

طرق الإستكشاف الكهربى

الإستكشاف الكهربى الأرضى Geoelectrical Exploration متنوع بشكل أكبر بكثير من الطرق الجيوفيزيائية الأخرى، حيث أن بعض الطرق الكهربائية مثل طريقة الجهد الذاتى Self-Potential والتيارات الأرضية الكهرومغناطيسية تعتمد على تأثير المجالات الناشئة طبيعيا وهى تشبه فى هذا الخصوص إستكشاف الجاذبية و المغناطيسية. وطرق أخرى تحتاج تيارات أو مجالات كهربية التى تدخل فى الأرض صناعيا ، وهى تشبه فى هذا الخصوص الأساليب السيزمية . وتنتمى إلى هذا النوع طرق المقاومة النوعية والكهرومغناطيسية، والإستقطاب المستحث Induced Polarization. وبسبب تنوع أساليب الإستكشاف الجيوكهربى بالمقارنة مع الطرق الأخرى سوف لا تعامل بنفس التفصيل مثل طرق السيزمية الجاذبية والمغناطيسية .

والطرق الكهربائية لها تطبيقات كثيرة حيث تستخدم فى البحث عن الفلزات والمعادن والمياه الجوفية وتستخدم أيضا بدرجة متزايدة فى الجيولوجيا الهندسية Engineering Geology، حيث تستخدم قياسات المقاومة النوعية لإيجاد عمق صخور الأساس Bed Rocks، وكذلك فى الإستكشاف الجيولوجى الحرارى Geothermal Exploration. بالإضافة إلى تطبيقاتها المهمة فى الكشف والتنقيب عن الآثار.

الخواص الكهربائية للصخور:

الإستكشاف الكهربى يستخدم ثلاث خواص أساسية للصخور.

1- **المقاومة النوعية Resistivity:** أو عكس الموصلية النوعية Conductivity والتي تحكم كمية التيار الذى يمر خلال الصخر .

2- **النشاط الكهروكيميائى Electrochemical:** النشاط الكهروكيميائى للصخور يعتمد على تركيبها المعدنى و على التركيب والتركيز للمحاليل

الكهربية المذابة فى المياه الجوفية حيث أن فروق الجهد الكهربائى الناتجة بالتفاعلات الكهروكيميائية تنتج نتيجة للتماس بين المعادن والمحاليل التى تكون على تماس معها. وهذا النشاط وفروق الجهد الناتجة يشكل الأساس لطرق الجهد الذاتى SP و الإستقطاب الحثى IP.

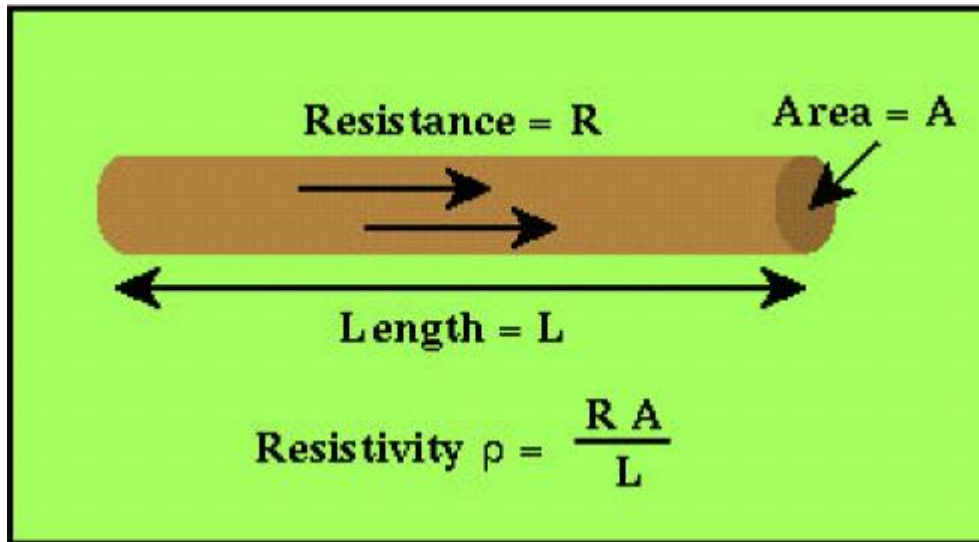
3- ثابت العزل Dielectric constant or Permittivity: يعطى معلومات

عن سعة مادة الصخر لتخزين شحنة كهربائية و يتحكم جزئيا فى تجاوب تكوينات الصخر للتيارات عالية التردد و الداخلة فى الأرض بوسائل توصيلية أو حثية. ثابت العازل الذى يناظر النفاذية فى المواد المغناطيسية هو مقياس للإستقطاب لمادة ما فى مجال كهربى.

طريقة المقاومة النوعية Resistivity Method

المقاومة النوعية Resistivity:

تعريف: المقاومة النوعية لأي مادة تعرف على أنها مقاومة إسطوانة ذات مقطع عرضي مساحتها وحدة المساحة وطول الإسطوانة وحدة الطول. لو أن مقاومة إسطوانة موصلة ذات طول l و مساحة مقطع عرضي A هي R . تكون المقاومة النوعية ρ معبرا عنها بالمعادلة:



$$\rho = R A / l$$

لو أردنا أن نعرف وحدة القياس للمقاومة النوعية فإن:

$$\rho = R A / l = \text{ohm.m}^2 / \text{m} = \text{ohm.m}$$

أى أن الوحدة المقبولة عامة للمقاومة النوعية هي الأوم - متر. و الموصلية الكهربائية تساوى $1/\rho$ ووحدتها mho/m أو siemens/m .

$$\sigma = \frac{1}{\rho} \left[\frac{\text{mhos}}{\text{m}} \right]$$

س: لماذا نستخدم المقاومة النوعية Resistivity وليس المقاومة الأومية Resistance:

المشكلة مع إستخدام المقاومة الأومية بأنها لا تعتمد فقط على نوع المادة ولكن تعتمد على شكل المادة حيث أن المقاومة الأومية لسلك تزداد مع طول السلك وتقل مع زيادة مساحة المقطع . ولكننا فى المسح الجيوفيزيائى نريد خاصية فيزيائية تقيس قدرة المادة على إمرار التيار الكهربى خاصة تميز المادة بغض النظر عن شكلها الهندسى. وهذه الخاصية الفيزيائية التى تميز المادة ولا تعتمد على شكل المادة هى المقاومة النوعية للمادة أو Resistivity ويرمز لها بالرمز ρ .

س: ما الذى يتحكم فى قيمة المقاومة النوعية للصخور؟

قبل الإجابة عن هذا السؤال المهم يجب أن نراجع معا الطرق المختلفة التى يتم بها توصيل التيار الكهربى فى المواد. و هى ثلاث وسائل:

1- توصيل إلكترونى ويتم بحركة الإلكترونات خلال المعادن جيدة التوصيل للكهرباء وهذا يتوقف على وجود عدد من الإلكترونات المنفردة فى المدارات الخارجية للمعادن ومن أمثلة هذه المعادن الكبريتيدات و الجرافيت والنحاس.

2- التوصيل الإلكتروليتى ويتم بحركة الأيونات فى السوائل

3- الإستقطاب الكهربى ويتم من حركة الأيونات المشحونة لمسافة قصيرة نتيجة تأثير مجال كهربى خارجى ثم يتوقف.

إن التوصيل الكهربائى فى معظم الصخور هو النوع الإلكتروليتى بالأساس. وذلك لأن معظم الحبيبات المعدنية عازلة (ماعد الخامات الفلزية والمعادن الطينية)، ويتم التوصيل الكهربائى من خلال المياه البيئية فى المسامات والشقوق. لذلك تعتمد مقاومة التكوين الصخرى عموما على مقاومة الإلكتروليت الموجود وتتناسب عكسيا مع المسامية ودرجة الإشباع.

على العموم، يمكن القول بأن الصخور الصلبة Hard rocks عبارة عن موصلات رديئة للكهربية، ولكن التوصيل يتم على طول وإمتداد الكسور والشقوق.

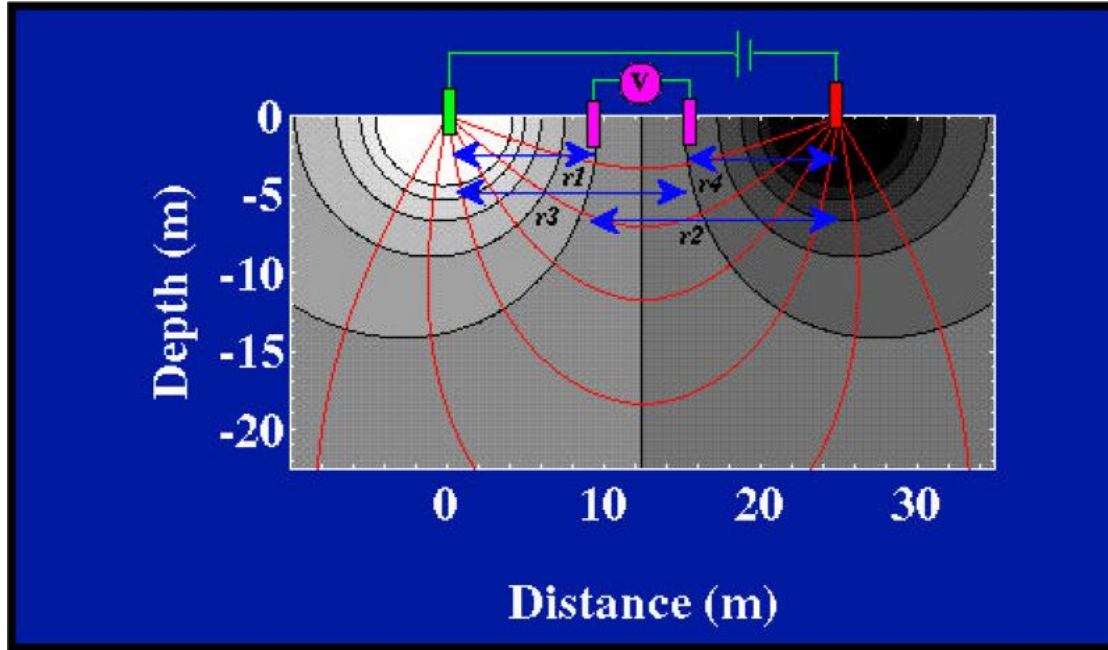
أما فى التكوينات الرسوبية المسامية فتتحكم درجة الإشباع water saturation وطبيعة الإلكتروليت و المسامية فى المقاومة. لذلك تعتبر المقاومة معاملا متغيرا، ليس فقط من تكوين الصخرى إلى آخر ولكن حتى ضمن التكوين نفسه. حيث لاتوجد مضاهاة عامة بطبيعة الصخور مع المقاومة ولكن هناك تصنيفا واسعا يترتب بموجبه تصنيف صخور الطين والمارل، الأحجار الرملية والحصى، الحجر الجيرى والصخور المتبلورة على أساس زيادة المقاومة يبين أنواع الصخور المختلفة.

ويمكن إيجاز العوامل التى تتحكم أو تؤثر فى المقاومة النوعية للصخور:

- 1- كمية الماء الموجود فى مسام الصخور و هى تتناسب عكسيا مع المقاومة النوعية أى كلما زاد تشبع الصخر بالمياه قلت مقاومته لمرور التيار الكهربى.
 - 2- الملوحة للسائل المسامى و هى تتناسب عكسيا مع المقاومة النوعية أى كلما زاد ملوحة المياه الجوفية قلت مقاومة الصخر لمرور التيار الكهربى.
 - 3- المسامية الصخرية والنفاذية لزيادة الممرات التى تساعد على حركة الإلكتروليتات وبالتالي فهى تتناسب عكسيا مع المقاومة النوعية أى كلما زاد المسامية والنفاذية قلت مقاومة الصخر لمرور التيار الكهربى.
 - 4- درجة حرارة الصخر مما يؤدده إلى إنخفاض لزوجة الصخر وبالتالي حرية حركة الإلكتروليت و بالتالى زيادة التوصيلية
 - 5- زيادة نسبة معادن الطين فى الصخر تزيد من توصيلية الصخر
 - 6- زيادة نسبة الشقوق الموجودة فى الصخر التى تعمل كممرات لحركة السوائل
- بما أن المقاومة هى خاصية كهربية أساسية لمواد الصخر ومرتبطة بشدة مع الخواص الصخرية ، فإن التوزيع تحت السطحى للمقاومة النوعية من قياسات على السطح يمكن أن تعطى معلومات مفيدة عن التركيب أو المحتوى للتكوينات المدفونة.

طرق المسح الحقلى لقياسات المقاومة النوعية

من الجدير بالذكر أن كل الطرق المستعملة لقياس المقاومة النوعية تتطلب قياس المقاومة النوعية الظاهرية من خلال إمرار تيار كهربى مستمر فى الأرض عن طريق زوج من الأقطاب وإستخدام زوج اخر لقياس الجهد المصاحب للتيار. دعنا نفترض أن جسما صخريا مقاوماته النوعية تساوى ρ ويفترض أن تيار قيمته I أدخل فى هذا الجسم الصخرى من خلال أقطاب A و B وأن الجهد المصاحب لهذا التيار يقاس عبر القطبين C و D على سطح الأرض بحيث تكون المسافة بين هذه الأقطاب r_1, r_2, r_3 and r_4 كما فى الشكل التالى:



بمعلومية المسافة بين الأقطاب r_1, r_2, r_3 and r_4 و قياس فرق الجهد ΔV بين أقطاب الجهد C و D وشدة التيار المارة إلى داخل الأرض I يمكن حساب قيمة المقاومة النوعية الظاهرية ρ_a كما يلى:

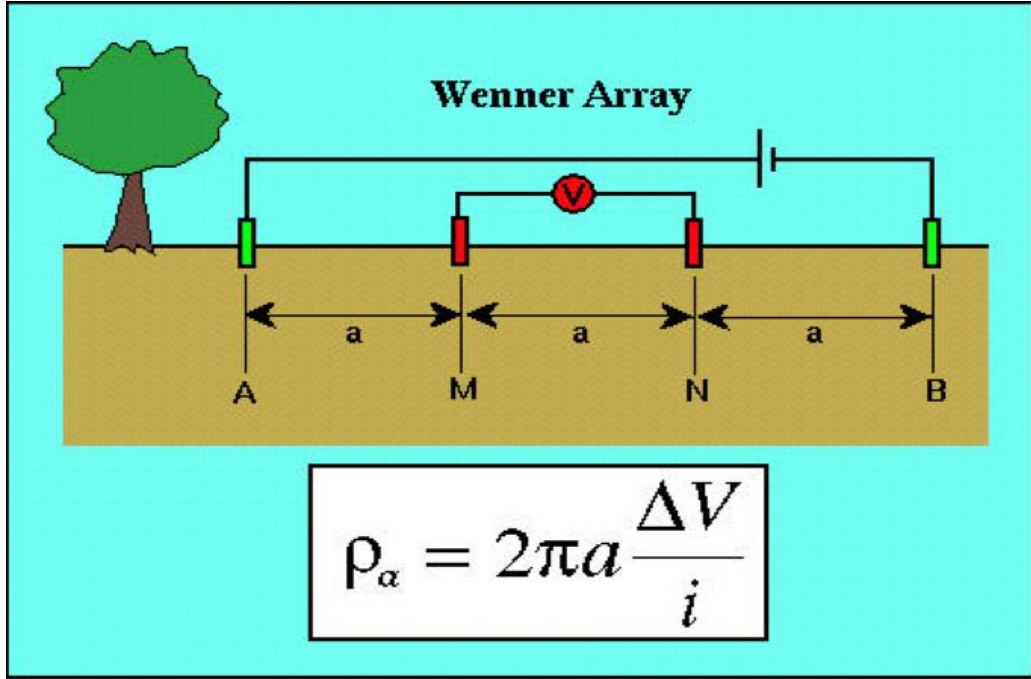
$$\rho_a = \frac{2\pi\Delta V}{i} \left[\frac{1}{\left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} - \frac{1}{r_3} + \frac{1}{r_4}\right)} \right]$$

هناك طرق عديدة للمسح الحقلى للمقاومة النوعية و لكن هنا سنركز على أكثر ثلاث طرق الأكثر شيوعا وإستخداما وهم طرق Wenner و Schlumbergeur و Dipole-Dipole .

1- طريقة التحرى الأفقى Horizontal Profiling:

وتسمى هذه الطريقة بطريقة Wenner و تعتبر من ابسط هذه الطرق وتستخدم عندما يكون هناك تغيرات أو إختلافات أفقية أو تكون الطبقات أو الحواجز الصخرية عمودية بدلا من كونها أفقية. وغالبا تستخدم هذه الطريقة فى الكشف عن هذه التغيرات الأفقية تحت السطحية.

فى هذه الطريقة توضع الأقطاب على خط واحد و على مسافة متساوية من بعضهم البعض وتسمى هذه المسافة بتباعد منظومة فينر a كما فى الشكل التالى. وبقياس فرق الجهد ΔV بين أقطاب الجهد M و N وشدة التيار المارة إلى داخل الأرض I بين أقطاب التيار A و B يمكن حساب قيمة المقاومة النوعية الظاهرية ρ_a كما كما فى المعادلة المبينة مع الشكل التالى.

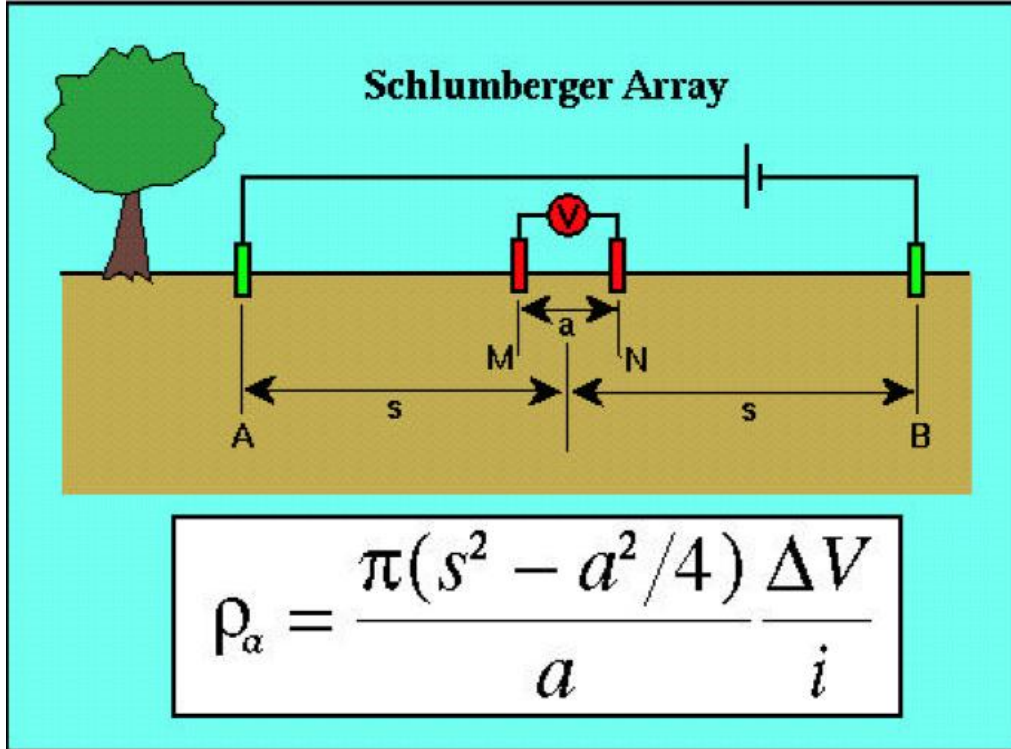


2- طريقة الجس (التصنت) الرأسى

Vertical Electric Sounding or Drilling:

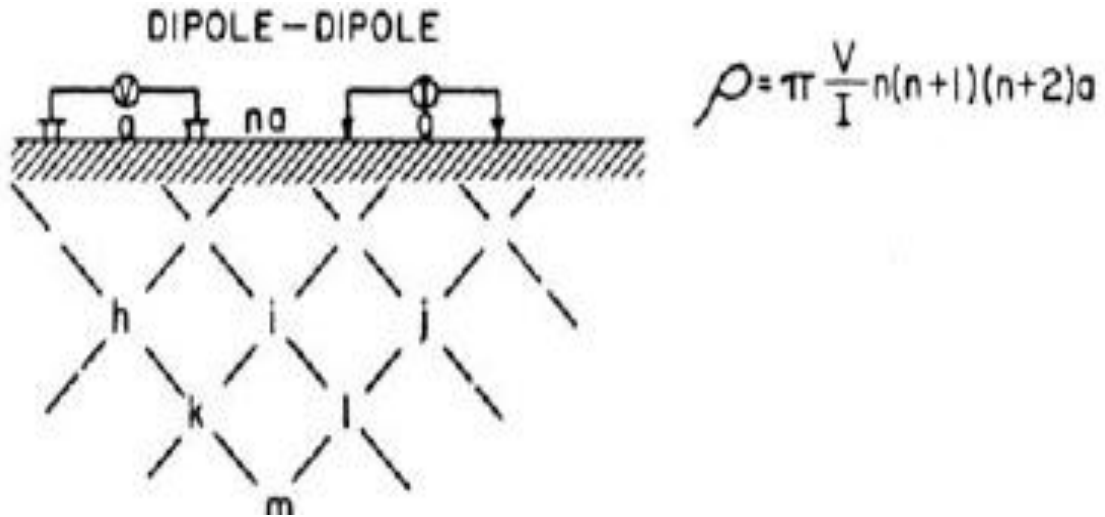
عندما تتكون الأرض من طبقات أفقية تقريبا، ويتطلب ذلك معرفة الاختلاف الرأسى فى المقاومة النوعية، فإن طريقة الجس الكهربى تكون هى الوسيلة فى إستنتاج إختلاف المقاومة النوعية مع العمق تحت نقطة على السطح.

تسمى هذه الطريقة بطريقة Schlumberger توضع الأقطاب على خط واحد و على مسافة غير متساوية من بعضهم البعض بحيث تكون المسافة بين قطبى الجهد a صغيرة بالمقارنة مع المسافة بين قطبى التيار S كما هو مبين بالشكل التالى. وبقياس فرق الجهد ΔV بين أقطاب الجهد M و N وشدة التيار المارة إلى داخل الأرض I بين أقطاب التيار A و B يمكن حساب قيمة المقاومة النوعية الظاهرية ρ_a كما فى المعادلة المبينة مع الشكل التالى.



3- طريقة ثنائي القطب – ثنائي القطب Dipole-Dipole Method :

في هذا التوزيع يتم وضع قطبي الجهد خارج قطبي التيار ويكون كل زوج له تباعد متبادل ثابت يساوي a وتكون المسافة بينهم كبيرة تساوي na . وهنا يمكن معاملة مصدر التيار كثنائي قطب كهربائي. وبقياس فرق الجهد ΔV بين أقطاب الجهد وشدة التيار المارة إلى داخل الأرض | أقطاب التيار يمكن حساب قيمة المقاومة النوعية الظاهرية ρ_a كما في المعادلة المبينة مع الشكل التالي. ويستخدم هذا التوزيع في قياس أو دراسة التغيرات الأفقية و الرأسية. لقياس التغيرات الأفقية يجب أن تبقى المسافة بين زوجي الأقطاب ثابتة. و لكن قياس التغيرات الرأسية مع العمق يجب أن تزداد المسافة بين زوجي الأقطاب بمعامل $n = 1, 2, 3, 4, 5, \dots, n$.



س: لماذا تسمى المقاومة الناتجة بالمقاومة الظاهرية Apparent Resistivity وليس المقاومة الحقيقية True Resistivity:

تعتبر المعادلات السابقة والممثلة للثلاث تنظيمات المختلفة لحساب المقاومة الحقيقية فقط لو كان الوسط الجيولوجي التحت سطحى وسطا متجانسا Homogeneous بصورة كاملة بحيث لا تتأثر قيمة هذه المقاومة عند تبديل أماكن أقطاب التيار والجهد. ولكن الواقع غير ذلك فإن المقاومة النوعية المقاسة تتغير مع تغير أماكن الأقطاب بمعنى أنه لو تم نقل أقطاب التيار حتى مع بقاء أقطاب الجهد ثابتة فسيتم الحصول على قيمة مختلفة للمقاومة النوعية وذلك نتيجة وجود إختلافات جانبية فى المقاومة النوعية لطبقات الأرض. لهذا يطلق على المقاومة النوعية الناتجة من المعادلات الثلاث السابقة بالمقاومة الظاهرية.

طريقة الجهد الذاتى

SELF-POTENTIAL

إن طريقة الجهد الذاتى SP هى الطريقة الوحيدة بين الطرق الكهربية التى لاتستخدم تيار إصطناعيا يرسل داخل الأرض. وتستند هذه الطريقة على قياس فرق الجهد الذى يوجد طبيعيا وتلقائيا داخل طبقات الأرض والنتاج من التفاعلات الكهروكيميائية فى الصخور والخامات المطمورة ويقاس ب الميلى فولت.

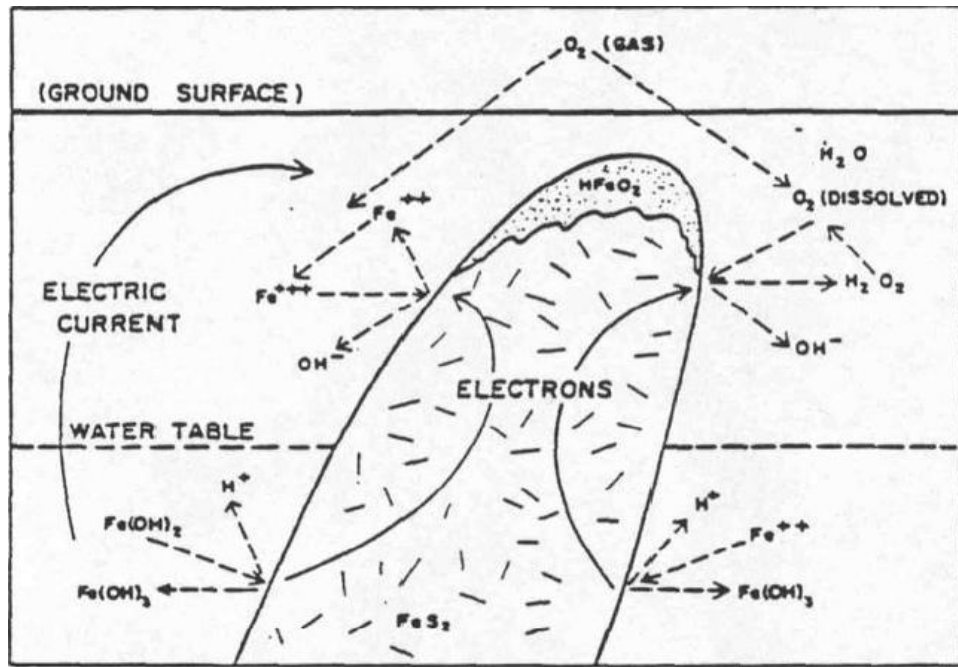
أصل الجهد الذاتى :

يمكن تقسيم الجهود التلقائية أو الذاتية الملحوظة فى الأرض إلى نوعين رئيسيين:

أولاً: جهد التمدن Mineralization Potential: وينشأ هذا النوع من فرق الجهد عندما يتصرف الخام المعدنى مثل الكبريتيدات والجرافيت الموجود فى طبقات الأرض كبطارية جلفانية طبيعية لها طرف موجب و آخر سالب. ويحدث هذا عندما يقع جزء من الخام المعدنى فوق مستوى المياه الجوفية وبالتالي يتأكسد سطحه بفقد إلكترونات (مكونا أيونات موجبة الشحنة) بينما يقع جزء الآخر تحت مستوى المياه الجوفية وبالتالي يتعرض سطح المعدن للاختزال (مكونا أيونات سالبة الشحنة), يؤدى هذا إلى سريان التيار الكهربى من طرف الخام المعدنى إلى الطرف الآخر نتيجة حركة هذه الأيونات بينما داخل جسم الخام لكونه موصلا جيدا للكهربية، تحمل تيار من المحاليل الكهربية المؤكسدة فوق منسوب الماء الجوفى إلى مختزلات موجودة أسفلها نتيجة حركة الإلكترونات الحرة داخل جسم المعدن وبالتالي يسرى التيار الكهربى مكونا شدة الجهد المقاسة فوق كتلة كبريتيد أو جرافيت التى تكون دائما سالبة . كما هو موضح فى الشكل التالى:



لاحظ الشدة السالبة فوق الخام المعدني
يختلف شكلها باختلاف عمق المصدر



ولكن هذا التفسير أو هذا الافتراض يفشل في تفسير التالي:

1- الشدة التي تمثل الخام المعدنى عندما يكون مغمور كلية تحت سطح الماء الجوفى.

2- لماذا تمنع طبقة الطين تكوين الجهد الذاتى للخام المعدنى عندما تغطيه أو تعلوه.

3- كيفية تكوين الجهد الذاتى فوق المعادن رديئة التوصيل الكهربى **Poor conductors**.

ثانيا: الجهود الخلفية Background Potentials وهى:

1- جهد الانتشار أو وصلة السوائل Liquid-Junction or Diffusion Potential:

وهو الذي ينشأ نتيجة انتشار السوائل بين وسطين موصلين للكهربية نتيجة وجود اختلاف في تركيز الأملاح بينهما.

2- فرق الجهد الإنسيابى Streaming or Electrokinetic Potential: وينشأ هذا

الجهد نتيجة مرور السوائل ذات خواص كهربية مختلفة خلال الصخور المسامية المنفذة .

3-- فرق الجهد الكهربى الحيوى Bioelectric Potential: وينشأ هذا النوع من

الجهد نتيجة مرور السوائل فى عملية التغذية الطبيعية فى جذور النباتات.

س: ليس كل كتل الكبريتيدات القريبة من السطح تحدث جهودا شاذة علل؟

الإجابة: يرجع هذا إلى وجود ظروف سطحية تمنع التأكسد أو وجودها أسفل منسوب الماء الجوفى أو وجود تربة دائمة التجمد.

س: لا تحدث كتل الكبريتيدات الموجودة فى المناطق المتجمدة جهودا شاذة

.....علل؟

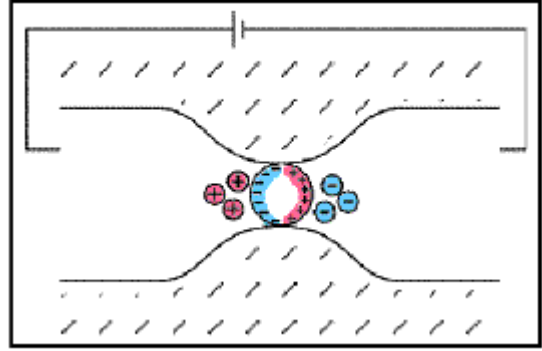
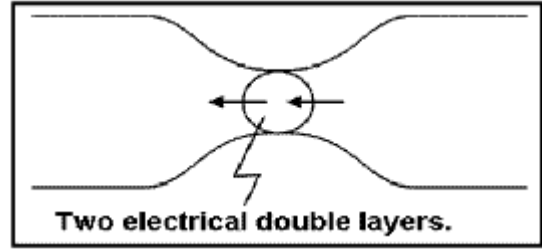
الإجابة: متروكة للطالب للإجابة

الإستقطاب المستحث Induced Polarization

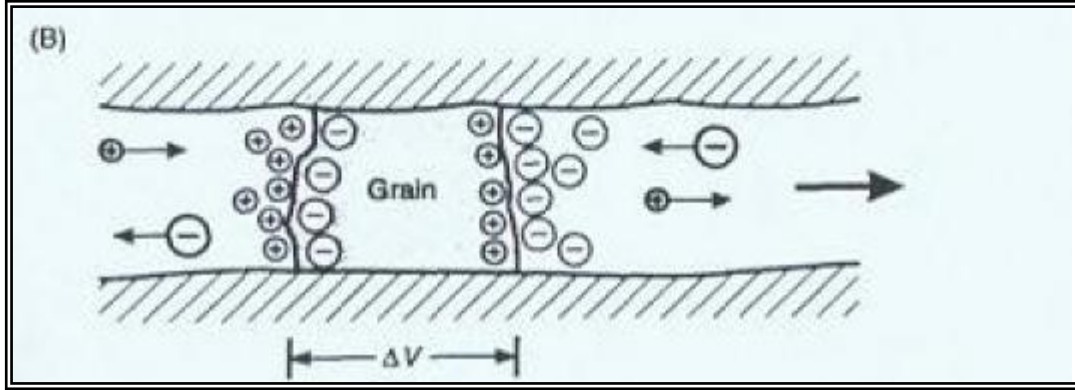
طريق الإستقطاب المستحث التى إستعملت لأول مرة فى أواخر الأربعينيات وبالرغم من قدمها إلا أنها مازالت تستخدم على نطاق واسع فى البحث عن خامات الكبريتيدات المبعثرة Disseminated sulfide ores وإلى حد ما فى البحث عن المياه الجوفية. و فيما يلى سيتم مناقشة وعرض الأساس الفيزيائى والجيولوجى لمصدر الإستقطاب المستحث فى طبقات الأرض:

1- الإستقطاب القطبى Electrode Polarization : ويصاحب هذا النوع من

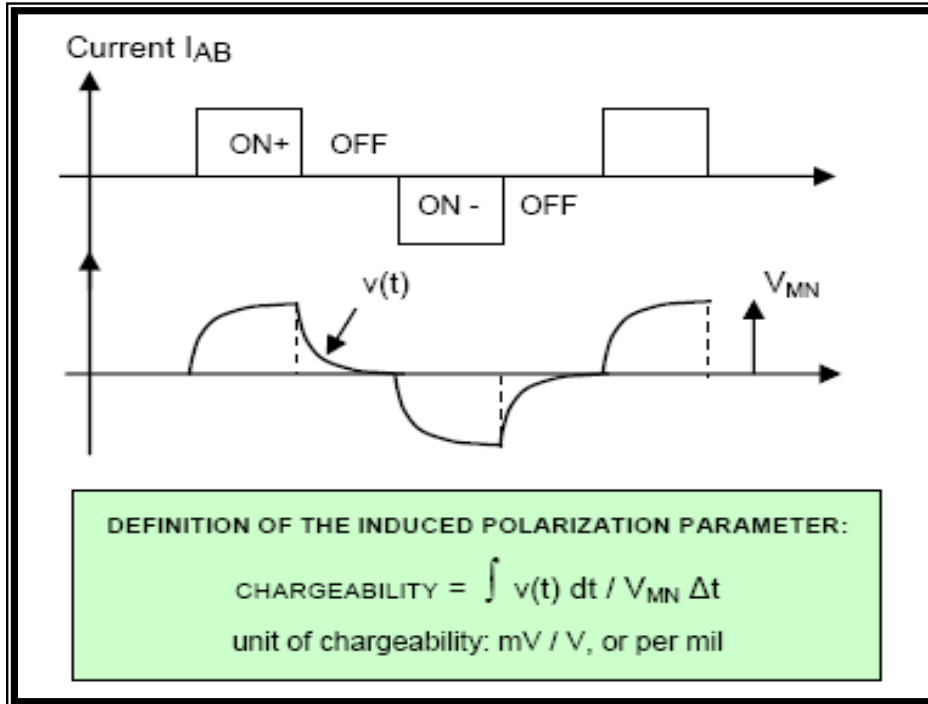
الإستقطاب الحثى تواجد المعادن الموصلة للكهربية و يتناقص مع زيادة المسامسة الصخرية. فعند مرور تيار كهربى خلال صخرة حاوية على معادن فلزية، فإن التوصيل الأيونى يتعوق إلى حد كبير من قبل الحبيبات المعدنية التى يكون إنسياب التيار فيها إلكترونيا. إن ذلك يقود إلى تراكم الأيونات فى الحد الفاصل بين المعدن والمحلول مؤديا إلى نمو فولتية كهروكيميائية عن سطوح الحبيبات المعدنية كما هو موضح بالشكل التالى:

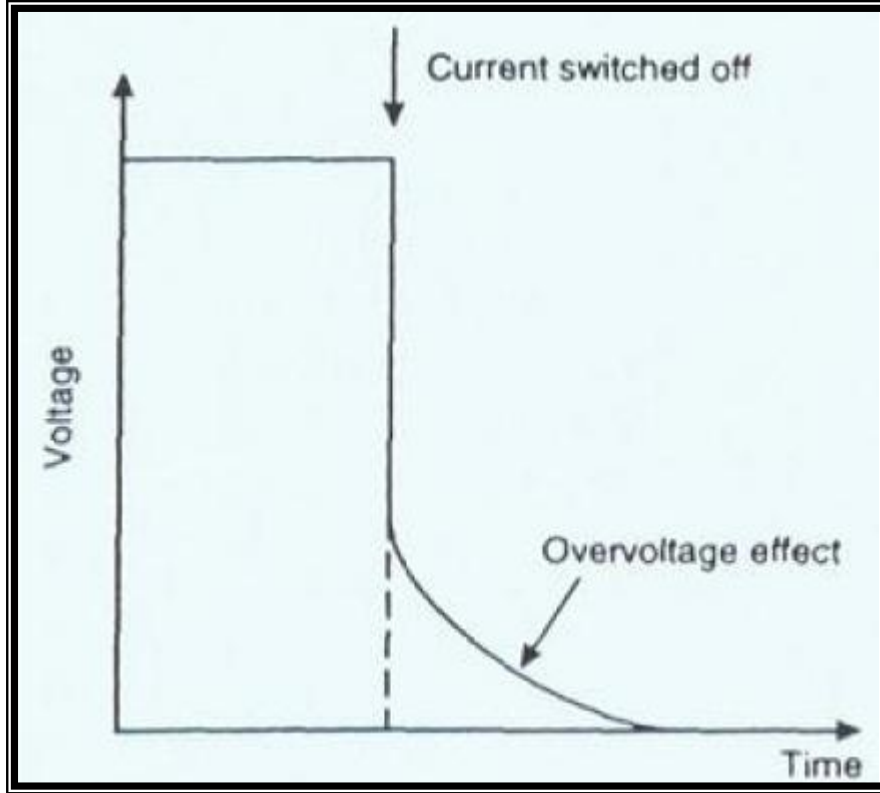
	<p>يحدث الإستقطاب القطبى عندما تسد المسام الصخرية بالحبيبات المعدنية . فإن التوصيل الأيونى يتعوق إلى حد كبير من قبل الحبيبات المعدنية التى يكون إنسياب التيار فيها إلكترونيا. إن ذلك يقود إلى تراكم الأيونات فى الحد الفاصل بين المعدن والمحلول مؤديا إلى نمو فولتية كهروكيميائية عن سطوح الحبيبات المعدنية عندما يطبق مجال كهربى خارجى كما هو مبين بالشكل.</p>
	<p>تكون النتيجة طبقتين كهربيتين مشحونتين على جانبي سطح الحبيبات المعدنية كما هو مبين بالشكل يودى إلى وجود جهد كهربى يقاس من على السطح.</p>

توضيح آخر لطريقة تكوين Electrode Polarization :



إن هذه العملية مشابهة لإستقطاب قطب وذلك عند غمس القطب فى محلول إلكترولىتى. وعند إنقطاع التيار الخارجى المسلط Applied Field تتبدد الفولتية الكهروكيميائية ولكنها لاتنخفض إلى الصفر أنيا. ولكن لوحظ أن إنحلال الفولتية يتغير مع الومن كما يظهر فى الشكل التالى:





ويمكن قياسه كجزء من الفولتية V التي كانت موجودة عند مرور التيار. وتعطى النسبة بين السعة للجهد الإضافي بعد توقف التيار مباشرة إلى تلك (قيمة الجهد) بعد التوقف $\Delta V/V$ تعطى قياس التركيز للمعادن الفلزية في المواد التي يسرى خلالها التيار. وهذا بإختصار مبدأ الإستقطاب المستحث أو IP .

س: هل يمكن ملاحظة الإستقطاب المستحث في حالة عدم وجود معادن فلزية في الصخر؟

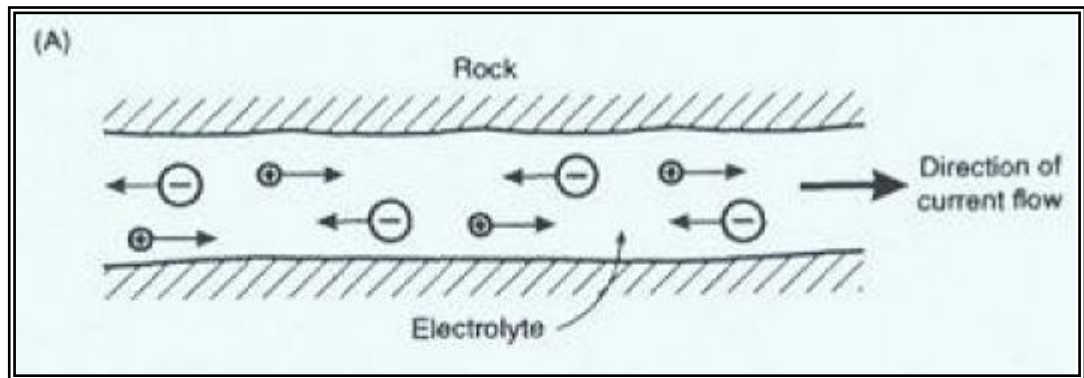
الإجابة: نعم يمكن. كيف؟

لوحظ أن الرواسب الحاملة للطين إستقطابا مستحثا ملموسا يسمى **الإستقطاب الغشائي Membrane Polarization** : ويسمى الإستقطاب الطبيعي Normal IP وهو يصاحب تواجد معادن الطين في الصخر حيث أن سطح جسم الطين له شحنة سالبة تجذب الأيونات الموجبة من الإلكترونات الموجودة في المسامات (إنظر الشكل التالي). وكنتيجة لهذا التوزيع المستقطب للأيونات والمسمى بالإستقطاب الغشائي)، فإن إنسياب التيار يعوق، و عند توقف التيار المسلط تعيد الأيونات الموجبة توزيع نفسها للرجوع إلى وضع التعادل. إن عملية إعادة التوزيع

للأيونات تظهر فولتية منحلة على شكل IP. ويتناقص قيمة هذا الجهد إذا زادت محتوى معادن الطين عن 10% وذلك بسبب نقص المسامية وبالتالي إنخفاض التوصيلية الكهربائية.

	<p>يحدث الإستقطاب الغشائي Membrane polarization عندما وجود حبيبات الطين ذو المسام الضخمة الضيقة و الشحنات السالبة على أسطح حبيباتها</p>
	<p>تتجمع الشحنات الكهربائية عندما يطبق المجال الكهربائي الخارجى</p>
	<p>ينتج شحنة ثنائية (موجب و سالب) على جانبي الإختناق فى الثغور أو المسام منتجا جهدا يمكن قياسه من على السطح</p>

توضيح آخر لطريقة تكوين Membrane Polarization :



ملحوظة هامة:

إن الإستقطاب المستحث سواء كان قطبيا أم غشائيا ظاهرة سطحية بالأساس أى تتم على أسطح حبيبات الصخر والمعدن ولذلك فإن تأثيرها سيكون أكبر فيما لو كان الخام الفلزي أو الطين مبعثرا بدلا من كونه متماسكا.