الأسبوع الرابع (٢٩-٣٨)

الفصل الثاني

طرائق المغنطيسية

Magnetic methods

الجامعة السورية الخاصة
SYRIAN PRIVATE UNIVERSITY

2-1- مقدمة:

تعتبر دراسة المغنطيسية الأرضية أقدم فروع الجيوفيزياء، فقد عرفت الشعوب القديمة خاصة التجاذب والتنافر عند بعض الصخور مثل حجر المغنطيس (Lodestone) (حجر المغنيتيت أو أكسيد الحديد المغنطيسي) ثم استخدم الصينيون البوصلة قبل الميلاد بعدة قرون، وقد تعرف الأوروبيون في القرن الثاني عشر الميلادي على البوصلة عن طريق التجار العرب.

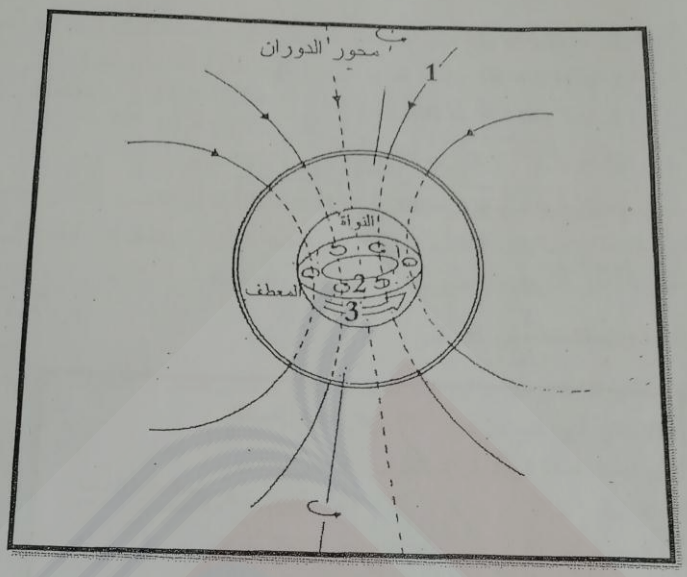
دفع ازدياد المعلومات عن المغنطيسية الأرضية السير وليام جلبرت (William Gilbert) (1540-1603) إلى القيام بأول دراسة علمية عنها، وسجل نتائجه بكتابه "المغنطيس" (De Magnet)، وبين بأن الحقل المغنطيسي الأرضي يشبه الحقل المغنطيسي الناتج عن مغنطيس ثنائي القطب دائم يتجه شمالاً-جنوباً ويمر بالقرب من محور دوران الأرض.

في القرنين السابع عشر والثامن عشر تم، خلال رحلات الاستكشاف الأوروبي للعالم، قياس تغيرات الانحراف المغنطيسي (Magnetic Declination) والميل المغنطيسي (Magnetic Inclination) في العالم، مما أدى إلى وضع خريطة تساوي الانحراف المغنطيسي (Isogonic map) في المحيط الأطلسي عام 1701 بواسطة هالي (Halley)، وتبع ذلك رسم خريطة تساوي الميل المغنطيسي (Isoclinic map) عام 1777 (Wilcke, 1777).

قام كارل فريدريك غاوص (Karl Frederick Gauss) بدراسات مكثفة للحقل المغنطيسي الأرضي بين عامي 1830 و 1840 ومازال العديد من نتائجه صالحاً حتى الآن. وبين من تحليلاته الرياضية بأن هذا الحقل ناتج عن مصدر داخل الأرض وليس خارجها، وأشار إلى احتمال وجود علاقة بين دوران الأرض والحقل المغنطيسي الأرضي بسبب قرب هذا الحقل من محور دوران الأرض. في عام 1839 استخدم غاوص المعلومات المتوفرة في وضع نموذج رياضي لهذا الحقل باستخدام حدود توافقية كروية (Terms of spherical harmonics)، مما برهن رياضياً على طبيعة الحقل ثنائية القطب وعلى مصدره الداخلي.

2-2- أصل الحقل المغنطيسي الأرضي:

استمرت دراسة الحقل المغنطيسي الأرضي (geomagnetic field) والظواهر المتعلقة به، وتبين بأن القسم الأعظمي منه (99%) ينشأ في باطن الأرض، ويعتقد حالياً بأن التيارات الكهربائية الحلقية التي تجري في النواة الخارجية للأرض، التي تمتد من 2800 إلى 5000 كم، تشكل ما يشبه المولد ذاتي التحريض (self-excited dynamo) (الشكل 2-1). تنتج هذه التيارات الكهربائية الحلقية في دوامات (eddies) كبيرة من المواد السائلة الناقلة كهربائياً، والتي تنتج عن تباين سرعة دوران النواة الداخلية للأرض عن سرعة دوران المعطف والقشرة بسبب لزوجة النواة الخارجية المنخفضة.



الشكل (2-1). الحقل المغنطيسي الأرضي والتيارات الحلقية.

1- خطوط الحقل المغنطيسي الأرضي خارج النواة.

2- التيارات الحلقية في النواة.

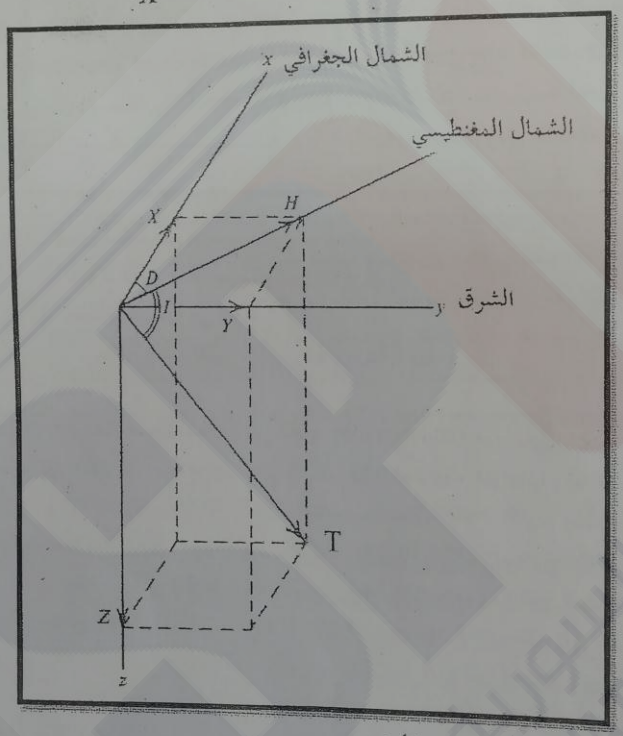
يشير السهم الكبير (3) إلى اتجاه حركة النواة.

تنتج هذه التيارات الكهربائية الحلقية الحقل ثنائي القطب (Dipole field) الذي يميل بزاوية مقدارها 11.5 درجة عن محور دوران الأرض، ويبتعد عن مركز الأرض 300 كم باتجاه إندونيسيا وإحداثيات أقطابه هي $78.5^oS, 110^oE$ و $78.5^oN, 70^oW$ أما القطبين المغنطيسيين حيث $I = 90^o$ وما يسمى أقطاب الغطس (Dip poles) فإحداثياتهما هي $67^oS, 143^oE$ و $75^o N, 101^oW$ (Telford et al., 1976).

يعطي الشكل (2-2) عناصر الحقل المغنطيسي الأرضي في نقطة (O) حيث (T) شدة الحقل الكلي (Total Field) واتجاهه باتجاه الشعاع T، وتمثل الزاوية (I) التي يصنعها الحقل الكلي مع الأفق ميل الحقل (Inclination) وتعد هذه الزاوية موجبة تحت الأفق، أما الزاوية (D) التي تصنعها المركبة الأفقية (H) (Horizontal) مع الشمال الجغرافي فتمثل انحراف الحقل (Declination) ويعد موجباً نحو الشرق، وأما مركبات الحقل فهي (X) باتجاه الشمال الجغرافي و (Y) باتجاه الشرق و (Z) الشاقولية نحو الأسفل.

تعطي العلاقات التالية (العلاقات 2-1) عناصر الحقل المختلفة:

$$X = H \cos D$$
$$Y = H \sin D \qquad (2\text{-}1)$$
$$Z = T \sin I = H \tan I$$
$$H = \sqrt{X^2 + Y^2} = T \cos I$$
$$F = \sqrt{X^2 + Y^2 + Z^2} = \sqrt{H^2 + Z^2}$$
$$\tan I = \frac{Z}{H}$$
$$\tan D = \frac{Y}{X}$$



الشكل (2-2). عناصر الحقل المغنطيسي الأرضي.

2-3- وحدات قياس الشدة المغنطيسية:

سميت وحدة الشدة المغنطيسية في النظام cgs بالأورستد Oersted، ويرمز له بـ Oe، أو الغاوص Gauss، ويرمز له بـ G، وسميت وحدة الشدة المغنطيسية المستخدمة في القياسات التنقيبية بالغاما Gamma، ويرمز لها بـ γ، وتساوي جزءاً من مئة ألف من الأورستد:

$$1\gamma = 10^{-5} Oe$$

تعتمد الكتب الجيوفيزيائية حالياً النظام الدولي للوحدات (SI) (International System) الذي سميت فيه وحدة الشدة المغنطيسية بالتسلا Tesla، ويرمز لها بـــ T، ويساوي عشرة آلاف أورستد أي:

$$1T = 10^4 Oe$$

وبما أن

$$1\gamma = 10^{-5} Oe$$

إذن

$$1\gamma = 10^{-9} T = 1 \text{ nanoTesla} = 1nT$$

تساوي شدة الحقل المغنطيسي الكلي حوالي 60000 و 70000 نانوتسلا في القطبين الشمالي والجنوبي على التوالي. وتساوي الشدة الدنيا للحقل 25000 نانوتسلا في جنوب البرازيل، وتصل هذه الشدة إلى 300000 نانوتسلا في بعض المناطق التي تحتوي على تجمع عالي لمواد مغنطيسية.

2-4- تغيرات الحقل المغنطيسي الأرضي:

يتألف الحقل المغنطيسي الأرضي من جزأين هما الحقل الرئيسي والحقل الشاذ أو التغيرات القرنية، ويتغير مع الزمان والمكان والارتفاع عن سطح الأرض.

تلخص التغيرات الحاصلة في الحقل المغنطيسي الأرضي بما يلي:

آ - التغيرات القرنية Secular Variations

ب - التغيرات اليومية القمرية Lunar diurnal Variations

ج - التغيرات اليومية الشمسية Solar diurnal Variations

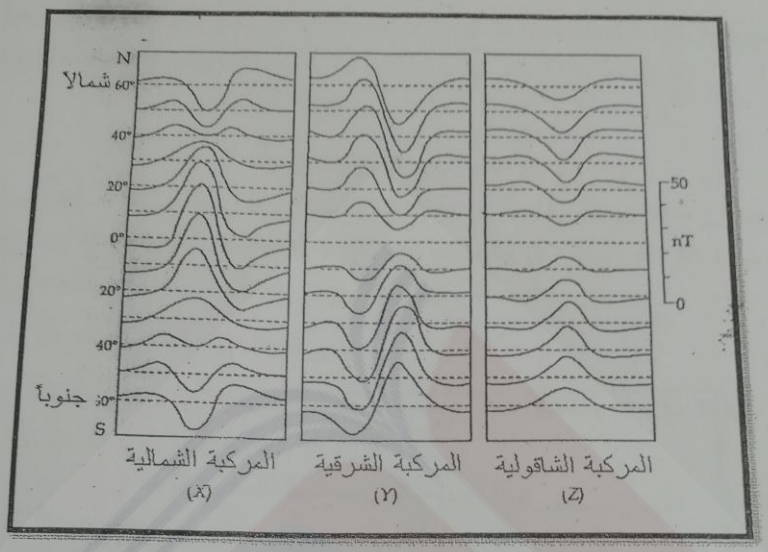
د - التغيرات الناتجة عن العواصف المغنطيسية Magnetic storms

2-4-1- التغيرات القرنية:

إن التغيرات القرنية هي تغيرات بطيئة في الحقل المغنطيسي الأرضي تتم خلال عقود وقرون من الزمن وبمعدل متغير مع الزمن ويمكن ملاحظتها في كل المراصد العالمية.

2-4-2- التغيرات اليومية:

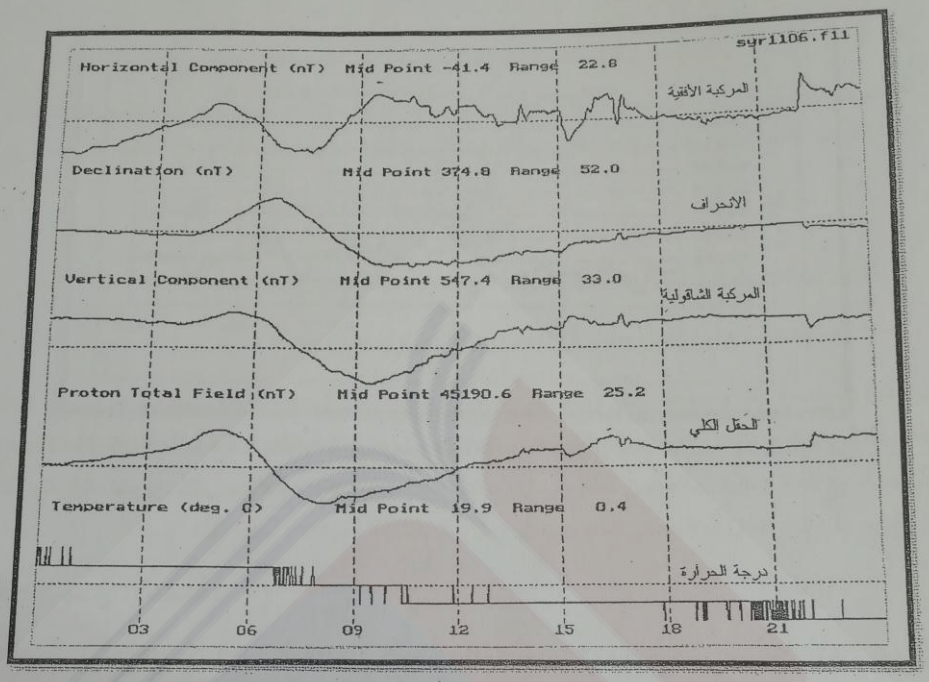
للتغيرات اليومية (diurnal variations)، برغم صغرها، أهمية كبرى نظراً للسرعة التي تتم بها، إذ يكون لها دورة مقدارها يوم واحد ومتوسط سعتها (25 نانوتسلا)، ويتم تسجيلها في المراصد المغنطيسية، وتعتمد على وضع الأرض بالنسبة للشمس، لذا سميت التغيرات الشمسية اليومية وتبلغ سعتها أو شدتها بحدود (40 نانوتسلا) (الشكل 2-3).



الشكل (2-3). تغير عناصر الحقل المغنطيسي الأرضي بآن واحد في نصف الكرة الشمالي ونصف الكرة الجنوبي.

هنالك أيضا التغيرات اليومية القمرية التي عُزي تشكلها لتأثير القمر على الغلاف المتأين للأرض أثناء دوران القمر حول الأرض. لكن هذه التغيرات أقل أهمية من التغيرات الشمسية نظراً لانخفاض سعتها.

يظهر الشكل (2-4) التغيرات اليومية الهادئة في المرصد المغنطيسي السوري (Syrian Magnetic Observatory SYR) في يوم 6 تشرين الثاني 2011، كما يظهر من الأرقام المسجلة في العمود الثالث من يمين الشكل.



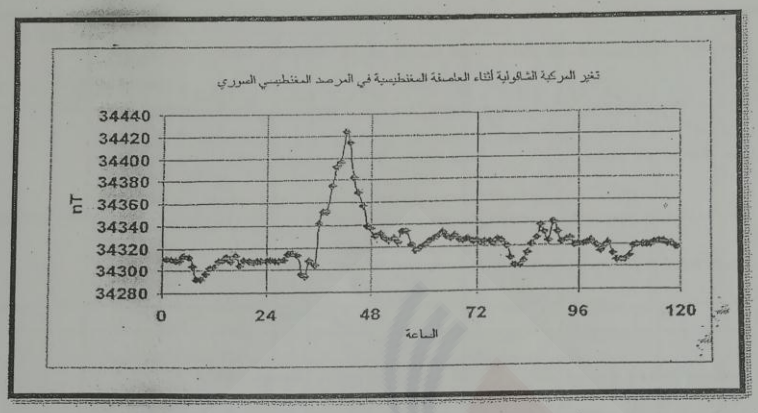
الشكل (2-4). التغيرات اليومية الهادئة في المرصد المغنطيسي السوري في 6 تشرين الثاني 2011.

2-4-3- العواصف المغنطيسية:

تكون التغيرات المضطربة أقل انتظاماً ومصاحبة للعواصف المغنطيسية وبالتالي يصعب التنبؤ بها. تسبب العواصف المغنطيسية المفاجئة اضطرابات عالية في التسجيلات المغنطيسية وتكون سريعة وغير متوقعة، فقد تبلغ سعتها بحدود (100 نانوتسلا) بين خط الاستواء وخط عرض (60°) بينما قد تزداد سعتها كثيراً في المناطق القطبية، إلى حوالي 1000 نانوتسلا، حيث تترافق مع حدوث الشفق القطبي.

وتنتج هذه العواصف من البقع الشمسية (Sun spots) التي ترسل سيلاً هائلاً من الجزيئات المشحونة، فتؤثر في الغلاف المتأين للأرض بشكل كبير. لذا يجب إيقاف المسح المغنطيسي عند حدوث عاصفة مغنطيسية نظراً لتعذر إجراء التصحيح بالنسبة لها.

يعطي الشكل (2-5) تغيرات المركبة الشاقولية في المرصد المغنطيسي السوري أثناء عاصفة مغنطيسية حدثت بين 19-23 تشرين الثاني من عام 2003 (Abou-Deeb et al., 2009).



الشكل (2-5). تغيرات المركبة الشاقولية في المرصد المغنطيسي السوري أثناء عاصفة مغنطيسية في تشرين الثاني من عام 2003.

2-5- المبادئ الأساسية:

بَيّنَ غاوص (Gauss) بأن القطب المغنطيسي (magnetic pole) الوحيد غير موجود، فكل قطب موجب يجب أن يقابله قطب سالب، بشكل ثنائي قطب مغنطيسي (magnetic dipole).

فالقطب المغنطيسي هو النقطة التي تتلاقى فيها خطوط الحقل أو القوة، وتبعد قليلاً عن طرف المغنطيس باتجاه وسطه.

2-5-1- قانون كولومب والقوة المغنطيسية Coulomb's Law and Magnetic force:

تكون القوة (F) بين قطبين مغنطيسيين قوتهما p_1 و p_2 وتفصل بينهما مسافة r:

$$F = \frac{1}{\mu}\frac{p_1 p_2}{r^2} \qquad (2\text{-}2)$$

حيث ثابت التناسب μ هو النفوذية المغنطيسية (magnetic permeability) وتعتمد على الخواص المغنطيسية للوسط المحيط بالقطبين.

2-5-2- العزم المغنطيسي Magnetic moment:

عند وضع ثنائي قطب في حقل مغنطيسي يدور ليأخذ اتجاه الحقل المغنطيسي، لذا يقال بأن لثنائي القطب عزم مغنطيسي. بالتعريف يكون العزم المغنطيسي M للمغنطيس مساوياً لجداء قوة القطب في المسافة الفاصلة بين القطبين:

$$M = p.\,L \qquad (2\text{-}3)$$

ومنحى العزم على طول الخط الواصل بين القطبين واتجاهه من القطب السالب نحو القطب الموجب.

2-5-3- الحقل المغنطيسي Magnetic field:

الحقل المغنطيسي H هو حقل كمون (potential field) ويُعرَّف بأنه القوة، مقدرة بواحدة قوة القطب، المطبقة من قطب قوته p على واحدة القطب p_0 الموضوع في نقطة ما تبعد بمسافة r عن القطب p، ويساوي:

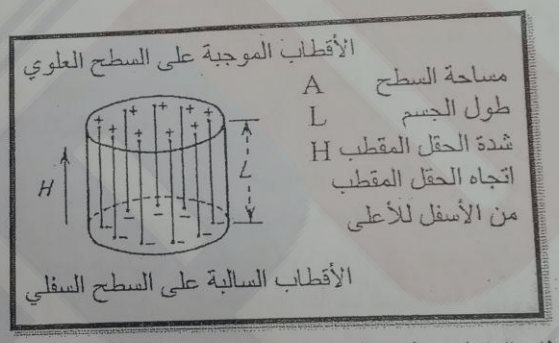
$$H = \frac{F}{p_0} = \frac{pp_0}{\mu r^2 p_0} = \frac{p}{\mu r^2} \qquad (2\text{-}4)$$

تقاس شدة الحقل المغنطيسي في نظام cgs بالأورستد وبالنظام الدولي SI بالتسلا.

2-5-4- شدة المغنطيسية Intensity of magnetization:

يؤدي وضع مادة مغنطيسية في حقل مغنطيسي خارجي شدته (I) إلى تحريض أقطاب مغنطيسية (الشكل 2-6) على طرفي المادة، تدعى هذه العملية الاستقطاب المغنطيسي (magnetic polarization) وتكون شدتها (I) متناسبة مع شدة الحقل المغنطيسي الخارجي (H). هذه الشدة مساوية لقوة القطب بواحدة مساحة السطح العمودي A على الحقل المغنطيسي الخارجي، أو بالعزم المغنطيسي بواحدة الحجم V، أي:

$$I = \frac{p}{A} = \frac{pL}{AL} = \frac{M}{V} \qquad (2\text{-}5)$$



الشكل (2-6). الاستقطاب المغنطيسي في حقل خارجي.

2-5-5- المتأثرية المغنطيسية Magnetic susceptibility:

تكون شدة المغنطيسية المتحرضة (induced magnetization) (I) في المادة متناسبة طرداً مع شدة الحقل المغنطيسي الخارجي المطبق (H) وتعطى بالعلاقة :

$$I = k.\,H \qquad (2\text{-}6)$$

ومنه

$$k = \frac{I}{H} \qquad (2\text{-}7)$$

حيث k ثابت التناسب وتدعى المتأثرية المغنطيسية وهي عدد دون وحدة وتساوي الصفر في المواد غير المغنطيسية.

2-5-6- التحريض المغنطيسي Magnetic induction:

بالإضافة إلى الاستقطاب السطحي للمادة الموضوعة في حقل مغنطيسي خارجي شدته (H) يتحرض داخل المادة حقلاً، تتناسب شدته طرداً مع شدة المغنطيسية (I) بالعلاقة التالية:

$$H' = 4\pi I \qquad (2\text{-}8)$$

يدعى مجموع الحقل الخارجي والحقل الداخلي بالتحريض المغنطيسي ويرمز له بـ (B) ويعطى بالعلاقة التالية:

$$B = H + H' = H + 4\pi I = H + 4\pi k H = H(1 + 4\pi k) \qquad (2\text{-}9)$$

يعطى B في نظام cgs بالغاوص G وفي نظام SI بالتسلا T.

2-5-7- النفوذية المغنطيسية Magnetic permeability:

تعد النفوذية المغنطيسية (μ) قياساً لقابلية مادة لتمرير تدفق مغنطيسي عبرها، وتساوي حاصل قسمة التحريض B على H أي:

$$\mu = \frac{B}{H} = \frac{H(1 + 4\pi k)}{H} = 1 + 4\pi k \qquad (2\text{-}10)$$

تعتمد قيمة μ على الخواص المغنطيسية للوسط الذي توجد فيه الأقطاب المغنطيسية، فتكون كبيرة في المعادن حديدية المغنطة وقريبة من الواحد في الفلزات والصخور وتساوي الواحد في الخلاء أو الهواء، وهي بدون وحدة.

2-6- العناصر والفلزات المغنطيسية:

إن أهم العناصر المغنطيسية في درجات الحرارة العادية هي الحديد والكوبالت والنيكل.

يعد المغنتيت (magnetite) (رمزه الكيميائي Fe_3O_4) من أهم الفلزات المغنطيسية وأشدها مغنطة ودرجة حرارة كوري له 578 درجة مئوية، ومتأثريته المغنطيسية أعلى من أي فلز طبيعي النشأة.

يعد الهيماتيت (haematite) (رمزه الكيميائي αFe_2O_3) من الفلزات المغنطيسية الهامة لكن مغنطيسيته منخفضة ودرجة حرارة كوري له 675 درجة مئوية، ومتأثريته المغنطيسية منخفضة.

ينتج الماغيميت (maghemite) (رمزه الكيميائي γFe_2O_3) ذو المغنطيسية العالية من أكسدة المغنتيت بدرجات الحرارة المنخفضة ودرجة حرارة كوري له 675 درجة مئوية، لكنه شبه مستقر.

من الفلزات الحاملة للمغنطيسية الضعيفة الغوتيت (Goethite) (رمزه الكيميائي FeOOH) ودرجة حرارة كوري له 100 درجة مئوية. وغير مستقر حرارياً، إذ يتفكك بدرجة حرارة حوالي 350 درجة مئوية. وهو فلز ثانوي في الحجر الكلسي وبعض الصخور الرسوبية.

والبيروتيت (Pyrrhotite) فلز كباريتي شائع يتشكل أثناء عملية الدياجينيز للصخر الرسوبي (رمزه الكيميائي $Fe\,S_{1+x}$) حيث $0 \le x \le 1$، عندما $x=0.14$ يتشكل البيروتيت المغنطيسي.

2-7- المتأثرية المغنطيسية في الصخور:

تعد المتأثرية المغنطيسية العامل المميز للصخر من الناحية المغنطيسية، وتعبر عن كمية الفلزات المغنطيسية الموجودة في الصخر ونوعية هذه الفلزات. تقسم المواد حسب متأثريتها المغنطيسية إلى ثلاثة أنواع: