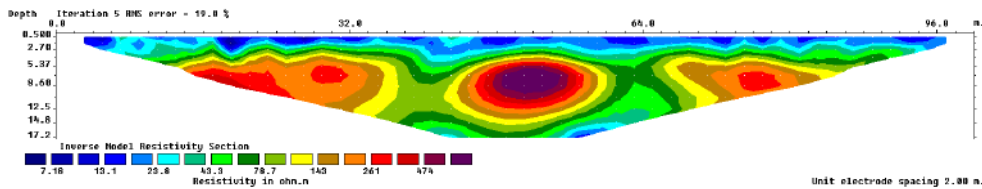
الجدول 3: يظهر نسب RMS % للموديلات الستة ولأنواع ترتيب الأقطاب المطبقة في الموديلات المعكوسة.

Cavity Model	RMS %					
	Wenner alpha	Wenner beta	Wenner-Sch	Pole-pole	pole-dipole	dipole-dipole
Narrow	4.9	4.3	4.8	5	5	5
Wide	4.8	4.3	5	5	4.9	5
Shallow	4.8	4.7	5	4.9	4.9	4.9
Deep	4.7	4.5	5	4.8	4.9	5
Multi	4.7	4.4	4.8	5	5	4.9

من خلال ملاحظة اللوحة (6) التي تمثل نموذج واحد من التكيف وبأنواع النشر المختلفة وبدرجتين من مستويات الضوضاء (0-20) % حيث من خلال ملاحظة سلوك انواع ترتيب الأقطاب خلال مستويات الضوضاء المختلفة نلاحظ انه ترتيب Wenner alpha هو الاختيار الافضل في حالة التحري في المناطق ذات الضوضاء العالية وهذا بسبب قوة الإشارة لديه اضافة الى درجة الوضوح العالية بالنسبة للتغيرات العمودية.

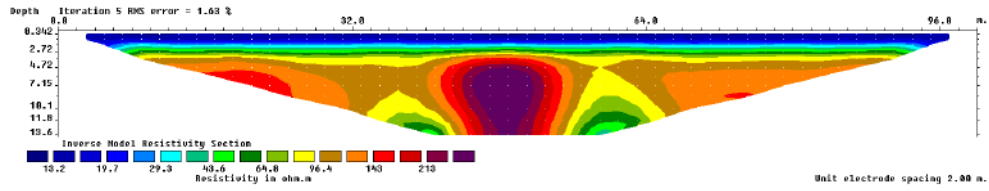


Noise levels (0%) for Wenner alpha array

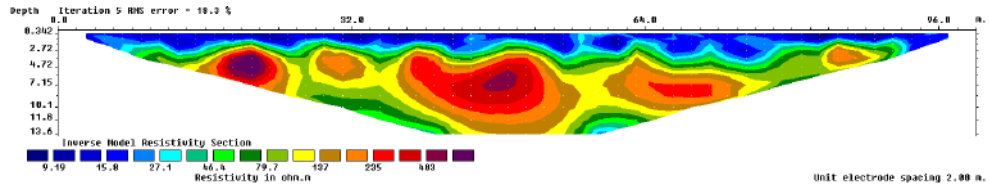


Noise levels (20%) for Wenner alpha array

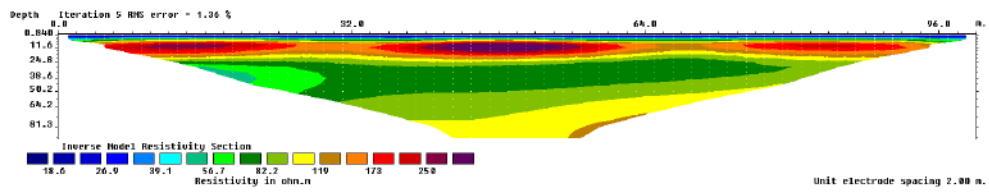
تحليل حساسية ووضوح بعض ترتيبات المقاومة الكهربائية للكشف عن التكهفات تحت السطحية باستخدام



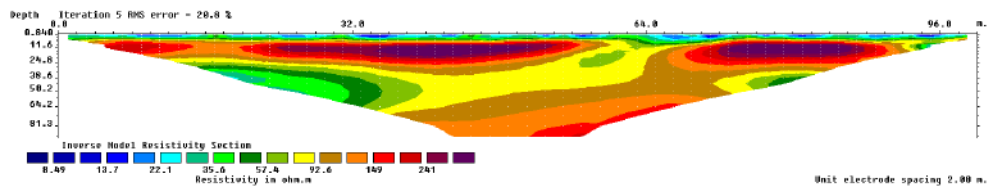
Noise levels (0%) for Wenner beta array



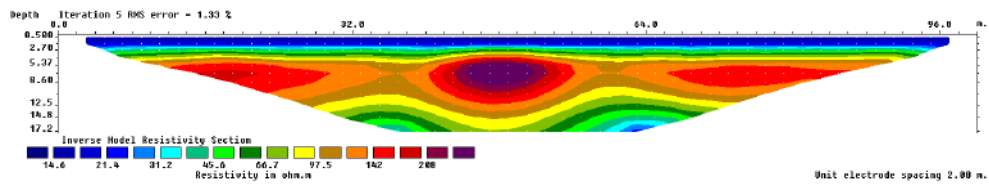
Noise levels (20%) for Wenner beta array



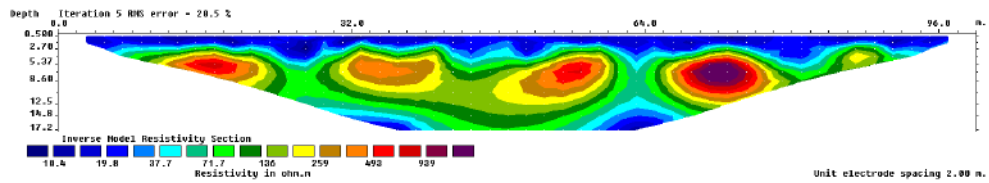
Noise levels (0%) for Wenner- Schlumberger array



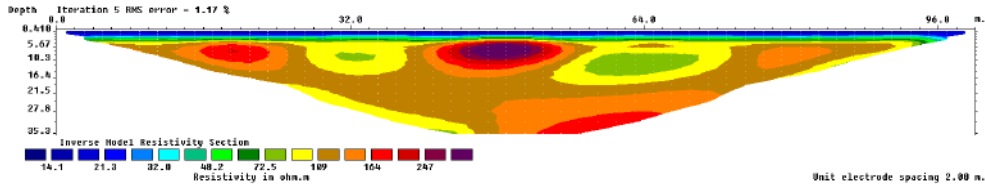
Noise levels (20%) for Wenner- Schlumberger array



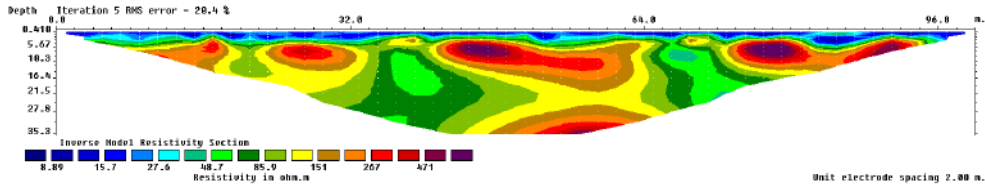
Noise levels (0%) for pole-pole array



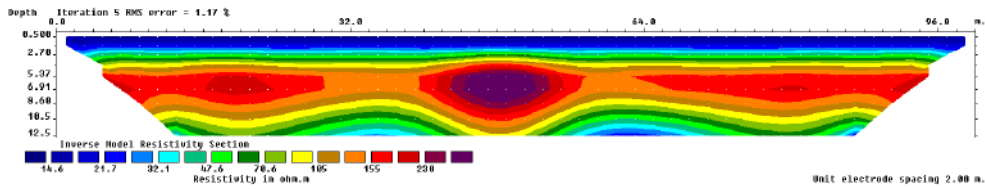
Noise levels (20%) for pole-pole array



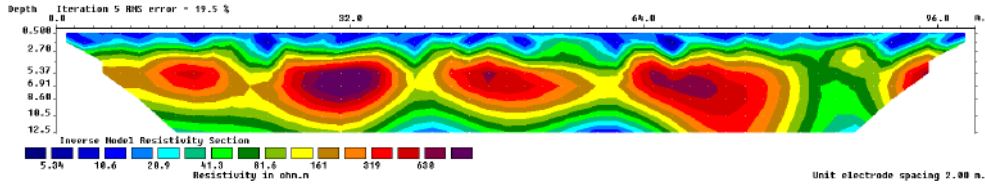
Noise levels (0%) for pole-dipole array



Noise levels (20%) for pole-dipole array



Noise levels (0%) for pole-dipole array



Noise levels (20%) for dipole-dipole array

اللوحة 6: مقاطع المقاومة المعكوسة ثنائية البعد لمستويين من الضوضاء (0-20) % لموديل التكيف المتعدد

الاستنتاجات

من خلال ملاحظة نتائج عمليات عكس الموديلات الاصطناعية يمكن ان نستنتج ما يلي:

1. ان ترتيب Wenner beta يعتبر الاختيار الاول و يليه بالدرجة الثانية ترتيب pole-dipole حيث انهم اعطو القيم المعكوسة الاكثر تطابقا مع قيم المقاومة الحقيقية للموديلات المصطنعة.
2. يعتبر ترتيب Wenner حساس نسبياً للتغيرات العامودية في المقاومة تحت السطحية أسفل مركز النشر، اما ترتيب dipole-dipole يكون ذو حساسية عالية لتغيرات المقاومة الأفقية، خاصة في المسوحات ثنائية البعد متعددة الاقطاب. اما ترتيب Schlumberger-Wenner فيكون حساس للتغيرات الافقية والعامودية بنفس الوقت.

3. لدى ترتيب Wenner قدرة تصويرية قوية في تحديد العمق مقارنة بالترتيبات الأخرى كذلك Pole-dipole. ومع ذلك، فإن ترتيب، Wenner alpha و pole-dipole الافضل من حيث القدرة الوضاحية المكانية، في حين أن ترتيب Schlumberger قد يوفر دقة تصوير محسنة جنباً إلى جنب مع ترتيب فينر Wenner (Schlumberger - Wenner)) ولكن قد يلتقط زيادة في الضوضاء عن الترتيب العادي عند تقييم جودة البيانات.
4. تحتل دقة ووضاحية (حساسية) التصوير لترتيب (pole-pole) مرتبة منخفضة بين الترتيبات الأخرى.
5. بشكل عام، ترتيب (dipole-dipole) له تأثيرات شاذة عالية نسبياً ولكنه أكثر تأثر لتلوث الضوضاء من الترتيبات الأخرى، وبالتالي فإن الدقة مع العمق ليست الأفضل، في حين ان وضاحية التصوير لهذا الترتيب جيدة خاصة بالنسبة لموقع التراكيب العامودية.
6. ان ترتيب wenner-beta هو حالة خاصة من dipole-dipole (من حيث التشابه في اسلوب النشر) ، ولكن في بعض الحالات يمتلك دقة مكانية أقل بكثير منه.
7. كلما يزداد عمق التكشف كلما تقل كفاءة جميع انواع النشر في الكشف عنه بسبب انخفاض نسبة التباين (contrast) بين الجسم والمحيط به، وهذا يدل على ان هذه الترتيبات تكون كفوءة في المسوحات البيئية او الهندسية القريبة من السطح.
8. ترتيبات، wenner- schlumberger, dipole-pole, dipole-dipole , wenner alpha , wenner beta وحسب الترتيب المذكور يعتبرو الافضل من حيث تحديد الموقع والابعاد الهندسية بشكل بشكل تقريبي لاغلب حالات التكشف المفترضة .
9. ان الموديل الذي يعطي اقل نسبة خطأ RMS هو ليس الموديل الأفضل دائماً فقد يكون الابعاد عن الواقع الجيولوجي للمنطقة، ولذلك فان المبدأ العام لاختيار الموديل الانسب هو مقارنة نتائج الموديل الناتج مع معلومات او معطيات الهدف من المسح.
10. ضرورة اعتماد الدراسة النظرية باستخدام الموديلات الاصطناعية كاجراء اولي قبل تنفيذ المسوحات الحقلية للحصول على أفضل النتائج وبأقل وقت وكلفة وجهد مبذول.
11. إذا كان منطقة المسح منطقة ذات ضوضاء عالية وتحتاج إلى دقة عامودية جيدة، ووقت مسح محدود، يفضل استخدام ترتيب Wenner. إذا كانت الدقة الأفقية الجيدة وتغطية البيانات مهمة، وكان مقياس المقاومة حساساً بما فيه الكفاية وكان هناك اتصال جيد بالأرض، يمكن استخدام ترتيب ثنائي القطب ثنائي القطب dipole-dipole في حالة عدم التأكد اوبحاجة إلى دقة أفقية وعامودية جيدة بشكل معقول، فاستخدم مجموعة Wenner Schlumberger ذات مستويات البيانات المتداخلة (overlapping). اما إذا كان نظام التسجيل به عدد محدود من الأقطاب الكهربائية، فقد يكون ترتيب pole-dipole بقياسات في الاتجاهين الأمامي والخلفي خياراً قابلاً للتطبيق. بالنسبة للمسوحات التي تحتوي على مسافات أقطاب كهربائية صغيرة وتغطية أفقية جيدة مثل الدراسات الزراعية، قد تكون ترتيب pole-pole هي الاختيار المناسب.

المصادر

- Adeoti, L., Afolabi, O. S., Ojo, A., & Ishola, S. K. 2017. Application of Three Electrical Resistivity Arrays to Evaluate Resolution Capacity of Fractured Zones at Apatara Farms, Iwo, Osun State, Nigeria. *Journal of Applied Sciences and Environmental Management*, 21(6), 1213-1221. <https://dx.doi.org/10.4314/jasem.v21i6.36>.
- Al-Heety, A.J. & Shanshal, Z.M., 2016. Integration of seismic refraction tomography and electrical resistivity tomography in engineering geophysics for soil characterization. *Arabian Journal of Geosciences*, 9(1), p.73. <https://doi.org/10.1007/s12517-015-2116-9>
- Al-Zubedi, A. S. 2016. Evaluation of Five Electrode Arrays in Imaging Subsurface Shallow Targets; A Case Study. *Iraqi Bulletin of Geology and Mining*, 12(2), 39-46.
- Cardarelli E. & Fishanger F. 2006. 2D data modelling by electrical resistivity tomography for complex subsurface geology. *Geophysical Prospecting* 54, 121–133.
- Cardarelli, E., Cercato, M., Cerreto, A., & Di Filippo, G. 2010. Electrical resistivity and seismic refraction tomography to detect buried cavities. *Geophysical Prospecting*, 58(4), 685-695. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2478.2009.00854.x>
- Cardarelli, E., Fischanger, F., & Piro, S. 2008. Integrated geophysical survey to detect buried structures for archaeological prospecting. A case-history at Sabine Necropolis (Rome, Italy). *Near Surface Geophysics*, 6(1), 15-20. <https://doi.org/10.3997/1873-0604.2007027>
- Chamberlain, A. T., Sellers, W., Proctor, C., & Coard, R. 2000. Cave detection in limestone using ground penetrating radar. *Journal of Archaeological Science*, 27(10), 957-964. <https://doi.org/10.1006/jasc.1999.0525>
- Chambers, J., Ogilvy, R., Meldrum, P., & Nissen, J. O. H. A. N. 1999. 3D resistivity imaging of buried oil-and tar-contaminated waste deposits. *European Journal of Environmental and Engineering Geophysics*, 4(1), 3-16.
- Dahlin, T. 1993. On the automation of 2D resistivity surveying for engineering and environmental applications. Lind University.
- Dahlin, T., & Zhou, B. 2004. A numerical comparison of 2D resistivity imaging with 10 electrode arrays. *Geophysical prospecting*, 52(5), 379-398. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2478.2004.00423.x>
- Dahlin, T. & Loke M.H. 1998. Resolution of 2D Wenner resistivity imaging as assessed by numerical modeling. *Journal of Applied Geophysics* 38, 237–249. [https://doi.org/10.1016/S0926-9851\(97\)00030-X](https://doi.org/10.1016/S0926-9851(97)00030-X).
- Ford, D., & Williams, P. D. 2013. *Karst hydrogeology and geomorphology*. John Wiley & Sons. <https://doi.org/10.1002/9781118684986> .
- Gardi, S.Q.S., Al-Heety, A.J. & Mawlood, R.Z., 2018. Engineering Site Investigation Using 2d Electrical Resistivity Tomography at The Siktan Proposed Dam Site at Erbil

Governorate, Iraqi Kurdistan Region. Journal of Duhok University, 20(1), 142-154
<https://doi.org/10.26682/sjuod.2018.20.1.13>.

Griffiths, D.H., & Barker, R.D., 1993, Two-dimensional resistivity imaging and modelling in areas of complex geology: Journal of Applied Geophysics, v. 29, p. 211–226. doi:10.1016/0926-9851(93).

Hartmann, A., Goldscheider, N., Wagener, T., Lange, J., & Weiler, M. 2014. Karst water resources in a changing world: Review of hydrological modeling approaches. Reviews of Geophysics, 52(3), 218-242. <https://doi.org/10.1002/2013RG000443>.

Hassan, A. A., Kadhim, E. H., & Ahmed, M. T. 2018. Performance of Various Electrical Resistivity Configurations for Detecting Buried Tunnels Using 2D Electrical Resistivity Tomography Modelling. Diyala Journal of Engineering Sciences (DJES), 11(3), 14-21.

Loke M. H. 2009. Tutorial: *2-D and 3-D electrical imaging surveys*. www.geoelectrical.com.

Loke, M.H. 2004. User's Manual for RES2DMOD and RES2DINV Software. Geotomo Software, pp: 128.

Loke, M. H., & Barker, R. D. 1996. Rapid least-squares inversion of apparent resistivity pseudosections by a quasi-Newton method. Geophysical prospecting, 44(1), 131-152. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2478.1996.tb00142.x>

Martínez Moreno, F. J. 2016. Detection & characterization of karstic caves: integration of geological and geophysical techniques. Ph.D. Thesis, Departamento de Geodinámica – Universidad de Granada Instituto Andaluz de Ciencias de la Tierra (CSIC-UGR). 284p.

Martinez-Lopez, J., Rey, J., Duenas, J., Hidalgo, C., & Benavente, J. 2013. Electrical Tomography Applied to The Detection Of Subsurface Cavities. Journal of Cave & Karst Studies, 75(1).

McDonald, R., & Davies, R. 2003. Detection of sinkholes using 2D electrical resistivity imaging. First Break, 21, 32-35.

McDowell, P. W., Barker, R. D., Butcher, A. P., Culshaw, M. G., Jackson, P. D., McCann, D. M., ... & Arthur, J. C. R. 2002. Geophysics in engineering investigations (Vol. 19). London: Ciria.

Reynolds J. 2011. An introduction to applied and environmental geophysics. 2nd ed, John Wiley and Sons, New York, USA, 796p.

Sasaki, Y. 1992. Resolution of Resistivity Tomography Inferred from Numerical Simulation. Geophysical prospecting, 40(4), 453-463. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2478.1992.tb00536.x>

Sissakian, V.K. & Al-Mousawi, H.A., 2007. Karstification and related problems, examples from Iraq. Iraqi Bulletin of Geology and Mining, 3(2), pp.1-12.

- Stevanović, Z. 2018. Global distribution and use of water from karst aquifers. Geological Society, London, Special Publications, 466(1), 217-236.
- Storez, H., Storz, W., & Jacobs, F. 2000. Electrical resistivity tomography to investigate geological structures of the earth's upper crust. Geophysical prospecting, 48(3), 455-472. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2478.2000.00196.x>
- Thabit, J. M., & Al-Zubedi, A. S. 2015. Evaluation of three important electrode arrays in defining the vertical and horizontal structures in 2D imaging surveys. Iraqi Journal of Science, 56(2B), 1465-1470.
- Varfinezhad, R., & Oskooi, B. 2020. 2D DC resistivity forward modeling based on the integral equation method and a comparison with the RES2DMOD results. Journal of the Earth and Space Physics, 45(4), 43-52. <https://doi.org/10.22059/jesp-hys.2019.260824.1007020>.
- Zhou, B., & Greenhalgh, S. A. 2001. Cross-hole resistivity tomography using different electrode configurations. Geophysical prospecting, 48(5), 887-912. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2478.2000.00220.x>