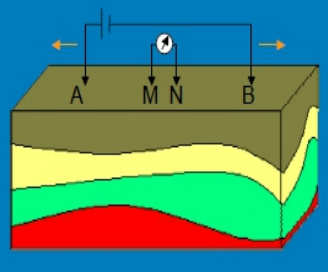
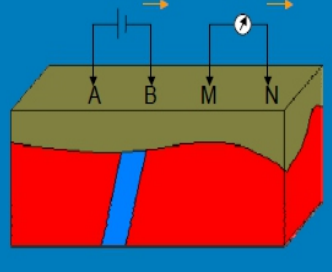
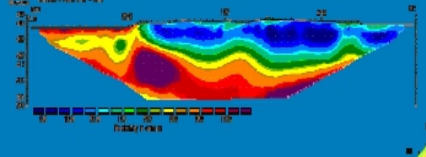
Electrical Resistivity Method Techniques

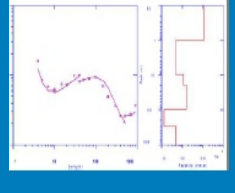
احمد سرداح كاظم الزبيدي , بكلوريوس في علوم الارض من كلية العلوم/جامعة بغداد, ماجستير ودكتوراه في الجيوفيزياء من الجامعة ذاتها, باحث وله العديد من البحوث المنشوره في مجلات علميه عالمية رصينه, له مشاركات في العديد من المؤتمرات العالمية والعربية والمحلية , مكتشف معادلة لحساب التشبع المائي للصخور الرملية بواسطة استخدام الموجات الطولية , صدر له كتاب عن دارالنشر الالمانية LAP بعنوان Principles of Electrical ResistivityTechniques يعمل حاليا رئيس جيولوجيين في الهيئة العامة للمياه الجوفية - وزارة الموارد المائية العراقية Ahmed.srdah@yahoo.com

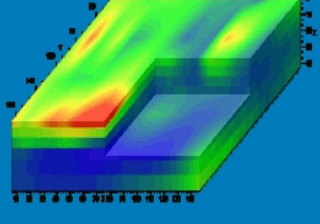
رقم الأيداع في دار الكتب والوثائق ببغداد ٣٢٥٨ لسنة ٢٠١٧











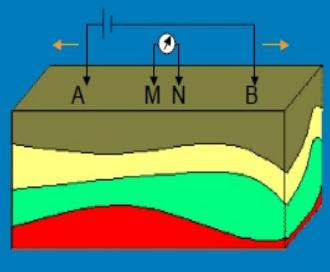
تقنيات طريقة المقاومة النوعية الكهربائية

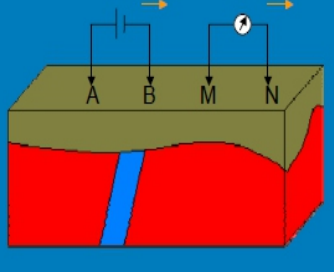
د.احمد سرداح كاظم الزبيدي

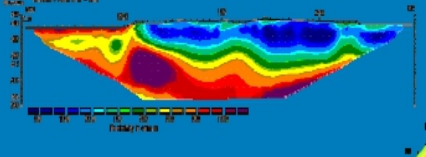
الطبعة الاولى ٢٠١٧

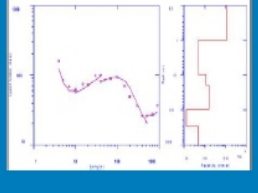
تقنيات
طريقة المقاومة النوعية الكهربائية

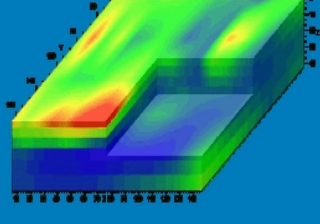
الدكتور
احمد سرداح كاظم الزبيدي











تقنيات طريقة المقاومة النوعية الكهربائية

تقنيات طريقة المقاومة النوعية الكهربائية

أعداد وتأليف

الدكتور

احمد سرداح كاظم الزبيدي

بغداد – 2017

مراجعة لغوية

الاستاذ الدكتور أمين ابراهيم اليأسي

هذا الكتاب وقف في سبيل الله ولا يجوز التربح بطبعة وبيعه

صورة الغلاف من شركة IRIS الفرنسية وبموافقتها الرسمية

تقنيات طريقة المقاومة النوعية الكهربائية

كتاب جيوفيزياء

الدكتور : احمد سرداح كاظم الزبيدي

الطبعة الاولى : 2017

عدد الصفحات : 125

الاخراج الفني : طالب جواد كاظم

آراء للطباعة والنشر والتوزيع

رقم الايداع في دار الكتب والوثائق بغداد (3258) لسـ 2017 ـنة

جميع الحقوق محفوظة للمؤلف

ولا يجوز الطبع والاستنساخ إلاّ بإذن من المؤلف

بسم الله الرحمن الرحيم

المقدمة

بعد صدور كتابي الاول Principles of Electrical Resistivity Techniques تلقيت من زملائي رسائل كثيرة ومناشدات عديدة لأعداد وتأليف كتاب مشابه باللغة العربية ، لأن المكتبة العربية تخلو من أي كتاب يتحدث عن مبادئ طريقة المقاومة النوعية وتقنياتها ، خصوصا الحديثة منها . في البداية ترددت كثيرا ، وذلك لان معظم المصطلحات المستخدمة في وصف واستخدام هذه التقنيات غير متفق عليها من ناحية الترجمة الدقيقة بين المختصين ، حتى اننا نلاحظ استعمال مفردات مختلفة من قبل اساتذتنا وزملائنا لوصف مصطلح معين ، كما ان البعض يفضل تعريب المصطلحات من اللغة الانكليزية الى اللغة العربية لكونه لا يعرف الكلمات المناسبة لها ، ولكن بعد التوكل على الله شرعت بتأليف وأعداد هذا الكتاب معتمدا على قدراتي الخاصة في ايجاد الترجمة الدقيقة للمصطلحات المستخدمة، باحثا في جميع مصادر المعرفة من كتب وبحوث ومواقع إلكترونية ومستنجدا ببعض الزملاء ممن اكمل دراسته خارج العراق ... فالحمد لله الذي وفقني لهذا .

لذا، يشرفني ويسعدني ان اضع بين ايدي اساتذتي وزملائي هذا الكتاب، راجيا ان يكون عونا لهم في مسيرتهم العلمية، وان لا يكون بديلا عن المصادر المتوفرة باللغة الانكليزية، وانما مكملا لها. لقد تضمن هذا الكتاب في فصلة الاول المبادئ الاساسية لطريقة المقاومة النوعية واهم الترتيبات الكهربائية المستخدمة في تنفيذ مسوحاتها، كما ناقش بإيجاز عمق التحري ودالة الحساسية التي لم توضح سابقا في أي منشور باللغة العربية. اما الفصل الثاني منه، فقد تضمن شرحا وافيا عن التقنيات المستخدمة في المسوحات احادية البعد واساليب تنفيذها ومعالجة نتائجها وتفسيرها. بينما احتوى الفصل الثالث التقنيات الحديثة بأسلوب بسيط وواف ، حيث تم التطرق الى تقنيات التصوير ثنائي وثلاثي ورباعي الابعاد واساليب تنفيذ مسوحاتها ، وطرق معالجة بياناتها ، واهم البرامج المستخدمة في ذلك ، والطرق الرياضية المستخدمة في الحصول على الموديل المعكوس وطرق تفسيره. اما المصادر، التي احتلت الجزء الاخير من هذا الكتاب ، فقد فضلت كتابتها جميعا باللغة الانكليزية لوجود مصدرين فقط باللغة العربية.

لقد تعمدت في جميع فصول هذا الكتاب على عدم ذكر بعض المفاهيم البسيطة وتركت المجال للقارئ لكي يستنتجها من بين السطور ، لكي لا يتعود الحصول على المعلومة الجاهزة دائما ، وانما يساعد نفسة في البحث عنها والحصول عليها.

اساتذتي زملائي ... ان هذا الكتاب لا يمثل جهدي الشخصي فقط ، وانما هو حصيلة جهود زملائي واساتذتي وكل انسان ساعدني في الحصول على المعلومة الدقيقة خلال السنوات الماضية. لذا يجب ان لا انسى بعد فضل الله وتوفيقه فضل استاذي واخي الدكتور جاسم محمد ثابت، الذي زرع في نفسي حب هذا الاختصاص وامدني بالمصادر والمعلومات الدقيقة طيلة السنوات الماضية والى الان ، و من خلال اشرفه على دراستي لنيل شهادتي الماجستير والدكتوراه ، هذا الرجل الذي اعجز عن شكره مدى الحياة .

احمد

2017/6/30

هذا الكتاب

وقفه في سبيل الله ، عني وعن روح والدي وروح والدتي وارواح اشقائي حامد ومحمد وشقيقاتي وزوجتي واولادي واقربائي واساتذي الدكتور جاسم محمد ثابت..... وجميع اساتذتي وزملائي واصدقائي ... السالكين طريق الحق .....والساعين في طرق الخير... المدافعين عن الإنسانية كائنا من يكون حاملها ... واموات المسلمين والمسلمات .

اللهم اسألك باسمك الاعظم وكل اسم سميت به نفسك .... ان تتقبل منا هذا العمل البسيط وتجعله في ميزان حسناتنا يوم العرض عليك .... لأنك الهي ومولاي قد اخبرتنا عن طريق رسولك الكريم محمد صلواتك وسلامك عليه وعلى اله .... وهو الذي لا ينطق عن الهوى وانما وحي يوحى .....

اذا مات ابن ادم انقطع عمله الا من ثلاث ...صدقة جارية او علم ينتفع به او ولد صالح يدعوا له ....

اللهم تقبله منا عملا صالحا وعلم ينتفع به خالصا لوجهك الكريم .... انك سميع مجيب .

الفهرس

رقم الفقرة	العنوان	الصفحة
	الفصل الاول ـ المبادئ الاساسية	
	المقدمة.....	1
1-1	المبادئ الاساسية	2
1-2	الخواص الكهربائية للصخور والترسبات.....	7
1-3	ترتيبات الاقطاب الكهربائية.....	8
	1-3-1 ترتيب شلمبرجر.....	9
	1-3-2 ترتيب فنر.....	10
	1-3-3 ترتيب ثنائي القطب – ثنائي القطب.....	11
	1-3-4 ترتيب قطب – قطب.....	13
	1-3-5 ترتيب قطب – ثنائي القطب.....	14
	1-3-6 ترتيب المربع.....	15
	1-3-7 ترتيب فنر – شلمبرجر.....	16
	1-3-8 ترتيب المتدرج.....	17
1-4	دالة الحساسية وعمق التحري.....	18
1-5	العوامل المؤثرة على عمق التحري.....	25
1-6	الاجهزة الحقلية.....	25
	الفصل الثاني – تقنيات المسح الكهربائي احادي البعد	
	المقدمة	29
2-1	تقنية المسارات ذات الفاصلة الثابتة (CST).....	30
2-2	تقنية الجس الكهربائي العمودي (VES).....	32
	2-2-1 المنحنيات الحقلية لترتيب شلمبرجر.....	33
	2-2-2 معالجة بيانات الجس الكهربائي العمودي (VES).....	38
	2-2-3 تفسير بيانات الجس الكهربائي العمودي (VES).....	42
	2-2-3-1 طريقة التفسير النوعي.....	42
	2-2-3-2 طريقة التفسير الكمي.....	45

رقم الفقرة	العنوان	الصفحة
2-2-3-2-1	التفسير اليدوي.....	46
2-2-3-2-2	التفسير بواسطة البرامج الحاسوبية.....	55
2-2-3-4	الغموض المكتنف في طريقة المقاومة النوعية الكهربائية.....	57
2-2-3-5	عرض نتائج التفسير الكمي.....	59
2-2-3-6	المعاملات الجيوكهربائية.....	61
2-3	مسح المقاومة النوعية الزاوي احادي البعد.....	64
2-4	تقنية المقاطع الزائفة.....	68
	الفصل الثالث – المسح الكهربائي التصويري	
	المقدمة	72
3-1	تقنية تصوير المقاومة النوعية ثنائي الابعاد.....	73
3-1-2	تصميم متسلسلات التصوير ثنائي الابعاد.....	75
3-1-3	معالجة البيانات.....	77
3-1-4	تفسير البيانات.....	78
3-1-5	المسح التصويري الزاوي ثنائي البعد للمقاومة النوعية.....	82
3-1-6	المسح التصويري المتقاطع داخل الابار.....	84
3-2	تقنية التصوير ثلاثي الابعاد للمقاومة النوعية.....	86
3-2-1	تفسير بيانات التصوير ثلاثي الابعاد.....	92
3-3	تقنية الفواصل - الزمنية وتقنية المسح رباعي الابعاد.....	95
	المصادر.....	98

الفصل الاول

المبادئ الاساسية

المقدمة

علم الجيوفيزياء هو العلم الذي يهتم بدراسة الارض اعتمادا على الخواص الفزيائية لمكوناتها ، مثل التوصيلية الكهربائية Electrical Conductivity معكوسها المقاومة النوعية (Resistivity) ، الممانعة الصوتية Impedance Acoustic ،الكثافة Density ، التمغنط Magnetization ، النشاط الاشعاعي Radioactivity ، او أية صفة اخرى قابلة للقياس يمكن من خلالها تحديد نوع و مكونات الصخور او الترسبات. يتم قياس هذه الخواص بواسطة العديد من الطرق الجيوفيزيائية ، مثل الطريقة الكهربائية ، الطريقة الزلزالية ، الطريقة الجذبية (التثاقلية) ، الطريقة المغناطسية و طريقة النشاط الاشعاعي، اضافة الى طرق اخرى ناتجة من دمج طريقتين مع بعضهما البعض مثل الطريقة الكهرومغناطيسية Electromagnetic Method التي تعتمد على قياس المجالات الكهرومغناطيسية المتولدة نتيجة مرور تيار كهربائي الى داخل الارض. يتضمن البعض من هذه الطرق مجموعة من الطرق التي تستخدم في قياس نفس الخاصية الفزيائية ولكن بأساليب مختلفة ، فالطريقة الكهربائية التي تعتمد على قياس التوصيلة الكهربائية تتضمن مثلا طريقة المقاومة النوعية Resistivity Method ، طريقة الجهد الذاتي Self- Potential Method و طريقة الاستقطاب المحتث Induced Polarization Method .

تعتبر طريقة المقاومة النوعية واحده من اهم واقدم الطرق الكهربائية والتي تستخدم في التحري عن المعادن ، المياه الجوفية ، الاثار والمشاكل الهندسية والبيئية . حيث تشير المعلومات التاريخية بان هذه الطريقة استخدمت لأول مرة في السويد عام 1906 (Dahlin, 2001)، ثم استخدمت من قبل شلمبرجر عام 1912 وهو نفس الوقت الذي اجرى فيه فنر تجاربه بهذه الطريقة في الولايات المتحدة الامريكية .

بدء الاستخدام التجاري لهذه الطريقة سنة 1920 بواسطة المسوحات احادية البعد One-Dimensional (1D) من خلال استخدام تقنية الجس الكهربائي العمودي Vertical Electrical Sounding (VES) وتقنية المقاطع الافقية Horizontal Profiling (HP) او ما يعرف بالمسارات ذات الفاصلة الثابتة Constant Separation Traverse (CST) . في عام 1957 ابتكر Hallof تقنية جديدة سميت بتقنية المقاطع الزائفة Pseudosections Technique وهي ناتجة عن دمج التقنيتين السابقتين معا . وفي نهاية عقد الثمانينيات من القرن المنصرم ، ونتيجة التقدم الحاصل في اجهزه العمل الحقلي وبرامج الحاسبة الالكترونية ، ظهرت في بداية عقد التسعينيات تقنيات تصوير المقاومة النوعية ثنائية و ثلاثـــــية الابعـاد 2D and 3D Resistivity Imaging Techniques ، واستمر التطور في تقنيات هذه الطريقة لتظهر تقنية تصوير المقاومة النوعية رباعية الابعاد 4D Resistivity Imaging Technique في بداية هذا القرن . المبادئ الاساسية لهذه الطريقة وتطبيقاتها سيتم مناقشتها في هذا الفصل.

1-1 المبادئ الاساسية

تسند طريقة المقاومة النوعية Resistivity Method في اساسها النظري على قانون (اوم Ohm's Law) ، الذي ينص على ان التيار (I) المار خلال سلك معدني سوف يتعرض الى مقاومة (Resistance) يرمز لها بالرمز (R) ناتجه عن ممانعة السلك لمرور هذا التيار ، والتي يمكن حسابها بوحدة قياس تسمى اوم (Ohm)، ووفق المعادلة التالية :-

$$R = \frac{\Delta V}{I} \qquad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (1)$$

حيث تمثل (ΔV) مقدار فرق الجهد المقاس عند نقطتين على السلك.

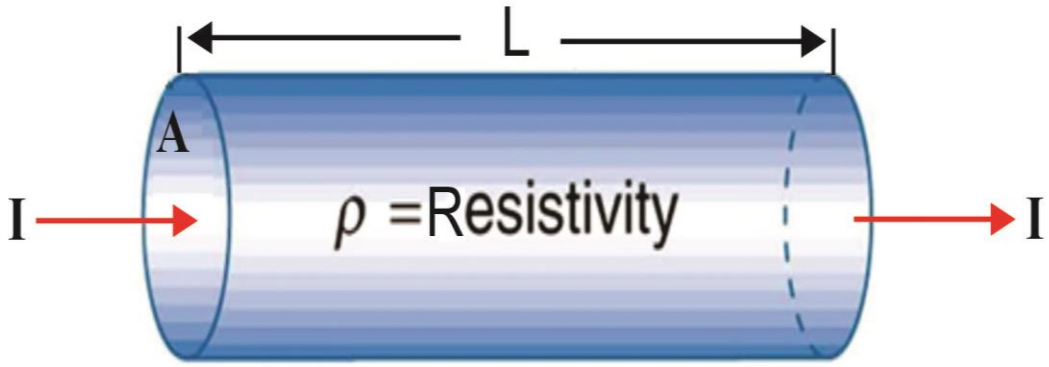
واذا استبدلنا السلك بأسطوانة معدنية طولها (L) ومساحة مقطعها العرضي (A) كما في الشكل (1-1)، فيمكن اعادة كتابة هذه المعادلة بالصيغة التالية

$$R = \frac{\rho L}{A} \qquad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (2)$$

او

$$\rho = \frac{\Delta V A}{I L}$$

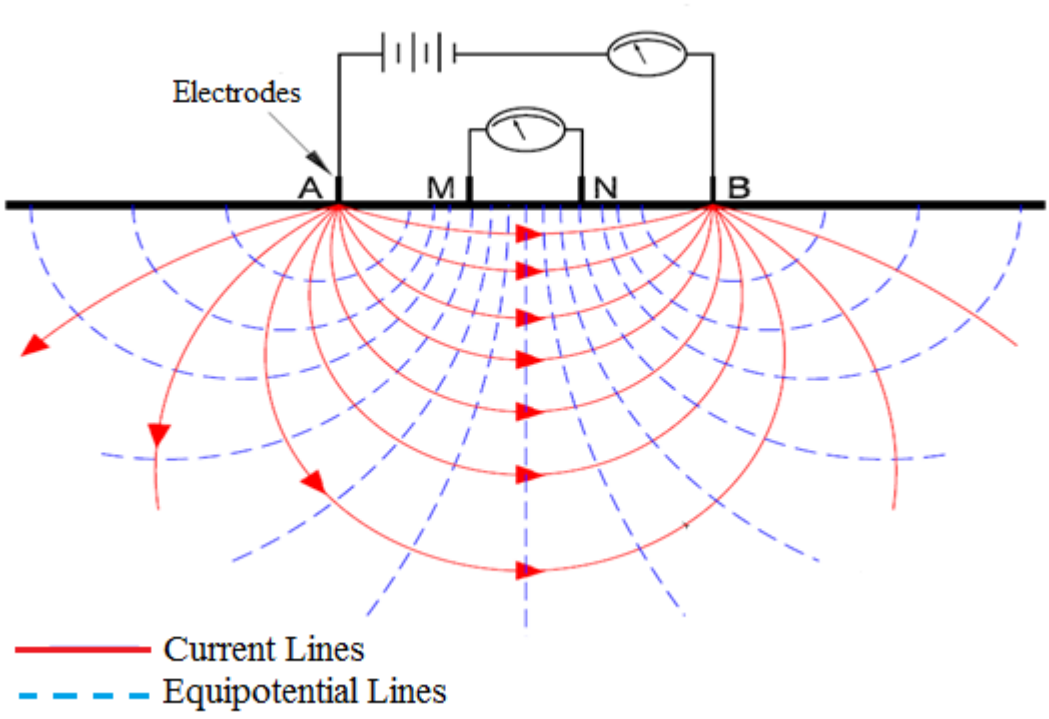
حيث ان ρ هي قيمة المقاومة النوعية (Resistivity) للأسطوانة ووحده قياسها هي اوم. متر (Ohm.m)، وتكتب ايضا بالصيغة التالية $\Omega.m$، ويمكن حسابها لجميع المواد في الطبيعية في حالة معرفة طول ومساحة المقطع العرضي للمادة المراد قياس مقاومتها النوعية.



شكل (1-1) :- يوضح تعريف المقاومة النوعية .

حاول العلماء الاستفادة من هذا القانون وهذه المعادلة لمعرفة قيم المقاومة النوعية لطبقات الارض من خلال تطبيق هذه التجربة ، وذلك بأرسال تيار كهربائي الى داخل الارض من خلال قطبين (قضيبين

من معدن موصل للكهرباء) اطلق عليهما اسم A وB ، و قياس فرق الجهد الناتج عن مروره داخل الارض بواسطة قطبين اخرين اطلق عليهما M وN . في هذه التجربة سوف ينتشر التيار داخل الارض على شكل انصاف اقطار دائرية تسمى Current Lines ، اذا كان الوسط الذي يمر فيه التيار متجانسا (Homogeneous)، اي متكون من مادة واحده لها نفس الخواص الكهربائية ، ومتماثل (Isotropic)، اي متساوي الخواص في جميع الاتجاهات. في الحقيقة ان خطوط انتشار التيار الكهربائي تولد خطوط اخرى تسمى خطوط تساوي الجهد Equipotential Lines ، تكون عمودية على هذه الخطوط ، وكما يوضح شكل (2-1)، وبالتالي فأن اي تغير في الخواص الكهربائية للوسط الذي يمر به التيار سوف يؤدي الى تغير في خطوط انتشار التيار وهذا بدوره يؤدي الى تشوه خطوط تساوي الجهد التي هي بالأساس عمودية على خطوط انتشار التيار. لذلك نحن نقيس مقدار التشوه هذا ، والذي يسمى فرق الجهد Potential Difference (ΔV)،والناتج عن مرور التيار الكهربائي داخل الارض. ولحساب قيمة المقاومة النوعية في هذه التجربة نجري الخطوات التالية بالاعتماد على قانون اوم (Ohm's Law) ، وكما ورد في Keller and Frischknecht, (1966) ، Bhattacharya and patra, (1968) وZohdy, (1974) :-



شكل (2-1) :- يوضح توزيع خطوط تساوي الجهد وخطوط تدفق التيار،(NGA, 2000) .

اولا"- بالاعتماد على قانون اوم (Ohm's Law) نحسب فرق الجهد Potential Difference (ΔV) من المعادلة وكما يلي :-

$$I = \frac{\Delta V A}{\boldsymbol{\rho} L} \qquad \text{.....(3)}$$

ولان التيار المار داخل الارض يكون غير منتظم في اغلب الاحيان ، لذلك نستبدل قيمة التيار (I) بكثافة التيار Current Density والذي يرمز له (J) والذي هو مقدار التيار على وحدة المساحة (A)، لتصبح المعادلة (3) كالآتي :-

$$J = \frac{\Delta V}{\boldsymbol{\rho} L} \qquad \text{.....(4)}$$

بما ان التيار الكهربائي ينتشر داخل الارض عبر سطح نصف كروي ، لذا فان كثافة التيار يمكن حسابها وفق المعادلة التالية:-

$$J = \frac{I}{(2\pi r^2)} \qquad \text{.....(5)}$$

وبما ان (L) هو المسافة بين قطب التيار الى قطب الجهد المراد قياس الجهد عنده يمكن تسميته بحرف (r) ، وبتعويض المعادلة (5) بالمعادلة (4) واعادة ترتيبها ، سنحصل على المعادلة التالية :-

$$\frac{I}{(2\pi r^2)} = \frac{\Delta V}{\rho r}$$

$$\Delta V = -\frac{\boldsymbol{\rho} I}{(2\pi r^2)} \boldsymbol{r} \qquad \text{.....(6)}$$

الاشارة السالبة تعني بان الجهد يزداد باتجاه معاكس لاتجاه سريان التيار الكهربائي. ولحساب الجهد عند القطب (M) الذي يبعد مسافة مقدارها (r) عن قطب التيار (A) يجب ان نكامل المعادلة (6)، وكما يلي:-

$$\int dV = -\int_{\infty}^{M} \frac{\boldsymbol{\rho}\, I}{(2\pi r^2)}\, dr$$

لتكون النتيجة المعادلة التالية :-

$$V^{A}_{M} = \frac{\boldsymbol{\rho}\, I}{2\pi r} \qquad \text{.....(7)}$$

يمكن استبدال الرمز (r) بالرمز (AM) لتوضيح اننا نقيس الجهد عند القطب (M) الناتج بفعل مرور التيار من القطب (A) وكذلك لبقية المسافات .

$$V^{A}_{M} = \frac{\boldsymbol{\rho}\, I}{2\pi\, AM} \qquad \text{.....(8)}$$

لتسهيل المعادلة نقوم بإخراج قيمة المسافة (AM) من المقام لتصبح المعادلة كالتالي :

$$V^{A}_{M} = \frac{\boldsymbol{\rho}\, I}{2\pi}\left(\frac{1}{AM}\right) \qquad \text{.....(9)}$$

ولحساب الجهد عند القطب (M) الناتج من وجود قطب التيار (B) لاحظ الشكل (2-1) ،سوف تكون المعادلة كالاتي :-

$$V^{B}_{M} = \frac{\boldsymbol{\rho}\, I}{2\pi}\left(\frac{1}{BM}\right) \qquad \text{.....(10)}$$

وبمان التيار الكهربائي هو متساوي في المقدار ومتعاكس بالاتجاه عند قطب الجهد (M) ، لذلك فان الجهد عند القطب (M) والناتج عن تأثير قطبي التيار A و B سيكون كما في المعادلة التالية :-

$$V^{AB}_{M} = V^{A}_{M} + V^{B}_{M} \qquad \text{.....(11)}$$

وبتعويض المعادلتين (9) و(10) في المعادلة (11) سيكون الجهد عند قطب الجهد (M) والناتج عن تأثير قطبي التيار A و B كما في المعادلة التالية :-

$$V^{AB}_{M} = \frac{\boldsymbol{\rho}\, I}{2\pi}\left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM}\right) \qquad \text{.....(12)}$$

وكذلك بالنسبة لحساب الجهد عند القطب (N) والناتج عن تأثير قطبي التيار A و B كما في المعادلة التالية :-

$$V^{AB}_{N} = V^{A}_{N} - V^{B}_{N} \qquad \text{.....(13)}$$

وبالتعويض تكون المعادلة كالاتي :-

$$V^{AB}_{N} = \frac{\boldsymbol{\rho}\, I}{2\pi}\left(\frac{1}{AN} - \frac{1}{BN}\right) \qquad \text{.....(14)}$$

ثانيا":- لحساب فرق الجهد (ΔV) عند قطبي الجهد M و N ، والناتج عن مرور التيار الكهربائي من قطب التيار (A) الى قطب التيار (B) كما في الشكل (2-1) سوف نستخدم المعادلة التالية :-

$$\Delta V = V^{AB}_{M} - V^{AB}_{N} = \frac{\rho I}{2\pi}\left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{BN}\right) \quad ....(15)$$

ومن المعادلة اعلاه (15) ، نحسب قيمة المقاومة النوعية (ρ) كالاتي :-

$$\rho = \frac{2\pi}{\left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{BN}\right)} \frac{\Delta V}{I} \quad .....(16)$$

ان المقدار $\left(\frac{2\pi}{\left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{BN}\right)}\right)$ يسمى العامل الهندسي Geometric Factor لترتيب الاقطاب الكهربائية ،ويرمز له بالرمز (K) وهو يختلف من ترتيب الى اخر اعتمادا على عدد الاقطاب المستخدمة في القياس والمسافات الفاصلة بينها، وكذلك حسب اتجاهات الاقطاب بالنسبة لبعضها البعض. وبما ان المقاومة حسب قانون اوم هي $(R=\frac{\Delta V}{I})$ ، لذا فان المعادلة النهاية لحساب المقاومة النوعية لطبقات الارض ستكون بالصيغة التالية :-

$$\rho = K R \quad .....(17)$$

تدعى هذه القيمة (ρ) بالمقاومة النوعية الحقيقة True Resistivity لأنها حسبت واشتقت بافتراض ان التيار الكهربائي ينتشر عبر سطح نصف كروي ، وان المواد او الطبقات الارضية متجانسة Homogeneous ومتساوية الخواص في جميع الاتجاهات Isotropic ، وهذا نادر جدا في الطبيعة ، لذا يتم استعمال مصطلح المقاومة النوعية الظاهرية لهذه القيمة Apparent Resistivity ويرمز لها بالرمز (ρ_a) ، وبهذا ستكتب المعادلة (17) بالصيغة التالية :-

$$\rho_a = K R \quad .....(18)$$

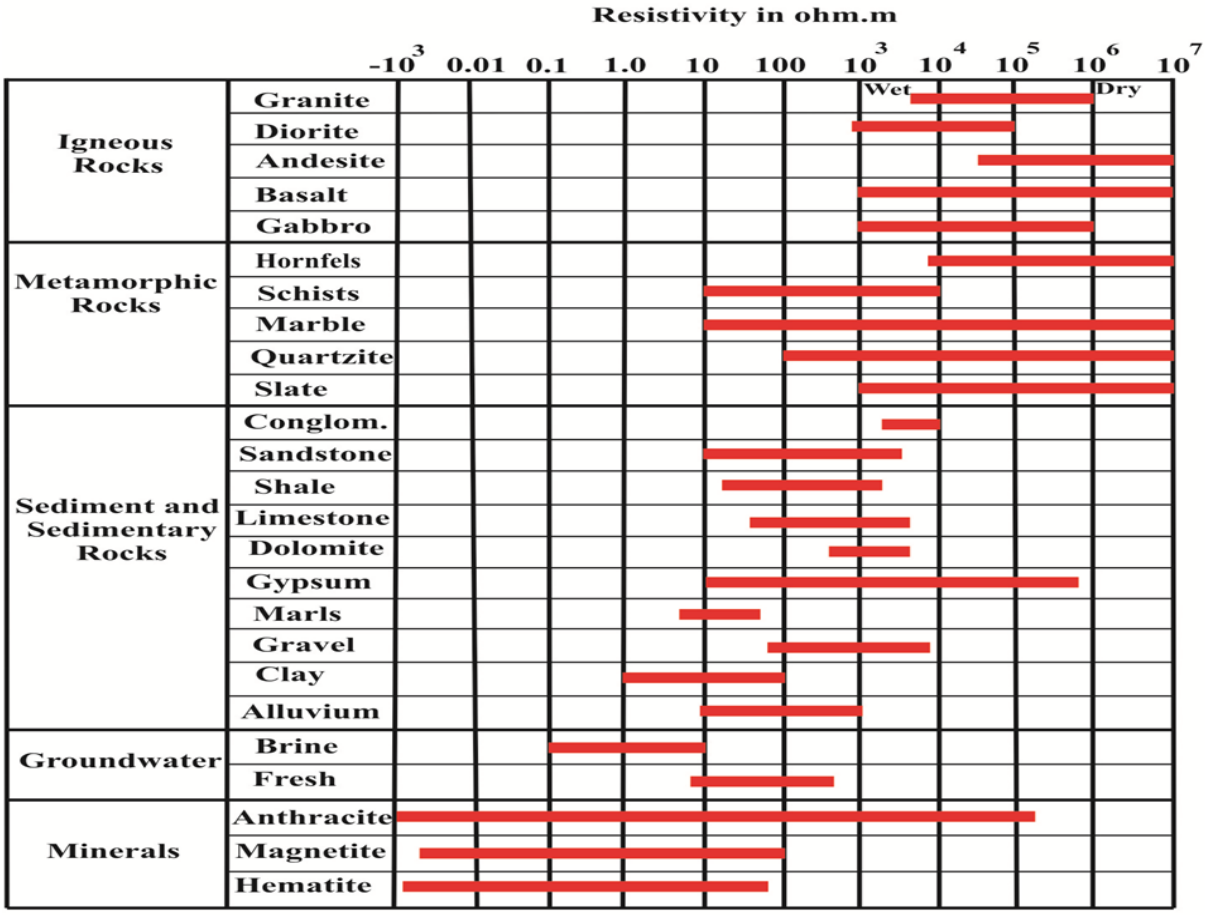
ان قيمة المقاومة النوعية الظاهرية (ρ_a) هي دالة للعديد من الخصائص الفزيائية والكيميائية للصخور والمعادن تحت السطحية مثل:- المسامية ،النفاذية ، درجة التشبع المائي وخواص التماثل isotropic للطبقات الصخرية ، بالإضافة الى العديد من الخصائص او الخواص الاخرى، كما ورد في Keller and Frischknecht (1966)، Bhattacharya and patra (1968) و Zohdy (1974).

1-2 الخواص الكهربائية للصخور والترسبات

Electrical Conductivity of Rocks and Deposits

يعد التوصيل الكهربائي Electrical Conductivity الخاصية الكهربائية المميزة لمعظم الصخور والترسبات ، والذي هو مقلوب المقاومة النوعية ويرمز له بالرمز (**σ**)، ويقاس بوحدة (Mho/m) ويمكن تمييز نوعين من التوصيل الكهربائي داخل الارض ، الأول يحدث نتيجة حركة الايونات خلال الفلز ويدعى بالتوصيل الفلزي Metallic Conductivity ، أما النوع الثاني فيحدث نتيجة حركة الايونات خلال المحاليل التي تملا مسامات الصخور والترسبات ، ويدعى بالتوصيل الالكتروليتي Electrolytic Conductivity ويكون شائعاً في معظم الصخور الرسوبية المشبعة بالمحاليل لان كثير من حبيبات المعادن تكون عازلة ، كما إنها تكون مترابطة مع بعضها بدرجات مختلفة تاركة فيما بينها مسامات pores مختلفة في الحجم وتكون مملؤة كليا او جزئيا بالماء ، ولذلك يكون التوصيل عن طريق المياه المحصورة بين وداخل هذه المسامات او الفراغات ، (Keller and Frishchknecht,1966). لذا ، ففي المناطق التي يكون فيها مستوى المياه الجوفية Water Table عميق جدا يكون التوصيل الكهربائي بواسطة التوصيل الفلزي فقط ، (Zohdy et al, 1974).

تعتمد المقاومة النوعية على الخواص الفيزيائية للصخور والترسبات ، وعلى نوعية المحاليل وتراكيزها ودرجة حرارتها ، وعلى المسامية والكسور ودرجة تشبع الصخرة بالمحلول وحجم حبيبات المادة وتوزيعها ، والضغط ، واحكام المادة (تراصها)، لذلك تتميز الصخور الرسوبية بقيم مقاومة قليلة مقارنة بالصخور المتحولة والنارية ، وهي بشكل عام تتراوح بين (1-10000 Ω.m). اما المقاومة النوعية للمياه الجوفية فتتراوح بين (10-100 Ω.m) ، حسب كمية الاملاح الذائبة التي تحتويها (Zohdy et al, 1974; Lowrie 2007; Loke, 2012). الشكل التالي (3-1) يوضح المدى لقيم المقاومة النوعية للصخور والترسبات وبعض الخامات المعدنية والمياه.



شكل (3-1):- مديات المقاومة النوعية الكهربائية للصخور والمعادن وبعض الخامات والمياه مطور من (Loke, 2012).

1-3 ترتيبات الاقطاب الكهربائية Electrodes Arrays

هنالك اكثر من (90) ترتيبا كهربائيا يستعمل لقياس المقاومة النوعية، (Szalai and Szarka, 2008)، وتختلف هذه الترتيبات عن بعضها البعض، نتيجة الاختلاف في مواقع الاقطاب ، أي مواقع قطبي الجهد M و N نسبة الى موقع قطبي التيار A و B ، بمعنى ان الترتيبات تصنف الى انواع اعتمادا على مواقع الاقطاب فيها. رغم هذا العدد الكبير من الترتيبات، الا ان الذي يستخدم منها في المسوحات الكهربائية لا يتجاوز عدد اصابع اليدين. وهذه الترتيبات هي:- شلمبرجر Schlumberger، فنر Wenner ، ثنائي القطب - ثنائي القطب Dipole – dipole، قطب – قطب Pole-pole، قطب - ثنائي القطب Pole-dipole، المربع Square، اوفست فنر Offset Wenner ، فنر- شلمبرجر Wenner-Schlumberger و المتدرج Gradient.

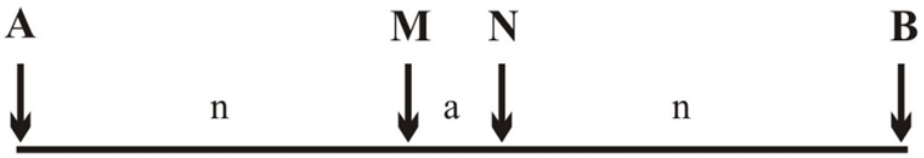
ان اختيار الترتيب الملائم لعملية المسح الكهربائي وقياس المقاومة النوعية يعتمد على العديد من العوامل مثل، العمق المراد الوصول اليه ، دالة الحساسية للترتيب والتي ترتبط بنوع الهدف المراد دراسته او استكشافه، التغطية العمودية والافقية ودقة القياسات للترتيب . بالإضافة الى ، مدى حساسية

الجهاز المستخدم ومستوى الضوضاء في المنطقة المراد دراستها (Roy, and Apparao, 1971) و (Loke, 2012) . وفي ادناه سنحاول شرح معظم الترتيبات التي ذكرت .

1-3-1 ترتيب شلمبرجر Schlumberger Array :-

اول من استخدم هذا الترتيب هو كونراد شلمبرجر عام 1912، ويعتبر الترتيب الاكثر استخداما في المسوحات الكهربائية خصوصا احادية البعد 1D Resistivity Surveys ، من خلال قياس التغيرات العمودية في قيم المقاومة النوعية الكهربائية تحت نقطة القياس (Kunetz 1966).

يستعمل في هذا الترتيب اربعة اقطاب متناظرة ، وموضوعة على خط مستقيم فوق سطح الارض . القطبان (A,B) للتيار ، والقطبان (M,N) لقياس فرق الجهد، وتسمى المسافة بين قطبي الجهد (a) والمسافة بين قطب التيار واقرب قطب للجهد (n)، وكما في الشكل (4-1) .



شكل (4-1):- يوضح ترتيب شلمبرجر للأقطاب، (Al-Zubedi, 2015b).

تتم القياسات بهذا الترتيب من خلال اخذ قراءات متتابعة بزيادة المسافة بين قطبي التيار وثبوت قطبي الجهد لعدة قياسات، إلى أن يصبح فرق الجهد بين القطبين (M) و(N) صغيرا لا يمكن قياسه ، عندئذ يتم زيادة المسافة بين قطبي الجهد، (Bhattacharya and Parta,1968)، وتكون المسافة بين (B،A) دائما اكبر من المسافة بين (N،M) ، وقد وجد عمليا، انه يجب تكون المسافة بين قطبي التيار اكبر من المسافة بين قطبي الجهد وكما في النسبة ($1/20 \leq MN/AB \leq 1/5$)، للحصول على نتائج دقيقة للمقاومة النوعية ،(Zohdy,1974). في حين ذكر (AL-Ane,1998) ان النسبة يجب ان تكون ($1/12 \leq MN/AB \leq 1/5$) ، لكن (Al-Zubedi ,2009) اوجد نسبة اخرى سيتم التطرق لها في موضوع قادم منعا للتكرار.

يتميز هذا الترتيب بالحساسية العالية للتغيرات العمودية تحت السطحية ، بينما يكون ضعيف الحساسية للتغيرات الافقية، وتحسب قيمة المقاومة النوعية لهذا الترتيب بواسطة المعادلة التالية :-

$$\rho_a = K R \qquad \text{.....(19)}$$

توجد معادلتان لحساب العامل الهندسي (k) لهذا الترتيب، الاولى تسمى المعادلة التطبيقية Practical Equation وهي الاكثر استخداما في حساب قيم المقاومة النوعية الظاهرية ، وتحسب كما يلي :-

$$K_{pr} = \pi\left[\frac{(AB\backslash 2)2}{MN - MN/4}\right] \qquad \text{.....(20)}$$

اما الثانية فتسمى بالمعادلة النظرية Theoretical Equation وهي تشتق بافتراض ان المسافة بين قطبي الجهد (MN) تكون صغيره جدا او تساوي صفر ، ويصعب الحصول على هذا الأمر في الواقع، لذا لا تؤخذ هذه المعادلة في الاعتبار من الناحية العملية ، (AL-Ane,1998).

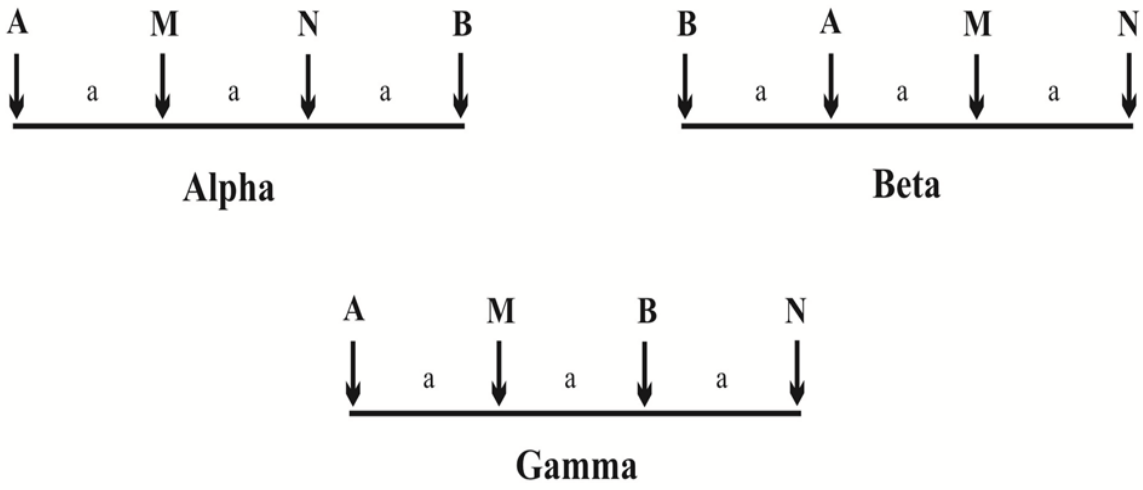
1-3-2 ترتيب فنر Wenner Array:-

في هذا الترتيب تكون المسافات بين الاقطاب متساوية وواقعة على خط مستقيم ، بحيث تكون المسافة بين قطبي الجهد (N،M) والتي تسمى (a) تساوي (AB 1/3). تحسب قيمة المقاومة النوعية لهذا الترتيب بواسطة المعادلة التالية (Keller and Frischknecht, 1966; Kunetz, 1966; Zohdy, 1974):-

$$\rho_a = 2\pi a R \qquad \text{.....(21)}$$

$$K=2\pi a$$

يتميز هذا الترتيب بحساسيته العالية تجاه التغيرات الافقية تحت السطحية خصوصا قرب سطح الارض، وبحساسيته الضعيفة تجاه التغيرات العمودية ، كما يتميز هذا الترتيب بقوة اشارة عالية لكون المسافات بين الاقطاب متساوية ، لذا يفضل استخدام هذا الترتيب في المناطق التي يكون فيها مستوى الضوضاء عال جدا او استخدامه في حالة كون الأجهزة المستخدمة ذات حساسية قليلة (Zohdy, 1974) و (Loke, 2012). ان اولى المسوحات الكهربائية ثنائية البعد اجريت بهذا الترتيب، وذلك لسهولة استخدامه مقارنة بالترتيبات الاخرى (Loke, 1999) . كما يتميز هذا الترتيب بوجود ثلاثة انواع لنشر الاقطاب وهي:- فنر الفا (α) ، فنر بيتا (β) وفنر كاما (γ) ، ويعتبر نوع الفا (α) وهو الاكثر استعمالا (Carpenter and Habberjam, 1956). الشكل التالي يوضح الانواع المختلفة للترتيب .

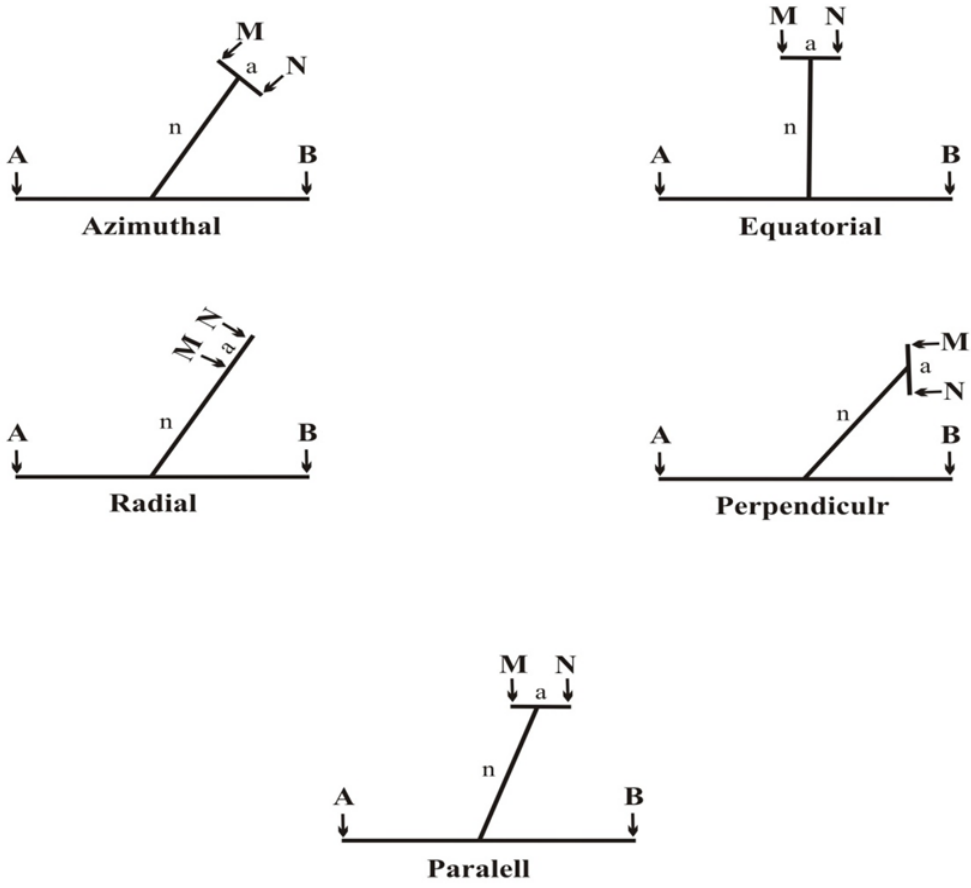


شكل (5-1):- يوضح الانواع المختلفة من ترتيب فنر، مطور عن (Loke, 2012).

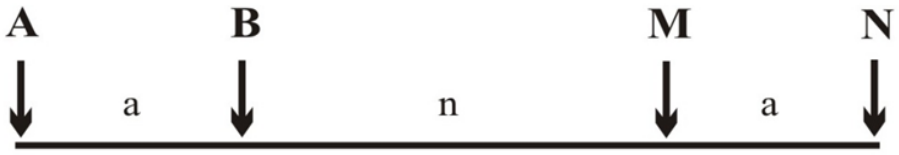
1-3-3 ترتيب ثنائي القطب – ثنائي القطب Dipole – dipole Array :-

هنالك انواع مختلفة من هذا الترتيب ، صنفت على اساس مواقع الاقطاب نسبة الى بعضها البعض والزوايا الواقعة بين محور المسافة (N،M) والتي تسمى (a) ومحور المسافة (B،A)، وهذه الانواع هي :- الاستوائي Equatorial ، الزاوي Azimuthal ، المتوازي Parallel ، العمودي Perpendicular ، الشعاعي Radial و القطبي او المحوري Polar، (AL-pine, 1950)، (Kunetz,1966) و (Keller and Frischknecht, 1966)، وكما في الشكل (6-1).

يعتبر النوع المحوري او القطبي من اكثر الانواع استخداما، وخصوصا في المسوحات الكهربائية ثنائية البعد ، وذلك لسهولة الاستعمال لكون الاقطاب تقع على خط واحد، حيث يكون قطبا التيار متجاورين وبينهما مسافة مساوية للمسافة بين قطبي الجهد اللذان يكونا ايضا متجاوران ، وكما في الشكل (7-1). تكون المسافة بين قطب التيار واقرب قطب للجهد والتي تسمى (n) هي المسيطرة على عمق التحري لهذا النوع ولجميع الانواع الاخرى من هذا الترتيب، وهذه الانواع تكون اكثر تأثرا بالضوضاء خصوصا عندما تكون المسافة (n) كبيرة جدا ، (AL-pine, 1950) ، (Kunetz,1966) و (Keller and Frischknecht, 1966).



شكل (6-1):- يوضح الانواع المختلفة من ترتيب ثنائي القطب – ثنائي القطب مطور عن (AL-pine, 1950).



شكل (7-1):- يوضح ترتيب ثنائي القطب- ثنائي القطب نوع القطبي او المحوري (Al-Zubedi, 2015b) .

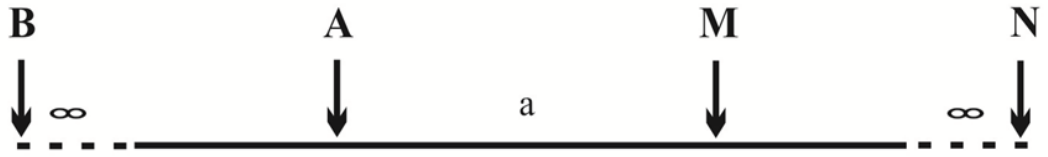
يتميز النوع المحوري هذا بانه حساس جدا للتغيرات الافقية وضعيف الحساسية جدا الى التغيرات العمودية تحت سطح الارض ، وهذا يجعله مفيد جدا في تحديد التراكيب العمودية، مثل الكسور، وغير مفيد في تحديد تتابع الطبقات الرسوبية، (Loke, 2012) . تحسب قيمة المقاومة النوعية لهذا الترتيب بواسطة المعادلة التالية (AL-pine, 1950)، (Kunetz,1966) و (Keller and Frischknecht, 1966):-

$\rho_a = \pi\, an\, (n+1)\, (n+2)\, R$ .....(22)

$K = \pi\, an\, (n+1)\, (n+2)$

1-3-4 ترتيب قطب – قطب Pole –pole Array :-

وهذا ابسط انواع الترتيبات الكهربائية ، حيث يكون هنالك قطب للتيار(A) مجاور لقطب الجهد (M) ويقعان على خط واحد . اما القطبان الاخران فيقعان على مسافة تعادل (20) مرة ضعف المسافة بين A وM ، وذلك لتقليل نسبة الخطأ في القياسات (Loke, 2012) ، وكما في الشكل (8-1).



شكل (8-1):- يوضح ترتيب قطب- قطب ،(Al-Zubedi, 2015b) .

ان تأثير القطبين B وN لا يؤخذ بالاعتبار ابدا ، لذلك يكون هذا الترتيب اكثر الترتيبات تأثرا بالضوضاء خصوصا اذا كانت المسافة بين القطبين A و M كبيرة ، وهذا يجعل القياسات بهذا الترتيب غير دقيقة و الميزة الوحيدة لهذا الترتيب هي انه له تغطية افقية واسعة وعمق اختراق كبير . لذلك ،هو يستخدم بشكل واسع في المسوحات الكهربائية ثلاثية الابعاد 3D imaging Resistivity Surveys (Li and Oldenburg, 1992). تحسب قيمة المقاومة النوعية لهذا الترتيب بواسطة المعادلة التالية (AL-pine, 1950)، (Kunetz,1966) و (Keller and Frischknecht, 1966):-

$\rho_a = 2\pi\, a\, R$ .....(23)

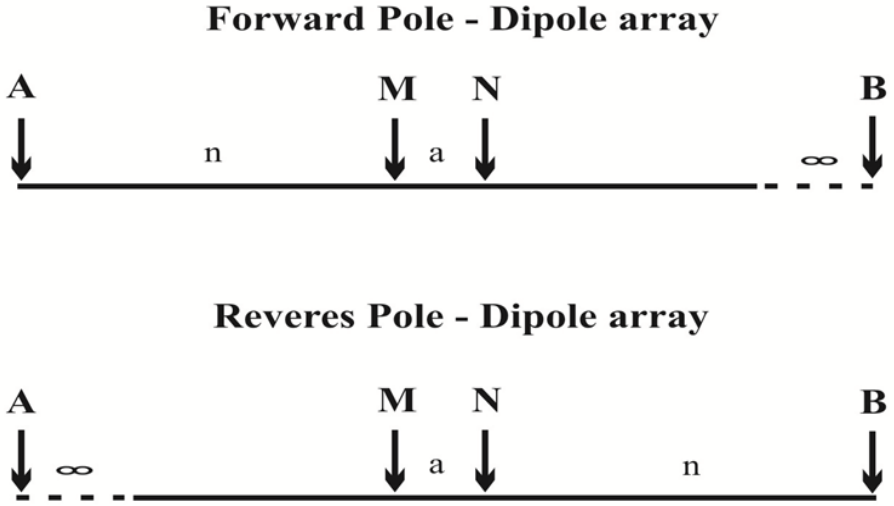
$K = 2\pi\, a$

1-3-5 ترتيب قطب – ثنائي القطب Pole-Dipole Aarray :-

هذا الترتيب يتكون من اربعة اقطاب تقع على خط مستقيم (A,B,M,N) ، ويكون احد اقطاب التيار (A) او (B) واقعا على مسافة بعيده جدا عن باقي الاقطاب والتي تعادل تقريبا من (5) الى (10) مرات عمق التحري المراد الوصول اليه ، بمعنى اذا اردنا التحري عن جسم او تركيب جيولوجي يقع على عمق (100m)، فيجب ان يقع قطب التيار هذا على بعد (500m) الى (1000m) من الاقطاب الباقية،

(Loke, 2012). هذا الترتيب يسمى ايضا نصف شلمبرجر Half-Schlumberger ، كما ورد في AL-pine, (1950) , Kunetz,(1966) و Keller and Frischknecht, (1966).

يتميز هذا الترتيب بالتغطية الافقية الجيدة ، وهو اقل تأثرا بالضوضاء مقارنة بترتيبي ثنائي القطب – ثنائي القطب وقطب – قطب، وذلك لكون احد اقطاب التيار قريب من قطبي الجهد . هنالك نوعان من هذا الترتيب امامي ومعكوس Forward and Reverse Pole-Dipole ، في النوع الامامي يقع قطب التيار (B) بعيدا عن باقي الاقطاب ، اما النوع المعكوس فيكون فيه قطب التيار (A) هو الذي يقع بعيدا عن باقي الاقطاب ، وكما في الشكل (9-1). يمكن الاستنتاج بان النوع الامامي هو افضل من المعكوس لان التيار الكهربائي ينتشر داخل الارض من القطب (A)، وهذا يجعل القياسات اكثر دقة ، اما في النوع المعكوس ، فان نقطة انتشار التيار من القطب (A) ستكون بعيده وان الاشارة الواصلة الى قطبي الجهد ستكون ضعيفة واكثر تأثرا بالضوضاء ، ولكن عمق التحري سيكون اكبر مما للنوع الامامي.



شكل (9-1):- يوضح ترتيب قطب- ثنائي القطب، (Loke,2012).

بشكل عام ،ان قوة الاشارة لهذا الترتيب تتناقص مع زيادة مربع المسافة (n) ، لذا يوصى بعدم زيادة هذه المسافة مع بقاء المسافة (a) ثابتة ، بمعنى ان تبقى المسافة (n) اكبر خمس مرات من المسافة (a)، وذلك لكي نحصل على دقة قياسات جيده وخصوصا في المسوحات ثنائية وثلاثية الابعاد، طبقا لـ(Loke,2012)، تحسب قيمة المقاومة النوعية لهذا الترتيب اعتماد على نوعه ، ففي النوع الامامي يهمل تأثير قطب التيار (B) لذا فهو لا يحسب عند حساب قيمة فرق الجهد عند قطبي الجهد ، وانما يحسب تأثير القطب (A) فقط ، وكما يلي :-

$$\rho_a = k\,R \qquad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots(24)$$

$$R = \Delta V^{A}_{MN} \backslash I$$

1-3-6 الترتيب المربع Square Array :-

هذا الترتيب يتكون من اربعة اقطاب (A، B، M وN) واقعة عند زوايا مربع ،و تكون قيمة المقاومة النوعية المقاسة في هذا الترتيب هي اكثر تمثيلا لمركز الترتيب واقل اعتمادا على الاتجاه، (Habberjam and Watkins, 1967) . يتميز هذا الترتيب بانه قليل التأثر بعدم التجانس السطحي ، لهذا فهو يستعمل بشكل واسع في التحري عن الاثار، اما عيوبه فانه لا يمكن استخدامه حاليا في المسوحات ثنائية وثلاثية الابعاد، كون الاقطاب فيه لا تقع على خط مستقيم. هنالك ثلاثة انواع من هذا الترتيب وهي :- الفا (**α**) ، بيتا (**β**) و كاما (**γ**) ، وكما في الشكل (10-1). ان النوعين الفا وبيتا تستخدمان لقياس تغير قيم المقاومة النوعية مع تغير الاتجاه ، بينما يستخدم النوع كاما من اجل تدقيق قياسات النوعين السابقين (Habberjam and Watkins, 1967) وكما يلي:-

اذا كان الوسط الذي يتم فيه القياس متجانسا وغير متساوي الخواص في جميع الاتجاهات Anisotropic فأن:-

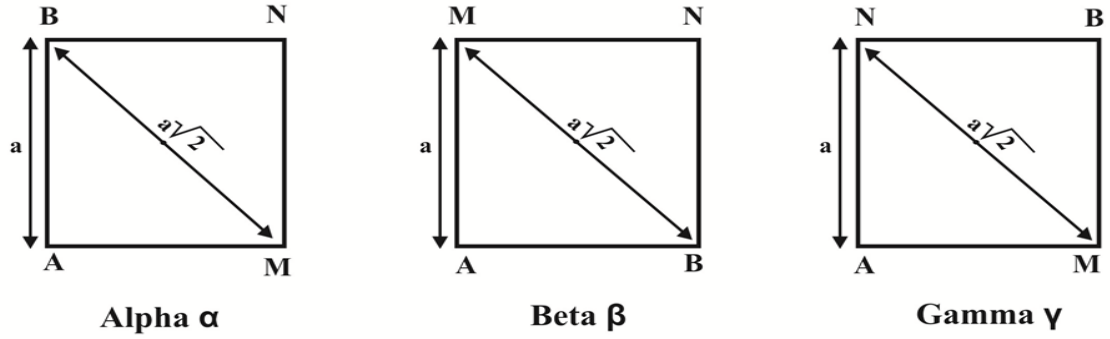
$$R\alpha = R\beta + R\gamma \qquad \text{.....(25)}$$

اما اذا كان الوسط متساوي الخواص في جميع الاتجاهات Isotropic فان :-

$$R\gamma = 0$$
$$R\alpha = R\beta \qquad \text{.....(26)}$$

تحسب قيمة المقاومة النوعية لهذا الترتيب بواسطة المعادلة التالية:-

$$\rho_a = K\,R \qquad \text{.....(27)}$$
$$K = \frac{2\pi a}{2-2\sqrt{2}}$$



شكل (10-1):- يوضح الانواع المختلفة من الترتيب المربع ، (Al-Zubedi, 2015b).

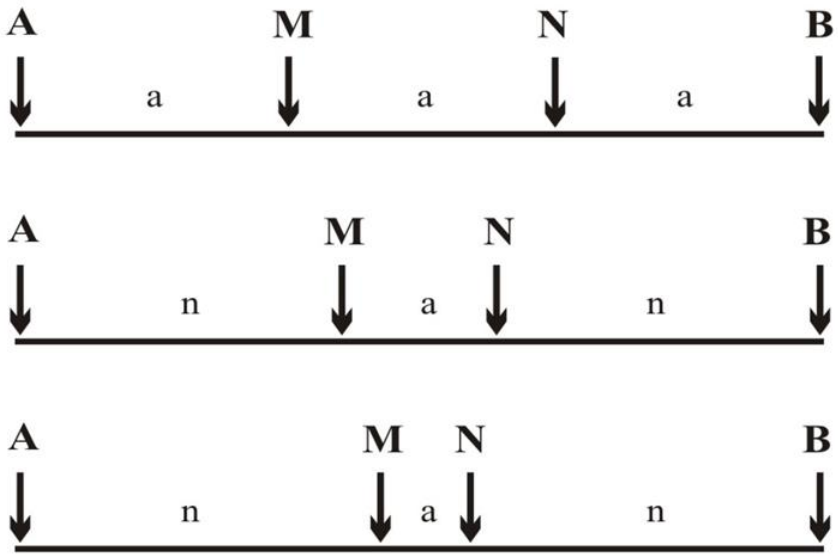
1-3-7 ترتيب فنر – شلمبرجر Wenner – Schlumberger Array :-

هذا الترتيب ،هو واحد من اهم الترتيبات التي تستخدم في المسوحات الكهربائية ثنائية البعد في السنوات الاخيرة ، وهو ترتيب جديد وهجين ناتج عن المزج بين ترتيب فنر وترتيب شلمبرجر Wenner and Schlumberger ، (Pazdirek and Blaha, 1996). يتميز هذا الترتيب بسهولة استخدامه في هذه المسوحات. وان الغرض من استخدامه هو الحصول على تغطية افقية وعمودية في نفس الوقت للتراكيب الجيولوجية، حيث كما اشرنا سابقا، بان ترتيب فنر يتميز بتغطية افقية جيدة فقط ، بينما ترتيب شلمبرجر على العكس منه يتميز بتغطية عمودية . هذا يعني ان هذا الترتيب الهجين هو اكثر حساسية للتغيرات الافقية والعمودية معا، (Loke, 2012).

يبدأ المسح الكهربائي ثنائي البعد بهذا الترتيب بأخذ القياسات بترتيب فنر لمجموعه من القياسات ثم يتحول الى اخذ القياسات بترتيب شلمبرجر ، وهذا ما يزيد من دقة القياسات مع العمق لكون المسافة بين قطبي الجهد ستكون قليلة ، بينما تكون القياسات الاولية المأخوذة بترتيب فنر والقريبة من السطح ذات دقة عالية لكون ترتيب فنر تقل حساسيته مع زيادة المسافة بين الاقطاب، لذا يبدأ هذا الترتيب بفنر وينتهي بشلمبرجر ، وكما في الشكل (11-1).

تحسب قيمة المقاومة النوعية لهذا الترتيب بواسطة المعادلة التالية :-

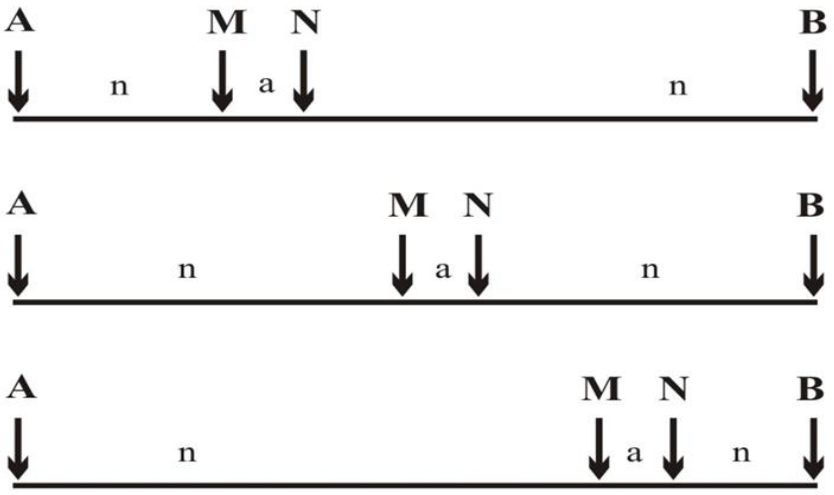
$$\rho_a = \pi\, n\, (n+1)\, a\, R \qquad \text{.....(28)}$$



شكل (11-1):- يوضح استخدام ترتيب فنر- شلمبرجر، (Loke,2012).

1-3-8 الترتيب المتدرج Gradint Array :-

ابتكر هذا الترتيب وطور نتيجة تطور انظمة وأجهزه قياس المقاومة النوعية بواسطة المسوحات ثنائية الابعاد ،(Dahlin and Zhou, 2006) . يتم اخذ القياسات بهذا الترتيب من خلال تثبيت قطبي التيار A وB على خط واحد وبينهما مسافة معينة ، بينما يتنقل قطبي الجهد M وN اللذان بينهما مسافة صغيرة (a) على طول خط المسح بين قطبي التيار مع كل قياس، وابتدأ من قطب التيار (A) ، وبهذا فهو يشبه ترتيب ثنائي القطب – ثنائي القطب وترتيب قطب – ثنائي القطب في عملية اخذ القياسات ، (Dahlin and Zhou, 2004)، كما في الشكل (12-1). استنادا الى ما تقدم فان هنالك اكثر من معادلة لحساب قيمة المقاومة النوعية لهذا الترتيب.



شكل (12-1):- يوضح استخدام الترتيب المتدرج ، (Loke, 2012) .

ظهرت في هذا الترتيب مشاكل كثيره اثناء المسح الكهربائي ثنائي الابعاد، خصوصا باستخدام اجهزة Syscal الفرنسية ، وتم اخبار الشركة المصنعة بهذا الموضوع ، واكدت الشركة وجود هذه المشاكل وان العمل جار على اصلحها . اضافة الى ذلك، هنالك مشاكل اخرى ذكرها بعض العلماء تتعلق بتمثيل نقطة القياس المقاسة في هذا الترتيب في الموديل النهائي للقياسات اي الموديل المعكوس.

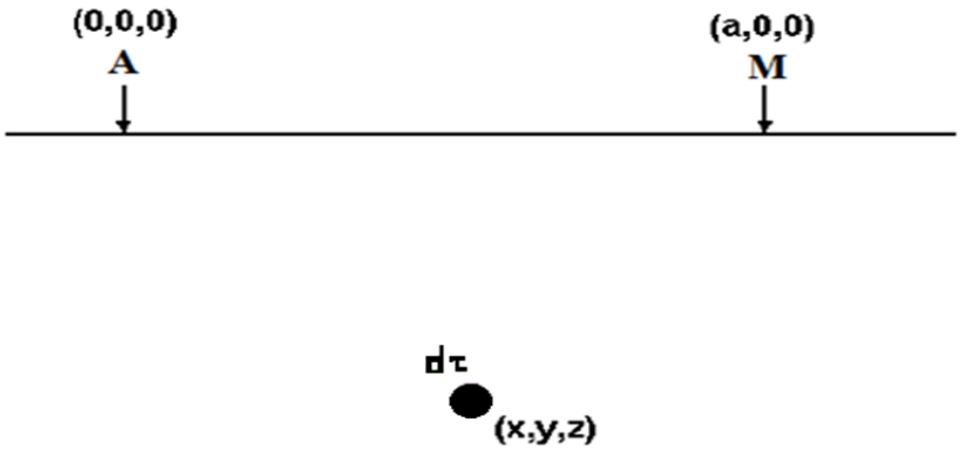
تم تطوير هذا الترتيب بحيث تتحرك اقطاب التيار A وB لكل مجموعة قياسات ، بمعنى يتم اخذ مجموعة من القياسات تكون فيها المسافة بين اقطاب التيار ثابته ، ثم تكبر المسافة بين اقطاب التيار ويتم ايضا اخذ مجموعة قياسات جديدة وهكذا ، وسمي الترتيب بالترتيب المتعدد التدرج Multiple Gradient، وبدأ استعماله في المسوحات ثنائية الابعاد.

1-4 دالة الحساسية وعمق التحري

Sensitivity Function and Depth of Investigation

ان من اهم العوامل المؤثرة على دقة قياسات المقاومة النوعية هو دالة الحساسية للترتيب المستخدم ، ويمكن تعريف دالة الحساسية Sensitivity Function بانها درجة التغير في قيم المقاومة النوعية للمواد الموجودة تحت سطح الارض وقدرة اقطاب الجهد على التأثر بها وقياسها (Loke, 2012)، بمعنى اخر انها قدرة الترتيب على تمييز التغيرات في قيم المقاومة النوعية للمواد الواقعة تحت سطح الارض اعتمادا على المسافات النسبية الموجودة بين مواقع الاقطاب الكهربائية وخصوصا قطبي الجهد. لذا فان القيمة العالية لدالة الحساسية تعطي دلالة على قوة التأثر بالمواد تحت السطحية. لذلك يمكن اعتبار دالة الحساسية هي مقياس للوضوح والدقة Resolution وعمق التحري للترتيب المستخدم (Chitea and Georgescu, 2009; Loke, 2010).

تم حساب دالة الحساسية رياضيا بواسطة اشتقاق Frechet للوسط المتجانس ذي السطح نصف الكروي وذي الابعاد المحدودة half-space،(McGillivray and Oldenburg, 1990) . حيث تم حسابها اولا لأبسط الترتيبات الكهربائية وهو ترتيب قطب – قطب. في هذا الترتيب هنالك قطب للتيار (A) يقع في موقع احداثيته (0,0,0) ، وقطب اخر للجهد يقع على مسافة (a) منه في موقع احداثيته (a,0,0) على خط مستقيم ، وكما في الشكل (13-1)، اذا ارسلنا تيار كهربائي من قطب التيار(A) فانه سوف يسير باتجاه قطب الجهد (M) ونقيسه عنده على شكل جهد Potential ولنسميه (Φ). لنفترض وجود نقطة صغيرة جدا تحت سطح الارض تقع على عمق معين واحداثيتها $d_T(x,y,z)$ ، هذه النقطة لها مقاومة نوعية متغيرة قليلا ولتكن ($\delta\rho$) ، ولها جهد يوثر على القطب (M)، وليكن ($\delta\phi$) ويمكن حسابه بواسطة المعادلة التالية و التي وضعت من قبل ، (Loke and Barker 1995):-



شكل (13-1):- يوضح حساب دالة الحساسية لترتيب قطب – قطب ، مطور عن (Loke, 2010).

$$\delta\phi = \frac{\delta\rho}{\rho^2}\int_V \nabla\phi\cdot\nabla\phi' d\tau \qquad \text{.....(29)}$$

الجهد النتائج من مرور التيار الكهربائي عند القطب (M) والذي اسميناه (Φ) يمكن ان يحسب وفق المعادلة التالية :-

$$\phi = \frac{\rho}{2\pi\left(x^2+y^2+z^2\right)^{0.5}} \qquad \text{.....(30)}$$

وهو مشابه لقيمة ('ϕ) انظر المعادلة (29). بعد فتح الاقواس للمعادلة (30) وتعويضها بالمعادلة (29) ، سوف نحصل على المعادلة التالية:-

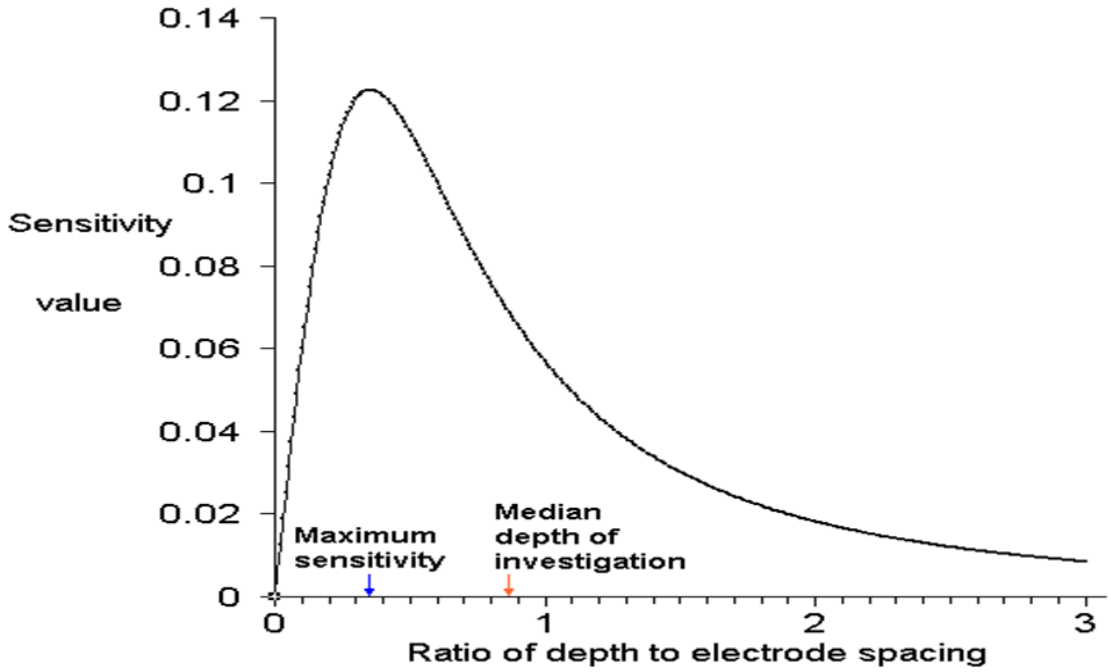
$$\frac{\delta\phi}{\delta\rho} = \int_V \frac{1}{4\pi^2}\cdot\frac{x(x-a)+y^2+z^2}{\left[x^2+y^2+z^2\right]^{1.5}\left[(x-a)^2+y^2+z^2\right]^{1.5}}dxdydz \qquad \text{.....(31)}$$

الاشتقاق ثلاثي الابعاد لـ (Frechet) بعد اجراء التكامل للمعادلة اعلاه (31) سيكون كالاتي :-

$$F_{3D}(x,y,z) = \frac{1}{4\pi^2}\cdot\frac{x(x-a)+y^2+z^2}{\left[x^2+y^2+z^2\right]^{1.5}\left[(x-a)^2+y^2+z^2\right]^{1.5}} \qquad \text{.....(32)}$$

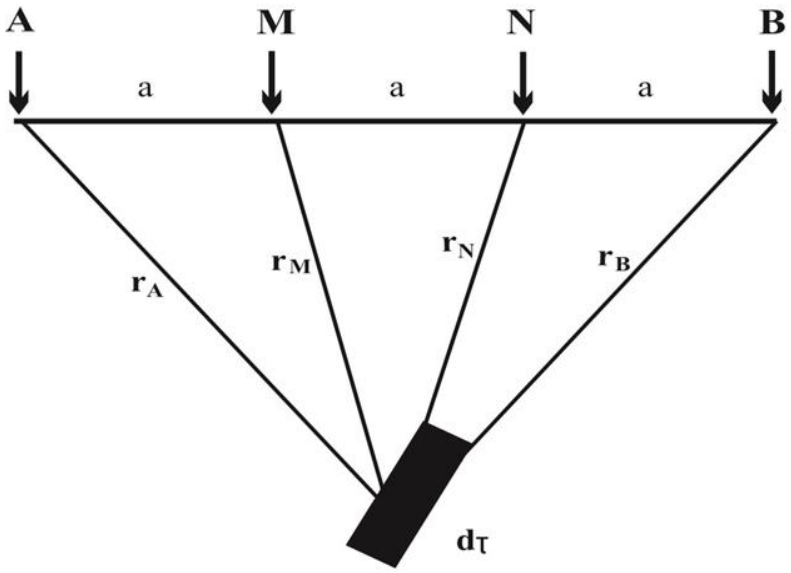
المعادلة اعلاه (32) هي المعادلة العامة لدالة الحساسية للترتيب قطب – قطب، (Loke,2012). الشكل التالي (14-1) يمثل دالة الحساسية احادية البعد للترتيب قطب – قطب .هذا الشكل يظهر ان متوسط عمق التحري للترتيب (السهم الاحمر) هو ضعف عمق القيمة العظمى لحساسية الترتيب Sensitivity (السهم الازرق)، وهذا يدل ان لهذا الترتيب عمق اختراق عال ولكن حساسيته لتحديد قيم المقاومة النوعية للطبقات تحت السطحية ستكون على عمق اقل من متوسط نصف عمق الاختراق ، أي ان الطبقات الواقعة على عمق اكثر من عمق القيمة العظمى لحساسية الترتيب لن يستطيع هذا الترتيب تحديدها بشكل دقيق جدا.

بشكل عام دالة الحساسية تعتمد على النسبة بين عمق الهدف المراد دراسته الى المسافة بين الاقطاب ، وتزداد قيمتها كلما كان النسبة صغيرة.



شكل (1-14):- مرتسم يوضح دالة الحساسية احادية البعد لترتيب قطب – قطب ، (Loke, 2012).

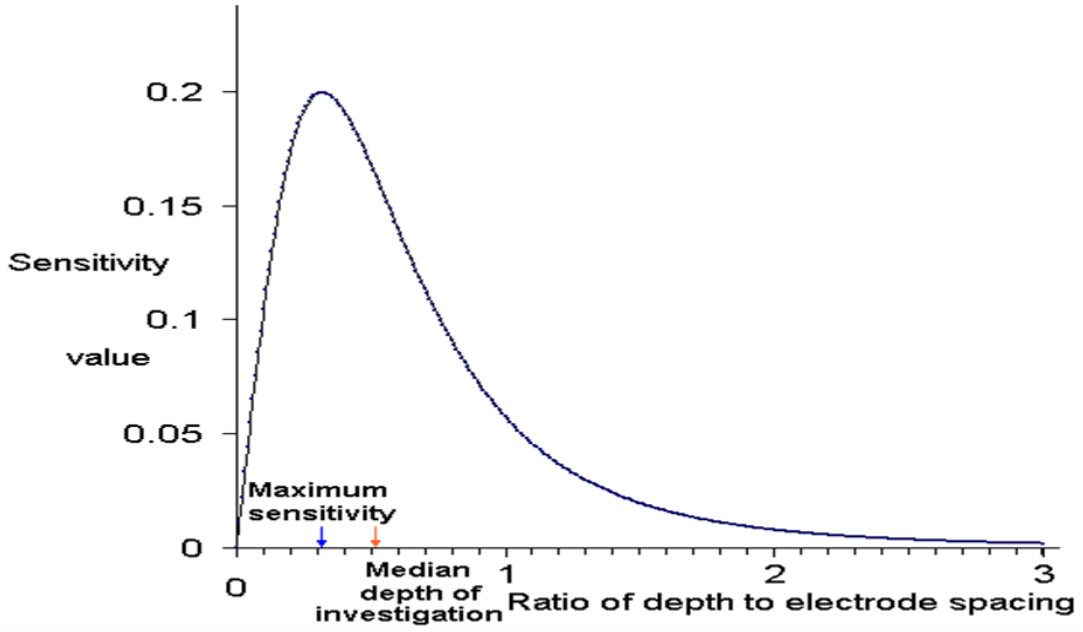
للحصول على اشتاق Frechet للترتيب مكون من اربعة اقطاب (A،B، M وN) وتقع على خط ، مستقيم , وليكن ترتيب فنر ، وكما في الشكل (1-15)، نستخدم معادلة (32) ، لتصبح على النحو التالي،(Tamssar, 2013) :-



شكل (1-14):- يوضح حساب دالة الحساسية على نقطة تقع على عمق $d_T\,(x,y,z)$ ، لترتيب فنر ، مطور عن، (Tamssar, 2013).

$$F_{3D}(x,y,z)=\frac{1}{4\pi^2}\left[\frac{(x-x_A)(x-x_N)+(y-y_A)(y-y_N)+(z-z_A)(z-z_N)}{(r_A r_N)^3}\right.$$
$$+\frac{(x-x_B)(x-x_N)+(y-y_B)(y-y_N)+(z-z_B)(z-z_N)}{(r_B r_N)^3}$$
$$+\frac{(x-x_A)(x-x_M)+(y-y_A)(y-y_M)+(z-z_A)(z-z_M)}{(r_A r_M)^3}$$
$$\left.+\frac{(x-x_B)(x-x_M)+(y-y_B)(y-y_M)+(z-z_B)(z-z_M)}{(r_B r_M)^3}\right] \quad \text{.....(33)}$$

هذه المعادلة (33) هي المعادلة العامة لدالة الحساسية لترتيب فنر، وقد حسبت من قبل (Tamssar, 2013) ، الشكل التالي (15-1) يمثل دالة الحساسية احادية البعد لهذا الترتيب، وهو يظهر ان متوسط عمق التحري للترتيب (السهم الاحمر) هو مقارب للقيمة العظمى لحساسية الترتيب Sensitivity (السهم الازرق)، وهذا يدل على ان حساسية الترتيب تكون عالية جدا عندما تكون نسبة عمق الهدف الى المسافة بين الاقطاب صغيرة ، وتقل كلما زادت هذه النسبة، بمعنى ان دالة الحساسية تقل عند زيادة المسافة بين الاقطاب.



شكل (15-1):- مرتسم يوضح دالة الحساسية احادية البعد لترتيب فنر ، (Loke, 2012).

من الناحية الرياضية ، ان اشتاق Frechet يستخدم لدوال المصفوفات ، وان الاشتقاق من الناحية الفزيائية يستخدم لتحديد تأثير نقطة صغيرة متناهية بالصغر على نقطة اخرى ، اي اننا نشتق لمعرفة

تأثير النقطة الصغيرة الواقعة تحت الارض والتي لها قيمة مقاومة نوعية معينة توثر بها على قطبي الجهد او على الجهد المقاس عند هذين القطبين .

ان ما يهمنا من اجراء المسوحات الكهربائية هو تحديد قيمة المقاومة النوعية للطبقات تحت السطحية وعمقها، لذلك وللحصول على عمق التحري لأي ترتيب كهربائي يستخدم في المسوحات الكهربائية احادية البعد وفي وسط متجانس وذي ابعاد محدده Homogeneous half-Space نقوم بأجراء عملية التكامل على المعادلة (33) التي تمثل دالة الحساسية له او ما يسمى اشتقاق Frechet. اذا افترضنا وجود عدة طبقات تحت سطح الارض تمتد بشكل افقي وذات قيم مختلفة من المقاومة النوعية ، فان هذه الطبقات سوف تؤثر على قطبي الجهد الموجودين على سطح الارض ويمكن تحديد هذا التأثير. و لو اخذنا طبقة قليلة السمك من هذه الطبقات والتي لها احداثيات (x) و (y) وتمتد من ما لا نهاية الى ما لانهاية $-\infty$ to $+\infty$ ، سوف نجري عملية التكامل على دالة الحساسية ثلاثية الابعاد التي تم حسابها بواسطة اشتقاق Frechet لتكون المعادلة (33) بالصيغة التالية (Loke, 2012) :-

$$F_{ID}(z)=\frac{1}{4\pi^2}\int_{-\infty-\infty}^{+\infty+\infty}\frac{x(x-a)+y^2+z^2}{\left[x^2+y^2+z^2\right]^{1.5}\left[(x-a)^2+y^2+z^2\right]^{1.5}}dxdz \qquad \text{.....(34)}$$

هذه المعادلة تم تبسيطها اعتمادا على الحلول التحليلية analytical solutions بواسطة (Roy and Apparao, 1971) ، وكالاتي :-

$$F_{ID}(z)=\frac{2}{\pi}\cdot\frac{z}{\left(a^2+4z^2\right)^{1.5}} \qquad \text{.....(35)}$$

المعادلة اعلاه (35) تسمى معادلة خصائص عمق التحري للترتيبات الكهربائية المستخدمة في التحريات الكهربائية احادية البعد 1D Resistivity Surveys. والرموز المستخدمة في هذه المعادلة هي (z) وتمثل عمق التحري Depth of Investigation وفي بعض الاحيان يختصر الى (DOI) ، اما الرمز (a) فهو يدل على المسافة بين قطبي الجهد (M,N) بالنسبة للترتيبات رباعية الاقطاب ، والمسافة بين قطب التيار(A) الى قطب الجهد (M) في ترتيب قطب – قطب. يستخدم العديد من الباحثين هذه المعادلة لمعرفة خواص الترتيبات الكهربائية في المسوحات الكهربائية احادية البعد (Edwards 1977, Barker 1991, Merrick 1997) ، لكن Edwards (1977) and Barker (1991)، اعتبروا ان الناتج النهائي لهذه المعادلة والاكثر دقة هو متوسط عمق التحري . بشكل عام للحصول على دالة العمق لأي ترتيب كهربائي يجب اجراء عملية التكامل على دالة الحساسية له.

بالنسبة لعمق التحري للمسوحات ثنائية البعد يتم اجراء عملية التكامل على دالة الحساسية ثلاثية الابعاد للبعد y (*dy*) والتي تم حسابها بواسطة اشتقاق Frechet والتي اعطيت في المعادلة (33)، لتصبح معادلة حساب متوسط عمق التحري، كما يلي:-

$$F_{2D}(x,z)=\frac{1}{4\pi^2}\int_{-\infty}^{+\infty}\frac{x(x-a)+y^2+z^2}{\left[x^2+y^2+z^2\right]^{1.5}\left[(x-a)^2+y^2+z^2\right]^{1.5}}dy \qquad \text{.....(36)}$$

بسطت هذه المعادلة ايضا اعتمادا على الحلول التحليلية بواسطة (Loke and Barker 1995) لتصبح المعادلة النهاية لحساب متوسط عمق التحري للترتيبات المستخدمة في المسوحات ثنائية البعد ، كما يلي:-

$$F_{2D}(x,z)=\pi\left[\frac{1}{2\alpha^3}-\frac{3a^2}{16\alpha^5}\right],\ \text{with}\ \alpha=0.25a^2+z^2 \qquad \text{.....(37)}$$

مما تقدم يظهر ان Edwards (1977) ، هو من حسب متوسط عمق التحري للترتيبات المستخدمة في المسوحات احادية البعد ، ثم جاء (Loke and Barker 1995)، ليحسبا متوسط عمق التحري للترتيبات المستخدمة في المسوحات ثنائية الابعاد ،وهي نفسها للترتيبات المستخدمة في ثلاثية الابعاد . حقيقة ان متوسط عمق التحري هذا لا يمثل العمق الحقيقي للطبقات ، لان هنالك الكثير من العوامل التي تؤثر على تحديد عمق الطبقات سيتم ذكرها لاحقا وليس فقط قيمة المقاومة النوعية لهذه الطبقات والمسافة بين الاقطاب ، لذلك Edwards (1977) ،اعطى جدولا، وهو جدول (1-1)، والذي طور من قبل، (Loke and Barker 1995)، يتضمن متوسط عمق التحري(z_e) لمختلف الترتيبات ويعطي فكرة عن مدى العمق الذي يمكن الوصل اليه في المسوحات الكهربائية احادية وثنائية الابعاد، و يمكن ان يستخدم لحساب عمق التحري الاعظم او الاقصى لكل قيمة من قيم المقاومة النوعية التي تم قياسها من خلال بعض العلاقات . فمثلا قبل اجراء المسح الكهربائي احادي او ثنائي الابعاد، واذا اردت ان تعرف لأي عمق ممكن ان تصل باستخدام ترتيب فنر الفا ، يمكنك ذلك اذا حددت اقصى مسافة بين الاقطاب (a) او المسافة الكلية بين الاقطاب (L)، التي سوف تستخدمها ، وتحدد هذه القيم اعتمادا على عمق الهدف المراد دراسته، وكما في المثال التالي للترتيب فنر نوع الفا :-

اذا كان طول خط المسح الكلي (L) يساوي (190m) أي ان قيمة (a) وهي المسافة بين الاقطاب (100m) ، نذهب الى جدول (1-1) ، ونستخدم العلاقة التالية :-

عمق التحري الاعظم = المسافة بين الاقطاب (a) * z_e /a (من الجدول)= 100* 0.519 =98.61m

او

عمق التحري الاعظم = المسافة الكلية (L) * z_e /L (من الجدول)= 190* 0. 173 =98.61m

جدول (1-1) :- يوضح قيم (z_e /a) و(z_e /L) لمختلف الترتيبات الكهربائية مطور من قبل (Loke, 2012)، وموضوع من قبل Edwards (1977). في الترتيبات فنر و قطب – قطب ، نحتاج فقط معرفة قيمة (a) اما في باقي الترتيبات فنحتاج معرفة قيمة (n) وهي المسافة بين قطب التيار واقرب قطب للجهد.

Array	*ze/a*	*ze/L*	Geometric Factor
Wenner Alpha	0.519	0.173	6.2832
Wenner Beta	0.416	0.139	18.850
Wenner Gamma	0.594	0.198	9.4248
Dipole-dipole n = 1	0.416	0.139	18.850
n = 2	0.697	0.174	75.398
n = 3	0.962	0.192	188.50
n = 4	1.220	0.203	376.99
n = 5	1.476	0.211	659.73
n = 6	1.730	0.216	1055.6
n = 7	1.983	0.220	1583.4
n = 8	2.236	0.224	2261.9
Equatorial dipole-dipole			
n = 1	0.451	0.319	21.452
n = 2	0.809	0.362	119.03
n = 3	1.180	0.373	367.31
n = 4	1.556	0.377	841.75
Wenner – Schlumberger			
n = 1	0.519	0.173	6.2832
n = 2	0.925	0.186	18.850
n = 3	1.318	0.189	37.699
n = 4	1.706	0.190	62.832
n = 5	2.093	0.190	94.248
n = 6	2.478	0.191	131.95
n = 7	2.863	0.191	175.93
n = 8	3.247	0.191	226.19
n = 9	3.632	0.191	282.74
n =10	4.015	0.191	345.58
Pole-dipole n = 1	0.519	0.296	12.566
n = 2	0.925	0.308	37.699
n = 3	1.318	0.330	75.398
n = 4	1.706	0.341	125.66
n = 5	2.093	0.349	188.50
n = 6	2.478	0.354	263.89
n = 7	2.863	0.358	351.86
n = 8	3.247	0.361	452.39
Pole-Pole	0.867		6.28319

1-5 العوامل المؤثرة على عمق التحري

Parameters Controlling Investigation Depth

ذكرنا سابقا ان عمق التحري الاعظم الذي يحسب من خلال الجدول (1-1)، ليس بالضرورة ان يكون هو العمق الحقيقي الذي يمكن الوصول اليه من خلال المسوحات الكهربائية، لان هنالك الكثير من العوامل التي تؤثر على عمق التحري للترتيبات الكهربائية المختلفة ،ومن اهم هذه العوامل هي ما يلي وكما ورد في Roy and Apparao, (1971) :-

1- الفرق في قيم المقاومة النوعية للطبقات الصخرية Contrast in Resistivities وكذلك سماكاتها، فاذا كان هنالك فرق كبير في قيم المقاومة النوعية لهذه الطبقات المتعاقبة او فرق كبير في سماكاتها سيكون عمق التحري قليل ولا يتطابق مع العمق الاعظم المحسوب من الجدول (1-1).

2- طول خط المسح . فكلما كانت المسافة بين قطبي التيار(AB) كبيره والمسافة الفاصلة بين اقطاب الجهد (MN) متناسبة معها ، سيكون عمق الاختراق للتيار Current Penetration كبير، وبالتالي من الممكن ان يكون عمق التحري كبير ومطابق للعمق الاعظم المحسوب من الجدول (1-1).

3- نوع الصخور والترسبات ، حيث تقلل الصخور او الترسبات ذات المقاومة النوعية العالية من عمق اختراق التيار، وبالتالي يقل عمق التحري .

4- شدة التيار الكهربائي المستخدم ، فكلما كان التيار المرسل الى داخل الارض ذو شده عالية كان عمق الاختراق له كبير ، وهذا قد يجعل عمق التحري كبير ، ومطابق للعمق الاعظم المحسوب من الجدول (1-1).

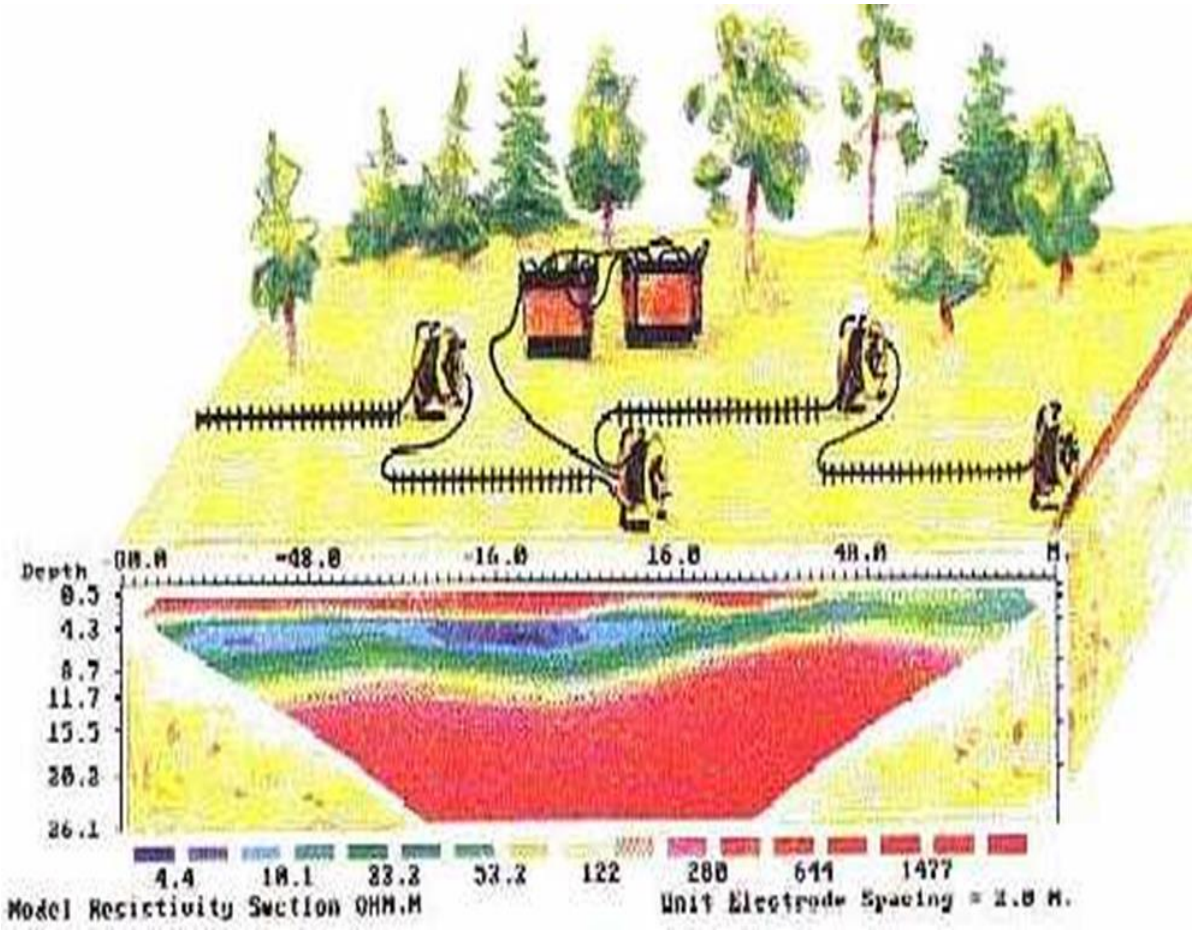
5- حساسية الجهاز المستخدم Resistivity Meter ، فالأجهزة ذات الحساسية العالية لها القدرة على التقاط الاشارة الضعيفة بشكل جيد ، ونقصد بالإشارة قيمة فرق الجهد التي يتم قياسها عند قطبي الجهد.

6- مستوى الضوضاء في المنطقة قيد الدراسة ، المجالات الكهرومغناطيسية الطبيعية والصناعية التي سوف تعمل على تقليل شدة التيار المرسل.

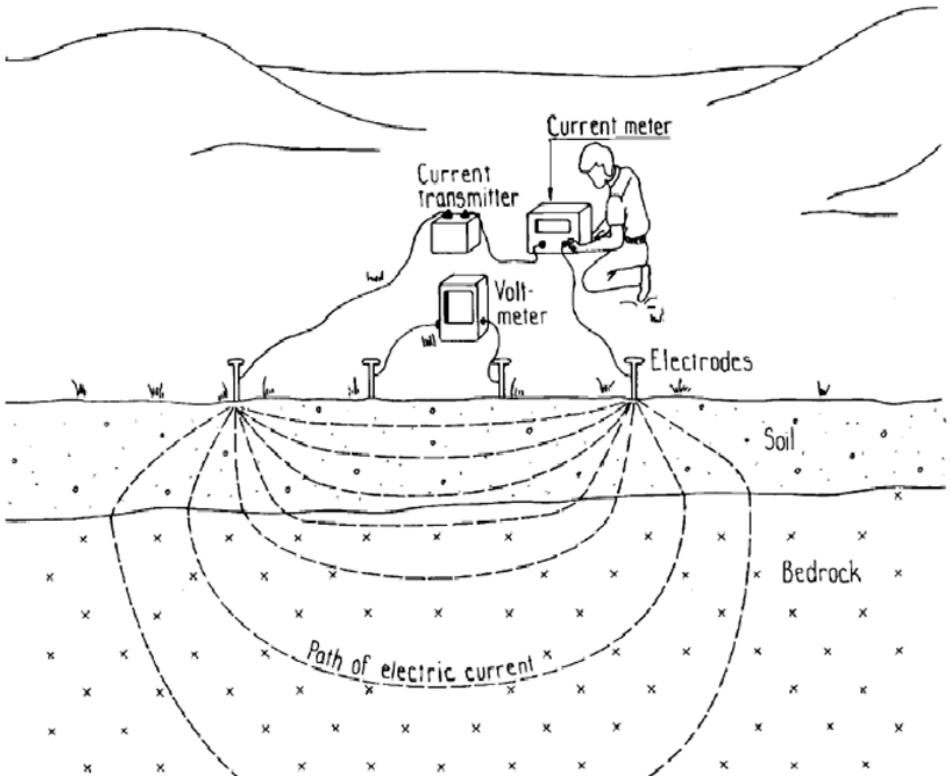
1-6 الأجهزة الحقلية Field Instruments

تتكون اجهزة المسح الكهربائي بشكل عام من جهاز قياس المقاومة النوعية Resistivity Meter واقطاب من الفولاذ او النحاس بأطوال (30cm) او (60cm) وبأقطار (8) او (12) ملم مع اسلاك كهربائية Wires اوCables و مطرقة و بطارية و مولد كهرباء Generator، وفي معظم الاحيان حاسبة محمولة Laptop ، حيث ان معظم الاجهزة الحديثة تربط بالحاسبة مباشرة ويتم نقل المعلومات والايعازات من الجهاز الى الحاسبة وبالعكس.

وبشكل عام يوجد نوعان من أجهزة قياس المقاومة النوعية الكهربائية ، النوع الاول يسمى الثابت Static اما النوع الثاني فيسمى المتحرك Dynamic، (Dahlin, 2001). معظم الاجهزة من نوع الثابت حاليا، هي الاجهزة المستخدمة في المسوحات الكهربائية ثنائية وثلاثية الابعاد، بالإضافة الى المسوحات احادية البعد (التقليدية) ، التي تتكون من جهاز قياس المقاومة النوعية و كابل متعدد الاسلاك الداخلية Multi – Core Cable (يستخدم فقط في المسوحات ثنائية وثلاثية الابعاد ، ويسمى ايضا كابل متعدد القلوب) ، اطواق ربط Card Clips (تستخدم لربط الاقطاب بالكابل او بالأسلاك)، بالإضافة الى ما ذكر في مقدمة الموضوع من ملحقات، وكما في الشكل (1-16) . اما الاجهزة القديمة من النوع الثابت فأنها كانت تتألف من ثلاثة اجزاء منفصلة موضوعة في صناديق منفصلة وهي :- جهاز قياس المقاومة النوعية ، وجهاز مرسل للتيار Current Transmitter ، وجاهز قياس الفولتية Voltmeter وبطارية او مولد كهربائي، بالإضافة الى الاقطاب والمحلقات الاخرى، وكما في الشكل (1-17).



شكل (1-16):- مرتسم يوضح جهاز قياس المقاومة النوعية الحديث من النوع الثابت مع ملحقاته ، اثناء المسح الكهربائي ثنائي الابعاد، (SISC Group, www.sisc.com.vn.).



شكل (17-1):- مرتسم يوضح جهاز قياس المقاومة النوعية القديم من النوع الثابت مع ملحقاته ، اثناء المسح الكهربائي احادي البعد،(Robinson and Coruh, 1988).

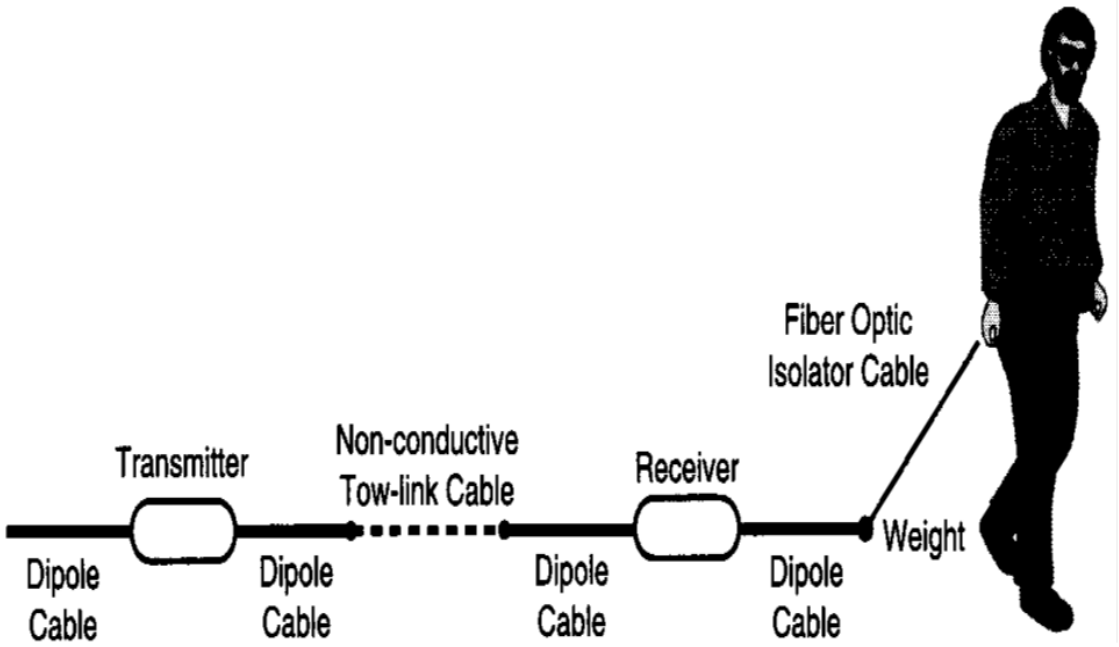
اما النوع الثاني من اجهزة المقاومة النوعية فهو المتحرك Dynamic ، وهو يتكون من عدد قليل من الاقطاب الكهربائية ، اثنان منهما للتيار والاخرى تستخدم كأقطاب جهد ومربوطة بواسطة كابل Cable مع بعضها البعض، ومتصلة بجهاز قياس المقاومة النوعية ، ويتم سحب الكابل على الارض بعد كل قياس للحصول على تغطية افقية واسعة ، استخدم هذا النوع في المسوحات الكهربائية احادية البعد وخصوصا بواسطة تقنية المقاطع العرضية Horizontal Profiling، والتي سيتم شرحها في الفصل القادم. يتميز هذا النوع من الاجهزة بانه سريع العمل وسهل الاستخدام، ويعطي تغطية افقية واسعة ، ولكن اهم عيوبه انه يعطي عمق تحري قليل، (Dahlin, 2001).

نتيجة التقدم العلمي والتطور الحاصل في مجال تصميم وانتاج اجهزة قياس المقاومة النوعية ومع التقدم في مجال البرامجيات والحاسبات الالكترونية ، ظهرت انواع حديثه من الاجهزة المتحركة تستخدم في المسوحات الكهربائية ثنائية وثلاثية الابعاد . هذه الاجهزة تتكون من قطبين للتيار وستة اقطاب لقياس الجهد، وقطب اخر يستخدم كقطب ارضي Ground Electrode. هذا النوع يستخدم بأرسال التيار الكهربائي الى داخل الارض من خلال الاتصال المباشر بين اقطاب التيار والارض، لذا فهو

يستخدم فقط في الاراضي المفتوحة ،(Loke, 2012) . Panissod et al. (1998)، طور هذا النوع من الاجهزة لتكون الاقطاب في صناديق متحركة ، تسحب بواسطة عربة صغيرة.

هنالك انواع اخرى من النوع المتحرك لا تتطلب الاتصال المباشر لأقطاب التيار بالأرض، وتكون الاقطاب على شكل ازواج ، الزوج الاول يولد تيار كهربائي محتث داخل الارض ، والازواج الاخرى تقيس الجهد المتولد ، هذا النوع هو أكثر استعمالا ويمكن استخدامه داخل المدن والطرقات ، (Gerard and Tabbagh 1991, Shima et al. 1996, Panissod et al. 1998, Loke et al. 2011a).

واحد من اهم انواع هذه الاجهزة هو Geometrics OhmMapper، يتألف من كابل او سلك يحتوي على اربعة الى ستة أقطاب ويسحب من قبل المشغل ، وكما في الشكل (18-1).



شكل (18-1):- مرتسم يوضح جهاز قياس المقاومة النوعية من النوع المتحرك مع ملحقاته ، اثناء المسح الكهربائي ثنائي البعد، (Courtesy of Geometrics Inc.)، من (Loke, 2012).

الفصل الثاني

تقنيات المسح الكهربائي احادي البعد

المقدمة

تستخدم طريقة المقاومة النوعية الكهربائية لتحديد قيم المقاومة النوعية الظاهرية للطبقات الصخرية تحت السطحية من خلال قياسها على سطح الارض، تحسب قيم المقاومة النوعية الحقيقة لها وتعرض على شكل موديل. فمنذ عام 1920 تقريبا ولغاية عام 1990 نفذت كل المسوحات الكهربائية لقياس المقاومة النوعية بواسطة المسح احادي البعد ، ومن خلال ثلاث تقنيات فقط ، و هي :- المسارات ذات الفاصلة الثابتة Constant Separation Travers (CST)، او ما يسمى المقاطع العرضية Horizontal Profiling ، الجس الكهربائي العمودي Vertical Electric Sounding (VES) و تقنية المقاطع الزائفة Pseudosection ، او ما تسمى Combined VES/CST Technique، حيث في هذه التقنية يتم دمج التقنيتين السابقتين من اجل الحصول على التغطية العمودية والافقية معا.

في هذا الفصل سنلقي الضوء على المسح الكهربائي احادي البعد والتقنيات المستخدمة فيه ، وسنشرح بإيجاز كل تقنية مع اسلوب اخذ القياسات في الحقل، وكيفية حساب المقاومة النوعية الحقيقة من المقاومة النوعية الظاهرية ، وكيفية تفسير نتائج هذه المسوحات، وكيفية عرضها بشكل يستطيع الجيولوجي او الباحث الاستفادة منها في بناء قرارته ، حيث ان الهدف من هذه المسوحات هو اظهار ما موجود تحت سطح الارض من تراكيب وطبقات واعماقها على شكل موديلات ، ليتمكن المختصون من اتخاذ القرار الدقيق والسليم.

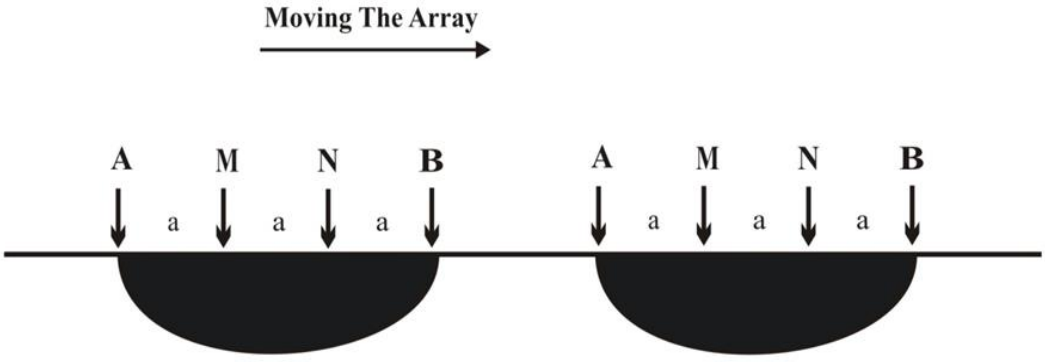
تقنيات المقاومة النوعية احادية البعد One-Dimension (1D) Resistivity Techniques

2-1 تقنية المسارات ذات الفاصلة الثابتة Constant Separation Travers (CST)

تعتبر هذه التقنية واحدة من اقدم تقنيات المسح الكهربائي للمقاومة النوعية، ويطلق عليها اسماء عديدة اضافة الى الاسم المذكور في اعلاه ، حيث يطلق عليها ايضا اسم تقنية المقاطع العرضية Horizontal Profiling ، وايضا اسم المسارات الكهربائية Electrical Profiling.

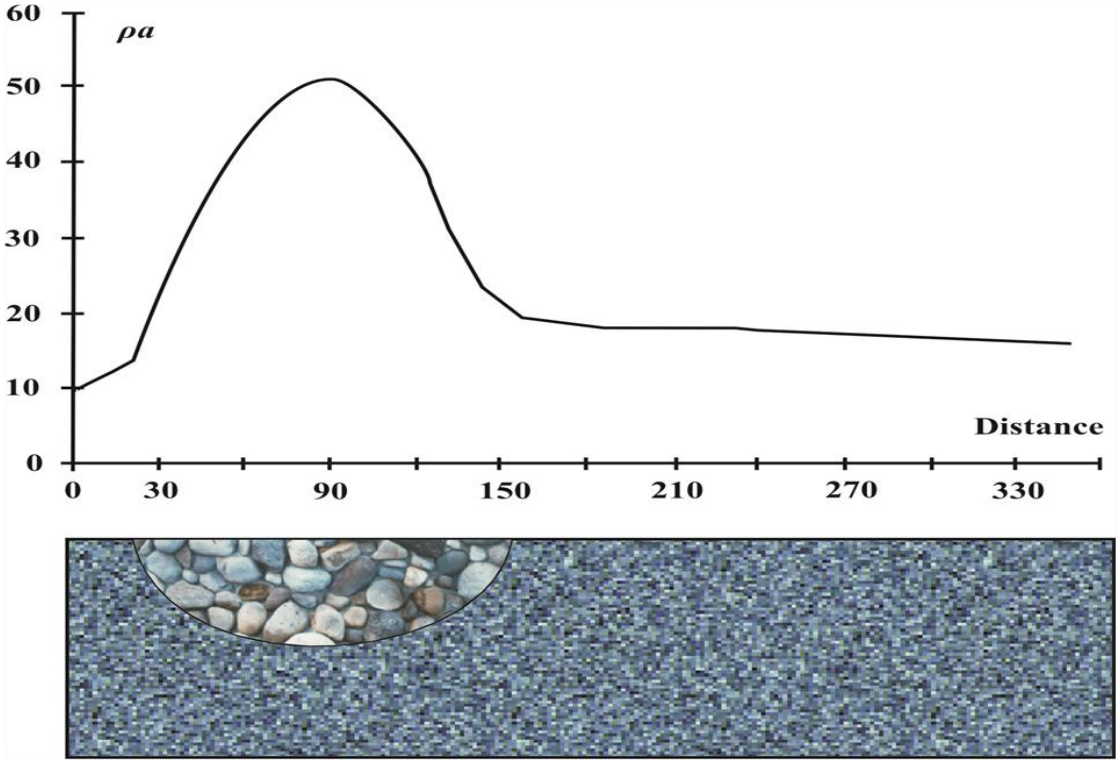
يتم في هذا التقنية قياس التغيرات الأفقية في المقاومة النوعية الظاهرية للطبقات الصخرية، ولأعماق ضحلة، من خلال تثبيت المسافة بين الاقطاب للترتيب المستخدم ، وبعد كل قياس ينتقل الترتيب بالكامل إلى موقع آخر مجاور وبمسافة معينة، يتم تحديدها وفق الغرض من الدراسة، وكما في الشكل (1-2). أن الفرق في قيمة المقاومة النوعية بين الموقعين يدل على وجود تغير أفقي للمقاومة النوعية الظاهرية، وهذا التغير سوف يشير الى وجود عدم تجانس جانبي في الطبقات الصخرية ، والذي ربما نتج عن وجود فالق او عن تغير ليثولوجي، لذلك تستخدم هذه التقنية بشكل واسع في التحري عن الفوالق ، وعن الترسبات المعدنية، وكذلك في الدراسات الجيوتكنيكية لتحديد مناطق الضعف في الطبقات الصخرية او الترسبات قرب سطح الارض، (Kunetz, 1966; Zohdy, 1974).

بالرغم من إمكانية استخدام اي ترتيب كهربائي إلا أنّ ترتيب فنر (Wenner) يُعدُّ الأكثر استخداماً في هذه التقنية، وذلك لكون المسافة بين الأقطاب متساوية مما يسهل عملية نقل الأقطاب من موقع الى اخر . للحصول على عمق تحرٍّ مناسب يجب أن تحدد المسافة بين الأقطاب بشكل دقيق لكونها العامل الأساسي في تحديد عمق التحري للترتيب المستخدم ، ويجب ان يكون خط المسح بهذه التقنية عمودي على مضرب الطبقات او التراكيب الجيولوجية ، وذلك للحصول على قياسات اكثر دقة لقيم للمقاومة النوعية الظاهرية.



شكل (1-2):- يوضح المسح الكهربائي احادي البعد باستخدام تقنية المقاطع العرضية او الـ CST بواسطة ترتيب فنر،(Al-Zubedi, 2015b).

تفسر البيانات الناتجة بهذه التقنية تفسيرا وصفيا Qualitative فقط، حيث لا يتم حساب المقاومة النوعية الحقيقة، وانما تبقى القياسات على شكل قيم مقاومة نوعية ظاهرية ، والتي يتم عرضها اما على شكل مقاطع عرضية Horizontal Profiling، او خرائط افقية (عرضية) Horizontal Maps. بالنسبة للمقاطع العرضية، ترسم نتائج القياسات على مرتسم لعدة قياسات ضمن نفس خط المسح بمقياس رسم خطي او لوغاريتمي، يمثل الاحداثي العمودي لهذا المرتسم قيم المقاومة النوعية الظاهرية ، بينما يمثل المحور الافقي المسافة، حيث يسقط كل قياس للمقاومة النوعية الظاهرية على المسافة التي تم القياس عندها والتي تمثل منتصف المسافة بين قطبي الجهد (a)، ثم توصل القياسات مع بعضها البعض على شكل منحني Curve، ويتم تفسير هذا المنحني وصفيا، اي وصف التغيرات في قيم المقاومة النوعية مع المسافة وإعطاء سبب لهذه التغيرات، وكما في الشكل (2-2).



شكل (2-2) :- يوضح التفسير بواسطة المقاطع العرضية ، ويظهر وجود تغير في قيم المقاومة الظاهرية لوجود عدسة من الحصى ضمن طبقة ترسبات رملية ،(Al-Zubedi,2015b).

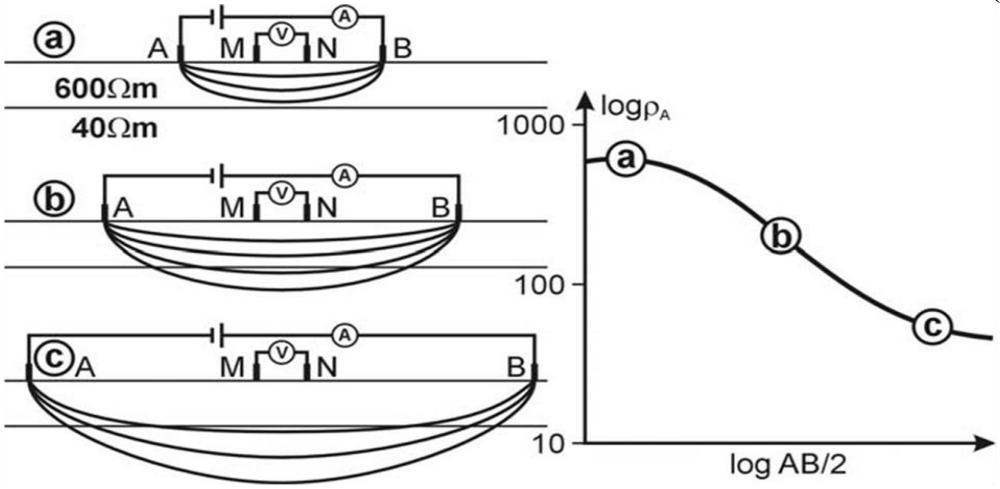
اما بالنسبة للخرائط الافقية فيتم جمع اكثر من خط مسح بهذه التقنية ورسمها على شكل خرائط ، يكون الاحداثي العمودي فيها ممثلا للمسافة بين خطوط المسح ، بينما الاحداثي الافقي ممثلا للمسافة التي اخذت عندها القياسات ، ويتم ربط القياسات مع بعضها بخطوط كنتورية ، ومن ثم تفسر ايضا وصفيا بإعطاء سبب التغير في شكل وامتداد الخطوط الكنتورية، (Kunetz, 1966; Zohdy, 1974).

2-2 تقنية الجس الكهربائي العمودي Vertical Electrical Sounding (VES) Technique

تشير المعلومات التاريخية بان المسح الكهربائي احادي البعد قد بدأ بواسطة هذه التقنية ، لذا تعتبر هذه التقنية من اهم التقنيات المستخدمة لغاية عام 1990، حيث ظهرت تقنيات المسح الكهربائي للمقاومة النوعية ثنائية وثلاثية الابعاد والتي اصبحت الاكثر استخدما. تستعمل تقنية الجس الكهربائي العمودي لمعرفة التغيرات العمودية لقيم المقاومة النوعية الظاهرية مع العمق، وبالتالي تحديد السطوح الفاصلة بين الطبقات، ومن ثم إيجاد السمك والمقاومة النوعية الحقيقة للطبقات المختلفة. تستخدم هذه التقنية بشكل واسع في التحري عن المياه الجوفية والتحريات الهندسية الضحلة، (Keller and Frischknecht, 1966; Zohdy, 1974). وتعتمد تقنية الجس الكهربائي العمودي للمقاومة النوعية في اساسها النظري على مبدأ ، أن زيادة المسافة بين قطبي التيار مع بقاء المسافة بين قطبي الجهد ثابتة لعدة قياسات ،سوف يزيد من عمق اختراق التيار في داخل الأرض وبالتالي يزداد عمق التحري ،(Kunetz 1966) .

يفضل في هذه التقنية استخدام ترتيب شلمبرجر لكونه يحقق عمق اختراق كبير، بالإضافة الى إن المسافة بين قطبي الجهد (M, N) تكون صغيرة وثابتة لعدة قياسات، مع تحريك أقطاب التيار(A, B) إلى الخارج، مما يؤدي إلى توفير الجهد والوقت في انجاز العمل الحقلي. ويجب ان يكون اخذ القياسات بهذه التقنية عمودي على مضرب الطبقات او التراكيب الجيولوجية للحصول على قياسات اكثر دقة لقيم للمقاومة النوعية الظاهرية.

ترسم نتائج القياس وفقا لهذه التقنية على شكل مرتسم وعلى ورق لوغاريتمي Log-Log ، يمثل الاحداثي العمودي فيه قيم المقاومة النوعية الظاهرية ، ويمثل الاحداثي الافقي منتصف المسافة بين اقطاب التيار(AB/2) ولجميع القياسات ، ثم يتم الربط بين القياسات على شكل منحني ، وكما في الشكل (2-3).



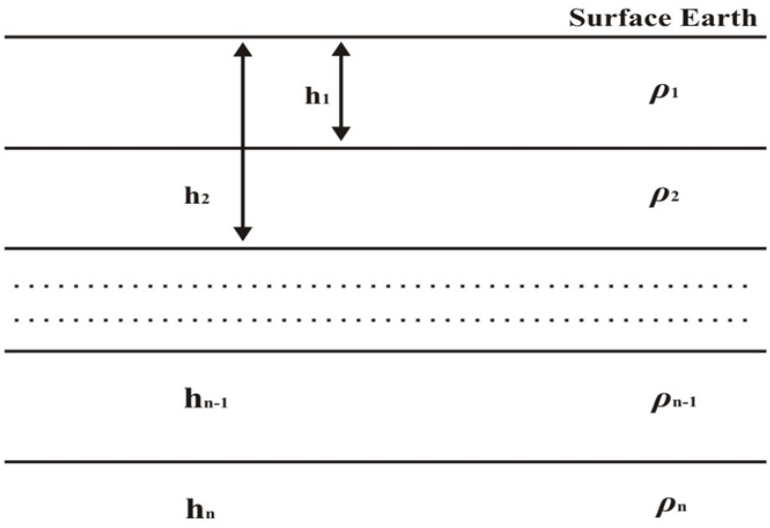
شكل (2-3):- يوضح اسلوب اخذ القياسات بتقنية الجس الكهربائي العمودي (VES) بواسطة ترتيب شلمبرجر،(Kirsch, 2006) .

2-2-1 المنحنيات الحقلية لترتيب شلمبرجر Field Curves of Schlumberger Array

نفذت معظم المسوحات الكهربائية احادية البعد خلال القرن الماضي بهذه التقنية ، لذلك اهتم الباحثون بهذه التنقية بشكل كبير ، مما يستدعي تسليط الضوء عليها في هذا الفصل، لكون جميع المؤلفات القديمة والابتكارات كانت تتعلق بهذه التقنية. استخدم ترتيب شلمبرجر بشكل واسع في تنفيذ هذه المسوحات الكهربائية دون غيره من الترتيبات ، لذا كل ما يخص هذه التقنية يرتبط ارتباطا مباشرا بهذا الترتيب.

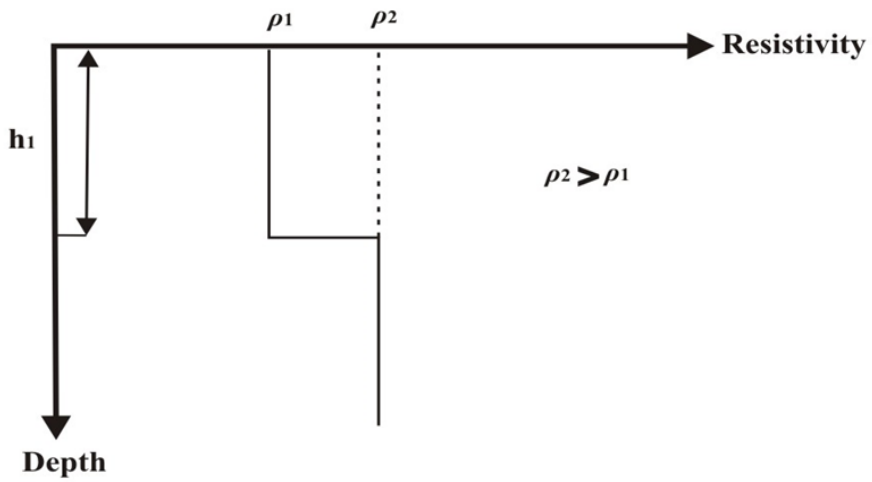
ان التوزيع العمودي لقيم المقاومة النوعية الظاهرية مع العمق ضمن حجم معين من الارض يسمى المقطع الجيو كهربائي Geo-Electrical Section، ويمكن تشبيه تتابع الصخور والطبقات تحت سطح الارض والممتدة بشكل افقي بالمقاطع الجيو كهربائية ، لذك تعتبر تقنية الجس الكهربائي العمودي هي التقنية الافضل لدراسة هذا التوزيع العمودي للمقاومة النوعية مع العمق ، (Orellana and Mooney, 1966).

لتبسيط الامور يمكن الاستعانة بالشكل التالي (2-4) ، الذي يظهر مقطع ثنائي الابعاد لتتابع من الطبقات الصخرية الافقية ، تم التعبير عن سمك الطبقة بالرمز (h) وبالرمز (ρ) لمقاومتها النوعية.



شكل (2-4):- يوضح مجموعة من الطبقات ضمن المقطع الجيو كهربائي ، (Orellana and Mooney, 1966).

يمكن تمثيل الخصائص الكهربائية للمقطع الجيو كهربائي اعلاه بيانيا وخصوصا للطبقتين القريبتين من سطح الارض، وكما في الشكل (2-5)، والذي يظهر ان المقاومة النوعية للطبقة الثانية هي اكبر من المقاومة النوعية للطبقة الاولى ، وهو اقرب الى شكل المنحني، لذا يمكن تمثيل توزيع المقاومة النوعية مع العمق على شكل منحنيات اعتمادا على المقاطع الجيو كهربائية.

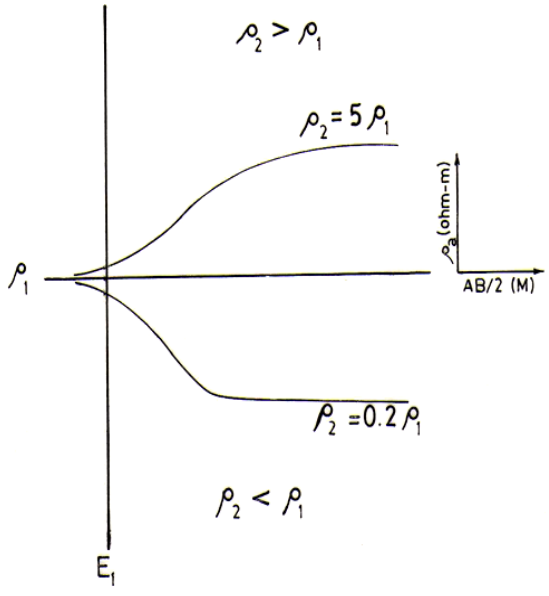


شكل (2-5):- يوضح مقطع جيو كهربائي ثنائي الطبقات، (Orellana and Mooney, 1966).

المقارنة بين المنحنيات الناتجة من تمثيل قيم المقاومة النوعية مع العمق للمقطع الجيو كهربائي ، قادت الى تصنيف هذه المنحنيات الى عدة مجاميع اعتمادا على التغير في قيم المقاومة النوعية مع العمق، وكما يأتي :-

a- منحنيات ثنائية الطبقة Two –Layer Curves

في هذه المجموعة هنالك نوعان فقط من المنحنيات ، النوع الاول تكون فيه المقاومة النوعية للطبقة الثانية اكبر من الاولى ، اما النوع الثاني فتكون المقاومة النوعية للطبقة الاولى اكبر من المقاومة النوعية للطبقة الثانية ، وكما في الشكل (2-6).



شكل (2-6):- انواع المنحنيات ثنائية الطبقة ،(Bhattacharya and patra, 1968) .

b- منحنيات ثلاثية الطبقة Three –Layer Curves

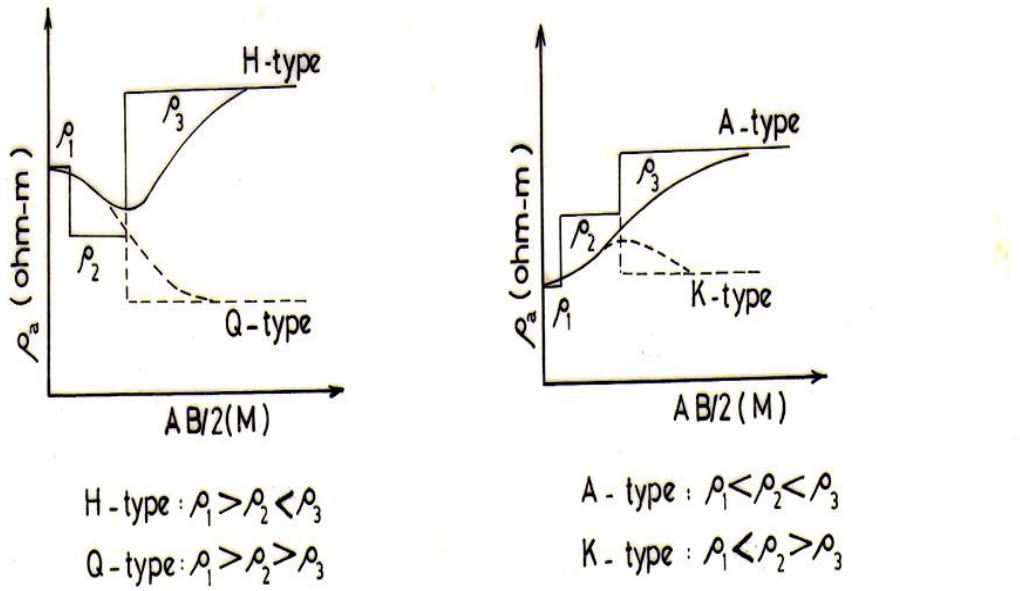
في هذه المجوعة توجد أربعة انواع نموذجية من منحنيات المقاومة النوعية الظاهرية وكما في الشكل (2-7) ، وتعتبر هذه المنحنيات هي الاساس في تصنيف باقي المنحنيات للطبقات الرباعية والخماسية والسداسية .... الخ، هذه المنحنيات هي :-

1- منحني نوع A-Type Curve (A) :- هذا النوع يظهر وجود ثلاثة طبقات ، تتميز بزيادة قيم مقاومتها النوعية تدريجيا مع العمق، حيث ($\rho_1 < \rho_2 < \rho_3$) .

2- منحني نوع K-Type Curve (K) :- في هذا النوع تكون المقاومة النوعية للطبقة الوسطى هي الاعلى قيمة من قيم الطبقة الاولى والاخيرة ، حيث ($\rho_1 < \rho_2 > \rho_3$).

3- منحني نوع H-Type Curve (H) :- هذا النوع يظهر ان المقاومة النوعية للطبقة الوسطى هي الاقل قيمة مقارنة مع قيم الطبقة الاولى والاخيرة ، حيث ($\rho_1 > \rho_2 < \rho_3$).

3- منحني نوع Q-Type Curve (Q) :- هذا النوع من المنحنيات يظهر انخفاض قيم المقاومة النوعية مع العمق للطبقات الثلاث وبشكل تدريجي ، حيث ($\rho_1 > \rho_2 > \rho_3$).



شكل (2-7):- يوضح انواع المنحنيات ثلاثية الطبقة ،(Bhattacharya and patra, 1968) .

c- منحنيات رباعية الطبقة Four –Layer Curves

في هذه المجموعة توجد ثمانية انواع من المنحنيات، وكما في الشكل (2-8) وهي:-

1 - AA في هذا النوع تكون قيم المقاومة النوعية للطبقات الاربع كالاتي :- $\rho_1 < \rho_2 < \rho_3 < \rho_4$.

2- AK في هذا النوع تكون قيم المقاومة النوعية للطبقات الاربع ، كالاتي :- $\rho_1 < \rho_2 < \rho_3 > \rho_4$.

3- HA في هذا النوع تكون قيم المقاومة النوعية للطبقات الاربع ، كالاتي :- $\rho_1 > \rho_2 < \rho_3 < \rho_4$.

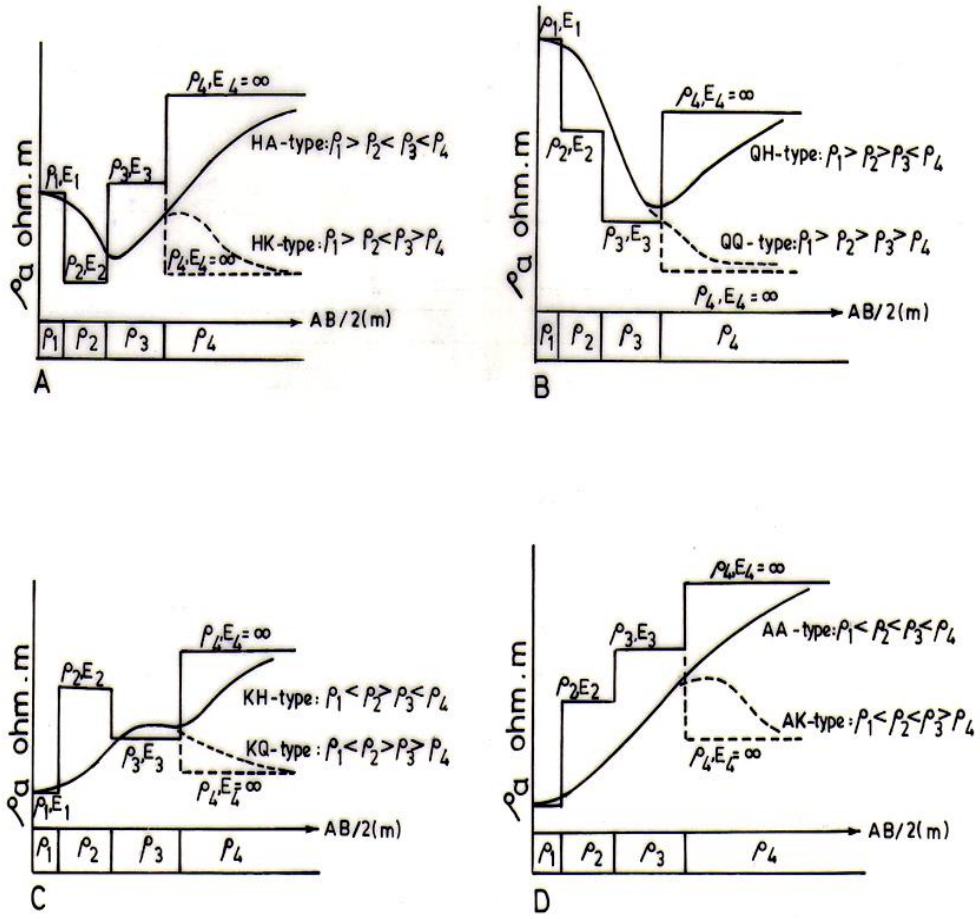
4- HK في هذا النوع تكون قيم المقاومة النوعية للطبقات الاربع ، كالاتي :- $\rho_1 > \rho_2 < \rho_3 > \rho_4$.

5- KH في هذا النوع تكون قيم المقاومة النوعية للطبقات الاربع ، كالاتي :- $\rho_1 > \rho_2 < \rho_3 < \rho_4$.

6- KQ في هذا النوع تكون قيم المقاومة النوعية للطبقات الاربع ، كالاتي :- $\rho_1 < \rho_2 > \rho_3 > \rho_4$.

7- QQ في هذا النوع تكون قيم المقاومة النوعية للطبقات الاربع ، كالاتي :- $\rho_1 > \rho_2 > \rho_3 > \rho_4$.

8- QH في هذا النوع تكون قيم المقاومة النوعية للطبقات الاربع ، كالاتي :- $\rho_1 > \rho_2 > \rho_3 < \rho_4$.

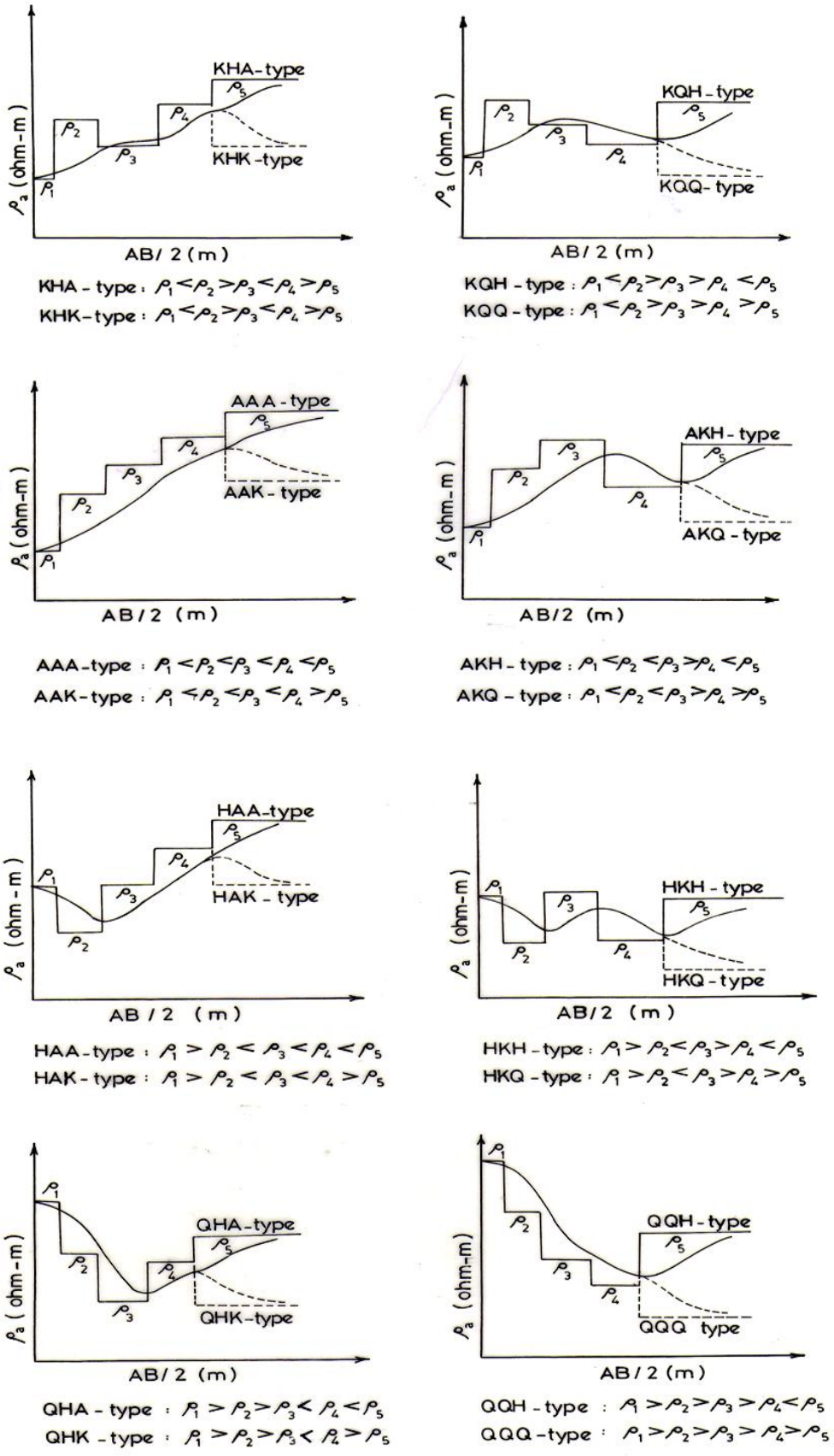


شكل (8-2):- يوضح انواع المنحنيات رباعية الطبقة ، (AL-Ane,1983).

بشكل عام، يمكن معرفة عدد المنحنيات لكل عدد من الطبقات الموجودة في الطبيعة من خلال استخدام العلاقة التالية (2^{n-1}) ، حيث يمثل الرمز (n) عدد الطبقات ، مثال ، لو كان لدينا (5) طبقات ، فان عدد المنحنيات يحسب كالاتي :-

$2^{n-1} = 2^{5-1} = 2^4 = 16$ منحني

اي يوجد (16) نوع من المنحنيات الخماسية الطبقة ، ثلاثة من كل منحي ستكون ثلاثية الطبقة اي (A,K,H,Q) والباقي كل رمز يمثل طبقة وحسب قيمة المقاومة النوعية لكل منها ، مثل KHA او AAA ..... الخ ،(Bhattacharya and patra, 1968) ، وكما في الشكل (2-9).



KHA-type : $\rho_1<\rho_2>\rho_3<\rho_4>\rho_5$
KHK-type : $\rho_1<\rho_2>\rho_3<\rho_4>\rho_5$

KQH-type : $\rho_1<\rho_2>\rho_3>\rho_4<\rho_5$
KQQ-type : $\rho_1<\rho_2>\rho_3>\rho_4>\rho_5$

AAA-type : $\rho_1<\rho_2<\rho_3<\rho_4<\rho_5$
AAK-type : $\rho_1<\rho_2<\rho_3<\rho_4>\rho_5$

AKH-type : $\rho_1<\rho_2<\rho_3>\rho_4<\rho_5$
AKQ-type : $\rho_1<\rho_2<\rho_3>\rho_4>\rho_5$

HAA-type : $\rho_1>\rho_2<\rho_3<\rho_4<\rho_5$
HAK-type : $\rho_1>\rho_2<\rho_3<\rho_4>\rho_5$

HKH-type : $\rho_1>\rho_2<\rho_3>\rho_4<\rho_5$
HKQ-type : $\rho_1>\rho_2<\rho_3>\rho_4>\rho_5$

QHA-type : $\rho_1>\rho_2>\rho_3<\rho_4<\rho_5$
QHK-type : $\rho_1>\rho_2>\rho_3<\rho_4>\rho_5$

QQH-type : $\rho_1>\rho_2>\rho_3>\rho_4<\rho_5$
QQQ-type : $\rho_1>\rho_2>\rho_3>\rho_4>\rho_5$

شكل (9-2):- يوضح انواع المنحنيات خماسية الطبقة ، (AL-Ane,1983).

2-2-2 معالجة بيانات الجس الكهربائي العمودي (VES)

Data Processing of Vertical Electrical Sounding (VES)

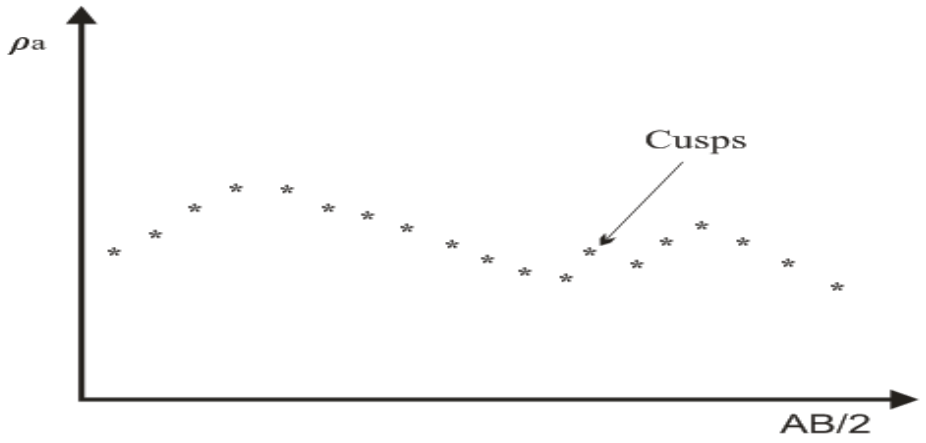
بعد اكمال العمل الحقلي بأجراء المسح الكهربائي للمقاومة النوعية بتقنية الجس الكهربائي العمودي (VES) ، بواسطة استخدام ترتيب شلمبرجر ، ترسم البيانات (القياسات) لقيم المقاومة النوعية على ورق لوغاريتمي Log – Log ذات معامل يساوي 62.5 مليمتر لكل دورة Cycle على شكل منحنيات حقلية، في حالة اجراء المسوحات بواسطة ترتيبات كهربائية اخرى يتم تحويل منحنياتها الى منحنيات ترتيب شلمبرجر ، لان كل طرق التفسير والمعالجة في هذه التقنية صممت لمنحنيات ترتيب شلمبرجر.

هذه المنحنيات الحقلية التي تم رسمها على ورق لوغاريتمي سوف تظهر في معظم الاحيان وجود تشوهات في الشكل ، اي نقاط القياس لا تقع على مسار منحني، وانما هنالك قياسات ستكون واقعة خارج هذا المسار، لذا يجب التخلص منها وازالتها من خلال عملية المعالجة التي تعتبر الخطوة الاولى نحو التفسير، والتي تسمى التهذيب Smoothing. وظاهرة التشوه هذه سببها وجود تغيرات جانبية ناتجة عن عدم التجانس في ليثولوجية الطبقات ، اخطاء في القياسات او بسبب وجود عطل في جهاز القياس ، (Zohdy, 1974) .

هنالك نوع اخر من التشوهات يكون على شكل انقطاعات في المنحني ، اي ان المنحني يتكون من اجزاء منفصلة عن بعضها ، وتمسى هذه التشوهات بالإزاحة Displacement ، وفي ادناه جميع التشوهات التي تظهر في المنحني الحقلي لترتيب شلمبرجر ، والتي هي :-

1- النتوءات الحادة Cusps :-

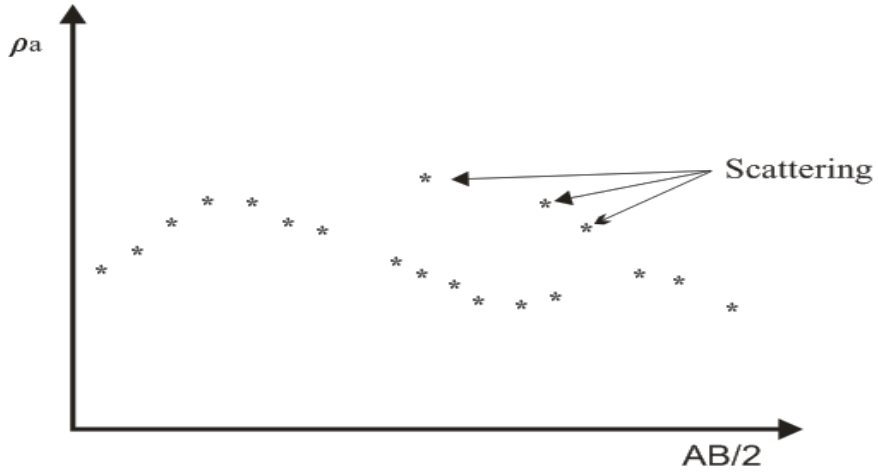
ويظهر هذا التشوه في المنحنيات الحقلية على شكل نتوءات حاده في قمم هذا المنحني ، وهي تنتج نتيجة وجود تغيرات جانبية (افقية) في الخصائص الكهربائية للصخور او الترسبات سببها وجود عدم تجانس جانبي، مثل وجود تغيرات ليثولوجية ، وجود الكسور، الأجسام النارية مثل (Dikes) او وجود العدسات، وكما تظهر فى الشكل (10-2).



شكل (10-2) :- يظهر وجود النتوء الحاد في منحني شلمبرجر الحقلي،(Al-Zubedi, 2015b) .

2- التبعثر لقيم (ρ_a) Scattering (ρa) Values

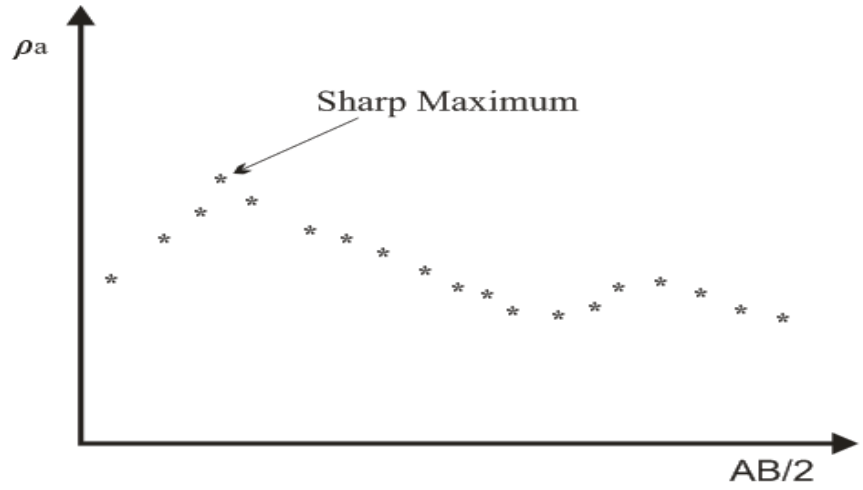
يحدث التبعثر او التشتت في قيم المقاومة النوعية الظاهرية نتيجة حدوث تغير مفاجئ ناتج عن عدم التجانس الجانبي في الطبقات الصخرية تحت سطح الارض، مثل وجود الفجوات والتكهفات، او الفوالق، وكما فى الشكل (11-2).



شكل (11-2):- يوضح تبعثر (تشتت) القياسات في منحني شلمبرجر الحقلي، (Al-Zubedi, 2015b).

3- الحافات الحادة Sharp Maximum

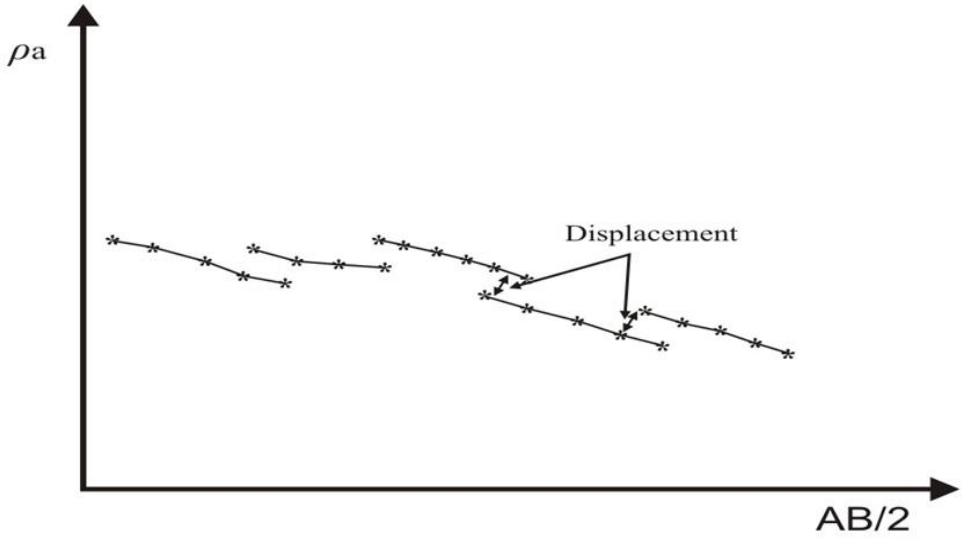
تظهر هذه الحافات الحادة عند مواقع نقاط الانقلاب في المنحني الحقلي، وخصوصا نوع (K) ، حيث تظهر هذه الحافات بشكل حاد بدل ان تكون منحنية ، وهي تحدث نتيجة تغير مفاجئ وسريع في قيم المقاومة النوعية الظاهرية ، نتيجة وجود عدم التجانس الجانبي، مثل وجود الفوالق ، الكسور او العدسات، (Zohdy, 1974)، وكما في الشكل (12-2).



شكل (12-2):- يوضح الحافات الحادة في منحني شلمبرجر الحقلي، (Al-Zubedi, 2015b).

3- الازاحة في افرع المنحني الحقلي The Displacement of Field Branches

وهي احدى انواع التشوهات التي تظهر في المنحنيات الحقلية ، حيث تظهر هذه المنحنيات بعد رسمها كأنها متكونة من اجزاء أو أفرع عديده و مزاحة بعضها عن بعض، وفي بعض الحالات نجد ان هذه الأفرع متقاطعة ، وكما في الشكل (13-2)، وأن سبب هذه الإزاحة عاملان وهما :-



شكل (13-2):- يوضح وجود الازاحة في منحني شلمبرجر الحقلي، (Al-Zubedi, 2015b).

a- الازاحة النظرية Theoretical Displacement

وتحدث هذه الازاحة اثناء اخذ القياسات وفق النسبة (MN/AB≤ 1/5)، حيث اثناء اجراء الجس العمودي بترتيب شلمبرجر، تثبت المسافة (MN) لعدد من القياسات بزيادة المسافة (AB). وعندما تصبح المسافة (MN) صغيرة نسبة إلى المسافة (AB)، في هذه الحالة يصعب أخذ القياس بين قطبي الجهد (M) و (N)، لذلك يتم زيادة المسافة (MN) لكي نتمكن من أخذ القياسات.

هذه الإزاحة ليس لها علاقة مع تأثير عدم التجانس السطحي للمقاومة النوعية، وإنما سببها هو النقصان في عمق التحري، نتيجة القياسات المعادة بعد زيادة المسافة (MN)، وتحدث بامتداد المحور السيني (X-axis)، (Kunetz, 1966) و (Zohdy, 1974) ، وكما في الشكل (13-2).

استطاع (Al-Zubedi, 2009) من تعديل جدول القياسات المستخدم في الجس الكهربائي العمودي والموضوع من قبل (Bhattacharya and patra, 1968; AL –Ane, 1998)، لتقليل تأثير الازاحة النظرية من خلال جعل النسبة (MN/AB) لا تساوي (1/3) و (1/4) ، وتقلليهما قدر المستطاع في جدول القياسات ، وكما في الجدول (1-2) ، وقد اثبت هذا الجدول فعالية عالية في التخلص من هذه الازاحة .

جدول (1-2):- يظهر المسافة بين الاقطاب لكل قياس من قياسات المقاومة النوعية (ρ_a) (Al-Zubedi, 2009) ومعدل عن (AL-Ane,1998).

NO.	AB/2	MN/2	MN/AB	ρ_a Ω.m
1	1.5	0.25	1/6	
2	2	0.25	1/8	
3	3	0.25	1/12	
4	3	0.5	1/6	
5	4	0.5	1/8	
6	5	0.5	1/10	
7	6	0.5	1/12	
8	5	1	1/5	
9	6	1	1/6	
10	8	1	1/8	
11	10	1	1/10	
12	8	2	¼	
13	10	2	1/5	
14	15	2	1/7.5	
15	20	2	1/10	
16	25	2	1/12.5	
17	20	5	¼	
18	25	5	1/5	
19	30	5	1/6	
20	40	5	1/8	
21	50	5	1/10	
22	40	10	¼	
23	50	10	1/5	
24	60	10	1/6	
25	80	10	1/8	
26	100	10	1/10	
27	100	20	1/5	
28	120	20	1/6	
29	140	20	1/7	
30	160	20	1/8	
31	200	20	1/10	
32	200	40	1/5	
33	250	40	1/6.25	

b - ازاحة عدم التجانس Inhomogeneities Displacement

إن هذه الإزاحة هي جزء من الإزاحة بين أفرع المنحني الحقلي، والناتجة من تأثير عدم التجانس السطحي Near Surface Inhomogeneity على قطبي الجهد (M) و (N) لأنهما دائماً قريبان من بعضهما. أما تأثير عدم التجانس على قطبي التيار (A) و (B) فيكون في الغالب قليل لأنهما دائماً

متباعدان، وهذا ينتج عنه تبعثر في قيم المقاومة النوعية الظاهرية، وتحدث هذه الإزاحة بامتداد المحور الرأسي (Y-axis) كما ورد في Kunetz, (1966) و Zohdy, (1974).

وهذه الإزاحة ليس لها علاقة بالنسبة (MN/AB) كما في الإزاحة النظرية، لذلك لا يمكن التقليل من تأثيرها، ولكن يتم تصحيحها بربط أفرع المنحني الحقلي مع بعضها بإجراء إزاحات إلى الأعلى والأسفل بامتداد المحور الرأسي (Y-axis).

2-2-3 تفسير بيانات الجس الكهربائي العمودي (VES) Interpretation of (VES) Data

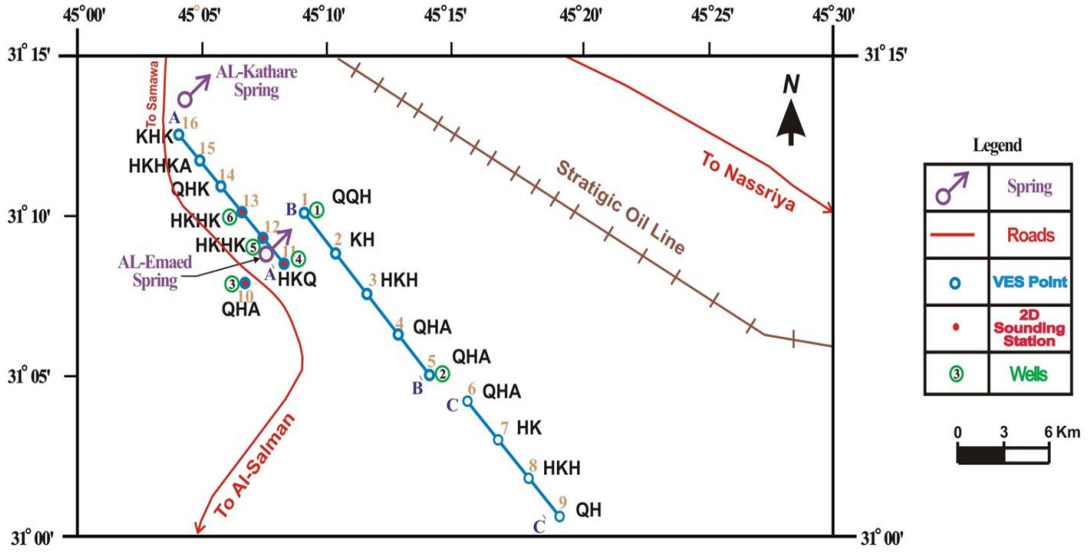
بعد اكمال عملية المعالجة لبينات الجس الكهربائي العمودي وإزالة كافة التشوهات من المنحنيات ، يتم تفسيرها بطريقتين ،الاولى تسمى بالتفسير النوعي أو الوصفي Qualitative Interpretation، والثانية تعرف بالتفسير الكمي Quantitative Interpretation ، إن الهدف من استخدام هذه الطرق هو تحديد قيم المقاومة النوعية وسمك الأنطقه الكهربائية تحت السطحية، وربط نتائج التفسير مع المعلومات الجيولوجية ، والتركيبة والهيدروجيولوجية واي معلومات متوفرة عن منطقة الدراسة لغرض دراسة خواص هذه الأنطقه وتغايرها العمودي والأفقي لمعرفة الوضع تحت السطحي للمنطقة، (Bhattacharya and Patra, 1968; Keller and Frischkncht, 1970; Zohdy, 1974).

2-2-3-1 طريقة التفسير النوعي Qualitative Interpretation Method

ان الهدف من استخدام هذا النوع من التفسير هو الحصول على تقييم أولي حول طبيعة المنطقة، وإعطاء فكرة أولية عن عدد الأنطقه الكهربائية لكل منحي عن طريق دراسة شكل المنحنيات، وملاحظة نقاط الانقلاب Inflection Point في هذه المنحنيات، و التي تظهر نتيجة تغير الخواص الكهربائية للطبقات الصخرية (Griffiths and King, 1981). في هذا النوع من التفسير لا يتم تحويل قيم المقاومة النوعية الظاهرية الى قيم مقاومة نوعية حقيقة وانما فقط وصف التغيرات في هذه القيم ، لذلك سمي بالتفسير الوصفي . ينفذ هذا النوع من التفسير بواسطة اربعة اساليب ، وهي كالاتي :-

A- دراسة انواع المنحنيات الحقلية لـ(VES) Study the Curve Types of VES

في هذا الأسلوب تصنف المنحنيات الحقلية إلى عدة مجاميع اعتماداً على أشكالها ،وتوزع على خطوط المسح التي اجريت فيها ضمن خارطة منطقة الدراسة، ويتم وصف انواع كل مجموعة على حده . يوفر هذا الأسلوب تقييماً أولياً عن عدد الأنطقه الكهربائية في كل منحني، و التغيرات العمودية لقيم المقاومة النوعية الظاهرية وتوزيعها في منطقة الدراسة ، إذ يمكن معرفة هذه المعلومات لأي منطقة بمجرد النظر لأشكال المنحنيات الحقلية وتوزيعها، (Griffiths and King , 1981) ، والشكل التالي (2-14) ، مثال لدارسة (Al-Zubedi, 2009)، في منطقة الرحاب من محافظة المثنى، والذي يظهر كيفية توزيع المنحنيات الحقلية في منطقة الدراسة.



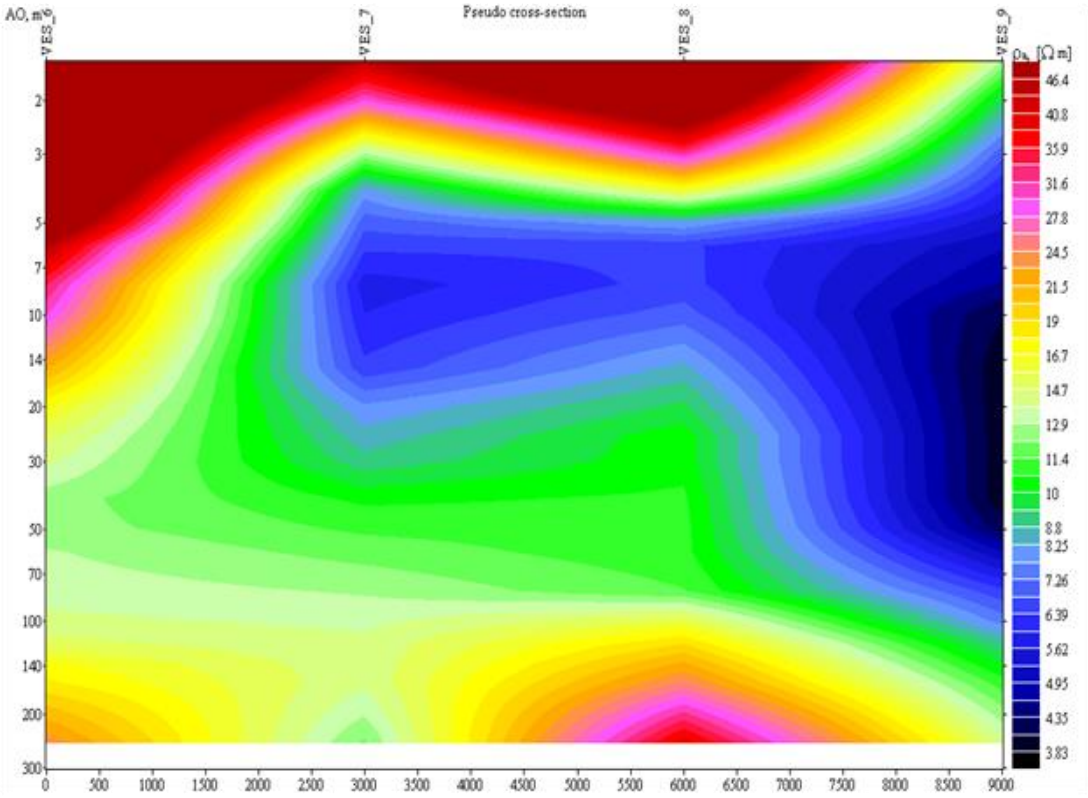
شكل (2-14):- يوضح توزيع المنحنيات الحقلية في منطقة الرحاب ضمن محافظة المثنى ،من (Al-Zubedi, 2009).

B- المقاطع العرضية الكاذبة للمقاومة النوعية الظاهرية

Apparent Resistivity Pseudo Cross – Section

تعتبر هذه المقاطع أحدى أهم طرائق التفسير النوعي والتي تعطي تقييم اولي عن التغيرات الأفقية والعمودية الحاصلة في قيم المقاومة النوعية الظاهرية مع زيادة مسافة نشر الأقطاب (AB/2). حيث ترسم هذه المقاطع عن طريق إسقاط نقاط الجس الكهربائي لخط مسح معين على المحور الأفقي العلوي، ومسافة طول خط المسح على المحور الافقي الاسفل، اما المحور العمودي فيمثل منتصف مسافة نشر أقطاب التيار (AB/2)، وكما في الشكل (2-15)، ثم تسقط قيم المقاومة النوعية لكل نقطة جس كهربائي مع كل مسافة نشر بشكل عمودي، ثم يتم توصيل القيم المتساوية بخطوط كنتورية وذلك لتوضح التغيرات الجانبية والعمودية الحاصلة في قيم المقاومة النوعية الظاهرية، وهي بذلك تعطي صورة ثنائية البعد عن التغيرات العمودية والافقية تحت سطح الارض. سميت هذه المقاطع بالكاذبة لان منتصف المسافة بين اقطاب التيار(AB/2) لا تمثل العمق الحقيقي لهذه المقاطع. يستخدم غالباً في رسم هذه المقاطع مقياس خطي للمحور العمودي الذي يمثل منتصف المسافة بين أقطاب التيار (AB/2) بدلاً من المقياس اللوغاريتمي، وذلك لإهمال تأثير الطبقات القريبة من السطح (Zohdy et al., 1980). حاليا يتم رسم هذه المقاطع بواسطة الحاسبة من خلال برامج التفسير العديدة الخاصة بتفسير بيانات (VES) وليس يدويا. بعض الباحثين يسمي هذا الاسلوب بالمقاطع الكاذبة Pseudosection ، وهذه التسمية غير

صحيحة لكون المقاطع الكاذبة هي تقنية قياس يتم فيها استخدام الجس الكهربائي العمودي والافقي معا للحصول على التغيرات الافقية والعمودية في قيم المقاومة النوعية الظاهرية ، كما سيتم شرحه لاحقا.



شكل (2-15):- يوضح المقاطع العرضية الكاذبة للمقاومة النوعية الظاهرية، (Al-Zubedi, 2009).

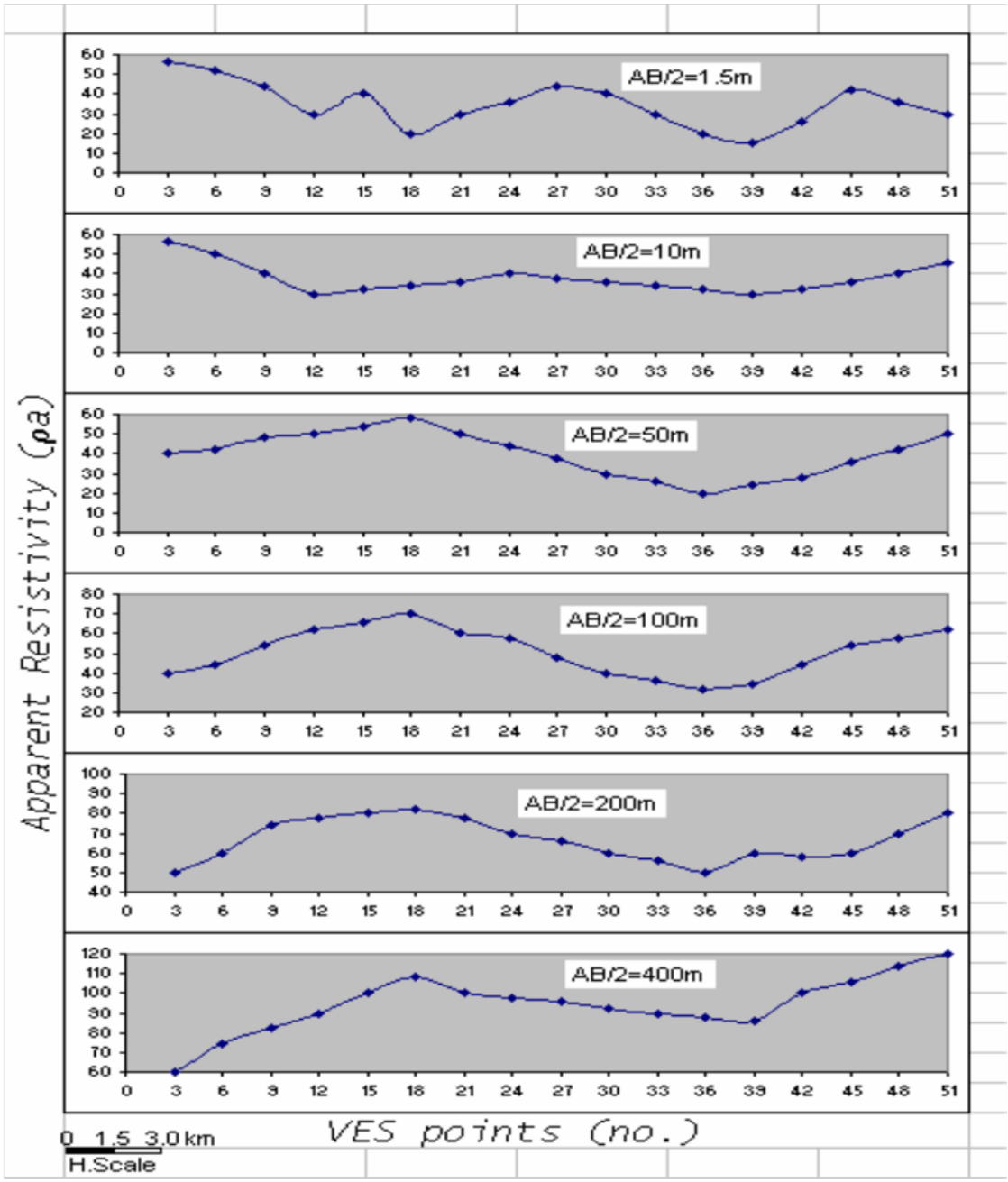
C- المقاطع الجانبية للمقاومة النوعية الظاهرية Apparent Resistivity Profiles

تعتبر المقاطع أو المسارات الجانبية إحدى اساليب التقييم النوعي والتي تظهر التغير في قيم المقاومة النوعية الظاهرية على امتداد خط مسح معين في نقاط الجس الكهربائي لمسافات نشر محددة بين الأقطاب، حيث ترسم هذه المقاطع من خلال اسقاط مواقع نقاط الجس الكهربائي على المحور الافقي، وقيم المقاومة النوعية الظاهرية على المحور العمودي وبمقياس رسم خطي، ولكل فاصلة قياس لمنتصف المسافة بين اقطاب التيار(AB/2)، ثم تجمع معا لغرض الحصول على تقييم أولي عن التغيرات الافقية والعمودية للقيم المقاومة النوعية مع العمق، وكما في الشكل (2-16). يستخدم هذا الاسلوب بشكل واسع في التحري عن الفوالق او الكسور تحت السطحية.

D- خرائط المقاومة النوعية الظاهرية Apparent Resistivity Maps

ويتم استخدام هذا الاسلوب من خلال اختيار فاصلة نشر معينة لمنتصف المسافة بين اقطاب التيار (AB/2)، وتسقط قيم المقاومة النوعية الظاهرية لها على مواقع نقاط الجس ضمن الخارطة

الطبوغرافية في الغالب ، ويتم الربط بين القيم المتساوية بخطوط كنتورية. ان الغرض من استخدام هذا الاسلوب هو تحديد وجود الفوالق تحت السطحية من خلال ملاحظة التغيرات الافقية (الجانبية) في قيم المقاومة النوعية .



شكل (2-16) :- يوضح المقاطع الجانبية للمقاومة النوعية الظاهرية ،(Amin,2008).

2-2-3-2 طريقة التفسير الكمي Quantitative Interpretation Method

تستخدم طريقة التفسير الكمي لبيانات الجس الكهربائي العمودي (VES) لتحديد قيم المقاومة النوعية الحقيقة وسمك وعمق جميع الطبقات الجيو كهربائية للمنحنيات الحقلية، ثم تعرض نتائج هذا

التفسير على شكل مقاطع جيو كهربائية او على شكل خرائط مقاومة نوعية حقيقة. تقسم طرق التفسير الكمي الى طريقتين ، الاولى تدعى طريقة التفسير اليدوي Manual Interpretation والثانية تدعى التفسير بواسطة البرامج الحاسوبية Interpretation by Computerized Programs .

2-2-3-2-1 التفسير اليدوي Manual Interpretation

هناك طريقتان أساسيتان تستخدمان لغرض التفسير الكمي للمنحنيات الحقلية يدوياً، وكلا الطريقتان تعتمدان على المقارنة بين المنحنيات الحقلية والمنحنيات النظرية القياسية، تدعى الأولى بطريقة التطابق الكامل Complete Curve Matching والتي تحتاج إلى عدد كبير من المنحنيات القياسية Standard Curves ثنائية وثلاثية ورباعية الطبقة، معدة مسبقاً لغرض التفسير الكمي. المنحنيات القياسية هذه منشورة في عدة مصادر منها على سبيل المثال، (Orellana and Mooney, 1966).

تعتبر طريقة التطابق الكامل للمنحني Complete Curve Matching ذات استخدام محدود لكونها تعتمد على إيجاد أفضل تطابق كامل للمنحني الحقلي مع المنحني النظري القياسي، كما أنها تحتاج إلى عدد كبير من المنحنيات النظرية القياسية وبذلك تحتاج إلى وقت وجهد كبيرين، إضافة إلى عدم توفر منحنيات نظرية قياسية خماسية وسداسية الطبقة، لذا يفضل استخدام الطريقة الثانية والتي تدعى بطريقة التطابق الجزئي للمنحني الحقلي Partial Curve Matching أو طريقة النقطة المساعدة Auxiliary Point Method ،والتي يتم فيها مطابقة أجزاء المنحني الحقلي مع المنحنيات ثنائية أو ثلاثية الطبقة، مع استخدام أربعة مخططات بيانية مساعدة Auxiliary Graphs وهي (Q) و(K) و(H) و(A).

هنالك طريقة للتفسير الكمي تستخدم فقط لتفسير نتائج الجس الكهربائي العمودي (VES) ، لمنحنيات ترتيب فنر ،وتسمى الرسم التصاعدي Cumulative plot $\sum \boldsymbol{\rho_a}$ ، وسيتم شرحها ايضا.

A – طريقة التطابق الكامل Complete Curve Matching

تعتمد هذه الطريقة في التفسير على المقارنة بين المنحنيات الحقلية و المنحنيات النظرية القياسية من خلال اجراء عملية التطابق الكامل بواسطة مجاميع من المنحنيات ثنائية وثلاثية ورباعية الطبقة . ويمكن ايجاز خطوات التفسير بهذه الطريقة لمنحني حقلي ثلاثي الطبقة كما يلي ، وكما ورد في Orellana and Mooney, (1966) و Keller and Frischnicht , (1966) :-

1- رسم المنحني الحقلي على ورقة شفافة لوغاريتميه Log-Log ذات معامل يساوي 62.5 مليمتر لكل دورة Cycle، ثم يحدد نوع المنحني (A,K,H,Q) وبعد ذلك يتم تحديد مجموعة المنحنيات النظرية التي لها نفس شكل المنحني الحقلي.

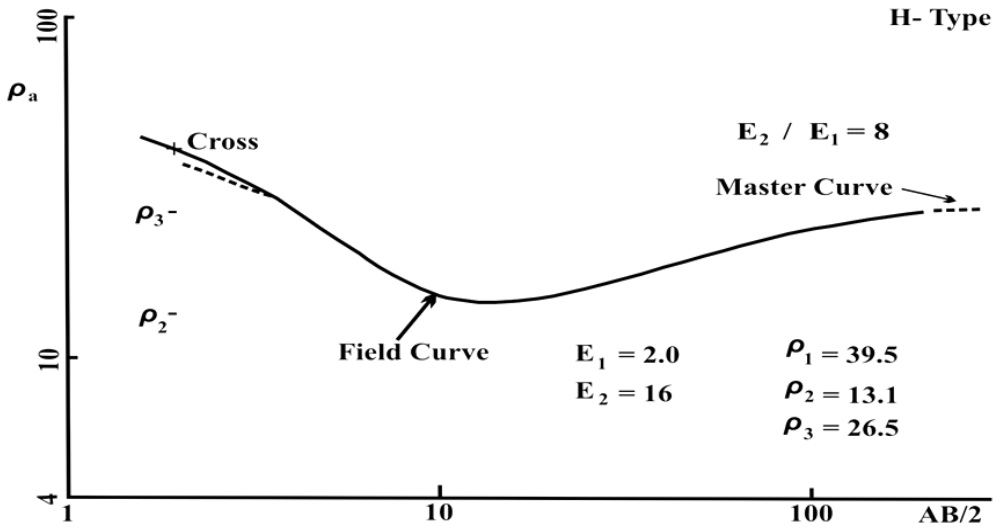
2- توضع الورقة اللوغاريتمية الشفافة على ورقة المنحنيات النظرية القياسية ، لا يجاد افضل تطابق بين المنحني الحقلي وأحد المنحنيات النظرية المشابهة له والتي حددت له في الخطوة الاولى على ان تكون المحاور متوازية.

3- توضع علامة Cross (+) على الورقة الشفافة تشير الى المركز الاحداثي Coordinate Origin للمنحني القياسي النظري ، وعلامة الى (ρ_2) واخرى الى (ρ_3)، ثم نعيين نسبة السمك (E_2/E_1) من المنحني النظري الذي تطابق بالشكل مع المنحني الحقلي، وكذلك نعيين النسبة للمقاومات النوعية للطبقات.

4- السمك للطبقة الاولى (E_1) يمثل الاسقاط العمودي لعلامة Cross (+) على المحور الافقي ، اما السمك للطبقة الثانية (E_2) فيحسب من النسبة (E_2/E_1) ، والتي تساوي (8)، كما في المثال المعطى والذي يظهر في الشكل (17-2).

5- المقاومة النوعية للطبقة الاولى (ρ_1) ، تمثل الاسقاط الافقي لعلامة Cross (+) على المحور العمودي الذي يمثل قيم المقاومة النوعية الحقيقة، اما المقاومة النوعية للطبقة الثانية والثالثة ، فيتم تحديدهما اعتمادا على النسبة التي يتم اعطاءها ضمن المنحني النظري او من خلال العلامتين (ρ_2) و (ρ_3) التي تم تحديدهما في الخطوة (3).

6- اذا لم يتطابق المنحني الحقلي مع اي منحني نظري بشكل كامل ، في هذه الحالة نستخدم طريقة الاستنباط Interpolation لمعالجة هذه الحالة.



شكل (17-2) :- يوضح التفسير بواسطة طريقة تطابق المنحني الكامل لمنحني حقلي ثلاثي الطبقة ، (AL-Ane,1983) .

B- طريقة التطابق الجزئي للمنحني Partial Curve Matching Method

وهي طريقة تفسير بيانية تستخدم لتفسير المنحنيات الحقلية متعددة الطبقات باستخدام منحنيات نظرية ثنائية وثلاثية الطبقة ومخططات بيانية مساعدة Auxiliary Graphs وهي (Q) و(K) و(H) و(A)، لذلك تسمى ايضا بطريقة النقطة المساعدة Auxiliary Point Method. إن أساس تطبيق هذه الطريقة يعتمد على تقليل عدد الطبقات، وذلك عن طريق دمج طبقتين أو أكثر إلى طبقة واحدة ذات مقاومة زائفة وسمك زائف Fictitious Resistivity and Thickness، لذا تدعى بالطبقة الزائفة Fictitious Layer، كما جاء في (Orellana and Mooney, 1966; Keller and Frischkncht, 1970).

إن عملية التفسير بطريقة التطابق الجزئي او النقطة المساعدة تتم بطريقتين، تدعى الأولى بطريقة أوريلانا Orellana Method ، وتستعمل لتفسير نوعين من المنحنيات الحقلية وهي (A) و(H)، أما الطريقة الثانية فتدعى بطريقة إيبرت Ebret Method ، وهي الأكثر استخداماً لإمكانية تفسيرها جميع أنواع المنحنيات الحقلية. في ادناه مثالان لمنحنين حقليين تم تفسير الاول بواسطة طريقة أوريلانا، والثاني بطريقة إيبرت ، ووفق الخطوات التالية كما ورد في (AL –Ane, (1983 :-

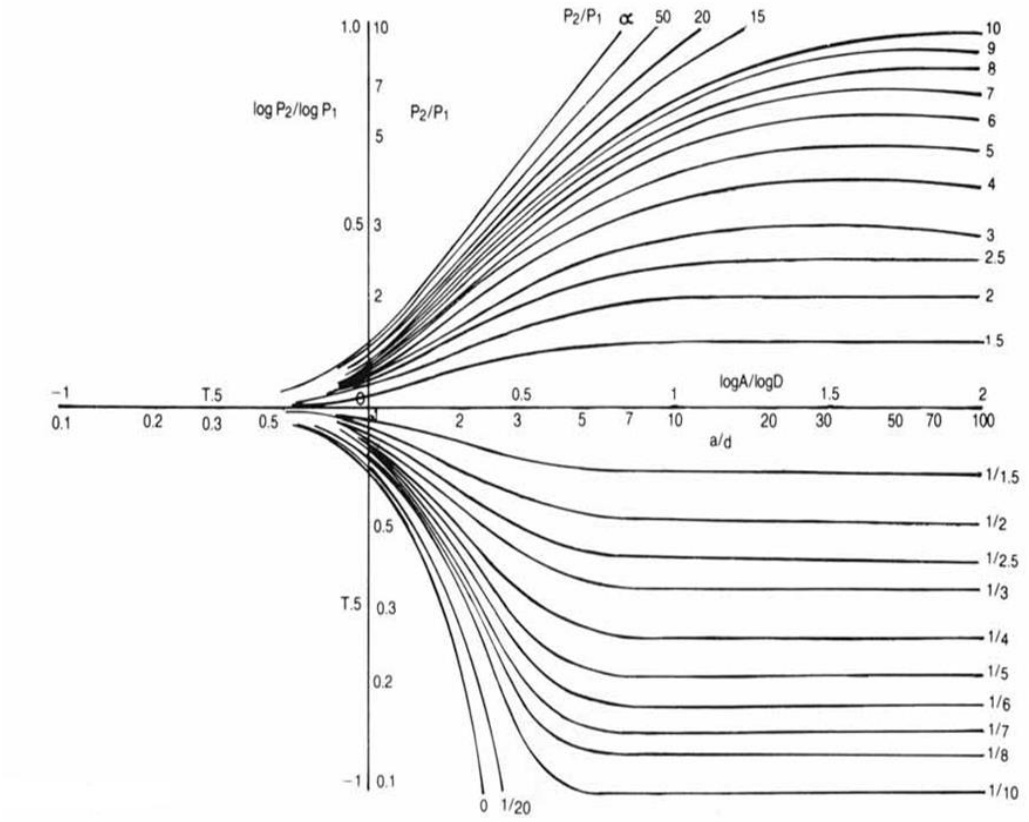
1- يطابق الجزء الايسر من المنحني الحقلي مع المنحنيات النظرية ثنائية الطبقة ،شكل (18-2)،وتوضع علامة (1) Cross على المنحني الحقلي وتشير الى المركز الاحداثي Coordinate Origin للمنحنيات ثنائية الطبقة ، وعلامة اخرى الى ($\boldsymbol{\rho_2}$)، وتحسب قيمة السمك للطبقة الاولى($\mathbf{E_1}$) وقيمة المقاومة النوعية لها ($\boldsymbol{\rho_1}$) ، من خلال اسقاط علامة (1) Cross على المحور الافقي والعمودي للمنحنيات النظرية ثنائية الطبقة . اما بالنسبة لقيمة ($\boldsymbol{\rho_2}$) فتحدد من خلال اسقاط العلامة التي وضعناها على المحور العمودي.

2- يرسم خط افقي على الورقة الشفافة اللوغاريتمية للمنحني الحقلي يقابل قيمة ($\boldsymbol{\rho_2}$).

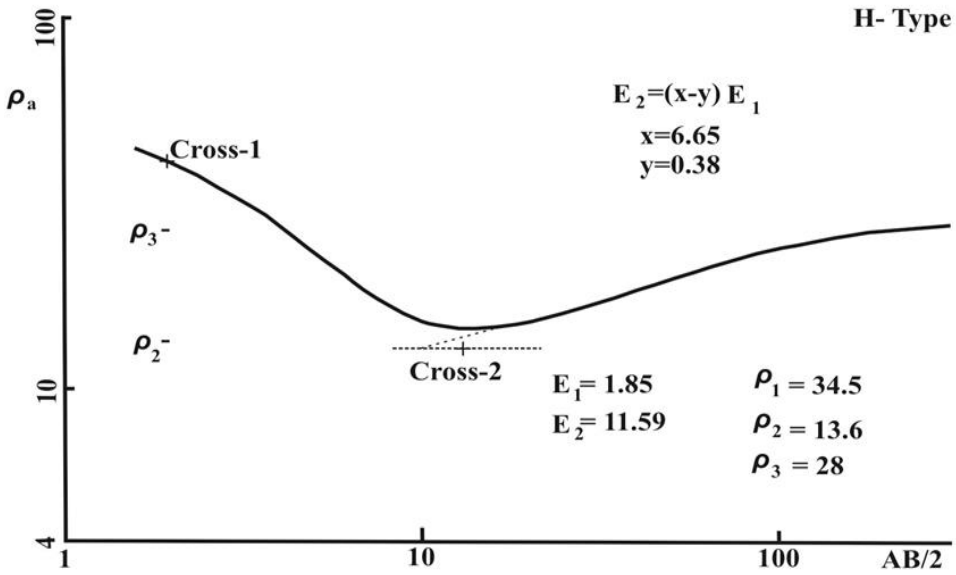
3- توضع ورقة المنحني الحقلي على ورقة المنحنيات النظرية ثنائية الطبقة ، حيث يقع المركز الاحداثي للمنحنيات النظرية على الخط الافقي الذي يمثل قيمة ($\boldsymbol{\rho_2}$).

4- يتم تحريك الورقتين بحيث تبقى المحاور متوازية، الى ان يتطابق الجزء الايمن للمنحني الحقلي مع احد المنحنيات النظرية ، وتوضع علامة (2) Cross تشير الى المركز الاحداثي للمنحنيات النظرية ، وعلامة اخرى تشير الى قيمة ($\boldsymbol{\rho_3}$) ، وكما في الشكل (19-2).

5- بعد ذلك توضع الورقة الشفافة للمنحني الحقلي على ورقة لوغارتمية اخرى لها نفس المقياس ، وتوضع العلامة (1) Cross على نقطة احداثياتها (1-1) في الورقة اللوغاريتمية ، بحيث تبقى المحاور متوازية.



شكل (2-18):- المنحنيات النظرية القياسية Master Curves ثنائية الطبقة ,(USGS,2010).



شكل (2-19):- يوضح عملية تفسير المنحني الحقلي ثلاثي الطبقة بواسطة طريقة أوريلانا ،-AL Ane,1983).

6- نقرأ احداثيات العلامة (1) Cross على الورقة اللوغاريتمية ، حيث الاحداثي الافقي يمثل (X) والاحداثي العمودي يمثل (Y) ، لذلك سمك الطبقة الثانية يساوي :-

$$E_2=(X-Y)\,E_1$$

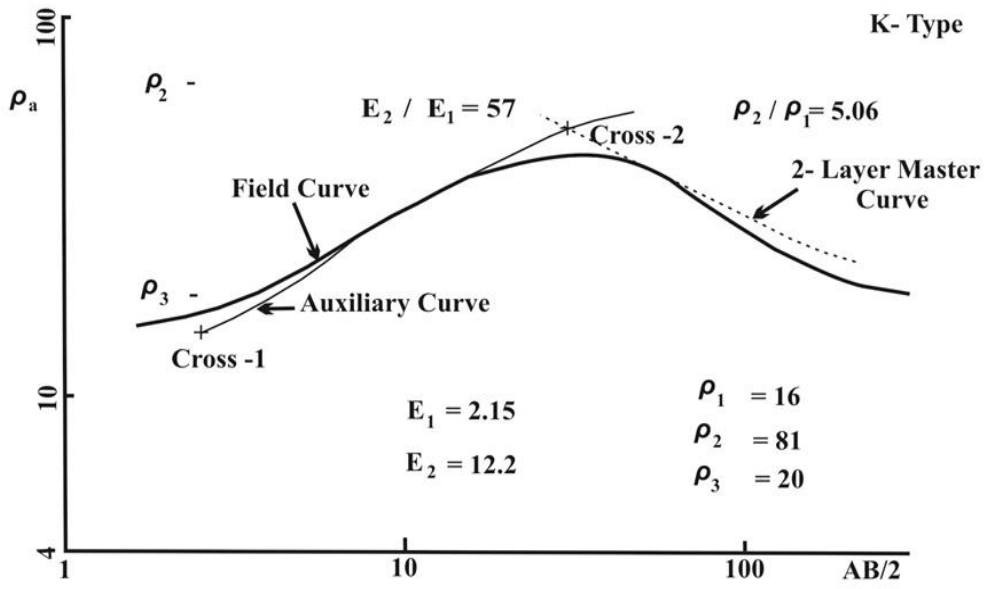
ويمكن حساب قيمة سمك الطبقة الثانية بطريقة اخرى ، عندما تكون ورقة المنحني الحقلي على الورقة اللوغاريتمية كما في الخطوة (5) ، حيث يمكن قراءة المحور الافقي على ورقة المنحني الحقلي والتي تقابل القيمة (X-Y) على الورقة اللوغاريتمية ، وهي تمثل قيمة ($\mathbf{E_2}$).

المثال الثاني هذا يوضح تفسير المنحنيات الحقلية بواسطة طريقة إيبرت، وحسب الخطوات التالية :-

1- يعين نوع المنحني الحقلي كنوع (A, K, Q, H) ويحدد نوع المخطط المساعد الملائم له.

2- يطابق الجزء الأيسر للمنحني الحقلي مع المنحنيات النظرية ثنائية الطبقة وتوضع علامة Cross (1) ، والتي تشير إلى المركز الإحداثي للمنحنيات ثنائية الطبقة، وعلامة (ρ_2)، ومن ثم تعين النسبة (ρ_2/ρ_1).

3- وتحسب قيمة ($\mathbf{E1}$)، (ρ_1) للطبقة الأولى، حيث تمثل على التوالي الإحداثي الأفقي والعمودي لـ(1) Cross. أما قيمة (ρ_2) فتعين من العلامة (ρ_2) أو من النسبة (ρ_2/ρ_1) وكما في الشكل (20-2).



شكل (20-2):- يوضح عملية تفسير المنحني الحقلي ثلاثي الطبقة بواسطة طريقة إيبرت، (AL-Ane,1983).

4- توضع الورقة الشفافة للمنحني الحقلي على ورقة المخطط المساعد، وكما في الشكلين (21-2) و (22-2) بحيث تكون المحاور متعامدة. بالنسبة إلى النوع (H) و (Q) توضع العلامة (1) Cross على

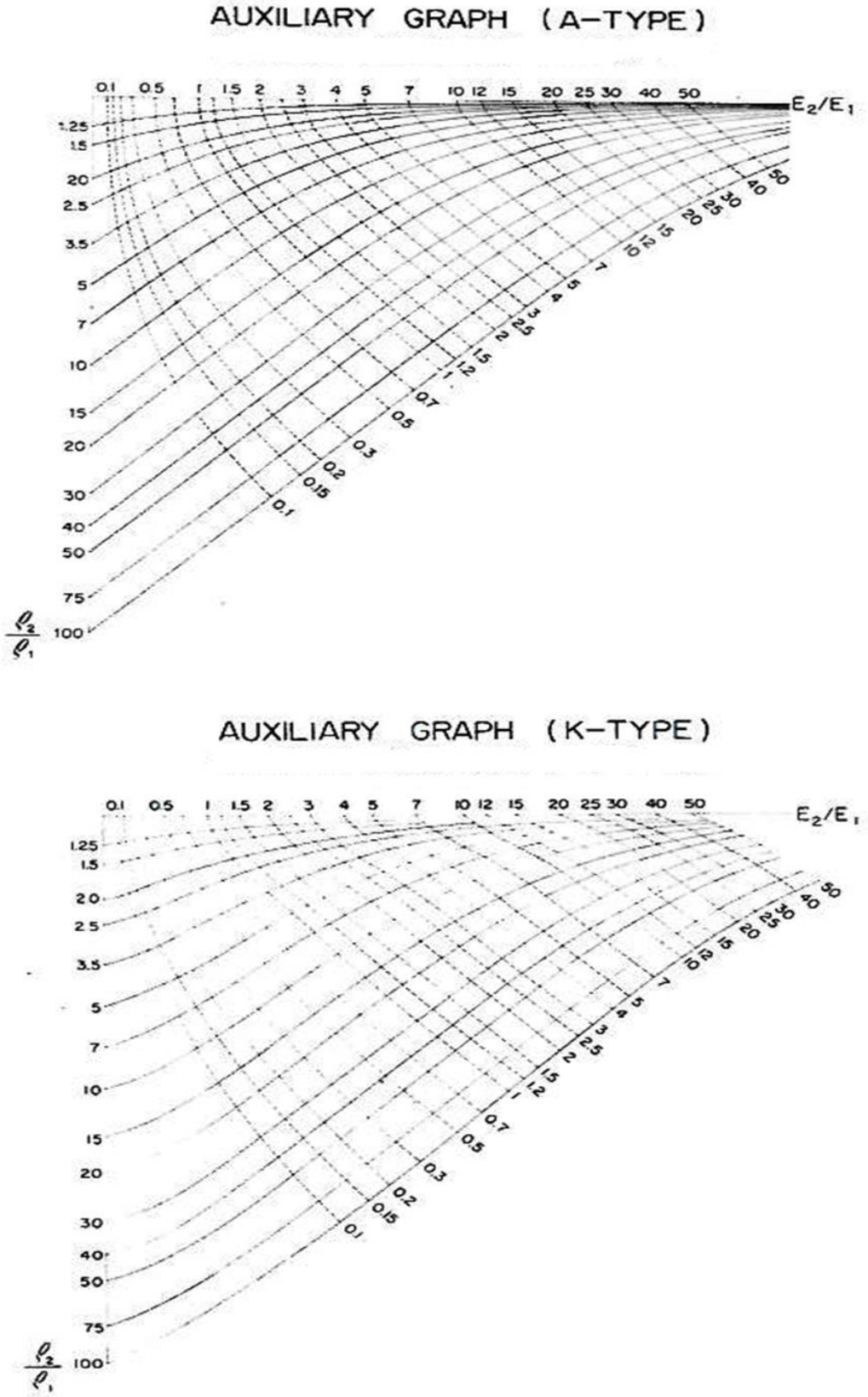
المركز الإحداثي للمخطط المساعد. أما في حالة النوعين (A) و (K) فتوضع العلامة (1) Cross على المحور العمودي للمخطط المساعد وفي موقع عمودي يساوي القيمة (ρ_2/ρ_1).

5- يتم اختيار المنحني المساعد الذي يقابل القيمة (ρ_2/ρ_1)، ويرسم هذا المنحني على الورقة الشفافة للمنحني الحقلي من العلامة (1) Cross.

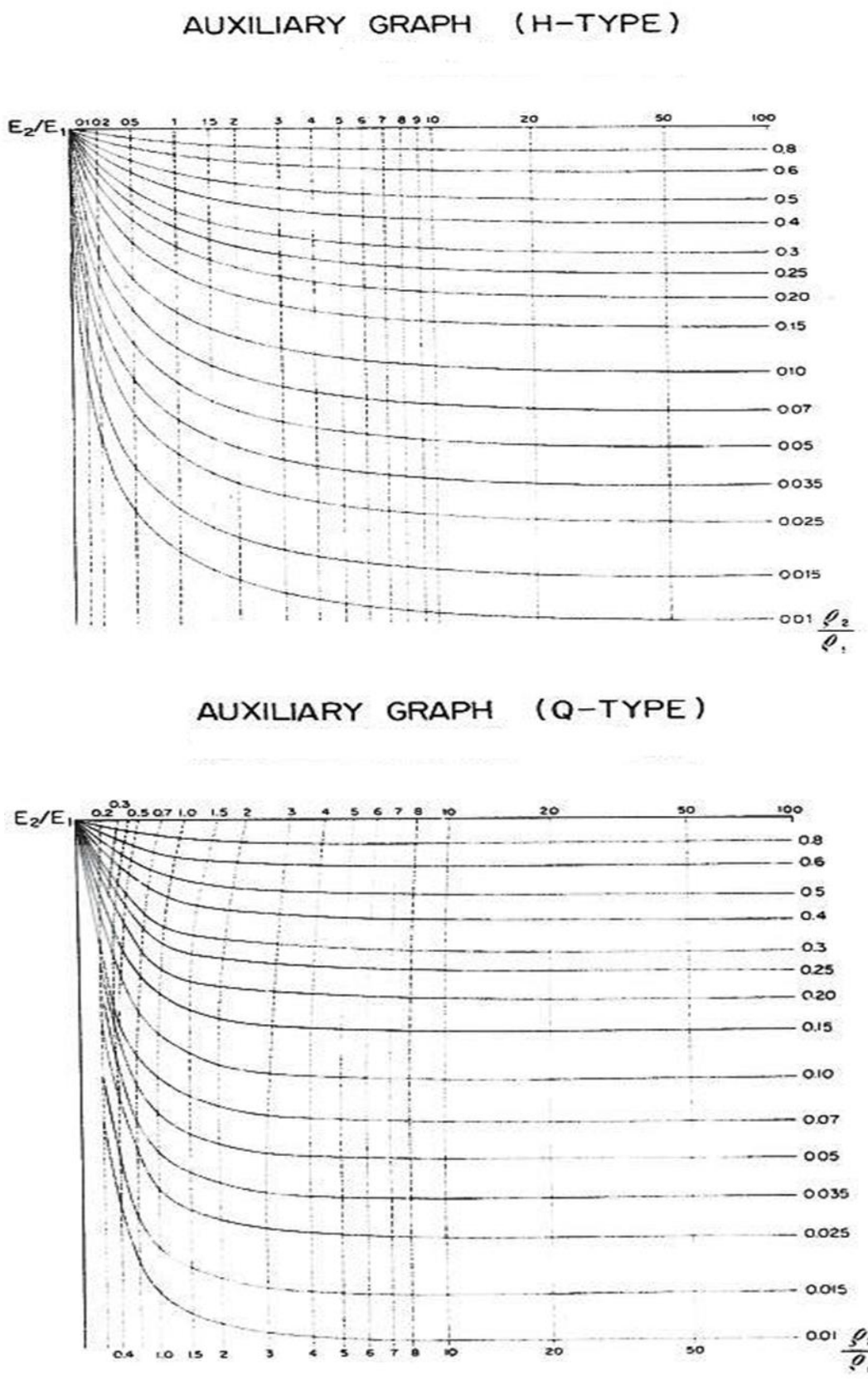
6- توضع الورقة الشفافة للمنحني الحقلي على ورقة المنحنيات النظرية ثنائية الطبقة، بحيث يقع المركز الإحداثي للمنحنيات النظرية على المنحني المساعد وبشرط أن تكون المحاور العمودية والأفقية للمنحنيين متوازية. ثم تحرك الورقتان إلى أن يتطابق الجزء الأيمن من المنحني الحقلي مع أحد المنحنيات النظرية ثنائية – الطبقة.

7- توضع العلامة (2) Cross على الورقة الشفافة للمنحني الحقلي والتي تشير إلى المركز الإحداثي للمنحنيات النظرية، وعلامة للمقاومة تعطي القيمة (ρ_3).

8- توضع ورقة المنحني الحقلي مرة أخرى على ورقة المخطط المساعد، بحيث تكون العلامة Cross (2) ، في نفس الموقع كما في الخطوة (4). في هذه الحالة سوف تقع العلامة (2) Cross على أو بالقرب من أحد الخطوط المتقطعة Dashed التي تمثل قيمة النسبة (**E2/E1**)، لذلك يمكن حساب قيمة (E2) والتي تمثل سمك الطبقة الثانية. في جميع المنحنيات، الطبقة الاخيرة لا يمكن تحديد سمكها لأننا لا نعلم الى أي عمق تستمر. لمزيد من التفاصيل حول تفسير المنحنيات رباعية وخماسية الطبقة او ...الخ، يرجى مراجعة (Orellana and Mooney, 1966; Keller and Frischnicht, 1970).



شكل (2-22) :- المخطط المساعد للمنحنيات الحقلية نوع (A) و(K)، (Orellana and Mooney, 1966).



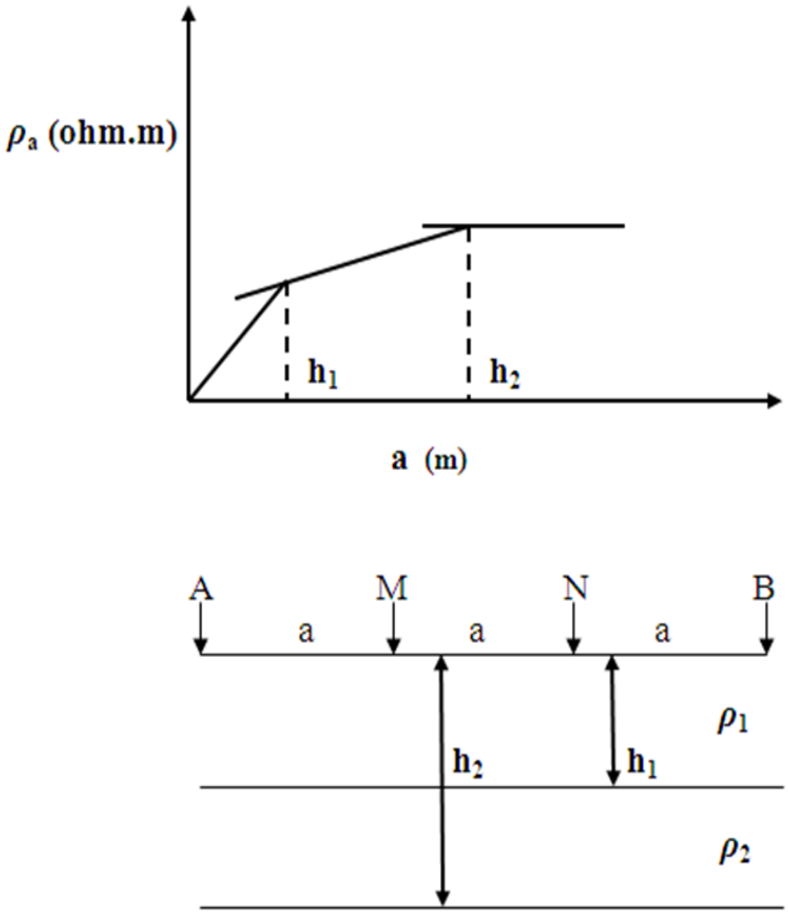
شكل (2-23) :- المخطط المساعد للمنحنيات الحقلية نوع (H) و(Q)، (Orellana and Mooney, 1966).

C- طريقة الرسم التصاعدي Cumulative plot $\sum \rho_a$

وهي احدى الطرق اليدوية التي تستخدم فقط لتفسير نتائج الجس الكهربائي العمودي المنفذ بواسطة ترتيب فنر تفسيرا كميا ، وهي تعطي معلومات جيدة عن الاعماق الضحلة ، ولكن لا يمكن ان تعطي اي معلومات عن الطبقات السمكية ، لذا يفضل استعمالها عندما تكون الزيادة في المسافة بين الاقطاب صغيرة وثابتة مقارنة مع سمك الطبقات. بشكل عام هذه الطريقة قديمة ولا تستعمل في الوقت الحاضر، وفي ادناه خطوات التفسير بهذه الطريقة ، وكما ورد في Telford et al., (1976).

1- ترسم قيم ($\boldsymbol{\rho_a}$) مقابل قيم المسافة بين الاقطاب (a) على ورق ليس بالضرورة لوغاريتميي، حيث يمثل المحور العمودي القيم التصاعدية لـ ($\boldsymbol{\rho_a}$) حاصل جمع قيم المقاومة النوعية الظاهرية ، بينما يمثل المحور الافقي قيمة (a) .

2- تمرر خطوط مستقيمة من نقاط التقاطعات للعلاقة الخطية بين ($\boldsymbol{\rho_a}$) و (a) ، وتسقط على المحور الافقي للتحديد الاعماق الى السطوح الفاصلة بين الطبقات ، وكما في الشكل (24-2).



شكل (24-2):- يوضح التفسير باستخدام طريقة الرسم التصاعدي ، (Telford et al., 1976).

2-2-3-2-2 التفسير بواسطة البرامج الحاسوبية Interpretation by Computerized Programs

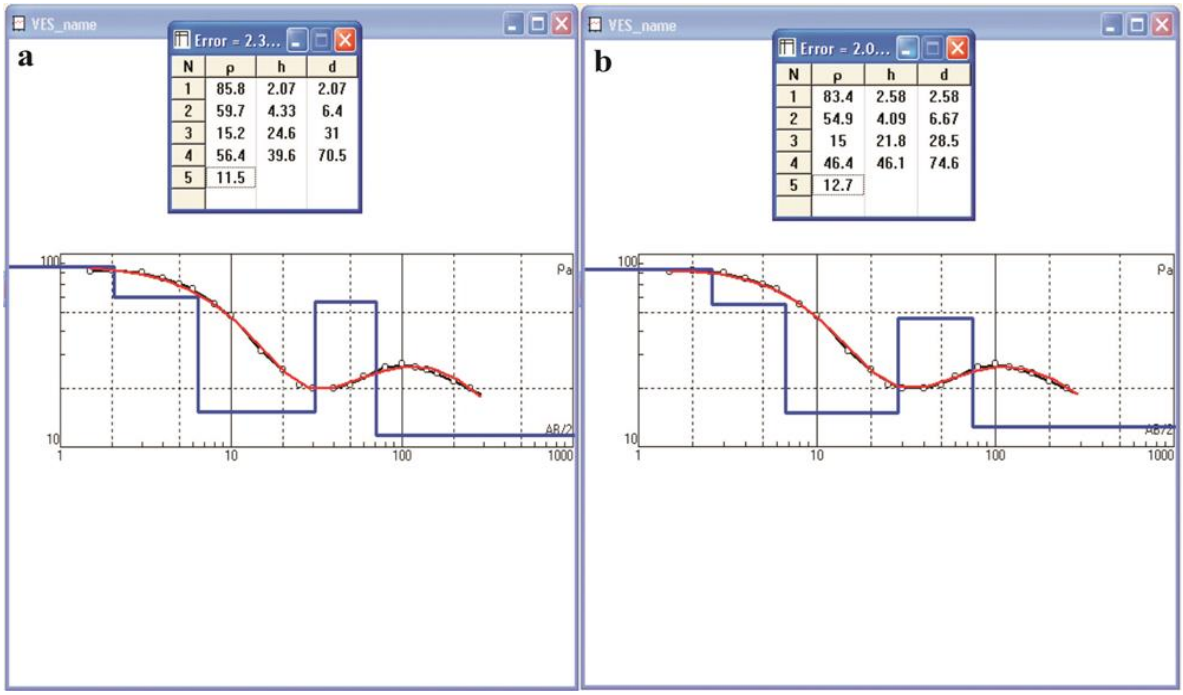
نتيجة التطور الكبير في مجال البرمجيات واجهزة الكمبيوتر في العقدين الاخرين من القرن الماضي ، ظهرت مجموعة كبيرة من برامج تفسير نتائج الجس الكهربائي العمودي (VES) مثل (RES1D, Resist, VES, IPI2win, IX1D) وغيرها من البرامج، ومن خلال الاطلاع على معظم الدراسات التي اجريت في العقدين الماضين وجد ان برنامج IPI2win هو الاكثر استخداما في التفسير الكمي والنوعي ، وذلك لسهولة استخدامه وإمكاناته الواسعة.

البرنامج مصمم لتفسير بيانات الجس الكهربائي العمودي (VES) ، وبيانات الاستقطاب المحتث (IP). يتميز هذا البرنامج بقدرته على تفسير بعض أجزاء المنحني الحقلي التي يصعب تفسيرها يدوياً ، كما يتميز هذا البرنامج بقدرته على تصميم ورسم مقاطع المقاومة النوعية الظاهرية الخاصة بالتفسير النوعي، ورسم المقاطع الجيوكهربائية Geoelectrical Sections بدلاً من رسمها يدوياً مما يوفر الجهد والوقت ، الميزة الاخيرة لهذا البرنامج هو استخدامه لتفسير جميع نتائج الجس الكهربائي العمودي (VES) المنجز بمختلف الترتيبات وليس فقط بترتيب شلمبرجر.

في هذا البرنامج طريقتان للتفسير الكمي، الأولى تدعى بطريقة الحساب الأمامي Forward Calculation والتي تتضمن إدخال قيم المقاومة النوعية الظاهرية (ρ_a) وقيم منتصف مسافة النشر لأقطاب التيار (AB/2) الى البرنامج، ثم يقوم البرنامج برسم المنحني الحقلي لهذه البيانات واجراء عملية التطابق بينه وبين المنحنيات النظرية القياسية المخزونة في ذاكرة البرنامج ، وبعد حصول افضل تطابق يقوم البرنامج بحساب السمك والعمق والمقاومة النوعية للأنطقة الكهربائية. أما الطريقة الثانية فتدعى بطريقة الموديل المعكوس Inverse Modeling التي تتضمن إدخال قيم المقاومة النوعية والسمك من المنحني الحقلي المفسر بالطريقة اليدوية إلى البرنامج (Bobachev, 2002)، ثم يقوم البرنامج بإجراء تعديل على نتائج التفسير اليدوي لتقليل النسبة المئوية لخطأ (RMS%) ، Root Mean Square Error ، والتي تمثل دالة للتطابق بين المنحني الحقلي مع المنحني النظري، إذ كلما كانت قيمة (RMS%) قليلة كان التطابق أفضل بين المنحنين ، ولكن هذا لا يعني بالضرورة ان عملية التفسير صحيحة ، فقد تكون النسبة عالية ولكن التفسير صحيح ويتطابق مع الوضع الموجود تحت سطح الارض. بشكل عام ، تستخدم طريقة الموديل المعكوس لتدقيق نتائج التفسير اليدوي.

في ادناه بعض الملاحظات حول استخدام برنامج التفسير هذا او البرامج الاخرى:-

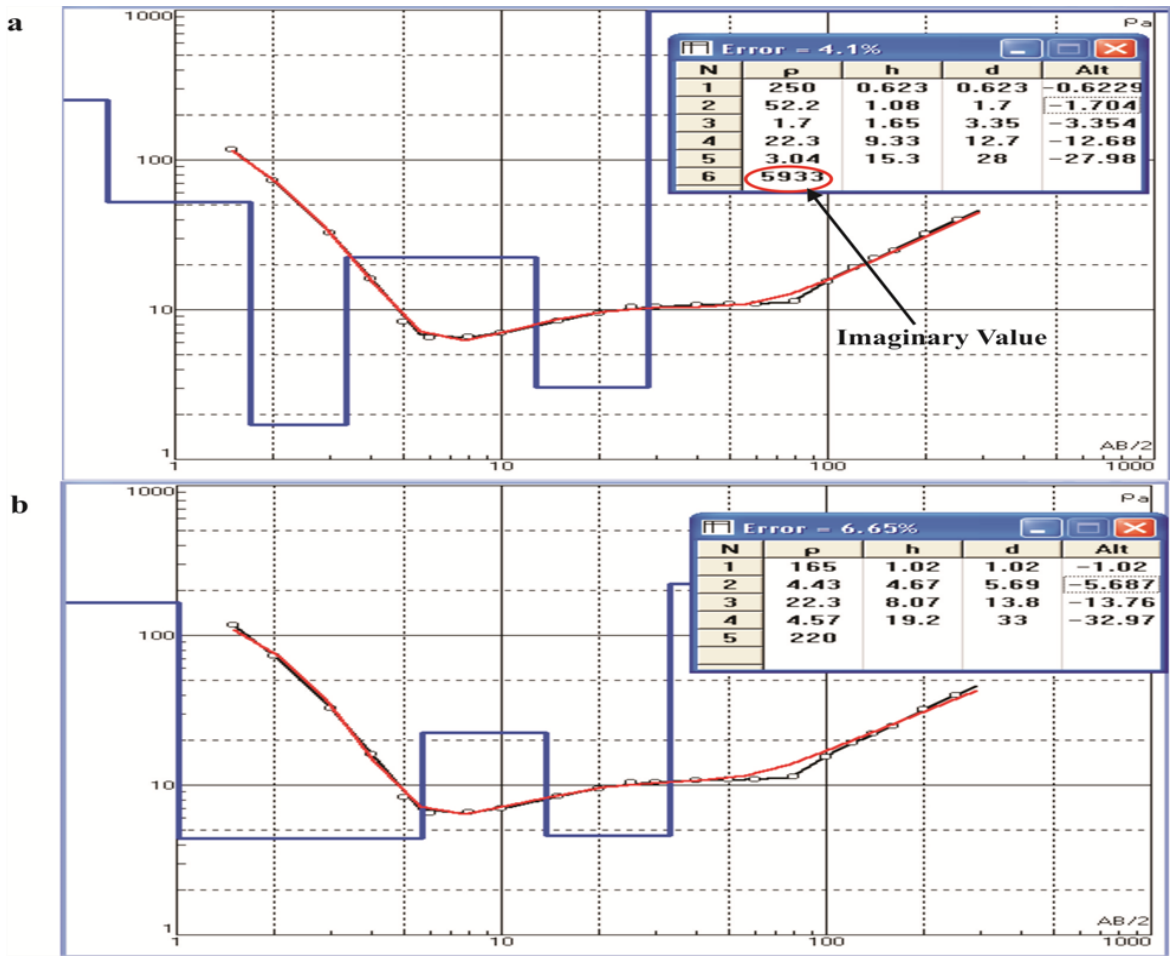
1- التفسير الدقيق والجيد يعتمد بشكل رئيسي على نوعية التهذيب Smoothing التي تجرى للمنحني ، فالتهذيب الجيد للمنحني يجعل نتائج التفسير جيده واكثر دقة وبكلا الطريقتين، وكما يظهر في الشكل (2-25).



شكل (2-25) :- يظهر تطابق نتائج التفسير للمنحني الحقلي نتيجة جودة عملية التهذيب ، a) بواسطة طريقة الحساب الامامي ، b) بواسطة طريقة الموديل المعكوس،(Al-Zubedi, 2009) .

2- في حالة وجود تغيرات مفاجئة ناتجة عن تغير في الخواص الكهربائية للطبقات ، والتي تظهر على المنحني الحقلي في نقاط الانقلاب ، فان افضل طريقة للتفسير هي طريقة الموديل المعكوس ، لان طريقة الحساب الامامي سوف تعطينا نتائج غير دقيقة وخيالية ، وكما في الشكل (2-26) ، حيث نلاحظ النطاق السادس في المنحني الحقلي كانت قيمة المقاومة النوعية له عالية جدا ولا تتطابق مع المعلومات المتوفرة عن الطبقات تحت السطحية المأخوذة من الابار القريبة ،عندما فسر بطريقة الحساب الامامي. لذا يجب أن يكون للمفسر دور في التفسير والسيطرة على طرق التفسير ونتائجها، وأن يمتلك خبرة كافية في استخدام البرامج.

3- ان طريقة الموديل المعكوس يمكن ان تستخدم من اجل تدقيق نتائج التفسير اليدوي للمنحني الحقلي وتحسينه ليتطابق مع المعلومات الجيولوجية التي يتم الحصول عليها من مقاطع الابار المحفورة ، وذلك من خلال استخدام مبدئي التكافؤ والاخماد Principles Suppression and Equivalence ، واللذين سوف يتم التطرق لهما في الموضوع التالي.



شكل (2-26) :- يظهر وجود قيمة خيالية وغير حقيقة للنطاق السادس في المنحني الحقلي عند تفسيره بطريقة الحساب الامامي. (a) بواسطة طريقة الحساب الامامي ، (b) بواسطة طريقة الموديل المعكوس،(Al-Zubedi, 2009) .

2-2-3-4 الغموض المكتنف في طريقة المقاومة النوعية الكهربائية

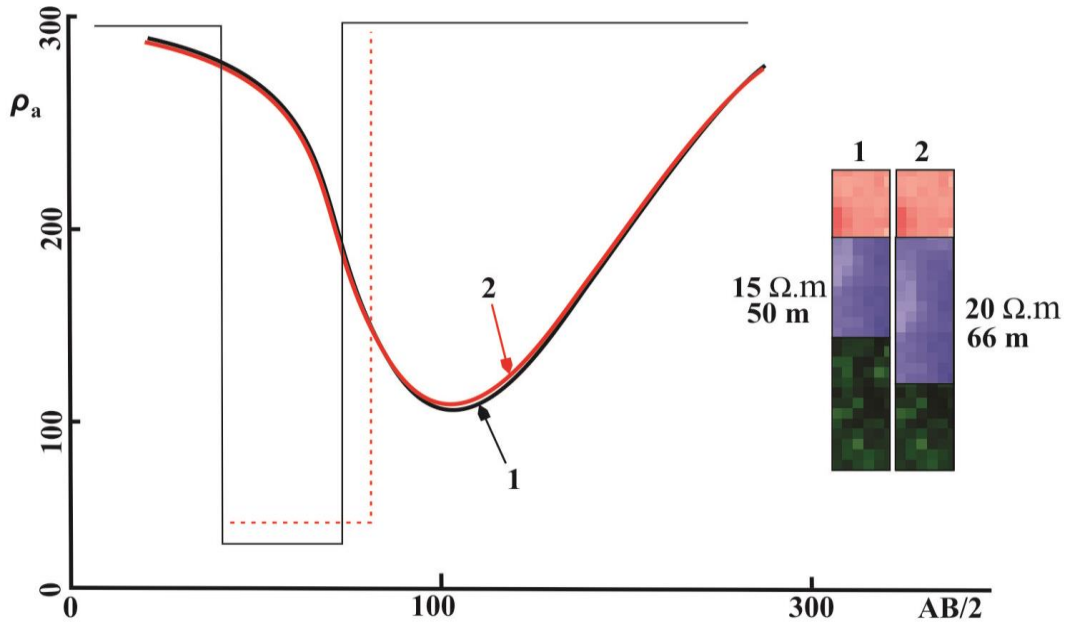
Ambiguity in Electrical Resistivity Method

طريقة المقاومة النوعية الكهربائية ، حالها حال جميع الطرق الجيوفيزيائية التي تعاني من عدم دقة نتائجها في بعض الاحيان، نتيجة الكثير من الاسباب وأهمها سمك الطبقات وقيمة المقاومة النوعية الحقيقة لها، وقد ارجع العلماء سبب هذه الحالة الى مبدئين هما التكافؤ والاخماد Principles of Suppression and Equivalence.

A- مبدأ التكافؤ Principle of Equivalence

يرتبط مبدأ التكافؤ بالطبقة التي مقاومتها النوعية إما أكثر أو أقل من الطبقات المحيطة بها. إذ لوحظ في حالة وقوع طبقة ذات مقاومة نوعية عالية بين طبقتين ذات مقاومة نوعية واطئة (توصيلة عالية) ، فأن تدفق التيار فيها سيكون بشدة أقل من الطبقات المحيطة بها، عندها ستظهر الطبقة نفسها على

المنحني الحقلي بواسطة مقاومتيها المستعرضة Transverse Resistivity والتي تمثل ناتج سمكها مضروبا بمقاومتها النوعية. أما في حالة وقوع طبقة ذات توصيلية عالية بين طبقتين ذات مقاومة نوعية عالية (توصيلة قليلة) ، فأن التيار سيتدفق في هذه الطبقة بشدة عالية وتظهر الطبقة نفسها على المنحني الحقلي عن طريق التوصيل الطولي Longitudinal Conductivity والذي يمثل حاصل قسمة سمكها على مقاومتها النوعية، (Flathe, 1955; Kunetz, 1966)، وكما في الشكل (27-2).



شكل (27-2) :- يظهر مبدأ التكافؤ لطبقة موصلة واقعة بين طبقتين ذوات مقاومة نوعية عالية، من الناحية العملية المنحيان متشابهين ، في المنحني رقم 1 طبقة وسطية ذات مقاومة نوعية (15 Ω.m) وسمك (50m)، اما في المنحني رقم 2 فان هذه الطبقة كانت لها مقاومة نوعية (20 Ω.m) وسمك (66m) ، معدل عن (Bentz,1961) ومأخوذ من (Sharma.1986) .

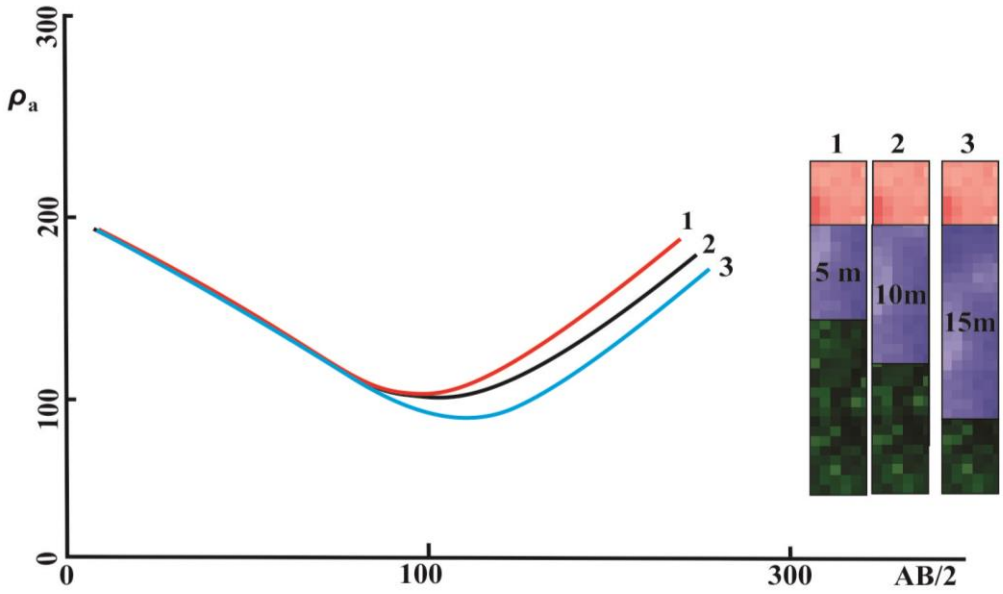
إن تأثير هذا المبدأ يقل مع زيادة سمك الطبقات (Flathe, 1955)، وتتم معالجة الغموض الناتج بفعل مبدأ التكافؤ باستخدام المخططات الأربعة التي وضعها بايليف (Pylaeve) لأنواع المنحنيات (A,K,H,Q) والمنشورة في (Bhattacharya and Parta, 1968)، و بعض المصادر الاخرى. كما يمكن معالجته أيضاً عن طريق استخدام برامج تفسير منحنيات الجس الكهربائي العمودي (VES) مثل برنامج (IPI2win) ،او اللجوء إلى معلومات الآبار المحفورة في المنطقة للتدقيق سمك الطبقات ومعرفة نوعها وتخمين مقاومتها النوعية، (Flathe, 1955; Kunetz, 1966).

B- مبدأ الإخماد Principle of Suppression

يرتبط مبدأ الإخماد بالطبقات التي تمتلك مقاومة نوعية وسطية بين مقاومات الطبقات المحيطة بها، لذلك لا تظهر على المنحني الحقلي ، طالما إن سمكها ليس كبيراً بما فيه الكفاية ، ويكون لها تأثير وتظهر على المنحني الحقلي عندما يكون سمكها كبير. لذا يكون تأثير تلك الطبقة ذات السمك القليل والمقاومة النوعية الوسطية غير محسوس على المنحني الحقلي ، وكما في الشكل (2-28).

يحصل هذا الفشل في تحديد الطبقات ذات المقاومة النوعية الوسطية بصورة معتادة في دراسات المياه الجوفية عندما تقع طبقة من الرواسب النهرية الرطبة بين طبقة نهرية جافة (الطبقة السطحية) وطبقة الطفل (Shale) التي تقع في الاسفل ،(Kunetz, 1966).

يستطيع المفسر ذو الخبرة الواسعة اظهار مثل هذه طبقات عند استخدام برامج التفسير ، من خلال فصل الطبقة الى اكثر من طبقة خصوصا اذا توفرت معلومات ليثولوجية من مقاطع الابار المحفورة في منطقة الدراسة.



شكل (2-28) :- يظهر مبدأ الاخماد لطبقة موصلة واقعة بين طبقتين ذوات مقاومة نوعية عالية، هذه الطبقة لن تظهر على المنحني الحقلي رقم 1 ، ولكن تظهر مع بداية زيادة سمكها ، كما في المنحنيين 2 و3، معدل عن (Kunetz, 1966).

2-2-3-5 عرض نتائج التفسير الكمي

Presentation of Quantitative Interpretation Results

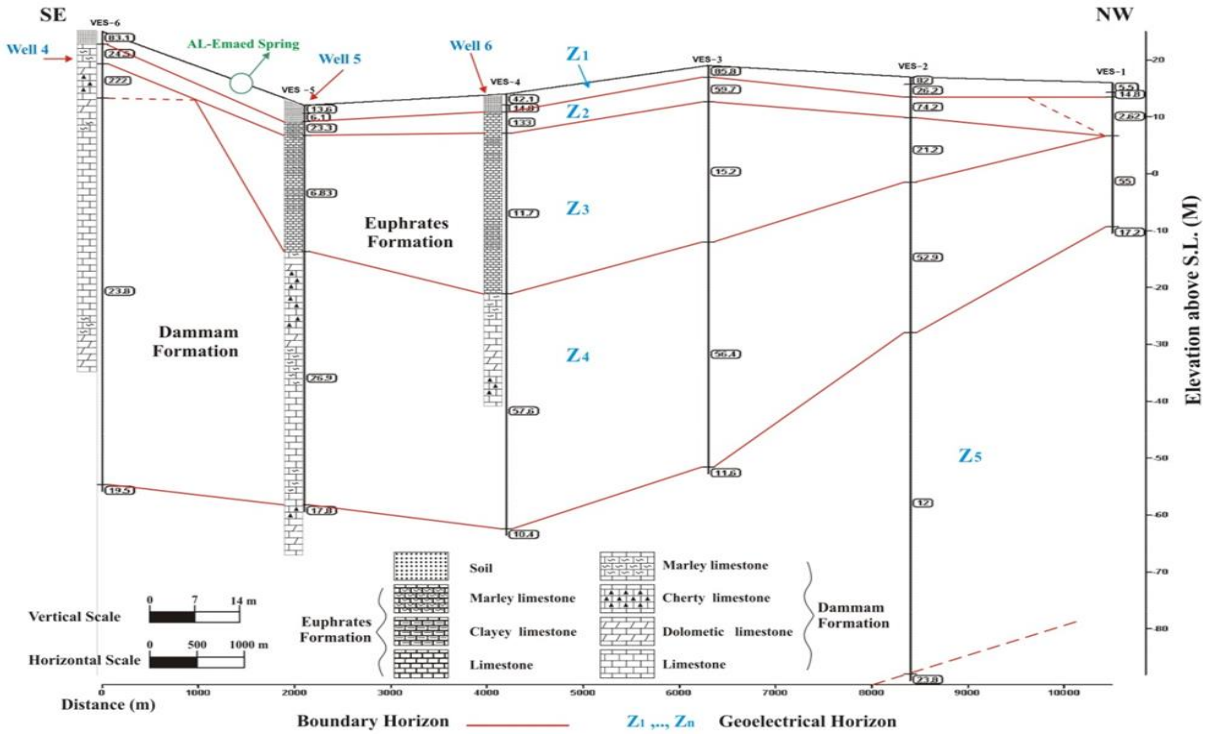
بعد الانتهاء من التفسير الكمي لبيانات الجس الكهربائي العمودي (VES) يتم عرض نتائج التفسير بواسطة طريقتين ، الاولى تدعى المقاطع الجيوكهربائية Geo-electrical Sections ، والثانية تدعى خرائط المقاومة النوعية الحقيقة Resistivity Maps.

A- المقاطع الجيو كهربائية The Geo-electrical Sections

تعتبر المقاطع الجيوكهربائية من أهم وسائل عرض نتائج التفسير الكمي لبيانات الجس الكهربائي العمودي (VES)، وهي تظهر التغيرات الجانبية (الافقية) والعمودية في قيم المقاومة النوعية والسمك للأنطقه الكهربائية المختلفة.

ترسم المقاطع الجيوكهربائية اعتماداً على الفرق في قيم المقاومة النوعية Contrast Resistivity بين الانطقة الكهربائية المختلفة لمجموعة من نقاط الجس (VES) والتي تقع على خط مسح واحد، وبالاعتماد على المعلومات الجيولوجية ومقاطع الآبار المحفورة في المنطقة، وذلك للحصول على مقطع دقيق ، (Van Overmeeren, 1989) . في هذه المقاطع المرسومة يمثل المحور العمودي سمك الانطقة الكهربائية ، بينما يمثل المحور الافقي المسافة بين نقاط الجس الكهربائي (VES)، وتتم عملية الربط بين الانطقة الكهربائية اعتماداً على القيم المتقاربة لتشكيل نطاق كهربائي واحد. أما عملية الفصل بين الأنطقه الكهربائية فتعتمد على الفروقات العالية لقيم المقاومة النوعية، إذ تظهر صعوبة في عملية الفصل بين الأنطقه الكهربائية في حالة تقارب المقاومة النوعية في نقاط جس مختلفة او ضمن نقطة الجس الواحدة ، وكما في الشكل (29-2) .

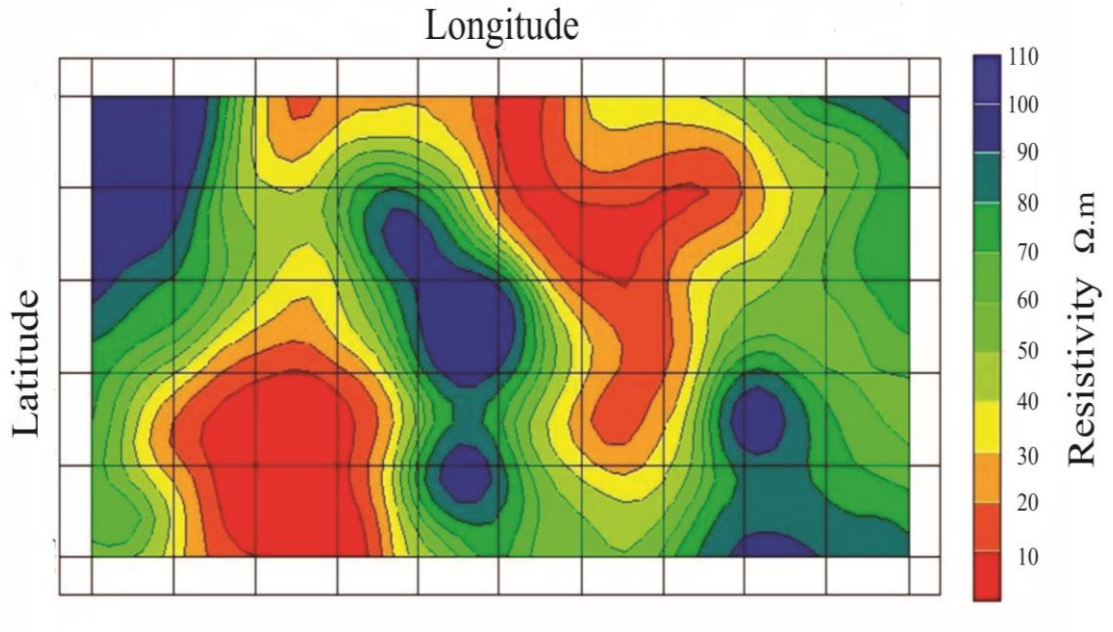
إن عملية ربط قيم المقاومة النوعية ستؤدي إلى رسم حدود تغير المقاومة النوعية مع العمق. إلا أنه ليس بالضرورة أن تمثل حدود الأنطقة الكهربائية مستويات التطبق للطبقات الصخرية إلا في حالة وجود فرق كبير في قيم المقاومة النوعية بين الطبقات، إذ تتغير قيم المقاومة النوعية في أغلب الأحيان لطبقة صخرية واحدة عند حصول تغير ليثولوجي او تركيبي أو عند وجود مستوى المياه الجوفية .



شكل (29-2) :- المقطع الجيوكهربائي، (Al-Zubedi and Thabit, 2014).

B- خرائط المقاومة النوعية الحقيقة The Resistivity Maps

ترسم خرائط المقاومة النوعية الحقيقة اعتمادا على نتائج التفسير الكمي للمنحنيات الحقلية ، من خلال توزيع هذه القيم لكل نطاق جيوكهربائي على خارطة في الاغلب جيولوجية ، لتوضح سمك الانطقة الجيوكهربائية في منطقة الدراسة وامتدادها . ان الغرض الرئيس من هذه الخرائط هو التحري عن الفوالق ، او متابعة امتداد الخزانات الجوفية او امتداد الاجسام المعدنية المترسبة ، وعادة ما ترسم بواسطة الحاسبة باستخدام برنامج السيرفرSurfer ، وكما في الشكل (30-2). هذه الخرائط تختلف عن الخرائط التي تم ذكرها في الفقرة (C 1-3-2) ضمن التفسير الوصفي، لكونها تمثل توزيع المقاومة النوعية الحقيقة مع السمك الحقيقي للانطقة الجيوكهربائية.



شكل (30-2) :- يظهر خارطة المقاومة النوعية المرسومة بواسطة برنامج السيرفرSurfer.

2-2-3-6 المعاملات الجيوكهربائية Geo-electrical parameters

ان حدود الانطقة الكهربائية التي رسمت في المقطع الجيو كهربائي اعتمادا على قيم المقاومة النوعية المتقاربة ، ليس من الضروري ان تتطابق مع حدود الطبقات الصخرية حتى وان كانت هذه الطبقات متكونة من وحدة طباقيه واحدة ذات انسجة صخرية متشابه . اذ يمكن ان نميز عدة انطقة كهربائية في المقطع الجيوكهريائي لطبقة صخرية واحدة ، ذات نسيج صخري واحد ولكن تختلف في نوعية المياه (ملوحتها) مع العمق. من جهة اخرى قد تظهر عدة طبقات جيولوجية مختلفة في التركيب الصخاري، كنطاق كهربائي واحد في المقطع الجيوكهربائي نتيجة التقارب في قيمة المقاومة النوعية لهذه الطبقات.

ان الخصائص الكهربائية لكل نطاق جيوكهربائي يمكن وصفها من خلال خمس معاملات اعتمادا على قيمة المقاومة النوعية (ρ_i) والسمك (h_i)، (Zohdy, 1974). هذه المعاملات تسمى بمعاملات دارزاروك Dar-Zarruok Parameters ، (Maillet, 1947). ويمكن الحصول عليها من خلال المجسات الكهربائية المستخدمة في طريقة الجس البئري Well Logs ،كما ورد في Keller and Frischkecht, (1982). وفي ادناه اهم هذه المعاملات :-

1- المقاومة المستعرضة R_T Transverse Resistance

وهي المجموع الكلي للمقاومة خلال عمود صخري ($1m^2$) التي تعترض مسار التيار والتي تكون عمودية على مستوى التطبق لمجموعة طبقات (n) ، والتي يمكن الحصول عليها من ناتج ضرب سمك الطبقة بمقاومتها النوعية ، وكما في المعادلة التالية :-

$$R_T = \sum_{i=1}^{n} \rho_i h_i \qquad .....(38)$$

2- المقاومة النوعية المستعرضة ρ_{Tr} Transverse Resistivity

وهي معدل المقاومة النوعية للأنطقة الكهربائية باتجاه موازي لسطح التطبق لعدد من الطبقات (n) ، اوهي ناتج قسمة المقاومة المستعرضة (R_T) على السمك الكلي للأنطقة (H) ،وكما في المعادلة التالية:-

$$\rho_{Tr} = R_T / H \qquad .....(39)$$

وهي دائما لها قيمة اكبر من قيمة المقاومة الطولية.

3- التوصيل الكهربائي الطولي S_L Longitudinal Conductance

وهو التوصيل الكهربائي الكلي على طول اتجاه موازي لمستوى التطبق لمجموعة من الطبقات (n) ، والذي يمثل ناتج قسمة المجموع الكلي لسمك الطبقات على مجموع مقاوماتها النوعية ، وكما في المعادلة التالية :-

$$S_L = \sum_{i}^{n} h_i / \rho_i \qquad .....(40)$$

4- المقاومة النوعية الطولية ρ_L Longitudinal Resistivity

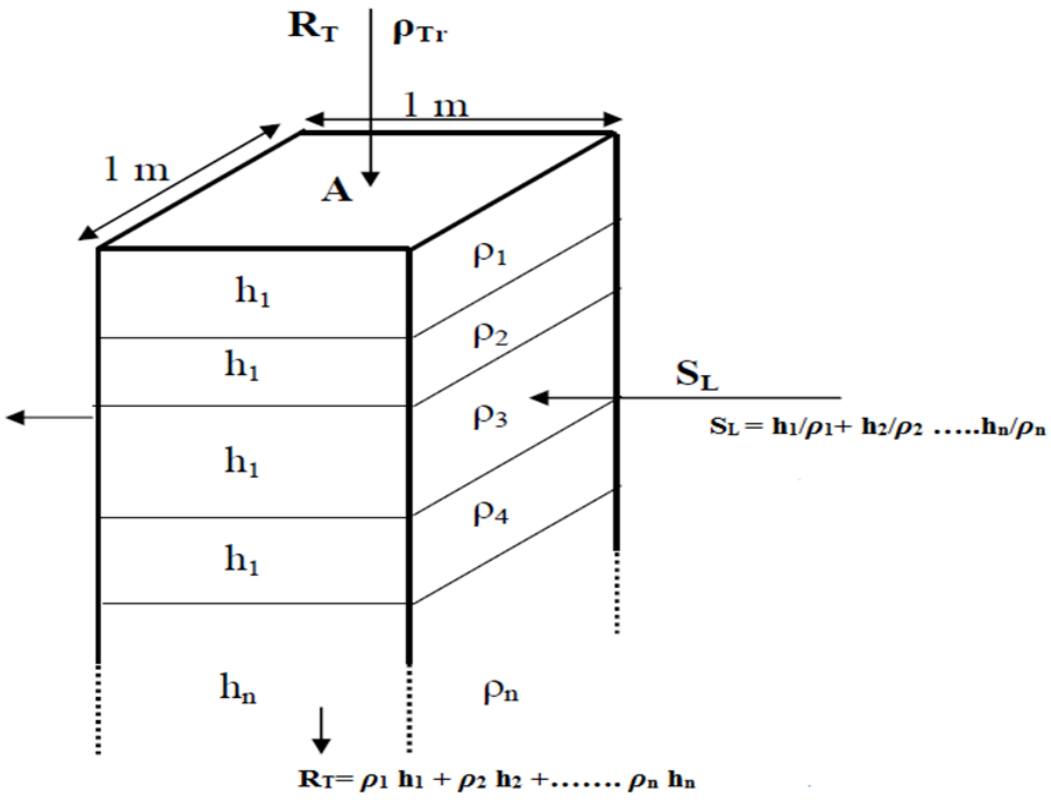
وهي معدل المقاومة النوعية للأنطقة الكهربائية باتجاه موازٍ لسطوح التطبق، والتي تساوي السمك الكلي (H) مقسوماً على التوصيل الكهربائي الطولي ، وكما في المعادلة التالية :-

$$\rho_L = H / S_L \qquad \ldots\ldots\ldots (41)$$

5- معامل عدم التماثل λ Coefficient of Anisotropy

ويعرف على انه الجذر التربيعي لنسبة المقاومات النوعية المقاسة في الاتجاهين الأساسيين، الاتجاه العمودي على سطح التطبق (ρ_{Tr}) والموازي لسطح التطبق (ρ_L) ، وكما في المعادلة الآتية والشكل (2-31) :-

$$\lambda = \sqrt{\rho Tr / \rho L} = \sqrt{RT.SL / H} \qquad \ldots\ldots\ldots\ldots (42)$$



شكل (2-31) :- يوضح المعاملات الجيوكهربائية لعمود صخري من عدة طبقات،(Zohdy, 1974) .

ان الغاية الرئيسية من استخدام هذه المعاملات هو اظهار الخصائص الكهربائية للوسط مثل المقاومة النوعية وتقييم سلوكها في الاتجاهات المختلفة طبقا لمستوى التطبق ، ففي الاوساط التي تكون غير متساوية الخواص في جميع الاتجاهات Anisotropic، تكون اعظم قيمة للمقاومة النوعية في اتجاه المقاومة المستعرضة (ρ_{Tr})، (بمعنى ان التيار الكهربائي يكون عمودي على مستوى التطبق)، واقل قيمة لها تكون على طول اتجاه المقاومة النوعية الطولية (التيار يتدفق باتجاه موازي لأسطح التطبق).

استنادا لذلك ، يمكن معرفة توزيع اسطح خطوط تساوي الجهد في الوسط المتساوي الخواص في جميع الاتجاهات من خلال استخدام معامل عدم التماثل (λ)، (Maillet, 1974). كما يمكن معرفة ان خطوط التيار ليست عمودية على اسطح خطوط تساوي الجهد في الوسط غير متساوي الخواص في جميع الاتجاهات Anisotropic، (Kunetz, 1966)، ففي الوسط المتساوي الخواص في جميع الاتجاهات تكون قيمة (λ) تساوي واحد وتكون خطوط التيار عمودية على اسطح خطوط تساوي الجهد.

2-3 مسح المقاومة النوعية الزاوي احادي البعد 1D Azimuthal Resistivity Survey

المسح الزاوي احادي البعد هو أحد انواع المسوحات الكهربائية والذي يستخدم من اجل تحديد خصائص الكسور Fractures في الطبقات الصخرية، حيث يتميز هذا النوع من المسوحات بقدرة نتائجه على تحديد اتجاهات عدم تساوي الخواص في الاوساط غير المتساوية الخواص Anisotropic والتي ترتبط بشكل مباشر بتغيرات في الليثولوجي (الصخارية) او في التراكيب تحت السطحية، (Leonard, 1984; Taylor and Fleming, 1988; Hagrey, 1994; Busby, 2000; Busby and Jackson, 2006).

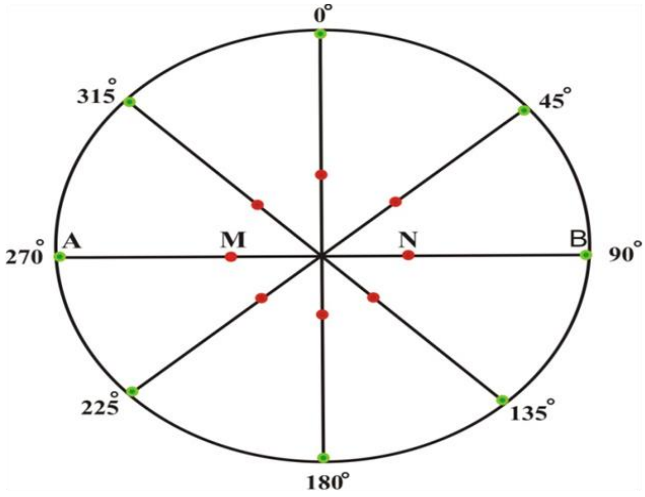
ان التغيرات في قيم المقاومة النوعية الظاهرية المقاسة بواسطة تقنية الجس الكهربائي العمودي (VES) او المسارات ذات الفاصلة الثابتة (CST) ، هي دالة للاتجاه الزاوي عندما تؤخذ القياسات باتجاهات مختلفة ،(Taylor and Fleming, 1988) من خلال تحديد نقطة مركزية يتم تحريك بعض الاقطاب الكهربائية للترتيب او الترتيب بأكمله حولها واخذ القياسات باتجاه عقارب الساعة ، وبناءا على ذلك يوجد نوعان من المسوحات الزاوية احادية البعد وهي :-

A- مسح المقاومة النوعية الزاوي احادي البعد المتناظر

Symmetrical 1D Azimuthal Resistivity Survey

هذا النوع من المسح ينفذ من خلال تثبيت الترتيب الكهربائي المستخدم حول نقطة مركزية وتحريك الترتيب بكاملة في عدة اتجاهات وبزاوية ثابتة بين اتجاه واخر، حيث يتم تحديد منطقة المسح على شكل دائرة وتقسيم محيطها الى درجات من (0) الى (360) ، وكما في الشكل (32-2)، ويجب ان تكون المسافة بين الاقطاب ثابتة في كل قياس. ان قيمة المقاومة النوعية عند الدرجة (0) سوف تكون نفسها

عند الدرجة (180)، وعند الدرجة (45) هي نفسها عند (225) وهكذا ، (Taylor and Fleming, 1988).

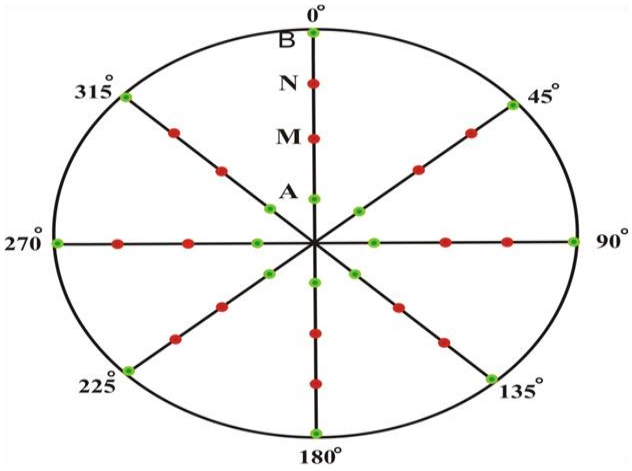


شكل (2-32) :- يوضح المسح الزاوي احادي البعد المتناظر بواسطة ترتيب فنر ، (Taylor and Fleming, 1988).

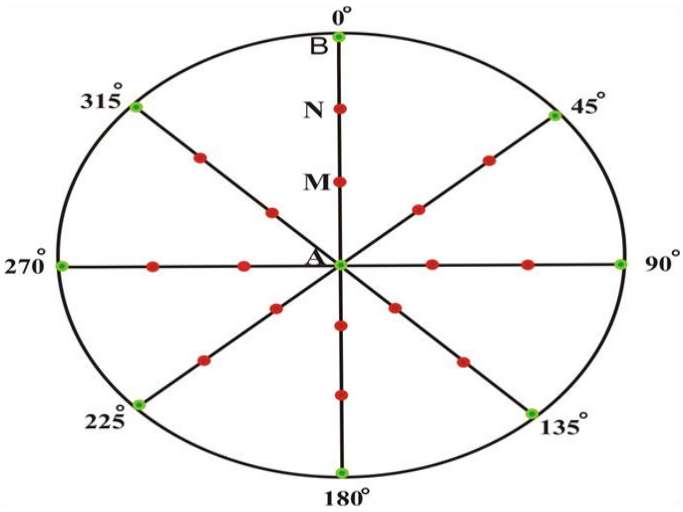
B- مسح المقاومة النوعية الزاوي احادي البعد اللا متناظر

Non-Symmetrical 1D Azimuthal Resistivity Survey

هذا النوع من المسوحات ينفذ من خلال تحريك الترتيب الكهربائي باتجاهات مختلفة، بحيث تكون نقطة القياس للمقاومة النوعية الظاهرية متغيرة (النقطة الوسطية بين قطبي الجهد M و N)، و المسافة بين الاقطاب الكهربائية ثابتة. هذا النوع ينفذ بطريقتين، الاولى تتضمن تحريك الترتيب بكاملة ، وكما في الشكل (2-33). بينما الثانية تتضمن تثبيت احد اقطاب التيار في منتصف نقطة المسح (المركز) وتحريك الاقطاب الاخرى باتجاهات معينه وبينها زاوية ثابتة ، وكما في الشكل (2-34).



شكل (2-33) :- يوضح المسح الزاوي احادي البعد اللا متناظر بواسطة ترتيب فنر، النوع الاول ، (Taylor and Fleming, 1988).

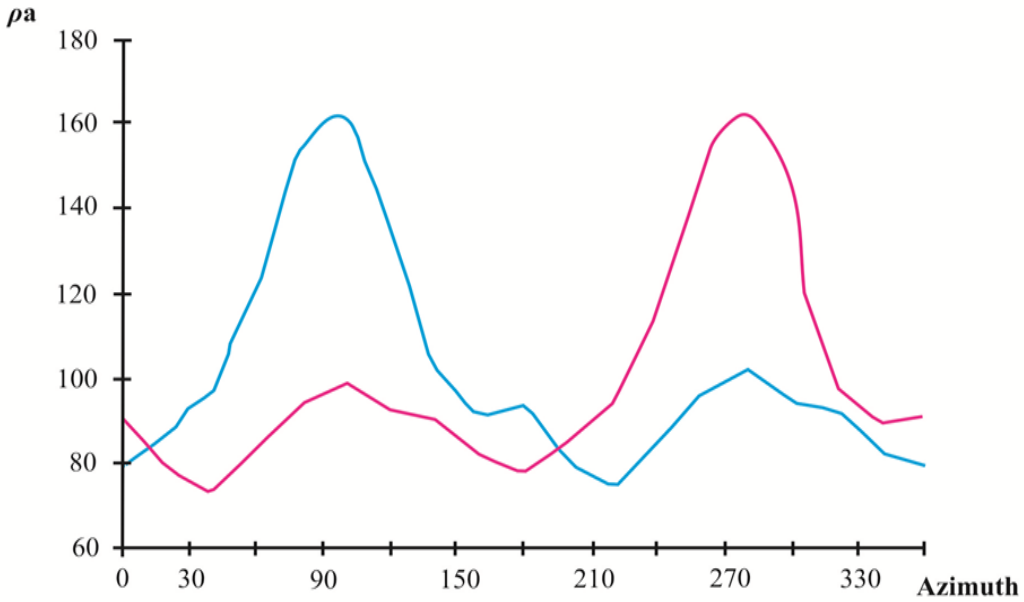


شكل (2-34) :- يوضح المسح الزاوي احادي البعد اللا متناظر بواسطة ترتيب فنر، النوع الثاني ، القطب الكهربائي (A) ثابت في مركز منطقة المسح ،(Taylor and Fleming, 1988) .

C- عرض بيانات مسح المقاومة النوعية الزاوي احادي البعد

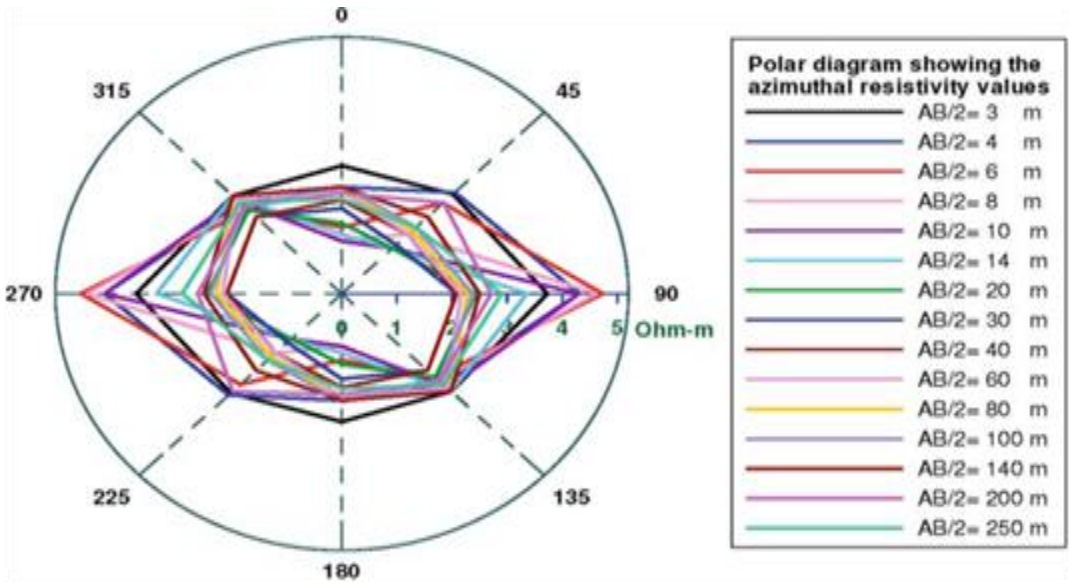
Display 1D Azimuthal Resistivity Data

تعرض نتائج المسح الزاوي للمقاومة النوعية بواسطة عدة طرق ، واحدة من اهم هذه الطرق هي طريقة رسم البيانات على شكل دالة للتغير الزاوي ، (Nunn et al., 1983). حيث تسقط قيم المقاومة النوعية على مرتسم يمثل الاحداثي العمودي فيه قيم المقاومة النوعية الظاهرية والمحور الافقي التدرج الزاوي للقياسات ، وكما في الشكل (2-35).



شكل (2-35) :- يوضح طريقة عرض نتائج المسح الزاوي احادي البعد،(Nunn et al., 1983) .

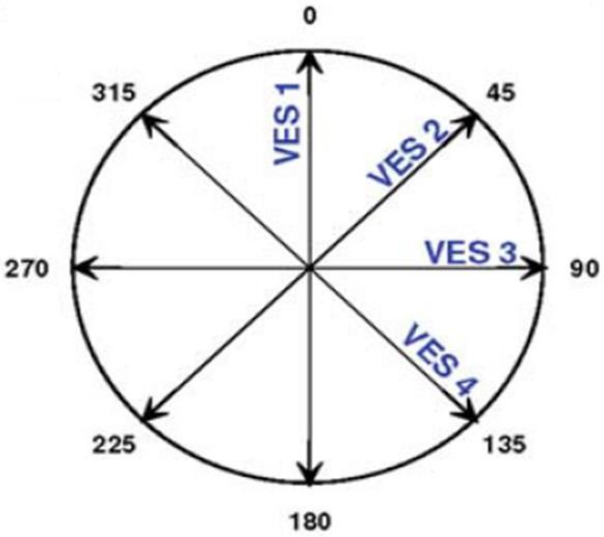
هنالك طريقة اخرى وهي الاكثر استخداما في عرض نتائج المسح الزاوي احادي البعد . في هذه الطريقة يتم رسم منطقة المسح والتي تكون على شكل دائرة وتثبت محاور الاتجاهات والزوايا داخل هذه الدائرة . يتم توزيع قيم المقاومة النوعية المقاسة في كل محور اعتمادا على المسافة بين الاقطاب لكل قياس، أي ان المحور الواحد قد يحتوي على اكثر من قياس ضمن الاتجاه الواحد ، ثم نقوم بتوصيل وربط جميع القياسات على شكل منحني، وكما في الشكل (2-36)،(Taylor and Fleming, 1988) .



شكل (2-36) :- يوضح طريقة المخطط المحوري (القطبي) لعرض نتائج المسح الزاوي احادي البعد، (Massoud et al., 2009).

ان قيم المقاومة النوعية الظاهرية التي سوف تكون على شكل دائرة ضمن مرتسم المخطط المحوري (القطبي) سوف تشير الى وجود عدم تجانس مثل وجود نطاق فالق ، او طبقات سميكة جدا تتميز بانها غير متساوية الخواص في جميع الاتجاهات . اما الشكل البيضوي الذي يظهر من توزيع قيم المقاومة النوعية في المخطط المحوري فانه يشير الى وجود تغيرات تركيبية مثل وجود فالق على طول المحور الزاوي . في الترتيبات الكهربائية الخطية (الاقطاب جميعها تقع على خط واحد) ، عندها سيكون المحور الرئيسي للشكل البيضوي متوافق مع مضرب الفالق Strike ، اما في حالة الترتيبات غير الخطية ، فان المحور الرئيسي للشكل البيضوي يكون موازي لمضرب الفالق، (Habberjam and Watkins, 1967).

بالنسبة لقيم المقاومة النوعية الزاوية والمقاسة بواسطة استخدام تقنية الجس الكهربائي العمودي (VES)، فأنها تعرض وتفسر وصفيا وكميا بواسطة الطرق التي تكلمنا عنها في بداية الفصل . الشكل (2-37) ، يوضح المسح الزاوي بواسطة استخدام تقنية الجس الكهربائي العمودي .



شكل (2-37) :- المسح الزاوي احادي البعد للمقاومة النوعية بواسطة تقنية الجس الكهربائي العمودي (VES)، (Massoud et al., 2009) .

تستخدم نتائج المسح الزاوي احادي البعد في تحديد عدم التماثل Anisotropy للصخور والتربة ، بواسطة العديد من الطرق ، واحدة من اهم هذه الطرق قدمت من قبل (Steinich et al., 1997). في هذه الطريقة يحسب معامل عدم التماثل (λ) من خلال النسبة بين أعلى قيمة للمقاومة الظاهرية واقل قيمة لها في المنحني الزاوي (منحني المخطط المحوري) ، فاذا كانت قيمة معامل عدم التماثل (1) ، فان الوسط متماثل Isotropic ، واذا كانت اكثر سيكون الوسط عديم التماثل Anisotropy ، وكما في المعادلة التالية :-

$$\lambda = \frac{\rho_a \max}{\rho_a \min} \qquad \text{..... (43)}$$

بشكل عام نتائج المسح الزاوي احادي البعد المنفذة بكلا التقنيتين (VES) او (CST) لا يمكن ان توضح نوع عدم التماثل Anisotropy ، وهذا سوف يقود الى حصول خطا في الاستنتاجات ، حيث ان التغير الزاوي في قيمة المقاومة النوعية يمكن ان يكون ناتج عن وجود ميل في الطبقات او نتيجة حصول تغير جانبي نتيجة عدم التجانس ، (Watson and Barker, 1999).

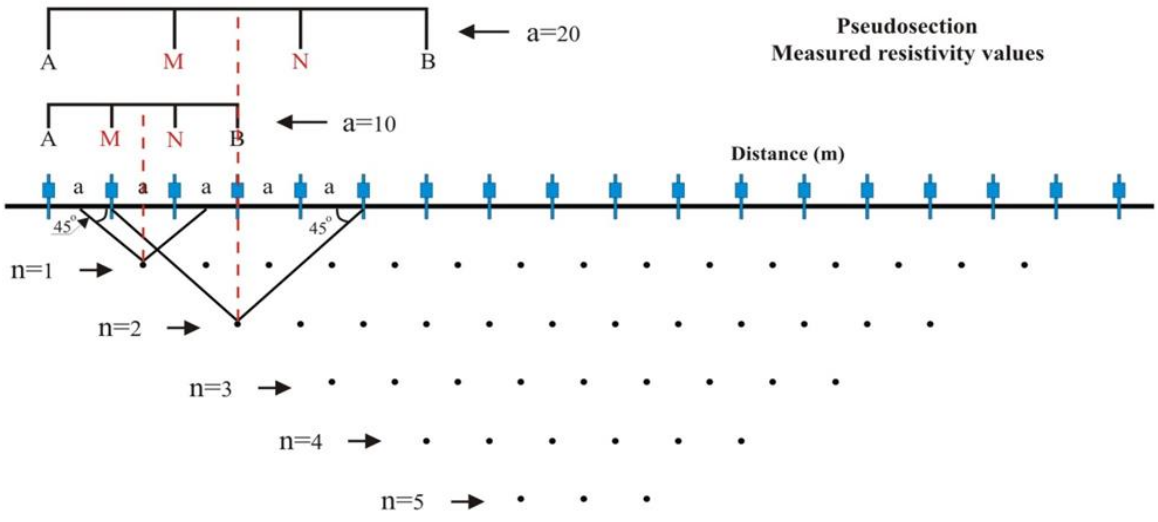
2-4 تقنية المقاطع الزائفة Pseudosection Technique

ابتكرت هذه التقنية من قبل Hallof (1957) لغرض تحديد التغيرات العمودية والافقية لقيم المقاومة النوعية في آن واحد مع العمق ، لذلك فهي تنفذ من خلال استخدام تقنية الجس الكهربائي العمودي (VES) وتقنية المسارات ذات الفاصلة الثابتة (CST) معا، وباستخدام الترتيبات الخطية فقط، لذلك

تسمى ايضا Combined VES/CST Technique. في هذه التقنية يتم في البداية اخذ القياسات بمسافة ثابتة بين الاقطاب (a1) لكل القياسات وعلى طول خط المسح ، ثم بعد اكمال جميع القياسات ، تبدأ عملية اخذ القياسات من نفس نقطة البداية مرة اخرى، ولكن بزيادة المسافة بين الاقطاب لتصبح (2a) ، وهكذا لعدد معين من (a).

ان قيم المقاومة النوعية المقاسة بهذه التقنية ترسم على شكل مقاطع كاذبة Pseudosection، وسميت كاذبة لان عمق نقاط القياس المرسومة فيها ليست اعماق حقيقة وانما اعماق كاذبة تمثل المسافة بين الاقطاب والتي يعتبرها (Edwards, 1977; Barker, 1992) دالة عمق للترتيب المستخدم ، بالإضافة الى ذلك ، فأن قيم المقاومة هي قيم ظاهرية وليست قيم مقاومة حقيقة. في هذه المقاطع يمثل المحور العمودي المسافة بين الاقطاب لكل مجموعات القياس (a) ، وكل مجموعة تسمى (n)، اما المحور الافقي فيمثل طول خط المسح .

ان موقع نقطة القياس والتي تمثل قيمة المقاومة الظاهرية ترسم في هذه المقاطع بعدة طرق . واحدة من اكثر الطرق استخدما هي رسم موقع نقطة القياس من تقاطع مستقيمين بزاوية (45^0) يرسمان من منتصف المسافة بين قطب التيار وقطب الجهد ، بمعنى منتصف المسافة بين (A و M) ومنتصف المسافة بين (B و N)، ونقطة التقاطع هذه تعتبر موقع نقطة القياس، وكما في الشكل (38-2).



شكل (38-2) :- يوضح طريقة بناء المقاطع الكاذبة واسلوب اخذ القياسات بترتيب فنر للأقطاب (Al-Zubedi, 2015b).

وبعد اكمال رسم مواقع جميع القياسات توصل القياسات المتشابة مع بعضها بواسطة الخطوط الكنتورية لتعكس لنا التغيرات العمودية والافقية في قيم المقاومة النوعية الظاهرية مع العمق ، وهي تفسر تفسيرا وصفيا وتعطينا صوره مقربة وليست حقيقة عن توزيع قيم المقاومة النوعية تحت سطح

الارض، (Loke, 2004). تستخدم هذه التقنية بشكل واسع من اجل تحديد مواقع الترسبات المعدنية تحت سطح الارض ، وكذلك في تحديد التراكيب تحت السطحية، (Edwards, 1977). هذه التقنية كانت القاعدة التي منها انطلقت تقنية المسح الكهربائي ثنائي الابعاد 2D Resistivity Survey Technique، والتي تسمى ايضا تقنية التصوير ثنائي الابعاد 2D Imaging Technique .

الفصل الثالث

تقنيات المسح الكهربائي التصويري

المقدمة

اشرنا خلال الفصول الماضية وفي مواضع عدة ، بان التطور الحاصل في تصميم وتصنيع اجهزة المسح الكهربائي والتقدم الهائل في مجال برامج الحاسبة الإلكترونية ، قد قاد الى ظهور تقنيات المسح الكهربائي التصويري ثنائي وثلاثي الابعاد 2D and 3D Resistivity Imaging Techniques في بداية عقد التسعينات من القرن الماضي ، (Loke et al., 2013). ان المسح التصويري ثنائي الابعاد اصبح من اكثر التقنيات استخداما وفي جميع انواع المسوحات الكهربائية لتحديد التراكيب تحت السطحية، (Kemna et al., 2002; Zhou et al., 2004; Loke et al., 2013; Al-Zubedi and Thabit, 2014). حتى اصبحت التقنيات القديمة نادرة الاستخدام في وقتنا الحالي .

ان هذه التقنية كما ذكرنا استندت في ظهورها على احدى التقنيات القديمة المسماة المقاطع الكاذبة Pseudosection Technique، والتي تتضمن استخدام تقنية الجس الكهربائي العمودي (VES) وتقنية المسارات ذات الفاصلة الثابتة (CST) معا ، والتي استخدمت لتحديد التغيرات العمودية والافقية تحت سطح الارض في وقت واحد (Edwards, 1977; Barker, 1992) ، لذا فهذه التقنية هي امتداد للتقنية القديمة ولكن تتميز عنها بانها تعطينا اعماق ومقاومات نوعية حقيقة وليست كاذبة او ظاهرية .

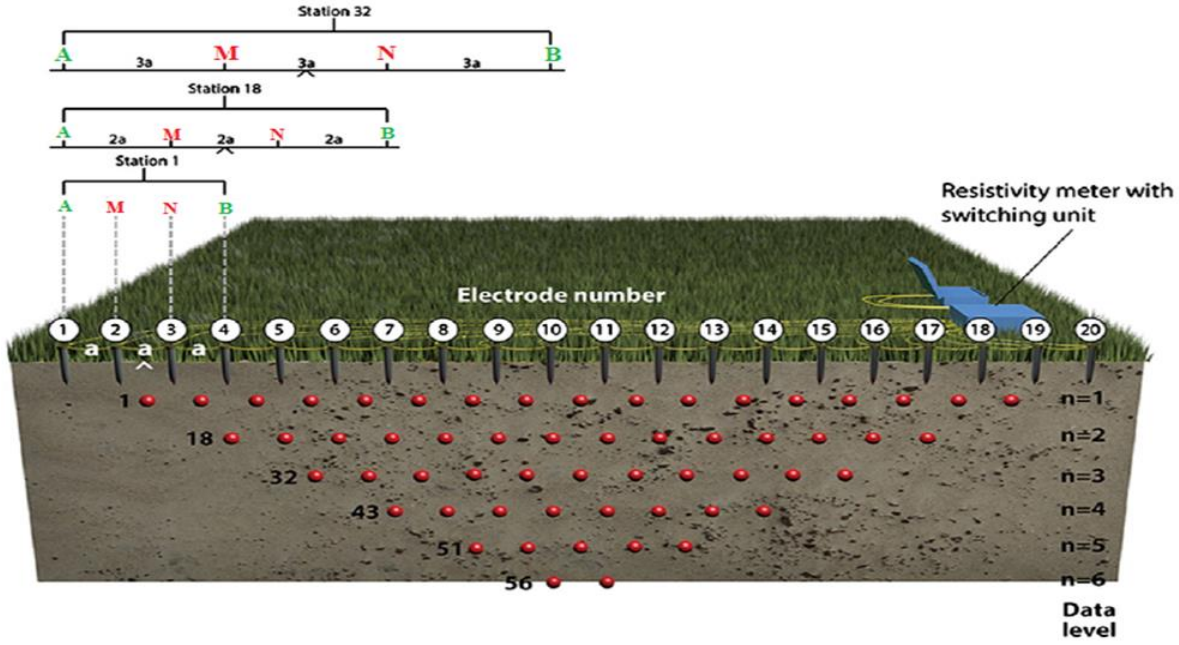
اما بالنسبة لتقنية التصوير ثلاثي الابعاد فقد ظهرت مباشرة بعد تقنية التصوير ثنائي الابعاد ، وهي تعطي معلومات اكثر دقة منها، خصوصا في المناطق التي تتميز بعدم تجانس عالي تحت سطح الارض. لذا فهي تستخدم بشكل واسع في التحريات الهندسية والبيئية ، (Aizebeokhai and Olayinka, 2010)، واهم عيوبها انها تستخدم فقط في التحريات الضحلة لأسباب عديده سيتم التطرق لها في هذا الفصل .

3-1 تقنية تصوير المقاومة النوعية ثنائية الابعاد 2D Resistivity Imaging Technique

تعطي تقنية تصوير المقاومة النوعية ثنائية الابعاد معلومات اكثر دقة من تقنيات المسح الكهربائي احادي البعد ، نتيجة كثافة القياسات التي يتم الحصول عليها من خلال هذه التقنية وبالاتجاهين العمودي والافقي . حيث ان معدل القياسات في كل نقطة جس كهربائي عمودي (VES) لا يتجاوز (50) قياس في اغلب الحالات، بينما يكون معدل القياسات في كل محطة قياس ثنائية الابعاد عشرة اضعاف هذا الرقم ، اضافة الى ذلك ، وكما ذكرنا سابقا، ان هذه التقنية تعطي صورة اقرب الى الحقيقة للوضع التركيبي الجيولوجي تحت السطحي ، بينما التقنيات المستخدمة في المسوحات احادية البعد تعطي معلومات قليلة وباتجاه واحد ، او باتجاهين ولكن غير حقيقة كما في المقاطع الكاذبة.

عند استخدام تقنية التصوير ثنائية الابعاد نحتاج الى عدد كبير من الاقطاب الكهربائية التي توزع على طول خط المسح وبمسافة ثابتة في ما بينها، هذه الاقطاب مرتبطة بكابل متعدد الاسلاك الداخلية Multi – Core Cable والذي يتصل بصورة مباشرة بجهاز المسح الكهربائي ، والذي يربط بحاسبة محمولة Laptop . ان عملية القياس بهذه التقنية هي اتوماتيكية وتتم من خلال تصميم متسلسلة Sequences او نظام Protocol اخذ القياسات من خلال الحاسبة او مباشرة من خلال الجهاز، لتبدأ عملية القياس من خلال الضغط على زر التشغيل.

وصف (Loke ,1999) اسلوب اخذ القياسات بهذه التقنية من خلال استخدام ترتيب فنر كمثال ، كما في المثال الآتي، تم تثبيت (20) قطبا على سطح الارض وبمسافة تساوي (a) بين قطب واخر، وكما في الشكل (1-3).



شكل (1-3) :- يوضح طريقة اخذ القياسات بتقنية تصوير المقاومة النوعية ثنائية الابعاد وباستخدام ترتيب فنر للأقطاب (Loke et al., 2013) .

ان عملية اخذ القياسات تبدأ من خلال اختيار الاقطاب الاربعة الاولى (1،2، 3 و4) والتي تمثل على التوالي (A،M،NوB) لأخذ القياس الاول، لاحظ الشكل (1-3). في القياس الثاني سيتم ترك القطب رقم (1)، ويتم اختيار الاقطاب (2،3، 4 و5) والتي تمثل (A،M،NوB) على التوالي ، وتستمر هذه العملية المتسلسلة الى ان نصل الى الاقطاب (17،18، 19 و20) ، وهي اخر قياس للمجوعة الاولى من القياسات التي كانت فيها المسافة بين الاقطاب تساوي (a) . ان عدد القياسات في هذه المجموعة بلغ (17) قياسا ويمكن تخمينها او حسابها من خلال طرح عدد الاقطاب المستخدمة في القياس من رقم (3)، حيث (20-3= 17)، ان سبب استخدام رقم (3) في هذه العلاقة ،هو ان عدد الاقطاب غير الداخلة في قياس فرق الجهد تساوي (3) ، لاحظ المجموعة الاولى من القياسات في الشكل (1-3) ، ستجد ان الاقطاب رقم (1) و(19) و (20) ، لا توجد تحتها نقاط قياس (النقاط الحمراء). بعد اكمال المجموعة الاولى من القياسات تبدأ المجموعة الثانية التي تكون فيها المسافة بين الاقطاب تساوي (2a)، وتبدأ عملية اخذ القياسات في هذه المجوعة أوتوماتيكيا ايضا، حيث يقوم الجهاز بختيار الاقطاب (1،3، 5 و7)، و التي تمثل (A،M،NوB) على التوالي، اما في القياس الثاني ضمن هذه المجموعة سيتم اختيار الاقطاب (2،4، 6 و8) واخذ القياس ، وهكذا الى ان نصل الى الاقطاب المرقمة (14،16، 18 و20) ، وهو اخر قياس ضمن المجموعة الثانية (2a). سيكون عدد القياسات في هذه المجموعة هو (14) قياسا، وحسبت وفق للعلاقة (20-2*3= 14)، وهنا ربما سائل يسأل لماذا تم ضرب الرقم (3)، بالرقم (2)، والجواب هو ان في المجموعة الاولى كان عدد الاقطاب غير الداخلة بقياس فرق الجهد هي (3)، عندما كانت المسافة بين الاقطاب تساوي (a) ، ولكن عندما ضاعفنا المسافة بين الاقطاب بمقدار (2a) اذن يجب ضرب الرقم (3) بالرقم (2)، وهكذا بالنسبة لبقية المجموعات (3a) و (4a) و (5a) ، الى ان تكتمل جميع القياسات في كل المجاميع التي تم تصميمها ضمن المتسلسلة. كقاعدة يقل عدد القياسات تنازليا بمقدار(3) قياسات في كل مجموعة جديدة ، يعني ان عدد القياسات سيكون بهذا الشكل 17-14-11-8-5-2 ، واخر مجموعة تتضمن قياسين فقط ،وكل مجموعة من القياسات لقيمة من قيم (a) تسمى مستوى Level ويرمز لها بالرمز (n)، لاحظ الشكل (1-3)،(Barker, 1992; Loke, 1999).

بعد اكمال اخذ القياسات في المتسلسلة Sequences يتم نقلها الى الحاسبة الالكترونية عن طريق برنامج خاص تختلف تسميته من شركة الى اخرى ، في هذا البرنامج يتم معالجة القياسات الشاذة وتهذيبها ثم تصدر الى أحد برامج التفسير.

في حالة وجود جهاز قديم وعدم توفر الكابل متعدد الاسلاك الداخلية Multi – Core Cable ، يمكن اجراء المسح التصويري ثنائي الابعاد يدويا من خلال تصميم جدول خاص ، ويتم اخذ القياسات من خلال تحريك الاسلاك من قطب لآخر على طول خط المسح ، واكمال جميع القياسات بهذه الطريقة، ثم تنقل الى الحاسبة من خلال برنامج IPI2win او برنامج الاكسل Microsoft Office Excel او

برنامج نوت باد Notepad على شكل Text File وفق رموز معينة ، ثم تصدر (تنقل) الى احد برامج التفسير، ولمزيد من التفاصيل يرجى الرجوع الى (AL-Zubedi, 2009).

3-1-2 تصميم متسلسلات التصوير ثنائي الابعاد Create 2D Imaging Sequences

تستخدم في اللغة الانكليزية كلمة Create وهي تعني خلق في وصف تصميم او تشكيل المتسلسلات، ولكوننا مسلمين لا نفضل استخدام هذه الكلمة لأنها صفة ربانية لله وحده ، لذا فضلت استخدام كلمة تصميم لوصف عملية تكوين او تشكيل هذه المتسلسلات. كما ان بعض المصادر تستعمل كلمة Protocol وتعني نظام بدل كلمة Sequences التي تعني متسلسلة.

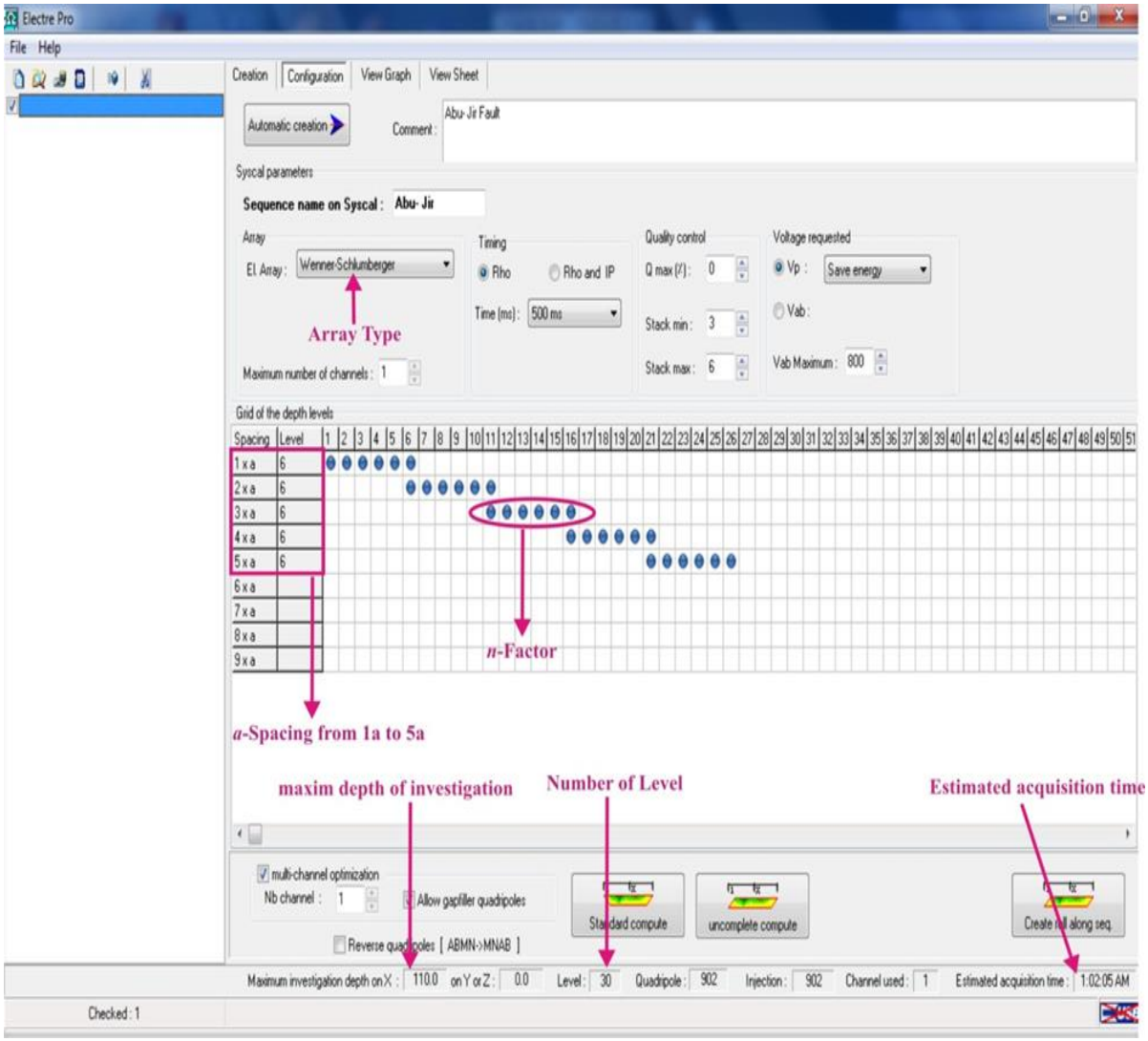
قبل بدأ العمل الحقلي ، لابد من وضع تصاميم للمتسلسلات التي نرغب باستخدامها في مسح التصوير ثنائي الابعاد للمقاومة النوعية ونقلها الى جهاز القياس Resistivity meter . هنالك الكثير من البرامج التي تستخدم لهذا الغرض ، وذلك لان كل شركة من شركات انتاج اجهزة قياس المقاومة النوعية لها برامجها الخاصة بها ، وقد تتشابه بعض هذه البرامج في خيارات التنسيق Format Options التي تستخدم في تشكيل او تصميم ملفات المتسلسلات Sequence files .

ان اهم الاهداف الرئيسية لهذه البرامج هو تصميم متسلسلة قادرة على انتاج قياسات دقيقة ، لذلك نحتاج ان نزود البرنامج ببعض المعاملات والمعلومات ، كي يتمكن من ان يعطينا معلومات شبه دقيقة عن اعظم عمق سوف نصل اليه ، عدد القياسات التي سوف تؤخذ (تسمى ايضا عدد القراءات)، بالإضافة الى تخمين الزمن اللازم لإكمال عملية القياس. ان اهم المعاملات التي يحتاجها البرنامج هي ، نوع الترتيب المستخدم ، المسافة بين قطبي الجهد (a) المسافة بين قطب التيار واقرب قطب للجهد (n)، وهي تمثل ايضا عدد المستويات لكل مجموعة قياسات لـ(a) . ان العاملين (a) و (n) هما اهم العوامل التي يجب التحكم بهما ،لان البرنامج سيعلب دورا اساسيا في تحسين نتائج القياسات بالاعتماد عليهما في تصميم المتسلسلات ، حيث سيقوم البرنامج بعمل تداخل Overlap بين قياسات المقاومة النوعية من اجل زيادة التغطية وزيادة عدد القياسات التي سيتم اخذها اثناء المسح ، فكلما زاد عدد القياسات كلما كانت النتائج اكثر دقة .

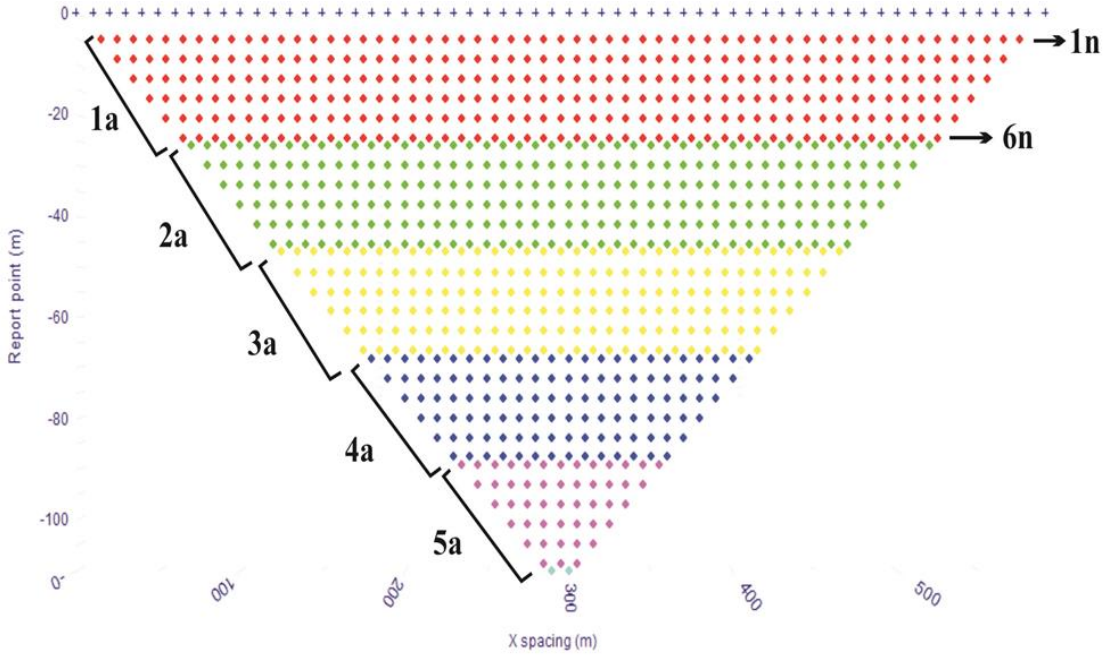
في المثال التالي سوف نوضح ما تم ذكره من خلال استخدام برنامج ELECTRE pro المنتج من قبل شركة Syscal لتصميم متسلسلة باستخدام ترتيب فنر- شلمبرجر وباستخدام (60) قطبا كهربائيا، ولنستخدم المسافة بين اقطاب الجهد، العامل (a) يساوي (10m) ، ونستخدم العامل (n) يساوي (6)، وهذا يعني ان المسافة بين قطب التيار واقرب قطب للجهد سوف تزداد (6) مرات من (1) الى (6) ، بمعنى ان كل قيمة لـ(n) ستقيس (6) مستويات من القياسات لكل (a)، وكما في الشكل (2-3).

بعد اكمال هذه الخطوة سيعطينا البرنامج متسلسلة توضح ان اقصى قيمة بلغتها (a) كانت (5) عندما اخترنا قيمه (n) تساوي (6)، وأن اعظم عمق سوف نصل اليه هو (110m)، وان عدد المستويات المصممة (30) مستو ،هذا يعني في كل مجموعة قياس لـ(a) كانت هنالك (6) مستويات، لان (30=6*5)، وكما في الشكل (3-3). اما النسبة للزمن المخمن لإكمال عملية القياس فهو(1:02 ساعة)، وان عدد القياسات للمقاومة النوعية ستكون (789) قياس او قراءة، وهذا يشير الى تغطية عمودية وافقية جيدة جدا للوضع تحت السطحي . بعد اكمال المتسلسلة يتم تصديرها الى جهاز المسح من خلال ربط الحاسبة المحمولة بجهاز القياس لتنفيذ المسح ثنائي الابعاد.

ملاحظة مهمة:- لزيادة عمق التحري نزيد من قيمة (n) ونقلل من قيمة (a) ، واذا اردنا تغطية افقية كبيرة مع عمق تحري قليل نجري العكس ، اي نقلل من قيمة (n) ونزيد قيمة (a).



شكل (3-2) :- يوضح تصميم متسلسلة قياس لترتيب فنر- شلمبرجر باستخدام برنامج ELECTRE pro، (Al-Zubedi, 2015b) .



شكل (3-3) :- يوضح نمط توزيع مستويات القياس لترتيب فنر- شلمبرجر باستخدام برنامج ELECTRE pro، حيث (a) من (1) الى (5)، و(*n*) من (1) الى (6)، (Al-Zubedi, 2015b) .

3-1-3 معالجة البيانات Data Processing

بعد اكمال المسح التصويري ثنائي الابعاد للمقاومة النوعية تصدر بيانات القياس من ذاكرة جهاز القياس الى الحاسبة المحمولة بواسطة برامج تسمى برامج مساعدة Assistant Software. في هذه البرامج العديد من الخيارات Options التي تستخدم لعرض ومعالجة البيانات (القياسات) قبل تصديرها الى برامج التفسير. ان عملية المعالجة تتم من خلال العديد من المرشحات Filters ، التي تستخدم لغرض ازالة البيانات الشاذة وغير الطبيعية Abnormal في سجل القياسات. حيث يستطيع المفسر من الاطلاع على جميع القياسات بعد عرضها بالبرنامج وملاحظة القيم الشاذة وغير الطبيعة واستخدام المرشح المناسب لأزالتها او تركها بدون معالجة اذا كانت البيانات جيدة . بشكل عام هذه المعالجة تتم بطريقتين اما يدوية او اتوماتيكية.

ان اسباب ظهور البيانات او القياسات الشاذة هو وجود تأثير لنوعين من انواع الضوضاء Noise ، النوع الاول يسمى نظامي Systematic ، بينما الثاني يسمى العشوائي Random. استنادا الى (Loke ,2014)، فان الضوضاء النظامية تسبب ظهور قيم للمقاومة النوعية لا تمثل القيم الطبيعة لما موجود تحت سطح الارض، وهذه الضوضاء تظهر نتيجة حدوث قطع في الاسلاك المستخدمة أو ان الطبقة العليا من التربة (سطح الارض) ذات توصيلية رديئة لا تسمح بتدفق التيار بشكل جيد داخل الارض أو لأن اطواق الربط Card Clips غير مرتبطة بصورة جيدة بالأقطاب ، أو بسبب ان احد

الاقطاب الكهربائية لم يتم تثبيته بشكل جيد داخل الارض. بشكل عام الضوضاء النظامية يمكن تمييزها بسهوله لا نها تظهر على شكل نظامي ومتكرر وهي ذات اعداد محدودة ضمن جميع القياسات. اما بالنسبة للضوضاء العشوائية فهي تنتج عن مصدر عشوائي مثل حركة سيارة قرب مكان الاقطاب الكهربائية، ان هذه الضوضاء تعمل على ظهور قيم عالية جدا او قليلة جدا عن المعدل العام للقياسات ، لذلك يمكن تمييزها وازالتها.

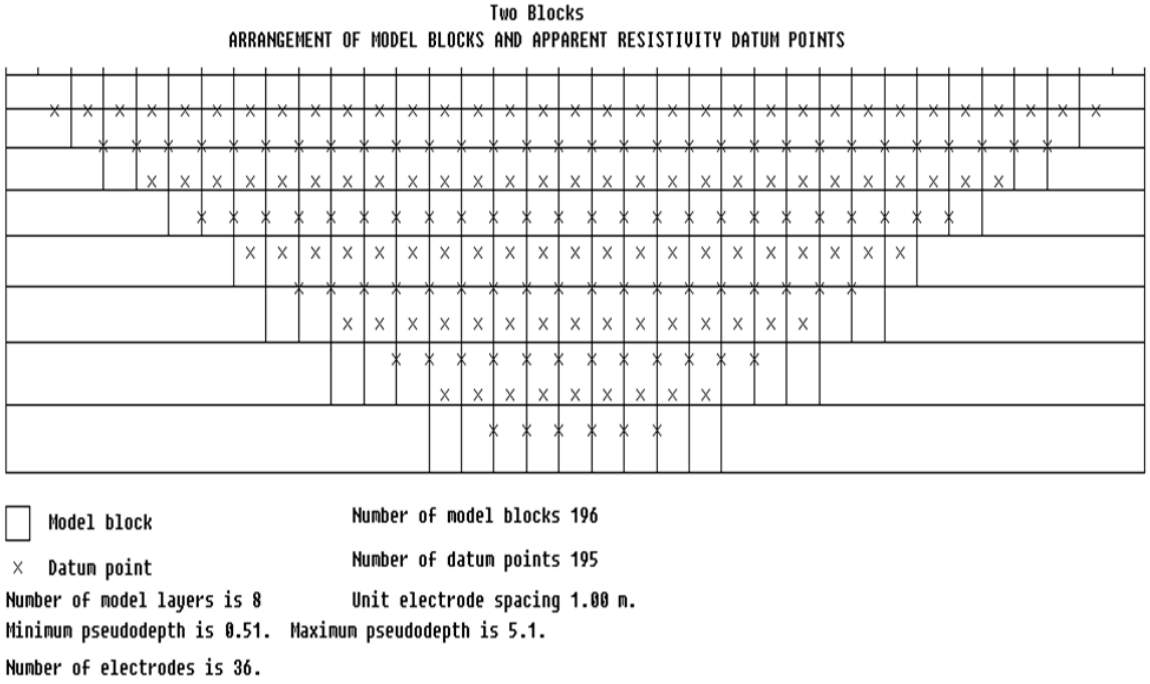
معظم برامج التفسير تحتوي على خيارات تحرير Edit Options تستخدم لأجراء عملية المعالجة اضافة الى المعالجة في البرامج المساعدة Assistant Software، وذلك لتحسين وتهذيب القيم المقاسة في حالة عبور بعض القياسات الشاذة من المرشحات الموجودة في هذه البرامج من غير الانتباه لها وازالتها ، وهذه المعالجة تكون على نوعين ايضا، يدوية او اتوماتيكية، ونحن نفضل اليدوية في معظم الحالات لان بعض القياسات قد تكون قياسات طبيعية وليست شاذة.

3-1-4 تفسير البيانات Data Interpretation

ان العدد الكبير من القياسات التي يتم الحصول عليها من المسح التصويري ثنائي الابعاد يتطلب تقنيات متقدمة لمعالجتها وتحويلها من قيم مقاومة نوعية ظاهرية الى قيم مقاومة حقيقة ، بالإضافة الى تحديد موقعها (عمقها) تحت سطح الارض. لذا تستخدم تقنية الموديلات العددية المعكوسة الاتوماتيكية Automatic Inverse Numerical Modeling ،والتي يمكن اختصارها الى الموديل المعكوس Inverse Modeling. اذن تستخدم تقنية العكس Inversion لتحويل قياسات المقاومة النوعية الظاهرية الى موديل ثنائي الابعاد لقيم المقاومة النوعية الحقيقة ، والذي يمكن ان يستخدم في تفسير الوضع الجيولوجي تحت السطحي . لذا صممت العديد من البرامج التي تستند على هذه التقنية لتفسير نتائج المسوحات التصويرية ثنائية الابعاد، وجميع هذه البرامج هي برامج غير خطية المعالجة - Non Linear Process وغير احادية النتائج Non - Unique ،بمعنى انها تعطي اكثر من موديل في حالة زيادة عملية التكرار Iteration للحصول على الموديل المناسب، ومن افضل واكثر البرامج هذه استخداما هو برنامج RES2DINV .

في جميع برامج العكس ، يقوم البرنامج برسم مقطع كاذب Pseudosection وتقسيم هذا المقطع الى خلايا مستطيلة تزداد مساحتها مع العمق (المقطع الكاذب يرسم اعتمادا على طول خط المسح وعدد المستويات ويكون مشابه من ناحية المساحة والحجم لما موجود تحت سطح الارض)، وتوزع قيم المقاومة النوعية الظاهرية داخل هذه الخلايا، وكما في الشكل (4-3)، فأن عملية التقسيم تتم وفق علاقات رياضية تعرف بطرق اختلافات – محدودة Finite – Differenc وعناصر – محدودة Finite – Element ، تستخدم الطريقة الاولى عندما تكون اشكال المقاطع الكاذبة منتظمة وهندسية ،

بينما تستخدم الطريقة الثانية Finite – Element عندما تكون المقاطع غير منتظمة الشكل الهندسي (Abu-Al- Rob,2016). تتكون الاشكال غير المنتظمة هندسيا للمقاطع الكاذبة، عندما يتم حذف بعض القياسات الشاذة اثناء عملية المعالجة والتي تقع في اطراف المقطع . تسمى عملية التقسيم هذه بطريقة الموديل المتقدم Forward Modeling، (Loke & Barker, 1995)، بينما يسمى المقطع الناتج من هذه العملية Measured Apparent Resistivity Pseudsection .

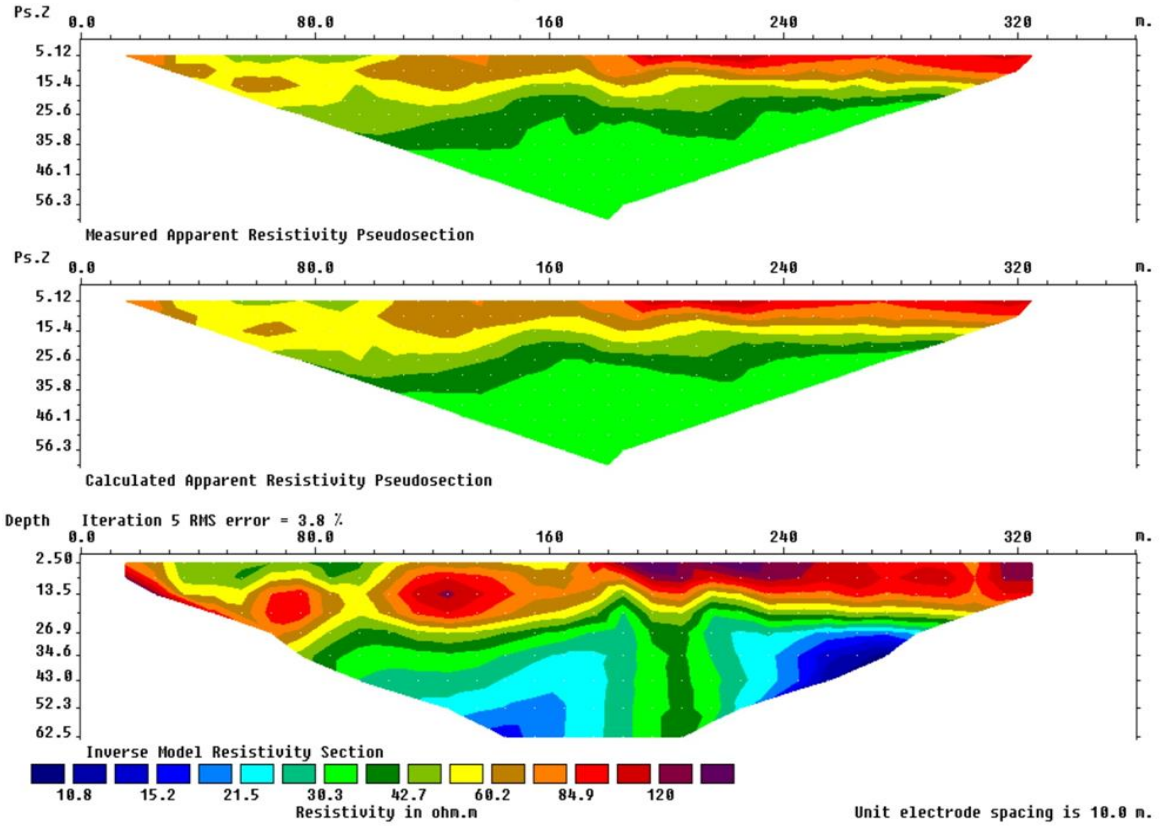


شكل (4-3) :- يظهر تقسيم المقطع الكاذب الى خلايا مستطيلة ،(Loke, 2004) .

بعد هذه العملية يقوم البرنامج بحساب الموديل المعكوس لقيم المقاومة النوعية الظاهرية من المقطع الذي تم عملة في الخطوة السابقة لحساب قيم المقاومة الحقيقة والعمق بواسطة استخدام عدة طرق ، اهمها واكثرها استخداما هي طريقة التهذيب الاجباري للمربعات الدنيا Smoothness Constrained Least-Squares ، (deGroot-Hedlin and Constable, 1990; Sasaki, 1992; Loke and Barker, 1996a)، لمزيد من المعلومات حول عملية العكس يرجى مراجعة ، (Tutorial: 2D and 3D electrical imaging surveys of Loke, 1996- 2014)

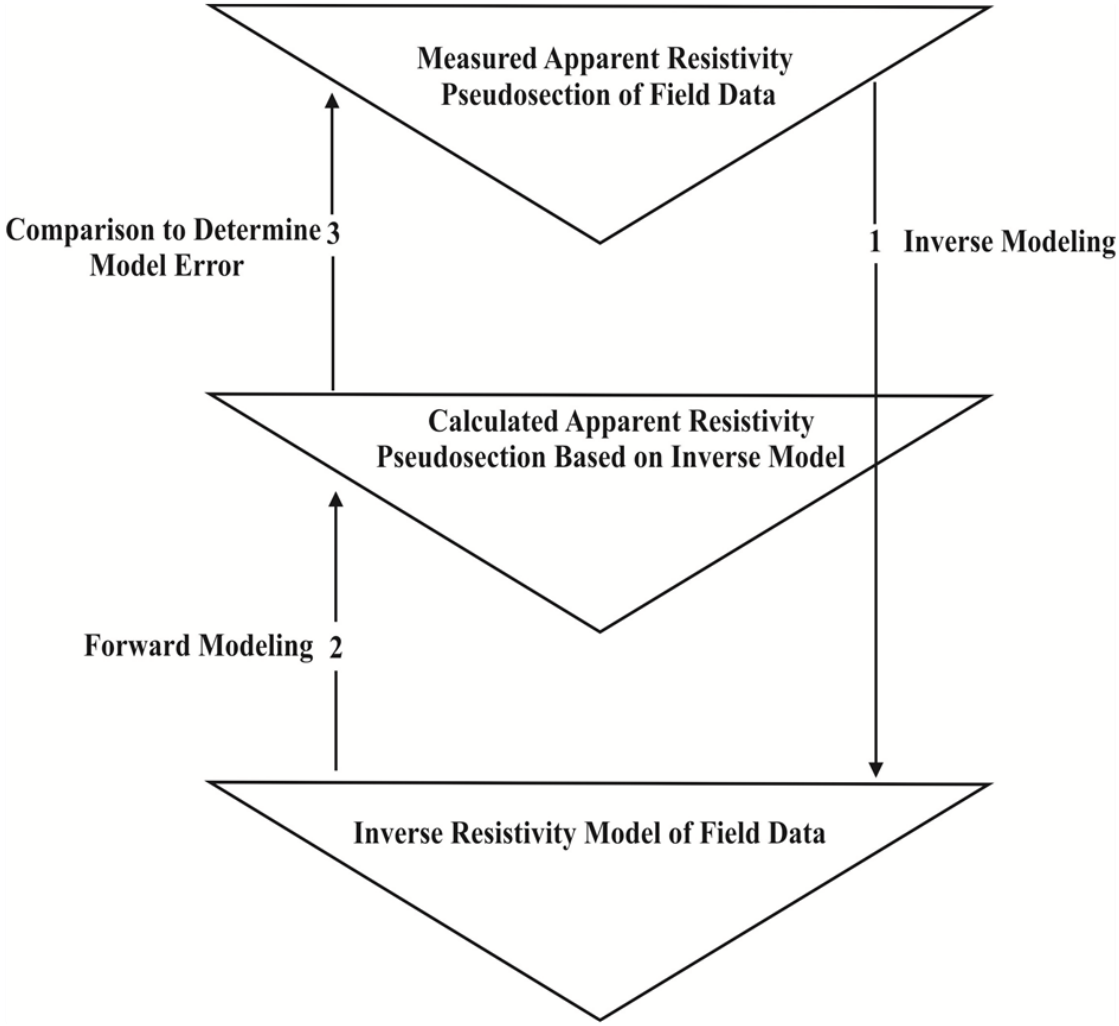
بعد حساب الموديل المعكوس ثنائي البعد لبيانات المسح التصويري ثنائي الابعاد وتحديد قيم المقاومة النوعية الحقيقة والعمق الحقيقي لكل القياسات ، ولغرض معرفة دقة هذا الموديل وهل أنه يمثل الوضع الحقيقي تحت سطح الارض ام لا، يقوم البرنامج بحساب موديل آخر من الموديل المعكوس يسمى Calculated Apparent Resistivity Pseudsection، ويحسب بواسطة طريقة Forward Modeling . ان الهدف من حساب هذا الموديل هو اجراء مقارنة بينه وبين الموديل المحسوب في

الخطوة الاولى Measured Apparent Resistivity Pseudsection، حيث لا يجوز المقارنة بين الموديل المعكوس وموديل Measured Apparent Resistivity Pseudsection، لان الموديل المعكوس يتضمن قيم المقاومة الحقيقة والعمق الحقيقي، بينما الاخر يتضمن قيم المقاومة النوعية الظاهرية والعمق الكاذب غير الصحيح . سوف تظهر نتائج المقارنة على شكل نسبة خطأ مئوية Root-Mean Squared Error (RMS%)، تعطى من قبل البرنامج ، كلما كانت نسبة الخطأ صغيره بين Measured Apparent Resistivity Pseudsection و Calculated Apparent Resistivity Pseudsection كان الموديل دقيق ومقارب للواقع تحت السطحي ،هذا من الناحية النظرية ، اما من الناحية العملية فان نسبة الخطأ القليلة لا تعني بأن الموديل المعكوس دقيق جدا ، فهنالك الكثير من العوامل التي تجعل هذه النسبة كبيرة وهي موجوده في الواقع ، مثل وجود عدم التجانس في مكونات الترسبات والصخور قرب سطح الارض وحتى العميقة منها تؤثر على نسبة الخطأ المحسوبة. يمكن مشاهدة الناتج النهائي من كل العمليات السابقة في الشكل التالي (3-5)، والذي يستخدمه المفسر لتفسير الموديل المعكوس وتحديد عمق الطبقات وقيم المقاومة النوعية لها وجودة القياس من خلال وصف نسبة الخطأ للموديل، وهو يستعين بكل المعلومات الجيولوجية والتركيبية المتوفرة من المسوحات القديمة او من مقاطع الابار لأثبات دقة تفسيره من خلال ربطها بنتائج الموديل المعكوس.



شكل (3-5) :- يوضح الناتج النهائي من الموديلات ثنائية الابعاد باستخدام برنامج RES2DINV، (Al-Zubedi,2015b).

اشرنا الى ان طريقة العكس هي طريقة غير احادية النتائج ، حيث يستطيع المفسر الحصول على اكثر من موديل من خلال زيادة عملية تكرار حساب الموديل Iteration ، واستنادا الى(Loke, 2004) يجب ان تكون عملية التكرار بحدود من (3) الى (5) مرات ، لان البرامج بعد هذه المرات سوف تعطي موديل غير دقيق. يمكن توضيح خطوات انشاء الموديل المعكوس من خلال الشكل التالي (6-3).



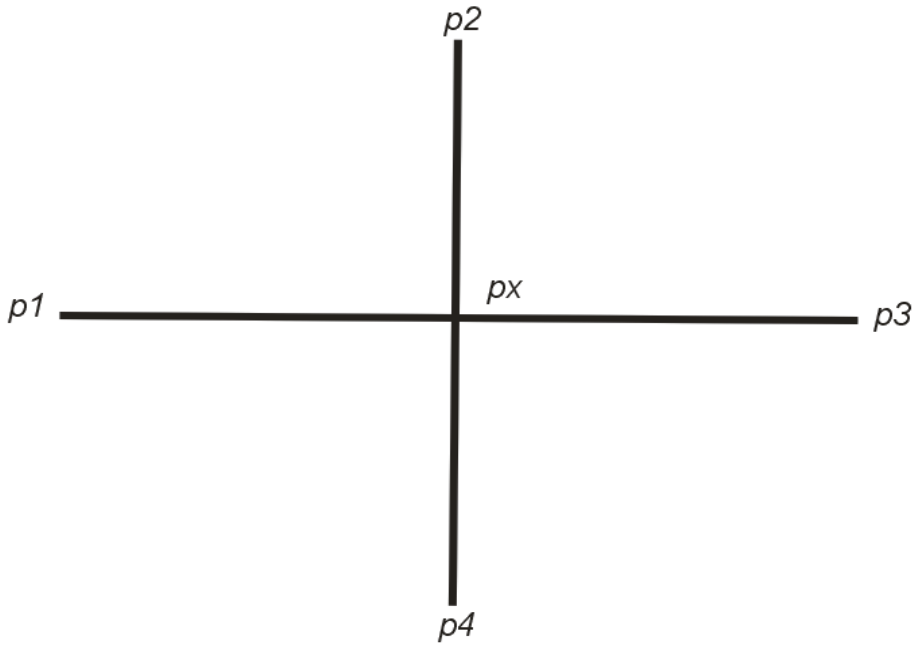
شكل (6-3) :- يوضح مراحل وخطوات تشكيل الموديلات ثنائية الابعاد ،(Al-Zubedi,2015b).

ذكرنا في موضوع المعالجة بان معظم برامج التفسير قد زودت بخيارات تحرير Edit Options تستخدم لغرض حذف وازالة القياسات الشاذة التي لم تحذف اثناء عملية المعالجة لغرض تحسين دقة الموديل، لذا فان البرنامج سيقوم بتعويض قيم هذه القياسات بقيم اخرى تحسب رياضيا بطريقة نقاط النجوم الخمسة (معادلات لابلاس Five Point Star Solution (Laplace Equation ، على العكس من القياسات المحذوفة في البرامج المساعدة والتي لا يتم التعويض عن قيمها.

يتم حساب قيمة القياس المحذوف بطريقة نقاط النجوم الخمسة من خلال اخذ قيمة المعدل للقياسات الاربعة المجاورة للقياس المحذوف ،وكما في المعادلة التالية :-

$$\rho x = \frac{\rho 2 + \rho 4 + \rho 1 + \rho 3}{4}$$

والشكل التالي (3-7) يوضح مواقع القياسات الاربعة والتي ستدخل في حساب قيمة تعوضيه للقياس المحذوف، والتي يمكن توضحيها بجمع اعلى واسفل ثم جمع يمين ويسار ثم يقسم المجموع الكلي على عدد القياسات الاربعة المجاورة.



شكل (3-7) :- يوضح حساب معدل القيمة التعويضية للقياس المحذوف (px) ، بطريقة نقاط النجوم الخمسة.

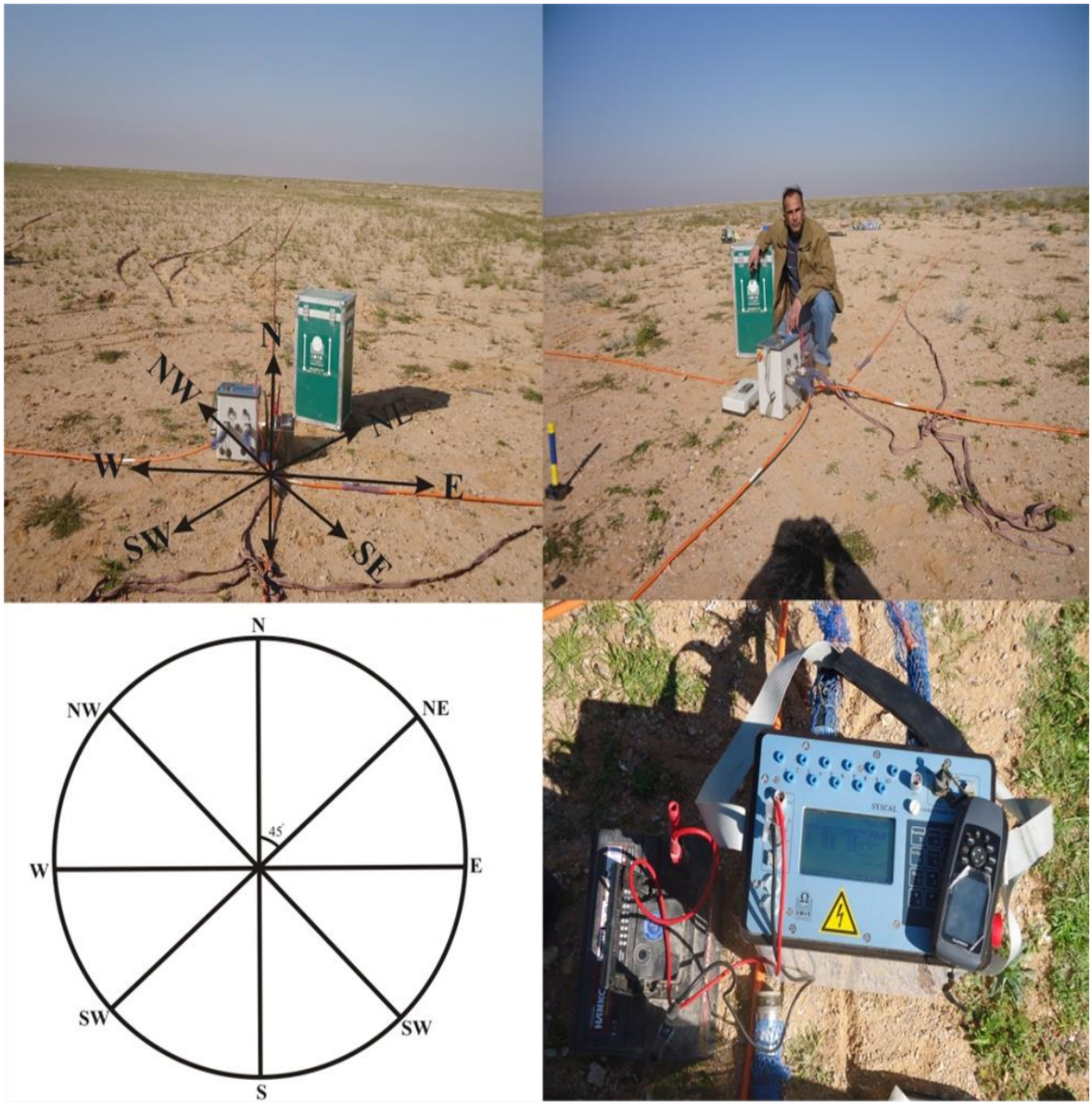
3-1-5 المسح التصويري الزاوي ثنائي الابعاد للمقاومة النوعية

2D Azimuthal Resistivity Imaging Survey

المسح التصويري الزاوي ثنائي الابعاد ، هو احد انواع المسوحات التي تنفذ بواسطة تقنية التصوير ثنائي الابعاد للمقاومة النوعية ، و يستخدم للتحديد خصائص الكسور تحت السطحية، وقد استخدم لأول مرة من قبل (Al-Zubedi ,2015a) . هذا النوع من المسوحات ينفذ بصورة مشابه لتنفيذ المسح الزاوي احادي البعد ، ولكن بتقنية المسح التصويري ثنائي الابعاد. يتميز هذا النوع من المسح عن المسح

احادي البعد بكونه يعطي المعلومة الاكثر دقة حول التغير الزاوي في قيمة المقاومة النوعية، وهل هو ناتج عن تغير في ميل الطبقات او ناتج عن وجود عدم تجانس جانبي ، بمعنى ان هذا النوع من المسح يعالج المشاكل الموجودة في المسح احادي البعد، لأنه يوضح سبب عدم التماثل Anisotropy الموجود تحت سطح الارض، وكما ورد Al-Zubedi and Thabit, (2016) ،الشكل التالي (3-8) يوضح اسلوب المسح التصويري الزاوي ثنائي الابعاد .

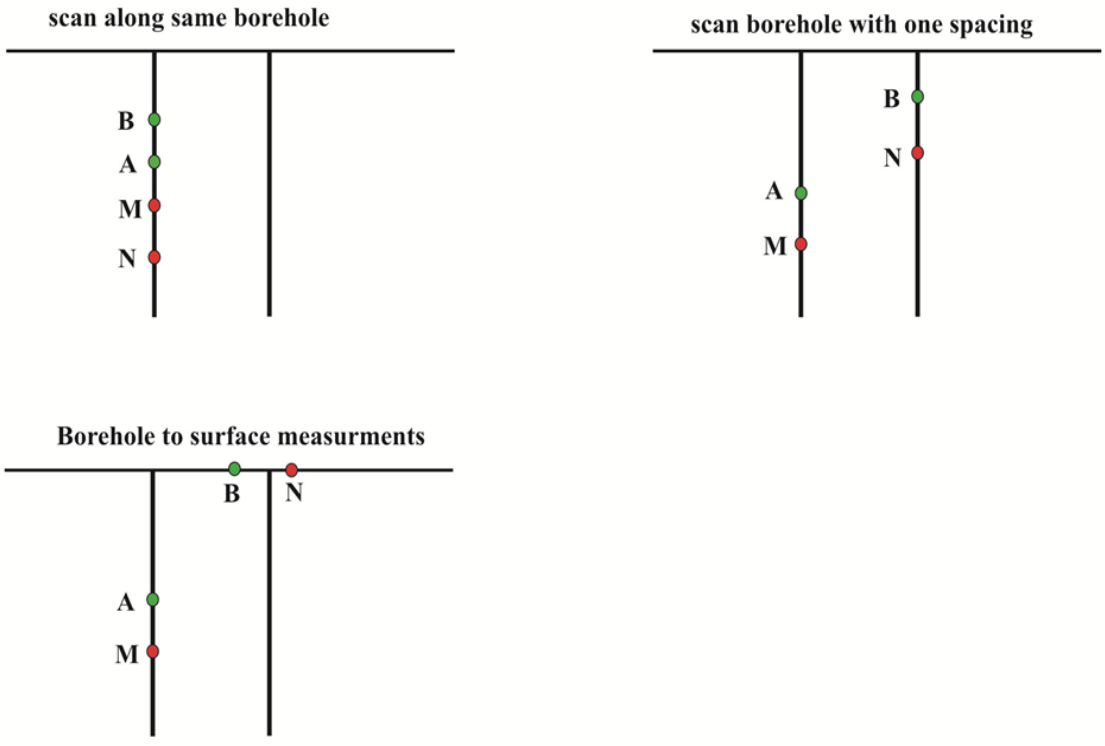
بعض الباحثين يعتبر ان المسح المتقاطع ثنائي الابعاد هو نفسة المسح التصويري الزاوي ثنائي الابعاد وهذا غير دقيق علميا ، لكون التغير باتجاهين لا يمكن ان يكون معبر عن التغير في جميع زويا الاتجاهات.



شكل (3-8) :- يوضح اسلوب اجراء المسح التصويري الزاوي ثنائي الابعاد ، (Al-Zubedi ,2015a)

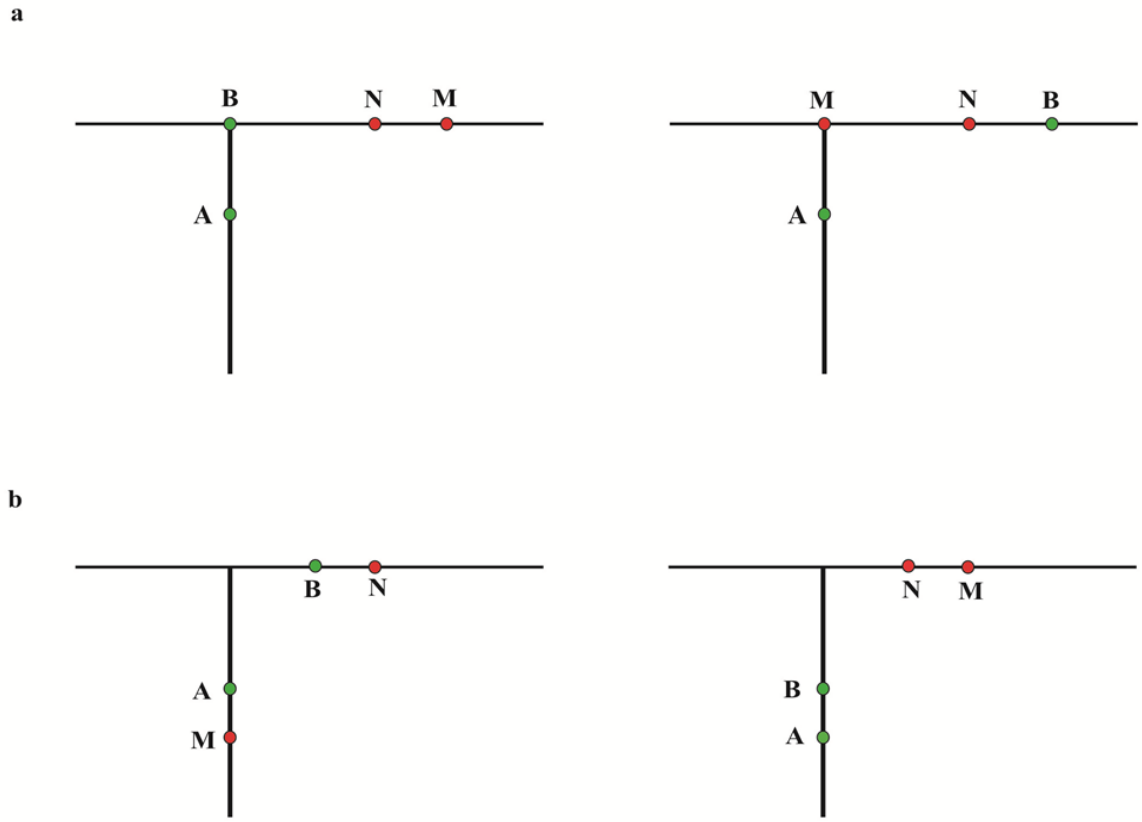
3-1-6 المسح التصويري المتقاطع داخل الابار Cross-Borehole Imaging Surveys

بشكل عام تستخدم تقنية المسح التصويري ثنائي الابعاد للمقاومة النوعية من خلال اجراء القياسات على سطح الارض وعلى طول خط مسح معين ،ولكن في بعض الحالات يمكن استخدامها داخل الابار وباستخدام اي ترتيب كهربائي في عملية مشابهة لجس الابار ، ويسمى هذا النوع من المسح بالمسح التصويري ثنائي الابعاد داخل الابار Cross-Borehole Imaging Surveys. هنالك ثلاث طرق مستخدمة في تنفيذ هذا النوع من المسوحات اعتمادا على توزيع مواقع الاقطاب للترتيب المتكون من اربعة اقطاب ، (Loke, 2014)، وكما في الشكل (3-9). الطريقة الاولى تنفذ من خلال وجود الاقطاب الاربعة داخل احد الابار ، اما الطريقة الثانية فتنفذ من خلال وجود قطبين احدهما للتيار والاخر للجهد داخل احد الابار والقطبين الاخرين على سطح الارض على يمين ويسار البئر الثاني، بينما الطريقة الثالثة تنفذ من خلال وجود قطبين داخل كل بئر احدهما للتيار والثاني للجهد. هنالك طرق اخرى تتضمن توزيع اخر للأقطاب الاربعة داخل الابار وخارجها وصفت من قبل Zhou and Greenhalgh (1997)، يمكن الرجوع لها والاطلاع عليها. كما ان هنالك طرق اخرى للترتيبات المتكونة من قطبين او ثلاثة ، يمكن الاطلاع عليها في (Tutorial: 2D and 3D electrical imaging surveys of Loke, 1996- 2014)



شكل (3-9) :- يوضح طرق المسح التصويري ثنائي الابعاد داخل الابار باستخدام ترتيب رباعي الاقطاب، مطور عن (Loke, 2014) .

في بعض الحالات لا يتوفر سوى بئر واحد ، في هذه الحالة ، هنالك طريقتان لتنفيذ هذا النوع من المسح وباستخدام ترتيب متكون من اربعة اقطاب، وكما في الشكل (3-10). الطريقة الاولى تنفذ من خلال وضع قطب واحد داخل البئر والاقطاب الاخرى على سطح الارض ، الطريقة الثانية تنفذ بوضع قطبين داخل البئر وقطبين على سطح الارض .



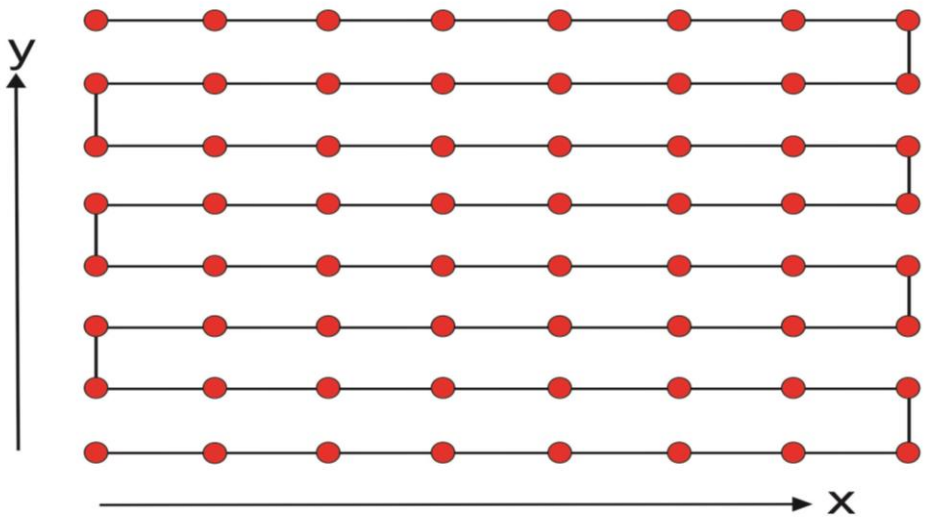
شكل (3-10) :- يوضح طرق المسح التصويري ثنائي الابعاد داخل بئر واحد باستخدام ترتيب رباعي الاقطاب، a) قطب واحد داخل البئر ، b) قطبان داخل البئر ، مطور عن (Loke, 2014) .

بشكل عام يستخدم هذا النوع من المسح للتحريات الضحلة ، وعليه فأنه يستخدم بشكل واسع في التحريات الهندسية . هنالك عدة بحوث ومؤلفات حول هذا النوع من المسح ، على سبيل المثال لا الحصر :- Zhao et al. (1986), Sasaki (1992), Zhou and Greenhalgh (2000), Oldenborger et al. (2005), Chambers et al (2007), Wilkinson et al (2008) and Nimmer et al (2008).

3-2 تقنية التصوير ثلاثي الابعاد للمقاومة النوعية 3D Resistivity Imaging Technique

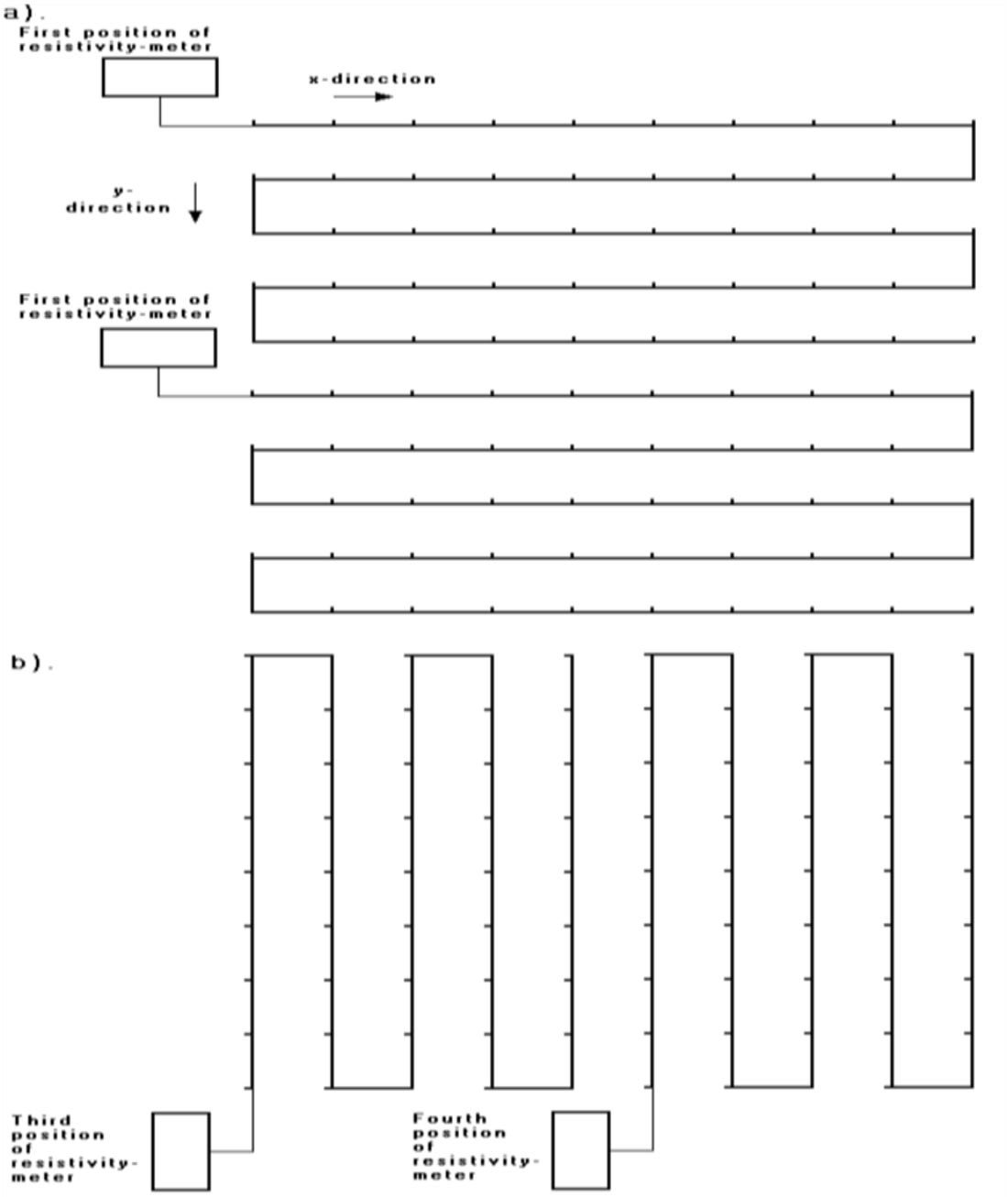
بعد فترة قصيرة من ظهور تقنية المسح التصويري ثنائي الابعاد للمقاومة النوعية ، استطاع العلماء من تطوير اجهزة المسح الكهربائي لاستخدمها في تقنية احدث وهي تقنية التصوير ثلاثي الابعاد مستثمرين التطور الحاصل في مجال برامج الحاسبة الالكترونية. وعلى الرغم من مرور اكثر من عقدين على ظهور هذه التقنية الا انها مازالت تستخدم للتحريات الضحلة فقط، ولأسباب عديده اهما ، عدم توفر اجهزة قياس تستطيع قياس عدد كبير جدا من قيم المقاومة النوعية في الوقت نفسه، بالإضافة الى عدم توفر حاسبات قادرة على معالجة او تحويل الأف القياسات خلال عملية العكس Inversion. هذه الاسباب واسباب اخرى يحاول العلماء ايجاد الحلول لها ، لتطوير هذه التقنية حتى يمكن استخدامها في التحريات العميقة،(Loke, 2014) .

تنفذ هذه التقنية من خلال طريقتين ، الطريقة الاولى هي الاقدم , والاكثر استخداما في التحريات الضحلة ، وقد وصفت بواسطة Loke and Barker ,(1996b)، حيث يتم قياس قيم المقاومة نوعية من خلال توزيع الاقطاب الكهربائية على شكل شبكة Grid مربعة او مستطيلة الشكل وبالاتجاهين (X,Y) وباستخدام كابل متعدد الاسلاك الداخلية واحد فقط Multi - Core Cable ، حيث يوصل بجميع الاقطاب (على شكل افعى Snake-Lines) ، وكما في الشكل (3-11). تسمى هذه الشبكة عادة اعتمادا على عدد الاقطاب في كل اتجاه (X) و (Y) ، وفي مثالنا هذا فان الشبكة تمسى شبكة (8 by 8). عادة ما تنفذ هذه الطريقة بواسطة استخدام ترتيبات كهربائية لها دالة حساسية تقل سريعا مع العمق مثل ترتيبات قطب- قطب، قطب – ثنائي القطب وثنائي القطب- ثنائي القطب، لهذا فهي تستخدم في التحريات الضحلة. ان الموديل ثلاثي الابعاد الناتج من استخدام هذه الطريقة يمسى بالموديل ثلاثي الابعاد الحقيقي.



شكل (3-11) :- يوضح استخدام تقنية التصوير ثلاثي الابعاد باستخدام الطريقة التقليدية ، مطور عن (Loke, 2012).

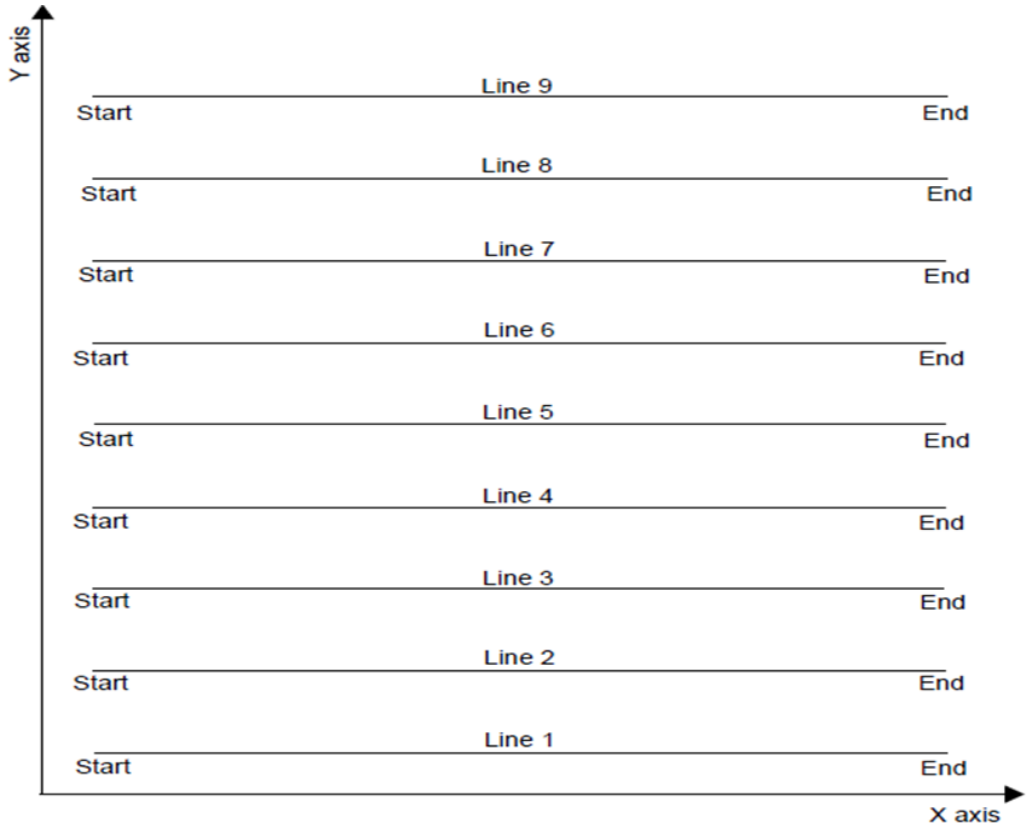
لغرض زيادة التغطية الافقية لهذه الطريقة لتشمل اكبر مساحة ممكنة من منطقة المسح تستخدم تقنية Roll-Along ، وهذه التقنية هي احدى التقنيات المستخدمة في المسوحات ثنائية الابعاد (Dahlin and Bernstone, 1997)، اما استخدامها في المسح التصويري ثلاثي الابعاد، فيتم من خلال عمل اكثر من شبكة قياس Grid متجاورة ،وبعد اكمال القياسات للشبكة الاولى يتم الانتقال الى الشبكة الثانية المجاورة واجراء القياس ومن ثم تربط الموديلات الناتجة مع بعضها البعض، وكما في الشكل ،(12-3).



شكل (12-3) :- يوضح طريقة استخدام تقنية Roll-Along في اجراء المسح التصويري ثلاثي الابعاد ، a) يوضح وجود شبكتين، كل شبكة من نوع (5 by 10) وبخطوط نشر تتجه باتجاه (X)، b) يوضح وجود شبكتين، كل شبكة من نوع (5 by 10) وبخطوط نشر تتجه باتجاه (Y)، (Loke, 2014).

اما الطريقة الثانية فهي تستخدم للحصول على عمق تحري كبير،(Rucker et al., 2009a) وتنفذ من خلال جمع خطوط مسح ثنائي الابعاد متوازية Parallel او متعامدة Orthogonal مع بعضها البعض لإنتاج موديل تصوير ثلاثي الابعاد 3D Imaging Model . ان استعمال خطوط المسح المتعامدة هو اكثر كلفة واكثر جهدا ،ولكنها الاكثر دقة لكثافة القياسات المأخوذة والمسافات الصغيرة بين قياس واخر. على اي حال، في كلا الحالتين ان كانت خطوط المسح المستخدمة متوازية او متعامدة ، فان الموديل النهائي الناتج هو موديل ثلاثي الابعاد غير حقيقي، لكون عملية اخذ القياسات لم تكن من خلال شبكة مسح ثلاثية الابعاد ، (Loke, 2014).

ان طريقة جمع خطوط المسح ثنائية البعد Parallel 2D Lines تستخدم حاليا بشكل واسع للحصول على عمق تحري كبير ، وهي تنفذ من خلال اجراء مسح تصويري ثنائي الابعاد في عدة خطوط مسح ، وكما في الشكل (13-3) . ويجب ان تكون المسافة بين خط مسح واخر تساوي اوقل من المسافة بين الاقطاب (a) لتقليل تأثير الربط بين القياسات Reduce Banding Effects، بمعنى اذا كانت المسافة بين الاقطاب (a) تساوي (10m) ، فيجب ان تكون المسافة بين خط مسح واخر تساوي (10m) او اقل، وهذا ايضا ما توصل له (Al-Zubedi ,2015a) عندما استخدم هذه الطريقة في التحري عن خزانات المياه الجوفية الواقعة على عمق اكثر من (100m).



شكل (13-3) :- يوضح طريقة تنفيذ المسح التصويري ثلاثي الابعاد بواسطة خطوط المسح ثنائية الابعاد المتوازية ، (ABEM, 2010).

اذا كان المسح التصويري ثلاثي الابعاد سينفذ بواسطة الطريقة الاولى نظام الشبكة Grid ، فيتم تصميم متسلسلات القياس Sequences في برامج خاصة وكما مر بنا في تصميم متسلسلات القياس في المسح التصويري ثنائي الابعاد، حيث تكون مشابهة لها تقريبا . اما اذا كان المسح ثلاثي الابعاد سينفذ باستخدام خطوط المسح ثنائية البعد المتوازية او المتعامدة ، فيجب تصميم المتسلسلات كما مر بنا في تصميم متسلسلات خطوط المسح ثنائية البعد في الفقرة (2-1-3).

بالنسبة الى نتائج المسح ثلاثي الابعاد بواسطة خطوط المسح ثنائية البعد المتوازية ، فأنها يجب ان توضع في ملف خاص يمكن قراءته من قبل برامج تفسير المسوحات ثلاثية الابعاد. هنالك طريقتان تستخدمان لتحويل بيانات المسح ثنائي الابعاد (الخطوط المتوازية او المتعامدة) الى بيانات مسح ثلاثي الابعاد ،(Loke, 2004) . الطريقة الاولى تتضمن استخدام برنامج التفسير RES2DINV واجراء عملية العكس Inversion على جميع بيانات الخطوط وحساب الموديل المعكوس لكل خط ، ثم استخدام خيار Collate Data into RES3DINV Format بعد ان تجمع جميع بيانات الخطوط في ملف واحد ، وكما في المثال التالي في الجدول (1-3).

اما الطريقة الثانية فتتضمن جمع بينات جميع خطوط المسح ثنائي الابعاد المتوازية في ملف واحد وقبل اجراء عملية العكس عليها Inversion ، وباستخدام برنامج NOTEPAD ، WORDPAD او برنامج Excel ،في هذه الطريقة يتم ادخال القياسات في ملف باستخدام احد هذه البرامج وبصيغة Text File ، بحيث يمكن قراءته بواسطة برنامج RES3DINV او اي برنامج يستخدم لتفسير بيانات المسح التصويري ثلاثي الابعاد. الجدول التالي (2-3) يتضمن صيغة انشاء الملف بالتفاصيل ومع بعض القياسات الحقلية ،(Al-Zubedi ,2015a) .

جدول (3-1) :- يوضح صيغة انشاء 3D text لبيانات المسح التصويري ثنائي البعد ، (Loke, 2012).

COLLATE_2D_3D.TXT file	Comments
Conversion of RES2DINV data file	Title
Number of files to collate	Header for no. of data files
3	Number of data files
File 1 parameters	Header for first file
Name of data file in RES2DINV format	Header for name of file
d:\test\FILE2D_1.DAT	Full name plus path of file
X and Y location of first electrode along this line	Header
0.0,0.0	Coordinates of the first electrode
Line direction (0=X,1=Y)	Header
0	Number specifying line direction
Line sign (0=positive,1=negative)	Header
0	Specify whether electrode coordinates increase or decrease
File 2 parameters	Same set of parameters for second file
Name of data file in RES2DINV format	
d:\test\FILE2D_2.DAT	
X and Y location of first electrode along this line	
0.0,-0.5	
Line direction (0=X,1=Y)	
0	
Line sign (0=positive,1=negative)	
….	Same for third file
….	
Name of Output file in RES3DINV format	Header
d:\test\FILE_3D.dat	Name of 3-D data file
End of file	Header for end of file

جدول (2-3) :- يوضح صيغة انشاء 3D text لبيانات المسح التصويري ثنائي الابعاد ، (Loke, 2012).

3D Imaging Station	
60	*Number of electrodes in x direction*
4	*Number of electrodes in Y direction*
10	*x unit electrode spacing*
10	*Y unit electrode spacing*
7	*Array type, 7 Wenner-Schlumberger*
3156	*Number of data points*
300.00 0.00 330.00 0.00 310.00 0.00 320.00 0.00 112.00	
300.00 0.00 350.00 0.00 320.00 0.00 330.00 0.00 144.18	
300.00 0.00 370.00 0.00 330.00 0.00 340.00 0.00 45.80	
300.00 0.00 390.00 0.00 340.00 0.00 350.00 0.00 93.72	
300.00 0.00 410.00 0.00 350.00 0.00 360.00 0.00 7.80	
300.00 0.00 430.00 0.00 360.00 0.00 370.00 0.00 97.86	
300.00 0.00 460.00 0.00 370.00 0.00 390.00 0.00 80.60	
300.00 0.00 480.00 0.00 380.00 0.00 400.00 0.00 92.70	
.	
.	
.	
.	
.	
0	
0	
0	
0	

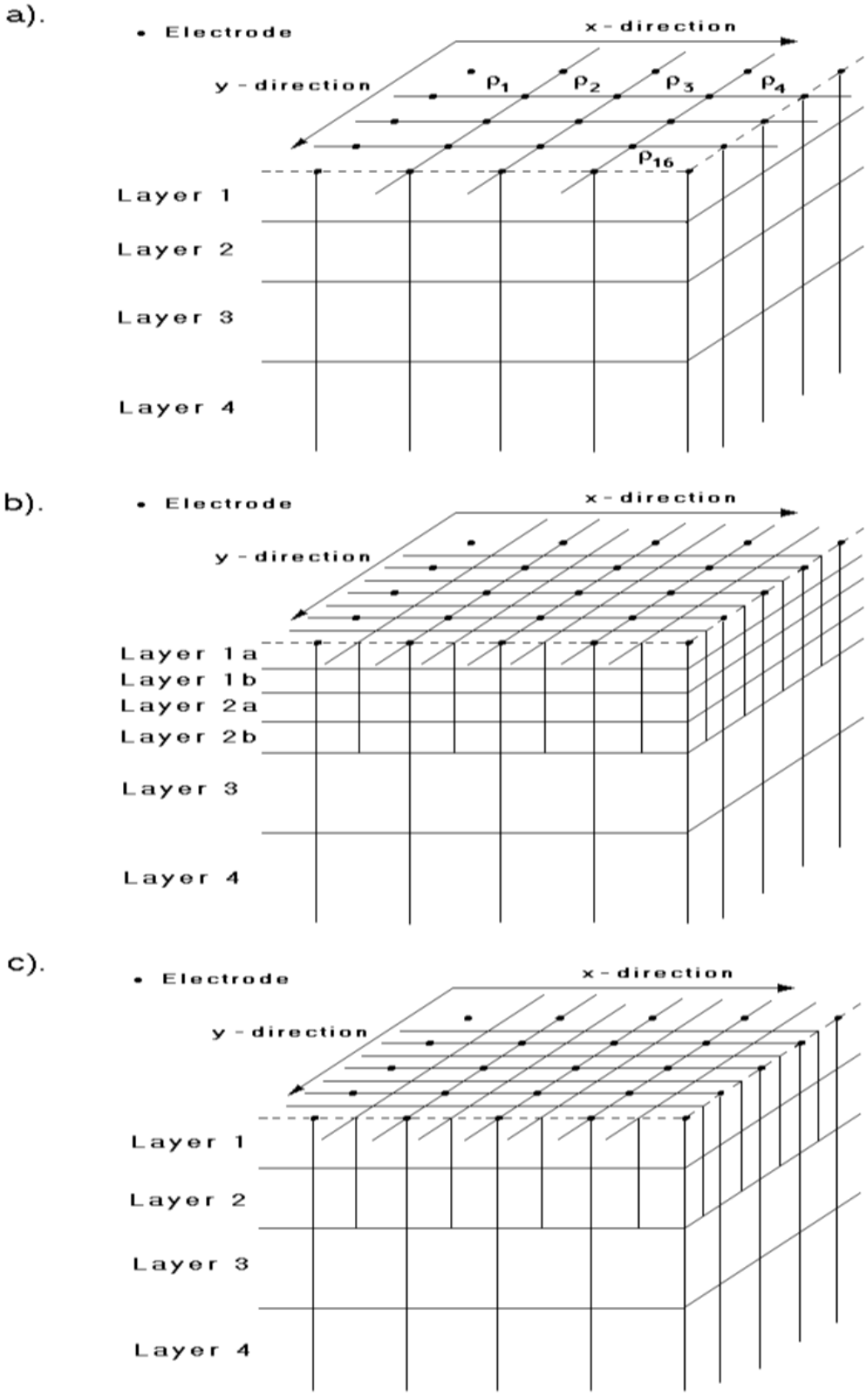
3-2-1 تفسير بيانات التصوير ثلاثي الابعاد Interpretation of 3D Imaging Data

على الرغم من ان عملية تطوير طرق التفسير لبيانات تقنية التصوير ثلاثي الابعاد مازالت مستمرة ، وانها الى الان في مراحلها الاولية ، الا انها لا تختلف عن تلك المستخدمة في تفسير بيانات المسح التصويري ثنائي الابعاد، سوى بقدرة المعالجات المستخدمة في تحويل الكم الهائل من القياسات الى قيم مقاومة نوعية حقيقة وعمق حقيقي في الموديل المعكوس ثلاثي الابعاد، (Li, 1992; Oldenburg and Li, 1994; Loke and Barker, 1996b).

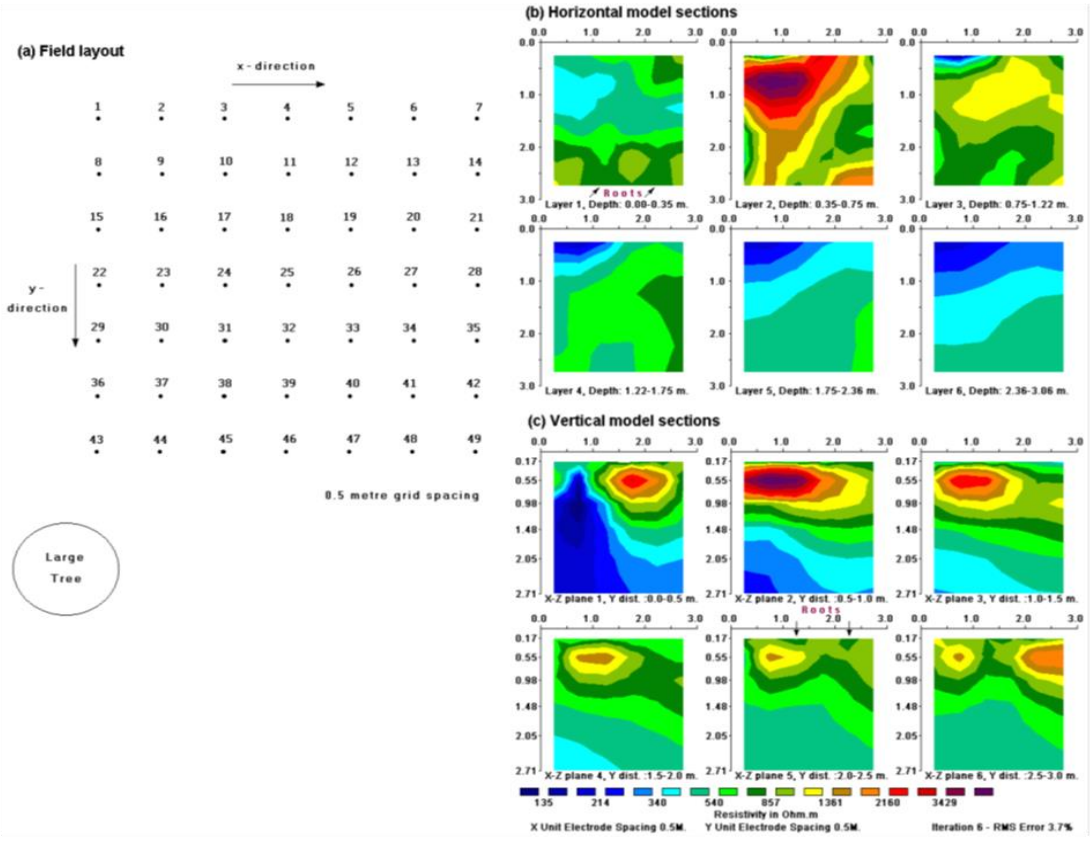
ان خطوات تحويل المقاومة النوعية الظاهرية الى قيم مقاومة حقيقة وعمق حقيقي لبيانات المسح التصويري ثلاثي الابعاد ، هي نفسها المستخدمة لتحويل بيانات المسح التصويري ثنائي الابعاد خلال عملية العكس Inversion ، ولكن يتم تقسيم المقاطع الكاذبة الى طبقات وكل طبقة تقسم الى عدة خلايا مستطيلة الشكل ، وذلك لأن المقاطع الكاذبة لبيانات تقنية التصوير ثلاثي الابعاد ترسم على شكل مكعبات وليس مترسم ثنائي الابعاد ، وكما في الشكل (3-14). وتستخدم في تقسيم الطبقات والخلايا للمكعبات نفس الطرق الرياضية المستخدمة في برامج تفسير البيانات ثنائية الابعاد وهي طرق اختلافات – محدودة Finite – Difference وعناصر – محدودة Finite – Element .

ان عملية تقسيم الطبقات الى خلايا وتوزيع قيم المقاومة النوعية في هذه الخلايا يكون بأنماط كثيرة ، لاحظ الشكل (3-14)، اعتمادا على الوضوح والدقة التي نرغب في الحصول عليها من الموديل المعكوس ، ولكن زيادة عدد الخلايا يساهم بشكل كبير في التأثير على عملية العكس Inversion، لان البرامج كلها حاليا ذات قدرة معالجة قليلة نسبيا مقارنة مع الكم الهائل من البيانات الواجب تحويلها الى موديل معكوس ثلاثي الابعاد، لذلك اشار الباحثون وبمضمنهم المؤلف في كثير من البحوث بان برنامج RES3DINV تقل قدرة العكس فيه مع زيادة عدد البيانات ، وهذا البرنامج هو من افضل البرامج المستخدمة حاليا في تفسير بيانات تقنية التصوير ثلاثي الابعاد. وللحصول على المزيد من المعلومات حول طرق وانماط تقسيم الخلايا في المكعبات ، يرجى مراجعة ، (Loke, 2014).

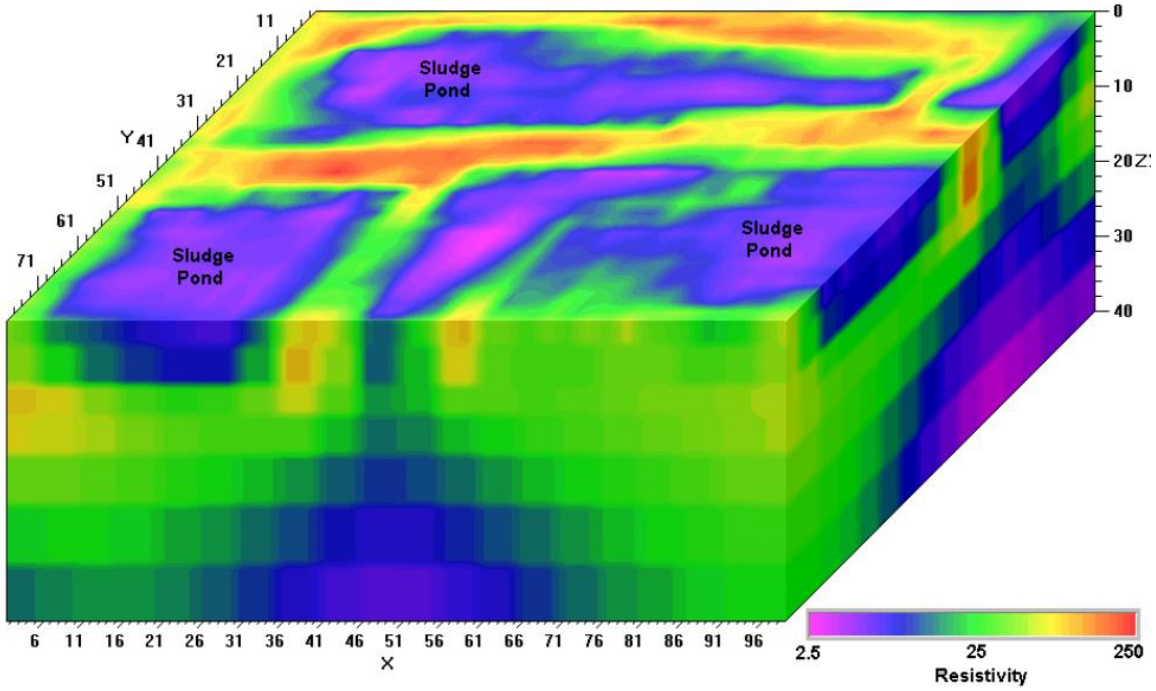
سيكون الناتج النهائي لبرامج التفسير بعد اجراء عملية العكس ، على شكل شرائح عمودية وافقية لأعماق مختلفة بالاتجاهات الثلاثة (X,Y,Z) للموديل المعكوس ثلاثي الابعاد، وكما في الشكل (3-14)، حيث ان اغلب البرامج تعطي هذا النوع من الشرائح وافضلها هو برنامج RES3DINV . هنالك برامج اخرى وهي ليست برامج تفسير تعرض الناتج النهائي على شكل مكعب مثل برنامج Slicer/Dicer ، وكما في الشكل (3-16)، اضافة الى ذلك هنالك برامج اخرى تعرض الناتج النهائي بأشكال مختلفة ، مثل برنامج 3D View. بشكل عام جميع البرامج لا تعرض المكعبات او الشرائح الكاذبة Measured Apparent Resistivity Pseudsection، او المقاطع المحسوبة Measured Apparent Resistivity Pseudsection، وانما تعرض فقط نسبة الخطأ المئوية (RMS%) .



شكل (14-3) :- يوضح تقسيم المكعبات الكاذبة a) يوضح مكعب قياسي فيه عرض الخلية يساوي المسافة بين الاقطاب في الاتجاهين (X) و (Y) , b) يوضح مكعب قسمت فيه الطبقة العليا الى خلايا بالاتجاهين العمودي والافقي بحيث يكون عرضها يساوي نصف المسافة بين الاقطاب وذلك لزيادة الوضوح والدقة ، c) يوضح مكعب قسمت طبقاته الى خلايا بالاتجاه الافقي فقط ،(Loke, 2014).



شكل (3-15) :- يوضح الناتج النهائي لعملية العكس والتي هي عبارة عن شرائح عمودية وافقية للموديل المعكوس ثلاثي الابعاد ،بواسطة برنامج RES3DINV،(Loke, 2014).



شكل (3-16) :- يوضح الناتج النهائي لعملية العكس والتي هي عبارة عن مكعب للموديل المعكوس ثلاثي الابعاد، بواسطة برنامج العرض Slicer/Dicer،(Loke, 2014).

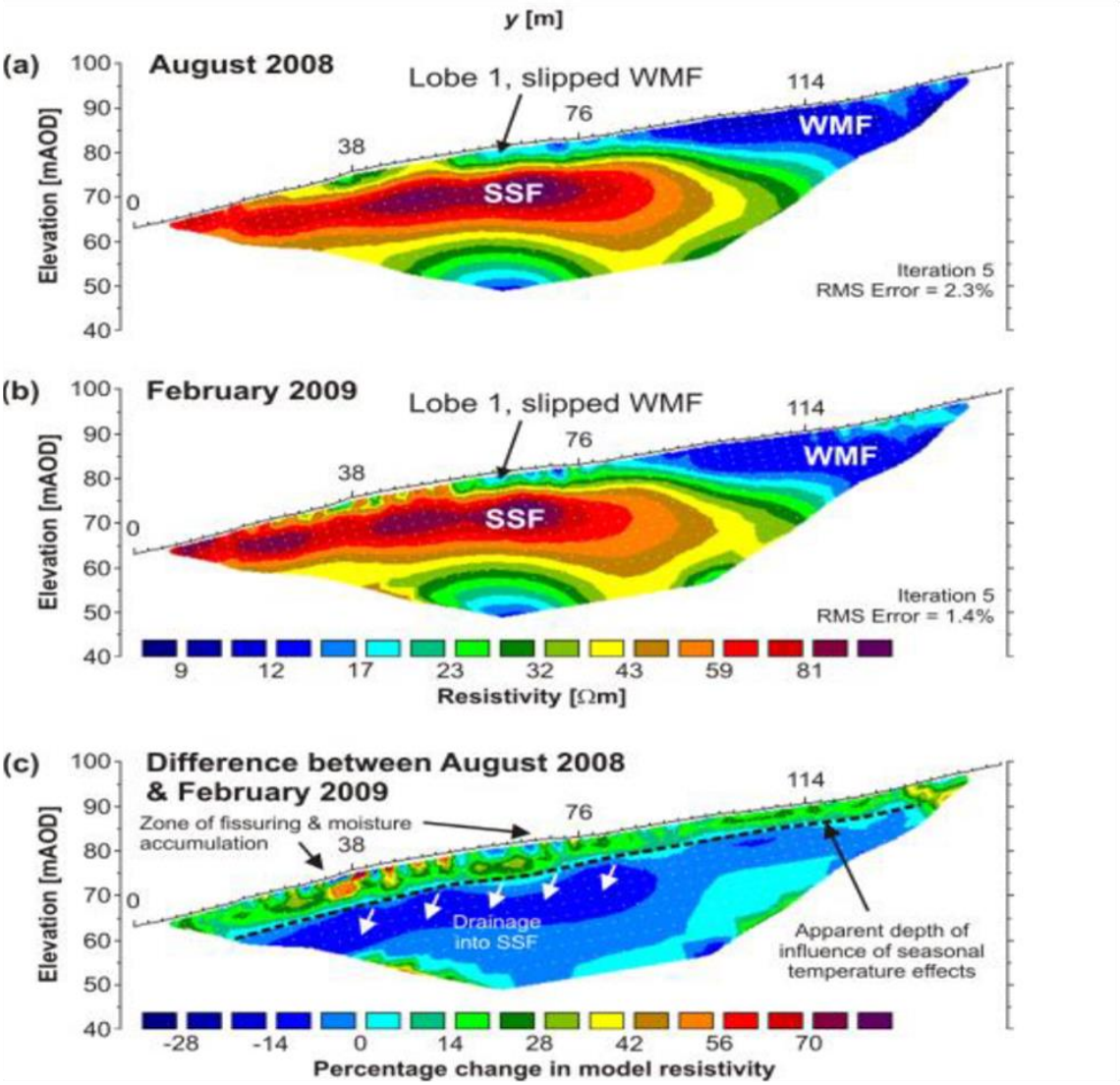
3-3 تقنية الفواصل - الزمنية وتقنية المسح رباعي الابعاد

Time-Lapse and 4D Survey Techniques

لم يعد المسح الكهربائي للمقاومة النوعية مرتبطا بالأبعاد الثلاثة للأرض فقط ، فقد ساعدت التكنولوجيا الحديثة على ادخال الزمن كبعد رابع للقياسات . ان تغير قيمة المقاومة النوعية مع الزمن له تطبيقات مهمة جدا ساعدت في حل الكثير من المشاكل الهندسية والبيئية . ان تقنية الفواصل- الزمنية Time-Lapse، هي واحدة من اهم التقنيات التي ظهرت في السنين الماضية كنظام انذار مبكر لمعرفة التغيرات التي تحصل في الطبقات الصخرية ، وخصوصا التغير في المحتوى المائي للطبقات ، (Gunn et al., 2010a; Chambers et al., 2011a; b; Gunn et al., 2014)، حيث ان هذه التقنية تعمل على قياس قيم المقاومة النوعية خلال فواصل زمنية محددة ، من خلال تثبيت جهاز المسح الكهربائي في منطقة الدراسة وربط منظومة القياس بجهاز الواي - فاي Wi-Fi او الاقمار الاصطناعية واجراء القياسات أوتوماتيكيا بفواصل زمنية محددة وارسالها الى مركز المراقبة . فقد تم تطوير اجهزة قياس المقاومة النوعية ثنائية الابعاد لتكون قادرة على رسم خرائط للمحتوى المائي مع الزمن لمعرفة اوقات حدوث الهزات الارضية، (Hassan, 2014)، او مراقبة عملية انتقال الملوثات وانتشارها داخل الارض، او مراقبة النضوح المائي في خزانات السدود ،كما استخدمت هذه التقنية لقياس التغير في درجة رطوبة التربة ومراقبة التغير في مستوى المياه الجوفية Water Table مع الزمن ، وكما في الشكل (3-17)، (Loke, 2012).

بشكل عام، تستخدم هذه التقنية لمراقبة وتصوير الاحداث التي تحدث ببطء ، لذا فهي تستعمل بشكل واسع في مجال هندسة الزلازل ، (Chambers et al., 2009)، والجيولوجيا الهندسية والبيئية. تستخدم هذه التقنية بشكل عام مع المسوحات الكهربائية ثنائية الابعاد بإدخال الزمن كبعد ثالث ، وان الفواصل الزمنية يتم اختيارها اعتمادا على طبيعة الظاهرة المراد دراستها ، فقد تكون هذه الفواصل، بالساعة ، بالأيام ، بالأشهر او بالسنة.

اما بالنسبة لتقنية المسح رباعي الابعاد فهي تستخدم ايضا بصورة مشابهة للتقنية اعلاه ، ولكن مع المسوحات ثلاثية الابعاد او المسوحات ثنائية الابعاد التي تنفذ بواسطة خطوط مسح متوازية او متعامدة، حيث يتم اجراء المسوحات خلال فترات زمنية محددة ،(Loke et al., 2013). لذا فان هذه التقنية تستخدم لنفس الاغراض التي يتم فيها استخدام تقنية الفواصل – الزمنية.



شكل (3-17) :- يوضح استخدام تقنية الفترات الزمنية من خلال المسح التصويري ثنائي الابعاد ، لجريان مياه على سطح الارض باتجاه منطقة غير مشبعة ، (Chambers et al., 2009) .

المصادر

ABEM, 2010. ABEM Terraloc Operators manual. Bromma, Sweden, 85P.

Abu-Al- Rob, M. F. Ahmed, 2016. Finite Difference and Finite Element Methods for Solving Elliptic Partial Differential Equations . Unpublished, M.Sc. Thesis, Faculty of Graduate Studies, An- Najah National University, Palestine , 130p.

Aizebeokhai, A. P., and Olayinka,A.I., 2010. Anomaly effects of arrays for 3D geoelectrical resistivity imaging using orthogonal or parallel 2D profiles. *African Journal of Environmental Science and Technology* **7**, 446-454.

AL-Ane, J. M., 1998. Theoretical and Application Consideration for the effect of the geometry on Schlumberger and dipole configuration. Ph.D. Thesis, (Unpublished), University of Baghdad, college of Science, 144p.

AL-Ane, J. M., 1983. Application of Electrical Resistivity for Hydrogelogical Problems in Jolak Basin. Unpublished, M.Sc. Thesis, Unv. of Baghdad, College of Science, 130p.

Alpin,L.M., 1950. The Theory of Dipole Sounding, Moscow, Gostoptekhizdat,89P. (In Russian), English Translation in Keller,G.V.,1966, Dipole Methods for Measuring Earth Conductivity, Consultant Bureau, Plenum Press ,New York, 61-78.

Al-Zubedi, A. S., 2009. Application of Vertical Electrical Sounding and 2D Imaging for Delineation of Part of Aquifers South and Southwest Samawa City, Southern Iraq. M.Sc. Thesis (Unpublished), University of Baghdad, college of Science.125p.

Al-Zubedi, A.S., and Thabit, J.M., 2014. Comparison between 2D imaging and vertical electrical sounding in aquifer delineation: a case study of south and south west of Samawa City (IRAQ), *Arabian Journal of Geosciences* 7(1), 173 – 180.

Al-Zubedi, A. S., 2015a. Delineation of Subsurface Fracture Characteristics Using 2D Azimuthal Resistivity Imaging in Dammam Aquifer Within and Out of Abu-Jir Fault Zone , Southwest of Karbala City, Central Iraq. Ph.D. Thesis, (Unpublished), University of Baghdad, college of Science. 147p.

Al-Zubedi, A. S., 2015b. Principles of Electrical Resistivity Techniques. LAP *LAMBERT Academic Publishing Company*, Germany. 147p.

Al-Zubedi, Ahmed Srdah and Thabit, Jassim M., 2016. A comparison between 2D azimuthal and 3D resistivity imaging techniques in determining the subsurface fracture zones within Abu-Jir Fault Zone, Southwest Karbala, Central Iraq, *Near Surface Geophysics*, 14, 401-409.

Amin, A. K., 2008. Aquifer delineation and evaluation of hydraulic parameters from surficial resistivity measurements in sharazoor basin- north east Iraq. Ph.D. Thesis, (Unpublished), University of Baghdad, college of Science .181P.

Barker, R.D., 1992. A simple algorithm for electrical imaging of the subsurface. First Break 10, 53-62.

Barker, R.D., 1991. Depth of investigation of collinear symmetrical four-electrode arrays. *Journal of Geophysics* 54, 1031-1037.

Bentley, L. R., and Gharibi, M., 2004. Two- and three-dimensional electrical resistivity imaging at a heterogeneous remediation site. *Journal of Geophysics*, 69 (3), 674–680.

Bhattacharya, P. K., and Patra, H.P., 1968. Direct Current Geoelectrical Sounding, *Elesvier Publishing Company*, Amsterdam, 131p.

Bobachev, C., 2002. "IPI2Win" A Windows Software for an Automatic Interpretation of Resistivity Sounding Data, Ph.D. Moscow State University, Moscow, Russia, 320p.

Busby, J. P., 2000. The effectiveness of azimuthal apparent resistivity measurements as a method for determining fracture strike orientations, *Journal of Geophysical Prospecting* 48, 677–695.

Busby, J. P. and Jackson, P., 2006. The application of time-lapse azimuthal apparent resistivity measurements for the prediction of coastal cliff failure, *Journal of applied Geophysics* 59, 261–272.

Carpenter, E.W. and Habberjam, G.M., 1956. A tri-potential method of resistivity prospecting. *Journal of Geophysical Prospecting* 29, 128-143.

Chambers, J. E., Meldrum, P. I., Gunn, D. A., Wilkinson, P. B., Kuras , O., Weller , A. L., and Ogilvy, R.D., 2009. Hydrogeophysical monitoring of landslide processes using automated time-Lapse electrical resistivity tomography (ALERT), *15th European meeting of environmental and engineering geophysics*, Dublin, Ireland.

Chambers J E, Wilkinson P B, Weller A L, Ogilvy R D, Meldrum P I, and Caunt, S, 2007. Mineshaft imaging using surface and cross-hole 3D electrical resistivity tomography: A case history from the East Pennine Coalfield, UK. *Journal of Applied Geophysics* 62, 324-337.

Chambers, J. E., Wilkinson, P.B., Kuras, O., Ford, J. R., Gunn, D. A., Meldrum, P.I.,Pennington, C. V. L., Weller, A., L., Hobbs, P. R. N. and Ogilvy, R. D. (2011b). Three dimensional geophysical anatomy of an active landslide in Lias Group mud rocks, Cleveland Basin, UK. *Geomorphology*, 125, 472-484.

Chitea F., and Georgescu P., 2009. Sensitivity function for various geoelectric arrays. Geophysical Research Abstracts. University of Bucharest, Faculty of Geology and Geophysics.

Dahlin, T., 2001. The development of DC resistivity imaging techniques. *Computers and Geosciences* 27 (9), 1019–1029.

Dahlin, T. and Bernstone, C., 1997. A roll-along technique for 3D resistivity data acquisition with multi-electrode arrays, Procs. SAGEEP'97 (Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems), Reno, Nevada, March 23-26 199. 927-935.

Dahlin, T. and Zhou, B., 2004. A numerical comparison of 2D resistivity imaging with 10 electrode arrays. *Journal of Geophysical Prospecting* 52, 379-398.

Dahlin, T., Bernstone, C., Loke, M.H., 2002. A 3D resistivity investigation of a contaminated site at Lernacken in Sweden. *Geophysics* 60 (6), 1682–1690.

Dahlin, T., Zhou, B., 2006. Multiple gradient array measurements for multi-channel 2D resistivity imaging. *Near Surface Geophysics* 4 (2), 113–123.

deGroot-Hedlin, C., Constable, S., 1990. Occam's inversion to generate smooth, two-dimensional models from magneto telluric data. *Geophysics* 55 (12), 1613–1624.

Edwards, L.S., 1977. A modified pseudosection for resistivity and IP. *Journal of Geophysics* 42 (5), 1020-1036.

Flathe, H., 1955. Possibilities and limitation in applying geoelectrical methods to hydrogeological problems in the coastal area of the North West Germany, *geophysical prospecting* 14 (14) , 195-206.

Gerard, R. and Tabbagh, A., 1991. A mobile four electrodes array and its application to electrical survey of planetary grounds at shallow depths. J. *Geophys*. Res., 96 (B-3), 4117-4123.

Griffiths, D. H., and King, R. f., 1981. Applied Geophysics for Geologist and Engineers, Pergamon Press., Second Edition, 223p.

Griffiths, D.H. and Turnbull, J., 1985. A multi-electrode array for resistivity surveying. First Break3, (7), 16-20.

Griffiths, D.H., Turnbull, J. and Olayinka, A.I., 1990. Two-dimensional resistivity mapping with a computer- controlled array. First Break 8, 121-129.

Gunn, D. A., Chambers, J. E., Uhlemann, S., Wilkinson, P. B., Meldrum, P. I., Dijkstra, T. A., Haslam, E., Kirkham, M., Wragg, J., Holyoake, S., Hughes, P.N., Hen-Jones, R. and Glendinning, S., 2014. Moisture monitoring in clay embankments using electrical resistivity tomography. *Construction and Building Materials*, 1-13.

Gunn, D. A., Ogilvy, R., Chambers, J. and Meldrum, P., 2010a. ALERT-ME New technologies for embankment warning systems. *Rail Technology Magazine*, Oct/Nov 2010, 80-82.

Habberjam, G. M. and Watkins, G. E., 1967. The use of a square configuration in resistivity prospecting, *Journal of Geophysical Prospecting*15, 445–467.

Hallof, P. G., 1957: On the interpretation of resistivity and induced polarization measurements. PhD Thesis, Massachusetts institute of technology.

Hagrey, S. A., 1994. Electric study of fracture anisotropy at Falkenberg, Germany, *Journal of Geophys*. 59, 881–888.

Hassan, A.A., 2014. Electrical Resistivity Method for Water Content Characterisation of Unsaturated Clay Soil. Ph. D. Thesis, Durham University. 303p.

Keller, G. V. and Frischknecht, F. C., 1966. Electrical Methods in Geophysical Prospecting, Pergamon Press Inc., Oxford, 519p.

Keller, G. V. and Frischknecht, F. C., 1970. Electrical methods in geophysical

Keller, G. V., and Frischknecht, F. C., 1982. Electrical methods in geophysical prospecting, Third edition, Pegamon press Inc., Oxford, 523P.

Kemna, A., Kulessa, B., Vereecken, H., 2002. Imaging and characterisation of subsurface solute transport using electrical resistivity tomography (ERT) and equivalent transport models. *Journal of Hydrology* 267 (3–4), 125–146.

Kirch, R., 2006. Groundwater geophysics. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. 489p.

Kunetz, G., 1966. Principle of direct current resistivity prospecting. Borntrager, Berlin, 106 p.

Leonard, M. P., 1984. A surface resistivity method for measuring hydrologic characteristics of jointed formations, U.S. Bur. Mines Report of Investigations. No. 8901.

Li Y, and Oldenburg D.W., 1992. Approximate inverse mappings in DC resistivity problems. *Geophysical Journal International* 109, 343-362.

Loke, M. H., 1999.Tutorial: 2-D and 3D Electrical Imaging Surveys, 111p.

Loke, M.H., 2004. Tutorial: 2-D and 3D Electrical Imaging Surveys, 127p.

Loke, M. H., 2010. Tutorial: 2-D and 3D Electrical Imaging Surveys, 145p.

Loke, M. H., 2012. Tutorial: 2-D and 3D Electrical Imaging Surveys, 172p.

Loke, M. H., 2014. Tutorial: 2-D and 3D Electrical Imaging Surveys, 188p.

Loke, M.H. and Barker, R.D., 1995. Least-square deconvolution of apparent resistivity pseudo-sections. *Journal of Geophysics* 60(6), 499-523.

Loke, M.H., Barker, R.D., 1996a. Rapid least-squares inversion of apparent resistivity pseudosections by a quasi- Newton method. *Geophysical Prospecting* 44 (1), 131–152.

Loke M.H. and Barker R.D.,1996b. Practical techniques for 3D resistivity surveys and data inversion. *Geophysical Prospecting*, 44, 499-523.

Loke, M. H., Chambers J.E., Rucker D.F., Kuras O., Wilkinson P. P., 2013. Recent developments in the direct-current geoelectrical imaging method. *Journal of Applied Geophysics* 95, 135–156.

Loke, M.H., Wilkinson, P.B., Chambers, J.E., Uhlemann, S.S. and Sorensen, J.P.R., 2014. Optimized arrays for 2-D resistivity survey lines with a large number of electrodes. *Journal of Applied Geophysics* 122, 136-146.

Maillet, R., 1974. Fundamental Equations of Electrical prospecting. *Geophysics* 12, 297-308.

Massoud, U., Qady ,G., Metwaly, and Santos,F., 2009. Delineation of Shallow Subsurface Structure by Azimuthal Resistivity Sounding and Joint Inversion of VES-TEM Data: Case Study near Lake Qaroun, El Fayoum, Egypt. *Pure and Applied Geophysics* 166, 701–719.

McGillivray, P.R. and Oldenburg, D.W., 1990. Methods for calculating Frechet derivatives and sensitivities for the non-linear inverse problem: A comparative study. *Journal of Geophysical Prospecting* 38, 499-524.

Merrick, N.P., 1997. A new resolution index for resistivity electrode arrays. *Exploration Geophysics* 28, 106-109.

NGA, (2000), Geophysical Serves, D.C. Resistivity. North Geophysical Associates, Inc.www.nga.com info@nga.com .

Nunn, K. R., Barker, R. D., and Bamford, D., 1983. In-situ seismic and electrical measurements of fracture anisotropy in the Lincolnshire chalk, Quart. *Journal of Engineering Geology* 16, 187-195.

Oldenburg, D.W. and Li, Y., 1999. Estimating depth of investigation in dc resistivity and IP surveys. *Geophysics* 64 (2), 403–416.

Oldenborger, G.A., Routh, P.S. and Knoll, M.D., 2005. Sensitivity of electrical resistivity tomography data to electrode position errors. *Geophysical Journal International* 163, 1–9.

Orellana, E., and Moony, H. M.,1966. Master Tables and Curves for Vertical Electrical Sounding over Layered Structures, Interciencia, Costanilla de Los Angeles, 15, Madrid, Spain.

Overmeeren, R.A., van Ritsema, I.L., 1988. Continuous vertical electrical sounding. First Break 6 (10), 313–324.

Panissod, C., Dabas, M., Hesse, A., Jolivet, A., Tabbagh, J., Tabbagh, A., 1998. Recent developments in shallow depth electrical and electrostatic prospectingusing mobile arrays. *Geophysics* 63–5, 1542–1550.

Pazdirek, O. and Blaha, V., 1996. Examples of resistivity imaging using ME-100 resistivity field acquisition system. EAGE 58th Conference and Technical Exhibition Extended Abstracts. Houten, the Netherlands: EAGE.

Robinson, E.S. and Coruh, C., 1988. Basic Exploration Geophysics, Wiley, New York, 562p.

Roy, A. and Apparao, A., 1971. Depth of investigation in direct current methods. *Journal of Geophysics* 36, 943-959.

Rucker, D.F., Levitt, M.T., and Greenwood, W.J., 2009a. Three-dimensional electrical resistivity model of a nuclear waste disposal site. *Journal of Applied Geophysics* 69 (3–4), 150–164.

Sasaki, Y., 1992. Resolution of resistivity tomography inferred from numerical simulation. *Geophysical Prospecting* 40 (4), 453–464.

Sharma , P.V., 1986, Geophysical methods in geology (2nd Edition) ., *Elsevier Scientific Pup. Co.* Netherland. , Amsterdam , 428p .

Shima, H., Sakashita, S. and Kobayashi, T., 1996. Developments of non-contact data acquisition techniques in electrical and electromagnetic explorations. *Journal of Applied Geophysics* 35, 167-173.

Steinich, B.; Simon, I.; Chavarria, J.A. and Marin, L.E., 1997. Geological investigations of the vadose zone in the valley of Hermosillo aquifer, Sonora, Mexico. *Journal of Geophysics International* 36 (3), 191-200.

Szalai, S., Szarka, L., 2008. On the classification of surface geoelectric arrays. *Journal of Geophysical Prospecting* 56 (2), 159–175.

Tamssar, A. Hamidou, 2013. An evaluation of the suitability of different electrode arrays for geohydrological studies in karoo rocks using electrical resistivity tomography. Ph.D. Thesis, university of Free State, faculty of natural and agricultural science, south Africa.183p.

Taylor, R. W. and Fleming, A. H., 1988. Characterizing jointed systems by azimuthal resistivity surveys. *Journal of Groundwater* 26, 464–474.

Telford, W.M.; Geldart, L.P.; Sheriff, R.E., and Keys, D.A., 1979. Applied Geophysics, Cambridge University Press, Cambridge, England, 451-455.

Van Overmeeren, R. A., 1989. Aquifer Boundaries Explored by Geophysical Measurements in the Coastal Plain of Yamen, A Case of Equivalence, *Geophysics* 54(1), 38- 48.

USGS, 2010. Surface Geophysics for Groundwater Exploration, Workshop, Erbil, Iraq.

Watson, K. A. and Barker, R. D., 1999. Differentiating anisotropy and lateral effects using azimuthal resistivity offset Wenner soundings. *Journal of Geophysics* 64(3), 1-7.

Wilkinson, P. B., Chambers, J. E., Lelliot, M., Wealthall, G. P. & Ogilvy, R. D., 2008. Extreme Sensitivity Of Crosshole Electrical Resistivity Tomography Measurements To Geometric Errors. *Geophysical Journal International* 173, 49-62.

Zhao, J.X., Rijo, L. and Ward, S.H., 1986. Effects of geologic noise on cross-borehole electrical surveys. *Geophysics* 51, 1978-1991.

Zhou, B. and Greenhalgh, S.A., 2000. Cross-hole resistivity tomography using different electrode configurations. *Geophysical Prospecting* 48, 887-912.

Zhou, QY, Matsui H, Shimada J., 2004. Characterization of the unsaturated zone around a cavity in fractured rocks using electrical resistivity tomography. *Journal Hydraulic Res*. 42, 25-31.

Zohdy, A. A. R., 1974. Electrical Methods Application of Surface Geophysics to Groundwater Investigations, Techniques of Water Resources Investigations of the United States Geological Survey (USGS), book 2, chapter D1, 66p.

Zohdy, A.A.R., Eaton, G.P., and Mabey, D.R., 1974. Application of surface geophysics to ground-water investigations; U.S. geological survey. Techniques of water resources investigation, 66p.